

Dissertação de Mestrado

**UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA PURA E
COM ADIÇÃO DE ARGILA COMO CAMADA DE
BASE EM PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

AUTOR: Antonio Donizetti de Resende

ORIENTADOR: Prof. Dr. Gilberto Fernandes (UFOP)

ESCOLA DE MINAS / UFOP

MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA UFOP

OURO PRETO - NOVEMBRO DE 2010

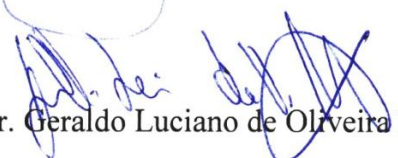
UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA PURA E COM ADIÇÃO DE ARGILA COMO CAMADA DE BASE EM PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**, área de concentração em *Geotecnia de Pavimentos*.

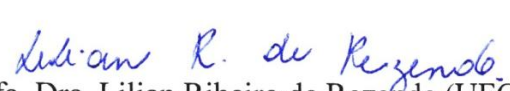
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 17 de novembro de 2010, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof. Dr. Gilberto Fernandes (Orientador /UFOP)



Prof. Dr. Geraldo Luciano de Oliveira Marques (UFOP)



Profa. Dra. Lilian Ribeiro de Rezende (UFG)

R433u Resende, Antonio Donizetti de.

Utilização da escória de aciaria pura e com adição de argila como camada de base em pavimentação rodoviária [manuscrito] / Antonio Donizetti de Resende - 2010.

xlvii, 210f.: il., color.; grafs.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Fernandes.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. NUGEO.

Área de concentração: Geotecnia de Pavimentos.

1. Geotecnia - Pavimentos - Teses. 2. Pavimentos de asfalto - Teses.
3. Escória - Teses. 4. Argila - Teses. 5. Estradas - Construção - Teses.
I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 625.855:628.54

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

“Há uma perpétua troca de serviços entre a ciência e o empirismo; muitas vezes a função da primeira consiste em formalizar o que a segunda descobriu.”

Eduard Douwes Dekker (Multatuli).

DEDICATÓRIA

Dedico ao maravilhoso Deus, que tanto tem socorrido e protegido-me.

A todos os meus familiares, especialmente, meu pai: Antônio Martins de Resende (in memoriam), minha mãe: Salete Maria Morais Resende, meus irmãos: Pedro, Ana Maria, Maria Aparecida, Maria Auxiliadora, Eulécia e Alessandra e meus sobrinhos: Anna Paula e Celso Augusto, muito importantes, em minha trajetória de vida.

A todos os meus amigos, colegas de trabalho (funcionários do DER/MG e demais parceiros internos e externos), aos meus companheiros de universidade, aos nossos valorosos e devotados professores e à Adv. Edilene A. Barbosa sempre presentes e solidários.

Ao DER/MG, FAPEMIG, UFOP/NUGEO, UFRJ/COPPE e a USIMINAS; entidades contributivas, que propiciaram-me concluir este importante e gratificante desafio, cursar o mestrado profissional em engenharia geotécnica, ênfase em pavimentação.

Aos companheiros atuantes nas diversas áreas do sistema viário terrestre, responsáveis pela concepção e elaboração dos projetos, implantação e execução das obras, manutenção, operação das vias, apoio e logística do transporte.

Finalizando, dedico também, a todos aqueles que de maneira direta ou indireta, contribuem, ou contribuíram, com o avanço e o aprimoramento da área de pavimentação rodoviária, ferroviária e urbana.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pela vida, pela saúde e por seu imensurável amor por toda a humanidade.

A todos os meus familiares, representados por minha mãe, Salete Maria de Moraes Resende, pelo incentivo, compreensão e suporte emocional.

Ao DER/MG - Diretor Geral: Eng. José Élcio Santos Montese, pelas relevantes contribuições, especialmente as prestadas pela 40^a CRG (Eng. Níveo Pinto) e pelo Laboratório (M.Sc. Eng. José Flávio Nascimento).

À UFOP/NUGEO e a todos os meus professores, representados pelo Prof. Dr. Romero César Gomes, pelo empenho e requintada didática, proporcionando-nos aquisição de valiosos conhecimentos através de uma efetiva e profícua transferência do saber.

Ao meu orientador: Prof. Dr. Gilberto Fernandes, pelos importantes esclarecimentos, invariavelmente, oportunos e saneadores.

Aos companheiros de trabalho, representados pelo M.Sc. Eng. Cláudio A. Valadão Albemaz pela cordialidade e imprescindíveis subsídios técnicos; através do Eng. Rogério Antônio Alves Pedrosa, agradeço também, a todos os colegas mestrandos.

À UFRJ/COPPE, especialmente a Prof. Dra. Laura Maria Goretti Motta e a M.Sc. Eng^a. Mariluce de Oliveira Ubaldo pela relevante contribuição com os ensaios laboratoriais.

À USIMINAS - Presidente: Adm. Emp. Wilson Nélio Brumer e particularmente ao Sr. Francisco O. Machado pelo fornecimento das amostras de agregados para os ensaios.

À Adv. Edilene A. Barbosa e a todos que colaboraram e ajudaram-me no decorrer deste curso de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, área de concentração: Pavimentação.

RESUMO

Um dos principais problemas defrontados pela engenharia rodoviária atualmente, consiste na escassez de materiais naturais em condições adequadas para utilização nas obras de implantação e pavimentação. Entretanto, paradoxalmente, as siderúrgicas geram diversos resíduos, constituindo passivos ambientais que necessitam urgentemente serem mitigados. Desta forma, pode-se equacionar ambos os problemas, utilizando-se, por exemplo, à escória de aciaria na confecção da camada de base rodoviária, onde a mesma, passa de um resíduo indesejável, a um valioso coproduto. Desta maneira, através deste estudo, visando comprovar a eficácia da citada utilização da escória de aciaria, analisou-se o comportamento geotécnico do pavimento da rodovia MG-232 - trecho: Mesquita a Santana do Paraíso, integrante da malha rodoviária do Estado de Minas Gerais, com vinte quilômetros de extensão. Este trecho rodoviário é constituído por seis segmentos homogêneos, onde o pavimento é composto por revestimento em pré-misturado a frio e tratamento superficial duplo e camadas de base estabilizadas granulometricamente, em cascalho, escória de aciaria pura e com adição de argila. Desta forma, para subsidiar os estudos, foram coletadas algumas amostras da escória de aciaria diretamente da pilha de depósito na siderúrgica USIMINAS, na cidade de Ipatinga – MG. Sequencialmente, amostragens representativas dos materiais que compõem todos os referidos seis segmentos, foram extraídas de todas as camadas do pavimento e também do subleito, que analisado pelo método Miniatura Compactado Tropical, mostrou-se, laterítico argiloso – LG'. Implementou-se ainda, estudos e caracterização físico-química e mineralógica dos diversificados materiais, componentes da estrutura deste pavimento rodoviário. Por intermédio da viga Benkelman, efetivou-se em todo o trecho, levantamentos das bacias de deflexão e dos raios de curvatura. O módulo de resiliência foi definido por retroanálise e ratificado pelo laboratório, concluindo os estudos promoveu-se um dimensionamento para vida útil de dez anos. A base em escória de aciaria analisada apresentou um bom comportamento, principalmente quando comparada aos resultados exibidos pela base confeccionada em cascalho. Demonstrando assim, a eficácia da utilização da escória de aciaria Linz-Donawitz nesta referida camada dos pavimentos rodoviários, tanto pura, quanto com adição de argila.

Palavras-chave: escória; aciaria; pavimento.

ABSTRACT

One of the major problems in the road engineering construction nowadays consists in the shortage of natural materials in adequate conditions for utilization at implantation and paving jobs. However, paradoxically, the steel industries generate diverse residues, which constitutes liable environmental materials that need urgently to be mitigated. This way, we can equate both problems, using, for example, the steel mill slag in the confection of road base layer, where this same residue goes from an undesirable material to a valuable co-product. This way, based in studies, focusing to prove the efficiency of such utilization of the steel mill slag, it was analyzed the geotechnical behavior of the pavement on the road MG-232 - stretch: Mesquita to Santana do Paraíso, part of the Minas Gerais State highways system, with twenty kilometers of extension. This road section is formed by six segments homogeneous, where the pavement is composed by a covering in a cold pre-mix and double superficial treatment, with stabilized granulated layers, gravel fill, pure steel mill slag and with the addition of argyle. This way, to subsidize the studies, it has been collected samples from the steel mill slag, directly from the piles at the deposit within USIMINAS steel plant, in the city of Ipatinga, Minas Gerais. Following that, samples representing the materials that form all the represented six segments pavements, were extracted from all of those layers and also from the sub grade, which was analyzed by the Miniature Compacted Tropical Method, showing it as lateritic clayey - LG'. Also, it has been implemented studies and characterization physiochemical and mineralogical for the diversified materials, components of the road pavement structure. Through Benkelman beam, it was done throughout the whole road stretch, detailed data information from the bay deflections and curvature rays. The resilience module was defined by retro-analysis and ratified by the laboratory studies conclusion, it was promoted a ten years utility life dimension. The road foundation done with steel mill slag in analysis presented a good behavior, mainly when compared to the results showed for the base foundation composed with gravel fill. Showing this way the efficiency of the steel mill slag utilization from Linz-Donawitz on this referred road pavement layer, pure, or with the addition of clay materials.

Key-words: slag; steel mill; pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Figura 1.1 – Rodovia MG-232 – Confecção da camada de base em escória de aciaria - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - Estaca 46 (DER/MG, 2006).....	5
Figura 1.2 - Base de escória + 20% de argila em execução - MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - est. 424 (ACERVO TÉCNICO 40 ^a CRG - DER/MG, 2007)...	6
Figura 2.1 – Forno primitivo tipo poço fechado (UNISINOS, 2003).....	9
Figura 2.2 - Forno primitivo tipo forja catalã (UNISINOS, 2003).....	10
Figura 2.3 - Alto-Forno moderno com os principais equipamentos periféricos (PEREIRA MACHADO, 2006).....	11
Figura 2.4 - Aplicação da escória de aciaria no Brasil (CASELATO, 2004).....	16
Figura 2.5 - Aplicação da escória de aciaria nos demais países (CASELATO, 2004).	16
Figura 2.6 - Aplicação da escória de aciaria na Europa (SILVA, 2003).....	17
Figura 2.7 – Fluxo simplificado de produção do aço (IBS, 2008).....	24
Figura 2.8 – Ciclo de refino do aço com reaproveitamento da sucata (IBS, 2008).....	26
Figura 2.9 - Fluxograma de produção - Usina integrada (MOREIRA & LANA, 2003).....	25
Figura 2.10 – Esquema de planta siderúrgica - Integrada (forno LD) - Semi- Integrada (forno EAF) utilizando-se forno tipo panela para redução da escória de aciaria (MASUERO et al., 2004 <i>apud</i> POLESE, 2007).....	28
Figura 2.11 - Fluxograma da fabricação do aço e geração da escória de aciaria LD ou BOF em usina integrada utilizando conversores a oxigênio (CST/ARCELORMITTAL, 2008).....	29
Figura 2.12 - Forno de Energia Otimizada – EOF (MINITECNOLOGIAS, 2009).....	30
Figura 2.13 (a), (b), (c) e (d) – Etapas: (1, 2, 3 e 4) referente ao ciclo de operações do refino do aço e geração da escória de aciaria pelo método do convertedor a oxigênio – LD (MOREIRA &LANA, 2003).....	31
Figura 2.14 – Detalhe do conversor a oxigênio durante o sopro supersônico e as reações químicas geradas na operação (MOREIRA &LANA, 2003).....	32
Figura 2.15 (a) e (b) - Etapas (5 e 6) referente ao ciclo de operações do refino do aço e geração da escória de aciaria pelo método do convertedor a oxigênio – LD (MOREIRA &LANA, 2003).....	33

Figura 2.16 - Fluxograma da fabricação do aço e geração da escória de aciaria elétrica EAF em uma usina semi-integrada.....	34
Figura 2.17 - Fluxograma da fabricação do aço e geração da escória de aciaria elétrica EAF em uma usina integrada.....	34
Figura 2.18 - Cestão de Carregamento de Sucata (SALES, 2005).....	35
Figura 2.19 – Estrutura física do forno EAF (TASHIRO, 2007).....	35
Figura 2.20 – Injeção de oxigênio forno EAF (METSOL et al., 2007 <i>apud</i> POLESE, 2007).....	35
Figura 2.21 - Fusão em Forno Elétrico - EAF (SALES, 2005).....	36
Figura 2.22 - Forno panela (CASTELO BRANCO, 2004).....	36
Figura 2.23 - Cambamento (CST/ARCELORMITTAL/TUBARÃO, 2009).....	40
Figura 2.24 – Resfriamento (CST/ARCELORMITTAL/TUBARÃO, 2009).....	40
Figura 2.25 – Reciclagem através de eletroímã.....	41
Figura 2.26 – Britagem da escória de aciaria.....	41
Figura 2.27 - Escória de aciaria britada estocada em pilhas.....	41
Figura 2.28 (a), (b), (c) e (d) - Insucessos devido expansibilidade da escória de aciaria (GONTIJO, 2006 <i>apud</i> FREITAS, 2007).....	43
Figura 2.29 – Cura da escória de aciaria por injeção de vapor d’água (ABM, 2004).....	44
Figura 2.30 – Temperatura na pilha de escória de aciaria (ABM, 2004).....	45
Figura 2.31 - Equipamento para ensaio de expansão em água (JIS A 5015, 1992 <i>apud</i> PENA, 2004).....	46
Figura 2.32 - Autoclave para cura da escória de aciaria com vapor d’água no Japão (ABM, 2004).....	46
Figura 2.33 – Cura por adição de sílica à escória de aciaria (ABM, 2004).....	47
Figura 2.34 Cura acelerada - umedecimento (ARCELORMITTAL, 2008).....	49
Figura 2.35 – Cura acelerada - aeração (ARCELORMITTAL, 2008).....	49
Figura 2.36 - Agulha de Le Chatelier (PENA, 2004).....	50
Figura 2.37– Comparativo entre a cura pelo método acelerado (ACERITA) e a cura da escória sem tratamento (ARCELORMITTAL, 2008).....	52
Figura 2.38 – Equipamento do Steam Test (MOTZ & GEISELER, 2001 <i>apud</i> RODRIGUES, 2007).....	54

Figura 2.39 – Vista aérea da pista do aeroporto de Vitória ES - Camada de base em escória de aciaria (PORTAL DO GOVERNO ES, 2010).....	56
Figura 2.40 – Vista aérea do complexo urbano em Dubai nos Emirados Árabes Unidos com a pavimentação executada utilizando-se a escória de aciaria (RAMOS et al., 2007).....	57
Figura 2.41– Confeção da camada de base de um pavimento rodoviário, executada em escória de aciaria LD (ACERVO DO DER/MG-40ª CRG, 2006).....	57
Figura 2.42 – Utilização da escória de aciaria em lastros ferroviários. (CST <i>apud</i> ROSSI, 2003).....	58
Figura 2.43 (a), (b) e (c) - Pista experimental circular em escória de aciaria DNIT, 1980).....	61
Figura 2.44 (a) e (b) – Simulador de tráfego da UFRGS/DAER-RS (BERNUCCI et al., 2007).....	61
Figura 2.45 (a) e (b) - Simulador móvel tipo Heavy Vehicle Simulator (BERNUCCI, 2007).....	62
Figura 2.46 – Depósito de escória em pilha.....	65
Figura 2.47 (a) e (b) - Estrutura dos pavimentos analisados - (a) estrutura do pavimento do acesso a Ipaba MG - (b) estrutura do pavimento da BR-381, lote 15 (ROHDE, 2002).....	66
Figura 2.48 - Equipamento para o ensaio Triaxial de Carga Repetida (DNER, 1994).....	73
Figura 2.49 - Módulo de resiliência versus tensão confinante (DNER, 1994).....	74
Figura 2.50 - Módulo de resiliência versus tensão desvio (DNER, 1994).....	75
Figura 2.51 - Equipamento para ensaio de Compressão Diametral de Carga Repetida (DNER, 1994).....	76
Figura 2.52 - Posicionamento da viga Benkelman e a prova de carga (DNER, 1998). 78	
Figura 2.53 - Esquema da bacia de deformação (deformada) (DNER, 1998).....	79
Figura 3.1 (a) e (b) – Amostras coletadas in loco na MG-232 - trecho: Santana do Paraíso a Mesquita - material de base, sub-base, reforço do subleito e do subleito.....	82
Figura 3.2 (a) e (b) – Amostras de escória de aciaria LD oriundas das pilhas de depósito da USIMINAS em Ipatinga MG utilizadas para os ensaios de PTM-130, DRX e	

MEV.....	83
Figura 3.3 – Material de subleito coletado na MG-232 - trecho: Mesquita - Santana do Paraíso.....	86
Figura 3.4 – Fração da amostra de escória de aciaria passante na peneira 2,0 mm sendo destorroado com a mão de gral no almofariz.....	88
Figura 3.5 - Fração da amostra seca ao ar retida na peneira de 2,0 mm, sendo lavada para eliminação de material fino ainda aderente as partículas deste material.....	89
Figura 3.6 – Representação gráfica dos limites de Atterberg.....	92
Figura 3.7 – Fases dos ensaios de limites de liquidez e plasticidade para posterior determinação do índice de plasticidade dos materiais estudados solo e escória de aciaria.....	92
Figura 3.8 – Fases do ensaio de ISC realizado neste estudo com as amostras de solo e de escória de aciaria.....	93
Figura 3.9 - Máquina Los Angeles utilizada para realização dos ensaios deste estudo.....	94
Figura 3.10 - Figura 3.10 (a) e (b) – Estufa capaz de manter a faixa térmica de trabalho entre 105 °C – 110 °C utilizada para o ensaio de durabilidade do agregado escória de aciaria.....	98
Figura 3.11 – Gráfico para cálculo do índice de grupo (SOUZA, 1980).....	100
Figura 3.12 – Gabaritos utilizados no ensaio de Índice de Lamelaridade.....	101
Figura 3.13 – Gráfico para determinação da taxa de expansão da escória de aciaria (DNER, 1982).....	106
Figura 3.14 - Nomograma de classificação MCT (NOGAMI E VILLIBOR, 1995 <i>apud</i> SOUZA, 2007).....	111
Figura 3.15 (a) e (b) - Difratômetro de Raios-X do Departamento de Geologia da UFOP.....	113
Figura 3.16 – Amostras de escória utilizada no ensaio DRX analisada pelo Laboratório de Geologia da UFOP.....	115
Figura 3.17 – Microscópio eletrônico de varredura do Laboratório de Geologia da UFOP.....	116
Figura 3.18 (a) e (b) – Detalhamento de funcionamento do microscópio eletrônico de varredura do Laboratório de Geologia da UFOP.....	117

Figura 3.19 – Amostras de escória de aciaria da USIMINAS dispostas em pastilhas utilizadas no ensaio realizado pelo Departamento de Geologia da UFOP.....	117
Figura 3.20 - Equipamento utilizado para metalização das amostras de escória de aciaria LD da USIMINAS para o ensaio de MEV realizado no DEGEO/UFOP.....	118
Figura 3.21 – Amostras de escória de aciaria LD da USIMINAS introduzidas na câmara do microscópio eletrônico de varredura do DEGEO/UFOP.....	118
Figura 3.22 (a) e (b) – Fases do ensaio Triaxial Dinâmico de Carga Repetida no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.....	122
Figura 3.23 – Deformada e raio de curvatura (DNER, 1998).....	126
Figura 3.24 – Variação das deformações específicas horizontais geradas na face inferior do reforço (ALBERNAZ, 2010).....	132
Figura 3.25 - Deformações verticais de compressão no topo do subleito (ALBERNAZ, 2010).....	132
Figura 3.26 – Figura 3.26 – Critério de dimensionamento com e especificação das espessuras válidas, não válidas e intervalo final de espessura permitida.....	133
Figura 3.27 – Intervalos finais de espessuras permitidas.....	134
Figura 4.1 - Faixas granulométricas das amostras dos materiais utilizado na base da MG 232 – trecho: Mesquita – S. do Paraíso - Faixas D e B - Norma ES 303 (DNER, 1997).....	138
Figura 4.2 - Faixas granulométricas das amostras dos materiais utilizados na base (após processo de compactação) - MG 232 – trecho: Mesquita – S. do Paraíso - Faixas D e C – Norma ES 303 (DNER, 1997).....	138
Figura 4.3 – Granulometria representativa às amostras da escória de aciaria pura e com adição de 20% de argila utilizada para confecção da base da MG 232 – trecho: Mesquita – Santana do Paraíso - FAIXA B – Norma ES 303 (DNER, 1997).....	139
Figura 4.4 - Granulometria representativa, após compactação - amostras da escória de aciaria pura e com adição de 20% de argila utilizada para confecção da base da MG 232 – trecho: Mesquita – Santana do Paraíso - FAIXA C – ES 303 (DNER, 1997).....	139
Figura 4.5 – Granulometria do agregado utilizado para confecção do PMF, revestimento de subtrecho da MG 232 – trecho: Mesquita – Santana do Paraíso e Faixa granulométrica utilizada pelo DER/MG para PMF (DER/MG, 2009).....	147
Figura 4.6 - Registros difratométricos da escória de aciaria (DEGEO/UFOP, 2009)..	149

Figura 4.7 - Fotomicrografias - amostras RE1 ampliadas: (a) 100 x; (b) 300 x; (c) 500 x; (d) 800 x; (e) 1200 x (DEGEO/UFOP, 2009).....	150
Figura 4.8 – RE1_4 (ddp = 20,0 kV) (DEGEO/UFOP, 2009).....	150
Figura 4.9 - Análise pontual da amostra RE1_4 da escória de aciaria LD (DEGEO/UFOP, 2009).....	151
Figura 4.10 - Fotomicrografias - amostras RE2 ampliadas: (a) 100 x; (b) 300 x; (c) 500 x; (d) 800 x; (e) 1200 x (DEGEO/UFOP, 2009).....	152
Figura 4.11 – RE2_2 (ddp = 20,0 kV) (DEGEO/UFOP, 2009).....	152
Figura 4.12 - Análise gráfica pontual da amostra RE2_2 da escória de aciaria LD (DEGEO/UFOP, 2009).....	153
Figura 4.13 – RE2_5 (ddp = 20,0 kV) (DEGEO/UFOP, 2009).....	154
Figura 4.14 - Análise gráfica pontual da amostra RE2_5 da escória de aciaria LD (DEGEO/UFOP, 2009).....	154
Figura 4.15 - Fotomicrografias Amostra RE3 ampliadas: (a) 100 x; (b) 300 x; (c) 500 x; (d) 800 x; (e) 1200 x (DEGEO/UFOP, 2009).....	155
Figura 4.16 – RE3_2 (ddp = 20,0 kV) (DEGEO/UFOP, 2009).....	156
Figura 4.17 - Análise gráfica pontual da amostra RE3_2 da escória de aciaria LD (DEGEO/UFOP, 2009).....	156
Figura 4.18 – RE3_5 (ddp = 20,0 kV) (DEGEO/UFOP, 2009).....	157
Figura 4.19 - Análise gráfica pontual da amostra RE3_5 da escória de aciaria LD (DEGEO/UFOP, 2009).....	158
Figura 4.20 - Subleito da MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - Estaca 424 (ACERVO TÉCNICO 40ª CRG - DER/MG, 2007).....	168
Figura 4.21 – Módulos de resiliência obtidos em campo pela retroanálise (DER/MG, 2009).....	169
Figura 5.1 – Revestimento em PMF - Rodovia MG 232 – Mesquita/Santana do Paraíso (ACERVO TÉCNICO 40ª CRG - DER/MG, 2007).....	182
Figura 5.2 – Espessuras do CBUQ – Est. 1 – SH-1E - Est.: 0 – 49 (DER/MG, 2010).183	
Figura 5.3 - Espessuras do CBUQ – Est. 4 – SH-1D - Est.: 0 – 49 (DER/MG, 2010). 184	
Figura 5.4 - Espessuras do CBUQ – Est. 364 – SH-4D - Est.: 362 - 533 (DER/MG, 2010).....	184
Figura 5.5 - Espessuras do CBUQ – Est. 367 – SH-4E - Est.: 362 - 533 (DER/MG,	

2010).....	185
Figura 5.6 - Espessuras do CBUQ – Est. 535 – SH-5E - Est.: 533 - 784 (DER/MG, 2010).....	185
Figura 5.7 - Espessuras do CBUQ – Est. 538 – SH-5D - Est.: 533 - 784 (DER/MG, 2010).....	186
Figura 5.8 - Espessuras do CBUQ – Est. 709 – SH-5E - Est.: 533 - 784 (DER/MG, 2010).....	186
Figura 5.9 - Espessuras do CBUQ – Est. 718 – SH-5D - Est.: 533 - 784 (DER/MG, 2010).....	187
Figura 5.10 - Espessuras do CBUQ – Est. 192 – SH-3D - Est.: 192 - 362 (DER/MG, 2010).....	189
Figura 5.11 - Espessuras do CBUQ – Est. 361 – SH-3E - Est.: 192 - 362 (DER/MG, 2010).....	189
Figura 5.12 - Espessuras do CBUQ – Est. 787 – SH-6E - Est.: 784 - 1000 (DER/MG, 2010).....	190
Figura 5.13 - Espessuras do CBUQ – Est. 790 – SH-6D - Est.: 784 - 1000 (DER/MG, 2010).....	190
Figura 5.14 - Espessuras do CBUQ – Est. 961 – SH-6E - Est.: 784 - 1000 (DER/MG, 2010).....	191
Figura 5.15 - Espessuras do CBUQ – Est. 970 – SH-6D - Est.: 784 - 1000 (DER/MG, 2010).....	191

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Extensão da malha rodoviária nacional – PNV/2010 (DNIT, 2010).....	4
Tabela 2.1 - Tipos de fornos utilizados por algumas das principais siderúrgicas brasileiras (IBS, 2002 <i>apud</i> ROHDE, 2002).....	15
Tabela 2.3 – Campo de aplicação das escórias de diferentes origens (BRUN & YUAN, 1994 <i>apud</i> GEYER 2001).....	17
Tabela 2.4 – Relação das quatro maiores empresas produtoras de minério de ferro do mundo (SINFERBASE et al., 2009 <i>apud</i> IBRAM, 2009).....	18
Tabela 2.5 – Relação das maiores empresas produtoras de minério de ferro do Brasil em 2008 (SINFERBASE et al., 2009 <i>apud</i> IBRAM, 2009).....	19
Tabela 2.6 - Percentual total da produção de minério de ferro brasileira distribuído por Estado em 2008 (SINFERBASE et al., 2009 <i>apud</i> IBRAM, 2009).....	19
Tabela 2.7 – Produção brasileira de aço bruto: jan. 2008 – Nov. 2008 (IBS, 2008)....	20
Tabela 2.8 – Produção Latino-Americana de aço bruto: jan. 2008 - out. 2008 (ILAFA, 2008 <i>apud</i> IBS, 2008).....	21
Tabela 2.9 – Produção mundial de aço bruto - jan 2008 - out 2008 (IISI, 2008 <i>apud</i> IBS, 2008).....	21
Tabela 2.10 – Produção mundial de aço bruto em 2008 (VALE S.A., 2009).....	23
Tabela 2.11 – Relação das dez maiores empresas produtoras de aço bruto no mundo em 2008 (ABM, 2008).....	24
Tabela 2.12 – Distribuição da fabricação brasileira de aço bruto por processo em 2008 (IBS, 2008).....	26
Tabela 2.13 – Comparativo dos percentuais médios dos principais compostos químicos da escória de aciaria no Brasil, Japão e Alemanha (IBS, 1998 <i>apud</i> LANA, 2003)....	37
Tabela 2.14 - Composição química da escória de aciaria LD (IBS, 1999 <i>apud</i> OLIVEIRA, 2006).....	38
Tabela 2.15 – Composição química da escória de aciaria EAF (IBS, 1999 <i>apud</i> OLIVEIRA, 2006).....	39
Tabela 2.16 – Características das espécies químicas isoladas da escória de aciaria e as suas respectivas variações volumétricas após hidratação (WEAST, 1971 <i>apud</i> MACHADO 2000).....	42

Tabela 2.17 - Parábola de Fuller (EN-1744-1/98 <i>apud</i> RODRIGUES, 2007).....	53
Tabela 2.18 – Ensaio de lixiviação - escória de aciaria LD/USIMINAS (SOUZA, 2007).....	71
Tabela 2.19 – Ensaio de solubilização - escória de aciaria LD/ USIMINAS (SOUZA, 2007).....	71
Tabela 2.20 – Faixa granulométrica dos agregados (solos, escória, etc.)para base em função do número N (DNER-ES 303, 1997).....	80
Tabela 3.1 – Boletim de sondagem, descrição da estrutura da rodovia, relação dos furos de sondagem e a respectiva identificação e localização das amostras (DER, 2009)...	85
Tabela 3.2 – Classificação de solos TRB "Transportation Research Board" (DNER, 2006).....	91
Tabela 3.3 – Energias utilizadas pelo DNER E DER/MG (DER/MG, 1982).....	104
Tabela 3.4 – Classificação MCT - propriedades típicas dos grupos de solos (DNER, 1994).....	112
Tabela 3.5 – Estimativa do MR da mistura asfáltica (método do IA) para a rodovia MG 232, Mesquita / Santana do Paraíso - estaca 0 a 1000 - 20 km (IA <i>apud</i> ALBERNAZ, 2010).....	129
Tabela 3.6 - Projeção do VMDAT e do número N para a MG 232 – Mesquita/Santana do Paraíso (DER/MG, 2010).....	130
Tabela 3.7 - Esforços limites de fadiga e deformação permanente – Número USACE (SYSBEINC - BUZATTI, 1998).....	131
Tabela 4.1 – Estudos geotécnicos - granulometria, LL, IP, IG e classificação TRB - materiais granulares - MG 232 - Mesquita/S. do Paraíso (DER, 2009).....	136
Tabela 4.2 - Estudos geotécnicos - granulometria, w_L , I_P , IG e classificação TRB dos materiais que constituem as camadas de base do pavimento da MG 232 - trecho Mesquita/Santana do Paraíso, após compactação (DER, 2009).....	137
Tabela 4.3 – Estudos geotécnicos dos solos e da escória de aciaria – Resultados de densidade real do agregado miúdo, expansão CBR e ISC - Rodovia MG 232 - Mesquita – Santana do Paraíso (DER, 2009).....	141
Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de abrasão Los Angeles da escória de aciaria – camada de base da MG 232 – trecho: Mesquita – S. do Paraíso (DER/MG, 2009).....	142
Tabela 4.5 – Média dos resultados dos ensaios de densidade real do agregado miúdo	

distribuído por camadas e respectivos agregados (DER/MG, 2009).....	142
Tabela 4.6 – Absorção de água pela escória de aciaria (DER/MG, 2009).....	143
Tabela 4.7 – Resultado do ensaio de índice de forma do agregado de escória de aciaria – método do DNER-ME 086/94 (DER/MG, 2009).....	143
Tabela 4.8 – Resultado do ensaio do índice de lamelaridade do agregado de escória de aciaria método DER/MG (DER/MG, 2009).....	144
Tabela 4.9 – Extração de betume de mistura asfáltica usinada (PMF) (DER/MG, 2009).....	145
Tabela 4.10 - Densidade aparente do corpo de prova "in situ" (PMF) - MG 232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso (DER, 2009).....	145
Tabela 4.11 – Granulometria após extração de betume do PMF – MG-232 – Mesquita/Santana do Paraíso (DER/MG/2009).....	146
Tabela 4.12 – Faixa granulométrica do DER/MG para PMF (DER/MG, 2009).....	146
Tabela 4.13 - Resultados do ensaio PTM-130 - Determinação da expansibilidade da escória de aciaria LD da USIMINAS - Ipatinga MG - Utilizada na camada de base da Rodovia MG-232 - Trecho: Mesquita / Santana do Paraíso (DER, 2009).....	148
Tabela 4.14 – RE1_4 - Weight (peso) % (DEGEO/UFOP, 2009).....	151
Tabela 4.15 – RE1_4 - Compound (composto) % (DEGEO/UFOP, 2009).....	151
Tabela 4.16 – RE2_2 - Weight (peso) % (DEGEO/UFOP, 2009).....	153
Tabela 4.17 – RE2_2 - Compound (composto) % (DEGEO/UFOP, 2009).....	153
Tabela 4.18 – RE2_5 - Weight (peso) % (DEGEO/UFOP, 2009).....	155
Tabela 4.19 – RE2_5 - Compound (composto) % (DEGEO/UFOP, 2009).....	155
Tabela 4.20 – RE3_2 - Weight (peso) % (DEGEO/UFOP, 2009).....	157
Tabela 4.21 – RE3_2 - Compound (composto) % (DEGEO/UFOP, 2009).....	157
Tabela 4.22 – R3_5 - Weight (peso) % (DEGEO/UFOP, 2009).....	158
Tabela 4.23 – R3_5 - Compound (composto) % (DEGEO/UFOP, 2009).....	158
Tabela 4.24 - Análise química por espectrometria de fluorescência de raios-x e espectrometria de absorção atômica (LDCM/SENAI/SC, 2009).....	160
Tabela 4.25 – Análise química qualitativa (LDCM/SENAI/SC, 2009).....	160
Tabela 4.26 – Fase cristalina da escória de aciaria LD (SETEM/CDTN/CNEN, 2009).....	160
Tabela 4.27 - Resistência à tração em misturas betuminosas (COPPE/UFRJ, 2009)..	161

Tabela 4.28 – Modulo de resiliência em solos - Ensaio triaxial dinâmico (COPPE/UFRJ, 2009).....	162
Tabela 4.29 – Resultados do ensaio de compressão diametral (COPPE/UFRJ, 2009).	163
Tabela 4.30 – Bacias de deformações - MG 232, estacas: 0 a 1000 (DER/MG, 2009).....	164
Tabela 4.31 – Retroanálise - Rodovia MG 232: SH-1 – Estacas: 0 a 49 (DER/MG, 2009).....	165
Tabela 4.32 - Retroanálise - Rodovia MG 232, estacas: 49 a 192 (DER/MG, 2009).....	165
Tabela 4.33 - Retroanálise – Rodovia: MG 232, estacas: 192 a 362 (DER/MG, 2009).....	166
Tabela 4.34 - Retroanálise – Rodovia: MG 232, estacas: 362 a 533 (DER/MG, 2009).....	166
Tabela 4.35 - Retroanálise – Rodovia: MG 232, estacas: 533 a 784 (DER/MG, 2009).....	167
Tabela 4.36 - Retroanálise – Rodovia: MG 232, estacas: 784 a 1000 (DER/MG, 2009).....	167
Tabela 4.37 – Módulos de resiliência - Retroanálise (DER/MG, 2009).....	169
Tabela 4.38 – Análise mecânica - Retroanálise – SH-1 - FE - Estaca 1 (DER/MG, 2010).....	171
Tabela 4.39 – Análise mecânica - Retroanálise – SH-4 - FE - Estaca 1 (DER/MG, 2010).....	172
Tabela 4.40 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-4 - FD - Est. 364 (DER/MG, 2010).....	173
Tabela 4.41 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-4 - FE - Est. 367 (DER/MG, 2010).....	173
Tabela 4.42 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-5 - FE - Est. 535 (DER/MG, 2010).....	174
Tabela 4.43 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-5 - FD - Est. 538 (DER/MG, 2010).....	174
Tabela 4.44 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-5 - FE - Est. 709 (DER/MG, 2010).....	175

Tabela 4.45 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-5 - FD - Est. 718 (DER/MG, 2010).....	175
Tabela 4.46 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-3 - FD - Est. 192 (DER/MG, 2010).....	176
Tabela 4.47 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-3 - FE - Est. 361 (DER/MG, 2010).....	177
Tabela 4.48 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-6 - FE - Est. 787 (DER/MG, 2010).....	177
Tabela 4.48 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-6 - FE - Est. 787 (DER/MG, 2010).....	178
Tabela 4.50 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-6 - FE - Est. 961 (DER/MG, 2010).....	178
Tabela 4.51 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-6 - FD - Est. 970 (DER/MG, 2010).....	179

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1.....	73
Equação 2.2.....	74
Equação 2.3.....	74
Equação 2.4.....	75
Equação 2.5.....	75
Equação 2.6.....	75
Equação 2.7.....	76
Equação 2.8.....	77
Equação 2.9.....	79
Equação 2.10.....	80
Equação 2.11.....	80
Equação 3.1.....	89
Equação 3.2.....	96
Equação 3.3.....	97
Equação 3.4.....	99
Equação 3.5.....	108
Equação 3.6.....	109
Equação 3.7.....	111
Equação 3.8.....	113
Equação 3.9.....	122
Equação 3.10.....	123
Equação 3.11.....	125
Equação 3.12.....	126
Equação 3.13.....	126
Equação 3.14.....	128

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

LISTA DE SÍMBOLOS

% - percentagem
km – quilômetro
CaO – Óxido de cálcio (cal)
CaF₂ - Fluorita
MgO – Óxido de magnésio (Periclásio)
O - Oxigênio
≤ - Menor igual
= - Igual
Si - Silício
SiO₂ – Dióxido de silício – (quartzo)
Mn - Manganês
MnO – Óxido de manganês
P – Fósforo
> - Maior
P₂O₅ – Pentóxido de fósforo (anidrido fosfórico)
FeO – Óxido de ferro
Fe₂O₃ – Hematita
CO – Monóxido de carbono
CaF₂ – Fluoreto de cálcio
Al₂O₃ – Óxido de alumínio
Fe – Ferro total
Cr₂O₃ – Óxido de cromo
TiO₂ - Óxido de titânio (anatase)
S – Enxofre
Mg(OH)₂ – Brucita
Ca(OH)₂ – Portlandita
CaCO₃ – Calcita – Aragonita
CaMg(CO₃)₂ - Dolomita

Fe^o – Ferro metálico

FeO – Wustita

< - Menor

≥ - Maior igual

VA, VB, VC e VD - Categorias da escória de aciaria, variando da mais nobre (VA) até a menos nobre (VD) conforme estipula o Comitê Europeu de Normalização

Fe(OH)₂ – Hidróxido de ferro

FeO(OH) – Goetita

Na₂O – Óxido de sódio

K₂O – Óxido de potássio

Cu – Cobre

Cr – Cromo

Hg – Mercúrio

Mo – Molibdênio

Pb – Chumbo

V – Vanádio (quando designar elemento químico)

Zn – Zinco

MPa – Mega Pascal (1.000.000 Pascal) – unidade de pressão/tensão

Ωm – Ohms x metro (unidade de grandeza para a resistividade)

kN – Quilo Newton (1.000 N) – unidade de força

D_o (ou d_o) – Deflexão recuperável máxima do pavimento

t – Tonelada

cm – Centímetro

mm - Milímetro

km/h – Quilômetro por hora

kPa – Quilo Pascal (1.000 Pascal)

m - Metro

kg - Quilograma

dcm³ – Decímetro cúbico

g - Grama

ml - Mililitro

cm³ – Centímetro cúbico

°C – Graus Celsius ou graus centígrados

D001 – Resíduo inflamável

D002 – Resíduo corrosivo

D003 – Resíduo reativo

D004 – Resíduo patogênico

D005 e D052 – Resíduos tóxicos

P – Prefixo utilizado para identificação dos resíduos quanto a toxicidade

U - Prefixo utilizado para identificação dos resíduos quanto a toxicidade

I – Classe de resíduos sólidos perigosos

II – Classe de resíduos sólidos não perigosos

IIA Classe de resíduos sólidos não inertes

IIB – Classe de resíduos sólidos inertes

σ_v – Tensão vertical (módulo de resiliência)

σ_h – Tensão horizontal (módulo de resiliência)

σ_d – Tensão desvio

ϵ_R = Deformação específica resiliente

σ_R - Resistência à tração máxima

ϵ_R – Deformação vertical recuperável ou resiliente

ϵ_v – Deformação específica vertical de compressão

ϵ_3 – Tensão confinante

N – Newton (unidade de força)

F – Carga de ruptura (ensaio de resistência a tração em misturas betuminosas)

D – Diâmetro do CP (ensaio de resistência a tração em misturas betuminosas)

H – Altura do CP (ensaio de resistência a tração em misturas betuminosas)

s – Segundo

F – Carga vertical repetida aplicada diretamente no CP (ensaio de MR)

Δ – Deformação elástica ou resiliente registrada no osciloscópio durante o ensaio triaxial dinâmico para 300, 400 e 500 aplicações de carga F em cm

H_o – Distancia entre alças, em centímetros (ensaio triaxial dinâmico)

k1, k2, k3 e k4 – Parâmetros de resiliência no solo ensaiado (módulo de resiliência)

σ_d - Tensão-desvio

C_1 e C_2 – Parâmetros de resiliência no cálculo de MR para solos siltosos
 μ = Coeficiente de Poisson.
 L_i – Leitura inicial em 0,01 mm
 L_f – Leitura final em 0,01mm
 K – Constante da viga Benkelman (relação entre o maior e o menor braço)
 d_x – Deflexão no ponto "x" considerado (cm)
" – Polegada
 w – Teor de umidade
 P_h – Peso do material úmido
 P_s – Peso do material seco
min – Minuto
 rad.s^{-1} – Radiano por segundo
 A_n – Abrasão Los Angeles da graduação n
 D_{25} – Densidade do agregado miúdo a 25 °C
n - número de frações (ou de tamanhos diretrizes) que compõem a graduação escolhida (ensaio de índice de forma)
a – Massa do picnômetro vazio e seco (ensaio de densidade real do agregado)
b – Massa do picnômetro mais amostra (ensaio de densidade real do agregado)
c – Massa do picnômetro mais amostra e água (ensaio de densidade real do agregado)
d – Massa do picnômetro cheio d'água (ensaio de densidade real do agregado)
 P_1 – Soma das percentagens retidas nos crivos I de todas as frações que compõem a graduação (ensaio de índice de forma)
 P_2 – Soma das percentagens retidas nos crivos II de todas as frações que compõem a graduação (ensaio de índice de forma)
 g/cm^3 – Gramas por centímetro cúbico
P (ou P_{200}) – Porcentagem passando na peneira 200 ou peneira 0,075 mm (ensaio para definição do índice de grupo)
 \pm - Mais ou menos
 a_n – Diferença de altura do CP após 4n golpes (0,01 mm)
 B_n – Número de golpes que resulta da interseção da curva de Mini-MCV com a reta de equações $a_n = 2$ mm
f (Mini-MCV) – Curva de umidade de compactação

A_c – Altura do cilindro padrão
 K_a – Constante de aferição
 A – Altura do corpo-de-prova
 A_n – Altura n do corpo-de-prova
 A_{4n} – Altura do corpo-de-prova após 4n golpes
 H_c – Teor de umidade de compactação
 B – Número de golpes que resulta da interseção da curva de Mini-MCV com a reta de equações $a_n = 2 \text{ mm}$
 P_1 – Perda de massa por imersão
 c (ou c') - Coeficiente (de deformabilidade) angular da parte mais inclinada e retilínea da curva de Mini-MCV 10 (ou teor de umidade que resulta em Mini-MCV10)
 d (ou d') - Coeficiente (de compactação) angular da parte retilínea (ou assimilável de uma reta) mais inclinada do ramo seco da curva de compactação – 10 golpes no ensaio de compactação Mini-MCV
 e (ou e') – Índice ou coeficiente classificatório MCT
 L – Solos de comportamento laterítico
 N – Solos de comportamento não laterítico
 LG' - Grupos de solos lateríticos argilosos
 LA – Grupos de solos lateríticos areias
 LA' - Grupos de solos lateríticos arenosos
 NA – Grupos de solos não lateríticos areias
 NS' - Grupos de solos não lateríticos siltosos
 NA' - Grupos de solos não lateríticos arenosos
 NG' - Grupos de solos não lateríticos argilosos
 k – Caulinita
 q – Quartzo
 m – Micas
 λ – Lambda - Comprimento de onda do feixe incidente (tubo do aparelho)
 θ = Ângulo de difração incidente
 n – Número cardinal não fracionado (ensaio DRX)
 d – Distância dos planos reticulados ou espaçamento interplanar (ensaio DRX)
 kV – Quilo Volts (1.000 Volts)

μA – Micro Ampéres (0,000.0001 Ampér)
 mA - Mili-Ampéres (0,0001 Ampér)
 σ_t – Tensão de tração
 ε_t – Deformação específica horizontal de tração
 T_a – Temperatura do ar na região do trecho em estudo (em graus centígrados)
 T_p – Temperatura média do CBUQ (em graus centígrados)
 Z – Profundidade a partir da superfície do revestimento para cálculo da temperatura
 P – Poise
 Pa.s – Pascal x segundo = (10 P) (unidade de viscosidade)
 γ_{mist} - Densidade da mistura
 γ_{ag} - Densidade do agregado
 γ_b – Densidade do betume
 V_g - Volume global
 V_b – Volume do betume
 V_a – Volume da água
 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ e β_5 – Coeficientes (parâmetros do IA) para cálculo de mistura asfáltica
 M – Coeficiente M - estimativa de deformação específica de tração admissível pelo método do Instituto do Asfalto
 C – Coeficiente C - estimativa de deformação específica de tração pelo método do Instituto do Asfalto
 $\#$ - Peneira
 N (ou N_{10}) – Número de retições do eixo padrão de 80,4 kN para o décimo ano
 γ – Densidade real do agregado miúdo
 W_{ot} - Umidade ótima
 $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ - Talco
 $\text{Fe}_8\text{O}(\text{OH})_{16}\text{Cl}_{13}$ - Akaganeite
 $\text{Al}_2(\text{OH})_3$ – Hidróxido de alumínio
 B_2O_3 – Óxido bórico (anidro bórico ou trióxido de boro)
 Li_2O – Óxido de lítio
 BaO – Óxido de bário (barita calcinada)
 Co_2O_3 – Óxido de cobalto
 Cr_2O_3 – Óxido de cromo

PbO – Óxido de chumbo (monóxido de chumbo)
SrO – Óxido de estrôncio
ZnO – Óxido de zinco (calamina)
ZrO₂+HfO₂ - Óxido de zircônia (badelleyta) + óxido de Háfnio
Ca – Cálcio
Fe – Ferro
Mg – Magnésio
Al – Alumínio
S – Enxofre
Na – Sódio
Cl – Cloro
K – Potássio
Br - Boro
Ti – Titânio
Sr – Estrôncio
Zr – Zircônio
Nb – Nióbio
Ba – Bário
Ca(MgFe) (CO₃)₂ – Ankerita
CaCO₃ - Calcita
Al₂Si₂O₅(OH)₄ – Caolinita
CaFe₂O₄ – Ferrita
Fe₃O₄ – Magnetita
FeCO₃ – Siderita
EYY (ε_t) – Deformação específica horizontal de tração na face inferior do reforço
EYY adm – Deformação específica horizontal de tração, máxima admissível, na face inferior do reforço
EZZ (ε_v) – Deformação específica vertical de compressão no topo do subleito
SZZ adm – Tensão vertical máxima admissível no topo do subleito
SYY – Tensão horizontal na face inferior do recapeamento
SZZ (σ_v) – Tensão vertical no topo do subleito

LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
A.C. – Antes de Cristo
Acerita - Escória reduzida pelo método de cura acelerada por umedecimento
ACESITA – Aços Especiais Itabira
Adimens. – Adimensional
Adm. - Admissível
ADT - Análise Térmica Diferencial
AF – Alto-Forno
Ag. - Agregado
Al. ou al. – Alli (em latim: outros)
Alt. – Altura
AM - Amostra
ANAMEC - Programa computacional de análise mecânica
ArcelorMittal – Conglomerado industrial do setor siderúrgico (fusão da Mittal Steel Company e da Arcelor)
AREA - American Railway Engineering Association
AREMA - American Railway Engineering and Maintenance of Way Association
ASSHO - American Society of State Highway Officials
ASSHTO – Association of State Highway and Transportation of Officials
ASTM - American Society for Testing and Materials
ATD – Análise térmica diferencial
Atual. - Atualizada
BA - Bahia
BD – Bordo direito
BDMG – Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais
Bet. – Betume
BGS – Brita graduada simples
BGTC – Brita graduada tratada com cimento
BH - Belo Horizonte

BHP – BHP Billiton (Mineradora Anglo-Australiana)
BOF - Blast oxygen furnace
BRRC - Belgian Road Research Center (Centro de Investigação Belga de Estradas)
C. - Camada
Caract. – Característica
CBR - California Bearing Ratio
CBUQ – Concreto betuminoso usinado a quente
CD-ROM – Compact disc-rom (disco compacto – leitura)
CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CE – Ceará
CEFET – Centro Federal de Educação e Tecnologia
CEI – Comunidade dos Estados Independentes
CEN – Comitê Europeu de Normatização
CETEC-MG – Centro Tecnológico de Minas Gerais (Fundação pública)
Cia. – Companhia
Class. – Classificação
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
Coef. – Coeficiente
Comb. - Combinado
Comp. - Composto
Compres. - Compressão
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
Cond. – Condicionada ou condicionamento
Consid. - Considerado
COSIGUA – Companhia Siderúrgica da Guanabara
COSIPA – Companhia Siderúrgica Paulista
CP – Corpo de prova
CRR – Road Research Center (Centro de Pesquisa de Estradas Belga)
CSN - Companhia Siderúrgica Nacional
CST - Companhia Siderúrgica de Tubarão
CTCmat – Centro de Tecnologia em materiais
C. Var. – Coeficiente de variação

D – Direita

DAER-RS – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul

DDP ou ddp – Diferença de potencial

Def. – Deformação

Dens. - Densidade

DER/MG - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais

DIN – Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão de Normalização)

Dist. – Distancia

Div. Divisão

DMA-1/DER-MG – Divisão de Materiais n. 1 do DER-MG

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (atual DNIT)

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

D. Padrão – Desvio padrão

DRX – Difração de Raios-X

E – Esquerda

EAF - Electric arc furnace

Ed. ou ed. – Edição

EDS – Espectrômetro a dispersão de energia

Elem. - Elemento

ELSYM5 – Elastic Layered System Model 5 (programa americano para cálculo de tensões e deformações por camadas em um pavimento)

EM - Especificação de material

EN – Norma europeia

ENACOR – Encontro nacional de conservação rodoviária

Ens. - Ensaio

ES – Espírito Santo

ES – Especificação de serviço (quando norma técnica e, precedido por MT-DNER)

Esp. - Espectrometria

Espec. - Específica

Espes. - Espessura

Est. ou est. – Estaca

ET – Especificação técnica
EUA - Estados Unidos da América
Exp. - Expansão
Expansib. - Expansibilidade
F (maiúsculo sem o ponto - F) - Furo
F. ou f. – Folha
F (minúsculo sem o ponto – f) – Índice de forma
FD – Faixa da direita
FE – Faixa da esquerda
Fehs – Forschungsgemeinschaft Eisenhuttenschlacken (Associação de pesquisa para escória de alto-forno, escória de aciaria e outros coprodutos siderúrgicos)
FHWA – Federal Highway Administration (Departamento de transportes da administração rodoviária federal dos EUA)
FP – Fator pista
Fr. – Frequência
FR – Fator regional (climático)
Fur. - Furo
FV – Fator veículo
Guará – Guaratinguetá
Horiz. - Horizontal
HRB - Highway Research Board
HVS – Heavy vehicle simulator (Simulador de veículo grande)
IA – The Asphalt Institute (Instituto do Asfalto - EUA)
IABr – Instituto Aço Brasil
IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais
IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração
IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia
ICDD - International Center for Diffraction Data
IG – Índice de grupo
IISI – International Iron and Steel Institute (Instituto Internacional do Ferro e Aço)
ILAFA - Instituto Latinoamericano del Fierro y el Acero (Instituto Latino-Americano do Ferro e Aço)

Ind. – Indeterminada

Infin. - Infinito

INFOMET – Informações Metalúrgicas

INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial

INTELOG - Inteligência em gestão logística

I_p – Índice de plasticidade

IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias

ISC - Índice de suporte Califórnia

IT – Instrução técnica

INTELOG – Inteligência em Gestão Logística

Intermed. - Intermediário

Internorm. – Internormal

JCPDS - Joint Committee on Powder Diffraction Standards

J F – Juiz de Fora

JFE – JFE Steel Corporation (empresa japonesa do Grupo JFE Holdings)

JIS - Japanese industrial standard

L – Laterítico

LA – Lama asfáltica

Laborat. - Laboratório

LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Laboratório Central de Estradas e Pontes - França)

LD - Lado direito

LD - Linz e Donawitz (quando precedido da expressão: escória de aciaria)

LDCM - Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais

LE - Lado esquerdo

LVDT – Linear variable differential transformer (Sensor para medição de deslocamento linear)

Max. - Máximo

MCT – Miniatura Compactado e Tropical

MCV – Moisture condition value (ensaio criado por Parsons, 1976: valor da condição de umidade)

ME – Método de ensaio

MEC – Ministério da Educação e Cultura
MEV – Microscopia eletrônica de varredura
MG - Minas Gerais
Min. - Mínimo
Mini-MCV – Miniatura-Moisture condition value (valor da condição de umidade)
MINITEC - Minitecnologias
Mist. - Mistura
MMX – Mineração e Metálicos S.A. (empresa do Grupo EBX)
Modif. - Modificada
Mogi – Mogi das Cruzes
MR – Módulo de resiliência
M. Rig. – Módulo de Rigidez do reforço em CBUQ
M. Sc. – Master of Science (Mestre em Ciências)
MT – Método técnico
N. ou n. – Número
NAASRA – National Association of Australian State Road Authorities (Associação Nacional de Autoridades Australianas de Estradas Estaduais)
NBR - Norma brasileira registrada
Nf – Número final
NL – Não laterítico
NP – Não plástico
Nt – Número total
NT – Norma técnica
Obs. - Observação
Of. – Ofício
OH - Open hearth
P. ou p. – Página
P ou p - Para
Pav. - Pavimento
PE – Pernambuco
Pedr - Pedregulho
Pen. - Penetração

Perm. - Permanente
Pinda - Pindamonhangaba
PMF – Pré-Misturado a frio
PNV – Plano nacional viário
Pos. - Posição
PR – Paraná
PRO – Procedimento
Prof. – Profundidade
PTM-130 - Pennsylvania Testing Method (Método de Teste Pensilvânia)
Pub. Publicação
R – Raio de curvatura
RAPv – Reunião Anual de Pavimentação
Recap. - Recapeamento
RE - Resíduo
Reg. - Registro
RETRAN5-L – Programa computacional para dimensionamento de pavimento, pelo método da retroanálise, elaborado por Claudio A. V. Albernaz
Rev. ou rev. - Revisada
RL-1C – Emulsão asfáltica de ruptura lenta, uma vez catiônica
RJ – Rio de Janeiro
RPU – Reunião de Pavimentação Urbana
RPM ou rpm – Rotações por minuto
RS – Rio Grande do Sul
RT – Recomendação técnica
R.T. – Revista dos Tribunais
S - Solto
S.A. – Sociedade anônima
S. do Paraíso – Santana do Paraíso
SEMAN/PR – Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Naturais da Presidência da República
Semi-infin. – Semi-infinito
Sen - Seno

SENAI/SC – Serviço Nacional da Indústria/Santa Catarina

SETEM - Serviço Tecnológico Mineral

SH – Segmento homogêneo

SHELL – Royal Dutch Shell (Empresa britânica e holandesa do setor petrolífero)

SINFERBASE – Sindicato Nacional da Indústria da Extração do Ferro e Metais Básicos

SINMETRO – Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

SINOBRAS – Siderúrgica Norte Brasil S.A.

SISNAMA - Sistema Nacional do Meio Ambiente

SMA - Stone Mastic Asphalt

SP – São Paulo

SYSBEINC - Programa computacional com modelos provisionais de variáveis para análise mecânica de pavimentos flexíveis

T - Temperatura

TG – Termogravimetria (análise térmica)

TRB - Transportation Research Board

TRL – Transport Research Laboratory (Laboratório de Pesquisa em Transportes)

TRRL – Transport and Road Research Laboratory (Laboratório de Pesquisa em Transportes e Estradas)

TSD – Tratamento superficial duplo

UE – União Europeia

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ/COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e pesquisa de Engenharia

UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

USA – United States of America (Estados Unidos da América)

USACE – United States Army Corps of Engineers

USGS – United States Geological Survey

USIBA – Usina Siderúrgica da Bahia S.A.

USIMINAS – Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A.

V. ou v. – Volume

VMDTA – Volume médio diário de tráfego no ano

V&M – Vallourec e Mannesmann Tubes

Visc. – Viscosidade

w_C – Limite de contração

w_L – Limite de liquidez

w_P – Limite de plasticidade

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I - DIMENSIONAMENTO POR RETROANÁLISE - RETRANS5-L (ALBERNAZ, 2010) - DEFINIÇÃO DOS INTERVALOS DE ESPESSURAS VÁLIDAS - CASOS BÁSICOS: 1, 2 e 3	I.1
DEFINIÇÃO DOS INTERVALOS DE ESPESSURAS VÁLIDAS - CASOS BÁSICOS: 4, 5 e 6	I.2
ANEXO II - RESULTADOS DE ENSAIO - EXTRAÇÃO DE BETUME - ENSAIO NÚMERO 01.....	II.1
RESULTADO DE ENSAIO - EXTRAÇÃO DE BETUME - ENSAIO 02.....	II.2
RESULTADO DE ENSAIO - EXTRAÇÃO DE BETUME - ENSAIO 03.....	II.3
ANEXO III - DETERMINAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA PTM-130 - Pennsylvania Testing Method (Método de Teste Pensilvânia) - Ensaio 01 - CP-01 - Ramo saturado (LABORATÓRIO DO DER/MG, 2009).....	III.1
Ensaio 01 – CP-02 - Umidade ótima (LABORATÓRIO - DER/MG, 2009).....	III.2
Ensaio 01 – CP-03 - Ramo seco (LABORATÓRIO - DER/MG, 2009).....	III.3
Ensaio 02 – CP-01- Ramo saturado (LABORATÓRIO - DER/MG, 2009).....	III.4
Ensaio 02 – CP-02 – Umidade ótima (LABORATÓRIO - DER/MG, 2009).....	III.5
Ensaio 02 – CP-03 – Ramo seco (LABORATÓRIO - DER/MG, 2009).....	III.6
ANEXO IV - MCT – MINIATURA COMPACTADO E TROPICAL - Ensaio MCT 1091 (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): teor de umidade do solo; Aferição, moldagens e densidades dos corpos de prova; perda por imersão; dados do CP submetidos à energia variável - altura final - definição do Mini-MCV e peso específico em função da umidade e o número de golpes (8 - 12 - 16) aplicados.....	IV.1
Ensaio MCT 1091 - Determinação dos coeficientes (c' - d' - P_i).....	IV.2
Ensaio MCT 1092 (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): teor de umidade do solo; Aferição, moldagens e densidades dos corpos de prova; perda por imersão; dados dos CP submetidos à energia variável - altura final - definição do Mini-MCV e peso específico em função da umidade e o número de golpes (8 - 12 - 16)	

aplicados.....	IV.3
Ensaio MCT 1092 - Determinação dos coeficientes (c' - d' - Pi).....	IV.4
Ensaio MCT 1093 (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): teor de umidade do solo; Aferição, moldagens e densidades dos corpos de prova; perda por imersão; dados dos CP submetidos à energia variável - altura final - definição do Mini-MCV e peso específico em função da umidade e o número de golpes (8 - 12 - 16) aplicados.....	IV.5
Ensaio MCT 1093 - Determinação dos coeficientes (c' - d' - Pi).....	IV.6
Ensaio MCT 1094 (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): teor de umidade do solo; Aferição, moldagens e densidades dos corpos de prova; perda por imersão; dados dos CP submetidos à energia variável - altura final - definição do Mini-MCV e peso específico em função da umidade e o número de golpes (8 - 12 - 16) aplicados.....	IV.7
Ensaio MCT 1094 - Determinação dos coeficientes (c' - d' - Pi).....	IV.8
CLASSIFICAÇÃO MCT - MINIATURA COMPACTADO TROPICAL.....	IV.9

ANEXO V - RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 1089.....	V.1
RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 1090.....	V.2
RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 1091.....	V.3
RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 1092.....	V.4
RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 1093.....	V.5
RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 1094.....	V.6
RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 1095.....	V.7
RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 1096.....	V.8

ANEXO VI - RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 11564.....	VI.1
RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 11564R.....	VI.2
RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 11565.....	VI.3
RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 11566.....	VI.4
RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 11567.....	VI.5
RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL(LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 11568.....	VI.6
RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL(LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009): CP n. 11569.....	VI.7
ANEXO VII - DEFLEXÕES MÁXIMAS - RODOVIA MG-323 - TRECHO: MESQUITA – SANTANA DO PARAÍSO - (DER/MG, 2010).....	VII.1
ANEXO VIII - GRÁFICOS - RAIOS DE CURVATURA - RODOVIA MG-323 - TRECHO: MESQUITA – SANTANA DO PARAÍSO - (DER/MG, 2010).....	VIII.1
ANEXO IX - RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETRANS5-L - GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232 - Mesquita - Santana do Paraíso - SH-1 - Est.: 0 - 49 - FD - Ext.: 980 m.....	IX.1

GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-1 - Est.: 0 - 49 - FE - Ext.: 980 m.....	IX.2
GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-2 - Est.: 49 - 192 - FD - Ext.: 2.860 m.....	IX.3
GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-2 - Est.: 49 - 192 - FE - Ext.: 2.860 m.....	IX.4
GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-3 - Est.: 192 - 362 - FD - Ext.: 3.400 m.....	IX.5
GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-3 - Est.: 192 - 362 - FE - Ext.: 3.400 m.....	IX.6
GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-4 - Est.: 362 - 533 - FD - Ext.: 3.420 m.....	IX.7
GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-4 - Est.: 362 - 533 - FE - Ext.: 3.420 m.....	IX.8
GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-5 - Est.: 533 - 784 - FD - Ext.: 5.020 m.....	IX.9
GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-5 - Est.: 533 - 784 - FE - Ext.: 5.020 m.....	IX.10
GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-6 - Est.: 784 - 1.000 - FD - Ext.: 4.320 m.....	IX.11
GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO	

PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-6 - Est.: 784 - 1.000 - FE - Ext.: 4.320 m..... IX.12

ANEXO X - DIMENSIONAMENTO (REFORÇO EM CBUQ) - 2010 - 2020 - RETROANÁLISE/RETRANS5-L (DER/MG, 2010) - RODOVIA MG-232 - TRECHO: MESQUITA - SANTANA DO PARAÍSO - ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ - SH 1 - LD/LE - EST. 0 - 49 - BASE: ESCÓRIA DE ACIARIA.....	X.1
ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ - SH 3 - LD - EST. 192 - 362 - BASE: CASCALHO.....	X.2
ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ - SH 3 - LE - EST. 192 - 362 - BASE: CASCALHO.....	X.3
ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ - SH 4 - LD - EST. 362 - 533 - BASE: ESCÓRIA DE ACIARIA COM ADIÇÃO DE 20% DE ARGILA.....	X.4
ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ - SH 4 - LE - EST. 362 - 533 - BASE: ESCÓRIA DE ACIARIA COM ADIÇÃO DE 20% DE ARGILA.....	X.5
ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ - SH 5 - LD - EST. 533 - 784 - BASE: ESCÓRIA DE ACIARIA.....	X.6
ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ - SH 5 - LE - EST. 533 - 784 - BASE: ESCÓRIA DE ACIARIA.....	X.7
ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ - SH 6 - LD - EST. 784 - 1000 - BASE: CASCALHO.....	X.8
ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ - SH 6 - LE - EST. 784 - 1000 - BASE: CASCALHO.....	X.9

ANEXO XI - GRÁFICOS DAS FLECHAS NAS TRILHAS DE RODAS - RODOVIA MG-232 TRECHO: MESQUITA - S. DO PARAÍSO (DER/MG, 2010)..... XI.1

ÍNDICE

CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO.....	4
1.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.....	5
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	6
CAPÍTULO 2.....	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 HISTÓRIA DA SIDERURGIA.....	9
2.2 SÍNTESE DO PARQUE SIDERÚRGICO BRASILEIRO.....	12
2.3 ORIGEM E CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA.....	12
2.3.1 Origem da escória.....	12
2.3.2 Escória de alto-forno.....	13
2.3.3 Escória de aciaria.....	14
2.3.3.1 Escória de aciaria; OH, LD ou BOF e EAF.....	15
2.3.3.2 Aplicações da escória de aciaria.....	15
2.3.3.3 Aplicações da escória de aciaria na Europa.....	17
2.4 RESERVAS E PRODUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, AÇO BRUTO E GERAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA NO BRASIL E NO MUNDO.....	18
2.4.1 Reservas e a produção de minério de ferro, no Brasil e no mundo.....	18
2.4.2 Produção de aço bruto no Brasil.....	19
2.4.3 Produção de aço bruto na América Latina.....	20
2.4.4 Produção de aço bruto no mundo.....	21
2.4.5 Análise sobre a produção de aço bruto no Brasil e no mundo.....	22
2.4.6 Comparativo sobre a produção de minério de ferro e aço bruto, no mundo e no Brasil.....	23
2.5 TIPIFICAÇÃO DAS USINAS SIDERÚRGICAS E OS PROCESSOS PRODUTIVOS DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....	24
2.6 PRODUÇÃO BRASILEIRA DE AÇO BRUTO DISTRIBUÍDO PELO	

PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	26
2.7 PRODUÇÃO DO AÇO E GERAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....	27
2.7.1 Refino do aço e geração da escória de aciaria LD ou BOF.....	30
2.7.1.1 Etapas do refino e geração da escória de aciaria LD ou BOF.....	30
2.7.2 Refino do aço e geração da escória de aciaria EAF (Forno elétrico).....	33
2.7.2.1 Etapas do refino e geração da escória de aciaria EAF.....	34
2.7.3 Escória de aciaria EAF: oxidante e redutora.....	37
2.7.4 Reações químicas no processo de fabricação do aço e geração da escória de aciaria.....	37
2.7.4.1 Reações químicas no processo de produção do aço e geração da escória de aciaria LD ou BOF.....	38
2.7.4.2 Reações químicas no processo de produção do aço e geração da escória de aciaria EAF.....	39
2.7.5 Etapa posterior ao processo de geração da escória de aciaria.....	39
2.7.6 Comportamento e Armazenagem da escória de aciaria.....	40
2.8 RECICLAGEM DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....	40
2.9 ESTOCAGEM DA ESCÓRIA DE ACIARIA	41
2.10 CONTROLE DA EXPANSÃO.....	42
2.11 PROBLEMAS OCACIONADOS PELO USO IMPRÓPRIO.....	43
2.12 MÉTODO DE CURA DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD.....	43
2.12.1 Cura da escória de aciaria no Japão com a utilização de vapor d'água.....	44
2.12.1.1 Comparativo entre a norma japonesa JIS "Japanese Industrial Standards" e a brasileira adotada pelo DNER-PTM-130	45
2.12.2 Cura da escória de aciaria com a utilização de vapor sob pressão.....	46
2.12.3 Cura por adição de sílica à escória de aciaria LD no estado líquido.....	47
2.12.4 Metodologia utilizada pela CST (Cura acelerada – ACERITA).....	47
2.13 MÉTODOS DE ANÁLISE DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....	49
2.13.1 Método de ensaio de agulhas de Le Chatelier – NBR-11582/91.....	49
2.13.2 Método de ensaio de Autoclave.....	50
2.13.3 Método de análise da expansão da escória de aciaria – CBR.....	51
2.13.4 Método de análise da expansão da escória de aciaria – PTM-130.....	51

2.13.4.1 Comparativo entre os Métodos CBR e PTM-130.....	52
2.13.5 Método de ensaio Steam Test ou Ensaio a Vapor (EN 1744-1/98).....	53
2.14 PRINCIPAIS ESTUDOS REALIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....	54
2.15 UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA EM PAVIMENTAÇÃO.....	56
2.15.1 Utilização da escória de aciaria em pavimentação rodoviária.....	59
2.15.1.1 A importância dos simuladores de tráfego para o incremento da utilização dos materiais alternativos nas pavimentações rodoviárias.....	60
2.15.1.2 Requisitos necessários para utilização da escória de aciaria na pavimentação rodoviária.....	62
2.15.1.3 Vantagens em utilizar a escória de aciaria para confecção de camadas de bases rodoviárias.....	63
2.15.1.4 Desvantagens ao utilizar a escória de aciaria para confecção de camada de base rodoviária.....	64
2.15.1.5 Vantagem técnica e econômica ao utilizar a escória de aciaria como agregado na camada de base nas pavimentações rodoviárias.....	65
2.15.1.6 Benefícios ambientais ao utilizar a escória de aciaria como agregado na camada de base nas pavimentações rodoviárias.....	66
2.16 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....	67
2.16.1 Ensaio de lixiviação e solubilização da escória de aciaria LD.....	70
2.17 METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO MR "MÓDULO DE RESILIÊNCIA" EM SOLOS E EM MISTURAS BETUMINOSAS.....	72
2.17.1 Método para determinação do módulo de resiliência em solos.....	72
2.17.2 Método para determinação do MR em misturas betuminosas.....	76
2.18 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO ESTRUTURAL - RETROANÁLISE.	77
2.19 REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA UTILIZAR OS SOLOS, MISTURAS DE SOLOS, ESCÓRIA E MATERIAIS BRITADOS OU PRODUTOS PROVENIENTES DE BRITAGEM NA CAMADA DE BASE RODOVIÁRIA..	80
CAPÍTULO 3.....	81
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	81
3.1 MATERIAIS.....	81

3.1.1 Demonstrativo da estrutura dos subtrechos e relação dos materiais da rodovia MG 232, trecho: Santana do Paraíso – Mesquita - 20 km de extensão...	83
3.2 MÉTODOS.....	86
3.2.1 Preparação das amostras para o ensaios de caracterização e compactação.....	87
3.2.2 Granulometria antes e após compactação.....	90
3.2.2.1 Classificação TRB - Solos e escória de aciaria LD.....	90
3.2.3 Ensaio dos limites de plasticidade e liquidez para determinação e do índice de plasticidade	91
3.2.4 Índice de suporte Califórnia (ISC) utilizando amostras não trabalhadas...	93
3.2.5 Ensaio para determinação da abrasão Los Angeles.....	94
3.2.6 Determinação da densidade real do agregado miúdo (grãos finos).....	95
3.2.7 Determinação da absorção de água da escória de aciaria.....	96
3.2.8 Ensaio para determinação do índice de forma do agregado.....	96
3.2.9 Ensaio para a avaliação da durabilidade de agregado.....	97
3.2.10 Definição do índice de grupo (IG) do material.....	99
3.2.11 Ensaio de determinação do Índice de Lamelaridade.....	100
3.2.12 Avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria Pennsylvania Test Method (PTM 130).....	102
3.2.12.1 Aparelhos necessários para execução do ensaio.....	103
3.2.12.2 Preparação da amostra para o ensaio PTM-130.....	103
3.2.12.3 Amostra para a relação umidade ótima – densidade máxima.....	104
3.2.12.4 Teste de expansão – procedimentos iniciais.....	105
3.2.12.5 Teste de expansão - procedimentos intermediários.....	105
3.2.12.6 Teste de expansão – procedimentos finais.....	106
3.2.13 Ensaio de misturas Betuminosas – Percentagem de betume.....	107
3.2.14 Ensaio da metodologia MCT.....	107
3.2.14.1 Ensaio Mini-MCV - solos compactados com equipamento miniatura.....	108
3.2.15 Difração de Raios-X (DRX).....	112
3.2.16 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	115
3.2.17 Análise química por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e Espectrometria de Absorção Atômica.....	119

3.2.18 Ensaio de determinação da resistência à tração em misturas betuminosas.....	120
3.2.19 Determinação do módulo de resiliência em solos e mistura betuminosa....	120
3.2.19.1 Determinação do módulo de resiliência em solos.....	120
3.2.19.2 Determinação do módulo de resiliência em misturas betuminosas.....	120
3.2.20 Metodologia de avaliação estrutural por retroanálise.....	123
3.2.21 Projeto de reforço estrutural do pavimento para dez anos (2010 - 2020)..	127
CAPÍTULO 4.....	135
4 RESULTADOS E ANÁLISES DOS ESTUDOS EFETUADOS.....	135
4.1 ESTUDOS DOS SOLOS: CASCALHO, ARGILA, ESCÓRIA DE ACIARIA E ESCÓRIA DE ACIARIA COM ADIÇÃO DE 20% DE ARGILA - GRANULOMETRIA, W_L, I_p, IG, CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL (TRB), EXPANSÃO CBR E ISC.....	135
4.2 DESGASTE DA ESCÓRIA DE ACIARIA POR ABRASÃO LOS ANGELES.....	142
4.3 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE REAL DO AGREGADO MIÚDO....	142
4.4 ÍNDICE DE FORMA DO AGREGADO - ESCÓRIA DE ACIARIA LD.....	143
4.5 ÍNDICE DE LAMELARIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD.....	143
4.6 DURABILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD.....	144
4.7 PERCENTUAL DE BETUME DA MISTURA BETUMINOSA (PMF) - REVESTIMENTO DE SUB-TRECHO DA MG 232.....	144
4.8 DETERMINAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA PELO MÉTODO PTM-130.....	147
4.9 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO MCT.....	148
4.10 PRIMEIRO ESTUDO QUÍMICO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD.....	149
4.10.1 Difração por Raios-X e constituição mineralógica da escória de aciaria ..	149
4.10.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	149
4.11 SEGUNDO ESTUDO QUÍMICO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD.....	159
4.11.1 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e Espectrometria de Absorção Atômica.....	159

4.12 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM MISTURAS BETUMINOSAS - REVESTIMENTO SUBTRECHO MG 232 (PMF).....	161
4.13 MÓDULO DE RESILIÊNCIA DOS SOLOS E DA ESCÓRIA DE ACIARIA - MG-232 - AMOSTRAS EXTRAÍDAS IN LOCO.....	161
4.14 MÓDULO DE RESILIÊNCIA EM MISTURA BETUMINOSA – ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL (REVESTIMENTO EM PMF).....	163
4.15 RETROANÁLISE – MG-232 - TRECHO: MESQUITA - SANTANA DO PARAÍSO.....	163
4.16 PONDERAÇÕES SOBRE OS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA OBTIDOS PELO LABORATÓRIO E OS OBTIDOS PELA RETROANÁLISE.....	168
4.17 PROJETO DE REFORÇO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO - MG-232 TRECHO: MESQUITA - SANTANA DO PARAÍSO - VIDA ÚTIL DEZ ANOS.....	170
CAPÍTULO 5.....	180
5 CONCLUSÃO.....	180
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	194

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Para a viabilização e operacionalização da pavimentação rodoviária comumente depara-se com diversos entraves, tais como: recursos financeiros escassos, indisponibilidades de materiais naturais apropriados à necessidade e a logística da obra, etc. Desta maneira, é imperativo à utilização de vários artifícios técnicos para assegurar a efetividade e eficácia dos trabalhos durante a implementação da pavimentação rodoviária. Uma das opções disponíveis para possibilitar a promoção destas necessárias adequações, consiste na flexibilização dos materiais indicados para pavimentação; porém estes ajustamentos deverão ocorrer sem o comprometimento da qualidade, resguardando rigorosamente os princípios científicos. A aplicação da escória de aciaria como camada de base e/ou de sub-base das estruturas dos pavimentos rodoviários flexíveis ou rígidos, em muitos casos, têm se apresentado como uma excelente alternativa tecnológica.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização da escória de aciaria como agregado em pavimentações rodoviárias já ocorre a um considerável período em nosso país, porém em pequena escala, quando correlacionada com a produção nacional de aço bruto que é diretamente proporcional a geração da escória de aciaria. Contrastando com o observado nos Estados Unidos da América, Canadá, e em alguns países da Europa e da Ásia que utilizam este agregado, em escalas expressivas e relevantes, respectivamente comparadas com suas produções de aço e conseqüentemente a geração da escória de aciaria. Pode-se atribuir esta característica da engenharia rodoviária brasileira, ao ainda insuficiente nível de informação sobre as propriedades, compatibilidades e possíveis aplicações da escória de aciaria na pavimentação rodoviária, devido principalmente ao sectarismo da divulgação. A qual ocorre normalmente de forma direcionada, restrita a esfera acadêmica e a um específico e reduzido número de órgãos públicos e empresas atuantes no setor rodoviário e siderúrgico.

A escória de aciaria tem sido utilizada com algumas aplicações na construção civil, no entanto, problemas como sua natureza expansiva, a inexistência de critérios técnicos para detectar sua estabilização e práticas inadequadas do material têm causado problemas de durabilidade e desempenho, contribuindo para o aumento da discriminação e da desconfiança da sociedade quanto à utilização das escórias de aciaria. Além disso, a utilização que vem sendo dada à escória de aciaria não tem sido suficiente para que a maior parte do volume gerado deste coproduto seja efetivamente consumido. (PENA, 2004).

Outro fator preponderante, atribuído à ainda reduzida utilização de materiais reciclados, como à escória de aciaria, na pavimentação rodoviária brasileira, pode-se imputar, de certa forma, a uma exacerbada utilização de materiais naturais para pavimentação. Ocorrendo muitas vezes, sem o necessário e devido controle ambiental, ou seja, sem a observância de todos os estudos de impactos ambientais, bem como as medidas mitigadoras, normalmente necessárias aos investimentos de infraestrutura de uma maneira geral, em alguns casos gerando prejuízos ao meio ambiente. Historicamente tal anomalia é parcialmente atribuída, a não conscientização da preservação do ecossistema e a relativa e não muito remota tolerância da sociedade, e a brandura da legislação ambiental até o final da década de setenta do século passado. Entretanto a partir desta data, o país muda radicalmente a maneira de conduzir sua política ambiental, implementando uma legislação severa e inibidora, restringindo a prática de danos contra o meio ambiente, sejam eles provocados pela indústria, por atividades gerais de infraestruturas de responsabilidade do Estado ou da iniciativa privada. Basicamente a legislação se funda em concisas normas jurídicas, com caráter claramente coercitivo e coativo, capitaneadas pela Constituição Nacional.

Uma das modificações significativas na fiscalização e controle do sistema ambiental brasileiro ocorreu com a delegação de autonomia ao poder público estadual para o exercício das atividades de licenciamento ambiental, *Resolução 237* do Conselho Nacional de Meio Ambiente de 18 de dez. de 1997, que dispõe sobre o licenciamento ambiental, (OF. CONAMA, n. 1006 de 1997). Entretanto, a lei que introduziu uma alteração consistente ao ordenamento jurídico ambiental brasileiro foi da lei de

licenciamento ambiental: BRASIL. *Lei Federal n.º. 6938* de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. (VADE MECUM RT, 2009). Alterando a legislação, através de uma premissa conceitual, a responsabilidade objetiva, ou do risco da atividade, segundo o qual os danos não podem ser partilhados com a comunidade.

A Constituição Federal de 1988 dedica um capítulo ao meio ambiente. Art. 225, capítulo seis, do Meio Ambiente, *Constituição Federal* de 05 de out. de 1988. (PINTO *et al.*, 2009). O caput do art. 225 especifica: “Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo, essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade, o dever de defendê-lo e preservá-lo, para as presentes e futuras gerações”.

Mais recentemente, ou mais precisamente há onze anos foi sancionada a lei de crimes ambientais: BRASIL. Congresso Nacional. *Lei Federal 9605* de 12 de fev. de 1998, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente (ACQUAVIVA, 2004).

É imperativo frisar, a intempestiva e surpreendente incidência de alguns insucessos, oriundos do emprego inadequado da escória de aciaria. Chegando ao absurdo, de a utilizarem de forma não tratada, sem a devida cura, conseqüentemente, apresentando níveis de expansão indesejados, ou seja, extrapolando o valor máximo permitido para a expansão volumétrica da escória de aciaria para utilização em pavimentação rodoviária estipulado pela norma EM 262 (DNER, 1994) que é de 3%. Tais incidências constituem em um dos fatores mais relevantes e inibidores, a um célere e efetivo incremento ao emprego deste agregado em nossas obras rodoviárias.

Ressalta-se a importância da redução dos custos das pavimentações, principalmente a rodoviária, pois a atual política de transportes brasileira privilegia, salvo pequenas exceções, tanto o transporte de pessoas, quanto de cargas, pela modalidade rodoviária. Este setor necessita desta maneira, receber muitos investimentos, para fazer frente às crescentes e expressivas demandas ora apresentadas. O Brasil, um país de dimensões

continentais, apresenta ainda, um significativo percentual das estradas, ainda por serem pavimentadas. Segundo dados do DNIT atualizados até 08 de junho de 2010, a extensão total da malha rodoviária brasileira federal, estadual e municipal, constantes do PNV (Plano Nacional Viário) é da ordem de 1.712.136,7 km, além de 131.328,1 km de rodovias estaduais coincidentes planejadas que também constituem o PNV. Pode-se constatar que apenas 12,4% deste total é pavimentado, 7,7% planejado e 79,9% não pavimentado. (Tabela 1.1). A pavimentação da totalidade da rede rodoviária Nacional é uma importante meta ainda por cumprir pela nação brasileira. Sendo o Brasil um dos maiores produtores de aço, e conseqüentemente, grande gerador da escória de aciaria, pode-se muito bem incrementar e acelerar este processo com o emprego de políticas de redução de custos, sem perda da qualidade técnica, através de uma maior utilização da escória de aciaria nas pavimentações rodoviárias.

Tabela 1.1 - Extensão da malha rodoviária nacional – PNV/2010 (DNIT, 2010).

MALHA RODOVIÁRIA BRASILEIRA - PNV - 2010			
EXTENSÃO (km)	PAVIMENTADA	NÃO PAVIMENTADA	TOTAL
Federal	61.961,3	13.751,6	118.873,2
Estadual	106.547,9	113.450,6	254.136,6
Municipal	26.826,7	1.234.918,3	1.339.126,9
Estadual coincidente (Planejadas)	-	-	131.328,1
Total	212.617,9	1.368.190,7	1.712.136,7

1.2 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO

As siderúrgicas têm a possibilidade de agregar valor aos seus coprodutos, demonstrando compromisso social e com o meio ambiente. Já a sociedade tem a possibilidade de ganhos ambientais e econômicos, respectivamente, através da mitigação dos passivos e reaproveitamento dos coprodutos (PENA, 2004).

Embasado no pragmatismo socioeconômico e visando demonstrar a relevância das reciclagens e do devido reaproveitamento da escória de aciaria nas pavimentações rodoviárias, viabilizou-se através deste estudo uma detida análise do comportamento

técnico e operacional do segmento da rodoviário pertencente a MG-232, trecho: Mesquita - Santana do Paraíso, com 20 km de extensão, pertencente à malha rodoviária do estado de Minas Gerais, composto por seis SH "segmentos homogêneos", ou seja, subtrecho com estrutura do pavimento constituída por duas camadas intermediárias, sub-base e base e outros somente com a camada de base; os materiais empregados para confecção das camadas de base variam: executada em cascalho, em escória de aciaria pura (Figura 1.1) e em escória com adição de 20% de argila. O revestimento também é composto por modalidade diferentes, alguns segmentos foram construídos utilizando-se o pré-misturado a frio e outros foram confeccionados em tratamento superficial duplo. A análise do comportamento das diversificadas camadas de base estabilizadas, utilizando agregados diferentes, se apresenta como um valioso exemplar para avaliar a eficiência e eficácia do uso deste coproduto como agregado para confecção de bases dos pavimentos rodoviários, principalmente pela possibilidade compará-las dentro do contexto exposto.



Figura 1.1 – Rodovia MG-232 – Confeção da camada de base em escória de aciaria - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - Estaca 46 (DER/MG, 2006).

1.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

Este estudo visa analisar o segmento rodoviário, retrorreferenciado na seção 1.2, constituinte da rodovia MG-232, totalmente implantado e pavimentado através de seis

segmentos homogêneos e geotecnicamente diferenciados, as camadas de base foram executadas por estabilização granulométrica, porém com a utilização de agregados diversificados, (escória, argila e cascalho) conforme já especificado na seção anterior.

Para isso foi necessário viabilizar o estudo do comportamento técnico do pavimento, e de maneira singular, promover, após os devidos estudos, subordinado aos rígidos preceitos epistemológicos, a verificação da eficiência e eficácia da utilização da escória de aciaria pura e com mistura na proporção de 20% (Figura 1.2) de argila para construção de bases rodoviárias. Assim sendo, através da análise da viabilidade, ou não, em utilizar-se este coproduto para a referida finalidade, investigar a possibilidade do equacionamento dos interesses do setor rodoviário, tão carente de materiais alternativos de boa qualidade e de baixo custo, aos das siderúrgicas, que necessitam mitigar os passivos ambientais, como no caso, os depósitos a céu aberto de escória de aciaria.



Figura 1.2 - Base de escória + 20% de argila em execução - MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - estaca 424 (ACERVO TÉCNICO 40ª CRG - DER/MG, 2007).

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A metodologia utilizada está embasada inicialmente, em um estudo das propriedades e características dos agregados empregados nas respectivas camadas do pavimento e do subleito rodoviário, através de um universo amostral, obtido em jazidas, depósitos e, em

coletas in loco; ou seja, retiradas do próprio pavimento, ora analisado, após a sua conclusão e posterior liberação ao tráfego. Assim sendo, visando-se analisar a viabilidade da utilização da escória de aciaria como camada de base em pavimentação rodoviária, promoveu-se uma análise físico-química e mecânica em laboratório e no campo pela retroanálise. No intuito de verificar o comportamento da estrutura sob o efeito das cargas e do tempo, realizou-se também um projeto de dimensionamento para uma vida útil de dez anos.

Desta forma, foi imperativo a realização de ensaios de: granulometria antes e após compactação; California Bearing Ratio (CBR); limites de liquidez (w_L) e limite de plasticidade (w_P), para definição do índice de plasticidade (I_P); permeabilidade; equivalência da mistura do PMF; Abrasão Los Angeles; análise química da escória de aciaria; Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV); Difração de Raios-X (DRX); Pennsylvania Testing Method (PTM-130), para definição da expansão da escória de aciaria; Módulo de Resiliência (MR) - ensaio Triaxial Dinâmico e, no revestimento a Compressão Diametral em corpos-de-prova cilíndricos; classificação do solo pelo Método Miniatura Compactado e Tropical (MCT) para caracterização da poção fina do solo. Utilizando-se a viga Benkelman como instrumento coletador dos dados defletométricos em campo, conjugado com a medição das bacias de deflexões, para obtenção dos elementos para análise, proporcionando posicionamento sobre o comportamento deste pavimento, através da Retroanálise; posteriormente, estes valores de MR também foram definidos e avaliados em laboratório.

Com o objetivo de verificar o comportamento das diversas camadas do pavimento quando submetidas ao incremento das cargas e dos efeitos do tempo, o trecho em referência, objeto deste estudo, foi dimensionado para uma vida útil de 10 anos, utilizando-se a metodologia da retroanálise - programa RETRANS5-L e ELSYM5.

Com estes referenciais técnicos, se tornou possível promover uma síntese conclusiva sobre a utilização da escória de aciaria neste segmento rodoviário. Desta maneira os capítulos foram distribuídos e enumerados, conforme a seguinte discriminação:

1. Capítulo 1. Introdução, com as considerações iniciais, justificativa, objetivo e estrutura da dissertação.
2. Capítulo 2. Referência bibliográfica sobre o tema em enfoque, relatando um paralelo referente a fabricação do aço e geração da escória de aciaria, desde os primórdios tempos, até os dias de hoje, transcorrendo sobre a produção, aplicação, os problemas e atributos positivos em utilizar-se a escória de aciaria em pavimentações viárias com ênfase para a especificidade rodoviária. Foram ainda relatados neste capítulo os requisitos mínimos, determinados pela Norma Técnica ES 303 (DNER, 1997) para que a escória de aciaria possa ser utilizada em pavimentação rodoviária. Alguns ensaios inerentes ao controle da expansão escória de aciaria, ao módulo de resiliência dos solos e material betuminoso, a avaliação estrutural por retroanálise e ensaios ambientais, tais como: a lixiviação e a solubilização de resíduos, realizados especificamente para escória de aciaria da USIMINAS, também constam das referências.
3. Capítulo 3. Descrição dos materiais e métodos de ensaios físico-químicos e mecânicos (campo e laboratório); os ensaios mecânicos de retroanálise, além da avaliação dos materiais e da estrutura do pavimento nas condições atuais, subsidiaram a base de dados do projeto de dimensionamento do reforço estrutural para uma vida útil de dez anos - (2010 - 2020), realizados com a utilização do programa RETRANS5-L.
4. Capítulo 4. Resultados e análise dos ensaios e demais estudos de campo e laboratoriais.
5. Capítulo 5. Conclusões finais, incluindo, sugestões para futuros estudos.
6. Referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da bibliografia tem como objetivo realizar uma abordagem geral sobre a utilização da escória de aciaria em pavimentações, principalmente como camada de base rodoviária. Transcorrendo sobre a sua origem, os meios de fabricação, os problemas e os sistemas de controle da expansão volumétrica deste coproduto da fabricação do aço.

2.1 HISTÓRIA DA SIDERURGIA

Em 1700 A.C. no sul do Cáucaso, surgia entre os Hititas, atualmente onde está situada a Turquia, à primeira indústria do ferro. Os Hititas aqueciam em buracos feitos no solo, uma mistura de carvão mineral e pequenas pedras de minério de ferro encontradas na superfície terrestre, obtendo uma massa pastosa, que era batida e posteriormente forjada. Estes princípios foram se aprimorando, até a construção de fornos semienterrados, porém mantendo ainda as mesmas técnicas rudimentares iniciais, utilizadas pelos hititas. A Figura 2.1 exemplifica como funcionavam os fornos tipo poço fechado utilizado para redução do minério de ferro pelo emprego do carvão vegetal como combustível, através do processo de redução direta.

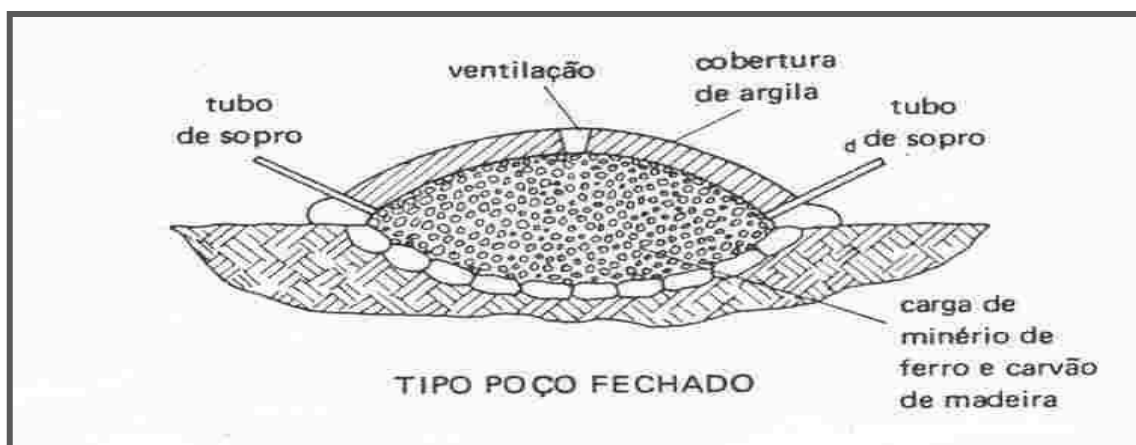


Figura 2.1 – Forno primitivo tipo poço fechado (UNISINOS, 2003).

Encontra-se registros da siderurgia no Egito, atualmente Grécia, em 1100 A.C., na Austrália em 920 A.C., na Itália em 600 A.C., Espanha, França e Suíça em 500 A.C.; os chineses no século V antes de Cristo, já fabricavam o ferro carburado, hoje denominado ferro-gusa.

No século VIII, na Catalunha, inicia-se a utilização de um sistema de beneficiamento utilizando uma espécie de forja, denominada, forja catalã utilizada para redução do minério de ferro pelo emprego do carvão vegetal como combustível, através do processo de redução direta (Figura 2.2), aumentando substancialmente a produção, chegando a quintuplicá-la.

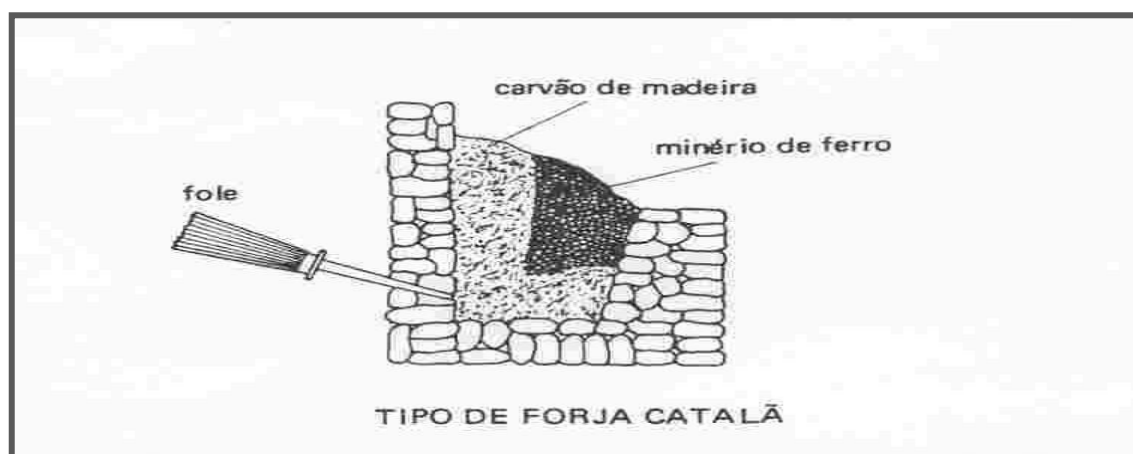


Figura 2.2 - Forno primitivo tipo forja catalã (UNISINOS, 2003).

Na idade média os fornos ampliaram as cubas elevadas acima do solo, incrementando a produção, a combustão passou a ser ativada por foles movidos a energia hidráulica, assim como o acionamento dos martelos que eram utilizados para bater a massa de material impuro oriundo dos fornos (ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2009).

O ferro era obtido no estado pastoso, misturado com as impurezas do minério. O ferro obtido dessa maneira apresentava relativa ductilidade, podendo ser trabalhado por martelamento a temperaturas relativamente elevadas. Após ser retirada do forno, aquela bola de ferro era martelada para remoção das impurezas. O resultado final era uma barra ou *lupa* posteriormente reaquecida e trabalhada por martelamento, dando origem ao

ferro pudiado. Os fornos primitivos possibilitavam a absorção de certa quantidade de carbono, até 1%, o que por rápido resfriamento poderia elevar drasticamente a dureza do material, denominado como têmpera (UNISINOS, 2003). Nessa época apareceram os problemas ecológicos, para obtenção do ferro, necessitava-se do carvão vegetal, abatendo-se muitas árvores. Dentro das minas o trabalho era feito a luz de velas e o minério de ferro era retirado em cestas, puxadas por cordas.

A partir da segunda metade do século XV, com a fundição a indústria siderúrgica ganha um novo impulso. Começa-se a produzir aço através do refino do ferro-gusa. O inglês Abraham Darly começa a produzir o ferro-gusa a partir do coque. Na França, Reáumur realiza estudos sobre a redução do ferro-gusa em aço, enquanto Huntsman obtém pequenas quantidades de aço no cadinho, no ano de 1745.

A descoberta do inglês Bessemer, em 1856, propiciando a produção do aço, pelo refino do gusa em um convertedor, através do sopro de uma corrente de ar que atravessava o banho de gusa, convertendo-o por oxidação em aço líquido, viabilizou a produção deste metal (aço), realmente em escala industrial, evoluindo aceleradamente até os atuais altos-fornos (Figura 2.3), providos de regeneradores, ventoinhas, sistema de coleta de gases, casa de corrida, correia transportadora principal e carro torpedo (ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2009).



Figura 2.3 - Alto-Forno moderno com os principais equipamentos periféricos (PEREIRA MACHADO, 2006).

2.2 SÍNTESE DO PARQUE SIDERÚRGICO BRASILEIRO

Conforme a publicação técnica do mês de dezembro do Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS (2008), o parque siderúrgico brasileiro compõe-se de vinte e seis usinas, administradas por oito grupos empresariais. São eles:

- a) ArcelorMittal Brasil - incluindo a ArcelorMittal Inox Brasil, ArcelorMittal Aços Longos e ArcelorMittal Tubarão;
- b) Grupo Gerdau;
- c) CSN;
- d) USIMINAS/COSIPA;
- e) SINOBRAS;
- f) V&M do Brasil;
- g) Villares Metals;
- h) Votorantim Siderurgia.

2.3 ORIGEM E CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA

Os rejeitos siderúrgicos do processo industrial para beneficiamento do aço são, dentre outros, a escória de alto-forno, o pó de alto forno, a lama de alto-forno, a escória de dessulfuração, a escória de aciaria LD, a lama grossa de aciaria, a lama fina de aciaria e a carepa. As escórias são as mais geradas, 60% (PEREIRA, 1994).

2.3.1 Origem da escória

A maioria das escórias são formadas por óxidos e silicatos, algumas vezes com aluminatos, fosfatos e boratos em uma reação endotérmica (MOORE, 1990 *apud* GRAFFITTI, 2002).

Segundo Baltazar (2001) o termo escória de aciaria procede do latim *scoria* e do grego *skória*, (resíduo silicoso) que se forma juntamente com a fusão de metais, sem valor agregado, mas de importante no processo siderúrgico.

Existem dois tipos de escórias siderúrgicas produzidos em larga escala: a escória de alto-forno e a escória de aciaria.

2.3.2 Escória de alto-forno

A escória de alto-forno é gerada em reatores metalúrgicos para produção de ferro-gusa, trata-se de um resíduo siderúrgico industrial, constituído basicamente, de aluminossilicatos cálcicos, como resultado da combinação da ganga ou canga do minério de ferro, com as cinzas do coque e do calcário utilizado como fundente no processo siderúrgico da fabricação do ferro fundido ou ferro-gusa. A composição química e o processo de resfriamento da escória de alto-forno são fatores determinantes na sua capacidade aglomerante.

A escória quando submetida a condições de resfriamento brusco na saída do alto-forno, por meio de jatos de água sob alta pressão, não havendo tempo suficiente para formação de cristais, essa escória se granula, vitrificando-se, processo este denominado, granulação da escória, que apresenta propriedades hidráulicas latentes, com diâmetro máximo de 5 mm, com 95%, em peso, passando na peneira de 4,8 mm. Essa escória é denominada, escória granulada. Entretanto, se o processo utilizado for com resfriamento lento, ao ar livre, a escória de alto-forno se cristaliza, processo denominado, escória não granulada, formando um produto sem atividade hidráulica, de aspecto vítreo e sem distribuição granulométrica definida. Desta maneira pode-se atribuir a reatividade hidráulica da escória de alto-forno à sua forma de obtenção.

Tem-se também a escória de alto-forno submetida ao processo de britagem, correspondendo a uma das classes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em função dos resultados de peneiramento. A aceitação ou rejeição da escória de alto-forno granulada e não granulada para utilização em pavimentação rodoviária está condicionada a irrestrita obediência aos requisitos da Norma (DNER-EM 260, 1994 & DNER-PRO 261, 1994). Condicionando a utilização somente da escória de alto-forno não granulada para camadas de regularização do subleito, sub-bases, bases e os revestimentos rodoviários flexíveis, permitindo a utilização da escória de alto-forno

granulada e não granulada na camada de revestimento dos pavimentos rígidos deste que atenda o item 3.4 e 3.5 da Norma (DNER-EM 260, 1994). Ao contrário da escória de aciaria, que ainda não atingiu um nível razoável de aproveitamento comercial, a escória de alto-forno, devido as suas propriedades físico-químicas se adequarem as necessidades, principalmente, da indústria cimenteira, recebe um tratamento mercadológico diferenciado, Ocorre um aproveitamento célere e mais significativo da escória de alto forno em relação à de aciaria, desta forma, se constata a ocorrência de uma menor relevância, sob o ponto de vista comercial, para o aproveitamento da escória de alto-forno em obras de pavimentação, exatamente por já possuir um mercado com demanda expressiva, excetuando-se alguns casos, nos períodos de alta produção, para viabilizar um rápido esvaziamento dos pátios de depósito, o produto é vendido em maior escala as poucas empresas especializadas na reciclagem da escória, que nestes casos à direcionam de forma parcial para utilização nas pavimentações viárias.

Entretanto, é importante frisar, que a escória de alto-forno não granulada, depois de reciclada, britada e enquadrada em uma faixa granulométrica adequada, constitui-se em um excepcional agregado para utilização em pavimentação.

2.3.3 Escória de aciaria

A escória de aciaria é gerada em reatores metalúrgicos para produção de aço, são utilizados fornos elétricos e conversores a oxigênio. Estas escórias podem ser tanto oxidantes: produzidas pela injeção de oxigênio no aço fundido para oxidar carbono, silício e enxofre, quanto redutoras: gerada após o vazamento da escória oxidada, através da adição de óxido de cálcio (CaO) e de fluorita (CaF₂) estes dois compostos são injetados no processo para dessulfurar o aço líquido e adicionar elementos de liga (MACHADO, 2000).

Em termos gerais a escória de aciaria pode se enquadrada em três tipos distintos: LD (Linz Donawitz) ou BOF (Blast Oxygen Furnace), EAF (Electric Arc Furnace) e OH (Open Hearth). Podemos afirmar, conforme elucidada a Tabela 2.1, com exemplos de fornos utilizados por algumas das maiores empresas do setor da metalurgia do ferro e do

aço no Brasil, que a maioria de nossas siderúrgicas faz uso dos fornos a oxigênio do tipo LD ou BOF. Um relevante número de empresas já utiliza os fornos tipo EAF, mas quanto aos fornos OH, sua utilização é mínima, apenas uma siderúrgica ainda o utiliza.

Tabela 2.1 - Tipos de fornos utilizados por algumas das principais siderúrgicas brasileiras (IBS, 2002 *apud* ROHDE, 2002).

EMPRESA E LOCALIZAÇÃO (ESTADO)	TIPOS DE ALTO FORNO		
	OH	BOF-LD	EAF
ArcelorMittal /Acesita S.A. MG		X	X
Aço Minas Gerais S.A. (AÇOMINAS) MG/SP		X	
Aços Villares S.A. SP			X
ArcelorMittal /Cia. Siderúrgica Belgo Mineira MG/SP/ES		X	X
Cia. Siderúrgica Nacional (CSN) RJ		X	
Cia. Siderúrgica Paulista (COSIPA) SP		X	
ArcelorMittal /Cia. Siderúrgica Tubarão (CST) ES		X	
Gerdau S.A. MG/PE/RS/ PR/CE/BA	X	X	X
Siderúrgica Barra Mansa S.A. RJ			X
Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A. (USIMINAS) MG		X	
Vallourec & Mannesman Tubes - V & M do Brasil S.A. MG		X	
Villares Metais S.A. SP			X

2.3.3.1 Escória de aciaria; OH, LD ou BOF e EAF

As escórias de aciaria OH, LD ou BOF e EAF são subprodutos derivados do processo de fabricação do aço. Portanto, este material é o resultado da agregação de diversos elementos que não interessam estarem presentes no material aço. Tem como características marcantes ser composta de muitos óxidos, como CaO e MgO e ser expansível, devido às reações químicas desses óxidos. As limitações encontradas no material são : heterogeneidade; alto teor de cal livre e a ausência de atividade hidráulica.

2.3.3.2 Aplicações da escória de aciaria

As escórias de aciaria apresentam grande versatilidade em suas aplicações potenciais. A sua fração graúda, após o período de cura, pode ser considerada como material inerte de elevada dureza, de bom atrito superficial e reduzida porosidade, constituindo-se em um agregado de boa qualidade para as obras de infraestrutura rodoviária: corpo de aterros,

revestimento primário, reforço do subleito, sub-base, base, revestimento, obras de contenção (gabião, rip-rap) e drenagem. Utiliza-se ainda a escória de aciaria na agricultura, como corretivo do solo, em berço de rios, em lastro de ferrovias, no tratamento de águas ácidas e na indústria cimenteira como insumo na produção.

Conforme Kalyoncu (2001) citado por Nascimento e outros (2003) nos EUA foram consumidos cerca de 20 milhões de toneladas de escória em 1999, para uma geração de 25 milhões de toneladas. As principais aplicações foram: bases de estradas (30%), agregados para revestimento asfáltico (27%) e aterro (13%).

Pelos dados de Castelato, 2004 a utilização da escória nos demais países (Figura 2.5), ocorre com distribuição mais equacionada do que no Brasil (Figura 2.4).

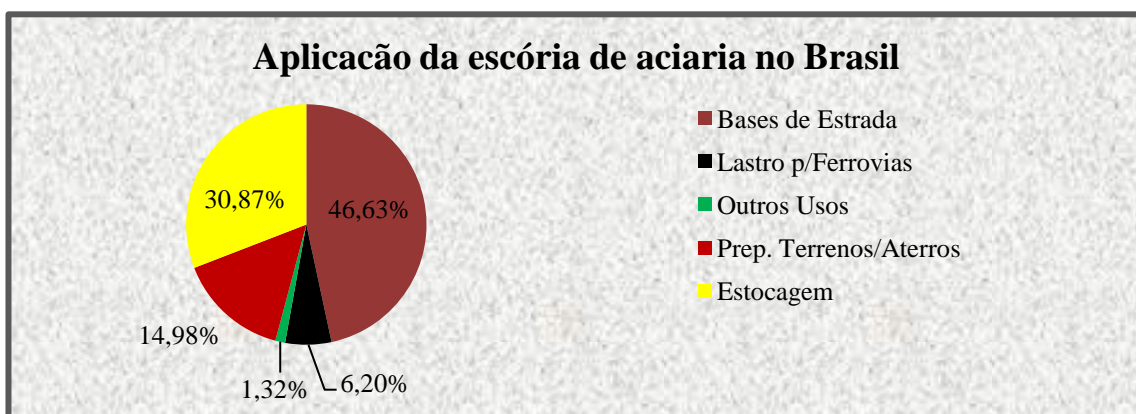


Figura 2.4 - Aplicação da escória de aciaria no Brasil (CASELATO, 2004).

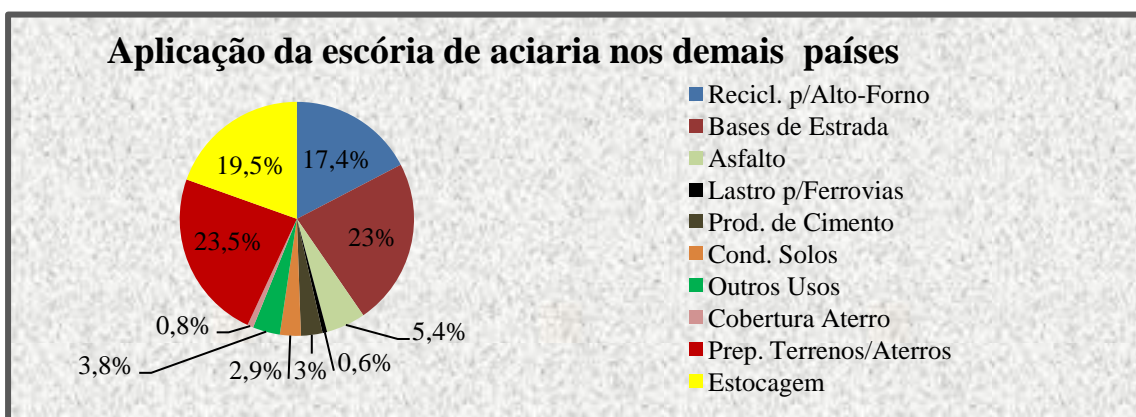


Figura 2.5 - Aplicação da escória de aciaria nos demais países (CASELATO, 2004).

2.3.3.3 Aplicações da escória de aciaria na Europa

Pelos dados de Silva, 2003, a aplicação da escória de aciaria na Europa mostra-se bem racionalizada, o sistema de reaproveitamento é bastante eficaz (Figura 2.6).

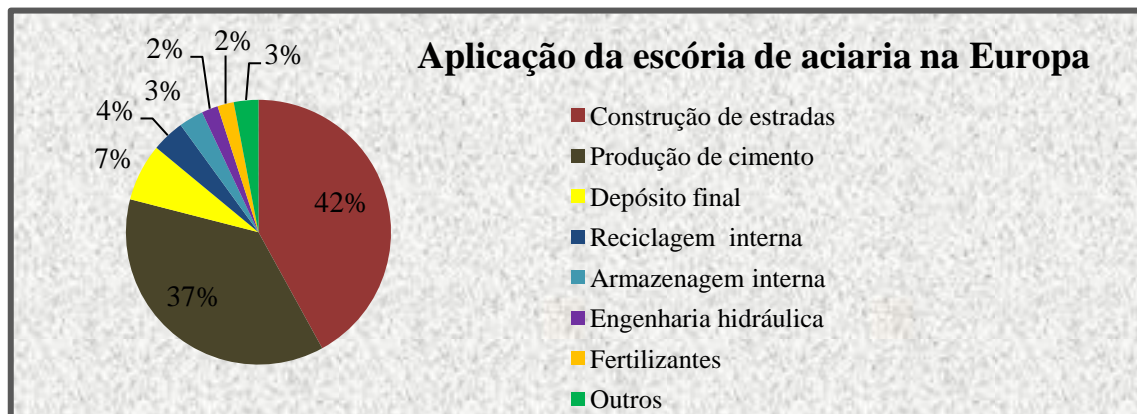


Figura 2.6 – Aplicação da Escória de Aciaria na Europa (SILVA, 2003).

As escórias possuem um campo de aplicação vasto (Tabela 2.3), porém algumas destas possibilidades ainda possuem aproveitamento deficiente.

Tabela 2.3 – Campo de aplicação das escórias de diferentes origens (BRUN & YUAN, 1994 apud GEYER 2001).

CAMPOS DE APLICAÇÃO		PROCEDÊNCIA DA ESCÓRIA		
		Aciaria	Alto-forno	Ferro-liga
Ferroviário	Lastro	X		X
	Sublastro	X		X
Rodoviário	Base	X	X	X
	Sub-Base	X	X	X
	Revestimento asfáltico	X	X	X
	Drenagem	X	X	X
	Proteção de talude	X		X
	Meio-Fio	X	X	X
Obras urbanas (pavimentação)	Pátio industrial	X	X	X
	Estacionamento	X	X	X
Construção civil	Piso de concreto	X	X	X
	Pré-Moldados	X	X	X
	Manilhas/tubos	X	X	X
Agricultura	Corretivo de solos	X	X	
Fábrica De cimento	Substituto do calcário	X		
	Substituto do Minério de ferro	X		
Metalúrgico	Substituto do clínquer		X	
	Fusão	X	X	
	Redução	X	X	

2.4 RESERVAS E PRODUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, AÇO BRUTO E GERAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA NO BRASIL E NO MUNDO

O Brasil, segundo o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) é o quinto país do mundo em reservas naturais de minério de ferro. Ficou com a nona colocação mundial em volume produzido de aço bruto em 2008 (VALE S.A., 2009).

2.4.1 Reservas e produção de minério de ferro, no Brasil e no mundo

As reservas de minério de ferro mundiais e brasileiras são: mundiais - da ordem de 370 bilhões de toneladas, as brasileiras somam 15,8 bilhões de toneladas em reservas medidas e 10,7 bilhões de toneladas em reservas indicadas, totalizando 26,5 bilhões de toneladas. Considerando as reservas em termos de ferro contido no minério, o Brasil se destaca no cenário internacional, devido ao alto teor de ferro encontrado nos minérios hematita (60% de ferro) no Pará, e o itabirito (50% de ferro) em Minas Gerais.

Em 2008 o Brasil foi o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, com uma produção de 409 milhões de toneladas anuais, representando 19,4% da produção mundial, que foi de 2.100 milhões de toneladas no referido ano. O maior produtor mundial de minério de ferro em 2008 foi à China, apesar de não possuir a maior reserva, que pertence a Rússia, a China produziu 600.000.000 t no referido ano.

As quatro principais empresas produtoras de minério de ferro no mundo estão listadas abaixo na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Relação das quatro maiores empresas produtoras de minério de ferro do mundo (SINFERBASE et al., 2009 *apud* IBRAM, 2009).

MAIORES PRODUTORAS MUNDIAIS DE MINERIO DE FERRO - 2008	
POSICIONAMENTO	EMPRESA
1º	VALE S.A.
2º	Rio Tinto
3º	BHP Biliton
4º	Anglo American

Pela Tabela 2.5 observa-se a relação das maiores empresas produtoras de minério de ferro do Brasil em 2008, somente a empresa Vale produz mais de três quartos do total produzido no país, ou precisamente 79%.

Tabela 2.5 – Relação das maiores empresas produtoras de minério de ferro do Brasil em 2008 (SINFERBASE et al., 2009 *apud* IBRAM, 2009).

MAIORES PRODUTORAS BRASILEIRAS DE MINERIO DE FERRO - 2008	
EMPRESAS	PRODUÇÃO (%)
Vale S.A.	79,0
CSN	7,4
Anglo American/MMX	3,0
Outras	10,6

Os estados brasileiros que mais produziram minério de ferro em 2008 foram Minas Gerais e Pará. Pode-se observar através da Tabela 2.6, que estes dois estados, apresentam uma relevante produção de minério de ferro, onde a soma das suas produções perfazem 97% do total produzido no país. (SINFERBASE et al., 2009 *apud* IBRAM, 2009).

Tabela 2.6 - Percentual total da produção de minério de ferro brasileira distribuído por Estado em 2008 (SINFERBASE et al., 2009 *apud* IBRAM, 2009).

PRODUÇÃO BRASILEIRA DE MINÉRIO DE FERRO 2008 – PERCENTUAL POR ESTADO PRODUTOR	
ESTADOS	PRODUÇÃO (%)
Minas Gerais	71
Pará	26
Outros	3

2.4.2 Produção de aço bruto no Brasil

Conforme publicado em novembro de 2008, pelo IBS, a produção brasileira de aço bruto, de novembro de 2007 a novembro de 2008, foi de 35.076.700 t, demonstrando

um percentual de crescimento em volume de produção da ordem de 19,1%. A geração média de escória de aciaria é da ordem de 120 kg por tonelada de aço bruto produzido. Estima-se que a geração de escória de aciaria no Brasil seja próxima dos de 4,21 milhões de toneladas por ano. É possível constatar pela Tabela 2.7 que a produção de aço bruto no Brasil encontra-se bastante concentrada em alguns Estados, principalmente em Minas Gerais, com um total de 35,8% da totalidade produzida no país neste período analisado.

Tabela 2.7 – Produção brasileira de aço bruto: jan. 2008 – Nov. 2008 (IBS, 2008).

PRODUÇÃO BRASILEIRA DE AÇO BRUTO POR ESTADO (jan. 2008 - nov. 2008)		
ESTADO	PRODUÇÃO (t)	PRODUÇÃO (%)
Minas Gerais	11.466.800	35,8
São Paulo	6.378.700	19,9
Espírito Santo	6.169.100	19,2
Rio de Janeiro	6.006.400	18,7
Outros Estados	2.045.600	6,4
Total	32.066.600	100,0

2.4.3 Produção de aço bruto na América Latina

Emprega-se também, nesta avaliação, os mesmos parâmetros de intervalo temporal, variando entre os meses de janeiro a outubro de 2008, utiliza-se como fonte de informação o ILAFA (Instituto Latinoamericano del Fierro y el Acero), que proporcionou e viabilizou constatar a relevante produção de aço bruto no âmbito latino-americano, onde a mesma alcançou o valor de 58.623.200 toneladas, distribuído segundo os termos da Tabela 2.8. A contribuição brasileira no volume total da produção de aço bruto na América Latina no referido período é extremamente substancial, ou seja, o Brasil contribuiu com mais de cinquenta por cento (50%) da totalidade produzida. Estes números relatam a importância da indústria siderúrgica brasileira, não somente no contexto latino-americano, mas também mundial.

Tabela 2.8 – Produção Latino-Americana de aço bruto: jan. 2008 - out. 2008 (ILAFA, 2008 *apud* IBS, 2008).

PRODUÇÃO LATINO-AMERICANA DE AÇO BRUTO (jan. 2008 - out. 2008)		
PAÍS	PRODUÇÃO (t)	PRODUÇÃO (%)
Brasil	29.743.000	50,74
México	15.907.600	27,13
Argentina	4.891.600	8,34
Venezuela	3.596.700	6,13
Chile	1.391.000	2,37
Peru	975.400	1,66
Colômbia	936.700	1,60
Trinidad-Tobago	453.900	0,77
Outros países da América Central	296.600	0,51
Cuba	225.400	0,38
Uruguai	69.100	*
Paraguai	68.400	*
Equador	67.800	*

* (Somatória do percentual produzido pelos três países = 0,35%)

2.4.4 Produção de aço bruto no mundo.

Como parâmetro de análise, também será utilizado o período de janeiro a outubro de 2008 (Tabela 2.9), onde a produção mundial totalizou: 1.136.238.000 t, conforme o IISI - International Iron and Steel Institute (Instituto Internacional do Ferro e do Aço).

Tabela 2.9 – Produção mundial de aço bruto - jan 2008 - out 2008 (IISI, 2008 *apud* IBS, 2008).

PRODUÇÃO MUNDIAL DE AÇO BRUTO (jan. 2008 - out. 2008)		
PAÍS	PRODUÇÃO (t)	PRODUÇÃO (%)
China	427.288.000	37,61
UE	176.651.000	15,55
Japão	102.441.000	9,02
CEI	102.417.000	9,01
EUA	83.030.000	7,31
Outros países	244.411.000	21,51
Total	1.136.238.000	100,00

Destacando-se, indiscutivelmente, a produção chinesa com 427.228.000 t, representando 37,61% do total da produção mundial de aço bruto, um valor extremamente proeminente dentro do contexto mundial. Estes números refletem a pujança da indústria siderúrgica chinesa.

2.4.5 Análise sobre a produção de aço bruto no Brasil e no mundo

Segundo dados divulgados em 29/01/2009 pela World Steel Association (Associação Mundial do Aço), devido à crise mundial da economia, a produção brasileira de aço em 2008, apresentou uma queda, concentrada nos últimos meses do ano. A produção em 2008 teve seu auge em julho com 3,198 milhões de toneladas produzidas neste referido mês. Desde então as principais usinas: CSN, USIMINAS, Gerdau e ArcelorMittal, reduziram a produção. A produção nacional em dezembro de 2008 foi de 1,646 milhões de toneladas, recuo de 29% em relação à produção de novembro deste mesmo ano, quando a produção somou 2,324 milhões de toneladas. Esta retração na produção teve seu início em outubro de 2008, quando a produção mensal somou 2,897 milhões de toneladas, recuo de 3% em comparação com o mês anterior. Em novembro de 2008 o volume caiu 19%, uma redução na produção de aço bruto de 0,2% em 2008, passando de 33,8 milhões de toneladas em 2007 para 33,7 milhões de toneladas em 2008.

Segundo a INTELOG (Inteligência em Gestão Logística), apesar da ocorrência de queda na produção do aço bruto em diversos países da Europa, Brasil, EUA, mesmo com a crise na economia, na Ásia, ocorreu um acréscimo de 1,9%, liderada pela China, maior produtora e consumidora de aço bruto do mundo. A República chinesa somou 502 milhões de toneladas, crescendo 2,2%, se tornando o primeiro país na história, a transpor o montante de produção de aço bruto de meio bilhão de toneladas em um ano, crescendo 2,6%, conforme podemos observar pela Tabela 2.10, que relaciona os dez maiores produtores de aço bruto do mundo. Todavia, no corrente ano (2010), após a crise econômica mundial, a siderurgia brasileira retoma o ritmo de crescimento. Os números consolidados até o momento indicam que o setor vem se recuperando. No ano de 2009 o fechamento de mais da metade dos altos-fornos existentes no país tornou-se símbolo das dificuldades vivenciadas pelas usinas. A queda na produção de aço bruto, no comparativo com 2008, chegou a 21,4%. totalizando 26,5 milhões. O cenário projetado para 2010 difere bastante do descrito acima. Já em janeiro a produção de aço bruto somou 2,7 milhões de toneladas, volume 4,4% maior do que o do mês anterior (dez. de 2009) e, 66,6% superior ao do mesmo mês de 2009. A previsão do IABr (Instituto aço Brasil) para o ano é de recuperação no consumo doméstico (alta de

23,3%), possibilitando uma produção de 33,2 milhões de toneladas de aço bruto, próximo ao resultado de 2008 (33,7 milhões de toneladas) (INFOMET/PORTOS E NAVIOS, 2010 *apud* Metálica – USIMINAS, 2010).

Tabela 2.10 – Produção mundial de aço bruto em 2008 (VALE S.A., 2009).

PRODUÇÃO MUNDIAL DE AÇO BRUTO ANUAL - 2008		
POSICIONAMENTO	PAÍS	VOLUME TOTAL (1000 t)
1º	China	502.010
2º	Japão	118.740
3º	EUA	91.490
4º	Rússia	68.510
5º	Índia	55.950
6º	Coréia do Sul	53.490
7º	Alemanha	45.830
8º	Ucrânia	37.100
9º	Brasil	33.710
10º	Itália	30.480

2.4.6 Comparativo sobre produção de minério de ferro e aço bruto, no mundo e no Brasil

No ano de 2008 a China liderou a produção mundial de aço com 37,61% do total, o Brasil maior produtor da América Latina, com 50,74%, se sobressaem como dois países expoentes no setor siderúrgico. Entretanto, estes números demonstram extrema diferença nos volumes produzidos entre estes dois líderes de mercado mundial e latino-americano, respectivamente, pois a produção brasileira representa, conforme as estatísticas, aqui apresentadas, somente 6,97% do montante produzido pela China. O Brasil contribuiu com 2,62% do aço bruto produzido no mundo em 2008, que foi de 1,33 bilhões de toneladas. A produção brasileira de aço poderia ser maior, tendo em vista o potencial instalado, um parque siderúrgico relevante e expressivas reservas do principal insumo, o minério de ferro. O grupo ArcelorMittal, maior produtor mundial de aço bruto em 2008, apesar de não ser uma organização genuinamente brasileira, é uma das empresas integrante deste conjunto siderúrgico operante no país (Tabela 2.11).

Tabela 2.11 – Relação das dez maiores empresas produtoras de aço bruto no mundo em 2008 (ABM, 2008).

MAIORES PRODUTORAS MUNDIAIS DE AÇO BRUTO ATUALMENTE	
POSICIONAMENTO	EMPRESAS
1 ^a	ArcelorMittal
2 ^a	Nippon Steel
3 ^a	JFE
4 ^a	Posco
5 ^a	Broosteel
6 ^a	Tata Steel
7 ^a	Anshan Benxi
8 ^a	Jiangsu Shagang
9 ^a	Tangshan
10 ^a	Us Steel

2.5 TIPIFICAÇÃO DAS USINAS SIDERÚRGICAS E OS PROCESSOS PRODUTIVOS DA ESCÓRIA DE ACIARIA

As usinas siderúrgicas se subdividem em dois grupos, integradas e semi-integradas. As semi-integradas são aquelas onde o aço é fabricado a partir da sucata e do ferro gusa, ou gusa sólido, não ocorrendo à fase de redução do minério de ferro. As usinas integradas dispõem de um sistema que utilizam também os altos-fornos, onde o aço é obtido do processamento do minério de ferro com a produção do gusa líquido, demonstrado pela Figura 2.7, com o fluxograma simplificado de produção do aço.

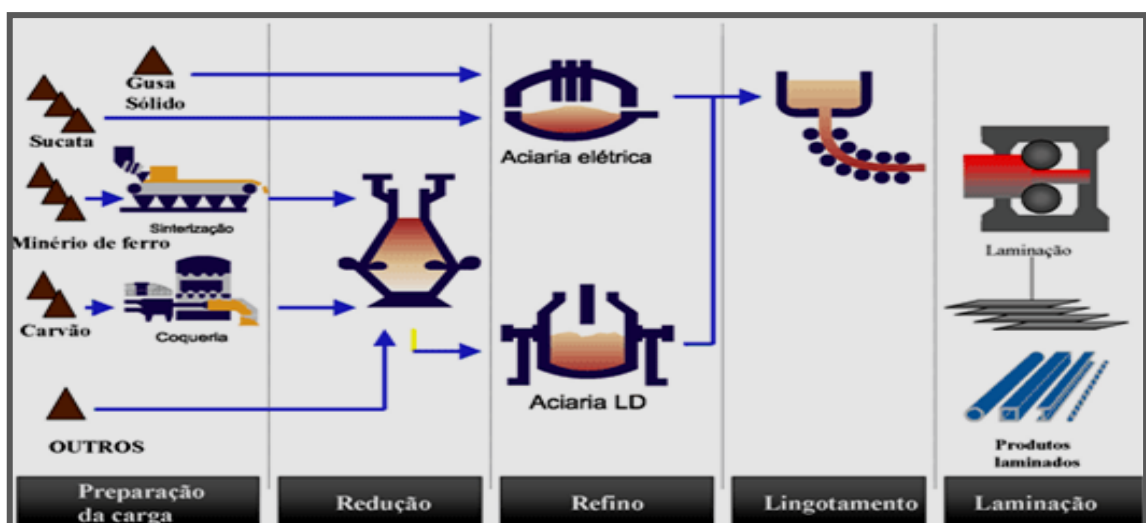


Figura 2.7 – Fluxo simplificado de produção do aço (IBS, 2008).

A aciaria é o setor da usina onde é realizado refino primário do ferro gusa líquido, obtendo-se o aço. O processo mais utilizado nas usinas integradas é a conversão do gusa no processo LD – Linz Donawitz ou BOF – Blast Oxygen Furnace. No processo de fabricação do aço LD, adiciona-se ao forno a sucata, o ferro gusa líquido, em seguida é lançado um jato de oxigênio gasoso com velocidade supersônica (ARAÚJO, 1997; GENTILE & MOURÃO, 2006, *apud* RODRIGUES, 2007).

A Figura 2.8 retrata o ciclo do refino do aço na aciaria, com reaproveitamento da sucata em uma usina semi-integrada EAF, paralelamente o minério de ferro já reduzido, com a adição de carvão, também em processo de refino em uma usina LD integrada.



Figura 2.8 – Ciclo de refino do aço com reaproveitamento da sucata (IBS, 2008).

A produção de aço bruto no Brasil em 1999 já apresentava uma preponderância dos fornos tipo LD ou BOF, sobre os elétricos EAF. Em uma produção de aço bruto de 24.996.000 t, um total de 19.115.000 t (76,5%) foram em fornos a oxigênio LD ou BOF, 5.476.000 t (21,9%) produzidos em fornos elétrico EAF e 405.000 t (1,6%) em fornos Siemens-Martin (Open Hearth). Este último, devido a baixa produtividade, tende ao desuso (GEYER, 2001).

Pela Figura 2.9 pode-se observar de forma esquemática o fluxo completo de produção do aço em uma usina siderúrgica integrada.

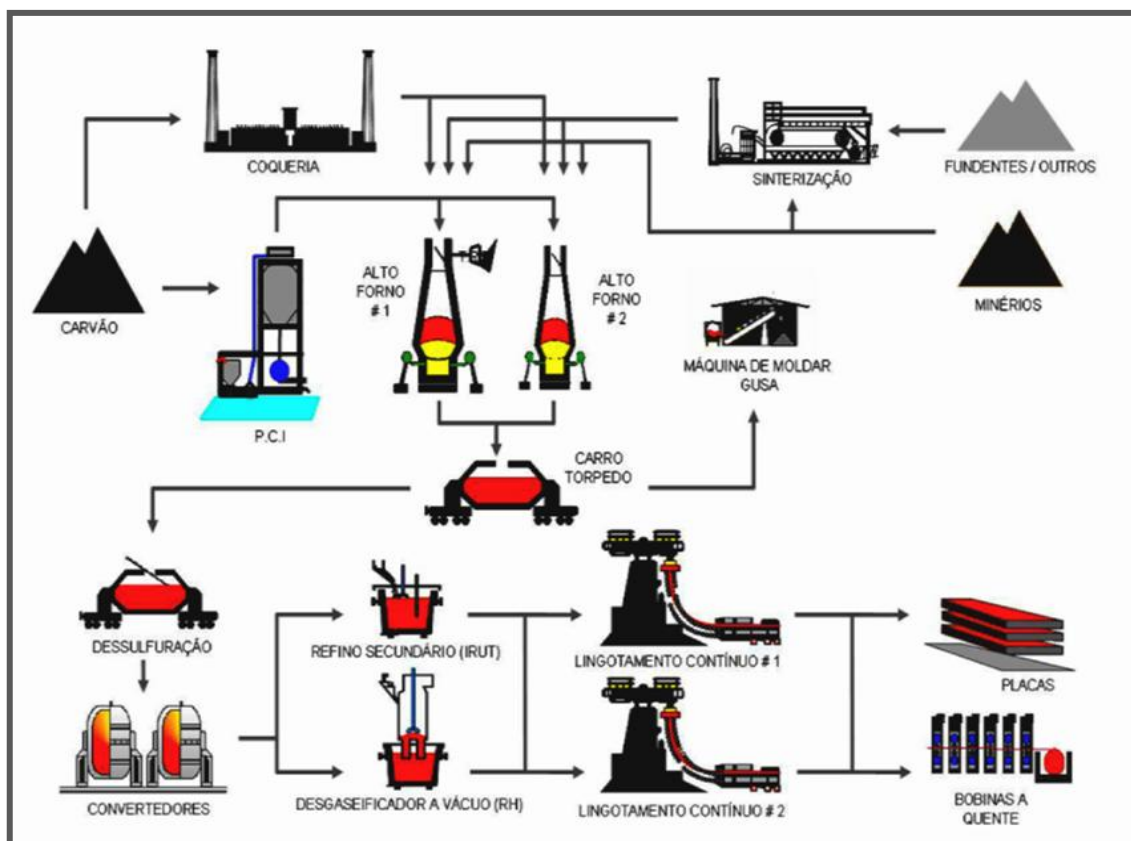


Figura 2.9 – Fluxograma de produção - Usina integrada (MOREIRA & LANA, 2003).

2.6 PRODUÇÃO BRASILEIRA DE AÇO BRUTO DISTRIBUÍDO PELO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Subsidiados pelos dados da Tabela 2.12, observa-se que em 2008, um relevante percentual do volume de aço bruto fabricado no Brasil, acima de 75% da totalidade produzida, transcorreu em usinas a oxigênio LD ou BOF e EOF.

Tabela 2.12 – Distribuição da fabricação brasileira de aço bruto por processo em 2008 (IBS, 2008).

PRODUÇÃO BRASILEIRA DE AÇO BRUTO POR PROCESSO DE FABRICAÇÃO		
(Jan. - Nov. /2008)		
ACIARIA	Volume (1000 t)	VOLUME (%)
OXIGÊNIO – LD ou BOF/EOF	24.349,6	75,9
ELÉTRICO - EAF	7.717,0	24,1
TOTAL	32.066,6	100,0

2.7 PRODUÇÃO DO AÇO E GERAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

A aciaria está presente nos duas modelagens de produção siderúrgica, tanto na usina integrada, quanto na semi-integrada. É o setor onde o gusa é refinado e obtém-se o aço. A escória de aciaria é gerada durante o refino que pode ser realizado, em fornos a oxigênio ou elétricos, dos tipos: LD ou BOF, EAF e OH.

A de geração da escória de aciaria OH (Open Hearth) que utiliza forno do tipo Siemens-Martin, fundamenta-se em adicionar a sucata metálica junto com o calcário e o minério de ferro, injetando-se oxigênio para provocar a fusão e a agitação do banho metálico, no refino, adiciona-se o CaO principalmente para remoção do fósforo. A produtividade é de 300 t de aço em um período de 5 a 14 horas, no processo BOF ou LD, a mesma quantidade de aço é obtida em apenas 30 a 45 minutos de sopro (MACHADO, 2000).

Os fornos a oxigênio são chamados de conversores, os mais utilizados atualmente são fornos LD ou BOF e fazem parte de usinas integradas com altos-fornos; agregado as LD ou BOF encontra-se atualmente os fornos EOF (Energy Optimizing Furnance) ou (Forno de Energia Otimizada), trata-se de um forno de fusão e refino para a produção de aço líquido, trabalhando com sopro de (O comb.) oxigênio combinado, atmosférico e submerso, em uma carga inicial que contém gusa líquido, sucata pré-aquecida no processo e fluxos para a formação de escória (MINITECNOLOGIAS, 2009).

As matérias-primas utilizadas no forno EOF são: gusa líquido, sucata mais gusa sólido (alguma participação de sucata mais gusa sólido), cal (a mesma utilizada nos processos anteriores), energia química (através do uso intensivo de oxigênio). Nesse processo, o forno é carregado com ferro-gusa líquido e sucata, injeta-se oxigênio através de ventaneiras, promovendo agitação e aceleração da reações. O elemento primordial é o pré-aquecimento da sucata com os gases do próprio forno. Os fornos elétricos são chamados EAF (Eletric Arc Furnace) e trabalham diferentemente dos fornos LD ou BOF, recebem a sucata e não o gusa líquido. Nos processos BOF e EAF, a geração de escória de aciaria varia de 100 a 170 kg de escória por tonelada de aço produzido, dependendo das características do processo de geração, das matérias-primas utilizadas e

das especificações dos aços produzidos por siderúrgica. Para a escória de aciaria LD, são gerados, aproximadamente 110 kg de escória de aciaria por tonelada de aço (ARAUJO, 1997).

A Figura 2.10 exemplifica o processo de produção do aço, através de uma usina integrada conjugada; utilizando conversores a oxigênio e forno EAF e forno tipo panela.

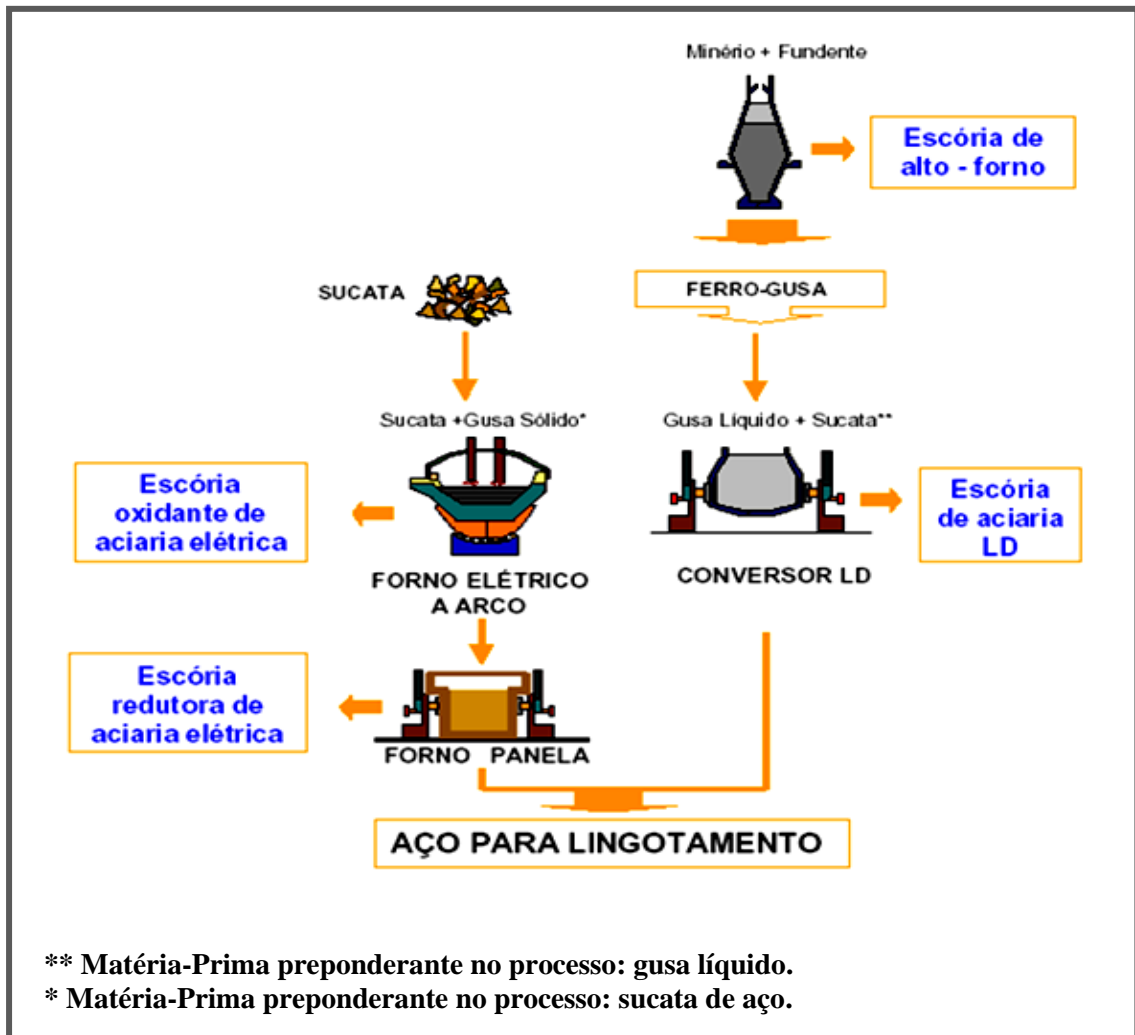


Figura 2.10 – Esquema de planta siderúrgica - Integrada (forno LD) - Semi-Integrada (forno EAF) utilizando-se o forno tipo panela para redução da escória de aciaria (MASUERO *et al.*, 2004 *apud* POLESE, 2007).

Neste sistema de planta siderúrgica, após o processo de redução do aço no AF, ocorre à geração da escória de alto-forno. Sequencialmente, através do refino em conversor a oxigênio é obtido à escória de aciaria LD e paralelamente é executada a redução,

utilizando-se forno elétrico, onde no primeiro forno EAF, são feitas adições de grafite, carbono e oxigênio, originando por este processo, a escória de refino oxidante de aciaria elétrica. Neste forno (EAF) são gerados em torno de 80% da escória elétrica produzida. No forno panela, são feitas adições de ligas ferro-silício, ferro-manganês e cal para absorver e neutralizar os óxidos ácidos que atacam o forno, assim é gerada a escória de refino redutora de aciaria elétrica. Estas adições, também ocorrem, para ajustar a composição química do aço. (CASTELO BRANCO, 2004).

A Figura 2.11, retrata o fluxo de produção do aço e a geração da escória de aciaria LD ou BOF em usina integrada, utilizando convertedores a oxigênio.

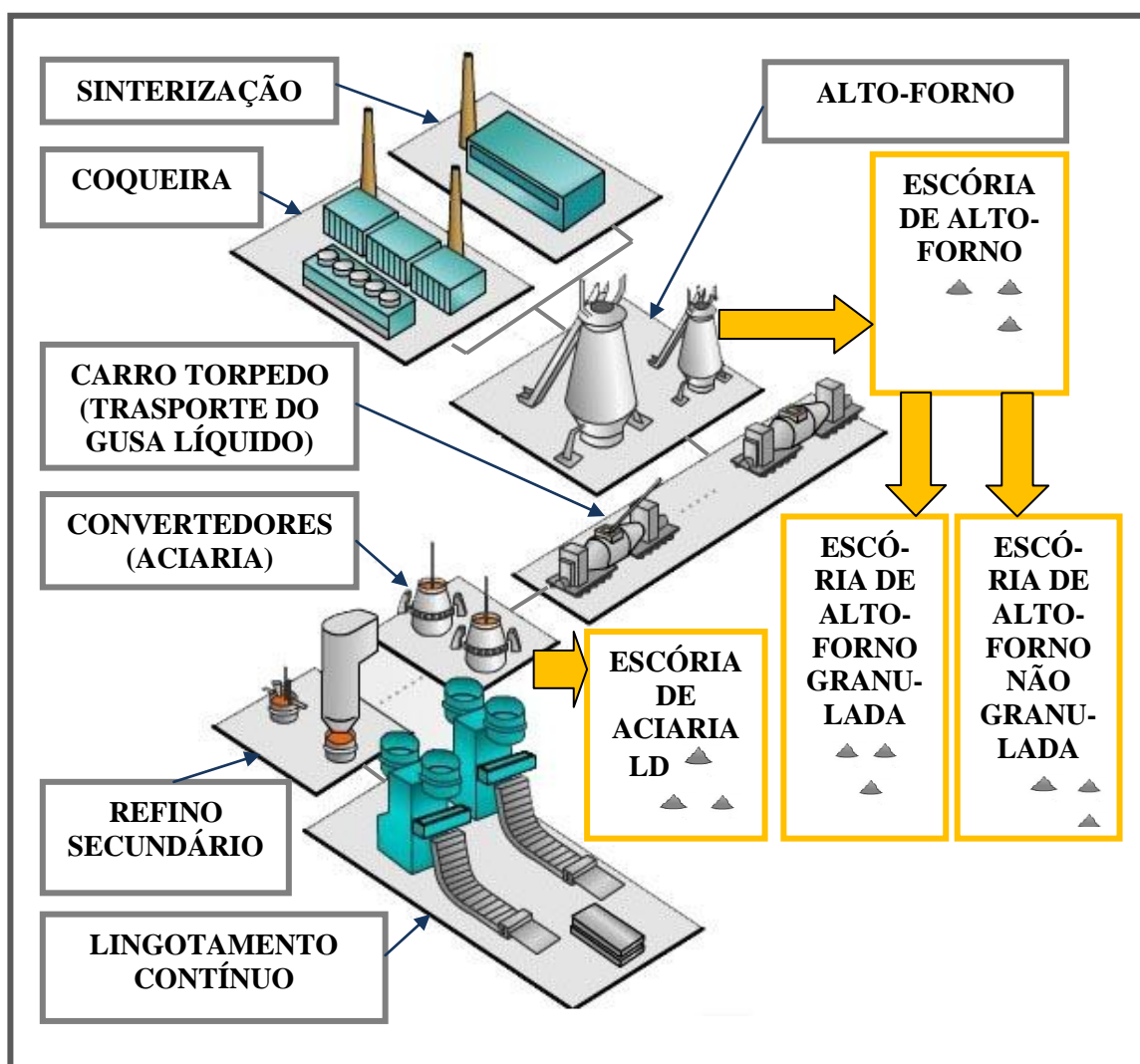


Figura 2.11 - Fluxograma da fabricação do aço e geração da escória de aciaria LD ou BOF em usina integrada utilizando conversores a oxigênio (CST/ARCELORMITTAL, 2008).

Segundo Sales (2005), foi constatado no Brasil em 2003 que 1,8% das aciarias utilizaram o tipo de forno de energia otimizada - EOF (Figura 2.12).

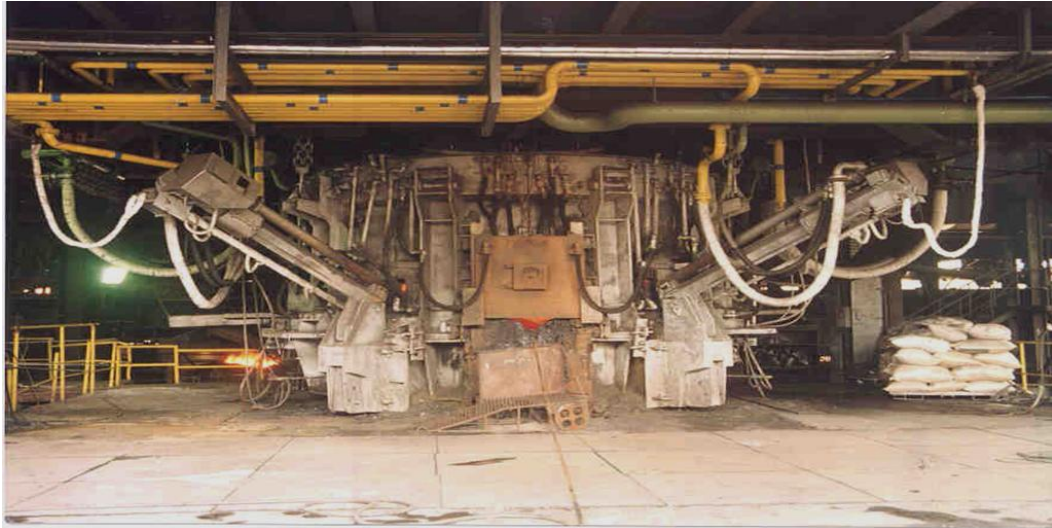


Figura 2.12 - Forno de Energia Otimizada – EOF (MINITECNOLOGIAS, 2009).

2.7.1 Refino do aço e geração da escória de aciaria LD ou BOF

O processo de refino do aço no conversor a oxigênio, pelo processo LD ou BOF, objetiva reduzir os teores de ferro-gusa de 4% para 0,1% e também outros elementos como o silício, enxofre ou fósforo. Neste processo a sucata e o gusa líquido em temperatura de 1300 °C a 1450 °C, são adicionados ao conversor, que é colocado na posição vertical, e uma lança é introduzida, injetando oxigênio gasoso em alta velocidade (ARAUJO, 1997).

2.7.1.1 Etapas do refino e geração da escória de aciaria LD ou BOF

Segundo Moreira & Lana (2003) o ciclo de operações do refino envolve seis etapas:

- a) 1ª etapa: posicionamento convertedor, com a inclinação apropriada para carregamento;
- b) 2ª etapa: carregamento de carga sólida;
- c) 3ª etapa: carregamento de gusa líquido;
- d) 4ª etapa: sopro supersônico, (medição de temperatura e retirada de amostras);

- e) 5ª etapa: vazamento de aço;
- f) 6ª etapa: vazamento de escória.

A Figura 2.13 (a), (b), (c) e (d), demonstra como se processa as quatro primeiras etapas, onde a sucata e o gusa líquido são adicionados ao conversor e sequencialmente é introduzido uma lança injetando oxigênio gasoso a alta velocidade.

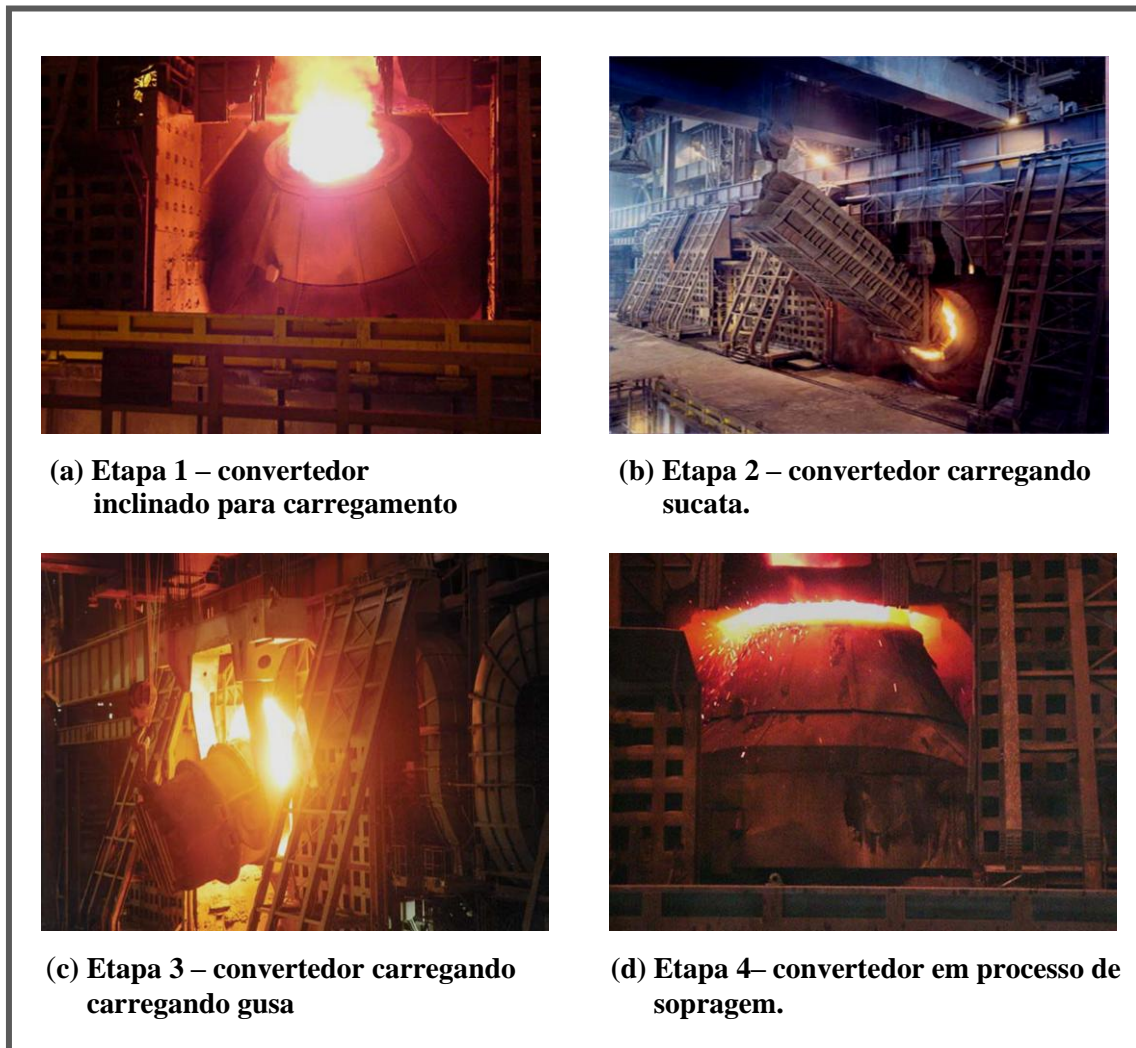



Figura 2.13 (a), (b), (c) e (d) – Etapas: (1, 2, 3 e 4) referente ao ciclo de operações do refino do aço e geração da escória de aciaria pelo método do conversor a oxigênio – LD (MOREIRA &LANA, 2003).

Após o sopro de oxigênio, ocorre à fusão e o refino da carga metálica, (gusa e sucata), nos convertedores a oxigênio pode-se também utilizar a sucata, sequencialmente os

elementos contidos no ferro-gusa são oxidados, decorrendo na elevação da temperatura do metal e eliminação dos elementos indesejáveis (Figura 2.14).



$$\frac{1}{2} \{O_2\} \rightarrow [O]$$

$$[Si] + 2[O] \rightarrow (SiO_2)$$

$$[Mn] + [O] \rightarrow (MnO)$$

$$2[P] + 5[O] \rightarrow (P_2O_5)$$

$$[Fe] + \frac{1}{2} \{O_2\} \rightarrow (FeO)$$

$$2(FeO) + \frac{1}{2} \{O_2\} \rightarrow (Fe_2O_3)$$

$$[C] + [O] \rightarrow (CO)$$

CONVERSOR A OXIGÊNIO DURANTE O SOPRO SUPERSÔNICO E AS REAÇÕES QUÍMICAS GERADAS NA OPRPERAÇÃO

Figura 2.14 – Detalhe do conversor a oxigênio durante o sopro supersônico e as reações químicas geradas na operação (MOREIRA &LANA, 2003).

O aço líquido e a escória resultante ficam separados dentro do conversor devido à diferença de densidade. Aproveita-se este fato para retirá-los do conversor separadamente, o aço sendo vertido em uma panela apropriada e a escória no "pote de escória" (Recipiente de aço fundido que é transportado através de ferrovia). Entretanto no pote de escória ainda há aço remanescente, cerca de 6% em peso de metal livre (FeO) misturado com a escória, que após o beneficiamento, pode ser reaproveitado,

consistindo nas etapas cinco e seis do ciclo de refino, onde o convertedor vaza na panela e posteriormente no pote, exemplificado pela Figura 2.15 (a) e (b).

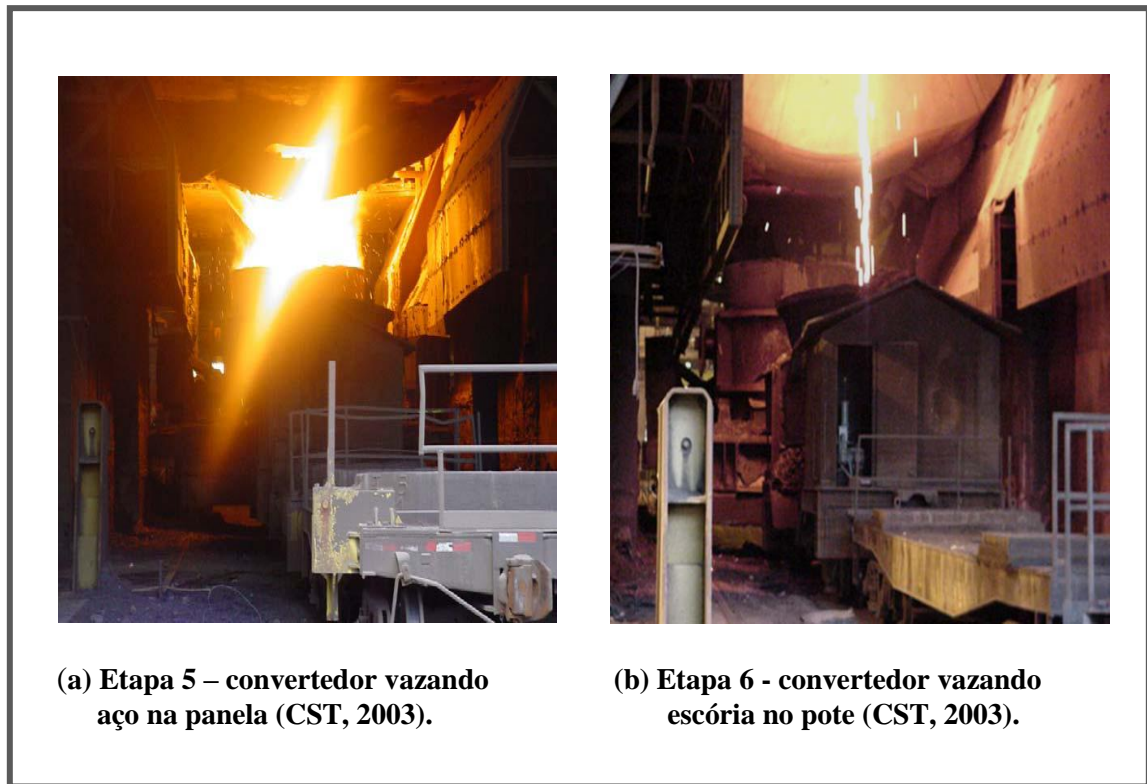


Figura 2.15 (a) e (b) - Etapas (5 e 6) referente ao ciclo de operações do refino do aço e geração da escória de aciaria pelo método do convertedor a oxigênio – LD (MOREIRA &LANA, 2003).

2.7.2 Refino do aço e geração da escória de aciaria EAF (Forno elétrico)

O refino do aço em forno EAF consiste na fusão de sucata de aço gerada por um arco elétrico, formado entre o aço e os eletrodos de grafite ou carvão amorfo. Após, injeta-se oxigênio através de uma lança, para promover a reação de oxidação do carbono, silício e fósforo (ARAUJO, 1997).

A Figura 2.16 demonstra o fluxograma produtivo do aço e a geração da escória de aciaria através de forno EAF e forno panela em uma usina semi-integrada e a Figura 2.17 exemplifica a produção e geração também em forno EAF e forno panela, porém em usina integrada. Ambas utilizam o gusa sólido, entretanto, no sistema semi-integrado se adquire ou produz fora da planta e no integrado produz in loco.

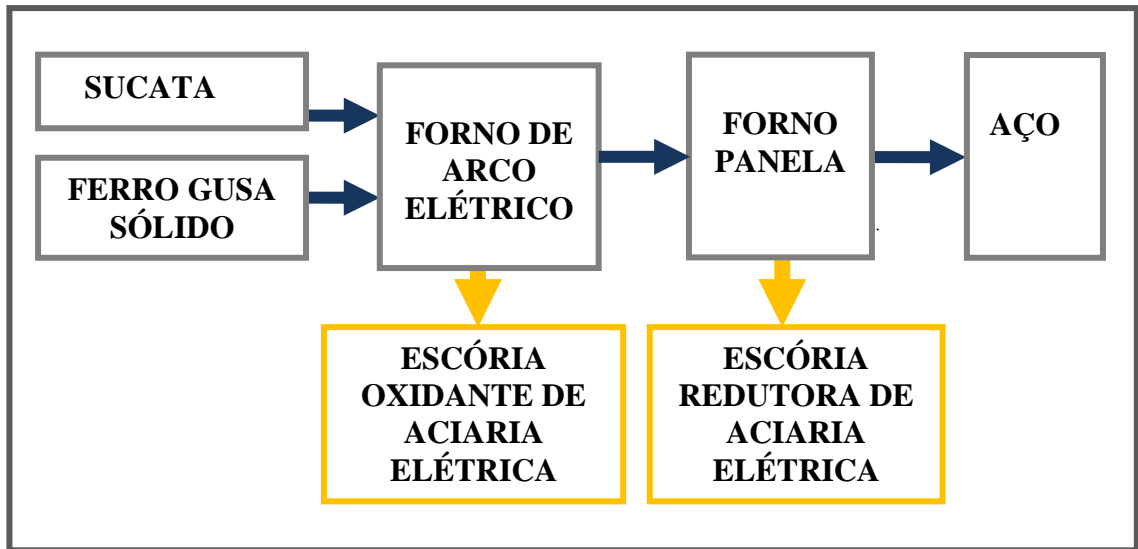


Figura 2.16 - Fluxograma da fabricação do aço e geração da escória de aciaria elétrica EAF em uma usina semi-integrada.

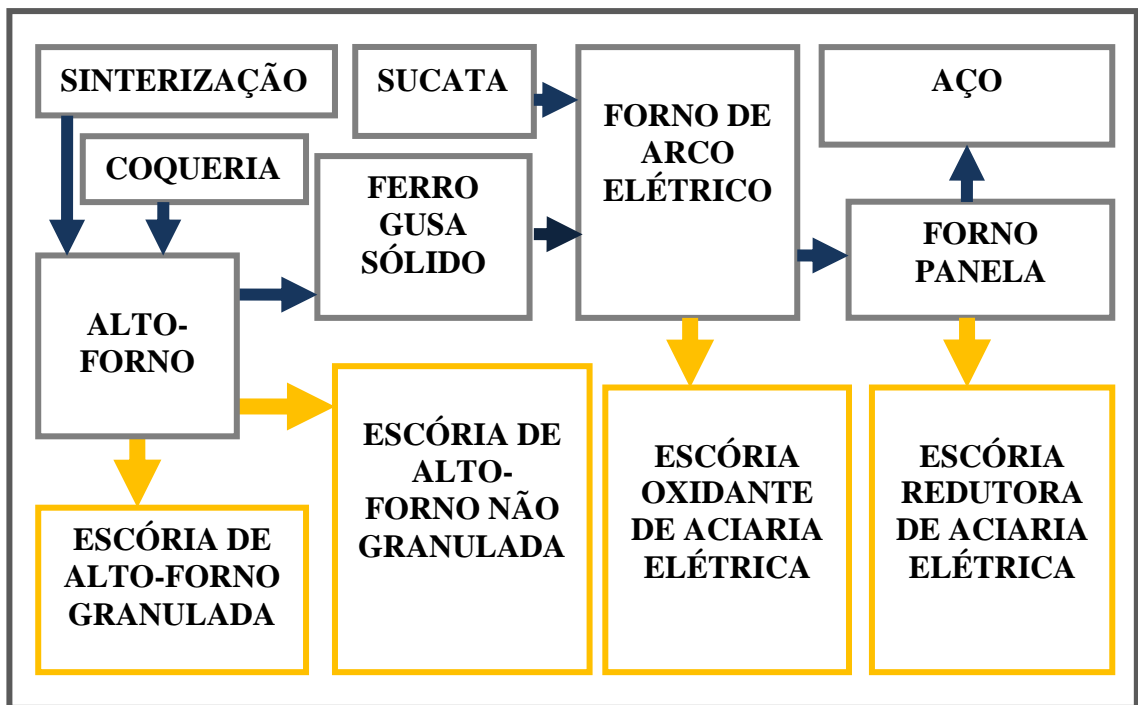


Figura 2.17 - Fluxograma da fabricação do aço e geração da escória de aciaria elétrica EAF em uma usina integrada.

2.7.2.1 Etapas do refino e geração da escória de aciaria EAF

A esquematização do refino do aço em forno de arco elétrico (EAF) é constituída por um ciclo com seis etapas. Distribuídas na seguinte ordem:

a) 1ª etapa: consiste no carregamento da sucata (Figura 2.18);

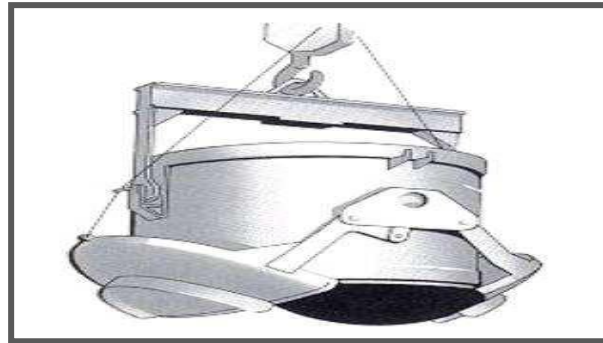


Figura 2.18 - Cestão de Carregamento de Sucata (SALES, 2005).

b) 2ª etapa: funda-se no acionamento do forno EAF (Figura 2.19);

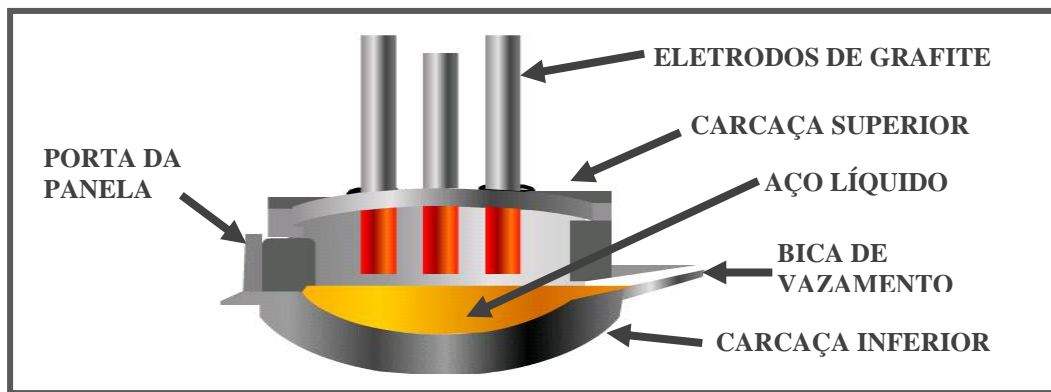


Figura 2.19 – Estrutura física do forno EAF (TASHIRO, 2007).

c) 3ª etapa: abertura de arco elétrico entre os eletrodos e a carga metálica com injeção de oxigênio e formação da primeira poça de aço líquido (Figura 2.20);

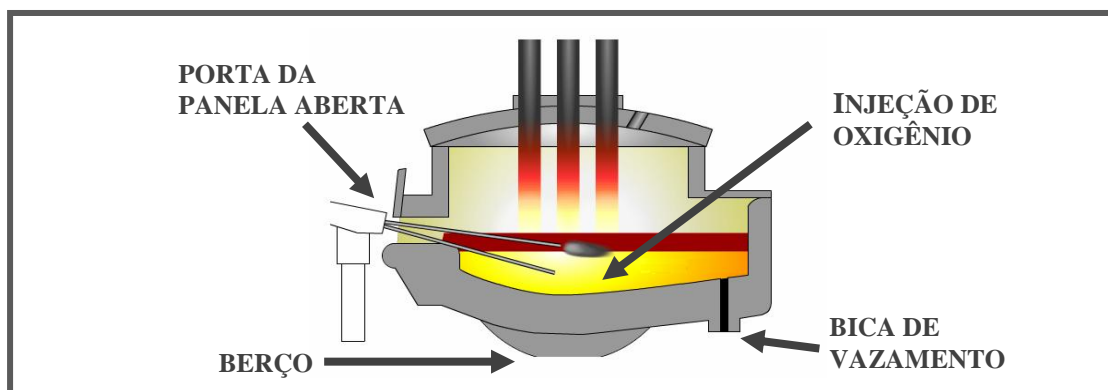


Figura 2.20 – Injeção de oxigênio forno EAF (METSOL et al., 2007 *apud* POLESE, 2007).

- d) 4ª etapa: aumento da poça de aço até que toda carga metálica seja derretida;
- e) 5ª etapa: fusão total da sucata com a temperatura do aço líquido próxima de 1570 °C e início do período de refino e formação de escórias, (Figura 2.21);
- f) 6ª etapa: vazamento do aço e posteriormente da escória em panelas distintas (ARAUJO, 1997).



Figura 2.21 - Fusão em Forno Elétrico - EAF (SALES, 2005).

Através do forno panela (Figura 2.22), é ajustada a composição química e dado um sobreaquecimento para compensar as perdas térmicas. O oxigênio controla a química do processo, estando este tanto na forma de óxidos, quanto livre. É preciso ajustá-lo e para isso, são usadas escórias.



Figura 2.22 - Forno panela (CASTELO BRANCO, 2004).

As escórias no forno panela absorvem os óxidos, controlam o ataque aos refratários, reduzem as perdas térmicas e faz parte de todo processo onde existem aços líquidos. O

forno panela tem a função precípua de aumentar a produtividade dos fornos elétricos de fusão, acertar, a composição química específica para cada tipo de aço e a temperatura de vazamento, além de conferir a homogeneidade química a corrida (banho) e conferir homogeneidade térmica ao aço. O forno panela é capaz de aumentar a produtividade dos fornos elétricos de fusão, uma vez que permite: a adição de carvão e ferroligas, liberando o forno EAF desta etapa. (SALES, 2005).

2.7.3 Escória de aciaria EAF: oxidante e redutora

A escória de aciaria elétrica pode ser classificada em duas categorias, a oxidante e a redutora, conforme as características ambientais do forno durante o refino. A escória oxidante é produzida no forno elétrico EAF, pela injeção do oxigênio no aço fundido, resultando na oxidação do conteúdo de cálcio, produzindo o óxido de cálcio (CaO), e o (Si) silício produzindo o pentóxido de fósforo (P₂O₅) presentes no aço. A redutora é gerada após o vazamento da oxidada, pela adição de CaO e fluoreto de cálcio (CaF₂) para promover a dessulfuração do aço líquido e a adição de elementos de liga (MACHADO, 2000).

2.7.4 Reações químicas no processo de fabricação do aço e geração da escória de aciaria

No processo de fabricação do aço e geração da escória de aciaria, decorrem diversas reações químicas. A Tabela 2.13 ilustra as médias dos principais compostos químicos componentes da escória de aciaria no Brasil, Japão e Alemanha.

Tabela 2.13 – Comparativo dos percentuais médios dos principais compostos químicos da escória de aciaria no Brasil, Japão e Alemanha (IBS, 1998 *apud* LANA, 2003).

MÉDIAS DOS PRINCIPAIS COMPOSTOS QUÍMICOS DA ESCÓRIA DE ACIARIA (%)			
ELEMENTO QUÍMICO (%)	PAÍS		
	BRASIL	JAPÃO	ALEMANHA
Óxido de cálcio (CaO)	23 - 46	42 - 44	48 - 54
Óxido de magnésio (MgO)	5 - 13	3 - 7	1 - 4
Dióxido de silício (SiO ₂)	11 - 15	11 - 14	11 - 18
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0,8 - 4	1 - 2	1 - 4
Ferro total (Fe total)	14 - 22	18 - 21	14 - 19

2.7.4.1 Reações químicas no processo de produção do aço e geração da escória de aciaria LD ou BOF

Conforme já exposto no processo produtivo do aço ocorre a geração da escória de aciaria LD, a formação da referida escória, envolve principalmente as reações de oxidação do silício (Si), manganês (Mn) e ferro metálico (Fe) e a dissolução da cal. Outros componentes são óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cromo (Cr_2O_3), óxido de titânio ou anatase (TiO_2), entre outros, provenientes das adições ou da oxidação de elementos secundários da carga metálica, óxido de magnésio (MgO) proveniente do desgaste dos refratários ou de adições, o (CaF_2) oriundo da fluorita adicionada e do anidrido fosfórico (P_2O_5) e enxofre (S) procedentes das reações de desfosforação e de dessulfuração (MALYNOWSKYJ, 2006 *apud* RODRIGUES, 2007).

A Tabela 2.14, especifica as composições químicas apresentadas na escória de aciaria LD nas principais siderúrgicas brasileiras que utilizam fornos LD – Linz Donawitz ou BOF – Blast Oxygen Furnace.

Tabela 2.14 - Composição química da escória de aciaria LD OU BOF (IBS, 1999 *apud* OLIVEIRA, 2006).

USINAS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA - ESCORIA DE ACIARIA BOF OU LD (%)							
	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	MnO	Fe (total)	S	P_2O_5
CST	45,20	5,50	0,80	12,20	7,10	18,80	0,07	2,75
Acesita	44,81	7,32	2,42	15,47	2,09	14,06	0,06	1,18
Belgo Mineira *	47,00	8,00	1,50	15,00	3,00	19,00	-	-
USIMINAS	41,40	6,20	1,40	11,00	6,30	22,00	-	1,80
AÇOMINAS	45,58	9,48	0,75	12,01	6,59	16,71	-	2,23
Gerdau (Cocais)	36,20	12,50	0,93	15,40	5,80	21,00	0,04	1,01
Mannesmann	43,00	7,00	0,80	15,00	3,00	22,00	0,20	1,60
CSN	35,00	6,00	4,00	15,00	3,50	19,70	0,34	0,70
COSIPA	38,69	9,76	1,29	11,17	6,42	22,29	0,06	1,44

* Localizada na cidade de João Monlevade.

2.7.4.2 Reações químicas no processo de produção do aço e geração da escória de aciaria EAF

A adição de CaO e MgO promove as reações de refino que conduzem à formação de escória de aciaria constituída de silicatos e óxidos. Outros óxidos também podem ser encontrados, tais como óxido de titânio ou anatase (TiO₂) e o óxido de cromo (Cr₂O₃), devido ao alto teor dos elementos de liga presentes na sucata de aço.

A Tabela 2.15 discrimina as composições químicas apresentada nas escórias de aciaria EAF, nas principais siderúrgicas que utilizam do processo elétrico para a fabricação do aço.

Tabela 2.15 – Composição química da escória de aciaria EAF (IBS, 1999 apud OLIVEIRA, 2006).

USINAS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA EAF (%)							
	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	Fe (total)	S	P ₂ O ₅
Gerdau (Ceará)	45-65	5-15	1-5	15-17	0,5-5	-	-	-
Gerdau (Açonorte)	25,70	10,37	5,31	15,80	5,51	34,31	0,31	-
Gerdau (Usiba)	42,0	6,50	4,50	13,50	3,0	28,0	0,06	0,60
Belgo (Cariacica)	34,0	9,30	6,20	18,20	4,70	18,67	0,13	0,54
Belgo (Piracicaba)	41,60	7,90	4,40	-	4,50	21,60	0,16	-
Barra Mansa	28,04	16,93	4,0	20,42	5,37	17,39	-	0,49
Gerdau (Cosigua)	30,0	9,0	3,0	17,0	3,0	35,0	1,00	-
Belgo (JF)	37,0	9,31	3,31	17,73	7,33	16,19	0,07	0,41
Vilares (Mogi)	45-55	4-6	3-5	12-17	4-6	10-15	-	-
Vilares (Pinda)	30-50	3-9	3-7	8-18	4-6	7-20	-	0,3-0,7
Vilares (Guará)	25,50	12,10	7,70	20,30	6,60	23,20	0,06	0,19
Gerdau (PR)	12-35	7-10	3-13	17-25	5-15	27-40	0,5-3	-

2.7.5 Etapa posterior ao processo de geração da escória de aciaria

Ao final do processo, a escória está separada do aço por diferença de densidade, ocorre o vazamento da mesma em potes e posteriormente a produção da escória de aciaria, a mesma é conduzida a um pátio e lançada nas baias de resfriamento.

2.7.6 Comportamento e Armazenagem da escória de aciaria

Dessa forma, a composição química da escória de aciaria LD varia em função da matéria-prima utilizada, do revestimento do conversor e do tipo de aço produzido. Além desses aspectos, sua composição será influenciada também pela forma de resfriamento pelas condições de armazenagem, vazamento, transporte, cambamento (Figura 2.23) e processo de resfriamento da escória de aciaria (Figura 2.24).



Figura 2.23 - Cambamento (CST/ARCELORMITTAL/TUBARÃO, 2009).



Figura 2.24 - Resfriamento (CST/ARCELORMITTAL/TUBARÃO, 2009).

2.8 RECICLAGEM DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Nas siderúrgicas que possuem planta de beneficiamento, a escória de aciaria segue para o processo de fragmentação, britagem, moagem e separações magnéticas e granulométricas. A escória reciclada é absorvida pela construção civil e a indústria cimenteira, quando devidamente reciclada e controlada poderá ser utilizada como substituto parcial do clínquer Portland. A escória de aciaria reciclada também pode ser empregada para confecção de camadas de sub-bases e bases dos pavimentos rodoviários e, como agregado para os revestimentos flexíveis. Na reciclagem, as etapas básicas são constituídas pela separação magnética e granulométrica, através da remoção de grandes placas metálicas por eletroímã (Figura 2.25) e posteriormente a britagem (Figura 2.26).



Figura 2.25 – Reciclagem através de eletroímã.



Figura 2.26 – Britagem da escória de aciaria LD.

2.9 ESTOCAGEM DA ESCÓRIA DE ACIARIA

A sistemática de estoque da escória de aciaria normalmente ocorre em forma de pilhas, localizadas dentro das dependências das próprias usinas geradoras. Conforme relata Raposo (2005) a escória de aciaria, diferentemente da escória de alto-forno, que é utilizada como matéria prima para a fabricação de cimento, tem seu emprego limitado na construção civil, não tendo destinação bem definida e às vezes se acumulando nos pátios de estocagem (Figura 2.27).



Figura 2.27 - Escória de aciaria britada estocada em pilhas.

2.10 CONTROLE DA EXPANSÃO

O termo escória de aciaria “curada” comumente refere-se à escória de aciaria que não apresenta o risco de expandir, por ter ficado estocada por um período mínimo de seis meses, apesar de algumas literaturas afirmarem um ano ou até mesmo dois anos. Entretanto a variável, tempo, não é o único fator responsável pela estabilização da escória. Os agentes que provocam a estabilização da escória são a água e o ar atmosférico, através de reações de hidratação e carbonatação dos óxidos CaO e MgO livres, transformando-os em hidratos e carbonatos estáveis. Devido à característica de hidráulidade da escória, a água de chuva, que caia sobre uma pilha de escória de aciaria reagirá com óxidos de CaO e SiO₂ formando uma película, dificultando a penetração da água no interior da pilha, retardando assim a sua cura. Segundo Machado (2000), a escória de aciaria, após hidratação, é induzida a expansão pelo substancial aumento dos cristais em relação ao seu volume original, seja pela, por hidratação, itens (2, 4, 11 e 12), carbonatação, itens (5, 6 e 7) e oxidação, itens (9 e 10), conforme a Tabela 2.16 que representa o fenômeno da expansibilidade da escória de aciaria.

Tabela 2.16 – Características das espécies químicas isoladas da escória de aciaria e as suas variações volumétricas após hidratação (WEAST, 1971 *apud* MACHADO, 2000).

CARACTERÍSTICAS DAS ESPÉCIES QUÍMICAS ISOLADAS DA ESCÓRIA DE ACIARIA E SUAS VARIAÇÕES VOLUMÉTRICAS APÓS HIDRATAÇÃO					
N.	Espécie química	Densidade (g/cm ³)	Massa molar (g/mol)	Volume molar cm ³ /mol	Variação de Volume (%)
1	MgO (Periclásio)	3,58	40,31	11,26	-
2	Mg(OH) ₂ (Brucita)	2,36	58,33	24,72	119,5 *
3	CaO (Cal)	3,38	56,08	16,59	-
4	Ca(OH) ₂ (Portlandita)	2,24	74,09	33,08	99,4 **
5	CaCO ₃ (Calcita)	2,93	100,09	34,16	105,9 **
6	CaCO ₃ (Aragonita)	2,71	100,09	36,93	122,6 **
7	CaMg(CO ₃) ₂ (Dolomita)	2,87	184,41	64,25	287,3 **
8	Fe ⁰ (Ferro Metálico)	7,86	55,85	7,11	-
9	FeO (Wustita)	5,70	71,85	12,61	77,4 ***
10	Fe ₂ O ₃ (Hematita)	5,24	159,69	30,48	328,7 ***
11	Fe(OH) ₂ (Hidróxido de Ferro)	3,40	89,86	26,43	271,7 ***
12	FeO(OH) (Goetita)	4,28	88,85	20,76	192,0 ***

* Em relação ao MgO. ** Em relação ao CaO. *** Em relação ao Fe⁰.

2.11 PROBLEMAS OCACIONADOS PELO USO IMPRÓPRIO

A diferença entre as condições de cura do exterior e do interior das pilhas de escória de aciaria é um dos principais fatores que resultarão nos problemas na pavimentação viária, pois se assume erroneamente que o material está todo curado apenas pelo fato de ter sido estocado por um período mínimo de seis meses. A Figura 2.28 (a), (b), (c) e (d) ilustra problemas típicos da aplicação incorreta, ocorrendo a expansão excessiva da escória de aciaria LD em pavimento rodoviário.

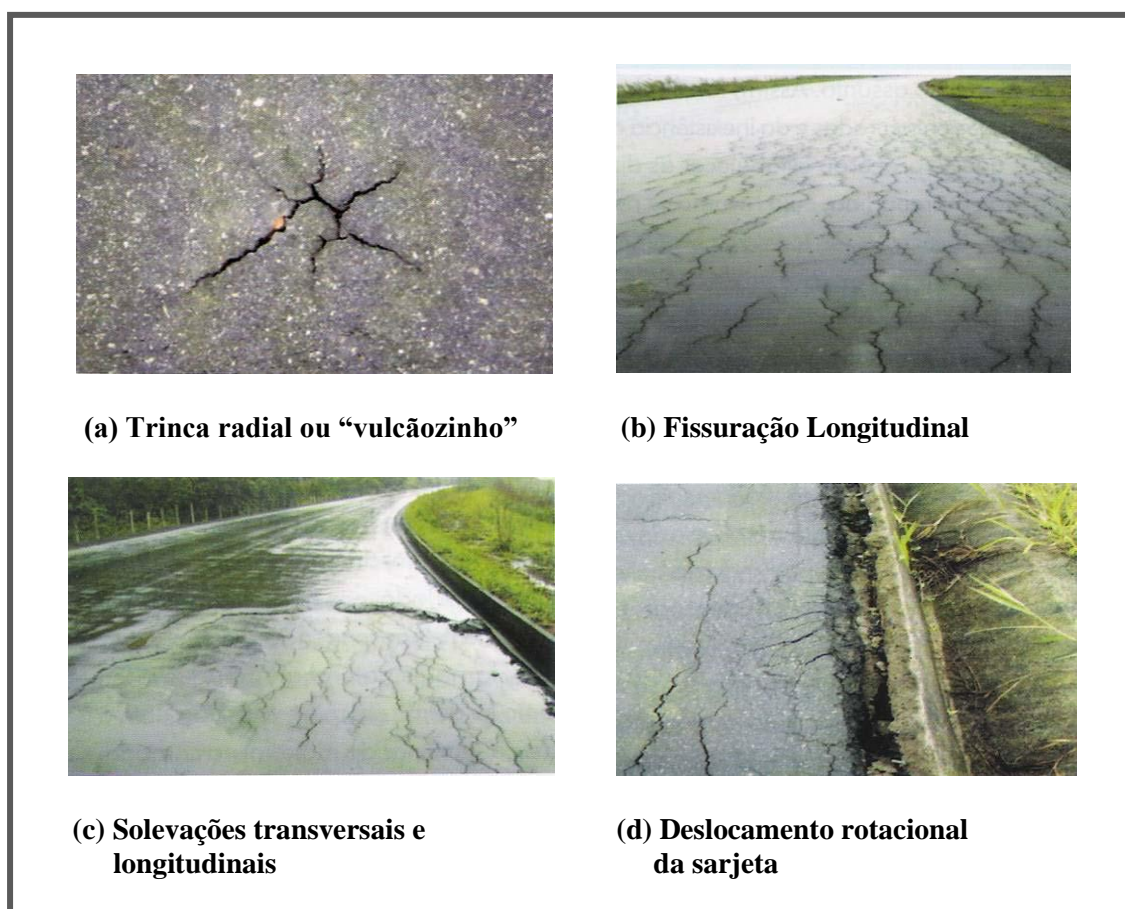


Figura 2.28 (a), (b), (c) e (d) - Insucessos devido expansibilidade da escória de aciaria (GONTIJO, 2006 *apud* FREITAS, 2007).

2.12 MÉTODO DE CURA DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD

A redução da expansão da escória de aciaria é importantíssima para viabilidade da sua utilização nas obras de infraestrutura de forma geral, porém, para a pavimentação

rodoviária é imprescindível. Assim, vários métodos são empregados com o objetivo desta redução: cura por injeção de vapor d'água, utilização do vapor d'água sobre pressão, injeção de sílica a escória de aciaria em estado líquido e a cura acelerada.

2.12.1 Cura da escória de aciaria no Japão com a utilização de vapor d'água

Este processo em uso no Japão consiste na cura de escória de aciaria LD, através da injeção de vapor d'água sob a pilha de escória coberta com lona. O ciclo inicia-se com o empilhamento do material na baía e seguida a cura através do vapor d'água, resfriamento e retirada do material. A literatura Japonesa registra que nos testes de expansão, segundo a norma JIS (Japanese Industrial Standards), determina para pavimentação o máximo de 1,5% de expansão. Realizaram-se no Brasil, através da CST, alguns testes pilotos, utilizando-se este método, conforme Figura 2.29.



Figura 2.29 – Cura da escória de aciaria por injeção de vapor d'água (ABM, 2004).

Pode-se observar os níveis de temperatura na pilha de escória de aciaria, com granulometria variando de 0 a 10,0 mm, curada com vapor d'água pela CST, com variações de 74 °C a 112 °C em um período de 70 horas, obtendo uma temperatura média no interior da pilha em torno de 105 °C (Figura 2.30). Analisado a expansão pelo método Pennsylvania Test Method (PTM-130), a escória curada por este método, obteve percentual expansivo bem abaixo de 0,5%, cujo valor atende perfeitamente ao preconizado pela norma do DNER (atual DNIT), para pavimentação no Brasil, onde é estabelecido o máximo de 3% de expansão medida pelo método PTM-130.

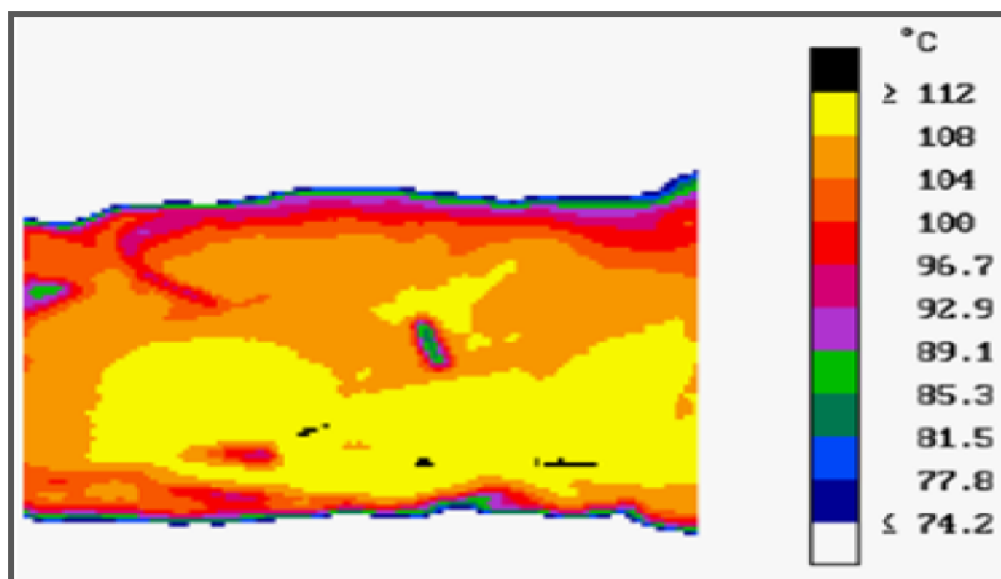


Figura 2.30 – Temperatura na pilha de escória de aciaria (ABM, 2004).

2.12.1.1 Comparativo entre a norma japonesa JIS "Japanese Industrial Standards" e a brasileira adotada pelo DNER-PTM-130

A norma japonesa JIS "Japanese Industrial Standards" preconiza uma expansão máxima de 1,5%. O método de análise consiste em conservar o corpo de prova submerso em água a 80 °C, seis horas por dia, durante dez dias, posteriormente analisar sua expansão, conforme ilustrado pela Figura 2.31.

A norma brasileira DNER-PTM-130 estipula expansão máxima de 3%. O método de análise condiciona o corpo de prova, submerso em água a uma temperatura de 71 °C, vinte e quatro horas por dia, durante sete dias, permanecendo por mais sete dias saturado em estufa a 71 °C. A norma brasileira é mais flexível quanto ao valor de expansão, considerando aceitável até 3%, entretanto, é muito mais rigorosa quanto ao tempo de exposição da amostra. O PTM-130 determina a conservação do corpo de prova submerso, não por seis horas, durante sete dias, conforme convencionava a norma japonesa, mas por vinte e quatro horas durante sete dias submersos em água a 71 °C e mais sete dias saturado em estufa também a 71 °C. Assim obtêm-se, uma simulação em laboratório, bem mais próxima da realidade, por representar com maior severidade a exposição da escória de aciaria aos processos de expansão apresentados em campo.

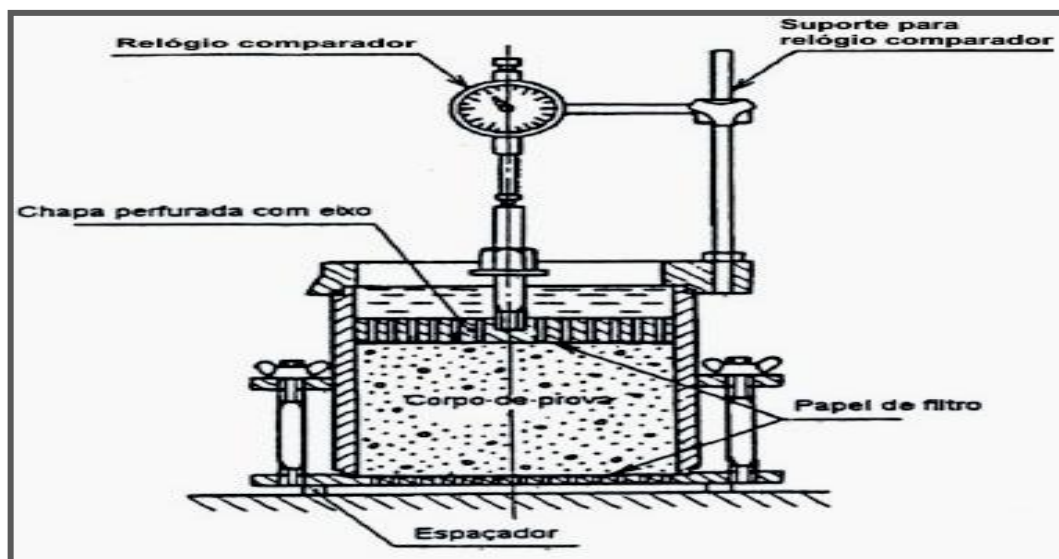


Figura 2.31 - Equipamento para ensaio de expansão em água (JIS A 5015, 1992 apud PENA, 2004).

2.12.2 Cura da escória de aciaria com a utilização de vapor sob pressão

Neste processo a escória de aciaria LD é colocada dentro de uma autoclave, onde a mesma permanece por três horas, submetida a uma atmosfera de vapor d'água sob pressão de 0,5 MPa. Pode-se observar pela Figura 2.32, o sistema de autoclave desenvolvido pela Sumitomo e Kawasaki, no Japão, para a cura de escória de aciaria com vapor d'água em alta pressão.



Figura 2.32 - Autoclave para cura da escória de aciaria com vapor d'água no Japão (ABM, 2004).

Ao final desse tempo o efeito sobre a expansibilidade da escória é semelhante ao obtido no processo descrito anteriormente (ABM, 2004).

Esta metodologia visa promover à hidratação dos compostos expansivos da escória de aciaria, melhorando as condições de estabilização acelerada do material em relação ao método de estabilização ao tempo. As moléculas de vapor são menores que as de água, com maior poder e velocidade de percolação e hidratação no material, agilizando, desta maneira, o processo de cura da escória de aciaria (MORISHITA *et al.*, 1995).

2.12.3 Cura por adição de sílica à escória de aciaria LD no estado líquido

Processo desenvolvido pela Thyssen e Fehs, na Alemanha e em operação na planta da Thyssen nesse mesmo país, consiste da adição de areia à escória de aciaria LD, dentro de uma determinada característica e sobre a qual é soprado oxigênio, a Figura 2.33, ilustra esse processo. O percentual de expansão final obtido é menor que 0,5%, segundo este método de ensaio europeu.

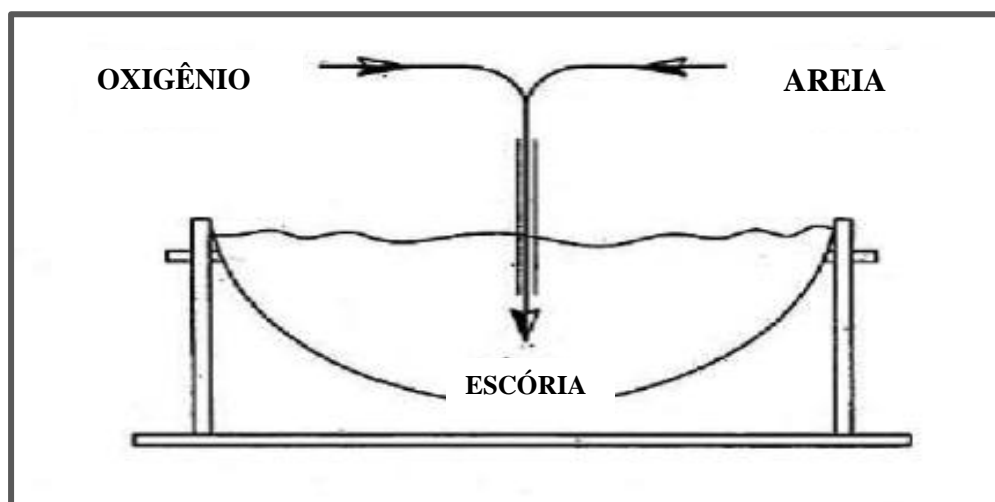


Figura 2.33 – Cura por adição de sílica à escória de aciaria (ABM, 2004).

2.12.4 Metodologia utilizada pela CST (Cura acelerada – ACERITA)

Esta metodologia com origem em programa experimental do setor siderúrgico brasileiro. A cura acelerada por umedecimento (Figura 2.34) e por aeração da escória

de aciaria LD (Figura 2.35) é um processo desenvolvido pela CST, atual ArcelorMittal Tubarão e por uma empresa de consultoria, registrado no INPI "Instituto Nacional de Propriedade Industrial" em 2002. A definição do método deu-se após um programa experimental de acompanhamento da cura da escória, que comparou o efeito isolado da umectação com o da umectação conjugada com aeração periódica sobre a efetividade na redução da expansão volumétrica. Através desse processo o tempo de cura é reduzido para no máximo dois meses, tendo o material um controle de qualidade que garante a redução da expansão de todo o lote tratado aos níveis exigidos pela norma PTM-130. Durante o período de tratamento para redução da expansão, a escória de aciaria é permanentemente monitorada através de ensaios de laboratórios e testes previstos pelas normas do DNER/DNIT, para utilização sub-bases e bases dos pavimentos rodoviários. Ao atingir um valor de expansão que atenda as normas técnicas, o processo é interrompido e a escória denominada como “ACERITA” ou escória de aciaria com redução da expansão, é disponibilizado para o mercado. As principais características da escória de cura reduzida são:

- a) granulometria: faixa C do DNER/DNIT;
- b) massa específica seca máxima: 2.350 g/dm^3 ;
- c) densidade do material solto: 1.750 kg/m^3 ;
- d) abrasão Los Angeles: 20 %;
- e) capacidade de geração: 15.000 t/mês.

Tramita no Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes para normatização, um processo de autoria do Instituto de Pesquisas Rodoviárias, intitulado: Pavimentação rodoviária – sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - ACERITA - Especificação de serviço. Visa desta forma regulamentar a utilização do referido produto em rodovias com o número $N < 5 \times 10^6$, na proporção máxima de 80% e mínima de 50%, em peso, misturada com solo de comportamento geotécnico laterítico; estabelecendo os requisitos concernentes ao material e equipamentos, execução, condicionantes ambientais, bem como controle da qualidade dos materiais empregados, além dos critérios para aceitação ou rejeição e medição dos serviços (DNIT, 2009).



Figura 2.34 Cura acelerada - umedecimento (ARCELORMITTAL, 2008).



Figura 2.35 – Cura acelerada - aeração (ARCELORMITTAL, 2008).

2.13 MÉTODOS DE ANÁLISE DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA

O controle da expansão da escória de aciaria ocorre através dos métodos de análises, destacando-se os métodos: agulhas de Le Chatelier, autoclave, CBR "California Bearing Ratio", PTM-130 "Pennsylvania Testing Method" e o Steam Test (teste a vapor).

2.13.1 Método de ensaio de agulhas de Le Chatelier – NBR-11582 (ABNT, 1991)

O ensaio referente a norma NBR-11582 (ABNT, 1991) visa a identificação acelerada da expansibilidade em cimento Portland oriundo da hidratação de CaO e MgO, através das agulhas de Le Chatelier: MB 3435 (ABNT, 1991). Estas agulhas são pequenos cilindros com dimensões de (30 x 30) mm de diâmetro, com uma fenda em uma das geratrizes, onde são soldadas duas agulhas, posicionadas uma de cada lado da fenda (Figura 2.36). Na adaptação deste ensaio para análise da expansão da escória de aciaria, é elaborado um traço de argamassa de cimento e escória que é colocado nas agulhas do ensaio. A expansibilidade é determinada pelo afastamento das extremidades das agulhas, o que ocorre em função do aumento de diâmetro do cilindro. O ensaio pode ser realizado a frio ou a quente, entretanto, o ensaio a quente exige menor duração que o ensaio a frio (GEYER *et al.*, 1998 *apud* PENA 2004).

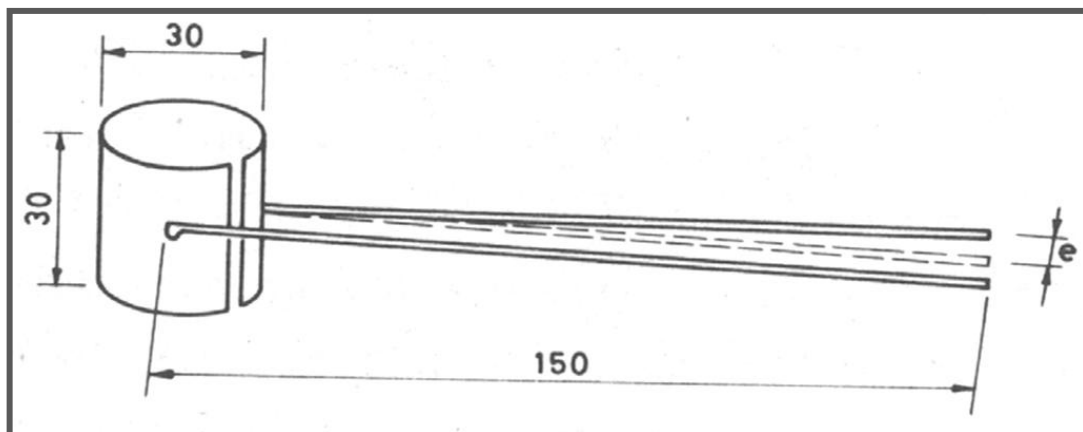


Figura 2.36 - Agulha de Le Chatelier (PENA, 2004).

No ensaio de expansibilidade a quente, os corpos-de-prova são inicialmente imersos em água a temperatura ambiente por vinte e quatro (24) horas, e posteriormente, imersos em água a 100 °C por um período de três (3) a cinco (5) horas. Há repetições deste ciclo até que a abertura das agulhas permaneça constante. No ensaio a frio, não ocorre à imersão em água a 100 °C e, a duração aumenta para sete (7) dias. Deve-se utilizar o mínimo de cimento no traço, apenas para possibilitar a moldagem dos corpos de prova.

Um questionamento significativo com referência ao método das agulhas de Le Chatelier é a respeito da carbonatação da amostra, visto que, para a realização do ensaio, a escória de aciaria precisa ser moída. A moagem quebra os grãos e expõe uma superfície do agregado com compostos anidros, antes internos ao grão. A estabilização destes compostos antes do ensaio pode levar a resultados de potencial expansivo menor que o real. Uma consideração importante é que não existe normatização a respeito da adaptação deste ensaio para escória de aciaria. Assim os pesquisadores trabalham com diferentes proporções de escória, cimento e água na pasta que compõem os corpos-de-prova nos ensaios, o que pode levar a diferentes resultados (PENA, 2004)

2.13.2 Método de ensaio de Autoclave

O objetivo do ensaio em autoclave é a avaliação da expansibilidade dos óxidos de cálcio e magnésio no cimento Portland, conforme discrimina a norma C 151 (ASTM, 1993). Neste ensaio, os corpos-de-prova prismáticos (25 x 25 x 250) mm são moldados e, após

24 horas, submetidos à autoclave por três (3) horas, depois de alcançada uma pressão de 2 MPa. O limite desta norma é 0,8%. As condições dos ensaios em autoclave, como variação de pressão e tempo de ensaio, possuem confiabilidade desconhecida. Este ensaio não é muito utilizado em escórias de aciaria. Antigamente o ensaio em autoclave era utilizado para determinar expansibilidade do cimento Portland (MOTZ & GEISELLER, 2001 *apud* RODRIGUES, 2007).

A alta temperatura e pressão no ensaio modificam a microestrutura do material, além de simular condições que o material nunca encontraria, quando em utilização em obras de engenharia como, por exemplo, na pavimentação. E, mesmo para o cimento, ele é bastante contestado, devido as reações que ocorrem na microestrutura da pasta do aglomerante, com o aumento de temperatura e pressão (PENA, 2004).

2.13.3 Método de análise da expansão da escória de aciaria – CBR

Ao tratar-se do percentual de expansão da escória de aciaria LD, é necessário indicar qual metodologia será utilizada, pois cada tipo de ensaio apresenta um resultado diferenciado, pois as metodologias são desiguais. No meio rodoviário brasileiro, o método de ensaio: ME-049 (DNER, 1994) denominado como CBR ou ISC é largamente utilizado, neste ensaio o corpo de prova fica submerso por 96 horas num tanque com água em temperatura ambiente. Nesse ensaio é admitido até 0,5% de expansão. Método este que serviu de embasamento para a adaptação de outros métodos, como por exemplo, o Pennsylvania Testing Method (Método de Teste Pensilvânia - PTM-130).

2.13.4 Método de análise da expansão da escória de aciaria – PTM-130

O ensaio de expansão PTM-130 "Pennsylvania Testing Method" foi desenvolvido basicamente por Emery (1984), em Ontario, Canadá, na MacMaster University. Posteriormente o DER/MG fez uma adaptação, originando, assim, o ensaio PTM/130 adaptado pela Divisão de Materiais do DER/MG em 1982. Este ensaio, adaptado pelo DER/MG, foi adotado pelo DNER. As normas: ME 262 (DNER, 1994) e PRO 263 (DNER, 1994) determinam que deva haver um rigoroso controle da expansão da escória

de aciaria através do referido método (PTM-130). Neste ensaio, o corpo de prova deverá permanecer 14 dias dentro de uma estufa a setenta e um graus centígrados (71 °C), sendo os sete primeiros dias totalmente submersos em água e os dias restantes apenas saturados com água. O limite aceitável de expansão é de 3%. A Figura 2.37, demonstra o percentual de expansão obtido na análise de uma amostra de escória de aciaria LD, pelo método PTM-130, com mais de seis meses de estocagem e outra curada pela metodologia citada anteriormente na seção 2.12.4, denominada como método acelerado. A reta em preto representa o limite permitido em norma.

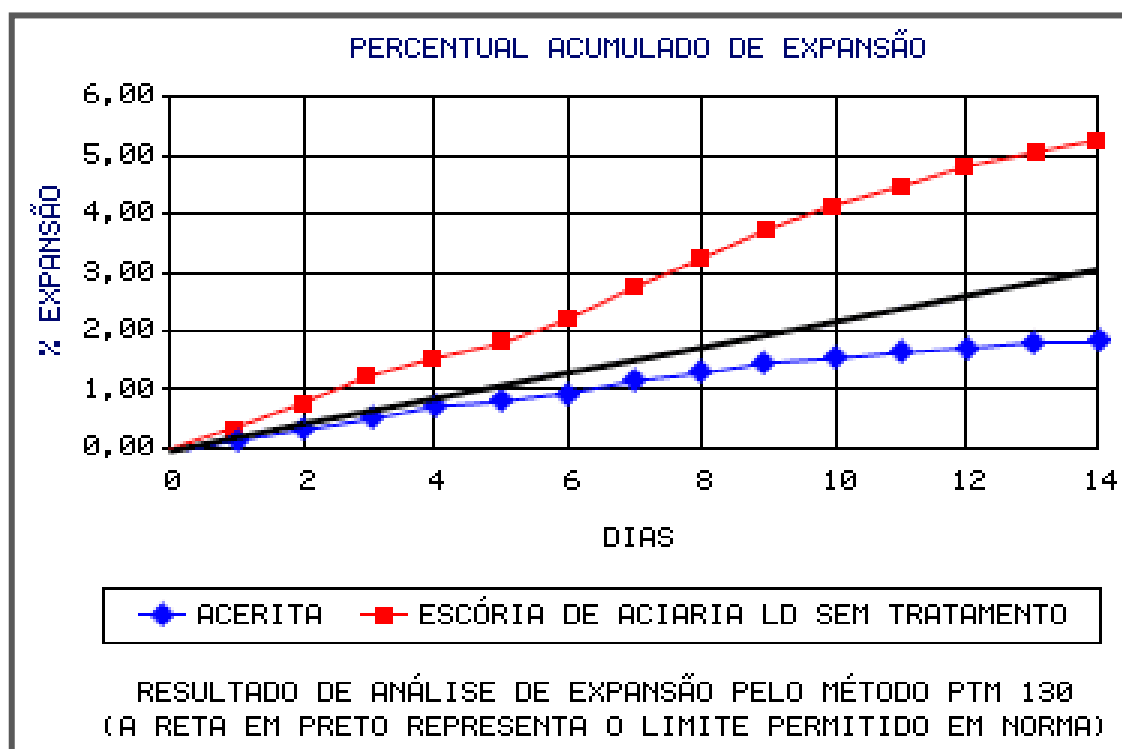


Figura 2.37– Comparativo entre a cura pelo Método Acelerado (ACERITA) e a cura da escória sem tratamento (ARCELORMITTAL, 2008).

2.13.4.1 Comparativo entre os Métodos CBR e PTM-130

O método CBR apresenta aparentemente um percentual limite menor em relação ao método PTM-130, entretanto as verificações em laboratório têm demonstrado que esse método é mais restritivo que o primeiro, ou seja, uma vez que a expansão atende ao limite determinado no PTM-130, também atenderá ao critério de expansão pelo CBR (SILVEIRA *et al.*, 2004).

2.13.5 Método de Ensaio Steam Test ou Ensaio a Vapor - EN 1744-1 (DIN, 1998)

A norma EN 1744-1 (DIN, 1998) especifica em sua seção 19.3 o método de determinação da suscetibilidade de expansão da escória de aciaria britada, resultante da hidratação tardia da cal livre e/ou do óxido de magnésio livre. São necessários no mínimo dois corpos-de-prova de 4,5 kg por amostra e cada um deve ser composto individualmente por uma granulometria específica. Conforme a EN 1744-1 (DIN, 1998) são utilizadas nas proporções de (0 - 22) mm de misturas secas de escória combinadas de acordo com a parábola de Fuller (Tabela 2.17) - correlaciona-se a proporção de massa por granulometria e devem ser tomadas a partir de agregados britados.

Tabela 2.17 - Parábola de Fuller EN-1744-1 (DIN, 1998).

GRANULOMETRIA (mm)	MASSA (%)
0,0 - 0,5	15
0,5 - 2,0	15
2,0 - 5,6	19
5,6 - 8,0	10
8,0 - 11,2	11
11,2 - 16,0	15
16,0 - 22,0	15

Os valores máximos permitidos de expansão pela norma EN 1744-1 (DIN, 1998) e pelas normas: EN 13043 (CEN, 2003) e EN 13242 (CEN, 2002), elaboradas para escória de aciaria LD/EAF, estabelecem: independentemente do teor de óxido de magnésio (MgO) ser (\geq) maior ou igual, ou mesmo ($<$) menor que 5%, a expansão ficará limitada a 5% para a categoria VA; para a categoria VB: 7,5%; para a categoria VC: 10%; para a categoria VD o teor de MgO deverá ser igual ou menor que 5%, porém, sem requisitos de controle da expansão. As categorias são estabelecidas conforme a utilização: VA = nobre, até a classificação VD = menos nobre. A umidade necessária à hidratação do CaO e do MgO é canalizada continuamente para a amostra preparada. O acréscimo de volume, obtido por meio do incremento da altura, é medido por um relógio comparador, acoplado à parte superior do equipamento e a partir do valor final encontrado, calcula-se a expansão da amostra de escória de aciaria. O tempo de estabilização pode variar entre: 24 horas, no caso da maioria das escórias tipo LD

(processo a oxigênio), e 168 horas, no caso da escória EAF (escória de aciaria elétrica) ou escórias LD de alto teor de óxido de magnésio ($MgO > 5\%$). A curva de expansibilidade x tempo, no Steam Test, é função do tipo da escória de aciaria e, principalmente, dos teores de CaO e MgO presentes na amostra (MOTZ & GEISELER, 2001 *apud* RODRIGUES, 2007). A Figura 2.38 retrata o equipamento do Steam Test.

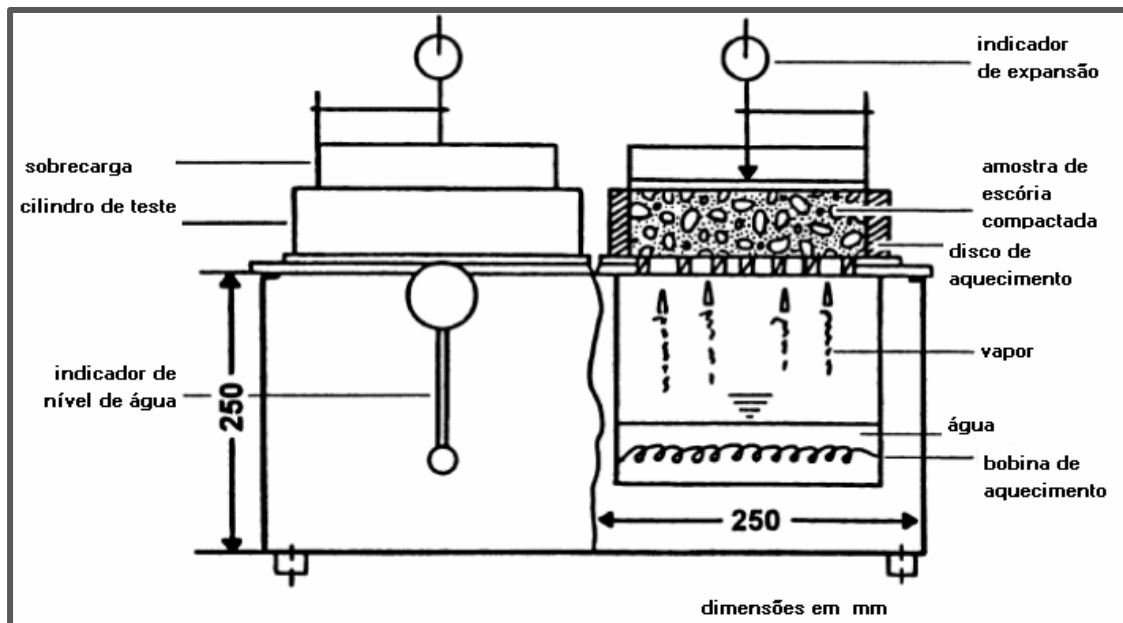


Figura 2.38 – Equipamento do Steam Test (MOTZ & GEISELER, 2001 *apud* RODRIGUES, 2007).

2.14 PRINCIPAIS ESTUDOS REALIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DA ESCORIA DE ACIARIA

Os principais estudos para caracterização da escória de aciaria são:

- A. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) - analisa a textura, a morfologia e a distribuição dos compostos. O MEV deve se utilizado conjuntamente com o EDS (Espectrômetro a Dispersão de Energia). Podendo-se assim analisar preliminarmente as fases observadas, facilitando assim, sua identificação. A técnica do MEV consiste no bombardeamento da amostra por elétrons produzidos pelo aquecimento de um filamento de tungstênio. Assim que esses elétrons atingirem a amostra, serão emitidos sobre as formas de elétrons

secundários, elétrons retroespalhados e fótons x , entre outros. Os elétrons secundários fornecem uma melhor definição de imagem e os retroespalhados permitem uma melhor análise; os fótons x são utilizados para a microanálise dos componentes ou de uma região observada com ajuda do EDS (REGOURD & HORNAIN, 1975; DELOYE, 1986 *apud* POLESE, 2007);

- B. Difração de Raios-X (DRX) - possibilita a caracterização da microestrutura da escória de aciaria, permitindo a identificação dos compostos cristalizados, inclusive as formas alotrópicas, presentes na amostra analisada. Este ensaio tem como intuito identificar a composição mineralógica da escória de aciaria. A difração é o efeito da interferência entre ondas que reforça as intensidades dos picos. As partículas são formadas por estruturas cristalinas com padrões de difrações diferentes e característicos de cada fase. O feixe de raios-x é incidido em ângulos variáveis na amostra de policristal (em forma de pó e com arranjo atômico ou molecular com estrutura que se repete de forma periódica e tridimensional) (BLEICHER & SASAKI, 2000 *apud* CASTELO BRANCO, 2004);
- C. Análise Química; o método mais recomendado é o de Fluorescência de Raios-X, para a devida determinação dos diferentes elementos presentes na amostra de escoria, fornecendo a composição química centesimal do material. Quanto menor a quantidade do componente, maior deve ser a aproximação da técnica adotada para determiná-la. A análise química é utilizada para determinar principalmente, os teores dos diversos óxidos presentes na amostra de escória de aciaria, tais como: óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃), óxido de magnésio (MgO), óxido de manganês (MnO), óxido de sódio (Na₂O), anidrido fosfórico (P₂O₅), óxido de potássio (K₂O) e óxido de titânio ou anatase (TiO₂); pode-se determinar também: a perda ao fogo, o resíduo insolúvel, os teores de CaSO₄ e SO₃, teores de metais pesados, tais como: cobre (Cu), cromo (Cr), mercúrio (Hg), chumbo (Pb), molibdênio (Mo), vanádio (V) e zinco (Zn) (AMARAL, 1999 *apud* POLESE, 2007);
- D. Análise Química pelo método do etileno glicol e do acetato de amônia - determina-se o teor de CaO livre e não o teor de MgO normalmente encontrado

em proporções relevantes na escória de aciaria, devido a estes questionamento, muitos estudiosos, não recomendam este tipo de ensaio, para a análise química. Para a avaliação do potencial expansivo da escória de aciaria, estes testes químicos podem ser utilizados apenas de forma complementar, pois existem outros compostos que também contribuem para a expansão do material, principalmente, quando a escória possui alto teor de MgO (PENA, 2004);

- E. Termogravimetria (análise térmica, TG) - determina-se à perda de massa da escória ao ser aquecida;
- F. Análise Térmica Diferencial (ATD) - permite observar os fenômenos caloríficos, tais como: ebulição, sublimação, vaporização, transições cristalinas (desidratação, decomposição, oxidação, redução e destruição da rede cristalina). As análises térmicas se baseiam no comportamento típico de cada substância, quando submetida a altas temperaturas, permitindo, assim, a identificar as fases cristalinas e amorfas.

2.15 UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA EM PAVIMENTAÇÃO

A escória de aciaria reciclada possui um vasto, porém ainda subaproveitado, campo de aplicações nas obras de pavimentação, podendo ser aplicada em sub-base e base de aeródromos, como exemplo, o aeroporto de Vitória - ES (Figura 2.39), que teve a sua pista executada em escória de aciaria.



Figura 2.39 – Vista aérea da pista do aeroporto de Vitória ES - Camada de base em escória de aciaria (PORTAL DO GOVERNO ES, 2010).

Pode-se aplicar a escória de aciaria reciclada em diversos tipos de obras de pavimentação viária: pavimentos flexíveis, semirrígidos e rígidos. É possível utilizá-la nas obras de pavimentação urbana: ruas, avenidas, ciclovias e áreas para estacionamentos, um bom exemplo desta citada utilização são as obras de pavimentação realizadas em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, (Figura 2.40). O aproveitamento da escória de aciaria nas rodovias também é muito indicado (Figura 2.41). Entretanto nos revestimentos dos pavimentos rodoviários rígidos, a melhor indicação é a escória de alto forno, desde que respeitado a norma: EM-260 (DNER, 1994).



Figura 2.40 – Vista aérea do complexo urbano em Dubai nos Emirados Árabes Unidos com a pavimentação executada utilizando-se escória de aciaria (RAMOS et al., 2007).



Figura 2.41– Confecção da camada de base de um pavimento rodoviário, executada em escória de aciaria LD (ACERVO DO DER/MG-40ª CRG, 2006).

A aplicação da escória de aciaria em lastros ferroviários (Figura 2.42) é bem difundida, porém, alguns requisitos devem ser rigorosamente observados, tais como, o índice de contaminação e o percentual de material fino em excesso.



Figura 2.42 – Utilização da escória de aciaria em lastros ferroviários. (CST *apud* ROSSI, 2003).

Para definir o índice e o grau de contaminação do lastro ferroviário deve-se primeiramente realizar o ensaio de granulometria do material. Trata-se de parâmetros muito relevantes, pois estão diretamente correlacionados ao ciclo de vida útil do lastro, quanto mais contaminado, menor será a capacidade deste para exercer suas funções estruturais. O excesso de material de granulometria fina é prejudicial a boa funcionalidade do lastro, reduzindo suas propriedades de drenagem podendo propiciar uma maior rigidez devido à ocupação dos vazios.

Em se tratando de escória de aciaria, outro problema é a capacidade de cimentação das suas partículas mais finas, quando na presença de água e outros materiais contaminantes proveniente do sublastro e derrame dos vagões. Segundo a norma NBR 5564 EB 655 (ABNT, 1991), o agregado para ser utilizado em lastros ferroviários deverá ter obrigatoriamente uma granulometria $> 12,7$ mm, ressaltando uma pequena margem de

tolerância de 5% da massa total. Porém, não se leva em consideração os materiais alternativos utilizados como lastro, por exemplo à escória de aciaria.

Outro fator não muito abordado é a questão da resistividade do material, entretanto a American Railway Engineering Association - AREA (1991) estabelece um método de ensaio para determinação da resistividade elétrica, devido a possíveis interferências com o sistema de sinalização de algumas ferrovias. Desta maneira, é estabelecido um valor mínimo de resistividade elétrica de 300 Ω m.

A American Railway Engineering and Maintenance of Way Association - AREMA (2001) recomenda ainda, que a escória de aciaria, para fins de utilização em lastros ferroviários, tenha uma percentagem de óxido de cálcio (CaO) menor que 45% e que o somatório dos percentuais de óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3 e FeO) seja inferior a 30%. (SOUSA, 2007).

2.15.1 Utilização da escória de aciaria em pavimentação rodoviária

A escória de aciaria é utilizada para confecções de sub-bases e bases rodoviárias com sucesso no Brasil, apesar da escala reduzida, quando correlacionada a demanda e sua oferta no mercado. Contrastando com a sua expressiva utilização em outros países.

A utilização da escória de aciaria, como agregado na confecção da camada de revestimento rodoviário e ainda incipiente em nosso país. Porém o aproveitamento da escória de aciaria em pavimentação rodoviária se mostra muito interessante, devido as significativas vantagens e reduzidas desvantagens, excetuando-se os efeitos da expansão volumétrica que necessita de um rigoroso monitoramento e da logística de transportes, que em alguns casos atua como complicador.

Os materiais ou agregados alternativos, de uma forma geral, têm sido objeto de estudo da nossa engenharia contemporânea. Porém nos últimos trinta anos, este tipo de procedimento, intensificou de forma significativa devido principalmente a implantação dos simuladores de tráfego.

2.15.1.1 A importância dos simuladores de tráfego para o incremento da utilização dos materiais alternativos nas pavimentações rodoviárias

Tais simuladores possibilita a realização de um estudo extremamente célere do pavimento, analisando os materiais empregados e a metodologia utilizada no projeto e construção do mesmo, propiciado pelo monitoramento seu comportamento real, quando submetido ao tráfego. São equipamentos de campo que permitem fazer avaliação estrutural de seções de pavimento, para determinação da vida de fadiga em situações mais próximas da situação real das condições tráfego, possibilitando também uma análise comportamental dos materiais empregados no pavimento, de forma acelerada em relação ao desempenho, corroborando com os estudos em laboratório, através da comparação dos resultados obtidos em ambos os estudos.

A simulação é processada de forma geral, fazendo atuar uma ou duas rodas de caminhão sobre uma curta seção do pavimento a ser testado, por ciclos de carga contínuos, durante várias horas do dia. Reproduzindo assim, em curto espaço de tempo o número de passagens de eixos previstos no projeto da estrutura ensaiada. No Brasil há três tipos de simuladores de tráfego em atividade: o circular do Instituto de Pesquisas Rodoviárias do IPR/DNIT; o linear da UFRGS/DAER-RS; e o móvel tipo HVS (Heavy Vehicle Simulator) (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Pela Figura 2.43 (a), (b) e (c), pode-se constatar a postura proativa do DNIT/IPR "Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes/Instituto de Pesquisas Rodoviárias" com relação à utilização de novos materiais em pavimentação rodoviária, através da implantação em 1980, do primeiro simulador de tráfego no Brasil, que também é denominado como pista experimental circular do IPR. Desta forma, este Instituto pertencente ao DNIT viabilizou pioneiramente, a realização de estudos em pavimentos executados com materiais alternativos, como exemplo, a escória de aciaria. O simulador de tráfego do Instituto de Pesquisas Rodoviárias, localizado na cidade do Rio de Janeiro, possui uma estrutura com as seguintes dimensões: raio externo de 14,2 m, raio interno de 11,2 m e perímetro de 79,80 m.



Figura 2.43 (a), (b) e (c) - Pista experimental circular em escória de aciaria (DNIT, 1980).

O simulador de tráfego da UFRGS/DAER-RS foi o 2º instalado no país (1995) em Porto Alegre Figura 2.44 (a) e (b), (Núñez, 1997 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2007).



Figura 2.44 (a e b) – Simulador de tráfego da UFRGS/DAER-RS (BERNUCCI *et al.*, 2007).

O simulador de tráfego HVS, de concepção brasileira, permite avaliação de pavimentos em pleno uso (FRITZEM *apud* BERNUCCI *et al.*, 2007). Esse tipo de equipamento, ilustrado pela Figura 2.45 (a) e (b), tem a grande vantagem, devido a mobilidade. Existem dois desses equipamentos móveis disponíveis e atuantes no país desde 2003.

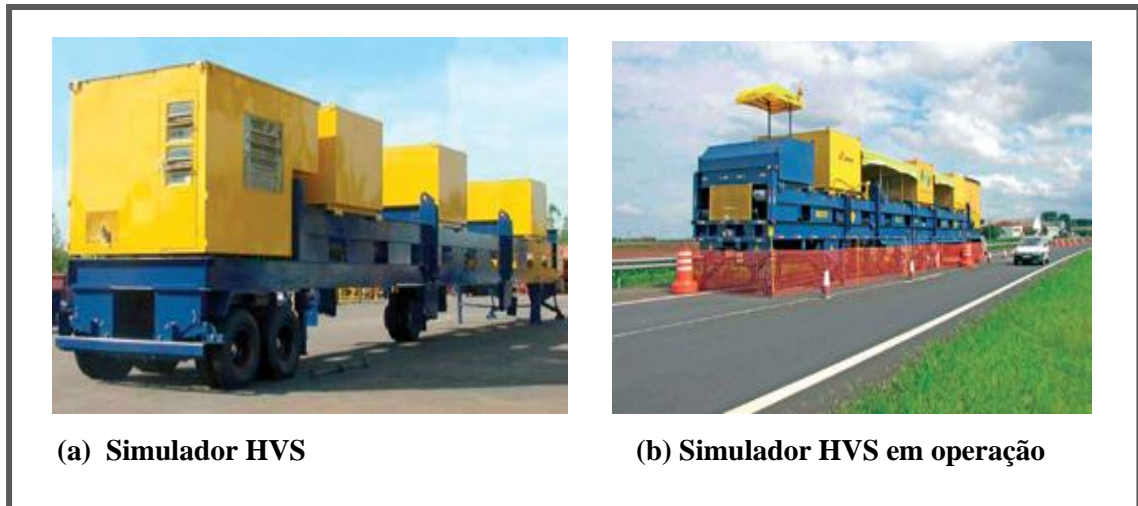


Figura 2.45 (a) e (b) - simulador móvel tipo Heavy Vehicle Simulator (BERNUCCI, 2007).

Denota-se, dessa maneira, a aptidão e importância dos simuladores de tráfego para o estudo e conseqüentemente a disseminação dos pavimentos rodoviários executados com materiais alternativos, como por exemplo, a escória de aciaria. Tal afirmação sustenta-se na possibilidade da simulação acelerada do comportamento de um pavimento ao longo de sua vida de serviço, através da construção de um subtrecho de pavimento numa faixa adicional colocada ao lado do pavimento existente, ou na própria pista. No caso do HVS ainda pode simular os testes com controle de temperatura através de uma câmara "addon" ou seja, que acrescenta os efeitos (BERNUCCI *et al.*, 2007).

2.15.1.2 Requisitos necessários para utilização da escória de aciaria na pavimentação rodoviária

A Norma EM 262 (DNER, 1994) determina e fixa requisitos para a utilização da escória de aciaria em pavimentação rodoviária, condicionado:

- a) máximo de 3,0% de expansão, analisado pelo método PTM-130;

- b) isenção de impurezas orgânicas, contaminação com escória de alto-forno, solos e outros materiais;
- c) granulometria: 40,0% na faixa até 12,7 mm e 60,0% na faixa entre (12,7 - 50,8) mm de abertura nominal e atender a granulometria de projeto;
- d) absorção de água: 1,0% a 2,0% em peso;
- e) massa específica: 3,0 a 3,5 g/cm³;
- f) massa unitária: 1,5 a 1,7 kg/dm³;
- g) desgaste (Abrasão Los Angeles) ≤ 25% para sub-base, base e revestimento.

A norma PRO 263 (DNER,1994) também delibera e regulamenta e fixa procedimentos e condições para utilização da escória de aciaria em pavimentação rodoviária:

- a) escória de aciaria - resíduo silicoso que se forma quando da fabricação do aço (não especifica o processo de fabricação);
- b) o lote de estocagem ≤ 2000 t;
- c) partida - parte de um fornecimento entregue em uma só vez ao comprador;
- d) plano de qualidade - registro documental sobre os procedimentos, recursos e sequencias das atividades vinculadas a qualidade da escória de aciaria;
- e) controle de qualidade - técnicas utilizadas para satisfação dos requisitos de finalidade da escória;
- f) declaração de conformidade – forma de certificação de conformidade, o fabricante é responsável pela mesma, sem supervisão de outras entidades;
- g) nota de entrega – documento emitido pelo fornecedor, discriminando o volume, o tipo e a granulometria do material;
- h) rastreabilidade – capacidade de se levantar o histórico da escória, dentro de limites previamente estabelecidos por meio de sua utilização e registros.

2.15.1.3 Vantagens em utilizar a escória de aciaria para confecção de camadas de bases rodoviárias

As vantagens em utilizar a escória de aciaria como agregado para a confecção de camadas de bases rodoviárias são:

- a) Maior resistência à abrasão (abaixo de 25% pelo ensaio Los Angeles);

- b) maior resistência ao desgaste (em solução de sulfato de magnésio);
- c) ausência de material orgânico;
- d) maior módulo de elasticidade;
- e) maior capacidade de suporte (CBR). A solidificação por carbonatação ou cimentação eleva ainda mais a capacidade de suporte da escória;
- f) forma de grãos cúbicos (menor lamelaridade), que confere ótima consistência e adesividade às misturas asfálticas;
- g) a escória de aciaria fornece uma maior e melhor capacidade de suporte após a compactação do que usando materiais convencionais;
- h) grande disponibilidade do produto;
- i) custo relativamente baixo;
- j) corrobora com a redução dos impactos ambientais, minimizando as degradações com a não utilização de jazidas existentes, além de evitar a exploração de outras novas emanções minerais de materiais naturais;
- k) mitigação dos passivos ambientais nos pátios das siderúrgicas.

2.15.1.4 Desvantagens em utilizar a escória de aciaria para confecção de camada de base rodoviária

As desvantagens na opção pela escória de aciaria para bases rodoviárias são:

- a) A logística em diversos casos contribuem desfavoravelmente. A indústria siderúrgica, dependente do vetor geográfico por motivos geológico, desta forma é direcionada a implantar seus parques industriais, nas proximidades das jazidas de minério de ferro. Assim essas empresas convergem para localidades específicas, concentrando os depósitos da escória de aciaria em seus pátios, (Figura 2.46). Não ocorrendo disponibilização deste coproduto fora das retrocitadas dependências, para o atendimento adequado da demanda em escala comercial. Inviabilizando sua utilização em alguns casos devido aos elevados custos de transporte;
- b) necessidade de rígido controle da correção da expansão volumétrica.



Figura 2.46 – Depósito de escória em pilha.

2.15.1.5 Vantagem técnica e econômica ao utilizar a escória de aciaria como agregado na camada de base nas pavimentações rodoviárias

Ao comparar-se a escória de aciaria com os materiais pétreos convencionais, este coproduto da fabricação do aço, proporciona obras de maior durabilidade devido à menor deterioração do material sob a ação do tráfego. Possibilitando inclusive diminuição nas espessuras das camadas, acentuando o ganho econômico, decorrente do menor custo do material.

Pavimentos delgados executados com escória de aciaria devidamente curada são equivalentes a pavimentos espessos, construídos com materiais convencionais, como brita graduada tratada com cimento e outros, conforme ocorrido no trecho rodoviário de acesso a cidade de Ipaba, localizada em Minas Gerais. Os resultados de ensaios obtidos para o pavimento do trecho rodoviário de acesso a citada cidade, com estrutura: sub-base executada com a espessura de 12 cm e a base com espessura de 15 cm, confeccionadas em escória de aciaria e o revestimento em TSD com 2,0 cm de espessura, apresentaram resultados defletométricos, em que a média das suas deflexões recuperáveis máximas (d_o), ficou 37% maior que a média das deflexões máximas apresentadas no trecho rodoviário denominado: lote 15 da BR-381(MG) com seu

pavimento constituído por: sub-base em BGTC com espessura de 15 cm, base em BGS com espessura de 15 cm e o revestimento em CBUQ com 13 cm de espessura, elucidado pela Figura 2.47 (a) e (b); apesar da diferença, em termos de equivalência estrutural referenciada ao material granular padrão, ser maior que 100% entre os dois pavimentos, ou seja, BR-381 - lote 15 = 66,0 cm e Acesso a Ipaba = 30,0 cm. Obtendo os resultados a partir do levantamento defletométrico, pode-se calcular o raio de curvatura característico de cada pavimento, quanto maior o raio de curvatura, maior a capacidade de distribuição de cargas no pavimento. Os raios de curvatura do levantados no trecho de acesso a Ipaba mostraram-se predominantemente superiores aos do lote 15 da BR-381/MG, isto significa que o pavimento de acesso a Ipaba – MG apresenta uma maior capacidade de distribuição de carga e menor dispersão, verifica-se que o coeficiente de variação dos resultados foi menor que o coeficiente de resultados do trecho rodoviário da BR-381 - lote 15. Estes dados demonstram que a escória de aciaria devidamente curada constitui um excelente material para execução de pavimentos rodoviários. (ALBERNAZ *et al.*, 2000).

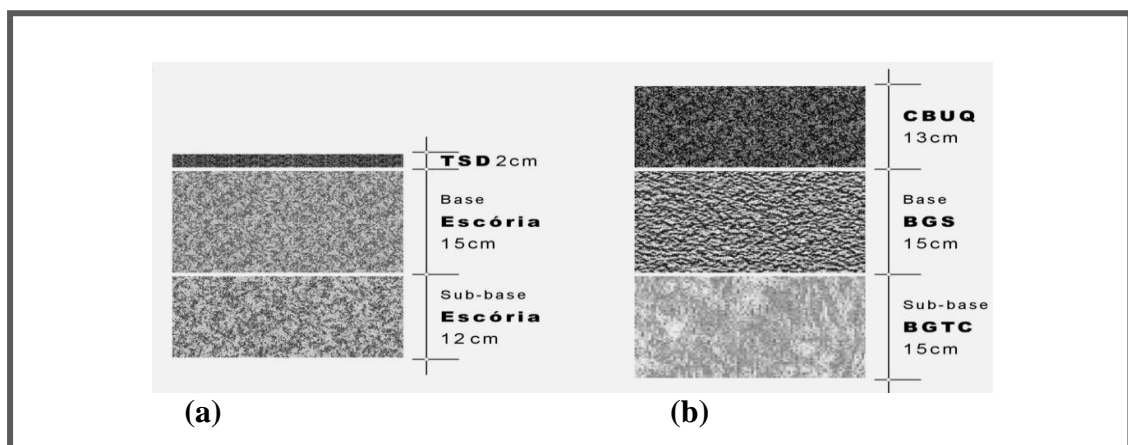


Figura 2.47 (a) e (b) - Estrutura dos pavimentos analisados - (a) estrutura do pavimento do acesso a Ipaba MG - (b) estrutura do pavimento da BR-381 - lote 15 (ROHDE, 2002).

2.15.1.6 Benefícios ambientais ao utilizar a escória de aciaria como agregado na camada de base nas pavimentações rodoviárias

Com a utilização da escória de aciaria para confecção das camadas de sub-base e base rodoviária obtêm-se representativo benefício ambiental, através da substituição de

materiais naturais, reduzindo a exploração de jazidas de granito, gnaiss e outras rochas naturais, promovendo o decréscimo na utilização de explosivos, assoreamentos de rios, etc. Os projetistas cada vez mais se dedicam ao estudo de alternativas para projetos ecologicamente corretos, proporcionando economia, preservação ambiental, aliado a boa técnica. Ao utilizarmos a escória de aciaria nas pavimentações rodoviárias, estamos interagindo positivamente com o setor siderúrgico; pois este material coproduto da fabricação do aço, depositado nas dependências das usinas, constitui em um incômodo problema de ordem logística, demandando grandes áreas para a armazenagem, além do comprometimento ambiental, através da poluição visual e muitas vezes a supressão da vegetação nativa, para viabilização de áreas disponíveis para os referidos depósitos, há possibilidade em alguns casos específicos da contaminação do próprio solo.

Para evitar as possíveis contaminações do solo, bem como, evitar o uso indevido deste material (escória de aciaria) recomenda-se à execução dos ensaios de lixiviação e solubilização, para verificar a composição do material depositado e se for o caso corrigir o problema de estocagem e até mesmo de utilização do produto.

2.16 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ESCÓRIA DE ACIARIA

É imperativo frisar que a normatização ambiental, vigente em nosso país, capitaneada pela Constituição Federal de 05 de outubro de 1988, através do art. 225 e do art. 23, incisos VI e VII, conjugado com as Leis Federais: Lei n. 9605 de 12/02/1998 (Lei de crimes ambientais), Lei n. 6938 de 31/08/1981 (Lei da política nacional do meio ambiente) e Lei n. 6902 (dispõe sobre a criação de estações ecológicas e área de proteção ambiental). Estas duas últimas leis (n. 6938 e n. 6902) foram regulamentadas pelo Decreto n. 99274 de 06/07/1990, instituindo e estruturando o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), bem como, as suas atribuições.

O SISNAMA ficou constituído conforme infradiscriminado:

1. Órgão superior: Conselho de Governo;
2. Órgão consultivo e deliberativo: Conselho Nacional de meio Ambiente (CONAMA);

3. Órgão central: Secretaria do Meio Ambiente da presidência da República (SEMAN/PR);
4. Órgão executor: Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais (IBAMA);
5. Órgãos seccionais: os órgãos ou entidades da administração pública federal direta e indireta, as fundações instituídas pelo poder público cujas atividades estejam associadas às de proteção ambiental da qualidade ambiental ou aquelas de disciplinamento do uso de recursos ambientais, bem como os órgãos e entidades estaduais responsáveis pela execução de programas, projetos e pelo controle e fiscalização de atividades capazes de provocar a degradação ambiental;
6. Órgãos locais: órgãos ou entidade municipais responsáveis pelo controle e fiscalização das atividades referenciadas no inciso anterior, nas suas respectivas jurisdições.

O Decreto n. 99.274, em seu art. 7º, inciso II, delega competência ao CONAMA para baixar normas de sua competência, necessárias à execução e implementação da Política Nacional De Meio Ambiente. Dentre diversas normas jurídicas, referentes ao meio ambiente, editadas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, salientamos a que dispõe sobre o inventário nacional de resíduos sólidos industriais (Resolução CONAMA 313/2002). Com referência as normas técnicas (ambientais) citamos:

1. NBR 10004 (ABNT, 2004) – Resíduos sólidos, classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública, para que estes resíduos possam ter manuseio e destinação adequados.
2. NBR 10005 (ABNT, 2004) – Lixiviação de resíduos – Procedimento.
3. NBR 10006 (ABNT, 2004) – Solubilização de resíduos – Procedimento.

Segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos podem ser classificados:

- a) resíduos classe I – perigosos;
- a) resíduos classe II – não perigosos;
- b) resíduos classe IIA – não inertes;
- c) resíduos classe IIB – inertes.

Todos os resíduos ou substâncias, listados pela NBR 10004 (ABNT, 2004), recebem uma codificação (seguida de três dígitos). Os resíduos perigosos codificados pela referida norma, iniciados com a letra F são originados de fontes não específicas, iniciados com a letra K são originados de fontes específicas; aqueles resíduos perigosos classificados pelas suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e patogênica, são classificados conforme a seguir:

- a) inflamável – D001;
- b) corrosivo – D002;
- c) reativo – D003;
- d) patogênico – D004.

Os resíduos que forem considerados tóxicos pelo ensaio de lixiviação, norma NBR 10005 (ABNT, 2004), são codificados como D005 e D052, e são identificados como perigosos. As substâncias que, devido a sua presença, conferirem periculosidade aos resíduos, recebem os códigos identificados pelas letras P e U, e serão adotados para codificar os resíduos, classificados como perigosos devido a sua característica de toxicidade. Os resíduos sólidos, ou misturas de resíduos, classificados como perigosos - classe I: são todos aqueles resíduos, ou misturas de resíduos que apresentarem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenia e também, aqueles que mesmo não apresentando estas características supracitadas, estiverem codificados pela NBR 10004 (ABNT, 2004), como perigosos, com a letra inicial da codificação F e K; são aqueles que apresentam riscos a saúde pública ou ao meio ambiente, quanto ao seu manuseio, transporte ou mesmo quando acondicionados ou dispostos de maneira incorreta. Os resíduos, ou misturas de resíduos, classificados como não perigosos – classe II, são os que não se enquadrarem como classe I, ou seja, não são inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos ou patogênicos, além disso, não constam da classificação da NBR 10004, (ABNT, 2004) como produtos perigosos, com o código de identificação com a letra inicial F e K, se subdividem em classe IIA e classe IIB. Os resíduos ou misturas de resíduos classificados como: não inerte – classe IIA: são aqueles que não são classificados como perigosos (classe I) e também não se enquadram como classe IIB – inertes, possuem constituintes solubilizados em concentração superiores ao estipulado na norma NBR 10006 (ABNT, 2004) – Procedimento para

obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Os resíduos não inertes – classe IIA podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Os resíduos classe IIB – inertes são os resíduos que, quando amostrados de maneira representativa, norma NBR 10007 (ABNT, 2004) e submetidos a um contato dinâmico e estático com a água destilada ou deionizada, a uma temperatura ambiente, conforme prescrição da norma técnica NBR 10006 (ABNT, 2004), não tiver nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme os padrões definidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004) para o ensaio de solubilização (limite máximo no extrato, em miligrama por litro).

2.16.1 Ensaio de lixiviação e solubilização da escória de aciaria LD

Conforme exposto anteriormente a NBR 10004 (ABNT, 2004), estabelece critérios para a classificação dos resíduos sólidos e a definição dos códigos para identificação destes resíduos, para que os mesmos possam ter manuseio e destinação adequada, precavendo-se dos riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública. O ensaio de lixiviação de resíduos, norma NBR 10005 (ABNT, 2004) consiste na separação de certas substâncias inorgânicas contidas nos resíduos industriais por meio de lavagem ou percolação. O ensaio de solubilização de resíduos, norma NBR 10006 (ABNT, 2004) institui procedimentos através da fixação dos requisitos exigíveis para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Desta forma, conforme a análise química (substâncias inorgânicas) da amostra representativa do resíduo, depois de dissolvido em água deionizada ou destilada e filtrada, diferencia-se os resíduos conforme a classificação da NBR 10004 (ABNT, 2004) como resíduos não inertes ou inertes.

Assim sendo, pode-se concluir pelos resultados oriundos dos ensaios de: lixiviação (Tabela 2.18) e solubilização (Tabela 2.19), realizados por Souza (2007), utilizando amostras (ME1) de escória de aciaria LD da USIMINAS que a mesma não é perigosa, porém não é inerte, recebendo a classificação: Classe II A (não perigoso – não inerte), por apresentar teor de alumínio na amostra solubilizada, acima do limite máximo permitido.

Tabela 2.18 – Ensaio de lixiviação - escória de aciaria LD/USIMINAS (SOUZA, 2007).

PARÂMETRO	LINITE MÁXIMO PERMITIDO (mg/L)	CONCENTRAÇÃO NO RESÍDUO LIXIVIADO (mg/L)
Arsênio	1,0	< 0,01
Bário	70,0	< 0,005
Cádmio	0,5	< 0,001
Chumbo	1,0	< 0,01
Cromo total	5,0	< 0,01
Fluoretos	150,0	3,70
Mercúrio	0,1	< 0,0002
Prata	5,0	< 0,01
Selênio	1,0	< 0,01

Tabela 2.19 – Ensaio de solubilização - escória de aciaria LD/ USIMINAS (SOUZA, 2007).

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO (mg/L)	CONCENTRAÇÃO ME1 (mg/L)
Arsênio	0,01	< 0,01
Bário	0,70	0,06
Cádmio	0,005	< 0,001
Chumbo	0,01	< 0,01
Cianeto	0,07	< 0,01
Cromo total	0,05	< 0,01
Fenóis totais	0,01	< 0,001
Fluoretos	1,50	1,0
Mercúrio	0,001	< 0,0002
Nitrato	10,0	< 0,05
Prata	0,05	< 0,01
Selênio	0,01	< 0,01
Alumínio	0,20	0,61
Cloreto	250,0	< 2,0
Cobre	2,0	< 0,01
Ferro	0,3	< 0,05
Manganês	0,1	0,02
Sódio	200,0	11,80
Surfactantes	0,5	< 0,10
Sulfato	250,0	1,62
Zinco	5,0	< 0,01

A escória de aciaria LD analisada por este estudo, realizado por Souza (2007) em amostras provenientes da USIMINAS, encontra-se em condições de ser utilizada nas pavimentações rodoviárias. É importante frisar que se trata do mesmo material utilizado para a confecção da camada de base nos segmentos estudados do trecho da MG-232, onde empregou-se a escória de aciaria pura e com adição de argila.

2.17 METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO MR "MÓDULO DE RESILIÊNCIA" EM SOLOS E EM MISTURAS BETUMINOSAS

Aurélio B. de Holanda Ferreira (1986) define resiliência como: "propriedade pela qual a energia armazenada em um corpo deformado é devolvida quando cessa a tensão causadora de uma deformação elástica". Em Medina (1997), resiliência significa a energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, que é desenvolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações, ou seja, é a energia potencial de deformação. O estado de tensões em um elemento do subleito ou de camada do pavimento varia com a posição da carga móvel P. A aplicação de uma carga vertical leva ao surgimento de uma tensão vertical (σ_v) e uma tensão horizontal (σ_h).

Os estudos sobre comportamento resiliente dos materiais usados em pavimentação foram iniciados na década de 1930 com Francis Hveem, o primeiro a relacionar as deformações recuperáveis (resiliência) com as fissuras surgidas nos revestimentos asfálticos. Hveem foi quem adotou o termo resiliência, criando também um equipamento chamado estabilômetro, utilizado para medir as deformações verticais através de sensores eletromecânicos (strain gages). O nome Resilient Modulus (Módulo de Resiliência), foi criado para que não fosse confundido com o Módulo de Young, determinado estaticamente (HVEEM, 1955 *apud* BERNUCCI, 2007).

2.17.1 Método para determinação do módulo de resiliência em solos

Esta metodologia para determinação do módulo de resiliência em solos é regulamentada pela norma ME 131 (DNER, 1994) - Solos – determinação do módulo de resiliência. O módulo de resiliência de solos é constituído pela relação tensão-desvio (σ_d), aplicada repetidamente em uma amostra de solo e a correspondente deformação específica vertical recuperável ou resiliente (ϵ_R).

Utiliza-se para a determinação do módulo de resiliência em solo o equipamento para realização do ensaio triaxial de carga repetida esta ilustrado pela Figura 248.

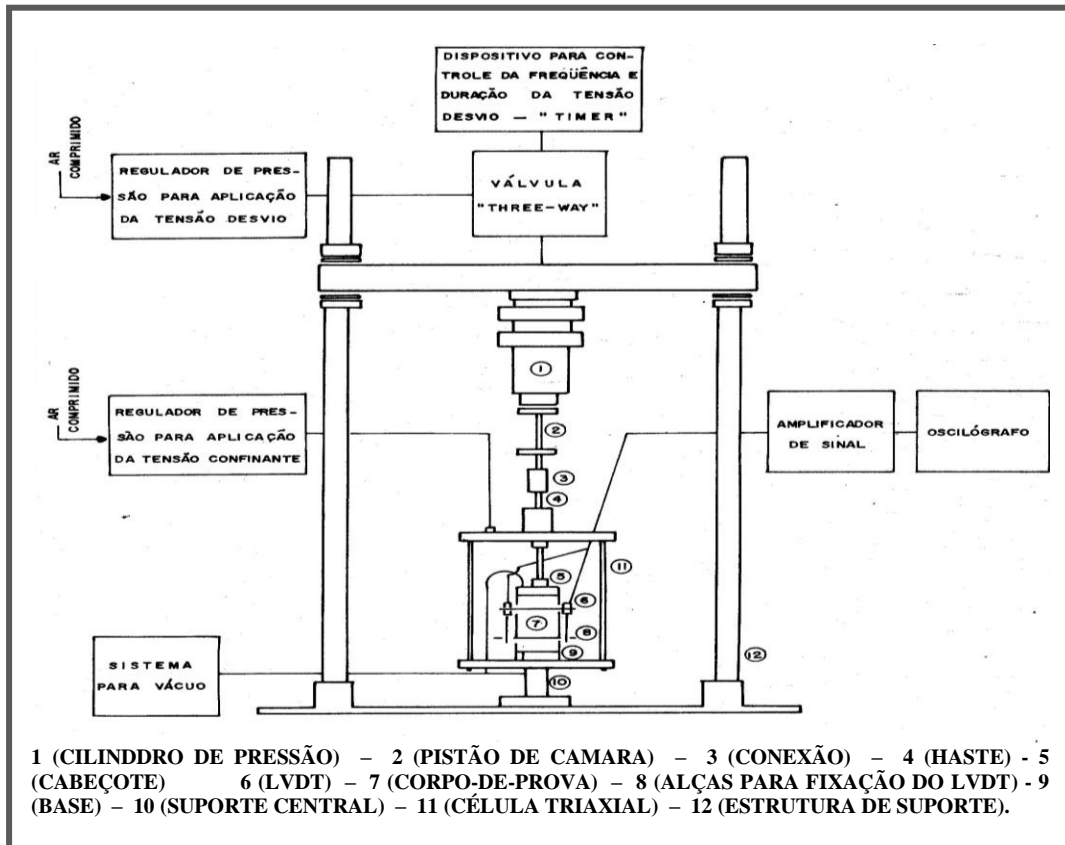


Figura 2.48 - Equipamento para o ensaio Triaxial de Carga Repetida (DNER, 1994).

O princípio de funcionamento dos transdutores, tipo LVDT, consiste em transformar as deformações axiais durante o carregamento repetido em potencial elétrico, cujo valor é registrado no oscilógrafo. Uma pré-calibração é necessária, visando correlacionar as deformações com os valores dos registros. A realização do ensaio para determinação do módulo de resiliência em solos inicia-se com a montagem do conjunto triaxial. Para realização do ensaio triaxial de carga repetida em solo arenoso ou pedregulhoso deve preliminarmente promover o condicionamento do corpo-de-prova e sequencialmente o registro das deformações no oscilógrafo. A metodologia de ensaio para solo siltoso argiloso, também tem seu início com a fase de condicionamento do corpo-de-prova em seguida registrar no oscilógrafo a deformação resiliente. Para o cálculo do módulo de resiliência em solos utiliza-se a Equação 2.1:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_R} \quad (2.1)$$

onde ϵ_R é determinado pela Equação 2.2:

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta_h}{H_0} \quad (2.2)$$

sendo:

MR = módulo de resiliência (MPa);

σ_d = tensão desvio aplicada repetidamente (MPa);

ε_R = deformação específica resiliente (cm);

Δ_h = deformação resiliente registrada no oscilógrafo (cm);

H_0 = distancia entre alças (cm).

Os resultados para o solo arenoso ou pedregulhoso podem ser apresentados em gráfico cujas ordenadas, em escala logarítmica, são os valores dos módulos de resiliência (MR) e as abscissas, em escala logarítmica, são os valores das tensões confinantes (σ_3). A análise de regressão fornece a Equação 2.3, representada graficamente pela Figura 2.49:

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \quad (2.3)$$

onde: k_1 e k_2 = parâmetro de resiliência do solo ensaiado.

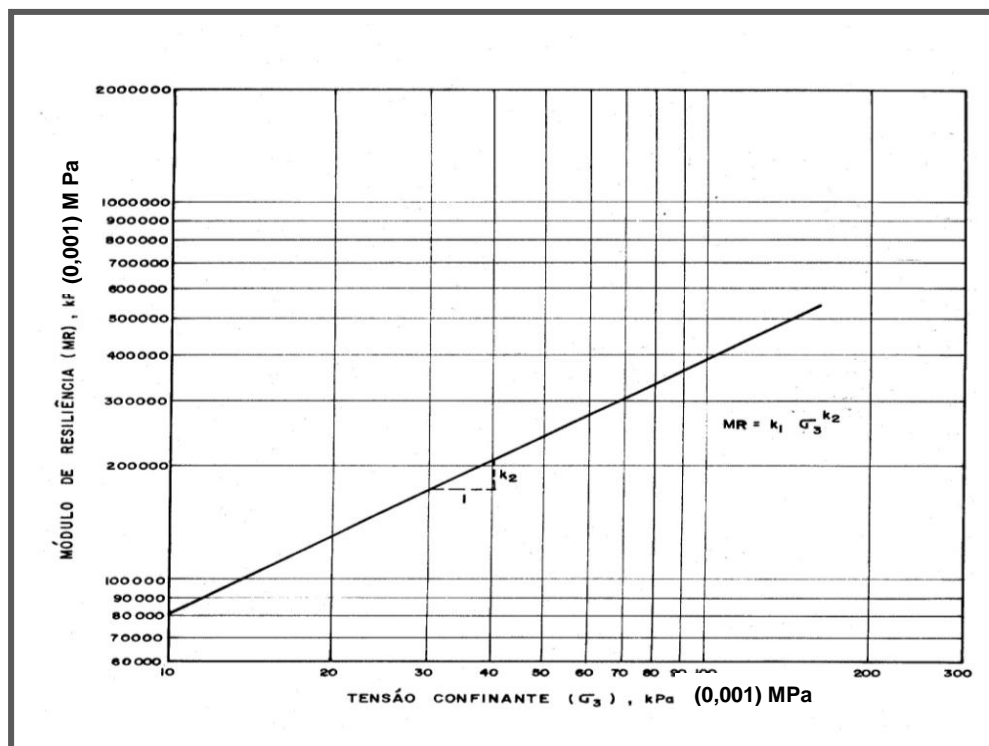


Figura 2.49 – Módulo de resiliência versus tensão confinante (DNER, 1994).

Os resultados para solo argiloso ou siltoso também podem ser apresentados em gráfico cujas ordenadas, em escala aritmética, são os valores dos módulos de resiliência (MR) e as abscissas, em escala aritmética, são os valores das tensões desvio (σ_d). A análise de regressão fornece um modelo bilinear, ver Figura 2.50, representado pelas Equações (2.4 e 2.5):

$$MR = k_2 + k_3 (k_1 - \sigma_d) \quad k_1 > \sigma_d \quad (2.4)$$

$$MR = k_2 + k_4 (\sigma_d - k_1) \quad k_1 < \sigma_d \quad (2.5)$$

onde:

k_1, k_2, k_3, k_4 = parâmetro de resiliência do solo ensaiado.

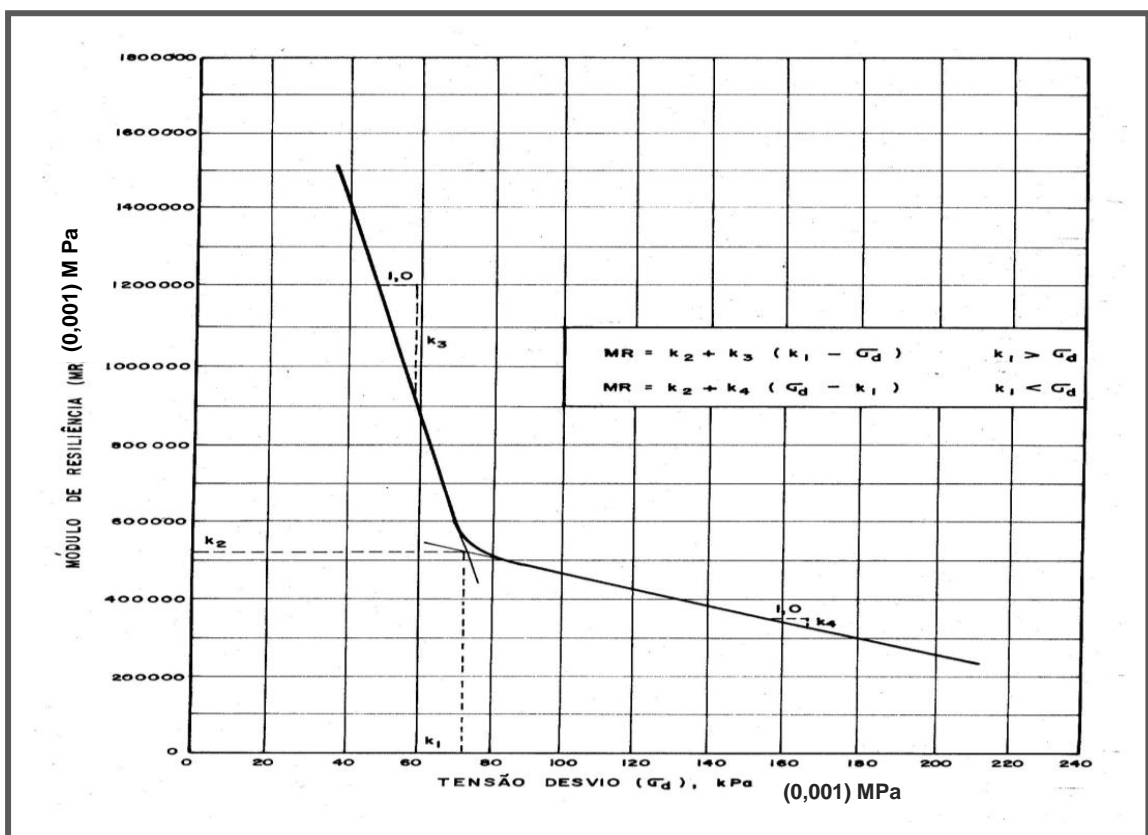


Figura 2.50 - Módulo de resiliência versus tensão desvio (DNER, 1994).

É relevante observar que: alternativamente, os resultados podem ser representados através da Equação 2.6:

$$MR = C_1 - \sigma_d^{C_2} \quad (2.6)$$

onde:

C_1 e C_2 são parâmetros de resiliência do solo estudado e σ_d é a tensão-desvio; no caso de solos siltosos, quando a percentagem de silte na fração que passa na peneira 0,075 mm for superior ou igual a 65%, verificar a influência da tensão confinante, através da metodologia de ensaio descrita para solo arenoso ou pedregulhoso (DNER, 1994).

2.17.2 Método para determinação do MR em misturas betuminosas

A determinação do módulo de resiliência em misturas betuminosas é regulamentada pela norma ME 133 (DNER, 1994). O MR de misturas betuminosas é a relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável (ϵ_r) correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (T), conforme a Equação 2.7.

$$MR = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \quad (2.7)$$

A aparelhagem necessária para determinação do módulo de resiliência em misturas betuminosas está esquematizada na Figura 2.51, sendo constituído de:

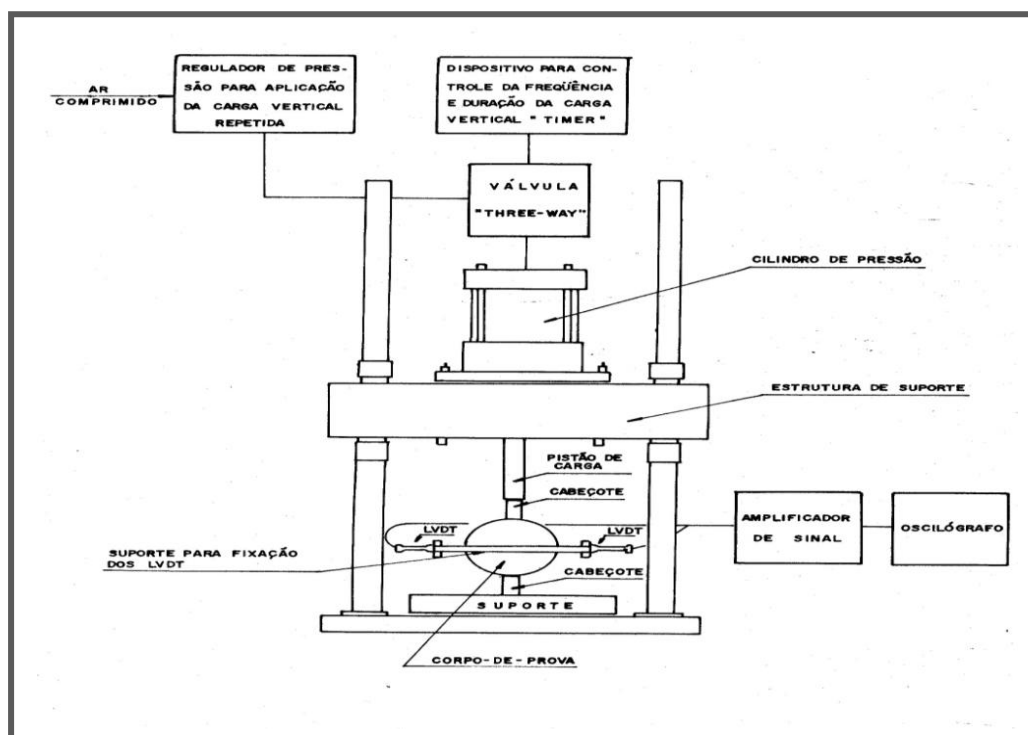


Figura 2.51 - Equipamento para ensaio de Compressão Diametral de Carga Repetida (DNER, 1994).

O corpo de prova (CP) destinado ao ensaio pode ser obtido diretamente do campo por extração através de sonda rotativa ou fabricado em laboratório, de forma cilíndrica, com altura entre 3,50 cm a 6,50 cm e diâmetro de 10 cm \pm 0,2 cm. A metodologia de ensaio para determinação do MR em misturas betuminosas compõe-se na montagem do conjunto: posicionar o CP no interior do suporte para fixação dos transdutores, colocar o CP na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes, fixar e ajustar os transdutores de modo a se obter registro no oscilógrafo, observar o exato assentamento do pistão de carga e dos cabeçotes no CP; sequencialmente a aplicação da carga: fase de condicionamento do corpo de prova: aplicar 200 vezes uma carga vertical repetida (F) diametralmente no CP, de modo a se obter uma tensão (σ_t) menor ou igual a 30% da resistência à tração determinada no ensaio de compressão diametral estático. Recomenda-se a aplicação da menor carga (F), capaz de fornecer um registro comensurável no oscilógrafo, A frequência de aplicação da carga (F) é de 60 ciclos por minuto, duração de 0,1 s; e finalizando com o registro das deformações no oscilógrafo: registrar no oscilógrafo a deformação resiliente para (300, 400 e 500) aplicações de carga (F). O resultado dos módulos de resiliência em misturas betuminosas são calculados através da Equação 2.8, utilizando os valores utilizados e obtidos no ensaio de compressão diametral de carga repetida:

$$MR = \frac{F}{100\Delta H} (0,997\mu + 0,2692) \quad (2.8)$$

onde:

MR = módulo de resiliência (MPa);

F = Carga vertical repetida aplicada diametralmente no CP (N);

Δ = deformação elástica ou resiliente registrada no oscilógrafo, para (300, 400 e 500) aplicações de carga (F) (cm);

H = altura do corpo de prova (cm);

μ = coeficiente de Poisson.

2.18 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO ESTRUTURAL - RETROANÁLISE

A ação das cargas do tráfego sobre pavimentos flexíveis e semirrígidos provoca deformações de dois tipos: recuperáveis e permanentes. As deformações recuperáveis

(deflexões recuperáveis) representam um indicativo de comportamento elástico da estrutura, deixando de existir alguns instantes após a retirada da carga. Estas referidas deflexões recuperáveis provocam o arqueamento das camadas do pavimento, e a sua repetição é a responsável pelo fenômeno de fadiga das camadas betuminosas e cimentadas (DNER, 1998). A retroanálise consiste na determinação analítica dos valores dos módulos de resiliência dos materiais das camadas do pavimento e do subleito para fins de avaliação estrutural. As deformações nos pavimentos são medidas normalmente obtidas em campo por intermédio da viga Benkelman, ver Figura 2.52 podendo também utilizar-se as vigas de deflexão automatizadas para verificação dessas deformações. A constituição básica da viga Benkelman compreende uma viga horizontal apoiada sobre três pés, sendo um traseiro e dois dianteiros. Um braço de prova é rotulado na parte frontal da viga de referência, tendo a sua porção maior posicionada adiante da viga, e a menor sob ela. A ponta do braço de prova deve tocar o pavimento no ponto a ser ensaiado, enquanto a outra extremidade aciona um extensômetro, solidário à viga, sensível a 0,01 mm. A magnitude destas deformações é variável e depende da geometria do carregamento, do valor da carga e da pressão utilizada para enchimento dos pneus, além da posição do ponto de medida em relação à posição da carga.

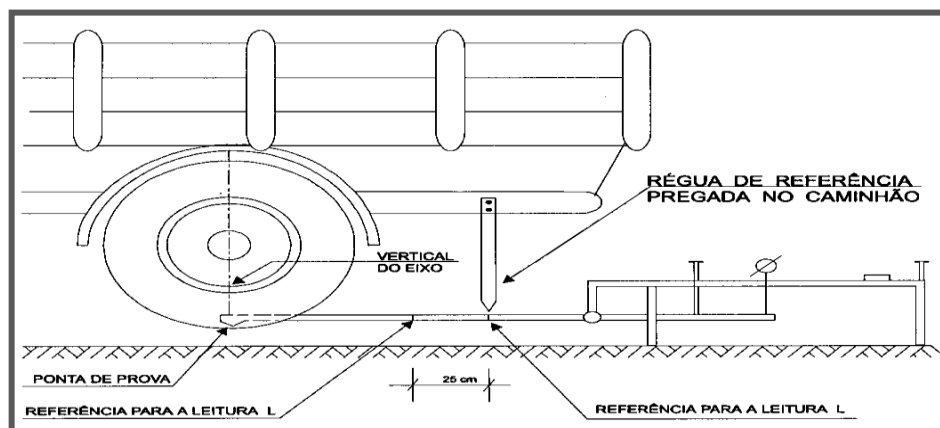


Figura 2.52 - Posicionamento da viga Benkelman e a prova de carga (DNER, 1998).

Considerando a aplicação de uma carga de roda dupla estática - carga de eixo 80,4 kN ou carga de roda 40,2 kN, instala-se a ponta de prova no centro de carga da roda dupla, faz-se uma leitura inicial (L_i) no extensômetro. O caminhão deverá ser deslocado à

frente lentamente, por pelo menos 10 m de distância da ponta de prova ou até que o extensômetro não acuse mais variação de leitura e só então, dever-se-á proceder à leitura final (L_f) em centésimo de milímetros. A área anexa à carga sofrerá deformação recuperável, assumindo a forma aproximada de uma elipse, cujo eixo maior coincide com a direção de deslocamento do tráfego, essa superfície recebe o nome de bacia de deflexão ou deformada, conforme ilustrado pela Figura 2.53 (DNER, 1994).

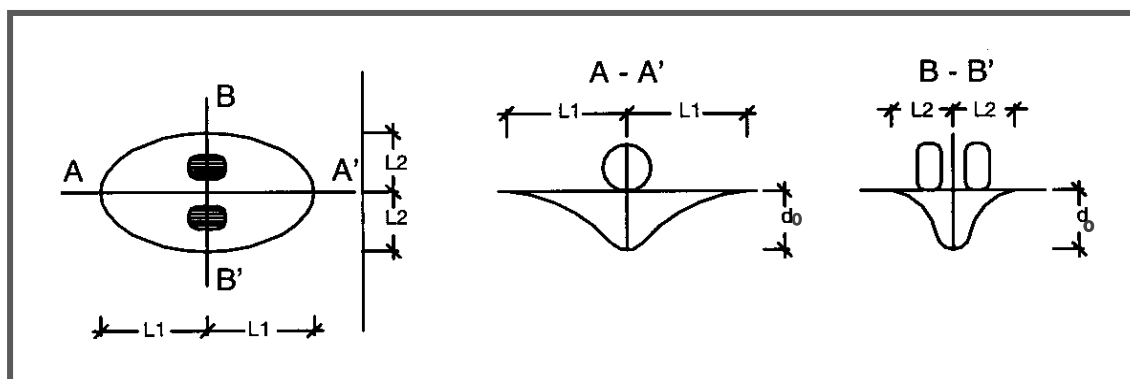


Figura 2.53 – Esquema da bacia de deformação (deformada) (DNER, 1998).

A determinação da deformada deverá ocorrer no sentido longitudinal, ou seja, no sentido de atuação do tráfego.

A deflexão recuperável máxima (d_o) é obtida pela Equação 2.9:

$$d_o = (L_i - L_f) K \quad (2.9)$$

onde:

d_o = deflexão recuperável máxima em centésimo de milímetro;

L_i = leitura inicial em centésimo de milímetro;

L_f = leitura final em centésimo de milímetro;

K = constante da viga obtida pela relação entre o braço maior e o braço menor, articulados, da viga Benkelman.

A forma da deformada deve ser levado em consideração na avaliação estrutural é essencial avaliar o raio de curvatura (R), parâmetro indicativo do arqueamento da deformada na sua porção mais crítica, em geral considerada a 25 cm do centro da carga. Para cálculo do raio de curvatura, normalmente é medido a deflexão máxima (d_o) e mais um ponto, geralmente a 25 cm do inicial (d_{25}), representando um arco de parábola que

passa por estes dois pontos. A Equação 2.10 é largamente utilizada para o ajuste de um arco parabólico que passa pelo ponto considerado, afastado genericamente do centro de carga de um valor x , que depende da deflexão máxima e da deflexão no ponto considerado (d_x).

$$R = \frac{10x^2}{2(d_0 - d_x)} \quad (2.10)$$

Para x , igual a 25 cm, termos a Equação 2.11:

$$R = \frac{6250}{2(d_0 - d_x)} \quad (2.11)$$

Um raio de curvatura baixo é indicativo de um severo arqueamento da deformada, denotando uma condição estrutural crítica.

2.19 REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA UTILIZAR OS SOLOS, MISTURAS DE SOLOS, ESCÓRIA E MATERIAIS BRITADOS OU PRODUTOS PROVENIENTES DE BRITAGEM NA CAMADA DE BASE RODOVIÁRIA

A norma ES 303 (DNER, 1997) especifica que os materiais destinados à confecção de base rodoviária (solos, misturas de solos, escória, misturas de solos e materiais britados ou produtos provenientes de britagem) devem seguir as seguintes características:

- a) deverão possuir composição granulométrica satisfazendo a uma das faixas da Tabela 2.20, de acordo com o número N de tráfego do DNER;

Tabela 2.20 – Faixa granulométrica dos agregados (solos, escória, etc.) para base em função do número N (DNER-ES 303, 1997).

TIPOS	PARA $N > 5 \times 10^6$				PARA $N \leq 5 \times 10^6$		TOLERÂNCIA DA FAIXA DE PROJETO (%)
	A	B	C	D	E	F	
Peneiras	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75 - 90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30 - 65	40 - 75	50 - 85	60 - 100	-	-	± 7
n. 4	25 - 55	30 - 60	35 - 65	50 - 85	55 - 100	10 - 100	± 5
n. 10	15 - 40	20 - 45	25 - 50	40 - 70	40 - 100	55 - 100	± 5
n. 40	8 - 20	15 - 30	15 - 30	25 - 45	20 - 50	30 - 70	± 2
n. 200	2 - 8	5 - 15	5 - 15	10 - 25	6 - 20	8 - 25	± 2

- b) a fração que passa na peneira n. 40 deverá apresentar limite de liquidez (w_L) inferior a 25% e índice de plasticidade inferior ou igual a 6%; quando esses limites forem ultrapassados, o equivalente de areia deverá ser maior que 30%;
- c) a porcentagem do material que passa na peneira n. 200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira n. 40;
- d) o índice de suporte Califórnia (ISC), deverá ser superior a 60% e a expansão máxima será de 0,5%, com energia de compactação intermediária (26 golpes por camada). Para as rodovias onde o tráfego previsto para o período de projeto ultrapassar o valor 5×10^6 , o ISC do material da camada de base deverá ser superior a 80%; neste caso a energia de compactação será a modificada (56 golpes por camada).
- e) o agregado retido na peneira n.10 deverá ser constituído de partículas duras e resistentes, isentas de fragmentos moles (durabilidade) alongados ou achatados (lamelaridade), estes isentos de matéria vegetal ou outra substancia prejudicial. Quando submetidos ao ensaio Los Angeles, não deverão apresentar desgaste superior a 55% admitindo valores maiores no caso de já ter sido utilizado anteriormente e apresentado desempenho satisfatório.

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Será abordado neste capítulo a relação dos materiais analisados e as metodologias empregadas neste estudo, tanto efetuadas em laboratório, quanto em campo para a retroanálise e projeto de dimensionamento de reforço estrutural para uma vida útil de 10 anos.

3.1 MATERIAIS

A Figura 3.1 (a) e (b) retrata amostras de alguns dos materiais analisados por este estudo: escória de aciaria, cascalho, argila e escória de aciaria + 20% de argila tiveram suas origens nas coletas a trado *in loco* na MG 232: Mesquita/Santana do Paraíso.



Figura 3.1 (a) e (b) – Amostras coletadas in loco na MG-232 – trecho: Mesquita/Santana do Paraíso - material de base, sub-base, reforço do subleito e do subleito.

Também foram coletadas neste segmento rodoviário, algumas amostras do revestimento em pré-misturado a frio, através de sondagens rotativas, para estudos granulométricos da brita e a análise do percentual de emulsão asfáltica RL-1C, efetuados após a extração do material betuminoso nos CP de PMF "Pré-Misturado a Frio".

Além das amostras de escória de aciaria coletadas in loco, foram obtidas outras amostras deste coproduto de fabricação do aço no depósito de estocagem da USIMINAS, conforme ilustrado pela Figura 3.2 (a) (b) e (c), para utilização nos ensaios: de análise da expansão PTM-130 " Pennsylvania Test Method" e DRX "Difração de Raios-X" e MEV "Microscopia Eletrônica de Varredura".



Figura 3.2 (a) e (b) – Amostras de escória de aciaria LD oriundas das pilhas de depósito da USIMINAS em Ipatinga MG utilizadas para os ensaios de PTM-130, DRX e MEV.

3.1.1 Demonstrativo da estrutura dos subtrechos e relação dos materiais da rodovia MG 232, trecho: Santana do Paraíso – Mesquita - 20 km de extensão

Todos os materiais citados nas alíneas: a – f, foram objetos de estudos de campo e laboratório, exceto à lama asfáltica e TSD, que foram analisados apenas pelo método de retroanálise. O trecho da MG 232 - Santana do Paraíso – Mesquita foi subdividido em:

- a) subtrecho 1 – estaca: 0 – 49 + 000, extensão: 980 m,
 - revestimento: PMF (execução: 1998), lama asfáltica (aplicação: 2008),
 - base: escória de aciaria de aciaria,
 - sub-base: cascalho,
 - subleito: argila;
- b) subtrecho 2 – estaca: 49 + 000 – 192 + 000: 2.860 m,
 - revestimento: PMF (execução: 2007),
 - base: escória de aciaria + 20% de argila (execução: 2007)
 - Sub-base: revestimento antigo em PMF (executado em 1998),

- Sub-base: antiga base em escória de aciaria (executada em 1998) + antiga sub-base em cascalho (executada em 1998),
 - subleito: argila;
- c) subtrecho 3 – estaca: 192 + 000 – 362 + 000: 3.400 m,
- revestimento: PMF (execução: 1998), lama asfáltica (aplicação: 2008),
 - base: cascalho (execução: 1998),
 - sub-base: cascalho,
 - subleito: argila;
- d) subtrecho 4 – estaca: 362 + 000 – 533 + 000: 3.420 m,
- revestimento: TSD (execução: 2007), aplicação de lama asfáltica entre as estacas: 385 + 000 – 510 + 000, em 2008),
 - base: escória de aciaria com adição de 20% de argila,
 - subleito: argila;
- e) subtrecho 5 – estaca: 533 + 000 – 784 + 000: 5.020 m,
- revestimento: PMF (execução: 2005 – 2006),
 - base: escória de aciaria pura,
 - subleito: argila;
- f) subtrecho 6 – estaca: 784 + 000 – 1000 + 000: 4.320 m,
- revestimento: PMF (execução: 2000), lama asfáltica (aplicação: 2008)
 - base: cascalho (execução: 2000),
 - sub-base: cascalho,
 - subleito: argila.

A extração das amostras para alguns dos ensaios deste estudo foram efetuadas in loco em 03 de fevereiro de 2009. A Tabela 3.1 descreve os locais das sondagens as características físicas e a classificação expedita do pavimento da MG 232 e do subleito no segmento rodoviário em estudo, anteriormente já referenciado. Identificando ainda as diversas amostras utilizadas nos ensaios de caracterização dos materiais, devidamente correlacionadas com os furos das sondagens e as suas estacas respectivas, bem como, o lado da pista onde as diversas amostras foram coletadas. As amostragens da camada de revestimento foram coletadas posteriormente. Como exemplo a Figura 3.3 apresenta o material de subleito coletado.

Tabela 3.1 – Boletim de sondagem, descrição da estrutura da rodovia, relação dos furos de sondagem e a respectiva identificação e localização das amostras (DER, 2009).

BOLETIM DE SONDAÇÃO – IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS COLETADAS NO CAMPO - ESTRUTURA DO PAVIMENTO						
RODOVIA: MG 232 - TRECHO: SANTANA DO PARAÍSO – MESQUITA						
EXTENSÃO: 20 km - DATA DO RECEBIMENTO PELO LABORATÓRIO: 19/03/2009						
REG.	FURO	EST.	POS.	PROF. (m)		CLASSIFICAÇÃO EXPEDITA
				Inicial	Final	
..	1	9 + 12	LD	0,00	0,06	PMF (revestimento)
AM-1	1	9 + 12	LD	0,06	0,23	Escória de aciaria pura (base)
AM-2	1	9 + 12	LD	0,23	0,42	Cascalho (sub-base)
AM-3	1	9 + 12	LD	0,42	0,57	Pedregulho e areia argilosa (subleito)
..	2	109 + 19	LE	0,00	0,08	PMF (revestimento)
AM-1	2	109 + 19	LE	0,08	0,29	Escória de aciaria + 20% de argila (base)
..	2	109 + 19	LE	0,29	0,32	PMF (revestimento)
AM-2	2	109 + 19	LE	0,32	0,53	Escória de aciaria pura (base)
AM-3	2	109 + 19	LE	0,53	0,72	Cascalho (Sub-base)
AM-4	2	109 + 19	LE	0,72	0,88	Argila (subleito)
..	3	209 + 19	LD	0,00	0,04	PMF (revestimento)
AM-1	3	209 + 19	LD	0,04	0,20	Cascalho (base)
AM-2	3	209 + 19	LD	0,20	0,30	Cascalho (sub-base)
AM-3	3	209 + 19	LD	0,30	0,47	Argila (subleito)
..	4	309 + 19	LD	0,00	0,05	PMF (revestimento)
AM-1	4	309 + 19	LD	0,05	0,26	Cascalho (base)
AM-2	4	309 + 19	LD	0,26	0,39	Cascalho (sub-base)
AM-3	4	309 + 19	LD	0,39	0,56	Argila (subleito)
..	5	410	LD	0,00	0,03	TSD (revestimento)
AM-1	5	410	LD	0,03	0,20	Escória de aciaria + 20% de argila (base)
AM-2	5	410	LD	0,20	0,40	Silte (subleito)
..	6	509 + 10	LE	0,00	0,03	TSD (revestimento)
AM-1	6	509 + 10	LE	0,03	0,26	Escória de aciaria + 20% de argila (base)
AM-2	6	509 + 10	LE	0,26	0,47	Argila (subleito)
..	7	609 + 9	LD	0,00	0,04	PMF (revestimento)
AM-1	7	609 + 9	LD	0,04	0,28	Escória de aciaria pura (base)
AM-2	7	609 + 9	LD	0,28	0,48	Pedregulho e areia argilosa (subleito)
..	8	710 + 5	LE	0,00	0,04	PMF (revestimento)
AM-1	8	710 + 5	LE	0,04	0,23	Escória de aciaria pura (base)
AM-2	8	710 + 5	LE	0,23	0,46	Argila (subleito)
..	9	810 + 1	LE	0,00	0,03	PMF (revestimento)
AM-1	9	810 + 1	LE	0,03	0,13	Cascalho (base)
AM-2	9	810 + 1	LE	0,13	0,23	Cascalho (sub-base)
AM-3	9	810 + 1	LE	0,23	0,45	Pedregulho e areia siltosa (subleito)
..	10	907 + 1	LD	0,00	0,05	PMF (revestimento)
AM-1	10	907 + 1	LD	0,05	0,17	Cascalho (base)
AM-2	10	907 + 1	LD	0,17	0,32	Cascalho (sub-base)
AM-3	10	907 + 1	LD	0,32	0,47	Pedregulho e areia argilosa (subleito)
..	11	998 + 19	LD	0,00	0,03	PMF (revestimento)
AM-1	11	998 + 19	LD	0,03	0,18	Cascalho (base)
AM-2	11	998 + 19	LD	0,18	0,28	Cascalho (sub-base)
AM-3	11	998 + 19	LD	0,28	0,43	Pedregulho e areia siltosa (subleito)



Figura 3.3 - Material de subleito coletado na MG-232 - trecho: Mesquita - Santana do Paraíso.

3.2 MÉTODOS

Os resultados obtidos, na presente pesquisa, foram fundamentados pelos ensaios de laboratório, de campo e pela retroanálise. Posteriormente, também utilizando-se o método de retroanálise, executou-se um projeto de reforço estrutural para uma vida útil do pavimento de 10 anos. Assim a metodologia utilizada embasa-se nos estudos das propriedades e características dos agregados empregados nas respectivas camadas do pavimento e do subleito rodoviário, além de análises físico-químicas e uma detida verificação do comportamento geotécnico da estrutura sob os efeitos das cargas e do tempo. Para obtenção de tais parâmetros foram realizados os estudos:

1. Granulometria antes e após compactação;
2. Limites de Atterberg: limite de plasticidade (w_p) e limite de liquidez (w_L) com a determinação do índice de plasticidade (I_p);
3. Índice de suporte Califórnia (ISC);
4. Abrasão Los Angeles;
5. Determinação da absorção e da densidade real do agregado miúdo da escória de aciaria;
6. Determinação do índice de forma do agregado;
7. Avaliação da durabilidade de agregado;
8. Definição do índice de grupo do material;
9. Determinação do índice de lamelaridade;
10. Avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria pelo método Pennsylvania test method - PTM 130;
11. Misturas Betuminosas – percentagem de betume;

12. Caracterização pela metodologia MCT;
13. Difração de raios-x (DRX);
14. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
15. Determinação da resistência à tração em misturas betuminosas;
16. Determinação do módulo de resiliência (MR) em solos – ensaio triaxial de carga repetida;
17. Determinação do módulo de resiliência (MR) em misturas betuminosas – ensaio de compressão diametral de carga repetida.

Nos estudos de campo, utilizando-se a viga Benkelman, proveu-se criteriosa medição das bacias de deflexões e com a treliça mediu-se as deformações permanentes do pavimento, assim sendo, foi possível à composição do banco de dados, viabilizando estudar o comportamento geotécnico do pavimento do trecho rodoviário supracitado. Desta maneira, como o objetivo principal deste estudo é demonstrar a eficácia, ou não, da utilização da escória de aciaria para confecção de bases rodoviárias, realizou-se uma avaliação estrutural por retroanálise, posteriormente, reiterados pelo laboratório (amostras coletadas in loco). Realizou-se também um dimensionamento do pavimento para vida útil de 10 anos utilizando-se os programas RETRAN5-L e ELSYM5. Este projeto de reforço tem à finalidade de verificar a necessidade, ou não, de reforçar a atual estrutural em CBUQ e, se necessário, em qual dimensão. Desta forma, os citados estudos possibilitou efetivar-se uma síntese conclusiva sobre a utilização da escória de aciaria neste segmento rodoviário.

3.2.1 Preparação das amostras para os ensaios de caracterização e compactação

As amostras de solo e de escória de aciaria para os ensaios de caracterização foram obtidas conforme prescrição das normas: ABNT-NBR 6457: Amostras de solos – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, 1986. 6 p.; DER/MG-MT-01.02: Preparação de amostras de solos destinados aos ensaios de caracterização, 1992. 4 p. e DNER-ME 041/94: Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização, 1994. 4 p.

As referidas amostras de solos e da escória de aciaria quando recebidas de campo foram secas ao ar e desagregadas completamente, eliminando os torrões no almofariz com utilização da mão de gral (Figura 3.4), tomando-se o cuidado para não reduzir o tamanho natural das partículas individuais do solo. Obteve assim, uma amostra representativa de 1500 g para os solos argilosos e de 2000 g para os solos arenosos e predregulhosos, os pesos das amostras representativas, obtidas com aproximação de 5 g foram anotados como peso total da amostra seca ao ar. Estas amostras secas ao ar foram passadas na peneira de 2,0 mm, tomando-se precaução de novamente desagregar no almofariz, com auxílio de mão de gral revestida de borracha, todos os torrões que ainda existam eventualmente, de modo a assegurar a retenção na peneira somente dos grãos maiores que abertura da malha.



Figura 3.4 – Fração da amostra de escória de aciaria passante na peneira 2,0 mm sendo destorroado com a mão de gral no almofariz.

Para a preparação das amostras dos materiais retrocitados, solo e escória de aciaria, para a análise granulométrica, umidade higroscópica e densidade real de solos, foram subdivididas em duas etapas básicas, a preparação das amostras dos materiais retidos na peneira 2,0 mm e daqueles que passaram pela peneira 2,0 mm. O preparo das amostras dos materiais retidos na peneira 2,0 mm foram implementadas utilizando a fração anteriormente reservada da amostra seca ao ar retida na citada peneira, sendo também lavada nesta peneira (Figura 3.5) a fim de eliminar o material fino aderente às partículas de diâmetro maior que 2,0 mm e seca em estufa com temperatura variando entre 105 °C – 110 °C, até que atingir a constância de peso; este material foi utilizado para análise granulométrica das frações das amostras maiores que 2,0 mm.



Figura 3.5 - Fração da amostra seca ao ar retida na peneira de 2,0 mm, sendo lavada para eliminação de material fino ainda aderente as partículas deste material.

As amostras de solo e de escória de aciaria que passaram na peneira 2,0 mm foram adequadas aproveitando as frações das amostras secas ao ar passantes nesta referida peneira, quarteadas numa quantidade de peso de cerca de 250 g, para ensaios de determinação da umidade higroscópica, para análises granulométricas das frações da amostras menores que 2,0 mm e para o ensaios de determinação da densidade real.

Em conformidade com a prescrição da seção 5.2.2 da norma ME 041 (DNER, 1994), as amostras de solos e de escória de aciaria para determinação dos limites de liquidez e plasticidade foram conseguidas utilizando-se as frações restantes das amostras obtidas na peneira de 2,0 mm e passando-as pela peneira de 0,42 mm tomando-se a precaução de desagregar no almofariz com o auxílio da mão de gral todos os torrões que eventualmente ainda possam se encontrar nas amostras, seguidamente, retirou-se dos respectivos materiais, pelo quarteamento, uma quantidade em peso de cerca de 200 g, desta quantidade tomou-se cerca de cerca de 70 g para o ensaio de determinação do limite de liquidez e cerca de 50 g para o ensaio de determinação do limite de plasticidade, ensaios realizados para cada amostra dos materiais retrorreferenciados.

Tomou-se cerca de 50 g de material seco ao ar que passou na peneira de 2,0 mm e determinou-se sua umidade higroscópica pela Equação 3.1:

$$w = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (3.1)$$

onde:

w = teor de umidade, em percentagem;

P_s = peso do material seco em estufa a 105 °C – 110 °C, até que alcançou a constância de peso, pesando este material com a aproximação de 0,01 g;

P_h = peso do material úmido;

3.2.2 Granulometria antes e após compactação

Os ensaios de granulometria por peneiramento, antes e após compactação, utilizando os materiais extraídos *in loco* na rodovia estudada foram executados em março de 2009, pelo laboratório da sede do DER/MG em Belo Horizonte, observando as normas: ABNT-NBR 7181 b: Análise granulométrica, 1981. 4 p.; DER/MG-MT-01.08: análise granulométrica de solos por peneiramento, 1992. 4 p. e DNER-ME 080/94: Solos – análise granulométrica por peneiramento, 1994. 4 p. Os ensaios de granulometria antes da compactação foram realizados com todas as amostras citadas na Tabela 3.1 retrorreferenciada, exceto com o material de revestimento, que é citado para efeito de localização e identificação da camada na estrutura do pavimento, ensaios com o revestimento será objeto de análise mais a frente deste estudo. Os ensaios de granulometria após a compactação foram realizados apenas com as amostra AM-1 de todos os furos de sondagem referenciados pela Tabela 3.1, supra.

3.2.2.1 Classificação TRB - Solos e escória de aciaria LD

Para classificação do material, utilizamos a metodologia adotada pelo DNER "Departamento Nacional de Estradas de Rodagem atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, a TRB " Transportation Research Board" da AASHTO "Association of State Highway and Transportation of Officials", antiga HRB " Highway Research Board", os solos são reunidos em grupos e subgrupos, em função de sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo. Conforme o DNER, (2006), pela Tabela 3.2 é mostrado o quadro de classificação dos solos, segundo a TRB. O grupo de solo é determinado por processo de eliminação da esquerda para a direita, no quadro de classificação. O primeiro grupo a partir da esquerda, com o qual os valores do solo ensaiado coincidir, serão a classificação correta.

Tabela 3.2 – Classificação de solos TRB "Transportation Research Board" (DNER, 2006).

CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS - TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB)												
CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (OU MENOS) PASSANDO NA PENEIRA DE n. 200							MATERIAIS SILTO-ARGILOSOS				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7					A-7-5	A-7-6
Granulometria - % passando na peneira												
n. 10	50 máx.											
n. 40	30 máx.	30 máx.	51 máx.									
n.200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.	
Características de fração passando na peneira n. 40												
Limite de liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	
índice de plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*	
Índice de grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.	
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosas ou argilosas				Solos siltosos		Solos argilosos		
Comportamento como subleito	Excelente e bom							Sofrível e mau				

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

3.2.3 Ensaio dos limites de plasticidade e liquidez para determinação do índice de plasticidade

Foram estudados os limites de Atterberg: limite de liquidez (w_L) e o limite de plasticidade (w_P), ver Figura 3.6. Estes limites foram obtidos sob a orientação das seguintes normas técnicas: ABNT-NBR 6459 b: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984, 6 p.; ABNT-NBR 7180: Limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1981. 3 p.; DER/MG-MT-01.05: Limite de liquidez de solos. Belo Horizonte, 1992. 6 p.; DER/MG-MT-01.06: Limite de plasticidade de solos. Rio de Janeiro, 1992. 2 p.; DNER-ME 082/94: solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994. 3 p. e DNER-ME 122/94: Solos – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1994. 7 p.

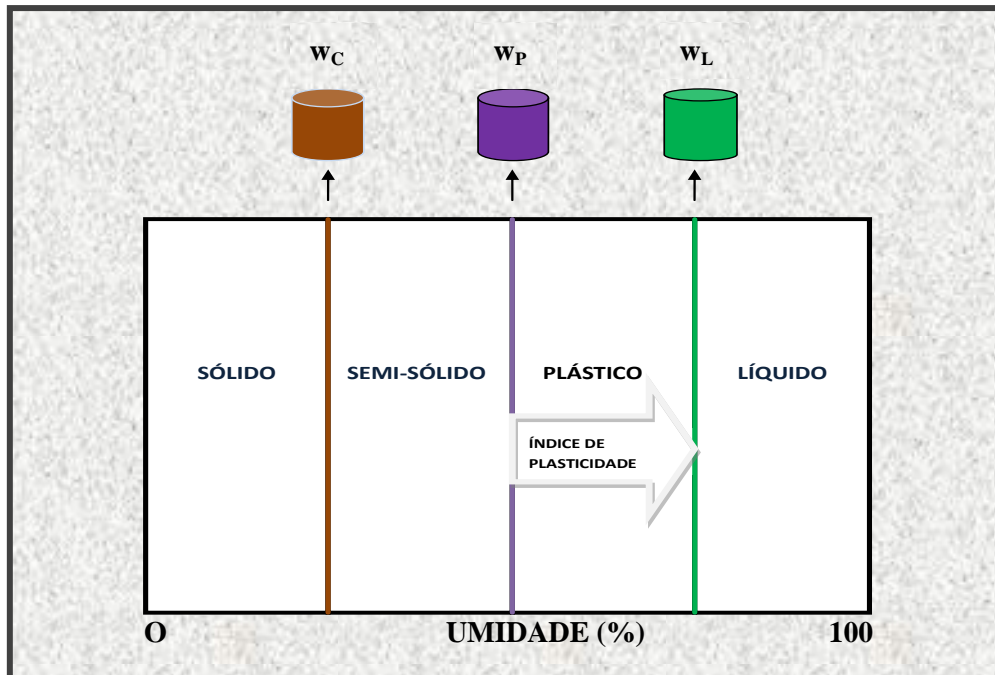


Figura 3.6 – Representação gráfica dos limites de Atterberg.

Os ensaios para determinação do limite de liquidez (w_L) e limite de plasticidade (w_P) conforme ilustração da Figura 3.7 foram realizados utilizando-se também as amostragens extraídas in loco na MG 232, trecho: Mesquita/Santana do Paraíso, após realizado estes ensaios (w_L e w_P) para todas as amostras citadas na Tabela 3.1, retrorreferenciada, foi determinando o índice de plasticidade (I_p) exceto com o material de revestimento, material não compatível para este tipo de método de estudo.

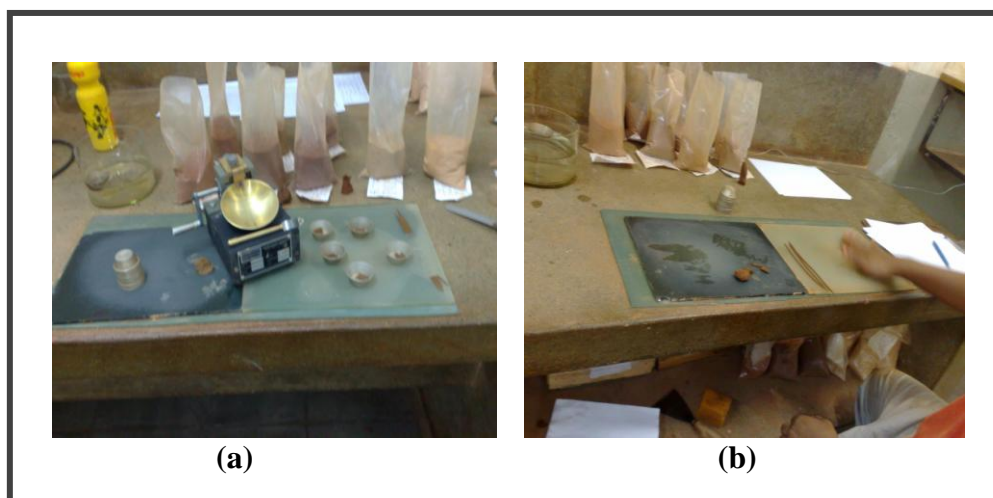


Figura 3.7 – Fases dos ensaios de limites de liquidez e plasticidade para posterior determinação do índice de plasticidade dos materiais estudados solo e escória de aciaria.

Segundo a norma ME 082 (DNER, 1994), calcula-se o índice de plasticidade (I_p) de um solo pela diferença numérica entre o limite de liquidez (w_L) e o limite de plasticidade (w_P); quando o limite de liquidez (w_L) ou limite de plasticidade (w_P) não puderem ser determinados, anota-se o índice de plasticidade (I_p) como NP (não plástico). Quando o solo for extremamente arenoso, o ensaio do limite de plasticidade (w_P) deve ser feito antes do ensaio do limite de liquidez (w_L). Se o limite de plasticidade (w_P) não puder ser determinado, anotar ambos como NP. Quando o limite de plasticidade (w_P) for igual ou maior do que o limite de liquidez (w_L) anota-se o índice de plasticidade (I_p) como NP

3.2.4 Índice de suporte Califórnia (ISC) utilizando amostras não trabalhadas

Os ensaios para determinação dos ISC "índices de suporte Califórnia" (Figura 3.8) foram realizados em amostras de solo e da escória de aciaria extraídas in loco nesta rodovia, conforme discriminação da Tabela 3.1, em todos os segmentos homogêneos do trecho rodoviário da MG-232, ora em estudo, conforme a prescrição contida nas normas técnicas: ABNT-NBR 9895: Índice de suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987. 14 p.; DER/MG-MT-01.09a: Ensaio de compactação e índice de suporte Califórnia (CBR). Belo Horizonte, 1992. 12 p.; DNER- ME-049/94: Solos – determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994. 14 p.

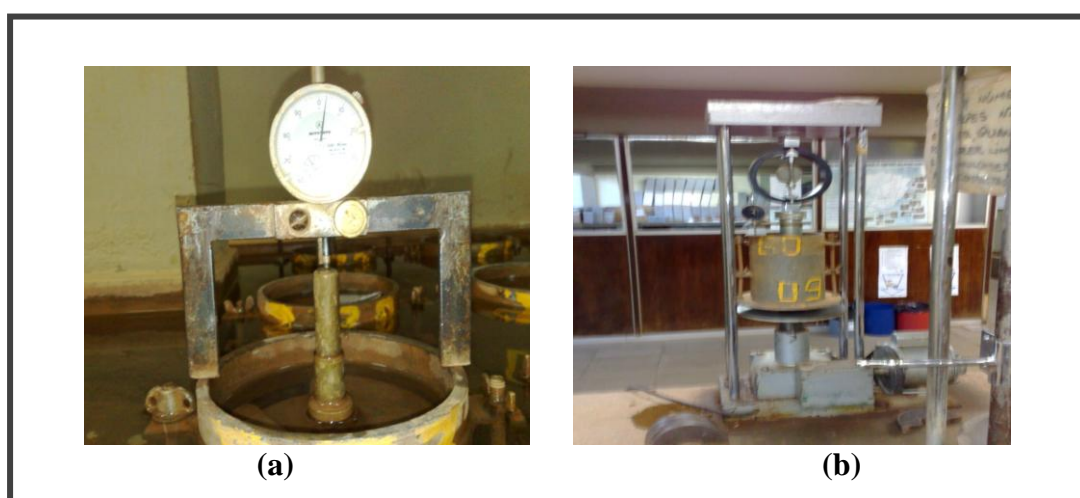


Figura 3.8 – Fases do ensaio de ISC realizado neste estudo com as amostras de solo e de escória de aciaria

3.2.5 Ensaio para determinação da abrasão Los Angeles

Os ensaios para determinação da abrasão Los Angeles, foram realizados conforme a prescrição contida nas normas técnicas: NBR-NM 51– Agregados – determinação da abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2001. 6 p; DER/MG-MT-01.43: Desgaste de agregados por abrasão. Belo Horizonte, 1992. 5 p. e DNER-ME 035/98: Agregados – determinação da abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998. 6 p.

Desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina Los Angeles juntamente com uma carga abrasiva, submetido a um determinado número de revoluções desta máquina à velocidade de 30 rpm "rotações por minuto" ou 3.142 rad.s^{-1} "radianos por segundo". O desgaste é convencionalmente expresso pela porcentagem, em peso, do material que passa, após o ensaio, pela peneira de malhas quadradas de 1,7 mm. A máquina Los Angeles (Figura 3.9) deverá ser fixada e operada para manter uma velocidade periférica uniforme.



Figura 3.9 – Máquina Los Angeles utilizada para realização dos ensaios deste estudo.

O ensaio de abrasão Los Angeles visa analisar o valor de desgaste do material, mais desfavorável, objetiva garantir o não comprometimento do mesmo, quanto as características de dureza e resistência. Certificando sua qualidade quanto aos esforços de impacto e polimento, características essenciais aos agregados. Segundo a norma EM

262 (DNER, 1994) o valor máximo aceitável para o desgaste por abrasão Los Angeles do agregado, escória de aciaria, para o uso em pavimentação, nas camadas de sub-base, base e revestimento, deverá ser $\leq 25,0\%$.

Assim sendo, servindo-se das amostras extraídas in loco, avaliou-se o desgaste Los Angeles da escória de aciaria, utilizada como camada de base do pavimento estudado, realizou-se três ensaios (A_n : Abrasão Los Angeles da graduação n), visando-se verificar a eficiência deste coproduto da fabricação do aço submetida ao ensaio abrasivo.

3.2.6 Determinação da densidade real do agregado miúdo (grãos finos)

Realizou-se o ensaio para determinação da densidade dos agregados miúdos (grãos finos) conforme as prescrições contidas nas normas técnicas: DER/MG-MT-01.46: Densidade real do agregado miúdo. Belo Horizonte, 1992. 3 p. e DNER-ME 084/95: Agregado miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995. 3 p.

A densidade real fornece elementos, para a caracterização do traço da mistura, tais como: densidade teórica, porcentagens de vazios do agregado mineral e nas misturas asfálticas, a relação betume vazios. A densidade definida por este método é a relação da massa de determinado volume de amostra a 25 °C (exclusive vazios) para a massa de igual volume de água destilada ou deionizada à mesma temperatura.

As frações amostrais das camadas de base executadas em escória de aciaria, cascalho, escória de aciaria + 20% de argila, da camada de sub-base executada em cascalho e do subleito em argila obtidas para o ensaio de densidade real do agregado miúdo foram oriundas das amostras extraídas in loco em todos os segmentos homogêneos do trecho estudado. As frações foram determinadas utilizando 100% da mistura de agregados, atendendo a faixa especificada, descrita no ensaio de granulometria por peneiramento. Para eliminação das bolhas de ar, adotou-se o processo da fervura por quinze minutos, agitando constantemente, para evitar o superaquecimento; sendo esfriado em banho d'água a 25 °C. O cálculo da densidade real do agregado miúdo é realizado pela Equação 3.2:

$$D_{25} = \frac{b-a}{(d-a)-(c-b)} \quad (3.2)$$

onde: D_{25} = densidade real de agregado miúdo 25 °C = n. adimensional;

a = massa do picnômetro vazio e seco, em g;

b = massa do picnômetro mais amostra, em g;

c = massa do picnômetro mais amostra mais água, em g;

d = massa do picnômetro cheio d'água, em g;

3.2.7 Determinação da absorção de água da escória de aciaria

Para realização do ensaio de absorção de água da escória de aciaria utilizada como camada de base da MG 232, trecho: Mesquita/Santana do Paraíso, também se adotou a norma ME 084 (DNER, 1995), sendo realizados três ensaios com os agregados passando na peneira de malha 19,1mm e retido na peneira de malha 9,5 mm. Este valor da absorção de água, deverá atender as normas: PRO 263 (DNER, 1994) e ME 262 (DNER, 1994), que estabelecem a absorção entre 1,0% a 2,0% em peso para que este material possa ser utilizado como camada de base rodoviária.

3.2.8 Ensaio para determinação do índice de forma do agregado

Os ensaios para determinação dos índices de forma foram realizados conforme a prescrição contida nas normas técnicas: DER/MG-MT-01.49: Índice de forma de agregados. Belo Horizonte, 1992. 3 p. e DNER-ME 086/94: Agregado – determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994. 5 p.

Esta metodologia fixa o modo pelo qual se determina a variação dos eixos multidirecionais das partículas que compõem o agregado, definindo-a pelo índice de forma. O tamanho diretriz, ou seja, o valor do diâmetro do menor crivo de abertura circular, especificado, em que passam todos os grãos de uma fração, das que compõem a graduação escolhida. De cada fração separam-se as partículas retidas no crivo redutor de abertura igual à metade do tamanho diretriz correspondente, anotando-se o seu peso (crivo I). O material que passar no primeiro crivo redutor deve ser testado em um

segundo crivo redutor de abertura igual a 1/3 do tamanho diretriz da fração. Anota-se o peso do material retido neste crivo (crivo II). Repetem-se as operações acima com todas as frações da graduação escolhida. Para cada fração, que compõe a graduação determina-se, em relação a seu peso inicial, as percentagens retidas em cada crivo redutor. Segundo a norma ME 086 (DNER, 1994) o índice de forma (f) é calculado pela Equação 3.3:

$$f = \frac{P_1 + 0,5P_2}{100n} \quad (3.3)$$

onde:

P_1 = soma das percentagens retidas nos crivos I, de todas as frações que compõem a graduação,

P_2 = soma das percentagens retidas nos crivos II, de todas as frações que compõem a graduação,

n = número de frações (ou de tamanhos diretrizes) que compõem a graduação escolhida.

Os ensaios de determinação do índice de forma foram realizados para este estudo, utilizando-se três amostras da escória de aciaria obtidas do depósito da USIMINAS em Ipatinga MG. O resultado deste ensaio é um parâmetro adimensional, utilizado para classificação do material quanto a sua esfericidade, podendo variar entre 0 a 1, quanto mais próximo do número 1 melhor será o resultado.

3.2.9 Ensaio para a avaliação da durabilidade de agregado

Os ensaios para determinação da durabilidade de agregado pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio foram realizados conforme a prescrição contida na norma técnica: DNER-ME 089/94: Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro. 6 p.

Este ensaio objetiva através de determinados procedimentos avaliar a durabilidade do agregado pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio. As soluções de sulfato de sódio ou de sulfato de magnésio devem ser preparadas dissolvendo-se uma

quantidade de sal, tal que, a uma temperatura entre 25 °C e 30 °C, assegure, não só a saturação, mas também a presença de excesso de cristais nas soluções, após a preparação. Durante a adição do sal as soluções devem ser rigorosamente agitadas, operação que se deve repetir a intervalos frequentes, até sua utilização. Depois de pronta, as soluções devem ser esfriadas à temperatura entre 21 °C ± 1 °C, e mantidas nessa temperatura por, no mínimo, 48 horas antes da realização do ensaio. No momento da utilização as soluções devem ser mais uma vez agitadas e apresentar, conforme o caso, as seguintes densidades: solução saturada de sulfato de sódio – densidade entre 1,151 e 1,174; solução saturada de magnésio – densidade entre 1,295 e 1,308.

Antes de qualquer das operações, de separação em frações, faz-se a análise granulométrica da amostra representativa do agregado. Material passando na peneira 9,5 mm – as frações para o ensaio, passando em torno de 110 g cada uma são separadas nas peneiras estipuladas pelo item 5.2 da norma ME 089 (DNER, 1994). A amostra deve ser imersa na solução de sulfato de sódio ou de magnésio por um período de 16 a 18 horas, de modo que o nível da solução fique 1 cm acima da amostra. Após o período de imersão a amostra deve ser retirada da solução, drenada durante 15 ± 5 minutos e colocada em estufa para secar a 105 °C – 110 °C, até constância de peso (Figura 3.10).

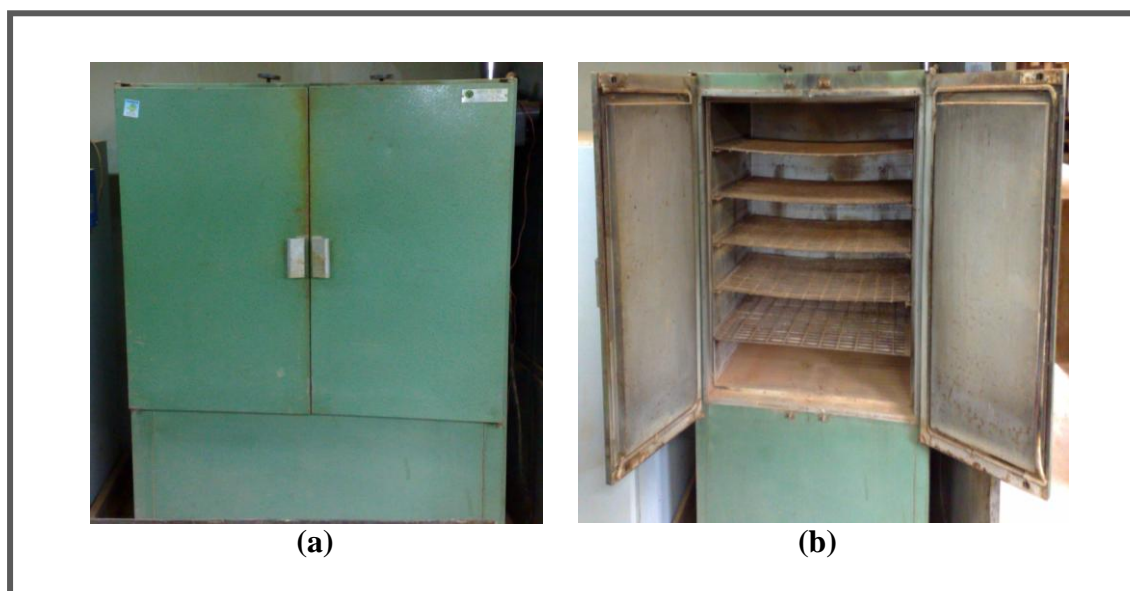


Figura 3.10 (a) e (b) – Estufa capaz de manter a faixa térmica de trabalho entre 105 °C – 110 °C utilizada para o ensaio de durabilidade do agregado escória de aciaria.

Durante a secagem, tomar precauções que evitem a perda de partículas retidas na peneira de menor abertura na qual a amostra foi preparada. Após a secagem, a amostra deve ser resfriada até a temperatura ambiente. O processo de imersão e secagem alternadas constitui um ciclo, que deve ser repetido até que o número desejado de ciclos seja completado. As frações > 19 mm devem ser examinadas qualitativamente após cada imersão, conforme prescreve a norma ME 089 (DNER, 1994),

O ensaio de durabilidade da escória de aciaria ME 089 (DNER, 1994) foi realizado com amostras de escória de aciaria, utilizada como na camada de base no trecho: Mesquita – Santana do Paraíso. A norma EM 262 (DNER, 1994) estabelece que a durabilidade ao sulfato de sódio, cinco ciclos, deverá ser de 0% a 0,5%.

3.2.10 Definição do índice de grupo (IG) do material

Foi determinado o Índice de Grupo (IG) para totalidade das amostras dos solos (argila e cascalho) e também para a escória de aciaria LD, utilizada pura e com mistura de 20% de argila coletadas in loco em todos segmentos homogêneos que compõem o trecho rodoviário da MG-232, objeto de nosso estudo, conforme elucidada a Figura 3.1 retrorreferenciada. Para determinação do índice de grupo (IG) utilizou-se da metodologia descrita pela Equação 3.4:

$$IG = (P - 35) (0,2 + 0,005) (w_L - 40) + 0,01 (P - 15) (I_p - 10) \quad (3.4)$$

Quando o índice de grupo (IG), dos solos classificados pela TRB forem: A-2-6 e A-2-7, usa-se apenas, a parte da fórmula que depende do índice de plasticidade (I_p). Quando for encontrado o valor de índice de grupo (IG), negativo, adotamos o valor, zero ($IG = 0$). O índice de grupo poderá ser obtido também pelo gráfico representado pela Figura 3.11, onde são determinados os IG parciais, em função do IG final, que é expresso como um número inteiro. Segundo ensina Murilo L. de Souza (1980), o suporte de um material em boas condições de drenagem e compactação, varia inversamente com o valor de IG, assim, um IG igual à zero é, provavelmente, indicativo de um material de bom suporte, enquanto um IG

igual a vinte (20), pressupõe um material de mau comportamento sob a ação sob a ação de cargas. Solos granulares $\rightarrow 0 \leq IG < 4$, solos siltosos $4 \leq IG < 12$, solos argilosos $12 \leq IG \leq 20$.

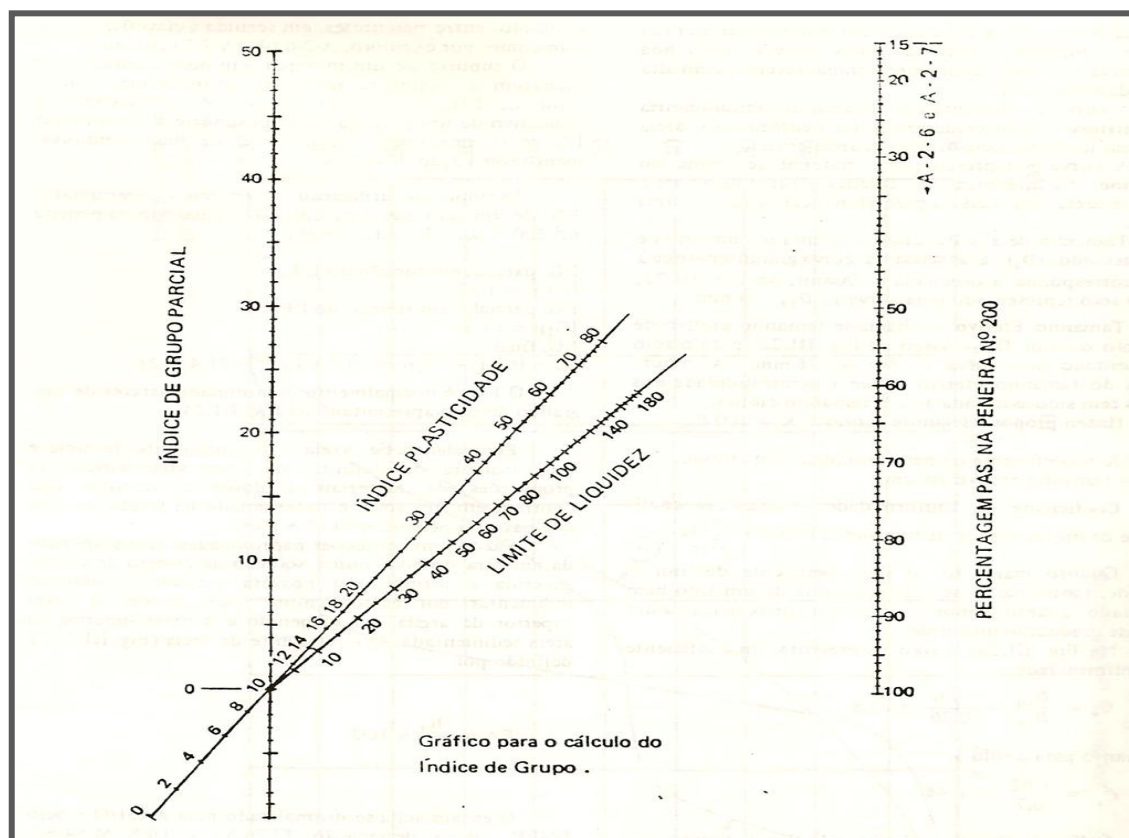


Figura 3.11 – Gráfico para o cálculo do índice de grupo (SOUZA, 1980).

O IG final se dará pela somatória dos valores constatados para os IG parciais, que são definidos em função do percentual do material passante na peneira 200 (P_{200}) da ASSHO ou da peneira 0,075 da ABNT e, respectivamente, do w_L e I_p . Assim sendo o IG parcial, em função do $w_L = IG_{LL}$, o IG parcial, em função do $I_p = IG_{IP}$ e o $IG = IG_{final} \therefore IG = IG_{w_L} + IG_{I_p}$.

3.2.11 Ensaio de determinação do Índice de Lamelaridade

O ensaio para determinação do índice de lamelaridade de agregado visa a determinação e avaliação do percentual de partículas lamelares contidas no agregado.

Foram realizados, neste estudo, três ensaios para determinação do Índice de Lamelaridade com amostras da escória de aciaria LD, obtidas no depósito da USIMINAS em Ipatinga MG, utilizando-se o método do Instituto de Asfalto MS-13 - determinação do percentual de partículas lamelares de agregados.

Segundo Murilo L. Souza (1980), a forma das partículas de um agregado é um dado importante porque formas indesejáveis (lamelares ou alongadas) podem ser a causa de certas anomalias, como, por exemplo, a variação do teor de betume necessário em uma mesma mistura betuminosa. A forma ideal das partículas é a cúbica, que propicia um maior entrosamento entre as mesmas, obtendo dessa maneira maior resistência ao cisalhamento, além de uma menor área específica.

Para realização do ensaio de determinação da lamelaridade, pelo método do Instituto de Asfalto – MS-13 utilizou-se a aparelhagem descrita sequencialmente:

- a) Série de peneiras “Tyler” de malhas quadradas (21/2, 2, 11/2, 11/4, 1, 2/4, 1/2, 3/8, 1/4) polegadas, inclusive fundo;
- b) balança com capacidade de 1 kg, sensível a 0,1 g;
- c) gabaritos apropriados para o ensaio, Figura 3.12.

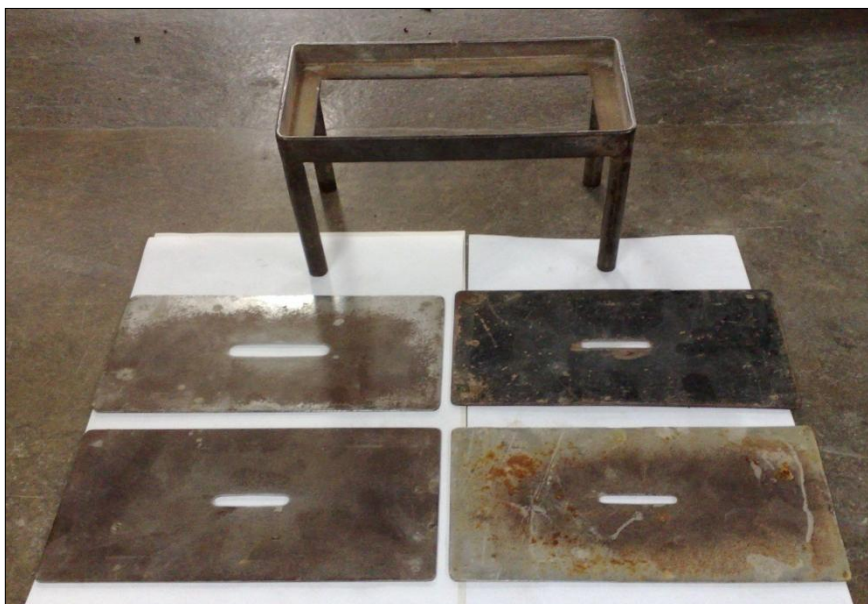


Figura 3.12 - Gabaritos utilizados no ensaio de Índice de Lamelaridade.

A preparação da amostra para realização do ensaio de determinação da lamelaridade, pelo método do Instituto de Asfalto – MS-13 consiste em utilizar-se no mínimo 200 partículas de cada fração. As que tiverem mais de 200 pedras deverão ser quarteadas até atingirem esta quantidade. As que tiverem menos de 200 deverão ser completadas através do remanescente da amostra de campo.

3.2.12 Avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria Pennsylvania Test Method (PTM 130)

O ensaio PTM-130 "Pennsylvania Test Method", criado em junho de 1976, revisado em maio de 1978 e adaptado pelo DER/MG "Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais" - DMA-1 "Divisão de Materiais" em 1982, visa avaliar o potencial expansivo da escória de aciaria. As escórias de aciaria, produzidas através dos diversificados processo de fabricação de aço, são geralmente de características expansivas, suscetíveis a excessivas mudanças de volume, podendo alcançar altíssimos níveis de expansão, em determinados casos, a expansão alcança valores próximos de 10%, esta exacerbada dilatação é atribuída à hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio. Este método é também aplicável a qualquer outro material particular que apresentar suspeitas de características expansivas. O ensaio PTM 130 foi adotado pelo DNER. As normas: EM 262 (DNER, 1994) e PRO 263 (DNER, 1994) determinam que deva haver um rigoroso controle da expansão da escória de aciaria através do referido método (PTM-130).

Neste estudo, após a determinação da umidade ótima, da massa específica aparente seca máxima ($2,370 \text{ g/cm}^3$) e da umidade ótima (9,6%), os corpos de prova de escória de aciaria LD, oriundos do depósito da USIMINAS em Ipatinga MG, foram preparados conforme prescreve a metodologia Pennsylvania test method (PTM-130), adaptado pelo DER/MG, através da sua Divisão de Materiais (DMA-1) em 1982. Foram realizados dois ensaios, cada um deles com três corpos-de-prova, moldados no dia 02/03/09; para cada ensaio, compactou-se um corpo de prova (CP) no ramo saturado, outro na umidade ótima e outro no ramo seco.

3.2.12.1 Aparelhos necessários para execução do ensaio

Os aparelhos necessários para a execução do ensaio PTM-130 são:

- a) Molde: deve ser de metal, de forma cilíndrica com um diâmetro interno de 15,24 cm \pm 0,13 mm e uma altura de 17,78 cm \pm 0,13 mm, deve ser provido de um colar de extensão metálico de 5,08 cm de altura e uma base perfurada de metal (prato) de 9,53 mm de altura, deve ser recoberto com um preventivo antiferruginoso ou construído de aço inoxidável. As perfurações no prato de base não devem exceder 1,59 mm de diâmetro;
- b) disco espaçador: um disco espaçador circular de metal de 15,08 cm de diâmetro e, 6,14 cm de altura;
- c) soquete: soquete metálico cilíndrico de 5,1 cm de diâmetro de face inferior plana, e peso de 2,496 kg equipado com dispositivo para controle de altura de queda igual a 30,48 cm;
- d) aparelhos medidores da expansão: uma haste metálica ajustável e prato perfurado, com perfurações não excedendo 1,59 mm de diâmetro e um tripé metálico para suportar o extensômetro medidor da expansão vertical acumulada;
- e) pesos: dois pesos metálicos anelares ou quatro pesos metálicos providos de ranhuras, totalizando 4,54 kg com diâmetro de 14,92 cm e um orifício central 5,40 cm de diâmetro;
- f) pesos: dois pesos metálicos anelares ou quatro pesos metálicos providos de ranhuras, totalizando 4,54 kg com diâmetro de 14,92 cm e um orifício central de 5,40 cm de diâmetro;
- g) extensômetro: dial com leitura de 0,025 mm;
- h) outros aparelhos, tais como: bandeja para mistura, esquadro, escala, tanque de imersão ou balde, papel filtro, pratos e estufa a 71 °C \pm 3 °C.

3.2.12.2 Preparação da amostra para o ensaio PTM-130

Secar a amostra ao ar, posteriormente, passar a amostra na peneira de 50,8 mm, desprezar a fração retida nessa peneira. A fração passada na peneira de 50,8 mm

constituirá a amostra total, da qual serão retiradas as amostras para os ensaios de compactação e expansão. Essa amostra será chamada amostra inicial.

3.2.12.3 Amostra para a relação umidade ótima – densidade máxima

- a) Da amostra obtida, em conformidade com a seção, 3.2.12.2, confeccionar com o auxílio do repartidor de amostras ou por quarteamento, uma amostra representativa de 6,36 kg ou mais;
- b) passa-se esta amostra representativa na peneira de 19 mm e retido na peneira 4,8 mm, obtido de outra amostra representativa, conforme descrito na alínea (a) desta seção;
- c) determinar a curva umidade ótima e a densidade máxima de acordo com o norma ME 049 (DNER, 1994), observando entretanto, que a escória de aciaria, no ensaio PTM-130, adaptado pelo DER/MG, deverá ser compactada em três camadas iguais com 56 golpes por camada (energia modificada), com molde conforme seção 3.2.12.1 alínea a, disco espaçador em conformidade com o prescrito pela seção 3.2.12.1 alínea c; e que as amostras só serão utilizadas para teste de expansão. As energias utilizadas pelo DER/MG e pelo DNER/DNIT são equivalentes, conforme elucida a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Energias utilizadas pelo DNER E DER/MG (DER/MG, 1982).

	ENERGIA (*)	APLICAÇÃO	N. DE CAMADAS	N. DE GOLPES POR CAMADA	SOQUETE (kg) (**)	DISCO ESPAÇADOR (cm) (***)
DNER	CONVENCIONAL	SUBLEITO	5	12	4,5	6,3
	INTERMEDIÁRIA	BASE E SUB-BASE	5	26	4,5	6,3
	MODIFICADA	BASE E SUB-BASE	5	56	4,5	6,3
DER/MG	CONVENCIONAL	SUBLEITO	5	13	4,5	5,1
	INTERMEDIÁRIA	BASE E SUB-BASE	5	29	4,5	5,1
	MODIFICADA	BASE E SUB-BASE	5	59	4,5	5,1
	MÉTODO PTM-130	GERAL	3	56	2,5	6,3

(*) As energias adotadas pelo DER/MG são equivalentes às do DNER.

(*) A energia do PTM-130 é equivalente às convencionais (DNER E DER/MG).

(**) Valores referentes ao o peso do soquete, arredondados para uma casa decimal.

(***) Valores referentes à altura do disco espaçador, arredondados para uma casa decimal.

3.2.12.4 Teste de expansão – procedimentos iniciais

Os três corpos-de-prova, com umidade próxima da ótima, sendo que um deles se situe no ramo seco, outro no ramo úmido e outro entre os anteriores, serão usados no teste de expansão. Coloque um disco de papel de filtro grosso na placa de base perfurada, inverta o molde com a escória compactada como obtida na seção 3.2.12.3 alínea c, fixando na mesma, a placa de base perfurada, de maneira que o papel de filtro fique em contato com a escória. Coloque a haste ajustável e a placa perfurada na amostra de escória compactada e aplique pesos para produzir sobrecargas de 4,542 kg. Submergir o molde e os pesos em água, pré-aquecida a 38 °C, permitindo a água livre acesso por cima e por baixo da amostra. Coloque a amostra submersa numa posição nivelada em uma estufa controlada para 71 °C ± 3 °C. Ajuste o tripé no colar de extensão, e coloque o dial do extensômetro, deve ser estabelecido de forma que seu pistão não seja muito estendido. Isto permitirá medidas do assentamento ou consolidação inicial da amostra.

3.2.12.5 Teste de expansão - procedimentos intermediários

Anotar a medida inicial, tomada 30 minutos após a colocação da amostra na estufa de 71 °C ± 3 °C. Esta medida é a leitura básica e permite a expansão térmica dos aparelhos de teste. As medidas devem ser anotadas no mínimo uma vez por dia, de preferência a mesma hora do dia, por um período de sete dias. Adicionar água suficiente, para que a amostra de teste permaneça completamente submersa. Esta água deve ser adicionada pelo menos duas horas antes da leitura do dia. Após o período de sete dias, a água deve ser removida do tanque ou balde, e mantida na estufa a 71 °C ± 3 °C, a condição de saturação, porém não submersa, deverá ser mantida por mais sete dias. As medidas de expansão, devem continuar conforme especificado na alínea b desta seção, e não devem ser anotadas, antes de duas horas, após adição de água na amostra. Um mínimo de 500 cm³ (meio litro) de água, deve ser adicionado à parte de cima da amostra todos os dias, com a finalidade de mantê-la completamente saturada. Após estas duas semanas de expansão, desmanche cuidadosamente a amostra de teste, verificando se houve alguma formação cristalina na superfície das partículas de escórias.

3.2.12.6 Teste de expansão – procedimentos finais

Calcule a porcentagem de expansão volumétrica, dividindo a leitura feita no extensômetro, menos a leitura base pela altura inicial da amostra 11,64 cm. A taxa de expansão é a curva do tempo em dias (eixo x) versus a porcentagem de expansão (eixo y), conforme Figura 3.13. As partes da curva desenvolvidas durante as condições de submersão e não submersa deverão ser claramente indicadas e as taxas de expansão deverão ser calculadas separadamente para cada uma destas duas partes referidas. As porcentagem da expansão volumétrica total, são obtidas com a leitura do extensômetro após 14 dias das condições estipuladas de submersão e não submersão, menos a leitura de base do extensômetro, dividida pela altura inicial da amostra 11,64 cm.

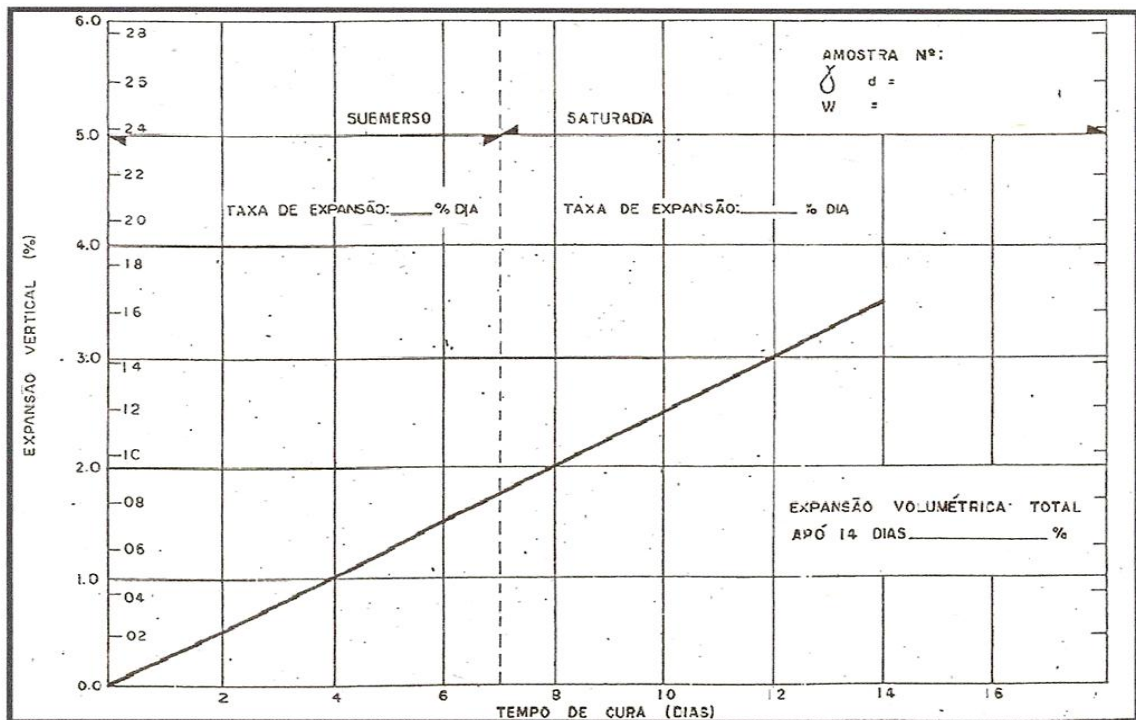


Figura 3.13 – Gráfico para determinação da taxa de expansão da escória de aciaria (DNER/MG, 1982).

Para este estudo, foram compactados dois ensaios com três corpos-de-prova cada, sendo que, um deles situado no ramo seco, outro no ramo úmido e outro na umidade ótima, sendo utilizadas para determinação do teste de expansão.

Os corpos de prova foram moldados no dia 02/03/09, e colocados em condição submersa a uma temperatura de $71\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. A leitura inicial com o extensômetro foi realizada após trinta minutos e, as demais leituras foram realizadas durante (14) quatorze dias no mesmo horário, sempre após duas horas depois da adição de água permitindo verificar a expansão térmica. Após a primeira metade do período, sete dias, a água do tanque foi retirada e a amostra foi mantida nas condições de saturação (não submersa), e na segunda metade, por mais sete dias, mantendo as leituras não devem ser anotadas, antes de duas horas, após adição de água na amostra.

3.2.13 Ensaio de misturas Betuminosas – Percentagem de betume

Os ensaios em misturas betuminosas, para determinação da percentagem de betume, foram realizados conforme a prescrição contida na norma técnica: DNER-ME 053/94: misturas Betuminosas – percentagem de betume. Rio de Janeiro, 1994. 5 p. Este método estipula a metodologia para a determinação da percentagem de betume extraído das misturas betuminosas por meio do extrator centrífugo.

Tendo em vista, que na finalização destes estudos, realizou-se um dimensionamento por retroanálise verificando a necessidade de reforço estrutural em um projeto com previsão de uma vida útil de 10 anos, torna-se interessante verificar além do comportamento da camada de revestimento executada em PMF nos segmentos homogêneos do trecho da MG-232 em estudo, também as características deste PMF, assim realizou-se três ensaios em amostras deste citado tipo de revestimento, verificando a percentagem de betume e posteriormente a granulometria dos seus agregados.

3.2.14 Ensaios da metodologia MCT

Os ensaios do solo (argila) do subleito da MG 232, trecho: Mesquita/Santana do Paraíso utilizando o método MCT "Miniatura, Compactado, Tropical", foram realizados, com início em 25 de maio de 2009, pelo Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, através de 4 baterias de ensaios, com 5 CP cada, registrados como: MCT 1091, MCT 1092, MCT 1093 e MCT 1094.

Esta tecnologia MCT (miniatura, compactado e tropical) é composta por uma série de ensaios em corpos-de-prova miniatura, adaptada do ensaio MCV (Moisture Condition Value) desenvolvida por Parsons em 1976 no TRL (Transport Research Laboratory - Inglaterra), com a denominação de Mini-MCV, pelo engenheiro: Job Shuji Nogami. Compactado segundo as normas: ME 228 (DNER, 1994): Compactação em equipamento miniatura, ME 258 (DNER, 1994): Solos compactados em equipamentos miniatura - Mini- MCV e ME 256 (DNER, 1994): Solos compactados com equipamento miniatura - determinação de perda de massa por imersão.

O objetivo da tecnologia MCT reside na avaliação do solo, possibilitando sua classificação, enquadramento e discriminação das principais propriedades destes solos tropicais, para um melhor aproveitamento daqueles que apresentarem características lateríticas. Segundo Marson (2004) citado por Souza (2007), o solo é laterítico, quando apresenta algumas características típicas em sua composição mineralógica, tais como: quartzo, caulinita, oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio; determinados pelos fatores: clima, fauna, relevo, a constituição da rocha matriz e o tempo de exposição aos agentes intempéricos.

3.2.14.1 Ensaio Mini-MCV - solos compactados com equipamento miniatura

Esta metodologia de ensaio, Mini-MCV, é regulamentada pela norma ME 258 (DNER, 1994): Solos compactados em equipamentos miniatura - Mini-MCV. O objetivo do ensaio do Mini-MCV consiste em determinar coeficientes empíricos que são utilizados na caracterização de solos tropicais que passam na peneira de dois milímetros 2 mm, realizado em laboratório, com corpos-de-prova tipo miniatura de cinquenta milímetros (50 mm) de diâmetro. A curva do Mini-MCV é aquela obtida representando-se num gráfico de eixos ortogonais, no eixo das abscissas, em escala logarítmica, o número de golpes; no eixo das ordenadas, em escala linear, o valor de a_n (diferença de altura do CP em 0,01 mm) dado pela Equação 3.5:

$$a_n = A_n - A_{4n} \quad (3.5)$$

onde: A_n é a altura do corpo-de-prova após o número de golpes n , e A_{4n} a altura do corpo-de-prova após $4n$ golpes.

Mini-MCV é o valor obtido pela Equação 3.6:

$$\text{Mini-MCV} = 10 \log B_n \quad (3.6)$$

onde: log é o logaritmo de base decimal e B_n é o número de golpes que resulta da interseção da curva Mini-MCV com a reta de equações $a_n = 2 \text{ mm}$.

Curva de umidade de compactação = f (Mini-MCV), aquela obtida, representando em gráfico de eixos ortogonais, os valores de Mini-MCV, em abscissas, e as umidades de compactação em ordenadas. A amostra para o ensaio de Mini-MCV deve ser coletada de acordo com a norma PRO 007 (DNER, 1978): Coleta de amostras deformadas de solo, na quantidade mínima de 2500 g de fração passando na peneira de 2 mm.

O ensaio de determinação da perda de massa por imersão em água, de corpos-de-prova compactados em laboratório, com equipamento em miniatura (corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro) é regulamentado pela norma ME 256 (DNER, 1994): Solos compactados com equipamento miniatura - determinação de perda de massa por imersão.

O CP de solo deve ser moldado em conformidade com o estabelecido nas normas ME 228 (DNER, 1994) e ME 258 (DNER, 1994). A perda de massa por imersão (P_1): massa seca da porção que se desprende do corpo-de-prova, quando o mesmo é preparado e imerso em água, sob condições padronizadas, expressa em percentagem da massa seca correspondente a uma parte do corpo-de-prova com comprimento de 10 mm. O objetivo do ensaio de determinação da perda de massa por imersão em água, de solos tropicais compactados, em laboratório, com uso de equipamento miniatura, visa possibilitar a sua classificação e previsão de sua estabilidade superficial à ação das intempéries.

Na apresentação do resultado, é sempre obrigatório a discriminação da condição em que o corpo-de-prova foi submetido, tais como a umidade de compactação, tipo de compactação etc. Conforme prescreve a norma ME 256 (DNER, 1994), para fins classificatórios e melhor caracterização do solo é indispensável a determinação da

variação da perda de massa por imersão, em função do teor de umidade de compactação.

No ensaio Mini-MCV para cada teor de umidade, se aplicam de forma padronizada energias crescentes, até conseguir uma massa específica aparente máxima. A curva de Mini-MCV é obtida em gráfico mono-log, onde, se representa para cada teor de umidade de compactação, a diferença de altura a_n , em ordenadas, e o número de golpes do soquete compactador n , em abscissas ($a_n = A_n - A_{4n}$), em que a_n é a altura do corpo de prova após o número de golpes A_{4n} , conforme estabelece a norma ME 228 (DNER, 1994). A curva Mini-MCV x umidade de compactação (H_c) é aquela obtida, representando-se em gráfico de eixos ortogonais, o valor de Mini-MCV em abscissas e o teor de umidade de compactação (H_c) em ordenadas.

O coeficiente P_i (perda de massa por imersão, para fins de classificação): valor da perda de massa por imersão em água, obtido de acordo com a norma ME 256 (DNER, 1994), com as seguintes correspondências para fins de classificação: Mini-MCV = 10, para solos com massa específica aparente úmida baixa, ou seja, quando o corpo-de-prova no ensaio de compactação Mini-MCV nessas condições tiver altura superior a 53 mm e Mini-MCV = 15, para solos com massa específica aparente úmida alta, ou seja, quando o corpo-de-prova no ensaio de compactação Mini-MCV nessas condições tiver altura inferior a 53 mm. Somente por mera coincidência consegue-se um corpo-de-prova compactado nestas condições de Mini-MCV, desta forma, normalmente é necessário obter o coeficiente P_i mediante interpolação gráfica. Isso pode ser obtido construindo-se duas curvas: Mini-MCV em função da perda de massa por imersão em água. O coeficiente “c” (nesta dissertação, denominado: c’): coeficiente angular da parte mais inclinada e retilínea da curva de Mini-MCV, correspondente a condição de Mini-MCV 10 (ou ao teor de umidade que resulta em Mini-MCV = 10); só em caráter excepcional se obtém, durante a execução do ensaio, a curva de Mini-MCV nessas condições, razão pela qual geralmente há necessidade de obter essa curva por interpolação gráfica apropriada. O coeficiente “d” (nesta dissertação: d’): coeficiente angular da parte retilínea (ou assimilável a uma reta) mais inclinada do ramo seco da curva de compactação, correspondente a 10 golpes, obtido na realização do ensaio de

compactação Mini-MCV, executado conforme estipulado na norma DNER-ME 258/94. O coeficiente “e” (nesta dissertação: e') é calculado conforme a Equação 3.7:

$$e = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d}} \quad (3.7)$$

A amostragem para a metodologia de classificação MCT deverá ser obtida obedecendo a norma PRO 003 (DNER, 1994): Coletas de amostras deformadas de solos, sendo necessário 1,5 kg de fração que passa na peneira 200 mm de abertura. Os procedimentos para classificação do Mini-MCV consistem em executar o ensaio de compactação Mini-MCV, de acordo com a norma ME 228 (DNER, 1994) e em seguida a determinação da perda de massa por imersão de acordo com a norma ME 256 (DNER, 1994). Com os resultados obtidos, determinar o coeficiente “P_i”, o coeficiente “c” e o coeficiente “d”. Calcular em seguida o índice “e”. Com os valores de “c” e “e” obtidos, localizar no gráfico representado pela Figura 3.14, o ponto que os representam, classificando a amostra de acordo com a área específica em que esse ponto se situa. Quando o ponto se localizar, no referido gráfico, próximo a linha que separa os solos de grupos lateríticos (L) dos não lateríticos (N), considerá-lo laterítico se a curva que representa a perda de massa por imersão P_i, em função do Mini-MCV 10 a 15, tiver inclinação negativa; a curva Mini-MCV x umidade de compactação tiver diminuição da inclinação para Mini-MCV crescentes.

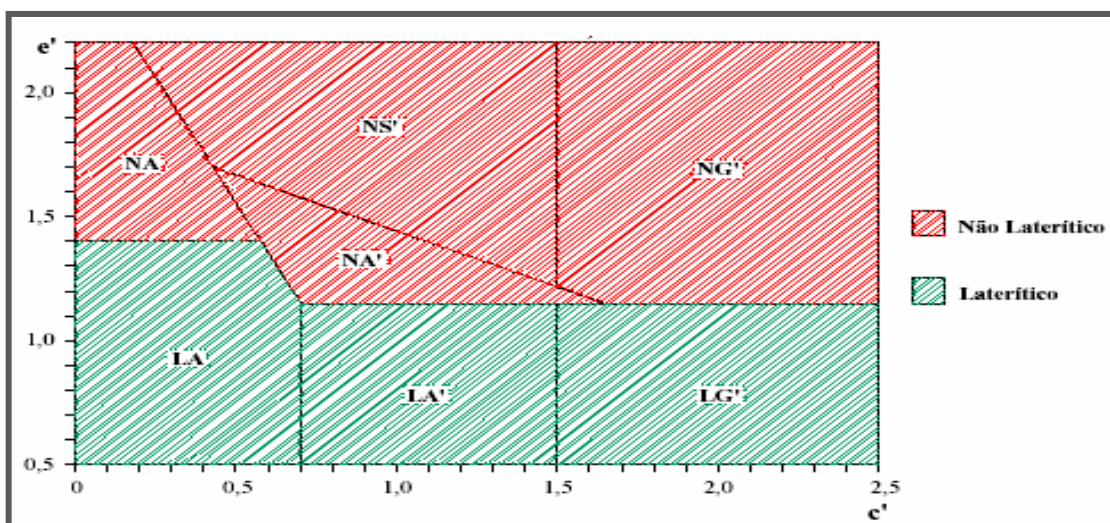


Figura 3.14 - Nomograma da classificação MCT (NOGAMI E VILLIBOR, 1995 apud SOUZA, 2007).

Esta metodologia MCT normatizada como CLA 259(DNER, 1996), estabelece a qual grupo pertence o solo, de acordo com a classificação MCT. As propriedades típicas dos solos integrantes dos vários grupos estão representadas conforme Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Classificação MCT - propriedades típicas dos grupos de solos (DNER, 1994).

CLASSIFICAÇÃO MCT – PROPRIEDADES TÍPICAS DOS GRUPOS DE SOLOS									
CLASSES		N - Solos de comportamento não laterítico				L – Solos de comportamento laterítico			
GRUPOS		NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'	
		Areias	Arenosos	Siltosos	Argilosos	Areias	Arenosos	Argilosos	
GRANULOMETRIAS TÍPICAS (MINERAIS) (1)		Areias	Areias siltosas	Siltos (k); (m)	Argilas	Areias com pouca argila	Areias argilosas	Argilas	
		Areias siltosas	Areias argilosas	Siltos arenosos e argilosos	Argilas arenosas		Areias adensadas	Argilas arenosas	
		Siltos (q)			Argilas siltosas				
Capacidade de suporte (2)	MINI-CBR sem embebição (%)	Muito alto > 30 Alto 12 - 30 Médio 4 - 12 Baixo ≤ 4	Alta a média	Alta	Média a alta	Alta	Alta	Alta a muito alta	Alta
	Perda de suporte por embebição (%)	Alta > 70 Média 40 - 70 Baixa ≤ 40	Média a baixa	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Baixa
EXPANSÃO (%) (2)		Alta > 3 Média 0,5 - 3	Baixa	Baixa	Alta	Alta a média	Baixa	Baixa	Baixa
CONTRAÇÃO (%) (2)		Baixa ≤ 0,5	Baixa à média	Baixa à média	Média	Alta a média	Baixa	Baixa à média	Média a alta
Permeabilidade - log k (cm/s)		Alta > (-3) Média (-3) – (-6) Baixa ≤ (-6)	Média a alta	Baixa	Média a baixa	Baixa à média	Média a baixa	Baixa	Baixa
PLASTICIDADE	Alta	IP (%) > 30 LL (%) > 70							
	Média	7 - 30 30 - 70	Baixa a NP	Média a NP	Média a alta	Alta	NP a baixa	Baixa à média	Média a alta
	Baixa	≤ 7 ≤ 30							

(1) q = Quartzo; m = Micas; k = Caulinita
(2) Corpos-de-prova compactados na umidade ótima, energia normal, com sobrecarga padrão quando pertinente

3.2.15 Difração de Raios-X (DRX)

O ensaio de Difração por Raios-X, utilizando-se amostras de escória de aciaria obtidas do depósito da USIMINAS em Ipatinga MG foi realizado pelo Laboratório de Difractometria de Raios-X do Departamento de Geologia da UFOP "Universidade Federal de Ouro Preto" servindo-se de um difratômetro da marca Rigaku, modelo

D/MAXB, com tubo de cobre e intervalo de varredura de 2° a 70° com radiação de 40 kV e 15 μ A. A velocidade adotada no ensaio foi de 1,2 graus por minuto, com duração de 70 minutos.

A Difração de Raios-X é um importante dispositivo, utilizado para identificar as fases cristalinas presentes na amostra, considerando que, a cada tipo de cristal, corresponde uma série de ângulos de difração que lhe são característicos. O equipamento utilizado para a referida análise foi o difratômetro de Raios-X (Figura 3.15).

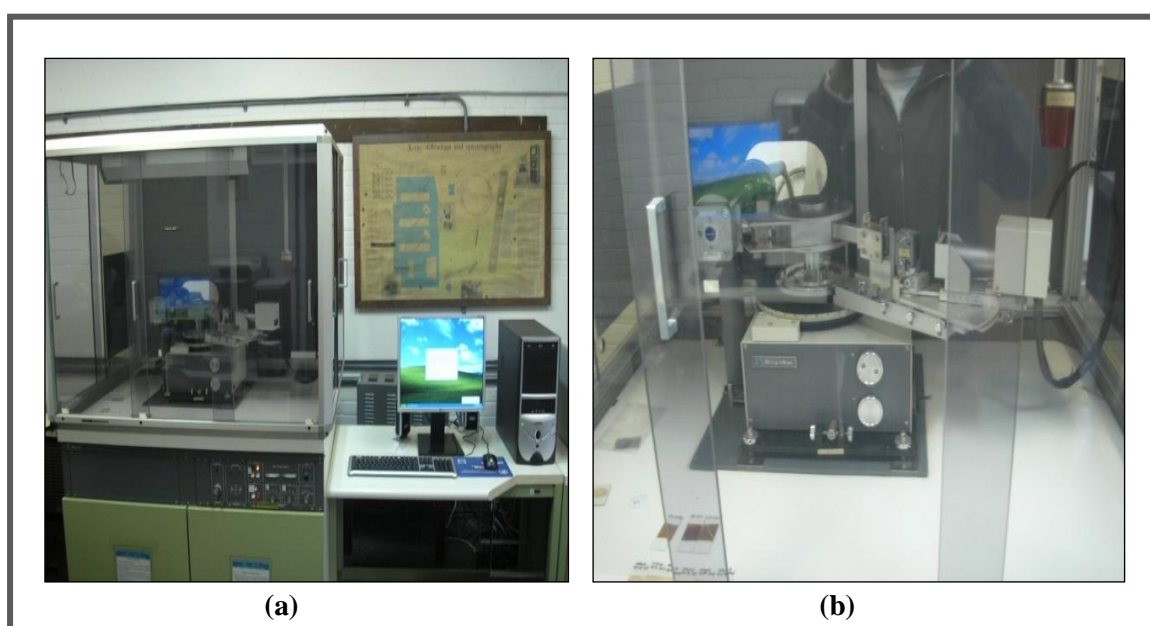


Figura 3.15 (a) e (b) - Difratômetro de Raios-X do Departamento de Geologia da UFOP.

A identificação das fases tem como embasamento a aplicação da Lei de Bragg, que considera o elemento usado no aparelho e o correspondente comprimento de onda, definida pela Equação 3.8:

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \quad (3.8)$$

Onde:

d = distância dos planos reticulados (espaçamento interplanar);

θ = ângulo de difração incidente;

n = número cardinal inteiro;

λ = comprimento de onda do feixe incidente (tubo do aparelho).

Para realizar-se este ensaio necessita-se de uma amostra moída, para que a difração dos raios-x seja devidamente observada. A emissão dos elétrons é efetuada por um filamento de tungstênio aquecido. A velocidade dos elétrons é adquirida pela alta tensão aplicada, em razão da diferença de potencial (ddp), entre a fonte e o alvo. O comprimento de onda dos raios-x utilizados depende do alvo, que normalmente pode ser de cobalto, cobre, molibdênio ou ferro. A radiação difratada é captada por um detector que identifica qualitativamente a composição mineralógica da escória de aciaria.

Esta metodologia utilizada para à análise por difração de raios-x possui algumas vantagens, como exemplo, execução célere e simples, o ensaio utiliza uma reduzida quantidade de amostra, que pode ser reutilizada. Entretanto, a mesma apresenta alguns inconvenientes, dificuldade de interpretação e impossibilidade de analisar substâncias mal cristalizadas. Pode-se considerar, também, como limitação desta técnica, a grande incidência de materiais com mesma estrutura atômica, ocorre para materiais isomorfos e para minerais com distâncias atômicas parecidas ou bastante heterogêneas.

O limite de detecção de um mineral em uma mistura é de aproximadamente 1% e somente as fases cristalinas são detectadas. A Difração de Raios-X permite diferenciar-se espécies de uma mesma composição química. Os dados registrados foram coletados, pelo detector através de um pulso elétrico amplificado e registrados analógica e digitalmente, estes dados coletados e amplificados correspondem aos difratogramas. Estes difratogramas apresentam sinais gráficos, com picos característicos, resultantes da Difração de Raios-X em planos cristalográficos da amostra, relacionados à posição, a intensidade e a forma da estrutura cristalina, caracterizando e tipificando a composição mineralógica da escória analisada.

O ensaio de DRX "Difração de Raios-X" executado por este estudo foi analisado e processado por um software específico, denominado JADE, que compara o pico da incidência de elétrons com um banco de dados disponíveis para caracterização dos minerais constituintes. Uma radiação monocromática de raios-x foi imposta à amostra, de escória de aciaria da USIMINAS, retrorreferenciada e retratada pela Figura 3.16,

através de diversos ângulos de incidência. Conforme supracitado, a dispersão dos diferentes comprimentos de onda obedece à lei de Bragg.

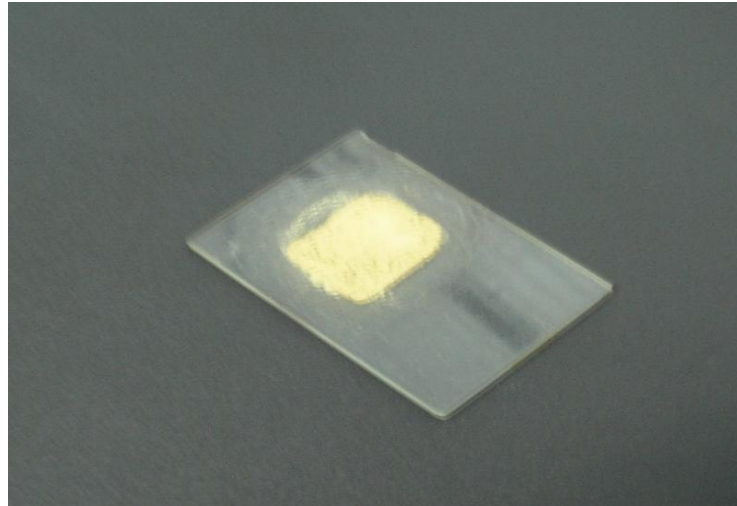


Figura 3.16 – Amostra de escória utilizada no ensaio DRX analisada pelo Laboratório de Geologia da UFOP.

3.2.16 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para caracterização qualitativa da morfologia de partículas das amostras em estudo, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura do tipo JEOL JSM – 5510, do laboratório do DEGEO/UFOP "Departamento de Geologia da Universidade de Ouro Preto". Foram moldadas três amostras, denominadas (RE1, RE2 e RE3), ampliadas em: 100 x, 300 x, 500 x, 800 x e 1200 x. Obteve-se a distribuição morfológica pela análise do pó e dos fragmentos de três amostras da escória de aciaria LD, proveniente também do depósito da USIMINAS em Ipatinga MG.

A microscopia eletrônica de varredura fundamenta-se na emissão de um feixe de elétrons pelo aquecimento de um filamento de tungstênio, incidentes sobre uma amostra que emite sinais elétricos, elétrons retroespehados e fótons x e outros mais. Os sinais emitidos pela incidência desses elétrons sobre a amostra são captados pelos detectores, amplificados, simultaneamente convertidos em imagens. Estas imagens observadas no microscópio eletrônico de varredura consiste no resultado da variação de contraste que

ocorre quando um feixe de elétrons primário varre a superfície da amostra em análise ponto a ponto. Esta técnica permite observar e analisar a textura do material a caracterização de diferentes tipos de minerais, morfologia, distribuição dos compostos e conseqüentemente a composição química do material.

O equipamento utilizado para o ensaio de microscopia Eletrônica de Varredura realizado pelo laboratório do Departamento de Geologia da Universidade de Ouro Preto foi o microscópio eletrônico de varredura, que deve ser utilizado juntamente com o espectrômetro a dispersão de energia (Figura 3.17). Propiciando-se, desta forma, analisar elementarmente as fases observadas facilitando sua identificação e evitando-se possíveis equívocos na caracterização qualitativa da morfologia de partículas das amostras dos materiais estudados.



Figura 3.17 – Microscópio eletrônico de varredura do Laboratório de Geologia da UFOP.

Através da aplicação de uma diferença de potencial com variação de 0,5 a 30 kV, possibilitando com essa defasagem de tensão a variação da aceleração dos elétrons provocando o aquecimento do filamento. Gerando assim uma aceleração dos elétrons em direção ao eletrodo positivo. A correção do percurso dos feixes (Figura 3.18) é realizada pelas lentes condensadoras que alinham os feixes em direção à abertura da objetiva, que ajusta o foco antes que os elétrons atinjam a amostra analisada.

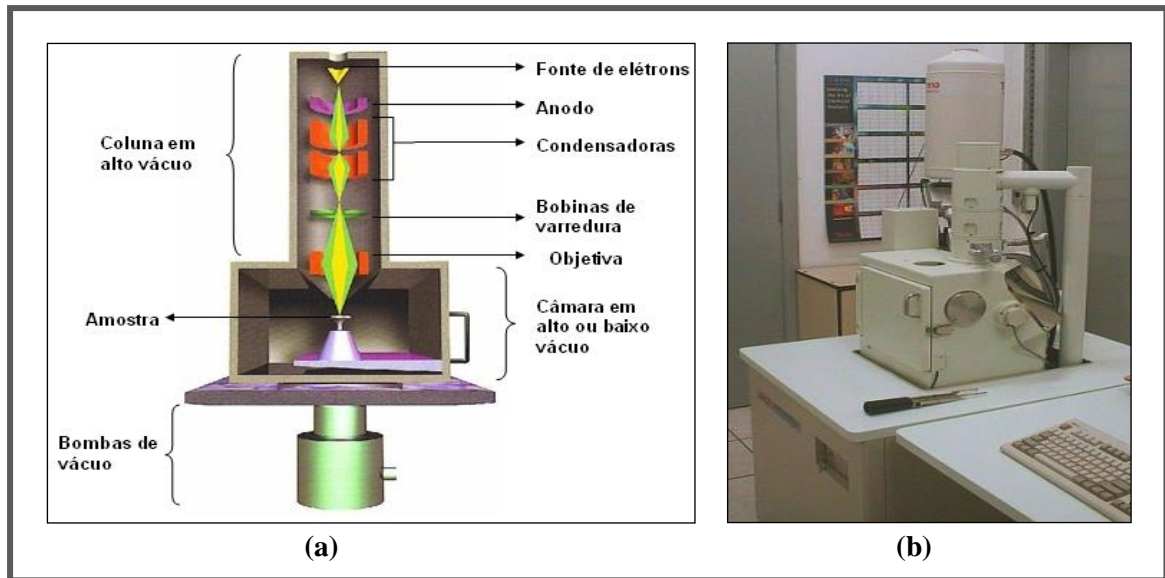


Figura 3.18 (a) e (b) – Detalhamento de funcionamento do microscópio eletrônico de varredura do Laboratório de Geologia da UFOP.

Para a realização do ensaio as amostras precisam ser condutoras em presença de carbono, para isso as amostras passaram por um processo chamado de metalização. Quando se trata de material não condutor, como a escória de aciaria LD. Desta forma é necessário fazer uma metalização na superfície. As amostras (Figura 3.19) são dispostas sob a forma de monocamadas em peças cilíndricas metálicas (pastilhas), revestidas de grafite por uma fita de dupla face.



Figura 3.19 – Amostras de escória de aciaria da USIMINAS dispostas em pastilhas utilizadas no ensaio realizado pelo Departamento de Geologia da UFOP.

Sequencialmente as pastilhas foram depositadas em um evaporador de vácuo (Figura 3.20) por um período de cerca de uma (1) hora.



Figura 3.20 - Equipamento utilizado para metalização das amostras de escória de aciaria LD da USIMINAS para o ensaio de MEV realizado no DEGEO/UFOP.

Após o processo de vaporização dos eletrodos de grafite por cerca de dez (10) minutos, a amostra se transformou em condutora, e a pastilha é introduzida na câmara do microscópio (Figura 3.21), fazendo-se um vácuo de 3 minutos. Sequencialmente as amostras foram submetidas ao processo de bombardeamento de elétrons e efetuou-se as fotos micrográficas, utilizando-se diferentes acessórios, tais como os espectrômetros de Raios-X, detector de elétrons retroespalhados, detector de elétrons absorvidos e detector de elétrons transmitidos.

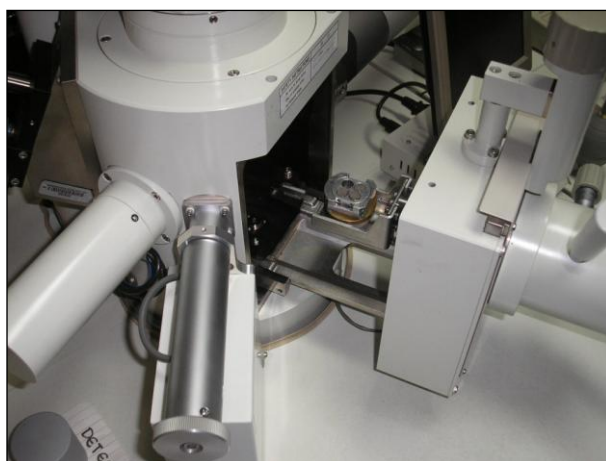


Figura 3.21 – Amostras de escória de aciaria LD da USIMINAS introduzidas na câmara do microscópio eletrônico de varredura do DEGEO/UFOP.

3.2.17 Análise química por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e Espectrometria de Absorção Atômica

Foi também realizado um segundo estudo químico com amostra de escória de aciaria LD oriunda do depósito da USIMINAS na cidade de Ipatinga - MG pelo CTCmat/SENAI/SC "Centro de Tecnologia em Materiais do Serviço Nacional da Indústria de Santa Catarina" com a amostra identificada como "E" recebida pelo laboratório em 18/6/2009, com finalização dos ensaios de determinação e análise química por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e Espectrometria de Absorção Atômica em 23/06/2009, utilizando-se 110 g do referido coproduto siderúrgico.

A identificação pelo método analítico, Difractometria de Raios-X - método do pó iniciada em 06 de junho de 2009 utilizando-se 50 g da referida escória de aciaria LD com certificação de análise das fases cristalinas emitida pelo SETEM-E0201/2009 em 22 de julho de 2009 pelo Serviço de Tecnologia Mineral do CNEN/CDTN "Comissão Nacional de Energia Nuclear/Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear localizado na cidade de Belo Horizonte - MG.

A operação do difratômetro de raios-x foram realizadas utilizando o fator de escala (4×10^3), constante de tempo (0,5 s), velocidade do registrador (40 mm/min), velocidade do goniômetro ($4^\circ 2\theta/\text{min}$), intensidade de corrente (30 mA) e tensão (40 kV). A Técnica utilizada para à análise química da escória de aciaria por difratometria de raios-x pelo método do pó foi através de um difratômetro de fabricação Rigaku, modelo: D\Max última automático, com goniômetro $\theta-\theta$ e tubo de raios-x de cobre. A Identificação das fases cristalinas na análise química da escória de aciaria difratometria de raios-x pelo método do pó foram Obtida por comparação do difratograma de raios-x da amostra com o banco de dados da International Center for Diffraction Data ICDD / Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) (Sets 01– 58; MDI; Jade 9; 2008). Na análise das fases cristalinas da escória de aciaria na difratometria de raios-x pelo método do pó foram levadas em consideração as intensidades das principais reflexões e as comparações entre as mesmas, avaliando-se assim as quantidades relativas de seus teores. Fase cristalina identificada.

3.2.18 Ensaio de determinação da resistência à tração em misturas betuminosas

O ensaio de determinação de resistência à tração estática por compressão diametral foi realizado em 30 de junho de 2009 pelo Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, utilizando-se seis (6) amostras de pré-misturado a frio extraídas diretamente do campo por extração, através de sonda rotativa, na MG-232, estacas: 0 a 362 e estacas: 553 a 1000 subtrecho com revestimento em PMF confeccionado com emulsão asfáltica RL-1C. O Objetivo deste método, regulamentado pela norma ME 138 (DNER, 1994): Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral. Este ensaio visa determinar à tração, de corpos-de-prova cilíndricos de misturas betuminosas.

3.2.19 Determinação do módulo de resiliência em solos e mistura betuminosa

Neste estudo a metodologia utilizada para determinação do módulo de resiliência em solos foi a regulamentada pela norma ME 131 (DNER, 1994) - Solos – determinação do módulo de resiliência. Este método prescreve o modo pelo qual se determina os valores do módulo de resiliência de solos, utilizando-se o equipamento triaxial de carga repetida, para vários níveis de tensões. E o módulo de resiliência em misturas betuminosas foi obtido conforme a norma ME 133 (DNER, 1994) - Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência. Este método prescreve o modo pelo qual se determina o módulo de resiliência de misturas betuminosas, utilizando o equipamento de compressão diametral de carga repetida.

3.2.19.1 Determinação do módulo de resiliência em solos

A partir do ano de 1990 nos ensaios triaxiais para obtenção do módulo de resiliência, realizados pelo Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, para todos os materiais estudados, passou-se utilizar os mesmos pares de tensão designados para solos arenosos ou pedregulhosos, por considerar que não há justificativa em se adotar para os solos argilosos, os estados de tensões correspondentes a um único nível de σ_3 (0,0206 MPa) para sete níveis de σ_d (0,0206, 0,034; 0,0521; 0,069; 0,103; 0,137 e 0,206) MPa. Esta

metodologia também foi aplicada neste estudo, pois os ensaios triaxiais de carga repetida foram realizados pelo Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

Os corpos-de-prova para o ensaio deve ter a proporção da altura com o diâmetro aproximadamente igual a dois. O módulo de resiliência (MR) de solos é constituído pela relação tensão-desvio (σ_d), aplicada repetidamente em uma amostra de solo e a correspondente deformação específica vertical recuperável ou resiliente (ϵ_R). Este método utiliza do princípio de funcionamento dos transdutores, tipo LVDT, consiste em transformar as deformações axiais durante o carregamento repetido, em potencial elétrico, cujo valor é registrado no oscilógrafo. Uma pré-calibração é necessária, visando correlacionar as deformações com os valores dos registros.

As amostras para determinação do módulo de resiliência em solos para este estudo foram obtidas in loco, conforme discriminado abaixo:

1. CP (1089) - Furo 6 = estaca: 509 + 10 E = (base - escória com 20% de argila) – energia: modificada.
2. CP (1090) – Furo 8 = estaca: 710 + 5 E = (base - escória pura) – energia: modificada.
3. CP (1091) - Furo 1 = estaca: 09 + 12 D = (subleito - argila) – energia utilizada: normal.
4. CP (1092) - Furo 4 = estaca: 309 + 19 D = (subleito - argila) – energia: normal.
5. CP (1093) - Furo 8 = estaca: 710 + 5 E = (subleito - argila) – energia: internormal
6. CP (1094) - Furo 6 = estaca: 509 + 10 E = (subleito - argila) – energia: internormal.
7. CP (1095) - Furo 4 = estaca: 309 + 19 D = (base - cascalho) – energia: modificada.
8. CP (1096) - Furo 11 = estaca: 998 + 19 D = (sub-base - cascalho) – energia: intermodificada.

A Figura 3.22 ilustra momento de realização do ensaio Triaxial Dinâmico de Carga Repetida realizado no Laboratório da COPPE/UFRJ com amostras de solo e escória de aciaria LD extraídas in loco no trecho rodoviário da MG 232 que interliga as cidades de Mesquita a Santana do Paraíso em Minas Gerais.

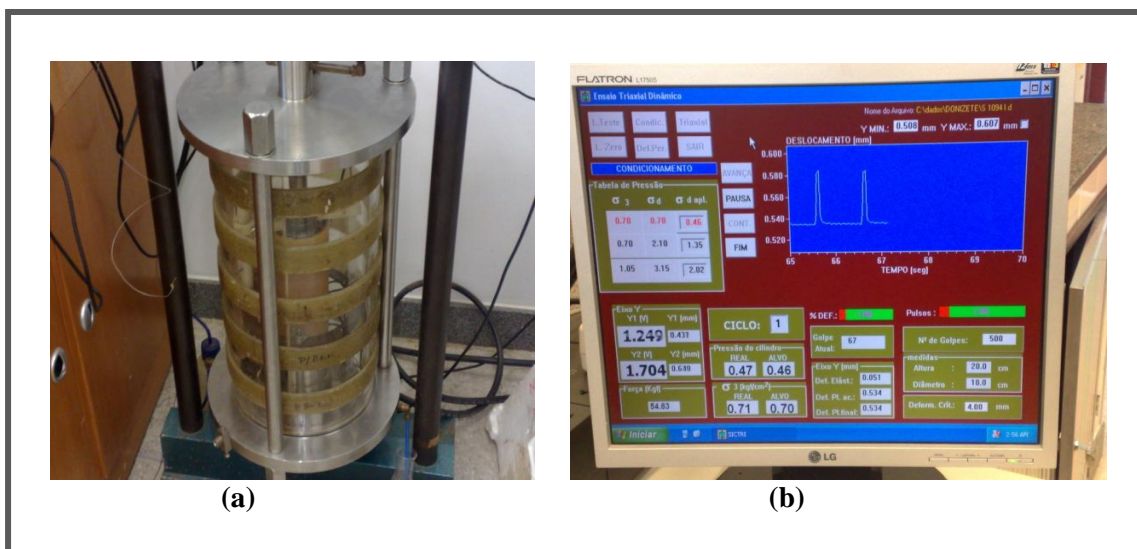


Figura 3.22 (a) e (b) – Fases do ensaio Triaxial Dinâmico de Carga Repetida no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

3.2.19.2 Determinação do módulo de resiliência em misturas betuminosas

Os ensaios de módulo de resiliência (MR) de misturas betuminosas efetuados neste estudo foram realizados utilizando-se (7) sete amostras de PMF extraídas *in loco* através de sonda rotativa no revestimento da MG 232, trecho Mesquita/Santana do Paraíso. Este método consiste em analisar a relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável (ϵ_t) correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (T), conforme a Equação 3.9.

$$MR = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \quad (3.9)$$

Posiciona-se o CP no interior do suporte para fixação dos transdutores, coloca-se o CP na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes, fixa e ajusta os transdutores de modo a se obter registro no oscilógrafo, observar o exato assentamento do pistão de

carga e dos cabeçotes no CP. Aplicar 200 vezes uma carga vertical repetida (F) diametralmente no CP, de modo a se obter uma tensão (σ_t) menor ou igual a 30% da resistência à tração determinada no ensaio de compressão diametral estático. Recomenda-se a aplicação da menor carga (F), capaz de fornecer um registro comensurável no oscilógrafo, A frequência de aplicação da carga (F) é de 60 ciclos por minuto, duração de 0,1 s. Registrar as deformações no oscilógrafo a deformação resiliente para (300, 400 e 500) aplicações de carga (F). Recomenda-se valor de 0,30 para o coeficiente de Poisson; o módulo de resiliência do CP ensaiado será a média aritmética dos valores determinados a 300, 400 e 500 aplicações de carga (F); quando a temperatura de ensaio não for especificada, o módulo de resiliência deverá ser determinado de $30\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Com os valores obtidos calcula-se os módulos de resiliência, através da Equação 3.10:

$$MR = \frac{F}{100\Delta H} (0,997\mu + 0,2692) \quad (3.10)$$

onde:

MR = módulo de resiliência (MPa);

F = Carga vertical repetida aplicada diametralmente no CP (N);

Δ = deformação elástica ou resiliente registrada no oscilógrafo, para (300, 400 e 500) aplicações de carga (F) (cm);

H = altura do corpo-de-prova (cm);

μ = coeficiente de Poisson.

3.2.20 Metodologia de avaliação estrutural por retroanálise

A técnica de retroanálise, aqui utilizada, segundo a norma D 5858 (ASTM, 1996) é definida como a técnica analítica empregada para determinar o módulo elástico equivalente das camadas de um determinado pavimento, correspondente a uma carga aplicada ao mesmo e as deflexões apresentadas e medidas. O trecho da MG 232, estudado, foi dividido em segmentos homogêneos (SH) distribuídos em seis subtrechos. Os seis segmentos homogêneos objetos da retroanálise na Rodovia MG 232 - trecho: Mesquita/Santana do Paraíso são:

a) Primeiro subtrecho - SH-1 → estacas: 0 a 49 → 980 m

SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (PMF + LA)	CAMADA 2 Base (escória)	CAMADA 3 Sub-base (cascalho)	CAMADA 4 Subleito (areia argilosa)
ESPESSURA (cm)	6,0	17,0	19,0	Infinito

b) Segundo subtrecho - SH-2 → estacas: 49 a 192 → 2.860 m

SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (PMF)	CAMADA 2 Base (escória + 20% de argila)	CAMADA 3 Sub-base (revestimento antigo em PMF)	CAMADA 4 Sub-base (antiga Base de escória + Sub-base de cascalho)	CAMADA 5 Subleito de argila
ESPESSURA (cm)	8,0	21,0	3,0	40,0	Infinito

c) Terceiro subtrecho - SH-3 → estacas 192 a 362 → 3.400 m

SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (PMF + LA)	CAMADA 2 Base (cascalho)	CAMADA 3 Sub-base (cascalho)	CAMADA 4 Subleito (areno-siltoso)
ESPESSURA (cm)	4,0	18,0	12,0	Infinito

d) Quarto subtrecho - SH-4 → estacas: 362 a 533 → 3.420 m

SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (TSD + LA E TSD)	CAMADA 2 Base (escória + 20% de argila)	CAMADA 3 Reforço do subleito (argila)	CAMADA 4 Subleito (areno-argiloso)
ESPESSURA (cm)	3,0	18,0	12,0	Infinito

e) Quinto subtrecho - SH-5 → estacas: 533 a 784 → 5.020 m

SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (PMF)	CAMADA 2 Base (escória)	CAMADA 3 Reforço do subleito (argila)	CAMADA 4 Subleito (areno-argiloso)
ESPESSURA (cm)	4,0	22,0	20,0	Infinito

f) Sexto subtrecho - SH-6 → estacas 784 a 1000 → 4.320 m

SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (PMF + LA)	CAMADA 2 Base (cascalho)	CAMADA 3 Sub-base (cascalho)	CAMADA 4 Subleito (argila-siltosa)
ESPESSURA (cm)	4,0	12,0	12,0	Infinito

Os dados levantados para o estudo de retroanálise do pavimento rodoviário da MG 232 entre as cidades de Mesquita e Santana do Paraíso foram: levantamento das respectivas seções do pavimento e das bacias deflectométricas, além da verificação e cadastramento

das deformações permanentes nas trilhas de rodas (medidas efetuadas com utilização da treliça) possibilitando à avaliação estrutural estratificada do referido pavimento.

O mecanismo utilizado para obtenção das bacias de deflexão para subsidiar o processo de retroanálise foram originados das deformações apresentadas nas respectivas seções do pavimento (resposta do pavimento a um carregamento estático ou a aplicação de uma determinada carga em movimento vagaroso). Os levantamentos das bacias de deflexões foram realizados conforme a norma ME 024 (DNER, 1994), através da viga Benkelman e carga de aplicação da força no pavimento de 80,4 kN.

A determinação da deformada ocorreu no sentido longitudinal, ou seja, no sentido de atuação do tráfego. A deflexão recuperável máxima (d_o) foi obtida pela Equação 3.11:

$$d_o = (L_i - L_f) K \quad (3.11)$$

onde:

d_o = deflexão recuperável máxima em centésimo de milímetro;

L_i = leitura inicial em centésimo de milímetro;

L_f = leitura final em centésimo de milímetro;

K = constante da viga obtida pela relação entre o braço maior e o braço menor, articulados, da viga Benkelman.

Quanto maior o valor da deflexão recuperável máxima (d_o), mais elástica ou resiliente será a estrutura e maior o seu comprometimento estrutural. Entretanto a análise isolada de seu valor pode não ser suficiente, já que algumas estruturas de pavimento podem apresentar a mesma deflexão máxima, porém com arqueamentos diferentes de outras estruturas na deformada. Assim a forma da deformada é um fator importante e deve ser levado em consideração na avaliação estrutural. Para auxiliar esta avaliação deve-se avaliar o chamado raio de curvatura (R), parâmetro indicativo do arqueamento da deformada na sua porção mais crítica, em geral considerada a 25 cm do centro da carga. Para cálculo do raio de curvatura, normalmente é medido a deflexão máxima (d_o) e mais um ponto, geralmente a 25 cm do inicial (d_{25}), representando um arco de parábola que passa por estes dois pontos (Figura 3.23).

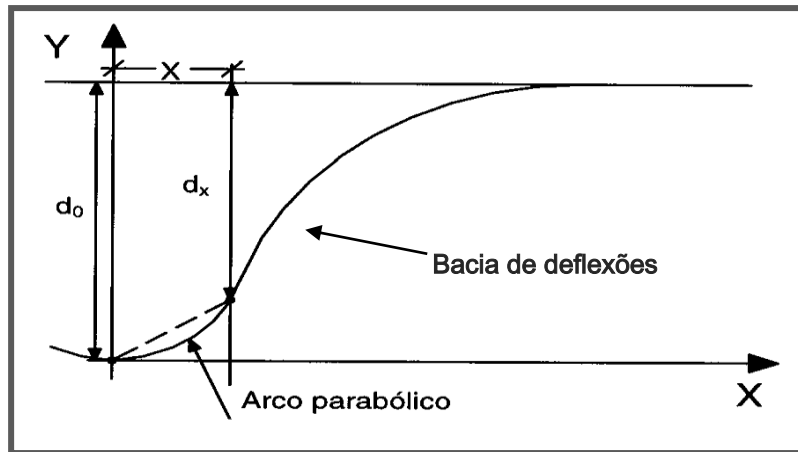


Figura 3.23 – Deformada e raio de curvatura (DNER, 1998).

A Equação 3.12, largamente utilizada para o ajuste de um arco parabólico que passa pelo ponto considerado, afastado genericamente do centro de carga de um valor x , que depende da deflexão máxima e da deflexão no ponto considerado (d_x).

$$R = \frac{10x^2}{2(d_0 - d_x)} \quad (3.12)$$

Para x , igual a 25 cm, termos a Equação 3.13:

$$R = \frac{6250}{2(d_0 - d_x)} \quad (3.13)$$

Segundo prescreve a norma ME 024 (DNER, 1994) um raio de curvatura baixo é indicativo de um severo arqueamento da deformada, denotando uma condição estrutural crítica. A análise da deflexão máxima conjuntamente com o raio de curvatura, permite avaliação do comportamento das estruturas de um determinado pavimento, através da associação dos parâmetros: produto ($R \times d$) ou quociente (R/d).

O programa utilizado para este estudo da estrutural estratificada, o RETRAN5-L, citado em Albernaz (2010), este programa, criado pelo mesmo, avalia até cinco camadas do pavimento. Nos levantamentos com viga Benkelman o RRETRAN5-L verifica se a bacia de deformação atingiu ou não os pés dianteiros do equipamento, em caso afirmativo, o programa corrige automaticamente as deflexões medidas.

Após obtido os módulos elásticos por retroanálise, tornou-se possível o cálculo das contribuições individuais de cada camada do pavimento. Assim a camada que mais estiver contribuindo para a formação da deflexão máxima, com as deformações no pavimento será a camada crítica da estrutura, e será esta a camada que mais contribuí para a degradação total do pavimento. Na retroanálise, normalmente é adotado três critérios para dimensionamento das espessuras das camadas do pavimento, o critério da fadiga, o critério de deformação permanente e o critério da reflexão de trincas.

O programa RRETRAN5-L que emprega um extenso banco de dados contendo milhares de estruturas teóricas, geradas pelo programa americano ELSYM5 foi utilizado não somente na avaliação estrutural, mas também no dimensionamento do reforço em nível de projeto final de engenharia, realizado por este estudo no pavimento analisado.

3.2.21 Projeto de reforço estrutural do pavimento para dez anos (2010 - 2020)

No presente estudo foi realizado o dimensionamento do reforço do pavimento pelo método de retroanálise utilizando-se o programa RETRANS5-L. Desta maneira foi obtido a caracterização da mistura asfáltica que constituirá a camada de revestimento em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) que servirá, caso necessário, de reforço do pavimento. Para a definição das características mecânicas e reológicas da mistura asfáltica foi adotado neste dimensionamento os dados do IA "Instituto do Asfalto Americano" (Tabela 3.5) que apresenta a metodologia de estimativa do valor do MR da mistura asfáltica, também denominado na Europa como módulo de rigidez (M. Rig. da mistura asfáltica) e também o valor da respectiva deformação específica admissível de tração preconizada pelo Instituto do Asfalto dos EUA. Os valores desses parâmetros foram estimados para as temperaturas de 15 °C, 25 °C, 35 °C e 45 °C.

Para o cálculo do módulo da mistura asfáltica, necessita-se adicionalmente do valor da temperatura média do ar na região onde a rodovia está implantada, porque ela tem influência sobre a temperatura de trabalho da mistura. As temperaturas médias, mínima e máxima, anual do ar na região do trecho são iguais a 23 °C e 28 °C, respectivamente, segundo dados obtidos no "Diagnóstico Ambiental do Estado de Minas Gerais"

publicado pelo CETEC/MG em 1983. A temperatura média de trabalho da mistura asfáltica foi calculada de acordo com a metodologia preconizada pelo Instituto do Asfalto dos EUA através da Equação 3.14:

$$T_p = \frac{(0,39Z+4,95)T_a+1,29Z+12,1}{0,39Z+4} \quad (3.14)$$

Onde:

T_p – Temperatura média do CBUQ "Concreto Betuminoso Usinado a Quente" a uma profundidade "Z" partindo da sua superfície (°C)

T_a – Temperatura média do ar na região do trecho (°C)

Z – Profundidade a partir da superfície do revestimento onde a temperatura deve ser calculada (cm).

A profundidade Z a considerar corresponde a 1/3 da espessura da mistura asfáltica a ser utilizada na camada de reforço estrutural. Para uma espessura média $H_{CBUQ} = 5,0$ cm, temos $Z = 1,67$ cm. Portanto, considerando-se $T_a = 23,0$ °C, $T_a = 28,0$ °C e $Z = 1,67$ cm obtêm: para $T_a = 23,0$ °C → $T_p = 30$ °C e para $T_a = 28,0$ °C → $T_p = 36$ °C. Entrando-se com todos os valores obtidos nas equações do Instituto do Asfalto, obtivemos os seguintes valores de módulo da mistura asfáltica (CBUQ) adotada: para $T_p = 30$ °C → $MR = 3.08 \times 10^3$ MPa e para $T_p = 36$ °C → $MR = 1.71 \times 10^3$ MPa.

O menor valor de MR será utilizado na análise de deformação permanente da mistura (maior temperatura), e o maior na análise de vida de fadiga (menor temperatura). Para o dimensionamento mecânico, também é necessário conhecer os esforços atuantes e dos esforços admissíveis de fadiga e de deformação permanente.

No dimensionamento mecânico deste estudo foram considerados nos cálculos os esforços horizontais na face inferior do reforço estrutural (CBUQ), e os esforços verticais no topo do subleito. Na Tabela 3.5 está indicado também o cálculo estimativo das deformações específicas de tração (ϵ_t) da mistura asfáltica, para as mesmas temperaturas citadas.

Tabela 3.5 – Estimativa do MR da mistura asfáltica (método do IA) para a rodovia MG 232, Mesquita / Santana do Paraíso - estaca 0 a 1000 - 20 km (IA *apud* ALBERNAZ, 2010).

ESTIMATIVA DO MR DE MISTURA ASFÁLTICA PELO MÉTODO DO INSTITUTO DO ASFALTO														
RODOVIA: MG-232		TRECHO: SANTANA DO PARAÍSO - MESQUITA					EST. 0 - 1000			EXT.: 20 km				
CARACT. MARSHALL MISTURA					CONDICÃO DE APLICAÇÃO DA CARGA		CARACT. DO LIGANTE		PARÂMETROS DE CÁLCULO DO MÉTODO					
$\gamma_{mist.}$ g/cm ³	γ_{ag} g/cm ³	γ_b g/cm ³	Faixa DNIT	Teor (%)	FR. (Hz)	T. °C	PEN. Antes 25°C X 0,1 mm	VISC.. 21,1°C X 10 ⁵ Pa.s	Coeficientes					MR da mistura asfáltica (MPa)
2,389	2,687	1,037	C	5,4					β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	
Temperatura de trabalho do concreto asfáltico (CA): 15 °C														
84,1	12,4	3,5	5,4	5,0	10,0	15	55	4,48	1,177	3748,2	1,721	6,009	1,798	1,04x10 ⁴
Temperatura de trabalho do concreto asfáltico (CA): 25 °C														
84,1	12,4	3,5	5,4	5,0	10,0	25	55	4,48	0,843	6050,2	1,721	6,009	1,798	4,80x10 ³
Temperatura de trabalho do concreto asfáltico (CA): 35 °C														
84,1	12,4	3,5	5,4	5,0	10,0	35	55	4,48	0,440	8827,4	1,721	6,009	1,798	1,90x10 ³
Temperatura de trabalho do concreto asfáltico (CA): 45 °C														
84,1	12,4	3,5	5,4	5,0	10,0	45	55	4,48	-0,029	12059,7	1,721	6,009	1,798	6,44x10 ²
Temperatura média mínima anual do concreto asfáltico (CA): 30 °C														
84,1	12,4	3,5	5,4	5,0	10,0	30	55	4,48	0,650	7380,8	1,721	6,009	1,798	3,08x10 ³
Temperatura média máxima anual do concreto asfáltico (CA): 36 °C														
84,1	12,4	3,5	5,4	5,0	10,0	36	55	4,48	0,396	9130,4	1,721	6,009	1,798	1,71x10 ³
Temperatura média mínima do ar: 23 °C							Temperatura mínima do concreto asfáltico (CA): 28 °C							
Temperatura média máxima do ar: 30 °C							Temperatura máxima do concreto asfáltico (CA): 36 °C							
M máximo: 3,08 x 10 ³ MPa							MR mínimo: 1,71 x 10 ³ MPa							
FADIGA - ESTIMATIVA DE DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DE TRAÇÃO ADMISSÍVEL - MÉTODO DO IA														
Va (%)	Vb (%)	MR da mistura asfáltica (MPa x 10 ⁶)	Coeficientes		Fator Laborat. X Campo	Número de repetições de carga		DEFORMAÇÃO ESPEC. DE TRAÇÃO ADM. ϵ_t (m/m) (adimensional)						
			M	C		Nt (pista)	Nf (laborat.)							
Temperatura de trabalho do concreto asfáltico (CA): 15 °C														
3,5	12,4	1,04 x 10 ¹⁰	0,4493	2,8137	18,4	1,18 x 10 ⁶	6,41 x 10 ⁴	2,26x10 ⁻⁴						
Temperatura de trabalho do concreto asfáltico (CA): 25 °C														
3,5	12,4	4,80 x 10 ⁹		2,8137	18,4	1,18 x 10 ⁶	6,41 x 10 ⁴	2,76x10 ⁻⁴						
Temperatura de trabalho do concreto asfáltico (CA): 35 °C														
	12,4	1,90 x 10 ⁹	0,4493	2,8137	18,4	1,18 x 10 ⁶	6,41 x 10 ⁴	3,51x10 ⁻⁴						
Temperatura de trabalho do concreto asfáltico (CA): 45 °C														
3,5	12,4	6,44 x 10 ⁸	0,4493	2,8137	18,4	1,18 x 10 ⁶	6,41 x 10 ⁴	4,65x10 ⁻⁴						
Temperatura média mínima anual do concreto asfáltico (CA): 30 °C														
3,5	12,4	3,08 x 10 ⁹	0,4493	2,8137	18,4	1,18 x 10 ⁶	6,41 x 10 ⁴	3,10x10 ⁻⁴						
Temperatura média máxima anual do concreto asfáltico (CA): 36 °C														
3,5	12,4	1,71 x 10 ⁹	0,4493	2,8137	18,4	1,18 x 10 ⁶	6,41 x 10 ⁴	3,61x10 ⁻⁴						

Os valores (ϵ_t) para as temperaturas da mistura asfáltica (T_p) iguais a 30,0 °C e 36,0 °C são, respectivamente, $3,10 \times 10^{-4}$ (m/m) e $3,61 \times 10^{-4}$ (m/m). Para ratificar os valores de (ϵ_t), estimados pelo método do Instituto do Asfalto, foram utilizadas fórmulas desenvolvidas por outros institutos de pesquisa americanos e europeus.

Para o volume médio diário de tráfego ao ano (VMDAT/2020) definiu-se o número "N" de projeto (N_{10}) utilizando-se os parâmetros $USACE = 1,18 \times 10^6$ (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Projeção do VMDAT e do número N para a MG 232 – Mesquita/Santana do Paraíso (DER/MG, 2010).

RODOVIA: MG-232 TRECHO: SANTANA DO PARAÍSO - MESQUITA										
PROJEÇÃO DO "VMDAT" E DO NÚMERO "N"										
ANO	Volumes de Tráfego (VMDAT)				Valores do Número "N"				Obs.	
	Número de veículos - tipo			Total	USACE		AASHTO			
	Passeio	Coletivo	Carga		Ano a ano	Acumulado	Ano a ano	Acumulado		
2003	1.024	69	152	1.245	Pesquisa	
2004	1.055	71	157	1.282	..	..	..	..
2005	1.086	73	161	1.321	..	..	..	..
2006	1.119	75	166	1.360	..	..	..	..
2007	1.153	78	171	1.401	..	..	..	..
2008	1.187	80	176	1.443	..	..	..	..
2009	1.223	82	181	1.487	..	..	..	..
2010	1.259	85	187	1.531	..	..	..	..
2011	1.297	87	193	1.577	$1,03 \times 10^5$	$1,03 \times 10^5$	$6,83 \times 10^4$	$6,83 \times 10^4$		1º ano
2012	1.336	90	198	1.624	$1,06 \times 10^5$	$2,09 \times 10^5$	$7,03 \times 10^4$	$1,39 \times 10^5$		
2013	1.376	93	204	1.673	$1,09 \times 10^5$	$3,19 \times 10^5$	$7,24 \times 10^4$	$2,11 \times 10^5$	5º ano	
2014	1.417	96	210	1.723	$1,13 \times 10^5$	$4,31 \times 10^5$	$7,46 \times 10^4$	$2,86 \times 10^5$		
2015	1.460	98	217	1.775	$1,16 \times 10^5$	$5,47 \times 10^5$	$7,68 \times 10^4$	$3,62 \times 10^5$		
2016	1.504	101	223	1.828	$1,20 \times 10^5$	$6,67 \times 10^5$	$7,91 \times 10^4$	$4,41 \times 10^5$		
2017	1.549	104	230	1.883	$1,23 \times 10^5$	$7,90 \times 10^5$	$8,15 \times 10^4$	$5,23 \times 10^5$		
2018	1.595	107	237	1.940	$1,27 \times 10^5$	$9,17 \times 10^5$	$8,39 \times 10^4$	$6,07 \times 10^5$		
2019	1.643	111	244	1.998	$1,31 \times 10^5$	$1,05 \times 10^6$	$8,65 \times 10^4$	$6,93 \times 10^5$		
2020	1.693	114	251	2.058	$1,35 \times 10^5$	$1,18 \times 10^6$	$8,91 \times 10^4$	$7,82 \times 10^5$		10º ano
Composição Percentual do Tráfego / 2004 (%)				Parâmetro Adotado no Cálculo do Número de Operações do Eixo-Padrão de 80,4 kN - Número "N"						
Passeio	Coletivo	Carga	Fatores de veículo - FV			Fator climático		Fator de pista		
82,25	5,54	12,21	FV _{USACE}			FV _{AASHTO}		FR		
Taxas de crescimento do tráfego (%)			2,018			1,336		1,000		
Passeio	Coletivo	Carga	Ano inicial para o cálculo do Número "N" → 2011							
3,00	3,00	3,00	Período de projeto - cálculo do Número "N" - P (anos) → 10							

Para verificar a validade dos valores de deformação de tração (ϵ_t), estimados pelo método do IA, utilizou-se as formulas desenvolvidas por outros institutos de pesquisas americanos e europeus. No presente projeto esses parâmetros foram calculados através

do programa SYSBEINC (Buzatti, 1998), estando os resultados indicados na Tabela 3.7, onde o valor médio das deformações específicas de tração (ϵ_t) é igual a $2,26 \times 10^{-4}$, com desvio-padrão de $5,61 \times 10^{-5}$. Adotou-se como a deformação específica de tração máxima admissível ($\epsilon_{t\text{ ADM.}}$) o valor médio, menos o desvio-padrão, obteve-se: $\epsilon_{t\text{ ADM.}} = 1,70 \times 10^{-4}$. Para o valor resultante para deformação específica vertical de compressão ($\epsilon_v\text{ ADM.}$), utilizou-se a mesma linha de raciocínio, adotando o valor médio das deformações específicas de compressão: $-4,49 \times 10^{-4}$ menos um desvio-padrão: $1,60 \times 10^{-5} = \epsilon_v\text{ ADM.} = -4,33 \times 10^{-4}$.

Tabela 3.7 - Esforços limites de fadiga e deformação permanente – Número USACE (SYSBEINC - BUZATTI, 1998).

ESFORÇOS LIMITES DE FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE – NÚMERO N USACE					
INSTITUIÇÃO	PARÂMETROS CONSIDERADOS				
	N_{10}	MR (MPa)	V_v (CBUB) (%)	Vb (%)	
1 – DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA HORIZONTAL DE TRAÇÃO NA FACE INFERIOR DO REVESTIMENTO (FADIGA)					ϵ_t (m/m) (adimens.)
BRRC (Bélgica)	$1,18 \times 10^6$	..	..	..	(não consid.)
FHWA (EUA)	$1,18 \times 10^6$	..	..	..	$1,29 \times 10^{-4}$
TRRL	$1,18 \times 10^6$	..	..	..	$2,16 \times 10^{-4}$
SHELL	$1,18 \times 10^6$	$3,08 \times 10^3$	3,5	12,4	$2,72 \times 10^{-4}$
P. Ullidtz (Dinamarca)	$1,18 \times 10^6$	..	..	..	$1,89 \times 10^{-4}$
YuT. Chou	$1,18 \times 10^6$	$3,08 \times 10^3$	..	..	$2,04 \times 10^{-4}$
NAASRA (Australia)	$1,18 \times 10^6$	..	..	..	$2,17 \times 10^{-4}$
University of Texas (Porter et al.)	$1,18 \times 10^6$	..	..	..	$2,79 \times 10^{-4}$
The Asphalt Institute (EUA)	$1,18 \times 10^6$	$3,08 \times 10^3$	3,5	12,4	$3,01 \times 10^{-4}$
Obs.:				Média	$2,26 \times 10^{-4}$
1) Adotando o valor da média menos um desvio-padrão (a favor da segurança).				D. Padrão	$5,61 \times 10^{-5}$
2) Valores extremos foram eliminados para atender ao critério de C. Var. < 25%.				C. Var. %	24,8 %
				Adotado	$1,70 \times 10^{-4}$
2 – DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA VERTICAL DE COMPRESSÃO NO TOPO DO SUBLEITO (DEFORMAÇÃO PERMANENTE)					ϵ_v (m/m) (adimens.)
SHELL	$1,18 \times 10^6$	..	..	..	(não consid.)
LCPC (França)	$1,18 \times 10^6$	..	..	..	(não consid.)
BROWN e PELL	$1,18 \times 10^6$	..	..	..	$-4,31 \times 10^{-4}$
GERMAN e HUDSON	$1,18 \times 10^6$	..	..	..	(não consid.)
DORMON e METCALF	$1,18 \times 10^6$	..	..	..	(não consid.)
CRR (Bélgica)	$1,18 \times 10^6$	..	..	..	$-4,41 \times 10^{-4}$
MONISMITH	$1,18 \times 10^6$	..	..	..	$-4,60 \times 10^{-4}$
The Asphalt Institute (EUA)	$1,18 \times 10^6$	..	..	..	$-4,65 \times 10^{-4}$
Obs.:				Média	$-4,49 \times 10^{-4}$
1) Adotando o valor da média menos um desvio-padrão (a favor da segurança).				D. Padrão	$1,60 \times 10^{-5}$
2) Valores extremos foram eliminados para atender ao critério de C. Var. < 25%.				C. Var. %	3,6 %
				Adotado	$-4,33 \times 10^{-4}$

Importante frisar, que esses valores, são válidos apenas para as condições adotadas nesta dissertação. Os esforços a serem considerados na análise mecânica podem ser as tensões, as deformações específicas, ou ambas que atuam de forma simultânea, horizontalmente a face inferior das camadas rígidas, ou verticalmente no topo das camadas granulares e do subleito. Todavia, segundo Albernaz (2010), obtêm-se resultados mais acurados quando se adota as deformações específicas em lugar das tensões, devido à natureza do carregamento dos ensaios de determinação dos módulos de resiliência e das vidas de fadiga e de deformação permanente. Portanto, adotou-se neste estudo os valores de deformação específica indicados a seguir:

CRITÉRIO DA FADIGA – FACE INFERIOR DO CBUQ	
ESFORÇO MÁXIMO ADMISSÍVEL	USACE
Deformação específica horizontal de tração	$1,70 \times 10^{-4}$ (m/m)

CRITÉRIO DA DEF. PERM. – TOPO DO SUBLEITO	
ESFORÇO MÁXIMO ADMISSÍVEL	USACE
Deformação específica vertical de compressão	$-4,33 \times 10^{-4}$ (m/m)

Definidos todos os parâmetros da estrutura existente, do carregamento e da mistura que constituirá o reforço do pavimento, procedeu-se o cálculo dos esforços gerados pela carga do eixo padrão na face inferior da camada de reforço estrutural (CBUQ) e no topo do subleito, utilizando-se os programas ANAMEC e ELSYM5, variando-se a espessura do reforço entre (2,5 - 32,5) cm, a cada 2,5 cm. As curvas dos esforços gerados na estrutura em função da variação da espessura do reforço estrutural de CBUQ são similares às curvas que representam as leis de variação das deformações específicas mostradas pelas Figuras (3.24 e 3.25).

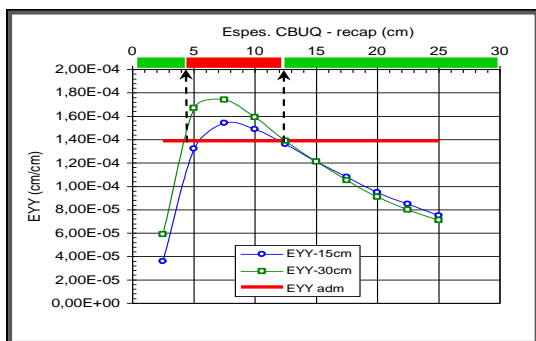


Figura 3.24 - Variação das deformações específicas horizontais geradas na face inferior do reforço (ALBERNAZ, 2010).

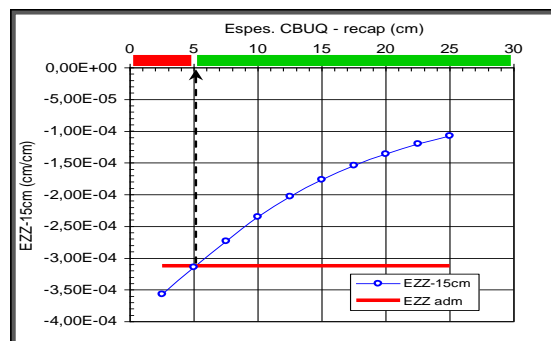


Figura 3.25 – Deformações verticais de compressão no topo do subleito (ALBERNAZ, 2010).

Em seguida plotou-se nos respectivos gráficos, exemplificados pelas retrorreferenciadas Figuras 3.24 e 3.25, as retas de deformação específica horizontal de tração admissível (face inferior do reforço) e de deformação específica vertical de compressão admissível (topo do subleito). A partir da confrontação entre as curvas dos esforços gerados na estrutura pelo carregamento, com as retas dos respectivos esforços admissíveis, determinou-se analiticamente, os intervalos de espessuras de revestimento que atendem ao critério: $\sigma_t, C \text{ gerada} \leq \sigma_t, C \text{ admissível}$ e/ou $\epsilon_t, C \text{ gerada} \leq \epsilon_t, C \text{ admissível}$. No exemplo anterior (Figura 3.24) que se refere às deformações específicas horizontais geradas na face inferior do reforço, a reta da deformação específica admissível corta a curva das deformações geradas em dois pontos extremos, que correspondem às espessuras de 4,2 cm (limite inferior máximo) e 12,1 cm (limite superior mínimo). Verifica-se no gráfico da referida Figura 3.24 que, para todas as espessuras situadas entre esses dois valores, as deformações específicas geradas são superiores à deformação específica máxima admissível e, portanto, não poderão ser adotadas porque o CBUQ teria vida de fadiga inferior ao período de projeto adotado, 10 anos. Rememorando, a deformação específica admissível é função do Número "N" considerado no dimensionamento. O mesmo procedimento é empregado para o caso das deformações específicas verticais de compressão no topo do subleito, sendo válidas, no caso da Figura 3.25, todas as espessuras de CBUQ maiores ou iguais a 5,0 cm. Desta forma, podemos observar pela Figura 3.26 que apenas o 2º Intervalo será considerado como válido para definição da espessura da nova camada de revestimento em CBUQ.



CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO	FAIXAS DE ESPESSURAS VÁLIDAS E NÃO VÁLIDAS						
FADIGA (deformação específica horizontal de tração)	0		<4,2cm				>12,1
DEFORMAÇÃO PERMANENTE (deformação específica vertical de compressão)	0		>5,0				
INTERVALO FINAL DE ESPESSURAS VÁLIDAS							>12,1
INTERVALO DE ESPESSURAS VÁLIDAS							2º Intervalo
 ESPESSURAS DE CBUQ VÁLIDAS	 ESPESSURAS DE CBUQ NÃO VÁLIDAS						

Figura 3.26 – Critério de dimensionamento com e especificação das espessuras válidas, não válidas e intervalo final de espessura permitida.

Entretanto para fins de analogia e exemplificação, lançando-se os intervalos das espessuras de reforço consideradas válidas e não válidas em um diagrama linear como o

da Figura 3.27 obtém-se o intervalo ou os intervalos finais de espessuras permitidas, ou seja, aquelas espessuras que atendem simultaneamente a todos os critérios de dimensionamento adotados.



CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO	FAIXAS DE ESPESSURAS VÁLIDAS E NÃO VÁLIDAS					
FADIGA (deformação específica horizontal de tração)	0 cm			< x cm		> y cm
DEFORMAÇÃO PERMANENTE (deformação específica vertical de compressão)	0 cm	> k cm				
INTERVALO FINAL DE ESPESSURAS VÁLIDAS	0 cm	> k cm		< x cm		> y cm
INTERVALO DE ESPESSURAS VÁLIDAS		1º Intervalo			2º Intervalo	
 ESPESSURAS DE CBUQ VÁLIDAS		ESPESSURAS DE CBUQ NÃO VÁLIDAS				

Figura 3.27 – Intervalos finais de espessuras permitidas.

O intervalo de espessuras válidas reduzidas é denominado “1º Intervalo de Espessuras Válidas”, e o relativo às espessuras elevadas, “2º Intervalo de Espessuras Válidas”. Esse tipo de análise pode gerar seis casos básicos de definição dos intervalos de espessuras válidas conforme indicados nos casos (1 - 6) do Anexo I. Quando a reta do esforço admissível não secciona a curva dos esforços gerados (A e B e/ou C indeterminados), significa que qualquer espessura de reforço satisfaz ao dimensionamento, o pavimento não necessita de reforço estrutural. Admitindo soluções de caráter funcional como lama asfáltica, microrrevestimento. Se optar por recapear o pavimento por motivos de ordem não estruturais, poderá ser indicado a espessura mínima exequível de CBUQ dependendo da faixa granulométrica adotada. Quando o dimensionamento define dois intervalos de espessuras válidas, já considerados todos os critérios de dimensionamento, deverá ser adotada, por questões econômicas, a menor espessura do 1º Intervalo, desde que exequível. Porém, deverão ser devidamente avaliados os riscos de reflexão de trincas e a compatibilidade geométrica com as espessuras das faixas de trânsito contíguas. Quando o dimensionamento define apenas um intervalo de espessuras válidas e esse intervalo é definido sempre pelo segundo intervalo do critério da fadiga (reforço) e também pelo intervalo da deformação permanente (subleito) deverá ser avaliado técnica e economicamente a alternativa de reconstrução do pavimento.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E ANÁLISES DOS ESTUDOS EFETUADOS

Para possibilitar a adequada identificação dos materiais e métodos, referenciados no capítulo três, com os resultados apresentados a seguir, bem como, a análise dos mesmos, faz-se necessário frisar e correlacionar novamente os subtrechos com os respectivos segmentos homogêneos que constituem o trecho rodoviário da MG 232 - Mesquita/Santana do Paraíso, bem como, sua localização e extensão, conforme a seguir:

- a) Primeiro subtrecho - SH-1 → estacas: 0 a 49 → 980 m;
- b) segundo subtrecho - SH-2 → estacas: 49 a 192 → 2.860 m;
- c) terceiro subtrecho - SH-3 → estacas 192 a 362 → 3.400 m;
- d) quarto subtrecho - SH-4 → estacas: 362 a 533 → 3.420 m;
- e) quinto subtrecho - SH-5 → estacas: 533 a 784 → 5.020 m;
- f) sexto subtrecho - SH-6 → estacas 784 a 1000 → 4.320 m.

Os materiais granulares utilizados para construção das camadas de base e sub-base estabilizadas granulometricamente, do reforço do subleito e também os solos que constituem o próprio subleito (escória de aciaria, escória de aciaria + 20% de argila, cascalho e argila) possuem características diferentes, conforme demonstraremos a seguir, pois as suas origens não são as mesmas, a argila e cascalho, oriundos da natureza e a escória, um agregado alternativo, um coproduto da indústria siderúrgica.

4.1 ESTUDOS DOS SOLOS: CASCALHO, ARGILA, ESCÓRIA DE ACIARIA E ESCÓRIA DE ACIARIA COM ADIÇÃO DE 20% DE ARGILA - GRANULOMETRIA, w_L , I_p , IG, CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL (TRB), EXPANSÃO CBR E ISC

Os resultados da granulometria por peneiramento, w_L "limites de liquidez", I_p "índice de plasticidade", IG "índice de grupo" e a classificação TRB "Transportation Research Board" dos materiais granulares retrorreferenciados constam da Tabela 4.1, a seguir:

Tabela 4.1 – Estudos geotécnicos - granulometria, LL, IP, IG e classificação TRB - materiais granulares - MG 232 - Mesquita/Santana do Paraíso (DER/MG, 2009).

ESTUDOS GEOTÉCNICOS – RODOVIA MG 232 – MESQUITA – SANTANA DO PARAÍSO													
REG. AM	CAMADA DO PAV.	POS.	w _L (%)	I _p (%)	GRANULOMETRIA (% passando)							IG	Class. TRB
					2"	1"	3/8"	#4	#10	#40	#200		
					50,8	25,4	9,5	4,8	2,0	0,42	0,075		
F 1 - EST.: 9+12 - 1 Escória de aciaria - 2 Cascalho - 3 Argila													
1	Base	LD	NL	NP	100,0	96,8	60,5	37,5	21,8	7,9	2,8	0	A-1-a
2	Sub-base	LD	25,7	10,3	100,0	96,1	89,0	84,3	68,4	39,3	19,5	0	A-2-4
3	Subleito	LD	32,0	15,2	100,0	97,9	94,1	89,7	82,4	58,2	31,7	1	A-2-6
F-2 - EST.: 109+19 - 1 Escória de aciaria + 20% de argila - 2 Escória de aciaria - 3 Cascalho - 4 Argila													
1	Base	LE	NL	NP	100,0	100,0	65,9	49,5	35,7	15,0	4,4	0	A-1-a
2	Sub-base	LE	NL	NP	100,0	94,8	50,1	29,8	17,9	7,8	2,9	0	A-1-a
3	Sub-base	LE	23,6	NP	100,0	100,0	91,0	81,2	58,5	33,5	15,6	0	A-1-b
4	Subleito	LE	49,8	22,4	100,0	100,0	99,7	98,5	95,3	74,3	56,8	10	A-7-6
F 3 - EST.: 209+19 - 1 Cascalho - 2 Cascalho - 3 Argila													
1	Base	LD	23,1	NP	100,0	96,5	90,0	84,2	61,0	33,2	15,5	0	A-1-b
2	Sub-base	LD	22,7	NP	100,0	100,0	96,2	88,6	61,3	33,2	14,7	0	A-1-b
3	Subleito	LD	33,6	13,7	100,0	89,7	87,8	85,0	77,0	57,6	38,4	2	A-6
F 4 - EST.: 309+19 - 1 Cascalho - 2 Cascalho - 3 Argila													
1	Base	LD	28,3	NP	100,0	91,4	82,2	63,6	46,1	25,8	13,2	0	A-1-a
2	Sub-base	LD	25,8	NP	100,0	97,7	86,7	71,1	55,1	29,6	13,7	0	A-1-b
3	Subleito	LD	56,5	25,2	100,0	97,0	96,6	95,9	90,9	65,9	46,3	8	A-7-5
F 5 - EST.: 410 - 1 Escória de aciaria + 20% de argila - 2 Argila													
1	Base	LD	NL	NP	100,0	91,5	54,2	42,6	33,1	15,6	5,9	0	A-1-a
2	Subleito	LD	43,8	NP	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	75,6	48,1	3	A-5
F 6 - EST.: 509+10 - 1 Escória de aciaria + 20% de argila - 2 Argila													
1	Base	LE	NL	NP	100,0	97,6	60,0	43,3	30,7	15,8	4,9	0	A-1-a
2	Subleito	LE	47,7	20,6	100,0	100,0	98,5	97,0	91,7	66,7	49,0	7	A-7-6
F 7 - EST.: 609+09 - 1 Escória de aciaria - 2 Argila													
1	Base	LD	NL	NP	100,0	84,3	51,9	34,4	23,3	11,6	3,1	0	A-1-a
2	Subleito	LD	31,9	16,0	100,0	87,6	79,7	73,7	63,8	44,1	25,2	1	A-2-6
F 8 - EST.: 710+05 - 1 Escória de aciaria - 2 Argila													
1	Base	LE	NL	NP	100,0	94,5	57,5	43,5	32,7	17,8	4,8	0	A-1-a
2	Subleito	LE	37,3	14,4	100,0	100,0	97,0	95,2	89,7	64,7	41,3	2	A-6
F 9 - EST.: 810+01 - 1 Cascalho - 2 Cascalho - 3 Argila													
1	Base	LE	39,3	16,0	100,0	86,4	78,5	70,4	54,1	33,2	21,8	0	A-2-6
2	Sub-base	LE	38,9	17,3	100,0	95,9	77,6	62,0	44,1	26,6	17,9	0	A-2-6
3	Subleito	LE	34,6	NP	100,0	100,0	95,0	92,2	86,8	58,4	33,3	0	A-2-4
F 10 - EST.: 907+01 - 1 Cascalho - 2 Cascalho - 3 Argila													
1	Base	LD	41,0	NP	100,0	98,7	89,1	77,0	58,5	38,3	26,2	0	A-2-5
2	Sub-base	LD	39,2	17,4	100,0	83,6	68,4	54,6	40,2	25,3	17,0	0	A-2-6
3	Subleito	LD	31,9	16,4	100,0	100,0	95,0	89,9	79,1	52,9	32,9	1	A-2-6
F 11 - EST.: 998+19 - 1 Cascalho - 2 Cascalho - 3 Argila													
1	Base	LD	30,8	NP	100,0	96,8	90,7	71,7	47,5	17,7	11,6	0	A-1-a
2	Sub-base	LD	33,6	14,5	100,0	98,4	86,9	62,3	39,6	21,1	13,3	0	A-2-6
3	Subleito	LD	26,0	NP	100,0	100,0	97,5	93,4	84,8	52,9	22,9	0	A-2-4

Pela Tabela 4.2 pode-se observar os resultados da granulometria por peneiramento, dos w_L "limite de liquidez", dos I_P "índices de plasticidade", dos IG "índices de grupo" e a classificação TRB "Transportation Research Board" dos materiais granulares utilizados na construção das camadas de bases do pavimento do trecho: Mesquita – Santana do Paraíso, subdividido em subtrechos com seis segmentos homogêneos, com as camadas de base executadas em cascalho, escória de aciaria pura e escória de aciaria com adição de 20% de argila. Salientamos que estes citados estudos, com os resultados destacados pela Tabela 4,4, foram efetuados após compactação, ou seja, depois dos mesmos serem utilizados nos corpos-de-prova dos ensaio de ISC "Índice de Suporte Califórnia foram novamente reutilizados e submetidos aos estudos geotécnicos.

Tabela 4.2 - Estudos geotécnicos - granulometria, w_L , I_P , IG e classificação TRB dos materiais que constituem as camadas de base do pavimento da MG 232 - trecho Mesquita/Santana do Paraíso, após compactação (DER/MG, 2009).

ESTUDOS GEOTÉCNICOS - MATERIAL DE BASE - MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO													
APÓS COMPACTAÇÃO													
REG.	CAM.	POS.	w_L (%)	I_P (%)	GRANULOMETRIA (% passando)							IG	Class. TRB
					2"	1"	3/8"	#4	#10	#40	#200		
AM.			50,8		25,4	9,5	4,8	2,0	0,42	0,075			
			F 1 - EST.: 9+12 - AM. 1 - Escória de aciaria										
1	Base	LD	NL	NP	100,0	100,0	70,5	42,8	30,2	14,9	5,8	0	A-1-a
			F-2 - EST.: 109+19 - AM. 1 Escória de aciaria + 20% de argila										
1	Base	LE	NL	NP	100,0	100,0	77,1	60,5	46,8	22,1	9,6	0	A-1-a
			F 3 - EST.: 209+19 - AM. 1 - Cascalho										
1	Base	LD	23,0	NP	100,0	100,0	97,9	94,0	73,3	48,3	22,3	0	A-2-4
			F 4 - EST.: 309+19 - AM. 1 - Cascalho										
1	Base	LD	26,3	NP	100,0	100,0	97,7	82,9	66,5	38,6	19,3	0	A-2-4
			F 5 - EST.: 410 - AM. 1 - Escória de aciaria + 20% de argila										
1	Base	LD	NL	NP	100,0	100,0	78,6	55,8	44,5	24,1	11,4	0	A-1-a
			F 6 - EST.: 509+10 - AM. 1 - Escória de aciaria + 20% de argila										
1	Base	LE	NL	NP	100,0	100,0	81,2	60,3	47,3	24,5	11,9	0	A-1-a
			F 7 - EST.: 609+09 - AM. 1 - Escória de aciaria										
1	Base	LD	NL	NP	100,0	100,0	76,7	51,2	38,3	18,5	7,3	0	A-1-a
			F 8 - EST.: 710+05 - AM. 1 - Escória de aciaria										
1	Base	LE	NL	NP	100,0	100,0	76,3	54,0	41,7	25,2	7,8	0	A-1-a
			F 9 - EST.: 810+01 - AM. 1 - Cascalho										
1	Base	LE	37,5	15,3	100,0	100,0	94,3	81,2	63,8	39,5	26,7	1	A-2-6
			F 10 - EST.: 907+01 - AM. 1 - Cascalho										
1	Base	LD	40,0	NP	100,0	100,0	96,7	86,4	72,6	44,4	29,6	0	A-2-4
			F 11 - EST.: 998+19 - AM. 1 - Cascalho										
1	Base	LD	25,7	NP	100,0	100,0	97,3	82,8	59,5	28,7	16,8	0	A-1-b

Ao estudar-se a camada de base sem distinção do tipo de agregado utilizado algumas amostras não atendem as especificações da norma ES 303 (DNER, 1997), não enquadrando-se totalmente em uma única faixa, conforme demonstrado numericamente pela Tabela 4,1, estudos granulométricos antes do material sofrer compactação para o ensaio de ISC. O cascalho enquadrou-se na faixa D e escória de aciaria na faixa B da retrocitada norma ES 303 (DNER, 1997) retratado graficamente pela Figuras 4.1 e após compactação o cascalho ajustou-se na faixa D e escória de aciaria na faixa C (Figura 4.2). Analisando somente a escória de aciaria, as condições melhoram, todavia, algumas amostras ainda não se enquadram.

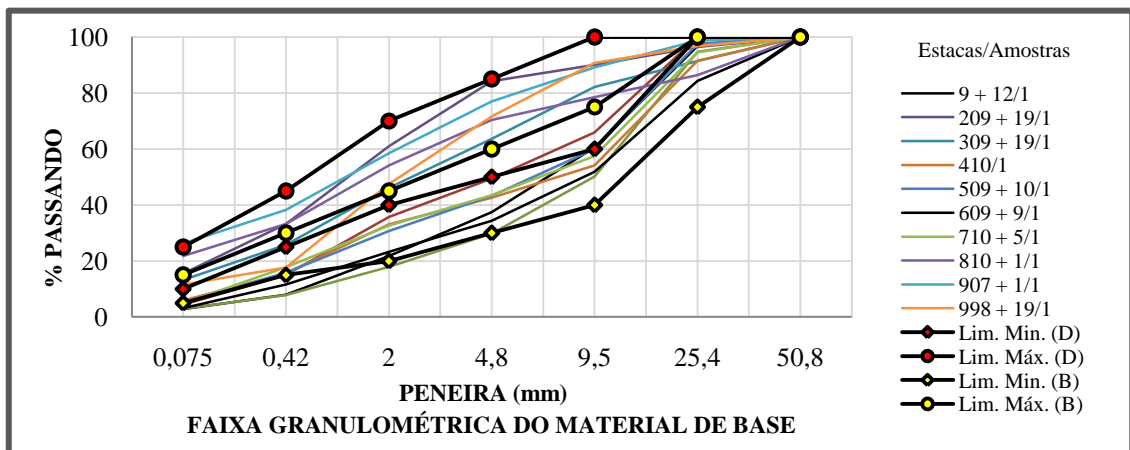


Figura 4.1 - Faixas granulométricas das amostras dos materiais utilizado na base da MG 232 – trecho: Mesquita – S. do Paraíso - Faixas D e B - Norma ES 303 (DNER, 1997).

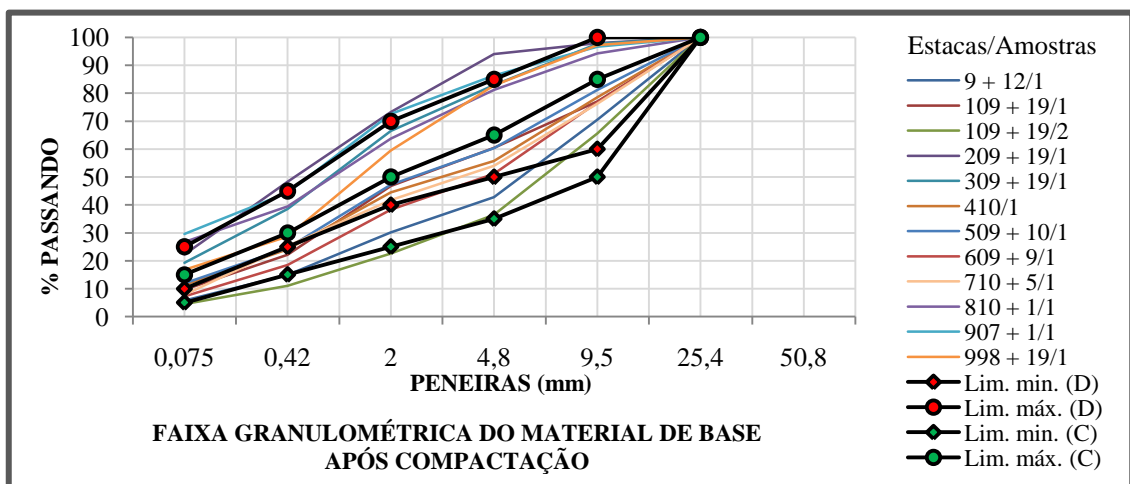


Figura 4.2 - Faixas granulométricas das amostras dos materiais utilizados na base (após processo de compactação) - MG 232 – trecho: Mesquita – S. do Paraíso - Faixas D e C – Norma ES 303 (DNER, 1997).

Ao analisar-se o estudo granulométrico da escória de aciaria antes da compactação para os ensaio de ISC (Figura 4.3), material utilizado na camada de base do trecho rodoviário que interliga as cidades de Mesquita a Santana do Paraíso, conforme já exposto, depara-se com um material ligeiramente mais graúdo, faixa B do DNER e sequencialmente, após sofrer a compactação (Figura 4.4) se ajusta na faixa C do DNER. Esta alteração granulométrica é justificada, pois o material ao ser compactado (durante a execução da obra e também pela compactação do ensaio de ISC) fica submetido a uma elevada energia, pois foi duplamente compactado, levando-o a um processo de degradação e quebra, assim, conseqüentemente ao ser analisado posteriormente, o material tende a se enquadrar em uma faixa mais fechada.

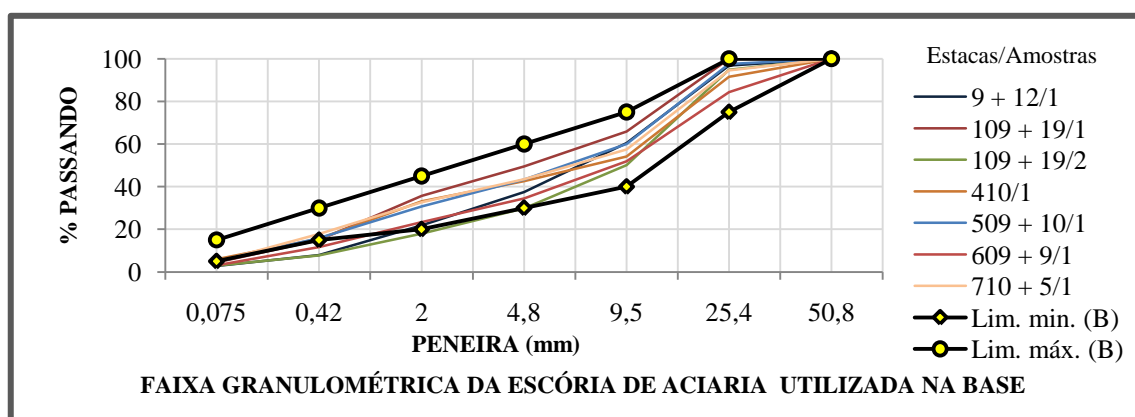


Figura 4.3 – Granulometria representativa às amostras da escória de aciaria pura e com adição de 20% de argila utilizada para confecção da base da MG 232 – trecho: Mesquita – Santana do Paraíso - FAIXA B – Norma ES 303 (DNER, 1997).

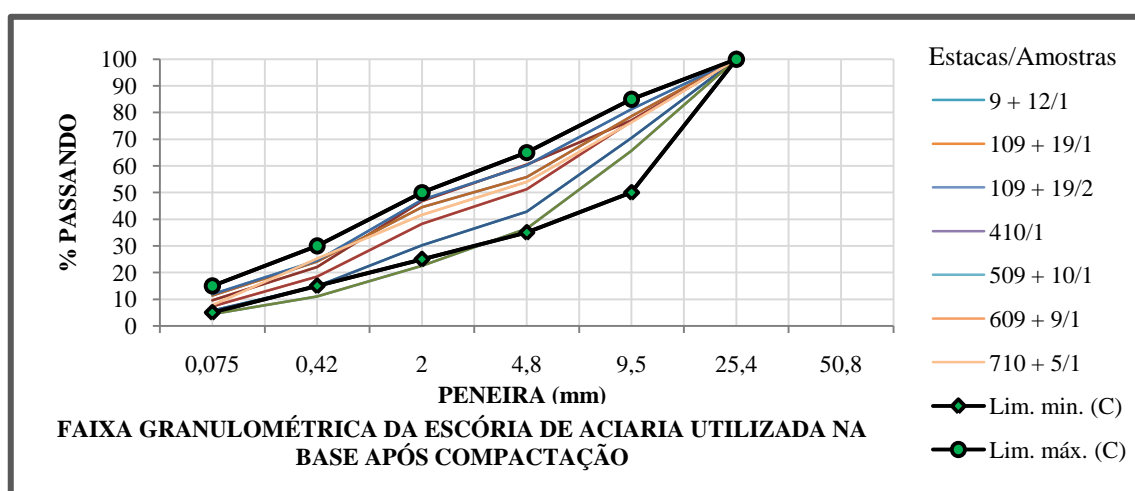


Figura 4.4 - Granulometria representativa, após compactação - amostras da escória de aciaria pura e com adição de 20% de argila utilizada para confecção da base da MG 232 – trecho: Mesquita – Santana do Paraíso - FAIXA C – ES 303 (DNER, 1997).

Com referencia ao limite de liquidez (w_L) e índice de plasticidade (I_P) do material de base, também ocorre algumas divergências entre a escória de aciaria e o cascalho. O cascalho ficou muito no limite de aceitação da norma ES 303 (DNER, 1997), em algumas amostras, como a da estaca 810 + 1 (A-2-6), os limites foram extrapolados, inclusive quanto ao índice de grupo (IG) com valores fora da especificação, entretanto as demais amostragens apresentaram IG excelente. A proporção granulométrica do material passante na peneira 200 e a expansão - ME 049 (DNER, 1994) conforme especifica a norma ES 303 (DNER, 1997), foram atendidos pelos materiais utilizados para confecção da base em estudo, o cascalho e a escória de aciaria pura e com adição de argila.

O ISC "Índice de Suporte Califórnia" do material de base, tanto do cascalho, quanto da escória de aciaria (pura e com adição de argila), atendem a norma do DNER com ISC > 80% portanto apto para rodovias com demanda de tráfego $N > 5 \times 10^6$, somente em uma amostra da base em cascalho (AM-1 - Estaca: 810 + 1) apresentou um ISC igual a 60%, portanto, próprio para rodovias com demanda $N \leq 5 \times 10^6$. O número "N" calculado para o ano de 2011, utilizando os parâmetros do USACE "United States Army Corps of Engineers" para esta rodovia, ora em estudo, será de $1,03 \times 10^5$ e para o ano de 2020 o "N" estará no patamar de $1,18 \times 10^6$, utilizando-se os parâmetros da AASHTO "Association of State Highway and Transportation of Officials" o número "N" para o ano de 2011 estará em $6,83 \times 10^4$ e para o ano de 2020, será igual a $7,82 \times 10^5$ portanto ambas projeções demonstram que atualmente, e mesmo no decorrer de dez anos, " a rodovia esta e estará em conformidade com a norma ES 303 (DNER, 1997) quanto a esta especificação normativa, referente aos fatores veículo, clima e pista que redundará no número "N".

Observar-se pela Tabela 4.3 os valores da densidade real do agregado miúdo, a expansão CBR "California Bearing Ratio" e também os resultados do ensaio de ISC "Índice de Suporte Califórnia" referentes aos materiais (escória de aciaria pura e com 20% de argila, cascalho e a argila) conforme amostras coletas, in loco na MG-232, no já referido trecho rodoviário da MG-232.

Tabela 4.3 – Estudos geotécnicos dos solos e da escória de aciaria – Resultados de densidade real do agregado miúdo, expansão CBR e ISC - Rodovia MG 232 - Mesquita – Santana do Paraíso (DER/MG, 2009).

ESTUDOS GEOTÉCNICOS - RODOVIA MG 232 – MESQUITA – SANTANA DO PARAÍSO												
REG.	FUR.	EST.	POS.	PROF. (m)		γ	COMPACTAÇÃO			EXP. (%)	ISC (%)	
				Inicial	Final		N. de Golpes	w _{ot} (%)	DENS. (kg/m ³)			
AM-1	1	9+12	LD	0,06	0,23	2,47	59	5,1	2567	-0,14	240,0	
AM-2	1		LD	0,23	0,42	2,82	29	6,6	2254	-0,02	150,5	
AM-3	1		LD	0,42	0,57	2,72	13	12,8	1942	0,00	18,0	
AM-1	2	109+19	LE	0,08	0,29	3,00	59	9,0	2350	-0,17	180,0	
AM-2	2		LE	0,32	0,53	3,06	59	5,8	2510	-0,21	349,1	
AM-3	2		LE	0,53	0,72	2,88	29	7,8	2235	0,02	184,5	
AM-4	2		LE	0,72	0,88	2,71	13	19,2	1660	-0,47	11,8	
AM-1	3	209+19	LD	0,04	0,20	3,05	59	7,7	2245	-0,02	109,0	
AM-2	3		LD	0,20	0,30	2,81	29	6,5	2160	0,00	129,8	
AM-3	3		LD	0,30	0,47	2,70	13	15,3	1792	-0,22	19,5	
AM-1	4	309+19	LD	0,05	0,26	2,68	59	7,0	2190	0,08	90,0	
AM-2	4		LD	0,26	0,39	2,72	29	6,5	2124	-0,05	155,8	
AM-3	4		LD	0,39	0,56	2,67	13	16,4	1746	-0,17	22,2	
AM-1	5	410	LD	0,03	0,20	2,91	59	10,1	2252	-0,04	270,0	
AM-2	5		LD	0,20	0,40	2,59	20	14,8	1758	2,00	9,0	
AM-1	6	509+10	LE	0,03	0,26	2,92	59	8,6	2289	-0,08	192,8	
AM-2	6		LE	0,26	0,47	2,66	20	16,4	1761	-0,08	27,3	
AM-1	7	609+09	LD	0,04	0,28	3,08	59	9,9	2418	0,00	205,0	
AM-2	7		LD	0,28	0,48	2,71	20	17,0	1900	-0,36	80,0	
AM-1	8	710+05	LE	0,04	0,23	2,93	59	7,9	2469	0,08	265,7	
AM-2	8		LE	0,23	0,46	2,68	20	14,3	1819	-0,10	27,0	
AM-1	9	810+01	LE	0,03	0,13	2,65	59	6,7	2079	0,05	60,0	
AM-2	9		LE	0,13	0,23	2,70	29	7,2	2040	0,18	36,0	
AM-3	9		LE	0,23	0,45	2,68	13	12,0	1902	-0,20	11,2	
AM-1	10	907+01	LD	0,05	0,17	2,69	59	9,1	2105	0,07	89,0	
AM-2	10		LD	0,17	0,32	2,64	29	8,0	2000	0,08	37,2	
AM-3	10		LD	0,32	0,47	2,67	13	11,3	1943	-0,29	20,6	
AM-1	11	998+19	LD	0,03	0,18	2,69	59	4,8	2162	0,02	179,4	
AM-2	11		LD	0,18	0,28	2,65	29	6,1	1992	0,09	57,2	
AM-3	11		LD	0,28	0,43	2,67	13	24,7	2018	0,10	24,7	

No segmento compreendido entre as estacas: est.: 0 – 362 e 784 – 1000, onde o pavimento é constituído com a camada de sub-base a energia utilizada para compactação do subleito foi a normal. No subtrecho desprovido da sub-base, entre as estacas 362 – 784 utilizou-se a energia internormal, visando melhoria do ISC do subleito. A sub-base foi compactada com a energia intermediária. A base, em todo trecho estudado, foi compactada utilizando a energia modificada. No intervalo: est.: 49 – 192 foi executado novo pavimento sobre o antigo. Apesar do bom comportamento geotécnico apresentado pelo cascalho, a escória mostrou-se em melhores condições, principalmente quanto ao I_p "Índice de Plasticidade" e o ISC "Índice de Suporte

Califórnia". É relevante ressaltar que o DER/MG utiliza a energia de compactação equivalente a normatizada pelo DNER atual DNIT.

4.2 DESGASTE DA ESCÓRIA DE ACIARIA POR ABRASÃO LOS ANGELES

Os resultados obtidos no ensaio de abrasão Los Angeles realizado com a escória de aciaria utilizada na camada de base da MG 232, trecho: Mesquita – Santana do Paraíso estão representados pela Tabela 4.4:

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de abrasão Los Angeles da escória de aciaria – camada de base da MG 232 – trecho: Mesquita – Santana do Paraíso (DER/MG, 2009).

RESULTADOS DO ENSAIO DE ABRASÃO LOS ANGELES – DNER-ME-035/98		
MATERIAL: ESCÓRIA DE ACIARIA	Trecho: MG 232 - Mesquita / Santana do Paraíso	
	ORIGEM: CAMADA DE BASE	
AMOSTRA	RESULTADO (%)	MÉDIA (%)
Amostra 1	18,8	18,7
Amostra 2	19,1	
Amostra 3	18,2	

A escória de aciaria que se utilizou nas camadas de base estudadas, atendem a norma ME 035 (DNER, 1998) obtendo resultados inferiores a 25%, portanto, apropriada para este referido uso.

4.3 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE REAL DO AGREGADO MIÚDO

Os resultados da densidade real do agregado miúdo norma ME 084 (DNER, 1995) estão descritos na Tabela 4.3 (retrorreferenciada). A Tabela 4.5 apresenta os valores médios de densidade real dos agregados miúdos dos materiais discriminados na mesma.

Tabela 4.5 – Média dos resultados dos ensaios de densidade real do agregado miúdo distribuído por camadas e respectivos agregados (DER/MG, 2009).

AGREGADO	Densidade real média do agregado miúdo
Escória de aciaria (base)	2,88
Cascalho (base)	2,75
Escória + 20% de argila (base)	2,94
Cascalho (sub-base)	2,74
Argila (subleito)	2,67

O valor médio constatado para a absorção de água pela escória de aciaria foi de: 1,97% (Tabela 4.6). Este valor da absorção de água atende as normas PRO 263 (DNER, 1994) e ME 262 (DNER, 1994) que estabelecem a absorção de 1,0% a 2,0% em peso.

Tabela 4.6 – Absorção de água pela escória de aciaria (DER/MG, 2009).

Agregado Graúdo (escória de aciaria) # (19,1 - 9,5) mm	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Peso da amostra seca (g)	500,0	502,4	502,5
Peso da amostra saturada (g)	509,4	513,0	512,2
Absorção (%)	1,9	2,1	1,9
Média da absorção de água (%)		1,97	

4.4 ÍNDICE DE FORMA DO AGREGADO - ESCÓRIA DE ACIARIA LD

A escória de aciaria, em estudo, possui ótimas características de cubicidade, conforme constatado por este ensaio, realizado em três amostras, com valor médio de 0,914, próximo ao número um (1), considerado ideal (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Resultado do ensaio de índice de forma do agregado de escória de aciaria – método do DNER-ME 086/94 (DER/MG, 2009).

ÍNDICE DE FORMA DO AGREGADO ESCÓRIA DE ACIARIA (adimensional)		
MATERIAL: Escória de aciaria		ORIGEM: USIMINAS
AMOSTRA	RESULTADOS	MÉDIA DOS RESULTADOS
1	0,874	0,914
2	0,952	
3	0,916	

Quanto ao aspecto da esfericidade, a escória estudada está apta para utilização em sub-bases e bases, inclusive como agregado nas misturas betuminosas, que compõem os revestimentos asfálticos flexíveis. Pois conforme a norma ES 031 (DNIT, 2004) para uso nesta finalidade referida, deverá apresentar um índice de forma superior a 0,5.

4.5 ÍNDICE DE LAMELARIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD

O resultado médio do Índice de lamelaridade da escória de aciaria estudada foi de 16,9%, abaixo do valor máximo especificado, que dependendo do tamanho médio da

fração considerada, varia entre (35% e 40)%; ficando abaixo também do valor máximo adotado pelo DER/MG, que é de 30%, vide Tabela 4.8, o material é apropriado para utilização em pavimentação rodoviária nas camadas de base ou de sub-base, objeto deste estudo. Entretanto, segundo a norma ES 031 (DNIT, 2004) que revisou a norma ES 313 (DNER, 1997) é um material inapropriado, no que se refere à lamelaridade, para utilização como agregado, na confecção de concreto betuminoso, a referida norma, estabelece como valor máximo: 10% de lamelaridade para o agregado.

Tabela 4.8 – Resultado do ensaio do índice de lamelaridade do agregado de escória de aciaria método DER/MG (DER/MG, 2009).

ÍNDICE DE LAMELARIDADE DO AGREGADO ESCÓRIA DE ACIARIA (%)			
AMOSTRA	RESULTADOS	MÉDIA	ESPECIFICAÇÃO DER/MG
1	21,6	16,9	30,0 máximo
2	13,0		
3	16,1		

4.6 DURABILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD

O resultado obtido foi da perda de 0,19%, material de excelente durabilidade, atendendo a norma DNER-EM 262/94, que estabelece para utilização em bases: durabilidade ao sulfato de sódio, cinco ciclos que deverá ser de (0 a 0,5)%. Segundo a norma ES 031 (DNIT, 2004), escória a durabilidade apresentada por estes estudos, perda de 0,19%, poderá ser utilizada, inclusive, como agregado para concreto asfáltico, a norma ES 031 (DNIT, 2004) especifica uma perda máxima de 12%.

4.7 PERCENTUAL DE BETUME DA MISTURA BETUMINOSA (PMF) - REVESTIMENTO DE SUB-TRECHO DA MG 232

Realizou-se o ensaio ME 053 (DNER, 1994) - Determinação do percentual de betume nas misturas betuminosas em amostras da camada de revestimento, executada em PMF "Pré-Misturado a Frio da MG-232 - trecho: Mesquita – Santana do Paraíso, com os resultados discriminados pelo Anexo II e sintetizado pela Tabela 4.9, os quais,

apresentaram taxas de RL-1C maiores que 7,4% em peso sobre o agregado, valor especificado em projeto. O teor de betume encontrado, refere somente ao CAP "Cimento Asfáltico de Petróleo", pois o material betuminoso indicado em projeto foi a emulsão asfáltica RL-1C, levando-se em consideração à água, o valor encontrado para o CAP é próximo de 60% do valor total da emulsão RL- 1C.

Tabela 4.9 – Extração de betume de mistura asfáltica usinada (PMF) (DER/MG, 2009).

EXTRAÇÃO DE BETUME DE MISTURA ASFÁLTICA USINADA - PMF			
RODOVIA: MG 232	TRECHO: MESQUITA – SANTANA DO PARAÍSO	DATA: 16/09/2009	
	REGISTRO: 148	REGISTRO: 147	REGISTRO: 244
APARELHO: ROTAREX	LADO: BD – F 1	LADO: BD – F 3	LADO: BD – F 7
	EST.: 9 + 12	EST.: 209 + 19	EST.: 609 + 9
Prato + Papel (P ₁) *	104,2	103,8	100,6
Prato + Papel + Amostra (P ₂) *	458,6	376,1	595,7
Amostra (P ₂) – (P ₁) *	354,4	272,3	495,7
Prato + Papel + Agregado (P ₃) *	432,5	357,8	557,6
Agregado (P ₃) – (P ₁) *	328,3	254,0	457,0
Ligante (P ₂) – (P ₃) *	26,1	18,3	38,1
Teor de betume (P₂ – P₃/P₂ – P₁)* x 100 (%)	7,4	6,7	7,7
Média RL – 1C (%)	12,3	11,2	12,8

* (P₁, P₂, P₃) = (g)

Também executou-se a densidade aparente do corpo-de-prova *in situ* e a granulometria após extração, como se pode-se observar pelas Tabelas 4.10 e 4.11, respectivamente.

Tabela 4.10 – Densidade aparente do corpo de prova “in situ” (PMF) – MG 232 – Trecho: Mesquita – Santana do Paraíso (DER/MG, 2009).

DENSIDADE DO CORPO-DE-PROVA IN SITU			
RODOVIA: MG 232	TRECHO: MESQUITA – S. DO PARAÍSO	DATA: 16/09/2009	
	REGISTRO: 148	REGISTRO: 147	REGISTRO: 244
AMOSTRA	LADO: BD – F 1	LADO: BD – F 3	LADO: BD – F 7
	ESTACA: 9 + 12	ESTACA: 209 + 19	ESTACA: 609 + 9
Peso do CP ao ar (g)	355,4	274,0	499,2
Peso do CP imerso (g)	196,6	148,0	289,0
Volume do CP (cm ³)	158,8	126,0	230,2
Densidade aparente do CP (g/cm³)	2,238	2,175	2,164

Tabela 4.11 – Granulometria após extração de betume do PMF – MG-232 – Mesquita/Santana do Paraíso (DER/MG/2009).

GRANULOMETRIA APÓS EXTRAÇÃO DE BETUME DO PMF – MG-232											
RODOVIA: MG 232			TRECHO: MESQUITA – SANTANA DO PARAÍSO				DATA: 16/09/2009				
AMOSTRA		REGISTRO: 148 LADO: BD – F 1 ESTACA: 9 + 12			REGISTRO: 147 LADO: BD – F 3 ESTACA: 209 + 19			REGISTRO: 244 LADO: BD – F 7 ESTACA: 609 + 9			
PENEIRAS - ASTM	REGISTRO: 148			REGISTRO: 147			REGISTRO: 244				
	Retido (g)	Passando (g)	% Passando	Retido (g)	Passando (g)	% Passando	Retido (g)	Passando (g)	% Passando		
2”	..	..	..	..	..	..	..	..	..
11/2”	..	..	..	..	..	..	..	..	..
1”	..	..	..	..	..	..	..	..	..
3/4”	..	..	..	..	..	..	..	451,2	100,0
1/2”	..	..	..	..	..	..	20,7	430,5	95,4
3/8”	..	321,0	100,0	..	253,0	100,0	31,4	399,1	88,5		
n. 4	53,0	268,0	83,5	33,2	219,8	86,9	147,1	252,0	55,4		
n. 10	109,2	158,8	49,5	66,0	153,8	60,8	83,2	168,8	37,4		
n. 40	82,5	76,3	23,8	78,4	75,4	29,8	75,3	93,5	20,7		
n. 80	33,3	43,0	13,4	38,8	36,6	14,5	47,4	46,1	10,2		
n. 200	19,6	23,4	7,3	17,8	18,8	7,4	25,9	20,2	4,5		
Fundo	23,4	-	-	18,8	-	-	20,2	-	-		

A faixa para dosagem de PMF "Pré-Misturado a Frio" utilizada pelo DER/MG possui uma composição granulométrica conforme detalhado pela Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Faixa granulométrica do DER/MG para PMF (DER/MG, 2009).

FAIXA GRANULOMÉTRICA ESPECIFICADA PARA PMF – DER/MG												
PENEIRAS	ASTM	2”	11/2”	1”	3/4”	1/2”	3/8”	n. 4	n. 10	n. 40	n. 80	n. 200
		ABNT *	50,8	38,1	25,4	19,1	12,7	9,5	4,8	2,0	0,42	0,18	0,075
FAIXA DER/MG (Limites) (%)		100	100	100	91	81	72	54	38	14	4	1
		100	100	100	100	95	86	64	48	20	10	5

* (mm)

Os resultados da granulometria após extração demonstram que a taxa de agregados referente à estaca 609 + 9 ficou dentro da faixa pré-estabelecida pelo DER/MG, porém nas estacas 9 + 12 e 209 + 19, não se enquadraram totalmente dentro da respectiva faixa, já à amostra da estaca 9 + 12, não atendeu ao valor estipulado para peneira n. 40. A amostra representativa da estaca 209 + 19 também deixou de atender aos valores pré-estipulados para as peneiras n. 40, n. 10 e n. 200 (Figura 4.5), o que de forma parcial,

justifica o acréscimo constatado na taxa de material betuminoso, gerado pelo aumento da área específica do agregado, ocasionada pelo fenômeno da degradação do material pétreo. Expondo a mistura betuminosa a danos precoces devido ao não atendimento à faixa granulométrica estipulada em projeto pelo DER/MG; este revestimento também estará sujeito a possíveis ocorrências de exsudações, pois a taxa de material betuminoso extrapolou o percentual de projeto.

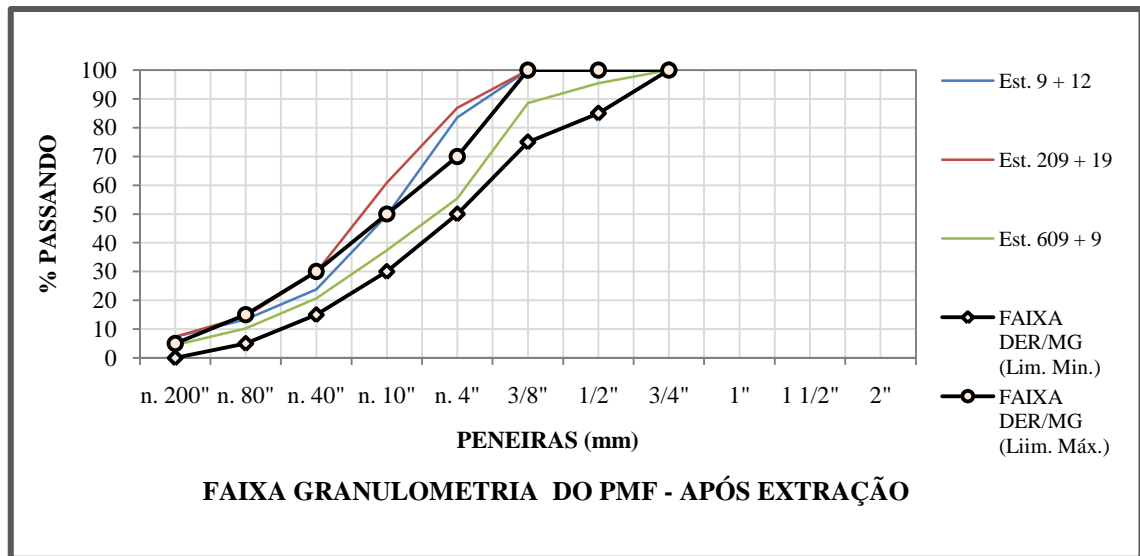


Figura 4.5 – Granulometria do agregado utilizado para confecção do PMF, revestimento de subtrecho da MG 232 – trecho: Mesquita – Santana do Paraíso e Faixa granulométrica utilizada pelo DER/MG para PMF (DER/MG, 2009).

4.8 DETERMINAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA PELO MÉTODO PTM-130

Após a determinação da umidade ótima, a massa específica aparente seca máxima ($2,370 \text{ g/cm}^3$) e a umidade ótima (9,6%), os corpos de prova foram preparados conforme prescreve a metodologia PTM-130 "Pensylvania Test Method" (Método de Teste Pensilvânia), método este, adaptado em 1982 pela Divisão de Materiais do DER/MG. Foram realizados dois ensaios, cada um deles com três corpos-de-prova, moldados no dia 02/03/09. Para cada ensaio compactou-se um corpo de prova no ramo saturado, outro na umidade ótima e outro no ramo seco, com os resultados discriminados pelo Anexo III e compendiados através da Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Resultados do ensaio PTM-130 - Determinação da expansibilidade da escória de aciaria LD da USIMINAS - Ipatinga MG - Utilizada na camada de base da Rodovia MG-232 - Trecho: Mesquita / Santana do Paraíso (DER/MG, 2009).

DETERMINAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA – PTM - 130						
Rodovia: MG 232	Trecho: Mesquita – Santana do paraíso					
ENSAIO	01			02		
Corpo de Prova	n. 01	n. 02	n. 03	n. 01	n. 02	n. 03
Número do cilindro	n. 22	n. 86	n. 32	n. 128	n. 127	n. 183
Umidade no ramo saturado %	10,60			10,60		
Umidade ótima %	9,60			9,60		
Umidade no ramo seco %	8,60			8,60		
Condição submersa - Taxa de expansão %	0,71	0,68	0,39	0,57	0,58	0,53
Condição saturada - Taxa de expansão %	- 0,11	- 0,09	0,12	0,01	0,02	0,02
Expansibilidade Total 14 dias %	0,60	0,58	0,51	0,58	0,60	0,55

A taxa de expansão da escória de aciaria LD, proveniente da Usiminas, utilizada pura e com adição de argila, na camada de base do trecho rodoviário em referência, analisada pelo método PTM-130, não ultrapassou o limite máximo de expansão (3,0%) estabelecido pela norma EM 262 (DNER, 1994). A referida escória de aciaria LD, sob o aspecto da expansão, está em habilitada para aplicação em pavimentação rodoviária.

4.9 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO MCT

Os ensaios do solo utilizando-se o método MCT "Miniatura Compactado Tropical" foram realizados pelo laboratório de geotecnia da COPPE/UFRJ, iniciados em 25/05/2009, através de 4 baterias de ensaios, com 5 CP cada, registrados como: MCT 1091, MCT 1092, MCT 1093 e MCT 1094. Os resultados dos ensaios: teor de umidade, moldagem e definição da densidade dos CP, perda por imersão com CP submetidos à energia variável (altura final e definição do Mini-MCV), peso específico em função da umidade, além do número de golpes aplicados, dispostos no Anexo IV embasa a determinação do coeficiente de deformabilidade c' , o coeficiente de compactação d' , e a perda de massa por imersão, Assim sendo, após o cálculo de e' , utilizando-se o nomograma de classificação MCT, também disposto no Anexo IV, definiu-se as características do material do subleito do pavimento da MG-232 em estudo, o qual é composto por um solo laterítico argiloso LG'.

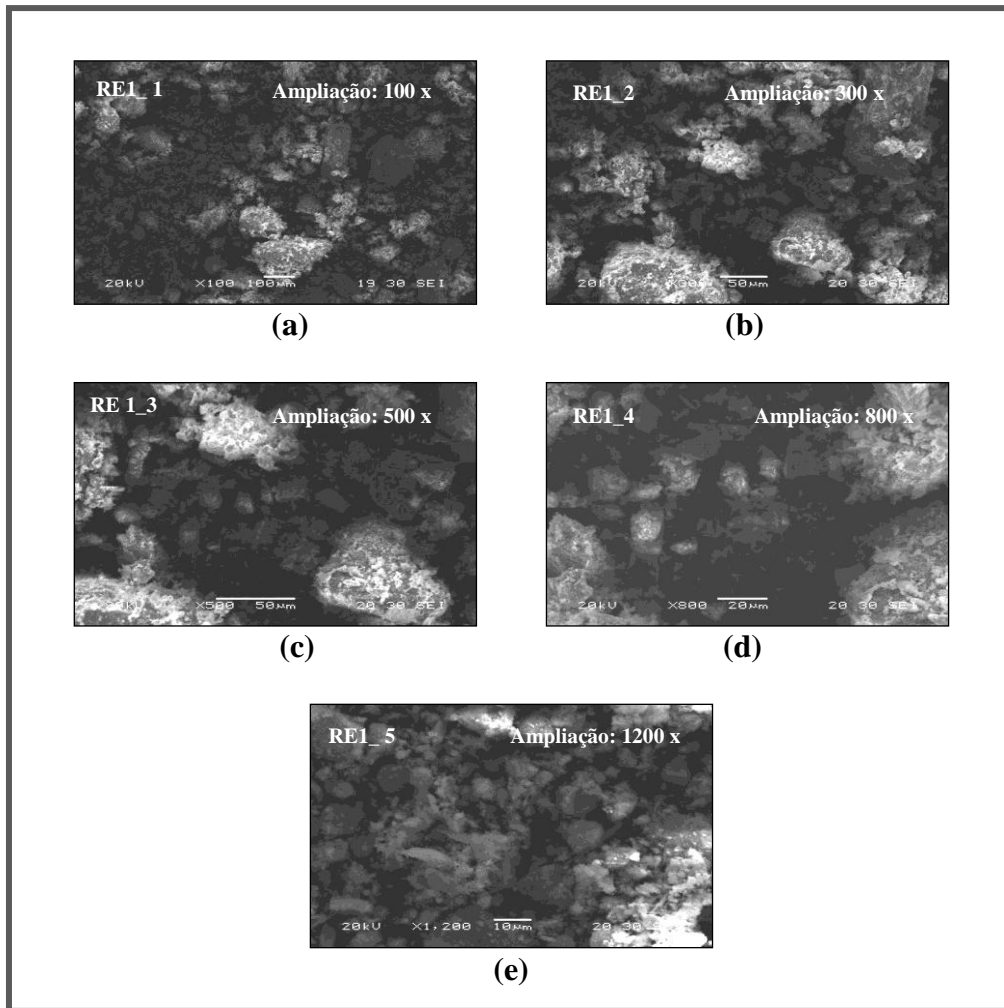


Figura 4.7 - Fotomicrografias - amostras RE1 ampliadas: (a) 100 x; (b) 300 x; (c) 500 x; (d) 800 x; (e) 1200 x (DEGEO/UFOP, 2009).

Pontos analisados - Defasagem da tensão aplicada (20,0 kV) em RE1_4 (Figura 4.8):

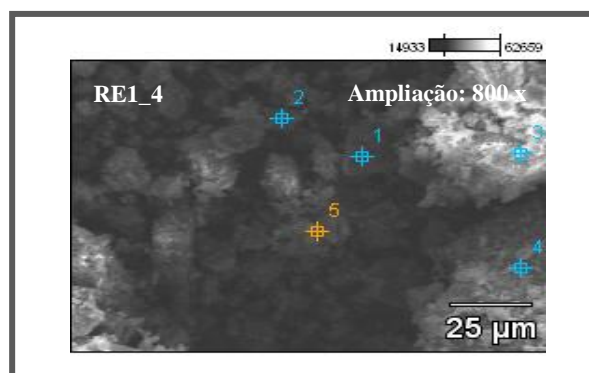


Figura 4.8 – RE1_4 (ddp = 20,0 kV) (DEGEO/UFOP, 2009).

Análise pontual da escória de aciaria da amostra RE1_4 (Figura 4.9):

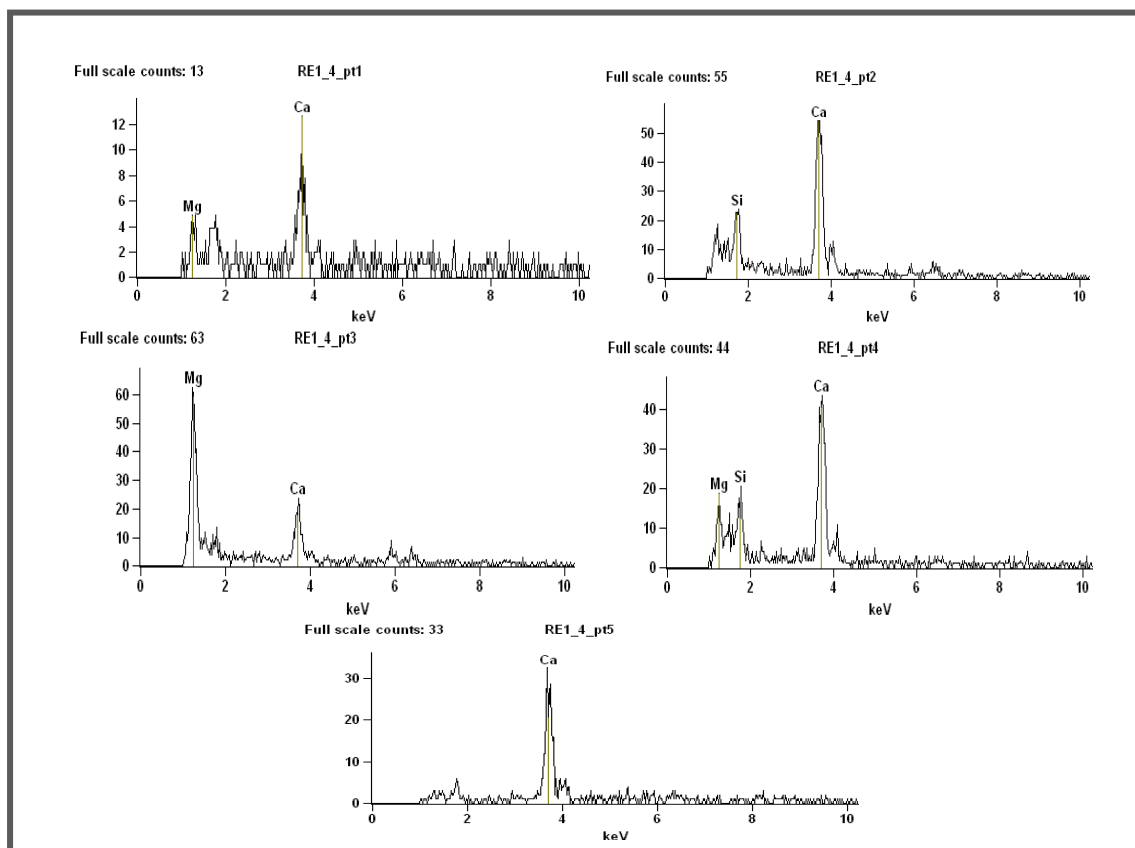


Figura 4.9 - Análise pontual da amostra RE1_4 da escória de aciaria LD (DEGEO/UFOP, 2009).

As Tabelas 4.14 e 4.15 sistematizam a análise química qualitativa da amostra RE1_4 com as suas espécies químicas encontradas e as porcentagens para cada análise pontual efetuada pela Figura 4.9.

Tabela 4.14 – RE1_4 - Weight (peso) % (DEGEO/UFOP, 2009).

ELEM. QUÍMICO (%)	O	Mg	Si	Ca
RE1_4_pt1	31,94 S	18,41	-	49,65
RE1_4_pt2	34,09 S	-	10,52	55,39
RE1_4_pt3	36,93 S	45,37	-	17,70
RE1_4_pt4	34,03 S	9,89	6,93	49,15
RE1_4_pt5	28,53 S	-	-	71,47

Tabela 4.15 – RE1_4 - Compound (composto) % (DEGEO/UFOP, 2009).

COMP. QUÍMICO (%)	MgO	SiO ₂	CaO
RE1_4_pt1	30,53	-	69,47
RE1_4_pt2	-	22,50	77,50
RE1_4_pt3	75,24	-	24,76
RE1_4_pt4	16,41	14,82	68,77
RE1_4_pt5	-	-	100,00

Amostra RE2 e as amplitudes visualizadas (Figura 4.10):

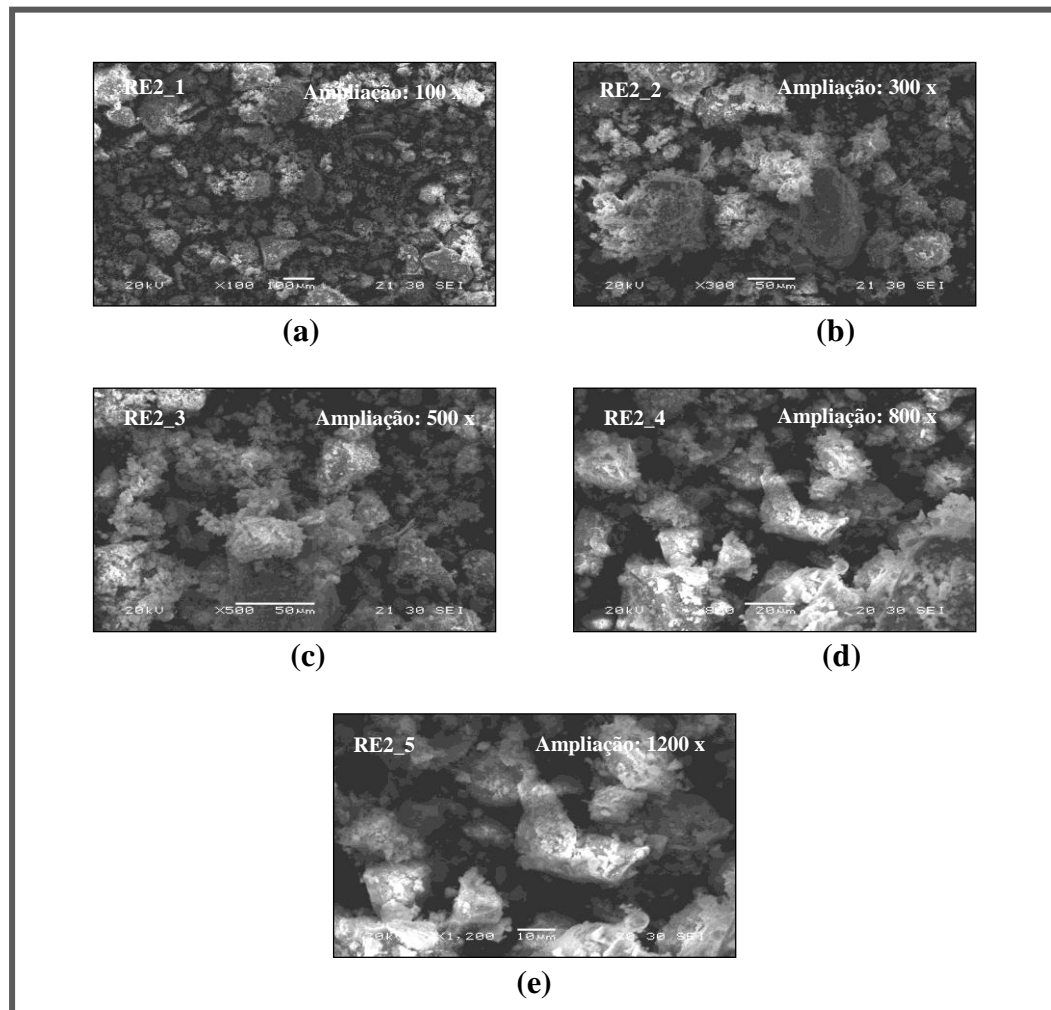


Figura 4.10 - Fotomicrografias - amostras RE2 ampliadas: (a) 100 x; (b) 300 x; (c) 500 x; (d) 800 x; (e) 1200 x (DEGEO/UFOP, 2009).

Pontos analisados - Defasagem da tensão aplicada (20,0 Kv) em RE2_2 (Figura 4.11):

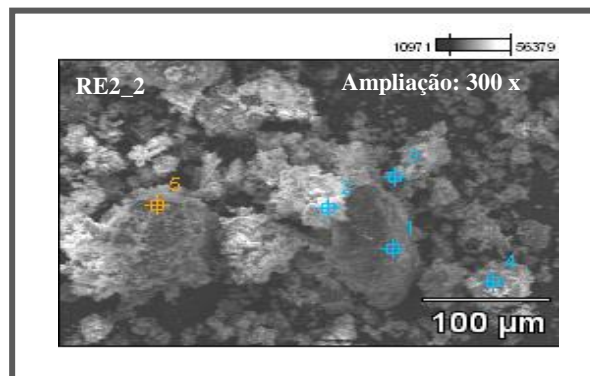


Figura 4.11 – RE2_2 (ddp = 20,0 kV) (DEGEO/UFOP, 2009).

Análise gráfica pontual da escória de aciaria LD, amostra RE2_2 (Figura 4.12):

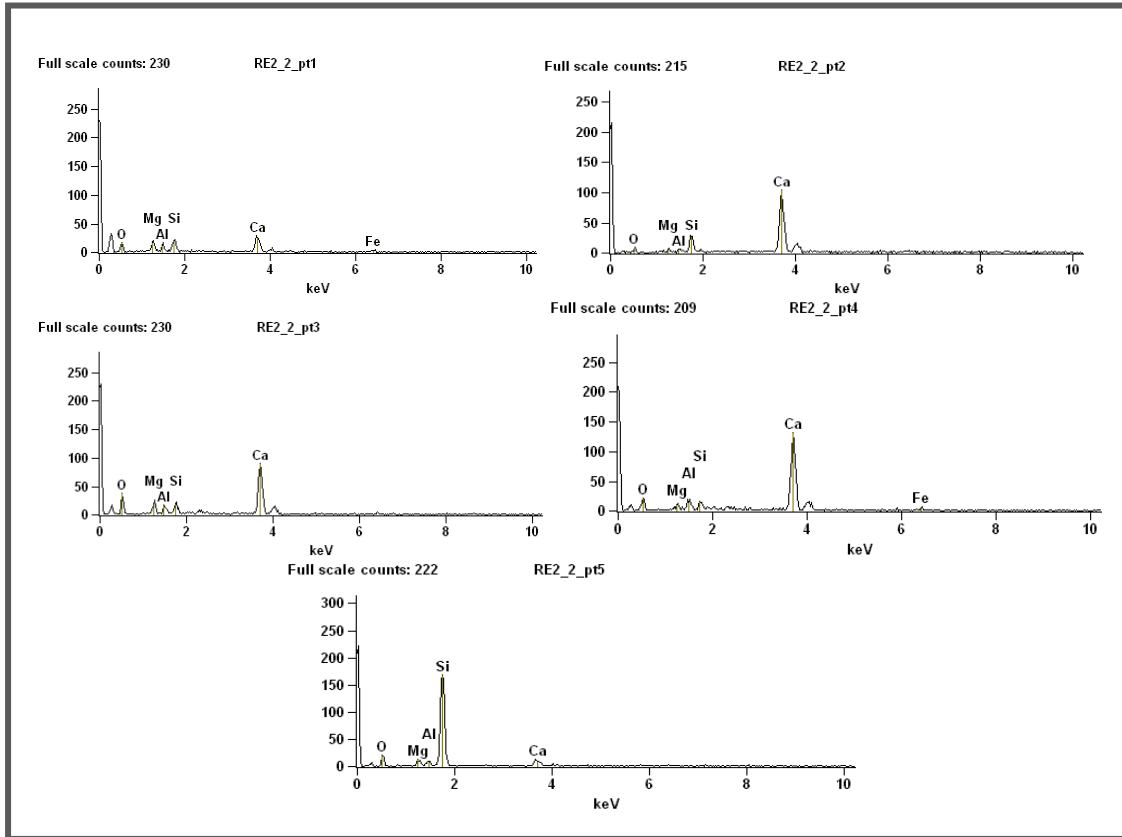


Figura 4.12 - Análise gráfica pontual da amostra RE2_2 da escória de aciaria LD (DEGEO/UFOP, 2009).

Análise química qualitativa da amostra RE2_2 com as suas espécies químicas e porcentagens para cada análise pontual efetuada, Tabelas (4.16 e 4.17):

Tabela 4.16 – RE2_2 - Weight (peso) % (DEGEO/UFOP, 2009).

ELEM. QUÍMICO (%)	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe
RE2_2_pt1	38,57 S	12,53	6,34	10,17	26,98	5,41
RE2_2_pt2	34,38 S	1,77	1,89	9,19	52,77	-
RE2_2_pt3	34,84 S	7,79	5,11	5,81	46,46	-
RE2_2_pt4	32,95 S	2,93	4,98	3,86	50,99	4,30
RE2_2_pt5	50,60 S	2,61	1,77	39,64	5,38	-

Tabela 4.17 – RE2_2 - Compound (composto) % (DEGEO/UFOP, 2009).

COMP. QUÍMICO (%)	..	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃
RE2_2_pt1	..	20,78	11,97	21,76	37,75	7,74
RE2_2_pt2	..	2,93	3,57	19,67	73,83	-
RE2_2_pt3	..	12,91	9,65	12,44	65,00	-
RE2_2_pt4	..	4,85	9,41	8,25	71,34	6,15
RE2_2_pt5	..	4,32	3,34	84,80	7,53	-

Pontos analisados - Defasagem da tensão aplicada (20,0 Kv) RE2_5 (Figura 4.13):

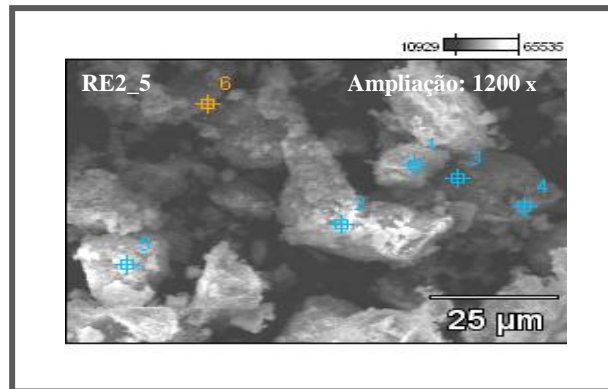


Figura 4.13 – RE2_5 (ddp = 20,0 kV) (DEGEO/UFOP, 2009).

Análise gráfica pontual da escória de aciaria LD, amostra RE2_5 (Figura 4.14):

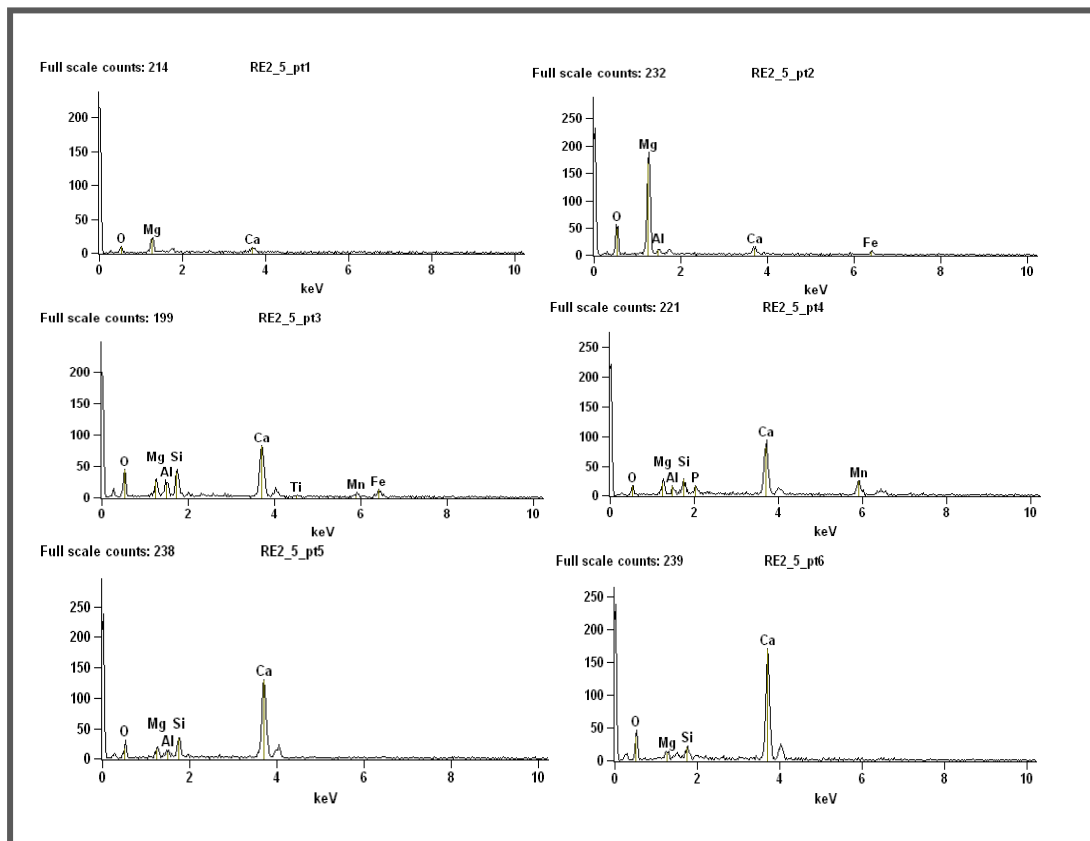


Figura 4.14 - Análise gráfica pontual da amostra RE2_5 da escória de aciaria LD (DEGEO/UFOP, 2009).

Análise química qualitativa da amostra RE2_5, suas espécies químicas e respectivas porcentagens para cada análise pontual efetuada, Tabelas (4.18 e 4.19):

Tabela 4.18 – RE2_5 - Weight (peso) % (DEGEO/UFOP, 2009).

ELEM. QUÍMICO (%)	O	Mg	Al	Si	P	Ca	Ti	Mn	Fe
RE2_5_pt1	37,55 S	48,74	-	-	-	1,71	-	-	-
RE2_5_pt2	39,13 S	48,42	4,41	-	-	3,85	-	-	4,18
RE2_5_pt3	36,97 S	7,12	5,81	9,37	-	26,35	1,53	4,46	8,40
RE2_5_pt4	34,12 S	8,16	2,91	4,84	2,95	29,05	-	17,98	-
RE2_5_pt5	34,27 S	6,39	3,02	6,60	-	49,72	-	-	-
RE2_5_pt6	31,13 S	4,12	-	3,47	-	61,29	-	-	-

Tabela 4.19 – RE2_5 - Compound (composto) % (DEGEO/UFOP, 2009).

COMP. QUÍMICO (%)	..	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
RE2_5_pt1	..	80,82	-	-	-	19,18	-	-	-
RE2_5_pt2	..	80,29	8,34	-	-	5,39	-	-	5,98
RE2_5_pt3	..	11,80	10,97	20,04	-	36,87	2,55	5,76	12,01
RE2_5_pt4	..	13,53	5,50	10,36	6,76	40,64	-	23,21	-
RE2_5_pt5	..	10,60	5,71	14,13	-	69,56	-	-	-
RE2_5_pt6	..	6,82	-	7,42	-	85,75	-	-	-

Amostra RE3, amplitudes visualizadas (Figura 4.15):

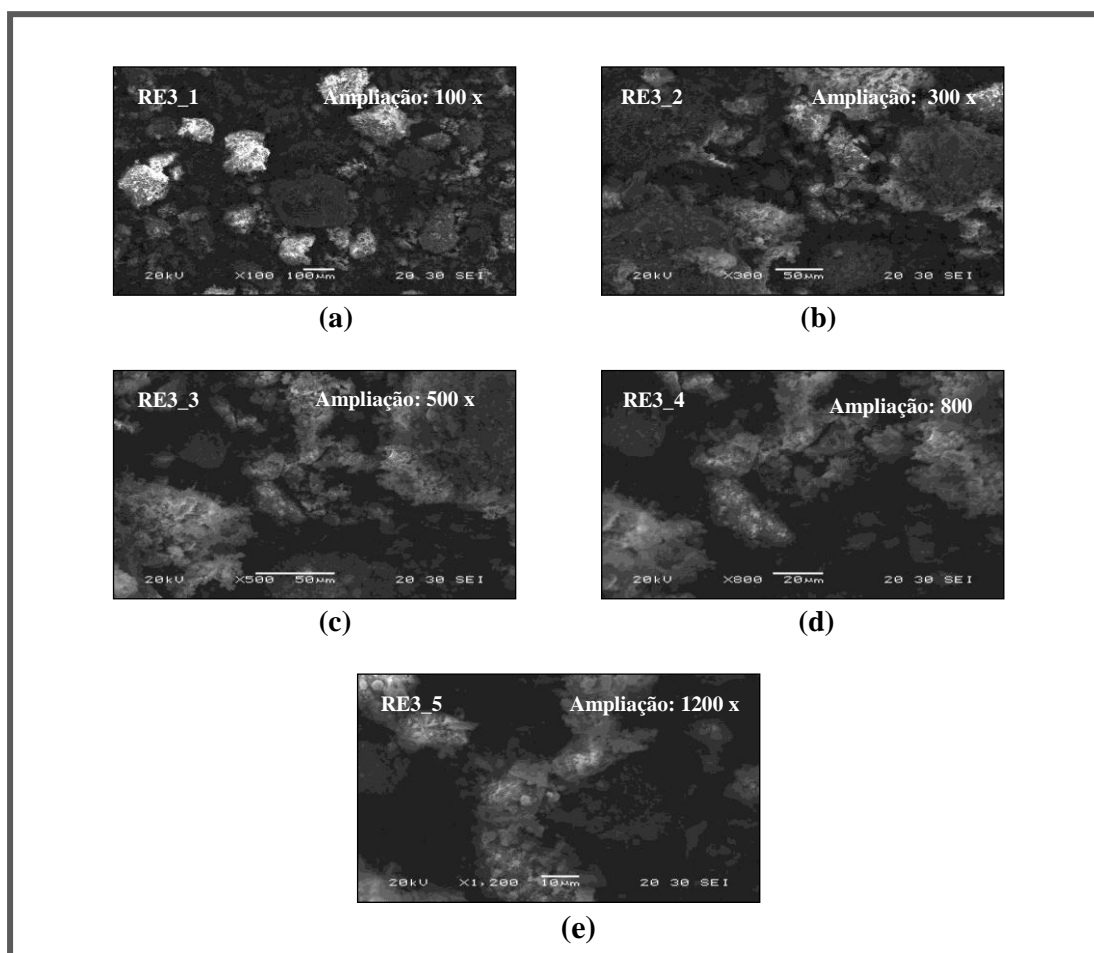


Figura 4.15 - Fotomicrografias Amostra RE3 ampliadas: (a) 100 x; (b) 300 x; (c) 500 x; (d) 800 x; (e) 1200 x (DEGEO/UFOP, 2009).

Pontos analisados - Defasagem da tensão aplicada (20,0 Kv) RE3_2 (Figura 4.16):

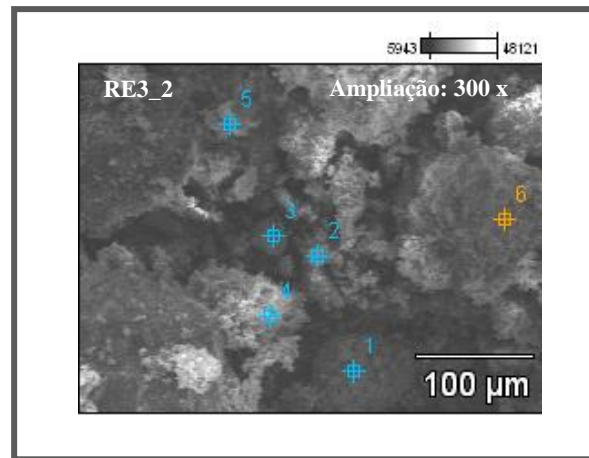


Figura 4.16 – RE3_2 (ddp = 20,0 kV) (DEGEO/UFOP, 2009).

Análise pontual da escória de aciaria LD, amostra RE3_2 (Figura 4.17):

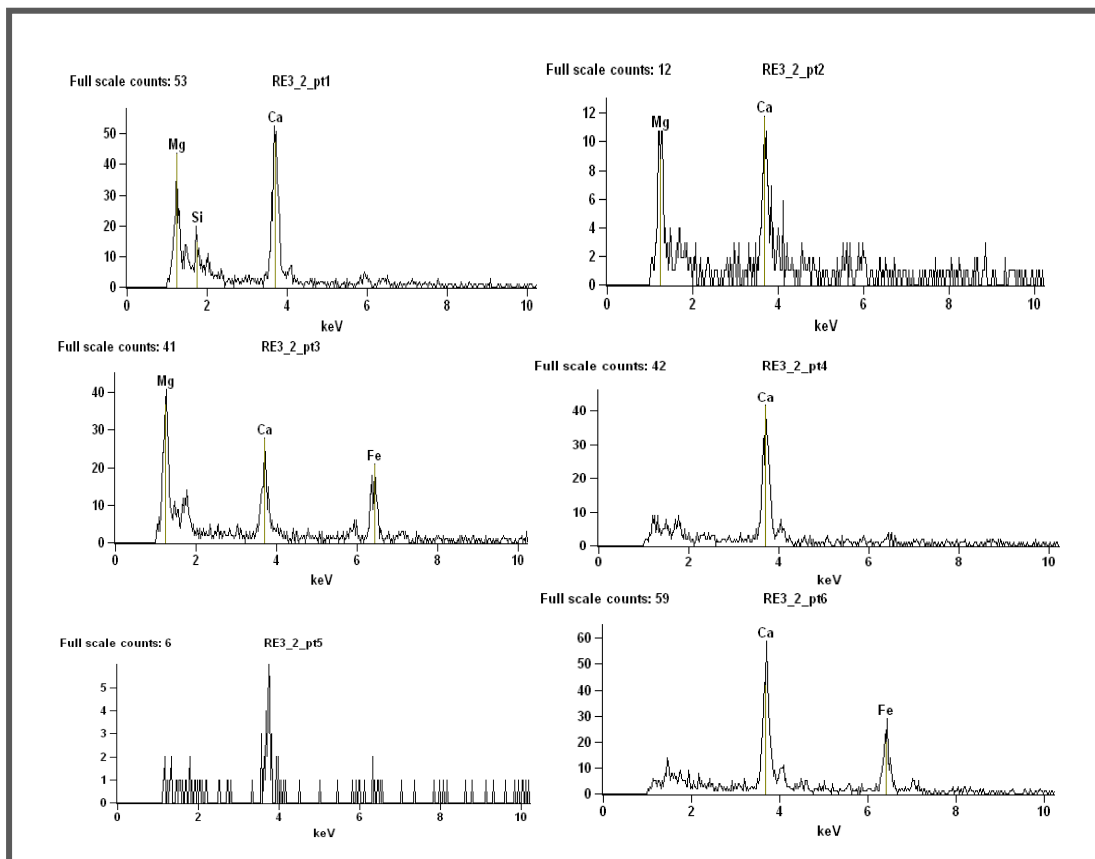


Figura 4.17 - Análise gráfica pontual da amostra RE3_2 da escória de aciaria LD (DEGEO/UFOP, 2009).

Análise química qualitativa da amostra RE3_2 com as suas espécies químicas e porcentagens para cada análise pontual efetuada, Tabelas (4.20 e 4.21):

Tabela 4.20 – RE3_2 - Weight (peso) % (DEGEO/UFOP, 2009).

ELEM. QUÍMICO (%)	O	Mg	Si	Ca	Fe
RE3_2_pt1	35,14 S	19,10	5,81	39,95	-
RE3_2_pt2	34,29 S	31,11	-	34,60	-
RE3_2_pt3	34,14 S	27,16	-	12,25	26,45
RE3_2_pt4	28,53 S	-	-	71,47	-
RE3_2_pt6	29,29 S	-	-	35,69	35,02

Tabela 4.21 – RE3_2 - Compound (composto) % (DEGEO/UFOP, 2009).

COMP. QUÍMICO (%)	..	MgO	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃
RE3_2_pt1	..	31,68	12,43	55,89	-
RE3_2_pt2	..	51,59	-	48,41	-
RE3_2_pt3	..	45,05	-	17,14	37,81
RE3_2_pt4	..	-	-	100,00	-
RE3_2_pt6	..	--	-	49,93	50,07

Pontos analisados - Defasagem da tensão aplicada (20,0 kV) RE3_5 (Figura 4.18):

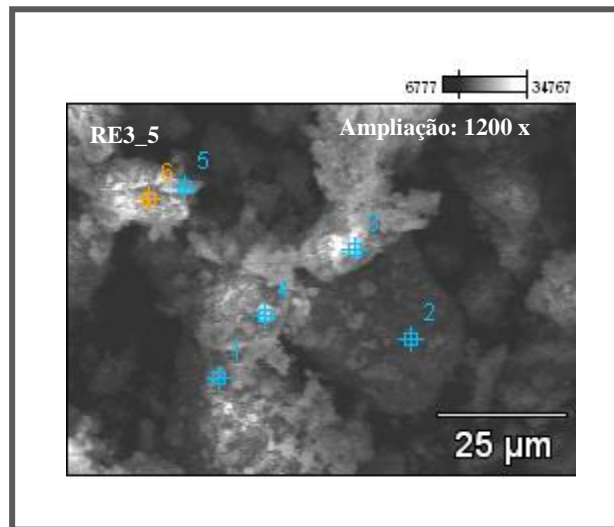


Figura 4.18 – RE3_5 (ddp = 20,0 kV) (DEGEO/UFOP, 2009).

A Figura 4.19 retrata o registro da análise gráfica pontual e, as Tabelas 4.22 e 4.23 sistematizam a análise química qualitativa da amostra da escória de aciaria LD (RE3_5) com as suas espécies químicas encontradas e respectivas porcentagens para cada análise pontual efetuada.

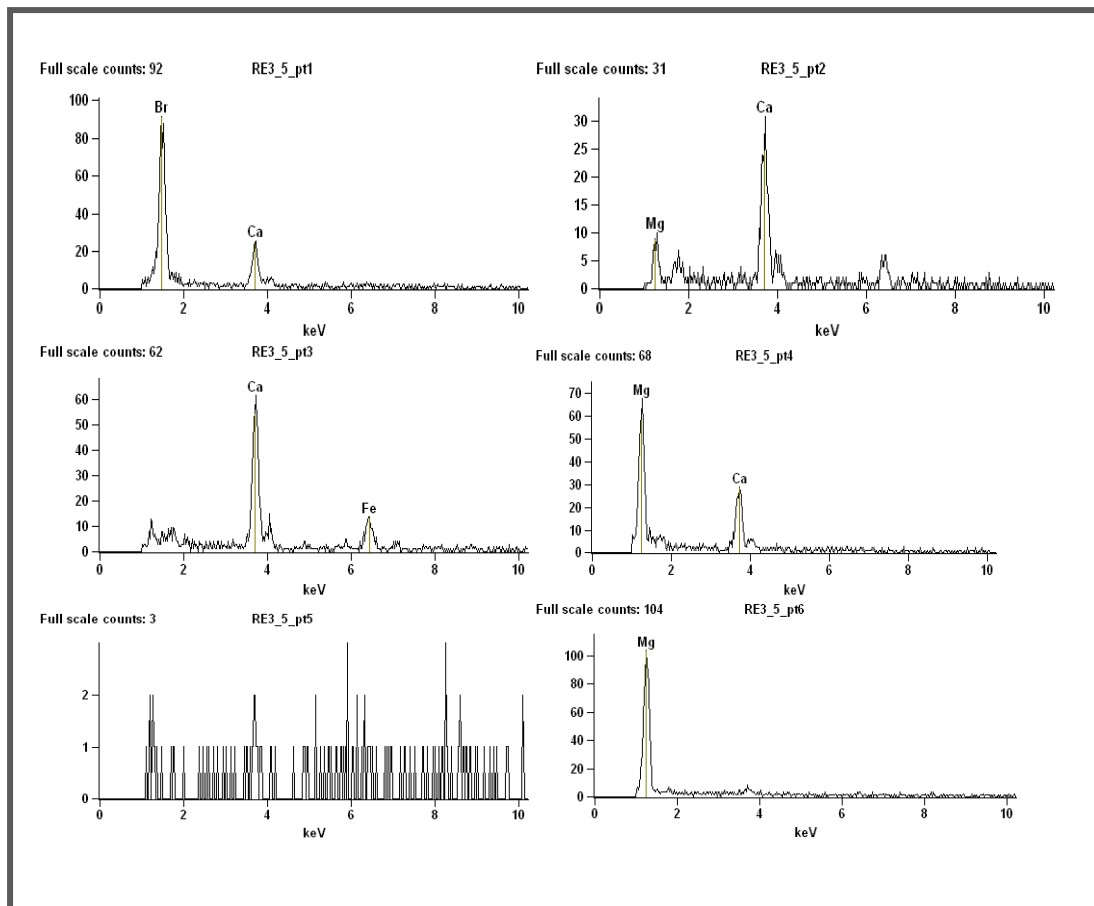


Figura 4.19 - Análise gráfica pontual da amostra RE3_5 da escória de aciaria LD (DEGEO/UFOP, 2009).

Análise química qualitativa da amostra RE3_5 com as suas espécies químicas e porcentagens para cada análise pontual efetuada, Tabelas (4.51 e 4.52):

Tabela 4.22 – R3_5 - Weight (peso) % (DEGEO/UFOP, 2009).

ELEM. QUÍMICO (%)	O	Mg	Ca	Fe	Br
RE3_5_pt1	26,55 S	-	66,50	-	6,95
RE3_5_pt2	31,03 S	13,47	55,50	-	-
RE3_5_pt3	29,12 S	-	43,70	27,18	-
RE3_5_pt4	36,37 S	42,34	21,30	-	-
RE3_5_pt6	39,70 S	60,30	-	-	-

Tabela 4.23 – R3_5 - Compound (composto) % (DEGEO/UFOP, 2009).

COMPOSTO QUÍMICO (%)	..	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Br
RE3_5_pt1	..	-	93,05	-	6,95
RE3_5_pt2	..	22,34	77,66	-	-
RE3_5_pt3	..	-	61,14	38,86	-
RE3_5_pt4	..	70,20	29,80	-	-
RE3_5_pt6	..	100,00	-	-	-

A amostra de escória de aciaria estudada pelo laboratório de geologia da Universidade Federal de Ouro Preto é constituída pelos elementos químicos majoritários: magnésio (Mg), cálcio (Ca), silício (Si) e ferro (Fe) e pelos elementos químicos minoritários: Alumínio (Al), fósforo (P), boro (Br), manganês (Mg) e titânio (Ti). Análise bastante similar aos resultados expressos pela amostra do segundo estudo, com exceção do magnésio que se apresenta em menor escala.

4.11 SEGUNDO ESTUDO QUÍMICO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD

O segundo estudo químico da escória de aciaria utilizando-se a quantidade de 110 g de amostra moída de escória de aciaria, obtida no depósito da USIMINAS em Ipatinga - MG foi realizado pelo LDCM "Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais" do Centro de Tecnologia de Materiais do SENAI "Serviço Nacional da Indústria" localizado na cidade de Criciúma - SC através dos ensaios de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e Espectrometria de Absorção Atômica, relatório de ensaio n. 3153/09 de 23 de junho de 2009 e pela certificação de análise SETEM-E0201/2009 emitido em 22 de julho de 2009 pelo SETEM "Serviço de Tecnologia Mineral" do CNEN/CDTN "Comissão Nacional de Energia Nuclear/Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear localizado na cidade de Belo Horizonte - MG.

4.11.1 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e Espectrometria de Absorção Atômica

Os resultados dos ensaios de determinação e análise química por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e Espectrometria de Absorção Atômica pelo método do pó são os constantes das Tabelas 4.24 e 4.25 e a análise das fases cristalinas da escória de aciaria está representada e discriminada percentualmente pela Tabela 4.26. Na difratometria de Raios-X pelo método do pó levou-se em consideração as intensidades das principais reflexões e as comparações entre as mesmas, avaliando-se as quantidades relativas de seus teores.

Tabela 4.24 - Análise química por espectrometria de fluorescência de raios-x e espectrometria de absorção atômica (LDCM/SENAI/SC, 2009).

ANÁLISE QUÍMICA POR ESP. DE RAIOS-X E ESP. DE ABSORÇÃO ATÔMICA			
ELEMENTOS	TEOR (%)	ELEMENTOS	TEOR (%)
Al ₂ O ₃	5,60	B ₂ O ₃	-
CaO	31,84	Li ₂ O	-
Fe ₂ O ₃	27,62	BaO	0,16
K ₂ O	0,01	Co ₂ O ₃	ND
MgO	6,87	Cr ₂ O ₃	0,18
MnO	3,78	PbO	ND
Na ₂ O	0,12	SrO	< 0,10
P ₂ O ₅	1,28	ZnO	ND
SiO ₂	13,80	ZrO ₂ +HfO ₂	ND
TiO ₂	0,70	Perda ao fogo	0,27

Tabela 4.25 – Análise química qualitativa (LDCM/SENAI/SC, 2009).

ANÁLISE QUÍMICA QUALITATIVA *											
Elementos Majoritários	Si	Ca	Fe	..	..	..	..	..	..	..	..
Elementos em Pequeno Percentual	Mg	Al	S	Mn	..	..	..	..	..	..	..
Elementos Traços	Na	P	Cl	K	Ti	Cr	Cu	Sr	Zr	Nb	Ba

* O somatório dos óxidos não totaliza 100%

Tabela 4.26 – Fase cristalina da escória de aciaria LD (SETEM/CDTN/CNEN, 2009).

FASE CRISTALINA IDENTIFICADA					
Predominante (> 20%)	Wustita	..	..	..	..
Maior (< 10%)	Ankerita	Dolomita	Hematita	Quartzo	Siderita
Menor (< 5%)	Calcita	Ferrita	Magnesita	Magnetita	..
Minoritária (< 3%)	Caolinita	..	..	..	..

Fórmula química das fases cristalinas identificadas: Ankerita: Ca(MgFe)(CO₃)₂ – Calcita: CaCO₃ – Caolinita: Al₂Si₂O₅(OH)₄ – Dolomita: CaMg(CO₃)₂ – Hematita: Fe₂O₃ – Ferrita: CaFe₂O₄ – Magnesita: MgCO₃ – Magnetita: Fe₃O₄ – Quartzo: SiO₂ – Siderita: FeCO₃ – Wustita: FeO (CNEN/CDTN/SETEM-E0201, 2009).

Os ensaios realizados, tanto pelo 1º estudo químico da escória de aciaria, quanto pelo 2º, demonstram preponderância do óxido de ferro (Wustita), óxido de cálcio, óxido de magnésio, dióxido de silício e, óxido de Manganês, composição própria da escória de aciaria LD, com baixa incidência de metais pesados e um reduzido percentual de perda ao fogo.

4.12 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM MISTURAS BETUMINOSAS - REVESTIMENTO SUBTRECHO MG 232 (PMF)

Os resultados da Resistência à Tração Estática Máxima (σ_R) para o PMF "Pré-Misturado a Frio", ensaio ME 138 (DNER, 1994) apresentou a média de 0,980 MPa (Tabela 4.27), satisfatório para o PMF. Como ilustração, o valor de σ_R deste PMF foi superior ao σ_R encontrado para o CBUQ "Concreto Betuminoso Usinado a Quente" e próximo à σ_R do SMA "Stone Mastic Asphalt", ambos, executados com material pétreo de origem granítica, conforme os dados apresentados por ANTUNES et al. (2009) na 16ª RPU/BH "Reunião de pavimentação Urbana, realizada em Belo Horizonte - MG.

Tabela 4.27 - Resistência à tração em misturas betuminosas (COPPE/UFRJ, 2009).

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM MISTURAS BETUMINOSAS						
Amostra: (PMF - após o ensaio de MR)				Protocolo: COPPE/UFRJ - 30-09		
Data: 23/06/2009		Constante do anel dinamométrico: 20,27 N/divisão			25 °C *	
N. do CP	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Leitura do anel (div.)	Carga aplicada (N)	σ_R (Resistência à tração estática máxima) (Mpa)	σ_R médio (Mpa)
11564	6,08	9,89	249	5047	0,52	0,980
11565	3,44	9,92	170	3446	0,63	
11566	4,57	9,97	457	9263	1,27	
11567	4,16	10,00	361	7317	1,10	
11568	4,34	9,94	392	7946	1,15	
11569	4,68	9,96	439	8899	1,19	

* Temperatura ambiente

4.13 MÓDULO DE RESILIÊNCIA DOS SOLOS E DA ESCÓRIA DE ACIARIA - MG-232 - AMOSTRAS EXTRAÍDAS IN LOCO

Os resultados dos MR e dos ensaios Triaxiais Dinâmicos com as amostras extraídas in loco na MG-232 - alíneas: a - h, estão dispostos no Anexo V e na Tabela 4.28:

- CP (1089) = Furo n. 6 = estaca: 509 +10 E = (base - escória com 20% de argila);
- CP (1090) = Furo n. 8 = estaca: 710 + 5 E = (base - escória pura);
- CP (1091) = Furo n. 1 = estaca: 09 +12 D = (subleito - argila);
- CP (1092) = Furo n. 4 = estaca: 309 +19 D = (subleito - argila);
- CP (1093) = Furo n. 8 = estaca: 710 + 5 E = (subleito - argila);
- CP (1094) = Furo n. 6 = estaca: 509 + 10 E = (subleito - argila);
- CP (1095) = Furo n. 4 = estaca 309 + 19 D = (base - cascalho);

h) CP (1096) = Furo n. 11 = estaca 998 + 19 D = (sub-base - cascalho).

Tabela 4.28 – Modulo de resiliência em solos - Ensaio triaxial dinâmico (COPPE/UFRJ, 2009).

MODULO DE RESILIÊNCIA EM SOLO - ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO									
RODOVIA: MG 232		TRECHO: MESQUITA – SANTANA DO PARAÍSO							
ENERGIA		Modif.	Modif.	Normal	Normal	Internorm.	Internorm.	Modif.	Intermed.
σ_3	σ_d	NÚMERO DO CORPO DE PROVA (20 x 10) mm							
(Mpa)	(Mpa)	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096
MÓDULO RESILIENTE (MPa)									
0,021	0,021	376	..	370	498	339	367	311	253
0,021	0,041	344	816	240	326	242	232	267	226
0,021	0,062	263	372	231	307	205	278	253	207
0,034	0,034	562	..	355	578	289	429	393	387
0,034	0,069	299	384	277	361	221	282	335	251
0,034	0,103	267	300	186	224	132	224	263	214
0,051	0,051	541	745	226	489	400	389	381	344
0,051	0,103	307	327	259	267	174	237	272	253
0,051	0,155	290	320	216	222	152	169	276	233
0,069	0,069	510	452	272	337	259	304	318	351
0,069	0,137	324	369	250	241	160	193	261	270
0,069	0,206	343	380	232	190	157	151	284	261
0,103	0,103	516	578	354	345	278	268	300	373
0,103	0,206	427	474	259	218	183	166	280	317
0,103	0,309	473	514	267	197	171	145	323	320
0,137	0,137	612	700	325	322	289	245	323	420
0,137	0,275	557	610	304	225	202	171	329	377
0,137	0,412	577	632	293	196	188	146	358	367
Def. Cond.**		705	764	2805	1758	2988	2516	1567	1186
Def. Total**		838	848	3113	2210	3461	3177	1665	1602
Alt. Final CP*		1992	1991	1969	1978	1965	1968	1983	1984

* (0,1 mm)

** (0,001 mm)

Os MR $f(\sigma_3 \times \sigma_d)$ MPa - amostras da MG 232, trecho: Mesquita/Santana do Paraíso, demonstram que a escória de aciaria pura e com adição de argila (camada de base), respectivamente, apresentam valores expressivos para MR, já o cascalho utilizado na camada de sub-base e na camada de base apresentam valores de módulos de resiliência próximos ao do subleito (material laterítico).

A escória de aciaria, além da boa performance no MR demonstrou possuir excelente suporte, submetida a elevadas energias, durante o ensaio Triaxial Dinâmico, não atingiu nem 1 mm de deformação total do CP.

4.14 MÓDULO DE RESILIÊNCIA EM MISTURA BETUMINOSA – ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL (REVESTIMENTO EM PMF)

Os resultados do MR do PMF obtidos através do ensaio de Compressão Diametral, (Anexo VI) realizado em amostras extraídas da camada de revestimento deste subtrecho estudado (Tabela 4.29) variam entre (1.630 e 4.880) MPa, com média de 3.456 MPa. Valor apropriado para este tipo de mistura betuminosa, confeccionada com a utilização de emulsão asfáltica RL-1C, apresentando um resultado médio próximo dos MR das misturas betuminosas convencionais, confeccionadas a quente, em alguns casos, até superior, como também pode-se observar pelo já referido estudo, efetuado por Antunes e outros (2009), onde o CBUQ "Concreto Betuminoso Usinado a Quente" e o SMA "Stone Mastic Asphalt", ambos, confeccionados com material pétreo de origem granítica, apresentam MR inferiores ao do PMF deste estudo.

Tabela 4.29 – Resultados do ensaio de compressão diametral (COPPE/UFRJ, 2009).

MODULO DE RESILIÊNCIA - PMF - ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL							
MG 232			TRECHO: MESQUITA – SANTANA DO PARAÍSO				
N. CP	Altura CP (cm)	Diâmetro CP (cm)	Ciclo	Força (N)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	Média MR (MPa)
11564	6,08	9,89	1	617	0,002462	2326	
11564	6,08	9,89	2	617	0,002211	2591	
11564	6,08	9,89	3	617	0,002292	2500	2472
11564R	6,08	9,89	1	912	0,005429	1570	
11564R	6,08	9,89	2	912	0,004874	1749	
11564R	6,08	9,89	3	912	0,005427	1570	1630
11565	3,44	9,92	1	912	0,004811	3131	
11565	3,44	9,92	2	912	0,004987	3020	
11565	3,44	9,92	3	912	0,004910	3068	3073
11566	4,57	9,97	1	1210	0,003189	4722	
11566	4,57	9,97	2	1210	0,003085	4880	
11566	4,57	9,97	3	1210	0,003132	4807	4803
11567	4,16	10,00	1	1808	0,006246	3956	
11567	4,16	10,00	2	1808	0,006400	3861	
11567	4,16	10,00	3	1808	0,006239	3961	3926
11568	4,34	9,94	1	2107	0,005664	4873	
11568	4,34	9,94	2	2107	0,005581	4945	
11568	4,34	9,94	3	2107	0,005725	4821	4880
11569	4,68	9,96	1	912	0,003600	3075	
11569	4,68	9,96	2	912	0,002705	4093	
11569	4,68	9,96	3	912	0,003615	3063	3410
Média final dos módulos de resiliência (MR)							3456

4.15 RETROANÁLISE – MG-232 - TRECHO: MESQUITA - S. DO PARAÍSO

Os levantamentos das deflexões no pavimento (Anexo VII) e os raios de curvaturas (Anexo VIII) do trecho rodoviário em referência, submetido a uma carga de 80,4 kN, foram realizados conforme prescreve a norma ME-024 (DNER, 1994). A seguir estão relacionados os SH e as respectivas deflexões constatadas nas bacias de deformações.

- a) (SH-1) estacas: 0 a 49;
- b) (SH-2) estacas: 49 a 192;
- c) (SH-3) estacas 192 a 362;
- d) (SH-4) estacas: 362 a 533;
- e) (SH-5) estacas: 533 a 784;
- f) (SH-6) estacas 784 a 1000.

A Tabela 4.30 apresenta os resultados médios para as bacias de deflexões.

Tabela 4.30 – Bacias de deformações - MG 232, estacas: 0 a 1000 (DER/MG, 2009).

BACIAS DE DEFORMAÇÕES								
MG-232 – MESQUITA / S. DO PARAÍSO		DISTÂNCIA RADIAL (cm)						
		0	25	50	75	100	125	150
MÉDIA DAS DEFLEXÕES (0,01 mm)								
SH-1 - estacas: 0 a 49	FD	64	49	32	21	15	11	8
	FE	72	48	25	14	9	7	5
SH-2 - estacas: 49 a 192	FD	36	30	23	17	13	11	9
	FE	37	28	20	14	11	8	7
SH-3 - estacas: 192 a 362	FD	86	62	42	30	23	18	14
	FE	61	40	24	16	11	8	7
SH-3 - estacas: 362 a 533	FD	61	46	32	23	17	14	11
	FE	44	34	23	17	13	10	8
SH-4 - estacas: 533 a 784	FD	73	54	36	26	19	15	12
	FE	76	56	38	27	21	16	13
SH-5 - estacas: 784 a 1000	FD	83	61	43	31	23	18	15
	FE	81	60	41	29	22	17	14

Os dados da retroanálise na rodovia MG-232 no trecho Mesquita - Santana do Paraíso, exibindo o percentual de contribuição das camadas na formação da deflexão máxima (D_0) e o percentual de distribuição geral das camadas críticas e os MR obtidos por retroanálise e da base de dados do programa RETRAN5-L estão exibidos pelas Tabelas (4.31 a 4.36) constantes das alíneas (a - f) e pelo Anexo IX.

a) Resultados da retroanálise da MG-232 no SH-1 - Est.: 0 a 49 (Tabela 4.31):

Tabela 4.31 – Retroanálise - Rodovia MG 232: SH-1 – Estacas: 0 a 49 (DER/MG, 2009).

RETROANÁLISE – Rodovia MG 232 - Mesquita/S. do paraíso – SH-1 (Est. 0 a 49)									
SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (PMF + LA)		CAMADA 2 Base (escória)		CAMADA 3 Sub-base (cascalho)		CAMADA 4 Subleito (areia argilosa)		
ESPESSURA (cm)	6,0		17,0		19,0		Infinito		
ESTACAS: 0 – 49	Média MR (MPa)	Coef. Poisson (μ)	Média MR (MPa)	Coef. Poisson (μ)	Média MR (MPa)	Coef. Poisson (μ)	Média MR (MPa)	Coef. Poisson (μ)	
FD	3493	0,34	572	0,40	24	0,40	110	0,45	
FE	3486		305		73		196		
CONTRIBUIÇÃO DAS CAMADAS NA FORMAÇÃO DA DEFLEXÃO MÁXIMA – D _o (%)									
FD	0,0		9,2		38,6		53,2		
FE	0,0		16,5		45,0		38,6		
DISTRIBUIÇÃO GERAL DAS CAMADAS CRÍTICAS (%)									
FD	0,0		0,0		12,5		87,5		
FE	0,0		0,0		62,5		37,5		

a) Resultados da retroanálise da MG 232 no SH-2 - Est.: 49 a 192 (Tabela 4.32):

Tabela 4.32 - Retroanálise - Rodovia MG 232, estacas: 49 a 192 (DER/MG, 2009).

RETRANÁLISE - RODOVIA: MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO										
SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (PMF)		CAMADA 2 Base (escória + 20% de argila)		CAMADA 3 Sub-base (revestimento antigo em PMF)		CAMADA 4 Sub-base (antiga Base de escória + Sub-base de cascalho)		Camada 5 Subleito de argila	
ESPESSURA (cm)	8,0		21,0		3,0		40,0		Infinito	
ESTACAS: 49 - 192	Média MR (MPa)	μ	Média MR (MPa)	μ	Média MR (MPa)	μ	Média MR (MPa)	μ	Média MR (MPa)	μ
FD	2697	0,34	752	0,40	3003	0,34	120	0,40	209	0,45
FE	2494		560		2622		192		259	0,45
CONTRIBUIÇÃO DAS CAMADAS NA FORMAÇÃO DA DEFLEXÃO MÁXIMA D _o (%)										
FD	0,0		10,5		1,8		40,9		49,4	
FE	0,0		14,4		1,1		45,6		40,4	
DISTRIBUIÇÃO GERAL DAS CAMADAS CRÍTICAS (%)										
FD	0,0		0,0		0,0		37,5		62,5	
FE	0,0		0,0		0,0		47,8		52,2	

- b) Resultados da retroanálise da MG 232 no seguimento - SH-3 - Est.: 192 - 362 (Tabela 4.33):

Tabela 4.33 - Retroanálise – Rodovia: MG 232, estacas: 192 a 362 (DER/MG, 2009).

RETROANÁLISE - RODOVIA: MESQUITA - SANTANA DO PARAÍSO									
SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (PMF + LA)		CAMADA 2 Base (cascalho)		CAMADA 3 Sub-base (cascalho)		CAMADA 4 Subleito (areno-siltoso)		
ESPESSURA (cm)	4,0		18,0		12,0		Infinito		
ESTACAS:	Média	Coef. Poisson	Média	Coef. Poisson	Média	Coef. Poisson	Média	Coef. Poisson	
162 - 362	MR (MPa)	(μ)	MR (MPa)	(μ)	MR (MPa)	(μ)	MR (MPa)	(μ)	
FD	2924	0,34	355	0,40	165	0,40	77	0,45	
FE	2823		403		134		154		
CONTRIBUIÇÃO DAS CAMADAS NA FORMAÇÃO DA DEFLEXÃO MÁXIMA – D _o (%)									
FD	0,0		12,3		19,5		68,5		
FE	0,0		16,1		27,6		57,0		
DISTRIBUIÇÃO GERAL DAS CAMADAS CRÍTICAS (%)									
FD	0,0		0,0		0,0		100,0		
FE	0,0		7,1		7,1		85,7		

- c) Resultados da retroanálise da MG 232 no SH-4 - Est.: 362 – 533 (Tabela 4.34):

Tabela 4.34 - Retroanálise – Rodovia: MG 232, estacas: 362 a 533 (DER/MG, 2009).

RETROANÁLISE - RODOVIA: MESQUITA - SANTANA DO PARAÍSO									
SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (TSD + LA E TSD)		CAMADA 2 Base (escória + 20% de argila)		CAMADA 3 Regularização do subleito (argila)		CAMADA 4 Subleito (areno-argiloso)		
ESPESSURA (cm)	3,0		18,0		12,0		Infinito		
ESTACAS:	Média	Coef. Poisson	Média	Coef. Poisson	Média	Coef. Poisson	Média	Coef. Poisson	
362 - 533	MR (MPa)	(μ)	MR (MPa)	(μ)	MR (MPa)	(μ)	MR (MPa)	(μ)	
FD	686	0,34	726	0,40	211	0,44	98	0,45	
FE	686		844		265		147		
CONTRIBUIÇÃO DAS CAMADAS NA FORMAÇÃO DA DEFLEXÃO MÁXIMA – D _o (%)									
FD	0,0		5,4		21,7		74,3		
FE	0,0		2,4		8,8		9,1		
DISTRIBUIÇÃO GERAL DAS CAMADAS CRÍTICAS (%)									
FD	0,0		0,0		0,0		100,0		
FE	0,0		0,0		3,6		96,4		

d) Resultados da retroanálise da MG 232 no SH-5 - Est.: 533 – 784 (Tabela 4.35):

Tabela 4.35 - Retroanálise – Rodovia: MG 232, estacas: 533 a 784 (DER/MG, 2009).

RETROANÁLISE - RODOVIA: MESQUITA - SANTANA DO PARAÍSO									
SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (PMF)		CAMADA 2 Base (escória)		CAMADA 3 Regularização do subleito (argila)		CAMADA 4 Subleito (areno- argiloso)		
ESPESSURA (cm)	4,0		22,0		20,0		Infinito		
ESTACAS:	Média	Coef.	Média	Coef.	Média	Coef.	Média	Coef.	
533 - 784	MR	Poisson	MR	Poisson	MR	Poisson	MR	Poisson	
	(MPa)	(μ)	(MPa)	(μ)	(MPa)	(μ)	(MPa)	(μ)	
FD	2918	0,34	446	0,40	58	0,44	87	0,45	
FE	2860		408		71		86		
CONTRIBUIÇÃO DAS CAMADAS NA FORMAÇÃO DA DEFLEXÃO MÁXIMA – D _o (%)									
FD	0,0		12,7		26,5		61,4		
FE	0,0		13,5		26,0		61,1		
DISTRIBUIÇÃO GERAL DAS CAMADAS CRÍTICAS (%)									
FD	0,0		0,0		0,0		100,0		
FE	0,0		0,0		2,4		97,6		

e) Resultados da retroanálise da MG 232 no SH-6 - Est.: 784 - 1000 (Tabela 4.36):

Tabela 4.36 - Retroanálise – Rodovia: MG 232, estacas: 784 a 1000 (DER/MG, 2009).

RETROANÁLISE - RODOVIA: MESQUITA - SANTANA DO PARAÍSO									
SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (PMF + LA)		CAMADA 2 Base (cascalho)		CAMADA 3 Sub-base (cascalho)		CAMADA 4 Subleito (argila- siltosa)		
ESPESSURA (cm)	4,0		12,0		12,0		Infinito		
ESTACAS:	Média	Coef.	Média	Coef.	Média	Coef.	Média	Coef.	
784 - 1000	MR	Poisson	MR	Poisson	MR	Poisson	MR	Poisson	
	(MPa)	(μ)	(MPa)	(μ)	(MPa)	(μ)	(MPa)	(μ)	
FD	2984	0,34	448	0,40	276	0,40	84	0,45	
FE	3119		601		228		79		
CONTRIBUIÇÃO DAS CAMADAS NA FORMAÇÃO DA DEFLEXÃO MÁXIMA – D _o (%)									
FD	0,0		6,7		14,9		78,9		
FE	0,0		5,6		16,9		78,2		
DISTRIBUIÇÃO GERAL DAS CAMADAS CRÍTICAS (%)									
FD	0,0		0,0		2,9		97,1		
FE	0,0		0,0		0,0		100,0		

Ao correlacionar-se os MR obtidos pela retroanálise com a conjuntura física do pavimento - materiais empregados e as respectivas correlações entre as camadas constituintes da estrutura, corresponderam à expectativa deste estudo. Ratificando os parâmetros utilizados para a realização do dimensionamento do mesmo. Pode-se afirmar o bom funcionamento e conseqüentemente a eficiência mecânica do pavimento, pois a camada de revestimento não concorreu para a formação da deflexão máxima (D_o) em nenhum dos SH estudados. Na distribuição das camadas críticas, o subleito (Figura 4.20) foi a camada que mais contribuiu para a composição da deflexão. Fenômeno este, gerador da fadiga e sucessivamente, decorrendo no trincamento do pavimento. Esta característica, onde o subleito é a camada que mais contribui, é constatada em todos os segmentos deste trecho rodoviário, reduzindo à medida que caminha-se para as camadas mais nobres do pavimento, até o revestimento, que não subsidia de modo nenhum com a deflexão, pois concorre com zero por cento de contribuição, mostrando-se, deste forma, um bom comportamento geotécnico.



Figura 4.20 - Subleito da MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - Estaca 424 (ACERVO TÉCNICO 40ª CRG - DER/MG, 2007).

4.16 PONDERAÇÕES SOBRE OS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA OBTIDOS PELO LABORATÓRIO E OS OBTIDOS PELA RETROANÁLISE

Na análise dos MR das diferidas camadas que compõem o pavimento da MG-232 (Mesquita/Santana do Paraíso) verifica-se em todos os SH analisados, tanto pelo

laboratório, quanto pela retroanálise, um adequado comportamento mecânico da estrutura. Pela comparação dos parâmetros dos estudos mecânicos de retroanálise e da análise laboratorial pode-se verificar que os respectivos módulos de resiliência, constatados pelos citados métodos: análise mecânica laboratorial (Anexo V e Tabela 4.28) - retroanálise (Anexo IX, Tabela 4.37 e Figura 4.21), quando confrontados, apresentam resultados com certas variações, porém não muito discrepantes, seguem as mesmas tendências, para cada tipo de material.

Tabela 4.37 – Módulos de resiliência - Retroanálise (DER/MG, 2009).

MÉDIA DOS MR (RETROANÁLISE) - MG 232 (Mesquita/S. do Paraíso)	
CAMADAS	MR - RETROANÁLISE (MPa)
Revestimento	2980
Base (cascalho)	452
Base (escória pura)	432
Base (escória + 20% de argila)	720
Sub-base	150
Subleito	132

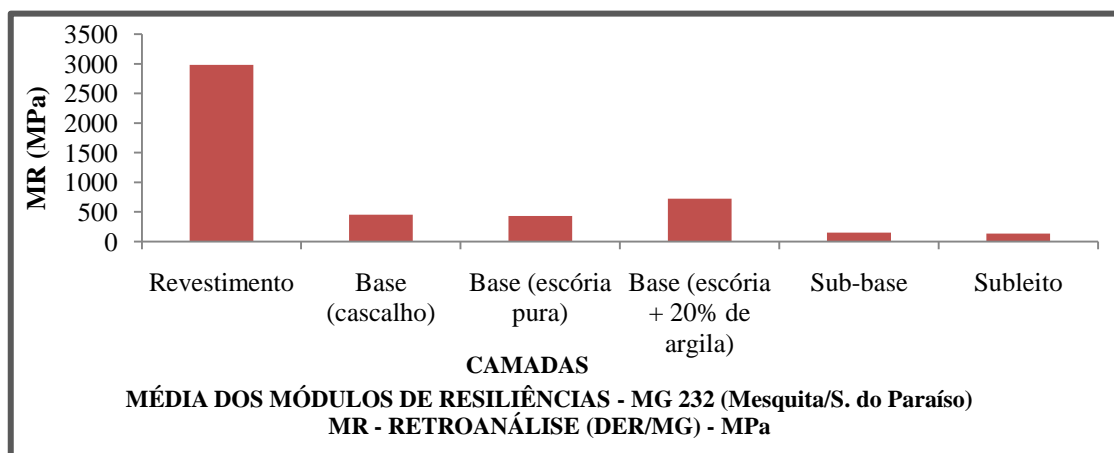


Figura 4.21 –Módulos de resiliência obtidos em campo pela retroanálise (DERMG, 2009).

Esta diferença ocorre por se tratar de estudos independentes, com metodologias distintas, conforme exemplifica ALBERNAZ (2010):

(...) qualquer que seja o método de dimensionamento adotado, tradicional ou mecânico, todo dimensionamento de pavimento é probabilístico, e não determinístico, ou seja, as espessuras dimensionadas e os parâmetros caracterizadores dos materiais não são “exatos” e inserem-se em “faixas de valores prováveis”, pois são determinados por meio de procedimentos com nível

variado de precisão; a imprecisão do levantamento das características gerais das camadas do pavimento e do subleito, tais como: espessuras, características geotécnicas, grau de compactação, teor de umidade, etc. Os furos de sondagem, segundo as normas, devem ser realizados a cada 1 km ou 2 km, considerando-se que os furos de sondagem possuem uma área aproximada de 1,00 m², e que os furos são realizados a cada 1 km, a área do pavimento estudada equivale a 0,014% da área total de uma pista de rolamento com 7 m de largura. As informações sobre as características das camadas do pavimento e do subleito entre dois furos de sondagem são, portanto, completamente desconhecidas. Quanto a imprecisão do levantamento das deflexões reversíveis do pavimento, pode-se concluir que de acordo com a norma DNER-ME 24/94 – Determinação das deflexões no pavimento pela viga Benkelman, que as deflexões devem ser medidas em estações espaçadas de 20 m, alternadamente em relação ao eixo da pista nas mesmas estações do inventário. Os levantamentos deflectométricos feitos segundo essa norma abrangem apenas 15% da área total de uma pista de rolamento com 7 m de largura. As informações sobre as condições deflectométricas do pavimento entre as estações inventariadas, ou seja, em 85% da área do pavimento em estudo são completamente desconhecidas. Outras condicionantes, como umidade e densidade “in situ”, homogeneidade dos materiais, posição relativa dos materiais na estrutura estratificada, espessura das camadas, temperatura ambiente, condições de umidade, presença de horizonte rochoso a poucos metros de profundidade, etc., produzem bacias de deformação diferentes, mesmo que os materiais das camadas do pavimento e do subleito possuam características geotécnicas e geométricas semelhantes ao longo de todo o trecho analisado.

Há que se observar, que neste estudo os materiais ensaiados em laboratório tratam-se de materiais recompactados. Tudo isso contribui para que haja diferenças entre os resultados de campo e de laboratório.

4.17 PROJETO DE REFORÇO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO - MG-232 TRECHO: MESQUITA - SANTANA DO PARAÍSO - VIDA ÚTIL DEZ ANOS

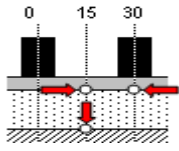
A retroanálise demonstrou que o pavimento estudado, atualmente, apresenta-se em boas condições estruturais. Entretanto para constatar o comportamento do referido pavimento quando submetido as cargas e ao tempo foi provido e implementado o projeto de

dimensionamento do reforço do pavimento para o ano 2020, utilizando-se a retroanálise - programa RETRANS5-L, para uma vida útil de 10 anos. Este estudo visa analisar, prioritariamente, as reações apresentadas pelas diversificadas camadas de bases dos SH analisados da MG-232, executados em cascalho, escória de aciaria LD e escória de aciaria LD com adição 20% de argila. O resultado do dimensionamento efetuado no SH-1, que é composto por uma camada de base executada em escória de aciaria LD sem adição de argila, demonstra que o pavimento apresenta um bom comportamento, não necessitando de reforço estrutural. Em nenhuma estaca constituinte do referido SH foi constatado a necessidade do reforço estrutural (Anexo X, página X.1). Como exemplificação destes dados, obtidos no dimensionamento por retroanálise no SH-1, destacou-se as estacas 1 e 4, que indicam os esforços gerados na estrutura do pavimento e a determinação das espessuras válidas para atender o projeto de vida útil para dez anos, utilizando-se o programa RETRANS5-L - Tabelas (4.38 e 4.39).

Tabela 4.38 – Análise mecânica - Retroanálise – SH-1 - FE - Estaca 1 (DER/MG, 2010).

ANÁLISE MECANÍSTICA - CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN							
Rodovia:	MG-232		Trecho:	MESQUITA /SANTANA DO PARAÍSO			
Subtrecho:	SEGMENTO HOMOGÊNEO SH-1E			Pista:	Simplex	Faixa:	ESQUERDA
Extensão:	980 m		Estacas:	0 - 49			
DETERMINAÇÃO DAS ESPESURAS VÁLIDAS DE RECAPEAMENTO EM CBUQ - RETRANS5-L							
CAMADA	ESPESES. cm	MR (MPa)	POISSON	TIPO DE MATERIAL		ESTACA	
1	3,0 a 30,0	3,08x10 ³	0,35	CBUQ (reforço estrutural)		<p>1</p> <p>Pontos de análise 0 15 30</p> <p>Esforços admissíveis</p>	
2	6,0	3,9x10 ³	0,35	PMF + LA			
3	17,0	148,6	0,40	Escória de aciaria			
4	19,0	19,6	0,40	Cascalho siltoso			
5	Semi-infin.	289,3	0,45	Pedregulho/Areia siltosa			
ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA - PROGRAMA ELSYM5							
ESPESES. CBUQ (recap) (cm)	ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA						
	Horizontal - face inferior do recap (CBUQ)				Vertical - subleito		
	SYX-15 cm (MPa)	EYY-15 cm (MPa)	SYX-30 cm cm/cm	EYY-30 cm cm/cm	SZZ-15 cm (MPa)	EZZ-15 cm cm/cm	
2,5	-0,709	-1,76x10 ⁻⁰⁵	-9,86	-1,73x10 ⁻⁰⁴	-0,0507	-1,21x10 ⁻⁰⁴	
5,0	-0,227	-4,02x10 ⁻⁰⁶	-3,67	-3,70x10 ⁻⁰⁵	-0,0421	-9,80x10 ⁻⁰⁵	
7,5	-0,001	1,76x10 ⁻⁰⁶	-0,81	2,10x10 ⁻⁰⁵	-0,0328	-8,00x10 ⁻⁰⁵	
10,0	0,105	4,22x10 ⁻⁰⁶	0,57	4,60x10 ⁻⁰⁵	-0,0304	-6,70x10 ⁻⁰⁵	
12,5	0,155	5,20x10 ⁻⁰⁶	1,23	5,40x10 ⁻⁰⁵	-0,0262	-5,70x10 ⁻⁰⁵	
15,0	0,175	5,49x10 ⁻⁰⁶	1,52	5,60x10 ⁻⁰⁵	-0,0229	-4,90x10 ⁻⁰⁵	
17,5	0,181	5,49x10 ⁻⁰⁶	1,62	5,40x10 ⁻⁰⁵	-0,0202	-4,20x10 ⁻⁰⁵	
20,0	0,179	5,20x10 ⁻⁰⁶	1,62	5,10x10 ⁻⁰⁵	-0,0178	-3,70x10 ⁻⁰⁵	
22,5	0,173	4,90x10 ⁻⁰⁶	1,57	4,70x10 ⁻⁰⁵	-0,0159	-3,30x10 ⁻⁰⁵	
25,0	0,165	4,61x10 ⁻⁰⁶	1,49	4,40x10 ⁻⁰⁵	-0,0144	-2,90x10 ⁻⁰⁵	
						SYX (σ_x)	
						..	
						EYY (ϵ_x)	
						1,70x10 ⁻⁰⁴	
						SZZ (σ_y)	
						..	
						EZZ (ϵ_y)	
						-4,33x10 ⁻⁰⁴	

Tabela 4.39 – Análise mecânica - Retroanálise – SH-4 - FE - Estaca 1 (DER/MG, 2010).

ANÁLISE MECANÍSTICA - CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN						
Rodovia: MG-232			Trecho: MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO			
Subtrecho:	SEGMENTO HOMOGÊNEO SH-1D			Pista:	Simples	Faixa: DIREITA
Extensão:	980 m		Estacas:	0 - 49		
DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS VÁLIDAS DE RECAPEAMENTO EM CBUQ - RETRANS5-L						
CAMADA	ESPESS. (cm)	MR (MPa)	POISSON	TIPO DE MATERIAL		ESTACA
1	3,0 a 30,0	3,08x10 ³	0,35	CBUQ (reforço estrutural)		<p style="text-align: center;">4</p> <p style="text-align: center;">Pontos de análise</p> 
2	6,0	3,92x10 ³	0,35	PMF + LA		
3	17,0	148,6	0,40	Escória de aciaria		
4	19,0	19,6	0,40	Cascalho siltoso		
5	Semi-infin.	289,3	0,45	Pedregulho/Areia siltosa		
ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA - PROGRAMA ELSYM5						
ESPESS. CBUQ (recap) (cm)	ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA					
	Horizontal - face inferior do recapeamento (CBUQ)				Vertical - subleito	
	SYX-15 cm (MPa)	EYX-15 cm (MPa)	SYX-30 cm (cm/cm)	EYX-30 cm (cm/cm)	SZZ-15 cm (MPa)	EZZ-15 cm (cm/cm)
2,5	-0,485	-1,15x10 ⁻⁵	-7,61	-1.15x10 ⁻⁰⁴	-0,0315	-1,93x10 ⁻⁰⁴
5,0	-0,258	-4,31x10 ⁻⁶	-4,04	-3.90x10 ⁻⁰⁵	-0,0275	-1,66x10 ⁻⁰⁴
7,5	-0,118	-4,90x10 ⁻⁷	-1,99	1.00x10 ⁻⁰⁶	-0,0240	-1,44x10 ⁻⁰⁴
10,0	-0,031	1,57x10 ⁻⁶	-0,79	2.00x10 ⁻⁰⁵	-0,0211	-1,26x10 ⁻⁰⁴
12,5	0,021	2,65x10 ⁻⁶	-0,08	2.90x10 ⁻⁰⁵	-0,0186	-1,10x10 ⁻⁰⁴
15,0	0,053	3,14x10 ⁻⁶	0,33	3.30x10 ⁻⁰⁵	-0,0165	-9,70x10 ⁻⁰⁵
17,5	0,072	3,33x10 ⁻⁶	0,57	3.40x10 ⁻⁰⁵	-0,0149	-8,60x10 ⁻⁰⁵
20,0	0,083	3,43x10 ⁻⁶	0,71	3.30x10 ⁻⁰⁵	-0,0134	-7,70x10 ⁻⁰⁵
22,5	0,088	3,33x10 ⁻⁶	0,79	3.20x10 ⁻⁰⁵	-0,0122	-7,00x10 ⁻⁰⁵
25,0	0,090	3,24x10 ⁻⁶	0,83	3.10x10 ⁻⁰⁵	-0,0112	-6,40x10 ⁻⁰⁵
						Esforços admissíveis
						SYX (σ_x)
						..
						EYX (ϵ_x)
						1,70 x 10 ⁻⁰⁴
						SZZ (σ_v)
						..
						EZZ (ϵ_v)
						-4,33 x 10 ⁻⁰⁴

Neste dimensionamento da MG-232 a escória de aciaria apresentou uma performance satisfatória, mostrando um bom desempenho tanto nos SH onde a camada de base foi executada em escória de aciaria LD sem a mistura de argila, quanto nos outros, com esta referida camada construída em escória de aciaria com adição de 20% de argila (Anexo X) páginas: X.1, X.4, X.5, X.6 e X.7 e Tabelas (4.40, 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 e 4.45) que indicam, respectivamente, os esforços gerados na estrutura do pavimento e a determinação das espessuras válidas para atendimento ao projeto de reforço estrutural - programa RETRANS5-L, nas estacas: 364 (SH-4 - FD), 367 (SH-4 - FE), 535 (SH-5 - FE), 538 (SH-5 - FD), 709 (SH-5 - FE) e 718 (SH-5 - FD). No SH-4 em alguns intervalos, como os das estacas: 370, 394, 406, 424, 436, 454, 460, 463, 487, 514, 520, 517 e no SH-5 estacas: 565, 571, 577, 589, 652, 655, 658, 670, 685, 691, 694, 700, 706, 712, 715 e 718, 724, 733, 754, 772 e 778 necessitam receber reforços de caráter estrutural, porém em espessuras reduzidas, conforme discriminado no Anexo X.

Tabela 4.40 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-4 - FD - Est. 364 (DER/MG, 2010).

ANÁLISE MECANÍSTICA - CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN						
Rodovia: MG-232 - Trecho: MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO - SH-4 - FD - Estacas: 362- 533 - Ext. 3.420 m						
DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS VÁLIDAS DE RECAPEAMENTO EM CBUQ - RETRANS-5-L						
CAMADA	ESPESES. (cm)	MR (MPa)	POISSON	TIPO DE MATERIAL	ESTACA	
1	3,0 a 30,0	3,08x10 ³	0,35	CBUQ (reforço estrutural)		
2	2,0	686,5	0,35	TSD (tratamento superficial duplo)		
3	20,0	926,7	0,40	Escória de aciaria + 20% argila		
4	Semi-infin.	42,2	0,45	Silte/Argila		
ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA - PROGRAMA ELSYM5						
ESPESES. CBUQ (recap) (cm)	ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA					
	Horizontal - face inferior do recap (CBUQ)				Vertical - subleito	
	SYX-15 cm (MPa)	EYX-15 cm (MPa)	SYX-30 cm cm/cm	EYX-30 cm cm/cm	SZZ-15 cm (MPa)	EZZ-15 cm cm/cm
2,5	-0,466	-5,20x10 ⁻⁰⁶	-4,44	-3,90x10 ⁻⁰⁵	-0,0468	-2,15x10 ⁻⁰⁴
5,0	-0,071	-5,78x10 ⁻⁰⁶	1,43	8,70x10 ⁻⁰⁵	-0,0401	-1,83x10 ⁻⁰⁴
7,5	0,139	0,98x10 ⁻⁰⁵	3,31	1,19x10 ⁻⁰⁴	-0,0350	-1,59x10 ⁻⁰⁴
10,0	0,237	1,08x10 ⁻⁰⁵	3,75	1,21x10 ⁻⁰⁴	-0,0307	-1,39x10 ⁻⁰⁴
12,5	0,276	1,06x10 ⁻⁰⁵	3,67	1,13x10 ⁻⁰⁴	-0,0271	-1,22x10 ⁻⁰⁴
15,0	0,285	0,99x10 ⁻⁰⁵	3,40	1,02x10 ⁻⁰⁴	-0,0242	-1,08x10 ⁻⁰⁴
17,5	0,278	9,02x10 ⁻⁰⁶	3,09	9,10x10 ⁻⁰⁵	-0,0215	-9,50x10 ⁻⁰⁵
20,0	0,265	8,24x10 ⁻⁰⁶	2,79	8,10x10 ⁻⁰⁵	-0,0194	-8,50x10 ⁻⁰⁵
22,5	0,248	7,35x10 ⁻⁰⁶	2,51	7,20x10 ⁻⁰⁵	-0,0174	-7,60x10 ⁻⁰⁵
25,0	0,230	6,67x10 ⁻⁰⁶	2,27	6,40x10 ⁻⁰⁵	-0,0158	-6,90x10 ⁻⁰⁵
						Esforços admissíveis SYY (σ_t) .. EYX (ϵ_t) 1,70x10 ⁻⁰⁴ SZZ (σ_v) .. EZZ (ϵ_v) - 4,33x10 ⁻⁰⁴

Tabela 4.41 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-4 - FE - Est. 367 (DER/MG, 2010).

ANÁLISE MECANÍSTICA - CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN						
Rodovia: MG-232 - Trecho: MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO - SH-4 - FE - Estacas: 362- 533 - Ext. 3.420 m						
DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS VÁLIDAS DE RECAPEAMENTO EM CBUQ - RETRANS-5-L						
CAMADA	ESPESES. (cm)	MR (MPa)	POISSON	TIPO DE MATERIAL	ESTACA	
1	3,0 a 30,0	3,08x10 ³	0,35	CBUQ (reforço estrutural)		
2	2,0	686,5	0,35	TSD (tratamento superficial duplo)		
3	20,0	926,7	0,40	Escória de aciaria + 20% argila		
4	Semi-infin.	223,1	0,45	Silte/Argila		
ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA - PROGRAMA ELSYM5						
ESPESES. CBUQ (recap) (cm)	ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA					
	Horizontal - face inferior do recap (CBUQ)				Vertical - subleito	
	SYX-15 cm (MPa)	EYX-15 cm (MPa)	SYX-30 cm cm/cm	EYX-30 cm cm/cm	SZZ-15 cm (MPa)	EZZ-15 cm cm/cm
2,5	-0,342	-2,35x10 ⁻⁰⁶	-3,28	-1,10x10 ⁻⁰⁵	-0,0479	-2,76x10 ⁻⁰⁴
5,0	-0,046	6,37x10 ⁻⁰⁶	1,66	9,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0417	-2,42x10 ⁻⁰⁴
7,5	0,123	9,33x10 ⁻⁰⁶	3,17	1,17x10 ⁻⁰⁴	-0,0367	-2,14x10 ⁻⁰⁴
10,0	0,206	1,02x10 ⁻⁰⁵	3,45	1,15x10 ⁻⁰⁴	-0,0324	-1,89x10 ⁻⁰⁴
12,5	0,238	0,98x10 ⁻⁰⁵	3,31	1,06x10 ⁻⁰⁴	-0,0288	-1,68x10 ⁻⁰⁴
15,0	0,246	9,12x10 ⁻⁰⁶	3,03	9,40x10 ⁻⁰⁵	-0,0256	-1,49x10 ⁻⁰⁴
17,5	0,240	8,33x10 ⁻⁰⁶	2,72	8,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0230	-1,33x10 ⁻⁰⁴
20,0	0,228	7,45x10 ⁻⁰⁶	2,44	7,40x10 ⁻⁰⁵	-0,0206	-1,20x10 ⁻⁰⁴
22,5	0,215	6,77x10 ⁻⁰⁶	2,20	6,50x10 ⁻⁰⁵	-0,0187	-1,08x10 ⁻⁰⁴
25,0	0,199	6,08x10 ⁻⁰⁶	1,98	5,80x10 ⁻⁰⁵	-0,0170	-9,80x10 ⁻⁰⁵
						Esforços admissíveis SYY (σ_t) .. EYX (ϵ_t) 1,70x10 ⁻⁰⁴ SZZ (σ_v) .. EZZ (ϵ_v) - 4,33x10 ⁻⁰⁴

Tabela 4.42 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-5 - FE - Est. 535 (DER/MG, 2010).

ANÁLISE MECANÍSTICA - CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN						
Rodovia: MG-232 - Trecho: MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO - SH-5 - FE - Estacas: 533 - 784 - Ext. 5.020 m						
DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS VÁLIDAS DE RECAPEAMENTO EM CBUQ - RETRANS-5-L						
CAMADA	ESPESES. (cm)	MR (MPa)	POISSON	TIPO DE MATERIAL		ESTACA
1	3,0 a 30,0	3,08x10 ³	0,35	CBUQ (reforço estrutural)		<p style="text-align: center;">535</p>
2	4,0	1,96x10 ³	0,35	PMF		
3	22,0	289,3	0,40	Escória de aciaria		
4	Semi-infin.	27,9	0,45	Pedr./areia argilosa/argila		
ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA - PROGRAMA ELSYM5						
ESPESES. CBUQ (recap) (cm)	ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA					
	Horizontal - face inferior do recap (CBUQ)				Vertical - subleito	
	SYX-15 cm (MPa)	EYX-15 cm (MPa)	SYX-30 cm (cm/cm)	EYX-30 cm (cm/cm)	SZZ-15 cm (MPa)	EZZ-15 cm (cm/cm)
2,5	-0,465	-9,22x10 ⁻⁰⁶	-6,32	-8,90x10 ⁻⁰⁵	-0,0353	-4,28x10 ⁻⁰⁴
5,0	0,007	4,61x10 ⁻⁰⁶	-0,35	5,60x10 ⁻⁰⁵	-0,0303	-3,65x10 ⁻⁰⁴
7,5	0,233	9,71x10 ⁻⁰⁶	2,85	1,04x10 ⁻⁰⁴	-0,0261	-3,12x10 ⁻⁰⁴
10,0	0,331	1,12x10 ⁻⁰⁵	3,70	1,17x10 ⁻⁰⁴	-0,0227	-2,68x10 ⁻⁰⁴
12,5	0,364	1,13x10 ⁻⁰⁵	3,87	1,14x10 ⁻⁰⁴	-0,0198	-2,31x10 ⁻⁰⁴
15,0	0,365	1,07x10 ⁻⁰⁵	3,74	1,07x10 ⁻⁰⁴	-0,0173	-2,00x10 ⁻⁰⁴
17,5	0,351	1,00x10 ⁻⁰⁵	3,51	9,80x10 ⁻⁰⁵	-0,0153	-1,75x10 ⁻⁰⁴
20,0	0,330	9,12x10 ⁻⁰⁶	3,24	8,90x10 ⁻⁰⁵	-0,0136	-1,54x10 ⁻⁰⁴
22,5	0,308	8,33x10 ⁻⁰⁶	2,97	8,10x10 ⁻⁰⁵	-0,0122	-1,37x10 ⁻⁰⁴
25,0	0,284	7,55x10 ⁻⁰⁶	2,73	7,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0110	-1,22x10 ⁻⁰⁴
						<p>Esforços admissíveis</p> <p>SYX (σ_x)</p> <p>..</p> <p>EYX (ϵ_x)</p> <p>1,70x10⁻⁰⁴</p> <p>SZZ (σ_v)</p> <p>..</p> <p>EZZ (ϵ_v)</p> <p>- 4,33x10⁻⁰⁴</p>

Tabela 4.43 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-5 - FD - Est. 538 (DER/MG, 2010).

ANÁLISE MECANÍSTICA - CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN						
Rodovia: MG-232 - Trecho: MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO - SH-5 - FD - Estacas: 533 - 784 - Ext. 5.020 m						
DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS VÁLIDAS DE RECAPEAMENTO EM CBUQ - RETRANS-5-L						
CAMADA	ESPESES. (cm)	MR (MPa)	POISSON	TIPO DE MATERIAL		ESTACA
1	3,0 a 30,0	3,08x10 ³	0,35	CBUQ (reforço estrutural)		<p style="text-align: center;">538</p>
2	4,0	1,96x10 ³	0,35	PMF		
3	22,0	862,0	0,40	Escória de aciaria		
4	Semi-infin.	201,0	0,45	Pedr./areia argilosa/argila		
ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA - PROGRAMA ELSYM5						
ESPESES. CBUQ (recap) (cm)	ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA					
	Horizontal - face inferior do recap (CBUQ)				Vertical - subleito	
	SYX-15 cm (MPa)	EYX-15 cm (MPa)	SYX-30 cm (cm/cm)	EYX-30 cm (cm/cm)	SZZ-15 cm (MPa)	EZZ-15 cm (cm/cm)
2,5	-0,315	-5,59x10 ⁻⁰⁶	-5,04	-5,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0344	-2,32x10 ⁻⁰⁴
5,0	-0,119	1,27x10 ⁻⁰⁶	-1,35	2,40x10 ⁻⁰⁵	-0,0303	-2,05x10 ⁻⁰⁴
7,5	0,005	4,31x10 ⁻⁰⁶	0,36	5,40x10 ⁻⁰⁵	-0,0268	-1,82x10 ⁻⁰⁴
10,0	0,076	5,59x10 ⁻⁰⁶	1,11	6,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0239	-1,62x10 ⁻⁰⁴
12,5	0,115	5,88x10 ⁻⁰⁶	1,41	6,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0214	-1,45x10 ⁻⁰⁴
15,0	0,133	5,76x10 ⁻⁰⁶	1,49	6,00x10 ⁻⁰⁵	-0,0193	-1,30x10 ⁻⁰⁴
17,5	0,140	5,49x10 ⁻⁰⁶	1,48	5,50x10 ⁻⁰⁵	-0,0175	-1,18x10 ⁻⁰⁴
20,0	0,141	5,20x10 ⁻⁰⁶	1,43	5,10x10 ⁻⁰⁵	-0,0159	-1,07x10 ⁻⁰⁴
22,5	0,137	4,80x10 ⁻⁰⁶	1,35	4,60x10 ⁻⁰⁵	-0,0146	-9,70x10 ⁻⁰⁵
25,0	0,132	4,41x10 ⁻⁰⁶	1,28	4,20x10 ⁻⁰⁵	-0,0134	-8,90x10 ⁻⁰⁵
						<p>Esforços admissíveis</p> <p>SYX (σ_x)</p> <p>..</p> <p>EYX (ϵ_x)</p> <p>1,70x10⁻⁰⁴</p> <p>SZZ (σ_v)</p> <p>..</p> <p>EZZ (ϵ_v)</p> <p>- 4,33x10⁻⁰⁴</p>

Tabela 4.44 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-5 - FE - Est. 709 (DER/MG, 2010).

ANÁLISE MECANÍSTICA - CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN						
Rodovia: MG-232 - Trecho: MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO - SH-5 - FE - Estacas: 533 - 784 - Ext. 5.020 m						
DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS VÁLIDAS DE RECAPEAMENTO EM CBUQ - RETRANS-L						
CAMADA	ESPESES. (cm)	MR (MPa)	POISSON	TIPO DE MATERIAL		ESTACA
1	3,0 a 30,0	3,08x10 ³	0,35	CBUQ (reforço estrutural)		<p style="text-align: center;">709</p>
2	4,0	3,92x10 ³	0,35	PMF		
3	22,0	289,3	0,40	Escória de aciaria		
4	Semi-infin.	27,9	0,45	Pedr./areia argilosa/argila		
ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA - PROGRAMA ELSYM5						
ESPESES. CBUQ (recap) (cm)	ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA					
	Horizontal - face inferior do recap (CBUQ)				Vertical - subleito	
	SYX-15 cm (MPa)	EYY-15 cm (MPa)	SYX-30 cm (cm/cm)	EYY-30 cm (cm/cm)	SZZ-15 cm (MPa)	EZZ-15 cm (cm/cm)
2,5	-0,518	-1,27x10 ⁻⁰⁵	-8,08	-1,30x10 ⁻⁰⁴	-0,0348	-4,21x10 ⁻⁰⁴
5,0	-0,128	-0,98x10 ⁻⁰⁶	-2,33	-7,00x10 ⁻⁰⁶	-0,0299	-3,58x10 ⁻⁰⁴
7,5	0,073	4,12x10 ⁻⁰⁶	0,24	4,40x10 ⁻⁰⁵	-0,0256	-3,04x10 ⁻⁰⁴
10,0	0,172	6,28x10 ⁻⁰⁶	1,44	6,40x10 ⁻⁰⁵	-0,0221	-2,58x10 ⁻⁰⁴
12,5	0,218	7,06x10 ⁻⁰⁶	1,97	7,10x10 ⁻⁰⁵	-0,0192	-2,21x10 ⁻⁰⁴
15,0	0,234	7,16x10 ⁻⁰⁶	2,17	7,00x10 ⁻⁰⁵	-0,0168	-1,91x10 ⁻⁰⁴
17,5	0,236	6,86x10 ⁻⁰⁶	2,20	6,70x10 ⁻⁰⁵	-0,0148	-1,67x10 ⁻⁰⁴
20,0	0,230	6,57x10 ⁻⁰⁶	2,15	6,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0132	-1,47x10 ⁻⁰⁴
22,5	0,220	6,08x10 ⁻⁰⁶	2,06	5,90x10 ⁻⁰⁵	-0,0118	-1,30x10 ⁻⁰⁴
25,0	0,208	5,69x10 ⁻⁰⁶	1,96	5,50x10 ⁻⁰⁵	-0,0107	-1,17x10 ⁻⁰⁴

Tabela 4.45 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-5 - FD - Est. 718 (DER/MG, 2010).

ANÁLISE MECANÍSTICA - CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN						
Rodovia: MG-232 - Trecho: MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO - SH-5 - FD - Estacas: 533 - 784 - Ext. 5.020 m						
DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS VÁLIDAS DE RECAPEAMENTO EM CBUQ - RETRANS-L						
CAMADA	ESPESES. (cm)	MR (MPa)	POISSON	TIPO DE MATERIAL		ESTACA
1	3,0 a 30,0	3,08x10 ³	0,35	CBUQ (reforço estrutural)		<p style="text-align: center;">718</p>
2	4,0	3,92x10 ³	0,35	PMF		
3	22,0	167,7	0,40	Escória de aciaria		
4	Semi-infin.	33,3	0,45	Pedr./areia argilosa/argila		
ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA - PROGRAMA ELSYM5						
ESPESES. CBUQ (recap) (cm)	ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA					
	Horizontal - face inferior do recap (CBUQ)				Vertical - subleito	
	SYX-15 cm (MPa)	EYY-15 cm (MPa)	SYX-30 cm (cm/cm)	EYY-30 cm (cm/cm)	SZZ-15 cm (MPa)	EZZ-15 cm (cm/cm)
2,5	-0,580	-1,46x10 ⁻⁰⁵	-8,74	-1,49x10 ⁻⁰⁴	-0,0388	-6,08x10 ⁻⁰⁴
5,0	-0,076	0,98x10 ⁻⁰⁷	-1,78	3,00x10 ⁻⁰⁶	-0,0326	-5,03x10 ⁻⁰⁴
7,5	0,154	5,88x10 ⁻⁰⁶	1,05	6,00x10 ⁻⁰⁵	-0,0274	-4,16x10 ⁻⁰⁴
10,0	0,253	8,04x10 ⁻⁰⁶	2,24	8,10x10 ⁻⁰⁵	-0,0232	-3,47x10 ⁻⁰⁴
12,5	0,291	8,53x10 ⁻⁰⁶	2,69	8,50x10 ⁻⁰⁵	-0,0199	-2,93x10 ⁻⁰⁴
15,0	0,299	8,43x10 ⁻⁰⁶	2,79	8,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0171	-2,49x10 ⁻⁰⁴
17,5	0,292	8,04x10 ⁻⁰⁶	2,74	7,80x10 ⁻⁰⁵	-0,0150	-2,15x10 ⁻⁰⁴
20,0	0,278	7,55x10 ⁻⁰⁶	2,61	7,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0132	-1,87x10 ⁻⁰⁴
22,5	0,261	6,96x10 ⁻⁰⁶	2,46	6,70x10 ⁻⁰⁵	-0,0117	-1,64x10 ⁻⁰⁴
25,0	0,243	6,37x10 ⁻⁰⁶	2,30	6,20x10 ⁻⁰⁵	-0,0105	-1,46x10 ⁻⁰⁴

Nos subtrechos constituídos pelos SH-3 e SH-6 as camadas de base e sub-base dos respectivos pavimentos foram confeccionadas em cascalho. No SH-3 - Tabelas (4.46 e 4.47) e SH-6 - Tabelas (4.48, 4.49, 4.50 e 4.51) constata-se, através do projeto de reforço para vida útil de dez anos (2010 - 2020), um bom comportamento da estrutura. Mas comparativamente aos SH com base construída em escória de aciaria pura e com adição de argila, apresentam um desempenho menos significativo. Os SH com bases confeccionadas com a utilização de cascalho necessitam receber reforço estrutural em maiores extensões e em escalas superiores. Todas as curvas EYY (15 e 30) cm "Deformação específica horizontal de tração, gerada na face inferior do reforço a 15 e 30 cm", ocorridas no SH-6, não superaram o limite admissível para ϵ_t , no entanto não ocorre o mesmo com as curvas EZZ 15 cm "Deformação específica vertical de compressão no topo do subleito a 15 cm". Desta forma, os SH com base em cascalho necessitam de reforço estrutural em praticamente toda sua extensão, vide os Anexo X, páginas X.2, X.3, X.8 e X.9.

Tabela 4.46 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-3 - FD - Est. 192 (DER/MG, 2010).

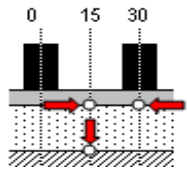
ANÁLISE MECANÍSTICA - CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN						
Rodovia: MG-232 - Trecho: MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO - SH-3 - FD - Estacas: 192 - 362 - Ext. 3.400 m						
DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS VÁLIDAS DE RECAPEAMENTO EM CBUQ - RETRAN-5-L						
CAMADA	ESPESS. cm	MR (MPa)	POISSON	TIPO DE MATERIAL		ESTACA
1	3,0 a 30,0	3,08x10 ³	0,35	CBUQ (reforço estrutural)		<p style="text-align: center;">192</p> <p style="text-align: center;">Pontos de análise</p> 
2	4,0	2,94x10 ³	0,35	PMF + LA		
3	18,0	342,7	0,40	Cascalho siltoso		
4	12,0	68,1	0,40	Cascalho siltoso		
5	Semi-infin.	116,7	0,45	Argila siltosa/argilosa		
ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA - PROGRAMA ELSYM5						
ESPESS. CBUQ (recap) (cm)	ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA					
	Horizontal - face inferior do recap (CBUQ)				Vertical - subleito	
	SYY-15 cm (MPa)	EYY-15 cm (MPa)	SYY-30 cm cm/cm	EYY-30 cm cm/cm	SZZ-15 cm (MPa)	EZZ-15 cm cm/cm
2,5	-0,413	-9,51x10 ⁻⁰⁶	-6,63	-9,50x10 ⁻⁰⁵	-0,0595	-4,45x10 ⁻⁰⁴
5,0	-0,062	-1,47x10 ⁻⁰⁶	-1,22	-2,00x10 ⁻⁰⁵	-0,0502	-3,74x10 ⁻⁰⁴
7,5	0,118	5,88x10 ⁻⁰⁶	1,05	6,40x10 ⁻⁰⁵	-0,0424	-3,15x10 ⁻⁰⁴
10,0	0,202	7,55x10 ⁻⁰⁶	2,01	7,80x10 ⁻⁰⁵	-0,0361	-2,68x10 ⁻⁰⁴
12,5	0,237	7,94x10 ⁻⁰⁶	2,36	8,00x10 ⁻⁰⁵	-0,0310	-2,29x10 ⁻⁰⁴
15,0	0,248	7,75x10 ⁻⁰⁶	2,43	7,70x10 ⁻⁰⁵	-0,0270	-1,98x10 ⁻⁰⁴
17,5	0,244	7,35x10 ⁻⁰⁶	2,37	7,20x10 ⁻⁰⁵	-0,0237	-1,73x10 ⁻⁰⁴
20,0	0,234	6,77x10 ⁻⁰⁶	2,25	6,60x10 ⁻⁰⁵	-0,0208	-1,52x10 ⁻⁰⁴
22,5	0,222	6,28x10 ⁻⁰⁶	2,11	6,10x10 ⁻⁰⁵	-0,0186	-1,35x10 ⁻⁰⁴
25,0	0,208	5,78x10 ⁻⁰⁶	1,97	5,50x10 ⁻⁰⁵	-0,0167	-1,21x10 ⁻⁰⁴
						<p style="text-align: center;">Esforços admissíveis</p> <p style="text-align: center;">SYY (σ_t)</p> <p style="text-align: center;">..</p> <p style="text-align: center;">EYY (ϵ_t)</p> <p style="text-align: center;">1,70x10⁻⁰⁴</p> <p style="text-align: center;">SZZ (σ_v)</p> <p style="text-align: center;">..</p> <p style="text-align: center;">EZZ (ϵ_v)</p> <p style="text-align: center;">-4,33x10⁻⁰⁴</p>

Tabela 4.47 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-3 - FE - Est. 361 (DER/MG, 2010).

ANÁLISE MECANÍSTICA - CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN						
Rodovia: MG-232 - Trecho: MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO - SH-3 - FE - Estacas: 192 - 362 - Ext. 3.400 m						
DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS VÁLIDAS DE RECAPEAMENTO EM CBUQ - RETRANS-5-L						
CAMADA	ESPES. (cm)	MR (MPa)	POISSON	TIPO DE MATERIAL		ESTACA
1	3,0 a 30,0	3,08x10 ³	0,35	CBUQ (reforço estrutural)		<p>361</p> <p>Pontos de análise</p> <p>Esforços admissíveis</p> <p>SYY (σ_t)</p> <p>..</p> <p>EYY (ϵ_t)</p> <p>1,70x10⁻⁰⁴</p> <p>SZZ (σ_v)</p> <p>..</p> <p>EZZ (ϵ_v)</p> <p>-4,33x10⁻⁰⁴</p>
2	4,0	1,96x10 ³	0,35	PMF + LA		
3	18,0	85,3	0,40	Cascalho siltoso		
4	12,0	139,7	0,40	Cascalho siltoso		
5	Semi-infin.	241,2	0,45	Argila silteosa/argilosa		
ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA - PROGRAMA ELSYM5						
ESPES. CBUQ (recap) (cm)	ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA					
	Horizontal - face inferior do recap. (CBUQ)				Vertical - subleito	
	SYY-15 cm (MPa)	EYY-15 cm (MPa)	SYY-30 cm cm/cm	EYY-30 cm cm/cm	SZZ-15 cm (MPa)	EZZ-15 cm cm/cm
2,5	-0,232	-3,9x10 ⁻³	-3,99	-0,04	-0,095	-0,35
5,0	0,290	11,7x10 ⁻³	3,33	0,12	-0,078	-0,28
7,5	0,463	14,7x10 ⁻³	5,14	0,16	-0,065	-0,23
10,0	0,496	14,7x10 ⁻³	5,31	0,15	-0,054	-0,19
12,5	0,477	13,7x10 ⁻³	4,97	0,14	-0,046	-0,16
15,0	0,442	12,7x10 ⁻³	4,50	0,12	-0,039	-0,13
17,5	0,402	10,7x10 ⁻³	4,02	0,11	-0,034	-0,12
20,0	0,363	9,8x10 ⁻³	3,58	0,10	-0,030	-0,10
22,5	0,328	8,8x10 ⁻³	3,18	0,08	-0,026	-0,09
25,0	0,296	7,8x10 ⁻³	2,84	0,07	-0,023	-0,08

Tabela 4.48 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-6 - FE - Est. 787 (DER/MG, 2010).

ANÁLISE MECANÍSTICA - CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN						
Rodovia: MG-232 - Trecho: MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO - SH-6 - FE - Estacas: 784 - 1000 - Ext. 4.320 m						
DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS VÁLIDAS DE RECAPEAMENTO EM CBUQ - RETRANS-5-L						
CAMADA	ESPES. (cm)	MR (MPa)	POISSON	TIPO DE MATERIAL		ESTACA
1	3,0 a 30,0	3,08x10 ³	0,35	CBUQ (reforço estrutural)		<p>787</p> <p>Pontos de análise</p> <p>Esforços admissíveis</p> <p>SYY (σ_t)</p> <p>..</p> <p>EYY (ϵ_t)</p> <p>1,70x10⁻⁰⁴</p> <p>SZZ (σ_v)</p> <p>..</p> <p>EZZ (ϵ_v)</p> <p>-4,33x10⁻⁰⁴</p>
2	4,0	1,96x10 ³	0,35	PMF		
3	12,0	85,3	0,40	Cascalho		
4	12,0	718,34	0,40	Cascalho		
5	Semi-infin.	116,7	0,45	Pedr/Areia silteosa/argilosa		
ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA - PROGRAMA ELSYM5						
ESPES. CBUQ (recap) (cm)	ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA					
	Horizontal - face inferior do recap. (CBUQ)				Vertical - subleito	
	SYY-15 cm (MPa)	EYY-15 cm (MPa)	SYY-30 cm cm/cm	EYY-30 cm cm/cm	SZZ-15 cm (MPa)	EZZ-15 cm cm/cm
2,5	-0,247	-4,31x10 ⁻⁰⁶	-4,20	-4,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0859	-5,61x10 ⁻⁰⁴
5,0	0,216	0,99x10 ⁻⁰⁵	2,63	1,06x10 ⁻⁰⁴	-0,0716	-4,61x10 ⁻⁰⁴
7,5	0,393	1,36x10 ⁻⁰⁵	4,51	1,40x10 ⁻⁰⁴	-0,0596	-3,78x10 ⁻⁰⁴
10,0	0,444	1,39x10 ⁻⁰⁵	4,83	1,41x10 ⁻⁰⁴	-0,0498	-3,12x10 ⁻⁰⁴
12,5	0,440	1,30x10 ⁻⁰⁵	4,63	1,30x10 ⁻⁰⁴	-0,0420	-2,60x10 ⁻⁰⁴
15,0	0,417	1,19x10 ⁻⁰⁵	4,25	1,17x10 ⁻⁰⁴	-0,0358	-2,20x10 ⁻⁰⁴
17,5	0,385	1,07x10 ⁻⁰⁵	3,85	1,04x10 ⁻⁰⁴	-0,0308	-1,89x10 ⁻⁰⁴
20,0	0,353	9,51x10 ⁻⁰⁶	3,46	9,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0269	-1,63x10 ⁻⁰⁴
22,5	0,322	8,53x10 ⁻⁰⁶	3,11	8,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0237	-1,43x10 ⁻⁰⁴
25,0	0,292	7,65x10 ⁻⁰⁶	2,80	7,40x10 ⁻⁰⁵	-0,0210	-1,26x10 ⁻⁰⁴

Tabela 4.49 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-6 - FD - Est. 790 (DER/MG, 2010).

ANÁLISE MECANÍSTICA - CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN						
Rodovia: MG-232 - Trecho: MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO - SH-6 - FD - Estacas: 784 - 1000 - Ext. 4.320 m						
DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS VÁLIDAS DE RECAPEAMENTO EM CBUQ - RETRANS-5-L						
CAMADA	ESPES. (cm)	MR (MPa)	POISSON	TIPO DE MATERIAL	ESTACA	
1	3,0 a 30,0	3,08x10 ³	0,35	CBUQ (reforço estrutural)	<p>790</p> <p>Pontos de análise 0 15 30</p>	
2	4,0	2,45x10 ³	0,35	PMF		
3	12,0	98,07	0,40	Cascalho		
4	12,0	97,58	0,40	Cascalho		
5	Semi-infin.	97,58	0,45	Pedr./Areia siltosa/argilosa		
ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA - PROGRAMA ELSYM5						
ESPES. CBUQ (recap) (cm)	ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA					
	Horizontal - face inferior do recap (CBUQ)				Vertical - subleito	
	SYX-15 cm (MPa)	EYY-15 cm (MPa)	SYX-30 cm (MPa)	EYY-30 cm (MPa)	SZZ-15 cm (MPa)	EZZ-15 cm (MPa)
2,5	-0,397	-9,12x10 ⁻⁰⁶	-6,17	-9,10x10 ⁻⁰⁵	-0,0900	-8,16x10 ⁻⁰⁴
5,0	0,169	7,55x10 ⁻⁰⁶	1,57	8,00x10 ⁻⁰⁵	-0,0715	-6,42x10 ⁻⁰⁴
7,5	0,378	1,24x10 ⁻⁰⁵	3,94	1,26x10 ⁻⁰⁴	-0,0573	-5,10x10 ⁻⁰⁴
10,0	0,441	1,31x10 ⁻⁰⁵	4,54	1,33x10 ⁻⁰⁴	-0,0468	-412x10 ⁻⁰⁴
12,5	0,443	1,26x10 ⁻⁰⁵	4,49	1,26x10 ⁻⁰⁴	-0,0388	-3,39x10 ⁻⁰⁴
15,0	0,422	1,17x10 ⁻⁰⁵	4,20	1,15x10 ⁻⁰⁴	-0,0327	-2,84x10 ⁻⁰⁴
17,5	0,392	1,06x10 ⁻⁰⁵	3,85	1,03x10 ⁻⁰⁴	-0,0280	-2,42x10 ⁻⁰⁴
20,0	0,360	9,51x10 ⁻⁰⁶	3,49	9,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0243	-2,08x10 ⁻⁰⁴
22,5	0,329	8,63x10 ⁻⁰⁶	3,15	8,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0212	-1,81x10 ⁻⁰⁴
25,0	0,301	7,75x10 ⁻⁰⁶	2,86	7,50x10 ⁻⁰⁵	-0,0187	-1,59x10 ⁻⁰⁴
Esforços admissíveis						
SYX (σ_t)						
..						
EYY (ϵ_t)						
1,70x10 ⁻⁰⁴						
SZZ (σ_v)						
..						
EZZ (ϵ_v)						
-4,33x10 ⁻⁰⁴						

Tabela 4.50 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-6 - FE - Est. 961 (DER/MG, 2010).

ANÁLISE MECANÍSTICA - CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN						
Rodovia: MG-232 - Trecho: MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO - SH-6 - FE - Estacas: 784 - 1000 - Ext. 4.320 m						
DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS VÁLIDAS DE RECAPEAMENTO EM CBUQ - RETRANS-5-L						
CAMADA	ESPES. (cm)	MR (MPa)	POISSON	TIPO DE MATERIAL	ESTACA	
1	3,0 a 30,0	3,08x10 ³	0,35	CBUQ (reforço estrutural)	<p>961</p> <p>Pontos de análise 0 15 30</p>	
2	4,0	2,94x10 ³	0,35	PMF		
3	12,0	687,9	0,40	Cascalho		
4	12,0	201,0	0,40	Cascalho		
5	Semi-infin.	68,1	0,45	Pedr./Areia siltosa/argilosa		
ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA - PROGRAMA ELSYM5						
ESPES. CBUQ (recap) (cm)	ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA					
	Horizontal - face inferior do recap (CBUQ)				Vertical - subleito	
	SYX-15 cm (MPa)	EYY-15 cm (MPa)	SYX-30 cm (MPa)	EYY-30 cm (MPa)	SZZ-15 cm (MPa)	EZZ-15 cm (MPa)
2,5	-0,483	-1,09x10 ⁻⁰⁵	-7,23	-1,07x10 ⁻⁰⁴	-0,0493	-6,81x10 ⁻⁰⁴
5,0	-0,172	-1,27x10 ⁻⁰⁶	-2,46	-6,00x10 ⁻⁰⁶	-0,0413	-5,75x10 ⁻⁰⁴
7,5	0,006	3,24x10 ⁻⁰⁶	-0,16	3,90x10 ⁻⁰⁵	-0,0349	-4,87x10 ⁻⁰⁴
10,0	0,103	5,29x10 ⁻⁰⁶	0,97	5,70x10 ⁻⁰⁵	-0,0298	-4,15x10 ⁻⁰⁴
12,5	0,154	6,08x10 ⁻⁰⁶	1,51	6,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0255	-3,56x10 ⁻⁰⁴
15,0	0,178	6,28x10 ⁻⁰⁶	1,74	6,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0222	-3,09x10 ⁻⁰⁴
17,5	0,187	6,08x10 ⁻⁰⁶	1,81	6,00x10 ⁻⁰⁵	-0,0116	-2,69x10 ⁻⁰⁴
20,0	0,187	5,78x10 ⁻⁰⁶	1,80	5,70x10 ⁻⁰⁵	-0,0172	-2,37x10 ⁻⁰⁴
22,5	0,183	5,49x10 ⁻⁰⁶	1,75	5,30x10 ⁻⁰⁵	-0,0153	-2,10x10 ⁻⁰⁴
25,0	0,175	5,09x10 ⁻⁰⁶	1,67	5,00x10 ⁻⁰⁵	-0,0139	-1,88x10 ⁻⁰⁴
Esforços admissíveis						
SYX (σ_t)						
..						
EYY (ϵ_t)						
1,70x10 ⁻⁰⁴						
SZZ (σ_v)						
..						
EZZ (ϵ_v)						
-4,33x10 ⁻⁰⁴						

Tabela 4.51 – Análise mecânica – Retroanálise - SH-6 - FD - Est. 970 (DER/MG, 2010).

ANÁLISE MECANÍSTICA - CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN														
Rodovia: MG-232 - Trecho: MESQUITA/SANTANA DO PARAÍSO - SH-6 - FD - Estacas: 784 - 1000 - Ext. 4.320 m														
DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS VÁLIDAS DE RECAPEAMENTO EM CBUQ - RETRAN5-L														
CAMADA	ESPESES. (cm)	MR (MPa)	POISSON	TIPO DE MATERIAL		ESTACA								
1	3,0 a 30,0	3,08x10 ³	0,35	CBUQ (reforço estrutural)		<p style="text-align: center;">970</p> <p style="text-align: center;">Pontos de análise</p> <p style="text-align: center;">0 15 30</p> <p style="text-align: center;">Esforços admissíveis</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="background-color: #d9ead3;">SYY (σ_t)</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9ead3;">..</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9ead3;">EYY (ϵ_t)</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9ead3;">1,70x10⁻⁰⁴</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9ead3;">SZZ (σ_v)</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9ead3;">..</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9ead3;">EZZ (ϵ_v)</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #d9ead3;">-4,33x10⁻⁰⁴</td> </tr> </table>	SYY (σ_t)	..	EYY (ϵ_t)	1,70x10 ⁻⁰⁴	SZZ (σ_v)	..	EZZ (ϵ_v)	-4,33x10 ⁻⁰⁴
SYY (σ_t)														
..														
EYY (ϵ_t)														
1,70x10 ⁻⁰⁴														
SZZ (σ_v)														
..														
EZZ (ϵ_v)														
-4,33x10 ⁻⁰⁴														
2	4,0	3,43x10 ³	0,35	PMF										
3	12,0	520,2	0,40	Cascalho										
4	12,0	201,0	0,40	Cascalho										
5	Semi-infin.	56,9	0,45	Pedr/Areia siltosa/argilosa										
ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA - PROGRAMA ELSYM5														
ESPESES. CBUQ (recap) (cm)	ESFORÇOS GERADOS NA ESTRUTURA													
	Horizontal - face inferior do recap (CBUQ)				Vertical - subleito									
	SYY-15 cm (MPa)	EYY-15 cm (MPa)	SYY-30 cm cm/cm	EYY-30 cm cm/cm	SZZ-15 cm (MPa)	EZZ-15 cm cm/cm								
2,5	-0,499	-1,18x10 ⁻⁰⁵	-7,63	-1,18x10 ⁻⁰⁴	-0,0478	-7,96x10 ⁻⁰⁴								
5,0	-0,165	-1,47x10 ⁻⁰⁶	-2,57	-1,00x10 ⁻⁰⁵	-0,0400	-6,67x10 ⁻⁰⁴								
7,5	0,022	3,33x10 ⁻⁰⁶	-0,16	3,70x10 ⁻⁰⁵	-0,0335	-5,59x10 ⁻⁰⁴								
10,0	0,122	5,40x10 ⁻⁰⁶	1,03	5,70x10 ⁻⁰⁵	-0,0284	-4,72x10 ⁻⁰⁴								
12,5	0,172	6,28x10 ⁻⁰⁶	1,59	6,40x10 ⁻⁰⁵	-0,0243	-4,02x10 ⁻⁰⁴								
15,0	0,195	6,47x10 ⁻⁰⁶	1,84	6,40x10 ⁻⁰⁵	-0,0209	-3,46x10 ⁻⁰⁴								
17,5	0,203	6,28x10 ⁻⁰⁶	1,92	6,20x10 ⁻⁰⁵	-0,0183	-3,00x10 ⁻⁰⁴								
20,0	0,202	6,08x10 ⁻⁰⁶	1,91	5,90x10 ⁻⁰⁵	-0,0161	-2,63x10 ⁻⁰⁴								
22,5	0,196	5,69x10 ⁻⁰⁶	1,86	5,50x10 ⁻⁰⁵	-0,0144	-2,32x10 ⁻⁰⁴								
25,0	0,187	5,29x10 ⁻⁰⁶	1,79	5,20x10 ⁻⁰⁵	-0,0129	-2,07x10 ⁻⁰⁴								

Todos os SH da MG-232, estudados pela retroanálise, apresentaram um procedimento técnico adequado, onde a camada que mais contribuiu com as deformações foi o subleito. Entretanto no projeto de dimensionamento os SH constituídos pelas camadas de base em escória de aciaria LD e em escória de aciaria com adição de 20% de argila, demonstraram um comportamento ainda mais expressivo, comparativamente aos SH com a base confeccionada em cascalho, conforme ilustra o Anexo X.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÃO

Embasado nos estudos de caracterização efetuados nas amostras dos materiais utilizados para confeccionar as diferentes camadas de bases, constituintes do pavimento rodoviário do trecho da MG 232, trecho: Mesquita - Santana do Paraíso, bem como, os demais resultados dos ensaios físico-químicos e mecânicos, pode-se imputar um adequado comportamento técnico da escória de aciaria pura ou com 20% de argila, sobressaindo-se qualitativamente de forma positiva quando comparada ao cascalho, também empregado para a confecção da referida camada deste trecho ora analisado.

Na análise granulométrica utilizando-se amostras dos materiais extraídos in loco na retrocitada rodovia, após já ter sofrido os esforços de compactação durante o período de implantação da mesma, e também durante o ensaio de ISC "Índice de Suporte Califórnia", observa-se um determinado desarranjo granulométrico, principalmente com referência ao cascalho, muito pouco relevante na escória de aciaria, que praticamente enquadrou-se na faixa especificada pela norma ES 303 (DNER, 1997). Demonstrando estar compatível com a energia empregada na compactação, durante os trabalhos de pavimentação e ensaio de ISC.

Os resultados do ensaio de Índice de Suporte Califórnia realizados com ambos os materiais (escória de aciaria e cascalho) mostraram-se muito bons, atendendo também a norma do ES 303 (DNER, 1997). Entretanto, também neste quesito, a escória de aciaria obteve melhor comportamento, apresentando suporte mais elevado que o cascalho.

Neste estudo, os ensaios de lixiviação e solubilização da escória de aciaria LD, não foram realizados, aproveitou-se os anteriormente efetuados por Souza (2007) nas denominadas ME1 - escória de aciaria LD da USIMINAS, referenciado na revisão bibliográfica na seção 2.16.1. Permitindo-se concluir que este material coproduto do aço, oriundo da USIMINAS, a escória de aciaria LD, não é perigosa, porém não é

inerte, recebendo a classificação: Classe II A (não perigoso – não inerte) por apresentar teor de alumínio na amostra solubilizada, acima do limite máximo permitido. Desta forma, encontra-se em condições de ser utilizada nas pavimentações rodoviárias, segundo as prescrições da norma NBR 10004 (ABNT, 2004) em suas seções 4.2.1.2 e 4.1.1.3, respectivamente, a mesma não apresenta características corrosivas, nem reativas.

Nos demais ensaios físicos, a escória de aciaria mostrou-se bem qualificada, como por exemplo, no desgaste Los Angeles foi constatado por este estudo um desgaste de 18,7% para este material, a norma EM 262 (DNER, 1994) determina para este coproduto um desgaste menor ou igual a 25%, portanto, a escória de aciaria analisada suporta bem aos esforços de impacto e polimento.

O pavimento em estudo, apresenta boas condições estruturais com relação as deflexões recuperáveis máximas (D_o), as mesmas são de valores bastante reduzidos (Anexo VII), conjugadas a elevados e expressivos os raios de curvatura (Anexo VIII), compondo uma deformada suave, quando submetido a prova de carga.

As deformações permanentes (caráter residual) aquelas que permanecem mesmo após cessar o efeito da atuação das cargas, (afundamentos nas trilhas de rodas e as rupturas de natureza plástica), foram verificadas *in loco*, em todos os segmentos homogêneos do trecho rodoviário estudado, utilizando-se a treliça. Todos SH estudados apresentaram resultados de deformação permanente bastante reduzidos (Anexo XI).

Os resultados da resistência à tração estática máxima (σ_R), obtidos nas amostras do revestimento em PMF da MG-232, ilustrado pela Figura 5.1, foram adequados para este tipo de mistura betuminosa. A média da resistência à tração estática máxima (σ_R) para o PMF foi de 0,98 Mpa, próxima dos valores médios constatados para algumas misturas betuminosas usinadas a quente, como por exemplo, os valores médios para σ_R do CBUQ convencional e até mesmo do SMA, conforme dados apresentados por Antunes et. al, 2009 durante a 16ª RPU "Reunião de Pavimentação Urbana" em Belo Horizonte.



Figura 5.1 – Revestimento em PMF - Rodovia MG 232 – Mesquita/Santana do Paraíso (ACERVO TÉCNICO 40ª CRG - DER/MG, 2007).

O MR médio encontrado pelo ensaio de Compressão Diametral realizado em amostras da camada de revestimento da MG-232, confeccionada em PMF, foi de 3.456 MPa, valor considerado elevado para este tipo de mistura betuminosa, o MR do PMF está próximo dos módulos de resiliência encontrado para o CBUQ convencional. Na literatura, podemos citar o professor Deividi Pereira (2010) "Análise Mecânica de Pavimentos" onde o mesmo sugere, como valor padrão aceitável para o CBUQ, um MR variando entre (3.000 - 5.000) MPa e para o PMF um MR entre (1.000 - 1.400) MPa.

Atribui-se a todos os segmentos pertencentes a rodovia MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso que foram dimensionados, utilizando-se a metodologia da retroanálise (RETRANS5-L), elaborado para o ano de 2020, uma excelente performance. Tal afirmação é embasada pelos resultados indicados no referido projeto de reforço do pavimento, o qual, submete o pavimento às demandas do tráfego e do tempo. O referenciado desempenho está demonstrado pelo Anexo X que apresenta os resultados das especificações das espessuras mínimas da camada de reforço em CBUQ, necessárias para que este pavimento suporte o período de projeto estipulado, ou seja, uma vida útil de dez anos. Entretanto nos segmentos homogêneos que tiveram a camada de base construída com a utilização da escória de aciaria pura e escória de aciaria com adição de 20% argila apresentaram um melhor comportamento técnico. No referido dimensionamento os citados SH quando correlacionados aos que tiveram a base

executada com a utilização do cascalho, evidenciam necessitar de intervenções de reforço em menor escala, ratificando os resultados da avaliação das condições atuais, tanto pelos estudos mecanísticos realizados pelo laboratório, quanto os de campo (retroanálise). Estes subtrechos são os representados pelos segmentos homogêneos: SH-1 - Figuras (5.2 e 5.3); SH-4 - Figuras (5.4 e 5.5) e SH-5 - Figuras (5.6, 5.7 e 5.8). Todavia é pertinente frisar que a camada de base em escória de aciaria LD, quando utilizada sem adição de argila, suportou as solicitações das cargas previstas em projeto para dez anos de maneira mais eficaz, do que a camada confeccionada com utilização da escória de aciaria com adição de 20% de argila. Tal observação é elucidada pelo Anexo X (página X.1, X.6 e X.7) que retrata respectivamente o SH-1 e o SH-5, ambos, com a camada de base construída em escória de aciaria sem mistura. No SH-1 (Anexo X) página X.1 o pavimento demonstrou não necessitar receber o reforço estrutural e o SH-5 precisará de intervenções de reforços em CBUQ em alguns pontos localizados, entretanto em menores proporções do que as demandadas para os SH-4 com a base executada em escória de aciaria + 20% de argila (Anexo X) páginas: X.4 e X.5.

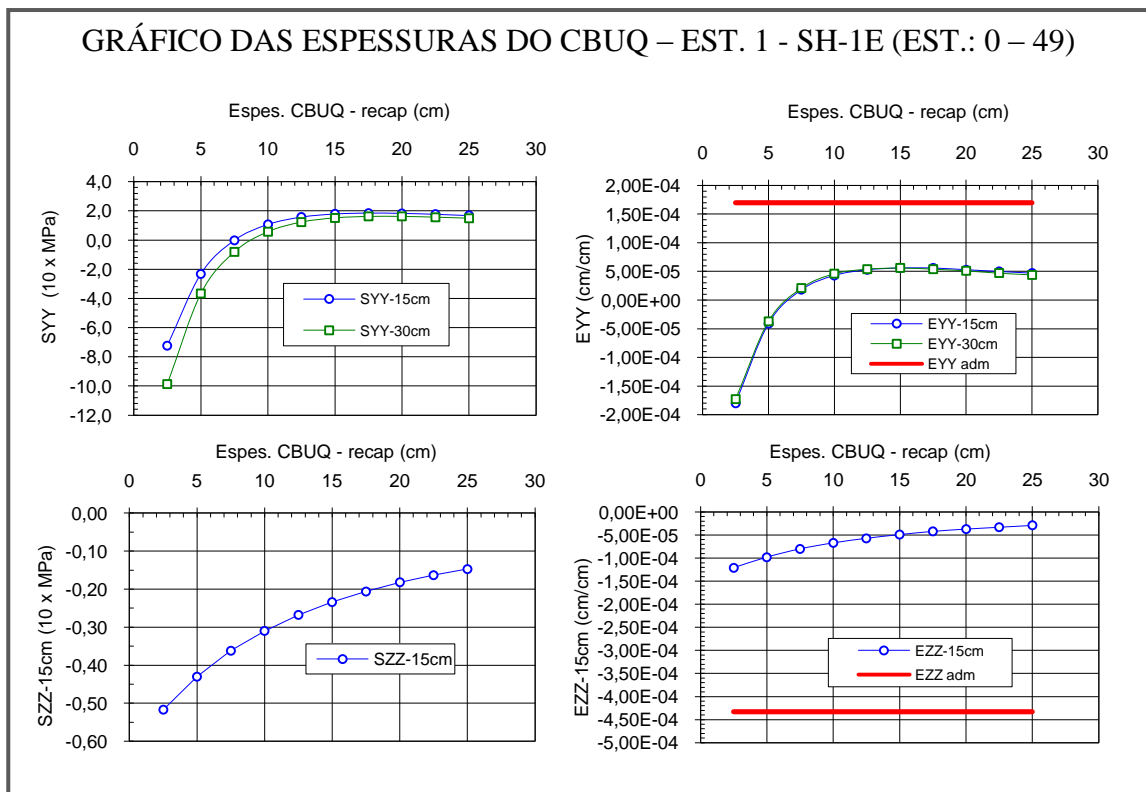


Figura 5.2 – Espessuras do CBUQ – Est. 1 – SH-1E - Est.: 0 – 49 (DER/MG, 2010).

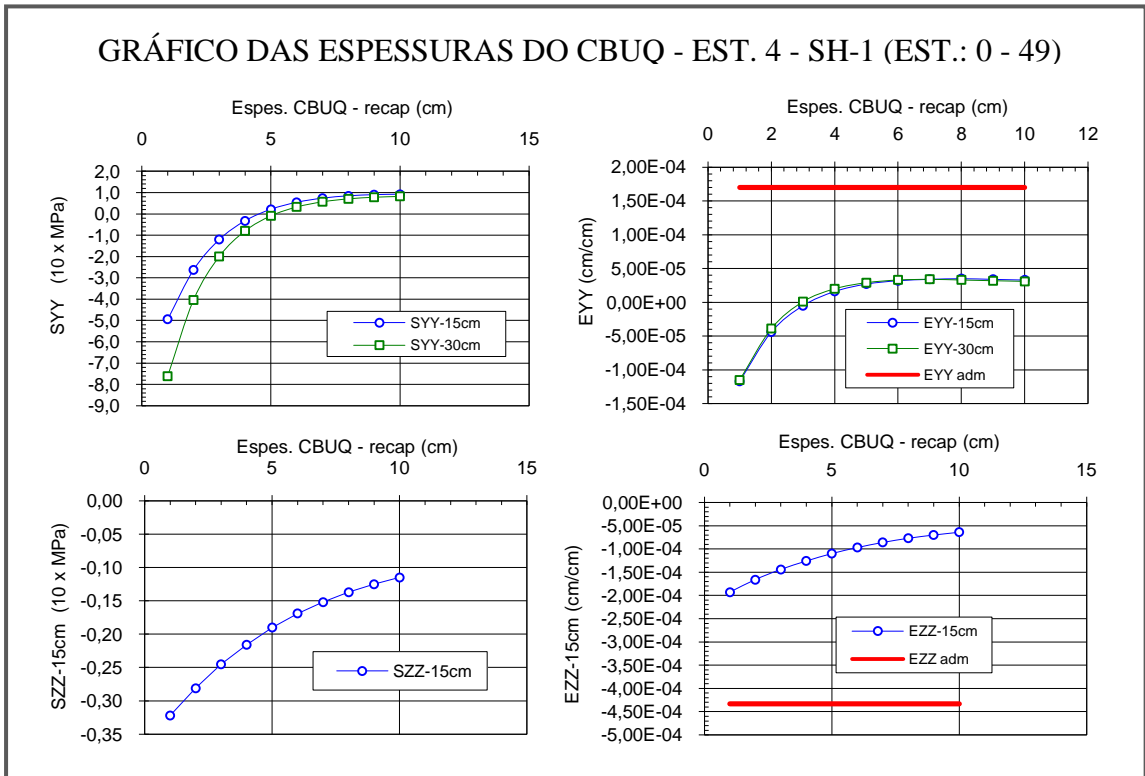


Figura 5.3 - Espessuras do CBUQ – Est. 4 – SH-1D - Est.: 0 – 49 (DER/MG, 2010).

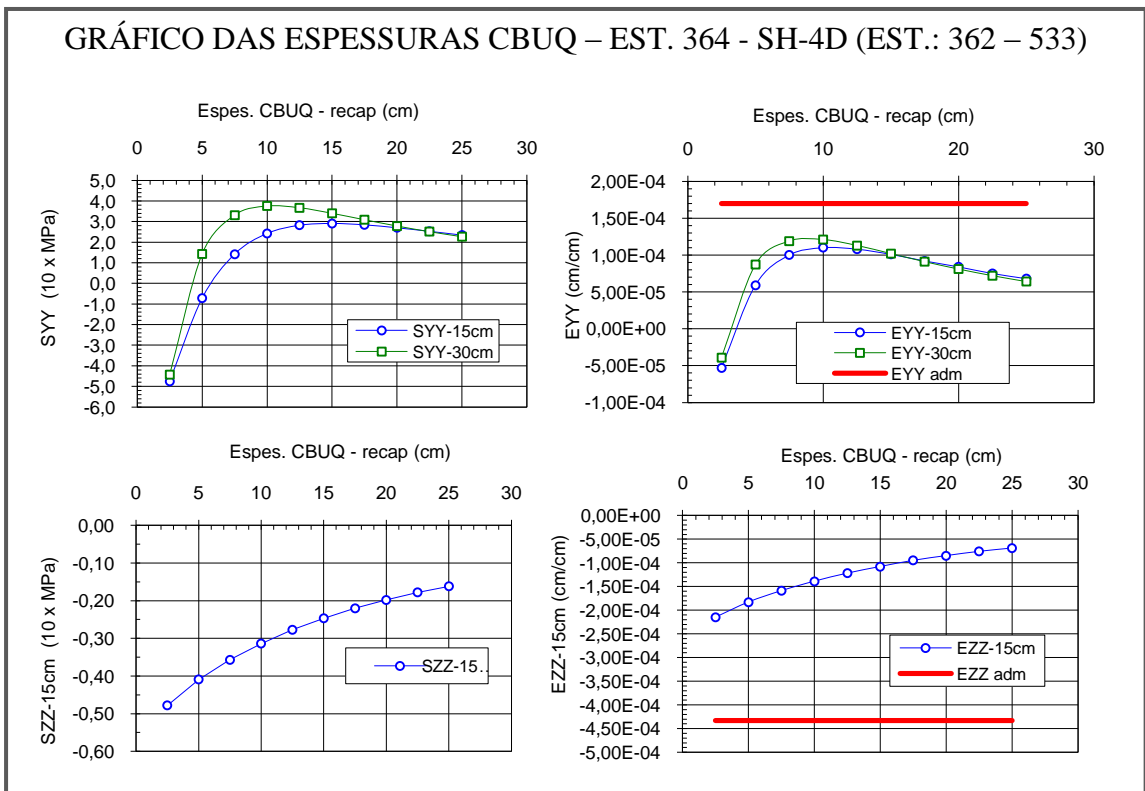


Figura 5.4 - Espessuras do CBUQ – Est. 364 – SH-4D - Est.: 362 - 533 (DER/MG, 2010).

GRÁFICO DAS ESPESSURAS DO CBUQ – EST. 367 - SH-4E (EST.: 362 – 533)

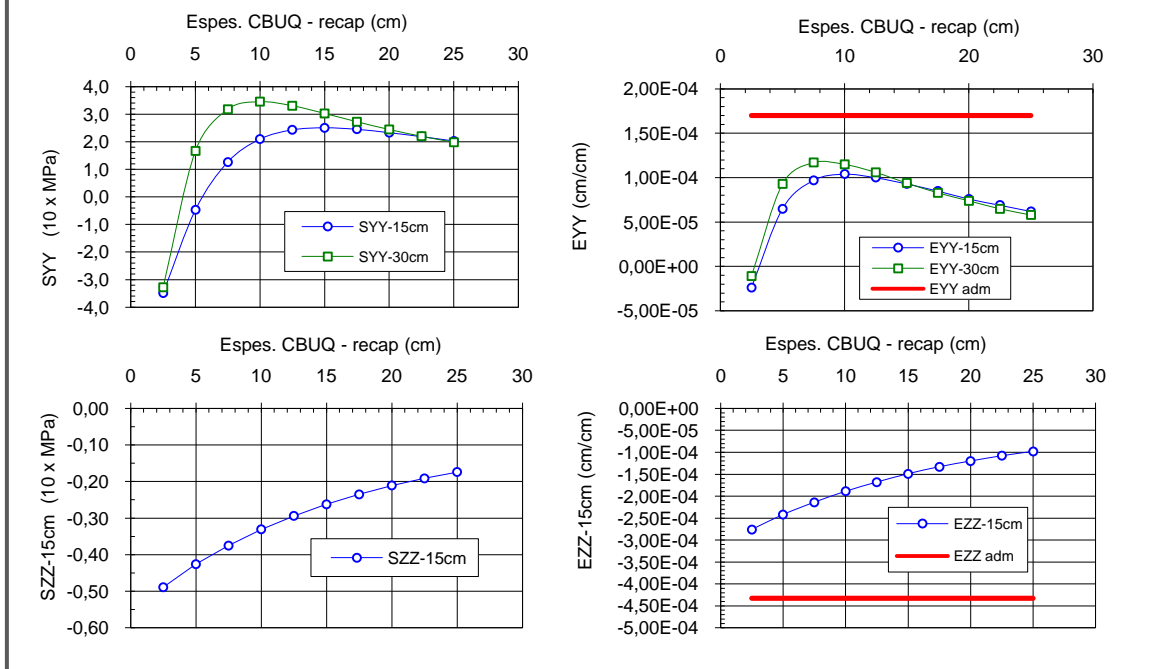


Figura 5.5 - Espessuras do CBUQ – Est. 367 – SH-4E - Est.: 362 - 533 (DER/MG, 2010).

GRÁFICO DAS ESPESSURAS DO CBUQ – EST. 535 - SH- 5E (EST.: 533 – 784)

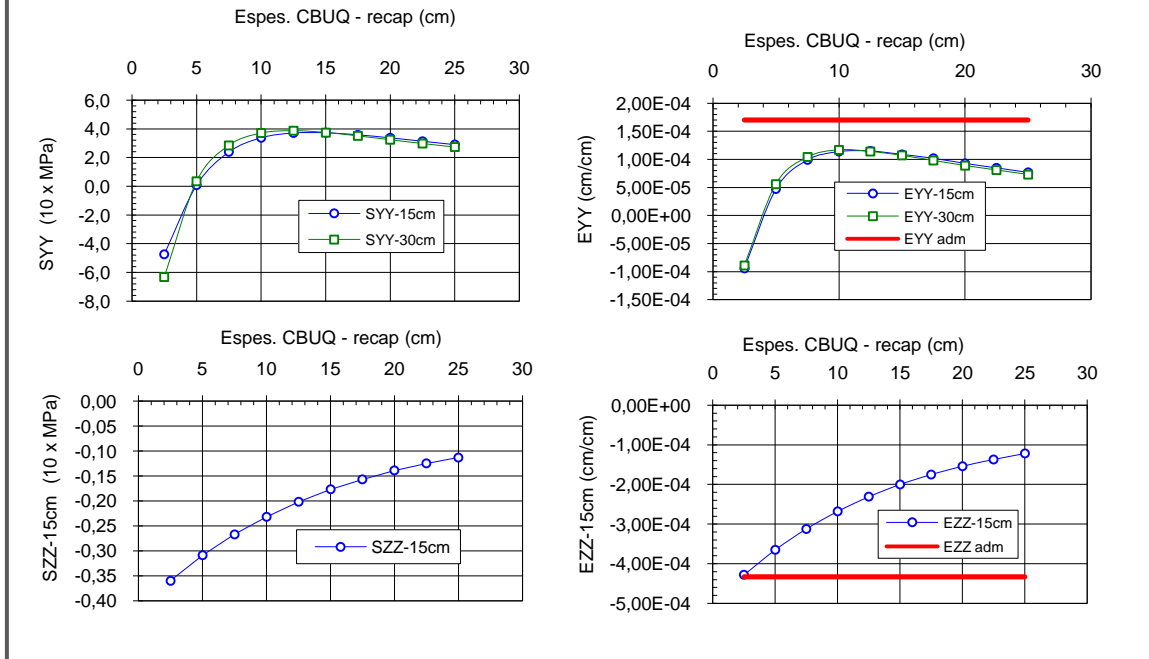


Figura 5.6 - Espessuras do CBUQ – Est. 535 – SH-5E - Est.: 533 - 784 (DER/MG, 2010).

GRÁFICO DAS ESPESSURAS DO CBUQ – EST. 538 - SH- 5D (EST.: 533 – 784)

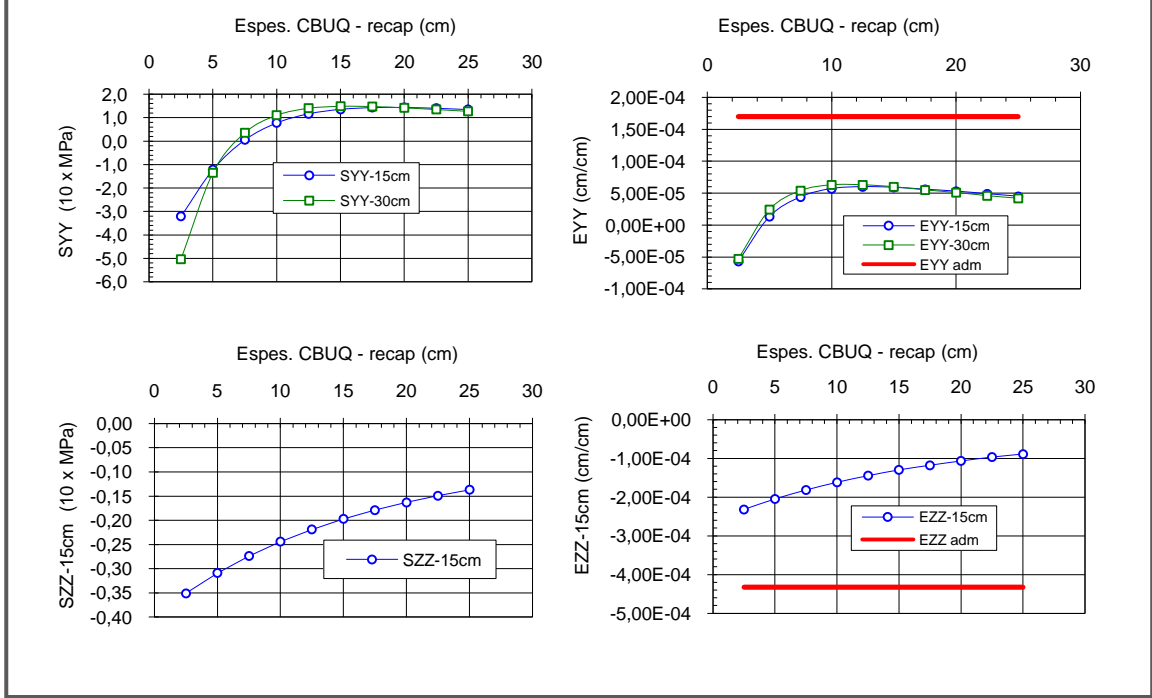


Figura 5.7 - Espessuras do CBUQ – Est. 538 – SH-5D - Est.: 533 - 784 (DER/MG, 2010).

GRÁFICO DAS ESPESSURAS DO CBUQ – EST. 709 - SH- 5E (EST.: 533 – 784)

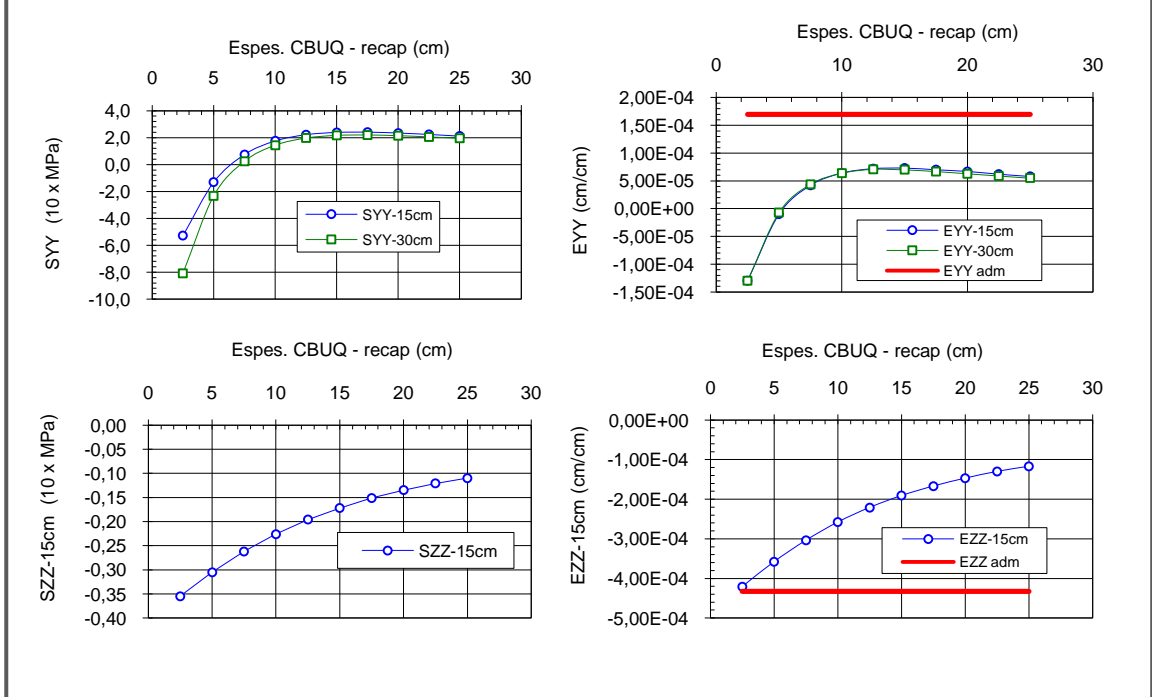


Figura 5.8 - Espessuras do CBUQ – Est. 709 – SH-5E - Est.: 533 - 784 (DER/MG, 2010).

Pode-se observar pelo exemplo do SH-5D - estaca 718, através das deformações na estrutura geradas no topo do subleito (ϵ_v), que nesse local o pavimento necessitará receber reforço estrutural. Pelos gráficos das deformações horizontais na face inferior do CBUQ - EYY (15 e 30) cm e verticais no topo do subleito (EZZ-15 cm), integrantes da Figura 5.9, verifica-se que a curva de deformação relativa aos esforços horizontais gerados na face inferior do recapeamento, não ultrapassou o limite admissível, não seccionando a reta EYY-15 cm e EYY-30 cm. Entretanto, a curva de deformação dos esforços verticais não tem comportamento semelhante, a mesma intercepta a reta do limite admissível das deformações geradas pelos esforços verticais no topo do subleito. Espessuras inferiores a 7cm de reforço em CBUQ não atenderão ao projeto (10 anos). Todavia em toda a extensão do SH-1, onde o pavimento é composto por camada de base em escória de aciaria LD sem adição de argila, não foi constatado necessidade de reforço estrutural do pavimento, sendo facultado a execução de lama asfáltica ou TSD, com a finalidade de promover o rejuvenescimento do pavimento (recuperação funcional do pavimento). Nos demais SH com a base construída em escória de aciaria pura e com adição de 20% de argila, poucos subtrechos necessitam de reforço estrutural, conforme demonstrado pelos Anexo X, páginas: X.1, X.4, X.5, X.6 e X.7.

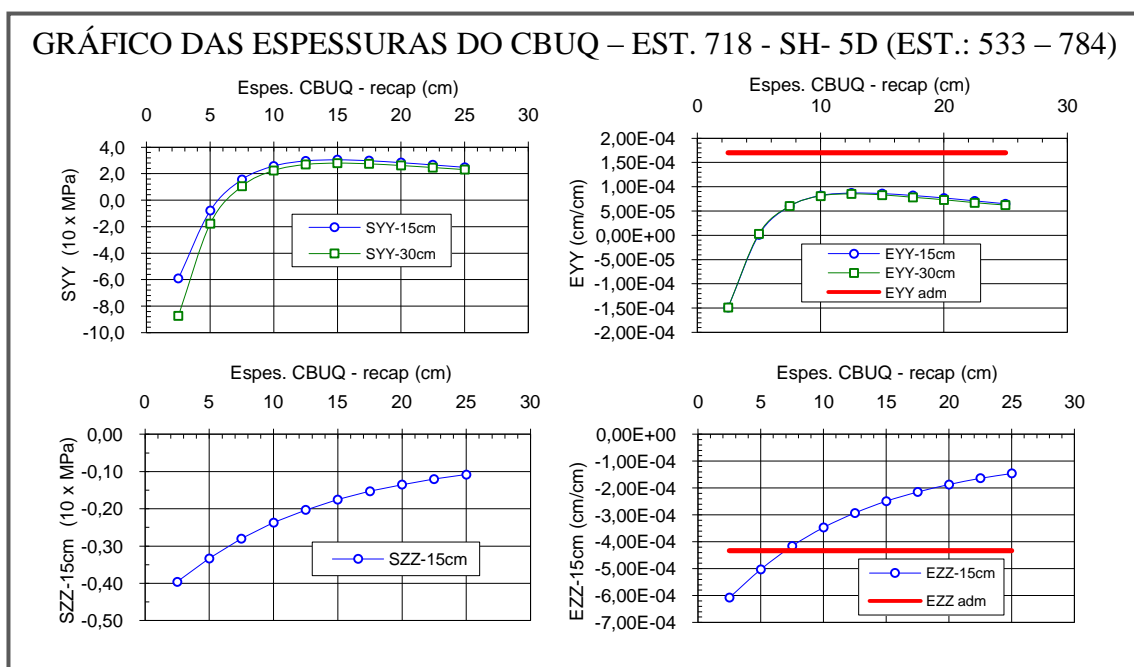


Figura 5.9 - Espessuras do CBUQ – Est. 718 – SH-5D - Est.: 533 - 784 (DER/MG, 2010).

Nos subtrechos, onde os pavimentos dos segmentos homogêneos são constituídos pelas respectivas camadas de base e sub-base, confeccionadas em cascalho SH-3 (Anexo X) páginas X.2 e X.3 e SH-6 (Anexo X) páginas X.8 e X.9 também foi constatado um bom comportamento da estrutura. Mas comparando-os com aqueles SH que possuem as camadas de bases executadas em escória de aciaria, tanto pura como com adição de 20% de argila, estes segmentos, com as camadas de bases confeccionadas em cascalho, apresentam-se mais deficitários. Tanto no SH-3 como no SH-6 o pavimento demonstra necessitar da execução do reforço estrutural em maiores extensões e em escalas superiores do que as determinadas para os SH-1, SH-4 e SH-5, segmentos com a base executada em escória de aciaria e escória de aciaria com adição de vinte por cento de argila.

As curvas EYY 15 cm e EYY 30 cm destes segmentos três e seis, superaram os limites de EYY adm "Deformação específica horizontal de tração, máxima admissível, na face inferior do reforço" em poucas estacas, porém não ocorre o mesmo com as curvas EZZ 15 cm, nestes dois referidos SH, com a base confeccionada em cascalho, para o devido atendimento às demandas do período de projeto, haverá necessidade do reforço estrutural em praticamente toda a extensão dos mesmos, pois as curvas EZZ 15 cm interceptam o limite de EZZ (ϵ_v) – Deformação específica vertical de compressão no topo do subleito.

Pelas páginas X.2 e X.3 do Anexo X pode-se constatar o que foi descrito sobre o SH-3, nas mesmas encontram-se a relação das estacas onde o pavimento necessitará receber o reforço estrutural, com a espessura variando entre (3 e 13) cm. As Figuras (5.10 e 5.11) com os gráficos das espessuras do reforço em CBUQ exemplificam a necessidade do referido reforço nas estacas (192 e 361) onde o pavimento necessitará receber o reforço de 3,0 cm em ambas as estacas e no SH-6 pelas Figuras (5.12, 5.13, 5.14 e 5.15) que igualmente retratam os gráficos das espessuras do reforço em CBUQ "Concreto Betuminoso Usinado a Quente", demonstram que estrutura precisará receber o reforço na espessura de 6 cm na estaca 787, de 9 cm nas estacas 790 e 961 e de 12 cm de reforço e na estaca 970.

GRÁFICO DAS ESPESSURAS DO CBUQ – EST. 192 - SH-3D (EST.: 92 – 362)

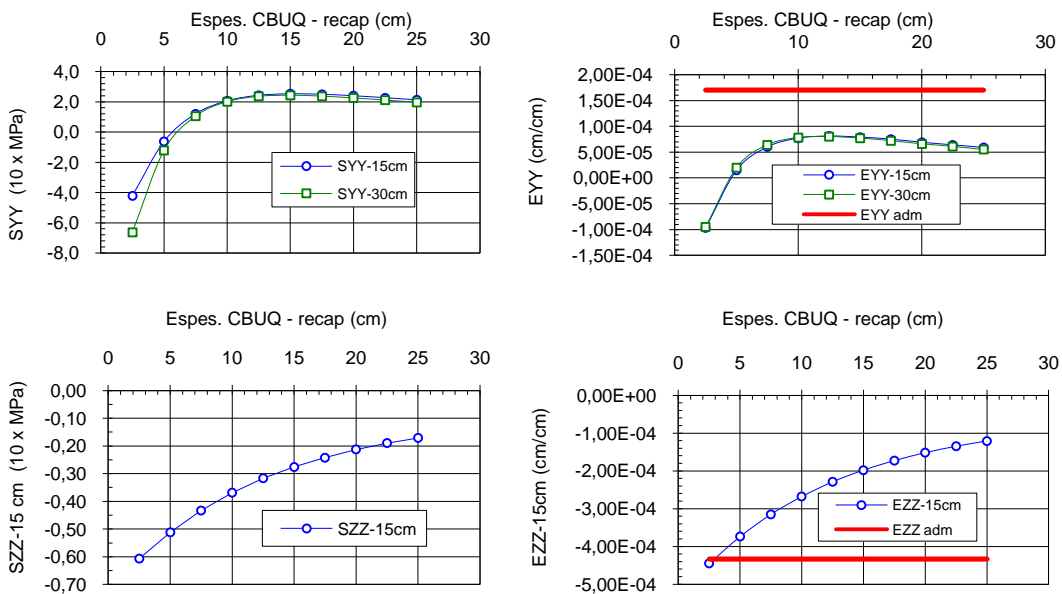


Figura 5.10 - Espessuras do CBUQ – Est. 192 – SH-3D - Est.: 192 - 362 (DER/MG, 2010).

GRÁFICO DAS ESPESSURAS DO CBUQ – EST. 361 - SH-3E (EST.: 192 – 362)

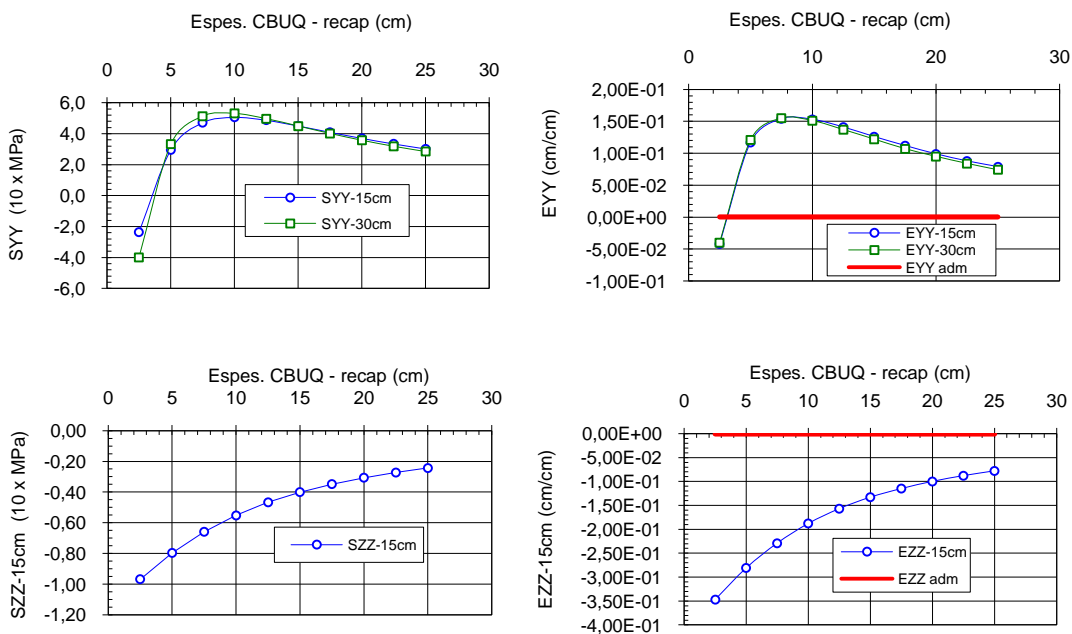


Figura 5.11 - Espessuras do CBUQ – Est. 361 – SH-3E - Est.: 192 - 362 (DER/MG, 2010).

GRÁFICO DAS ESPESSURAS DO CBUQ – EST. 787 - SH-6E (EST.: 784 – 1000)

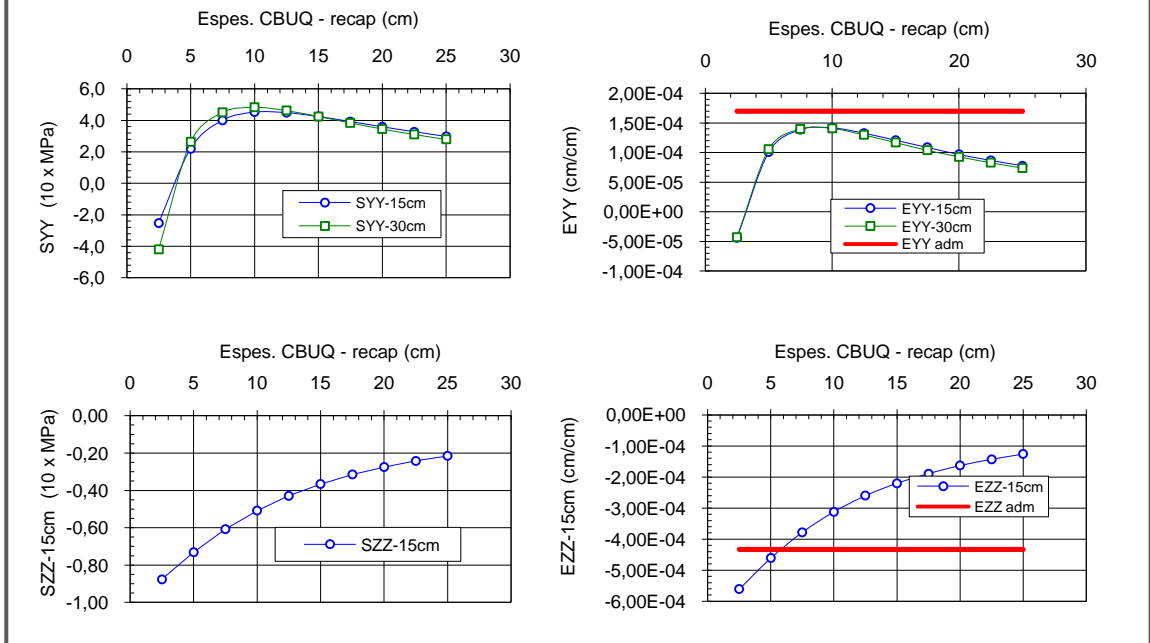


Figura 5.12 - Espessuras do CBUQ – Est. 787 – SH-6E - Est.: 784 - 1000 (DER/MG, 2010).

GRÁFICO DAS ESPESSURAS DO CBUQ – EST. 790 - SH-6D (EST.: 784 - 1000)

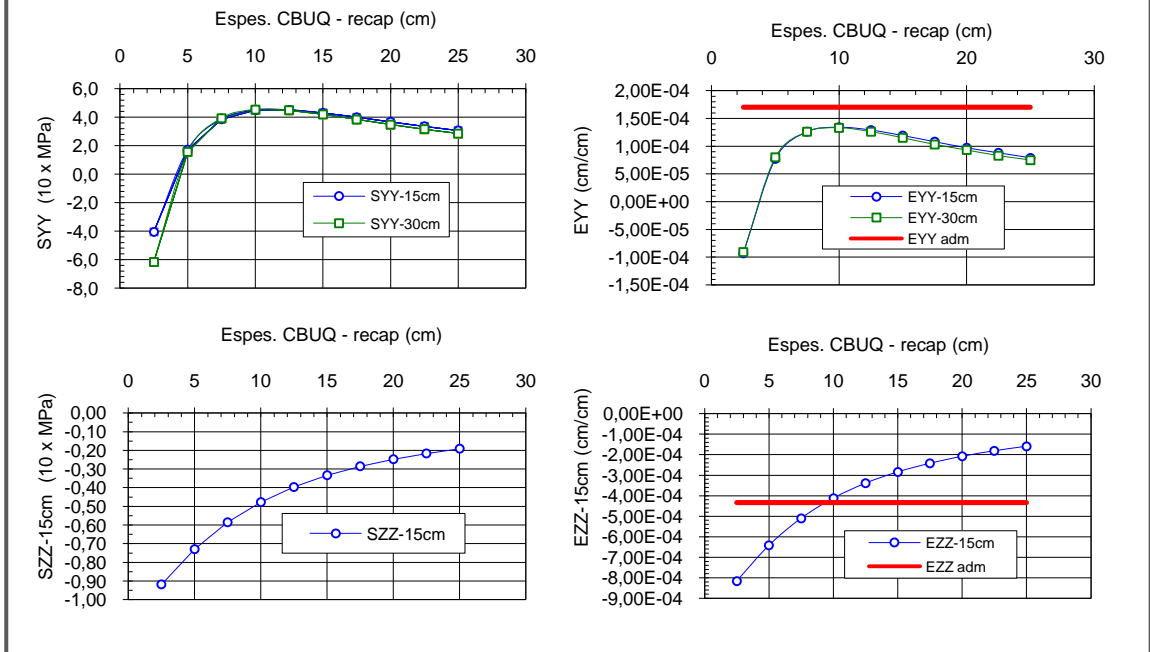


Figura 5.13 - Espessuras do CBUQ – Est. 790 – SH-6D - Est.: 784 - 1000 (DER/MG, 2010).

GRÁFICO DAAS ESPESSURAS DO CBUQ – EST. 961- SH-6E (EST.: 784 - 1000)

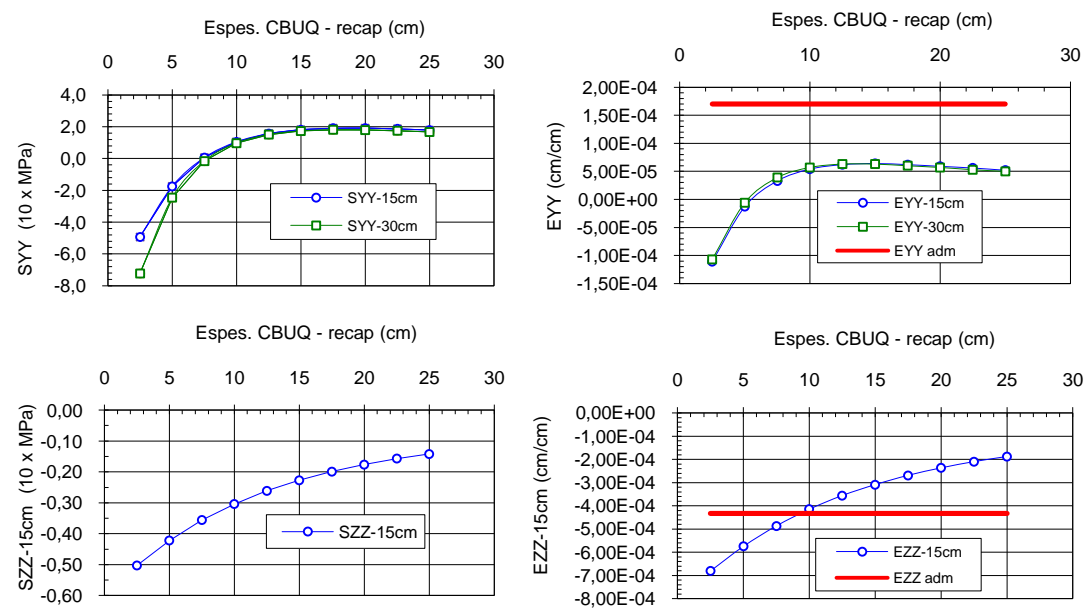


Figura 5.14 - Espessuras do CBUQ – Est. 961 – SH-6E - Est.: 784 - 1000 (DER/MG, 2010).

GRÁFICO DAS ESPESSURAS DO CBUQ – EST. 970 - SH-6D (EST.: 784 - 1000)

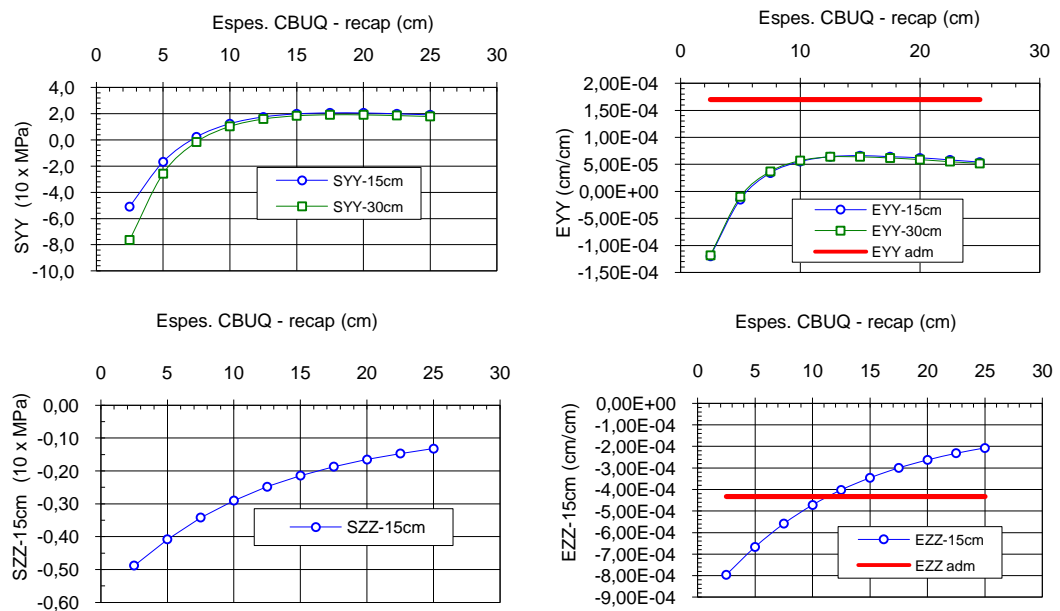


Figura 5.15 - Espessuras do CBUQ – Est. 970 – SH-6D - Est.: 784 - 1000 (DER/MG, 2010).

Em suma, os resultados apresentados com referencia ao projeto do reforço estrutural executado para o pavimento da MG-232 no trecho: Mesquita - Santana do Paraíso com previsão de vida útil de dez anos (2010 - 2020), o comportamento geotécnico do pavimento nos segmentos executados em escória de aciaria pura e com adição de 20% de argila foi mais eficaz. As camadas do reforço estrutural, necessárias para suportar o período de projeto, são espessas e necessitam serem aplicadas em maiores extensões nos subtrechos com base executada em cascalho. Desta forma, constata-se a eficiência e a eficácia da utilização da escória de aciaria LD na confecção da camada de base rodoviária.

Como sugestão para novos estudos, envolvendo a aplicação da escória de aciaria em rodovias, seria interessante que os mesmos fossem desenvolvidos visando analisar o comportamento da escória de aciaria nas atividades inerentes a manutenção rodoviária, ou seja, trabalhos de reconformação da plataforma, tapa panelas, remendos profundos, tapa buracos, etc. Por se tratar de uma área que demanda constantes aportes de recursos, principalmente para aquisição de agregados, nem sempre disponibilizados conforme a demanda, a escória de aciaria apresenta-se como excelente alternativa para suprir esta carência. Em determinados casos, o custo consiste apenas no transporte, pois as siderúrgicas disponibilizam a escória sem custos, devido a necessidade da liberação dos seus pátios para atendimento as imposições dos órgãos ambientais. Tecnicamente, desde que devidamente controlado, este coproduto da fabricação do aço é extremamente viável para a construção de base rodoviária, conforme demonstrado por esta dissertação. Desta forma, este coproduto da fabricação do aço, evidencia potencialidade para apresentar um bom comportamento ao ser utilizada como agregado nas atividades rodoviárias sugeridas para estudo. Atualmente não é tarefa fácil obter materiais naturais que atendam simultaneamente aos requisitos geotécnicos, ambientais e logísticos, em volume e custos adequados para suprir as necessidades geradas nos trabalhos de manutenção rodoviária, que por natureza são contínuos e rotineiros.

Observado dentro do contexto atual, o estudo da utilização da escória de aciaria em obras rodoviárias, se evidencia com relevância e tempestividade, tanto aqueles orientados para as retrocitadas atividades de manutenção, quanto os direcionados para

as obras de pavimentação. Tal atributo se deve as características do material, pois a escória de aciaria reciclada é originada de um subproduto considerado passivo ambiental nos depósitos das siderúrgicas, desta forma sua utilização nas referidas obras, á transforma em um valioso coproduto do aço, harmonizado com as atuais políticas ambientais de um ecossistema equilibrado e sustentável.

Assim sendo, pode-se afirmar tanto do ponto de vista técnico, quanto logístico que a escória de aciaria é uma excelente opção para a confecção de sub-bases e bases rodoviárias, em detrimento ao uso do material natural, o cascalho, porém não é aconselhável, seu emprego sem os devidos controles, principalmente, o da expansão volumétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERNAZ, Claudio Angelo Valadão. O apoio do DER/MG às Universidades. *Tribuna do Rodoviário*, Belo Horizonte, n. 22, p. 3 – 4, jul. de 2008.

_____. *Dimensionamento mecânico de pavimentos asfálticos: conceitos e sistemática de cálculo*. Belo Horizonte: abr. de 2010. 38 p.

ALBERNAZ, Claudio A. Valadão *et al.* Pavimentos de alto desempenho estrutural executado com escória de aciaria. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, n.10, 2000, Uberlândia, MG. *Anais...* Associação Brasileira de Pavimentação, 2000. 26 p. (CD-ROM).

ANTUNES, Fernando Felipe L. et al. Influência dos agregados nas diferentes fontes nas misturas asfálticas. In; REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, n.16, 2009, Belo Horizonte, MG. *Anais...* Associação Brasileira de Pavimentação, 2009. 10 p. (CD-ROM).

AMARAL, L. A. *Hormigones con escorias de horno eléctrico como aridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental*. 230 f. (Tese de doutorado). Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 1999 *apud* POLESE, Mariana de Oliveira. *Estudo da expansibilidade e da microestrutura de escórias de aciaria LD e EAF*. 271 f. (Dissertação mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *C 151/93*: Standard test method for autoclave expansion of Portland cement. Philadelphia, 1993.

_____. *D 4792*: Avaliação da expansão dos agregados. 1995. 2 p.

_____. *D 5858/96*: Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. *63º Congresso anual, jul. 2008*. Disponível em < <http://www.abmbrasil.com.br>>. Acessado em 10 de jan. de 2009.

ANDRADE, Maria Lúcia Amarante; CUNHA, Luiz Maurício da Silva & GANDRA, Guilherme Tavares. *A Ascensão da Mini-Mills no Cenário Mundial*. Disponível em: < <http://www.MINI-MILLS+maria+lucia+amarante>> Acessado em 15 de mar. 2009.

ARAÚJO, L. A. *Manual de Siderurgia*. 1 ed. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997. v. 1. 470 p.

ARCELORMITTAL - COMPANHIA SIDERURGICA TUBARÃO - *História da siderurgia*. Disponível em: <http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_aciaria>. Acessado em 06 de jun. de 2009.

ARCELORMITTAL- TUBARÃO (CST). ArcelorMittal - Aços Planos. Disponível em < <http://www.arcelormittal.com/br/tubarao/>> acessado em 10 Mar. de 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR-NM 51*– Agregados – determinação da abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2001. 6 p.

_____. *NBR 5734*: Peneiras para ensaio. Rio de Janeiro, 1989. 5 p.

_____. *NBR 6457*: Amostras de solos - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.

_____. *NBR 6459 b*: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984. 6 p.

_____. *NBR 6508*: Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984. 8 p.

_____. *NBR 7180*: Limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984. 3 p.

_____. *NBR 7181 b*: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

_____. *NBR 7182 a*: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10 p.

_____. *NBR 7183*: Determinação do limite e relação de contração de solos. Rio de Janeiro, 1982. 3 p.

_____. *NBR 8547*: Pavimentos flexíveis e semirrígidos – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1984. 7 p.

_____. *NBR 9895*: Índice de suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987. 14 p.

_____. *NBR 10004*: – Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro 2004. 71 p.

_____. *NBR 10005 c*: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 16 p.

_____. *NBR 10006*: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004. 3 p.

_____. *NBR 10007*: Resíduos sólidos – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 21 p.

_____. *NBR 11582*: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 1991. 2 p.

_____. *NBR 11804*: Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente. Rio de Janeiro, 1991. 3 p.

BALTAZAR, R. P. *Caracterização do fator de expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação*. 93 f. (Dissertação de mestrado em engenharia). Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2001.

BERNUCCI, Liedi Bariani; *et al.* *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2007. 501p.

BLEICHER, L. & SASAKI, J. M. *Introdução à difração de raios-X em cristais*. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2000 *apud* CASTELO BRANCO, Verônica Teixeira Franco. *Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado*. 135 p. (Dissertação de mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

BOLETIM TÉCNICO DA CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. Dados referentes a abr. de 2008. 2 p. Disponível em: < <http://sistemacnt.cnt.org.br> > acessado em dez. de 2008.

BORGES, Rodrigo César Neiva. Regulamentação sobre obras de pavimentação rodoviária. *Consultoria legislativa; desenvolvimento urbano, trânsito e transportes*. Brasília, out. 2008. 14 p.

BORTOLETTI A. C. R., *et al.* Noções básicas sobre agregados, ligantes e misturas betuminosas. *Publicação técnica*. DER/MG-DP/DMA-DMA1. 83 p. Belo Horizonte, sd.

BRASIL. Congresso Nacional. *Lei Federal 9605* de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. In: Acquaviva, M. C. *Vade mecum da Legislação Pátria 2004*. 5. ed. São Paulo: Jurídica Brasileira, 2004. p. 1062 - 1067.

BRASIL. Constituição (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil*. Art. 225, capítulo seis do Meio Ambiente, referenciado no título oitavo, da Ordem Social da Constituição Federal, 05 de out. de 1988. In: Pinto A. L. de T. *et al.* *Coleção Saraiva de Legislação*. Constituição da República Federativa do Brasil. 42. ed. São Paulo: Saraiva, 2009. p. 159 - 161.

BRASIL. *Lei Federal n. 6938* de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. In: *Vade mecum RT 2009*. 4. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2009. p. 1396 - 1401.

BRUN, D. W. & YUAN, W. C. Caracterização e aproveitamento dos resíduos siderúrgicos principais gerados pela aciaria elétrica. In: PPGEMM/UFRGS, Seminário da disciplina MTMD99- Tópicos especiais – resíduos industriais siderúrgicos: caracterização e aproveitamento. UFRGS, *Anais...* Porto Alegre, 1994 34 p. *apud* GEYER, Rejane Maria Tubino. *Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de*

aciaria como adição ao concreto. 169 f. (Tese de doutorado em engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

BUZATTI, Dauro José. Confronto entre dois métodos de medidas de deflexão pela viga Benkelman. *Publicação técnica*. ANT/DER/MG, Belo Horizonte, n. 20, p. 171 - 188, set. 1984.

_____. Programa computacional SYSBEINC: Modelos provisionais de variáveis para análise mecânica de pavimentos flexíveis, versão 2.0, 1998.

_____. Índice de abrasão Los Angeles e índice de degradação; análise comparativa para diversas naturezas de agregados. . *Publicação técnica - ANT/DER/MG*, Belo Horizonte, n. 23, p. 5 - 21. dez. 1987.

CARACIOLO, Patrícia Maria de Magalhães. *Apostila de legislação ambiental sobre licenciamento e fiscalização*. Ministério do Meio Ambiente. Programa Nacional do Meio Ambiente. Disponível em: < http://www.portaldomeioambiente.org.br/JMA-txt_importante/downloads/apostila-legislacao.pdf >. Acessado em 10 de Nov. 2008.

CASTELATO, Lúcia. Ações institucionais da siderurgia brasileira para disseminação do uso das escórias de aciaria. In: *Workshop – Gerenciamento de resíduos sólidos no setor minero-metalúrgico – IBS*. Rio de Janeiro, 24 de Nov. de 2004.

CASTELO BRANCO, Verônica Teixeira Franco. *Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado*. 135 p. (Dissertação de mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CDTN)/CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA NUCLEAR CNEN)/SERVIÇO DE TECNOLOGIA MINERAL (SETEM). *Certificado de análise: SETEM E-0201/2009*. Belo Horizonte. 2 p.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. *Resolução 237* de 18 de dez. de 1997. Dispõe sobre o licenciamento ambiental, Of. n. 1006/1997. Brasília, 1997. 8p.

CORRÊA, Mauro L. T. *et al.* Avaliação do uso agrícola de escória de aciaria como corretivo e fertilizante de solos. In: *Seminário - Escória de aciaria - A excelência na utilização do material de múltiplas aplicações, 2003*. Anais... Universidade Federal de Viçosa & Companhia Siderúrgica de Tubarão. Vitória: jul. de 2003. 30 p.

DELOYE, F.X. *L'analyse du béton durci*. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. 1986 80 p. 1986 *apud* POLESE, Mariana de Oliveira. *Estudo da expansibilidade e da microestrutura de escórias de aciaria LD e EAF*. 271 f. (Dissertação mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2007.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS. *Acervo técnico 40ª CRG/DER/MG* - Fotografias trecho rodoviário MG-232 – Mesquita a Santana do Paraíso. Arquivo de fotografias disponível em CD-ROM.

_____. Análise mecânica - Retroanálise - Carregamento viga Benkelman. Determinação das espessuras válidas (programa RETRANS5-L) e esforços gerados na estrutura (programa ELSYM5). Belo Horizonte, 2010. 286 p.

_____. Assessoria de Normas Técnicas. Vice Diretoria Geral do DER/MG. Cálculo das deflexões características nos projetos de recuperação de pavimentos (SISBENK). *Publicação técnica do DER/MG*, Belo Horizonte, n.16, p. 189 - 211, nov. 1980.

_____. *Deflectometria - RETRANS5-L*. Belo Horizonte, 2009. 239 p.

_____. *DMA-1/DER-MG/92*. Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria adaptação do PTM 130, Belo Horizonte, 1992. 8 p.

_____. *IT-01.11*: Instrução para pesquisa e amostragem de jazidas. Belo Horizonte, 1992. 7 p.

_____. *IT-01.12*: Sondagens e amostragem de solos de subleito e determinação da profundidade do lençol freático. Belo Horizonte, 1992. 4 p.

_____. *IT-01.30*: Estudos geotécnicos em projetos rodoviários. Belo Horizonte, 1992. 3 p.

_____. *IT-01.42*: Formação de Amostras de Agregados. Belo Horizonte, 1992. 4 p.

_____. NÚCLEOS DE LABORATÓRIOS - DP/GEM/NLB. *Relatório 034/2009 - Rodovia MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso*. Belo Horizonte, 2009. 9 p.

_____. NÚCLEOS DE LABORATÓRIOS - DP/GEM/NLB. *Resultado de ensaios - Rodovia MG-232 - Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso*. Belo Horizonte, 2009. 10 p.

_____. *MT-01.02*: Preparação de amostras de solos destinados aos ensaios de caracterização. Belo Horizonte, 1992. 4 p.

_____. *MT-01.03a*: Absorção e massa específica aparente e real dos grãos de solos. Belo Horizonte, 1992. 6 p.

_____. *MT-01.04*: Compactação de solos. Belo Horizonte, 1992. 7 p.

_____. *MT-01.05*: Limite de liquidez de solos. Belo Horizonte, 1992. 6 p.

_____. *MT-01.06*: Limite de plasticidade de solos. Belo Horizonte, 1992. 2 p.

_____. *MT-01.08*: Análise granulométrica de solos por peneiramento. Belo Horizonte, 1992. 4 p.

_____. *MT-01.09a*: Ensaio de compactação e índice de suporte Califórnia (CBR). Belo Horizonte, 1992. 12 p.

_____. *MT-01.15*: Dimensionamento de pavimentos flexíveis pelo índice de suporte Califórnia. Belo Horizonte, 1992. 7 p.

_____. *MT-01.43*: Desgaste de agregados por abrasão. Belo Horizonte, 1992. 5 p.

_____. *MT-01.45*: Densidade de agregado graúdo. Belo Horizonte, 1992. 3 p.

_____. *MT-01.46*: Densidade real do agregado miúdo. Belo Horizonte, 1992. 3 p.

_____. *MT-01.47*: Massa específica real de material finamente pulverizado. Belo Horizonte, 1992. 3 p.

_____. *MT-01.48*: Análise de agregados. Belo Horizonte, 1992. 3 p.

_____. *MT-01.49*: Índice de Forma de Agregados. Belo Horizonte, 1992. 3 p.

_____. *MT-01.58b*: Definição das condições para execução de compactação de solos. Belo Horizonte, 1992. 7 p.

_____. Projeção do VMDAT e do número N para a MG 232 – Mesquita/Santana do Paraíso, Belo Horizonte, 2010. 1 p.

_____. *RT-01.13a*: Estabilização granulométrica de solos. Belo Horizonte, 1992. 6 p.

_____. *RT-02.28.c*: Controle deflectométrico na execução de camadas de pavimentos através da viga Benkelman, Belo Horizonte, 2004. 13 p.

_____. *RT-01.29c*: Avaliação da energia de compactação para as condições de estabilização mecânica de solos. Belo Horizonte, 1992. 5 p.

_____. VD/ANT-DER/MG. *IT-01.01a*: Recepção de amostras pelos laboratórios. Belo Horizonte, 1992. 5 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) - INSTITUTO ALEMÃO DE NORMALIZAÇÃO. *EN 1744-1*: Testes para propriedades químicas de agregados – análises químicas. Método acelerado da norma europeia. Ensaio de aceleração da hidratação dos óxidos expansivos por vapor Alemanha, 1998. 30 p.

DINIZ, Dayse Horta; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti; PADULA, Flávio Renato de Góes. O emprego de agregados de escória de aciaria na fabricação de blocos intertravados para pavimentação. *39ª RAP/13ª ENACOR*. Recife, set. de 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *EM 262/94*: Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

_____. *ES 303/97*: Pavimentação – base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997. 7 p.

_____. IPR. Disponível em < http://www.dnit.gov.br/menu/IPR/ipr/document_view > acessado em 15 de jan. de 2009.

_____. Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro, 1998. 359 p.

_____. *ME 024/94*: Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994. 6 p.

_____. *ME 029/94*: Solo – determinação de expansibilidade. Rio de Janeiro, 1994. 7 p.

_____. *ME 035/98*: Agregados – determinação da abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998. 6 p.

_____. *ME 041/94*: Solos – preparação das amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

_____. *ME 049/94*: Solos – determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994. 14 p.

_____. *ME 053/94*: Misturas betuminosas – percentagem de betume. Rio de Janeiro, 1994. 5 p.

_____. *ME 061/94*: Pavimento – delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994. 8 p.

_____. *ME 080/94*: Solos – análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

_____. *ME 081/98*: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998. 16 p.

_____. *ME 082/94*: Solos – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994. 3 p.

_____. *ME 084/95*: Agregado miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995. 3 p.

_____. *ME 086/94*: Agregado – determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994. 5 p.

_____. *ME 087/94*: Solos – determinação dos fatores de contração. Rio de Janeiro, 1994. 5 p.

_____. *ME 089/94*: Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro. 6 p.

_____. *ME 122/94*: Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito. Rio de Janeiro, 1994. 7 p.

_____. *ME 129/94*: Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994. 7 p.

_____. *ME 131/94*: Solos – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994. 8 p.

_____. *ME 133/94*: Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994. 5 p.

_____. *ME 138/94*: Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

_____. *ME 152/95*: Agregado em estado solto – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1995. 3 p.

_____. *ME 194/98*: Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998. 4 p.

_____. *MT-DNER - EM 260/94*: escórias de alto-forno para pavimentos rodoviários. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

_____. *PRO 002/94*: Coleta de amostras indeformadas de solos. Rio de Janeiro, 1994. 12 p.

_____. *PRO 003/94*: Coletas de amostras deformadas de solos. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

_____. *PRO 006/03*: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos, Rio de Janeiro, 2003. 10 p.

_____. *PRO 175/94*: Aferição de viga Benkelman, Rio de Janeiro, 1994. 11 p.

_____. *PRO 120/97*: Coleta de amostras de agregados. Rio de Janeiro, 1997. 5 p.

_____. *PRO 261/94*: - Emprego de escórias de alto-forno em pavimentos rodoviários. Rio de Janeiro, 1994. 3 p.

_____. *PRO 263/94: Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários*. Rio de Janeiro, 1994. 3 p.

_____. *Resumo da Retroanálise*. Belo Horizonte, 2009. 114 p.
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. *Manual de Pavimentação*. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

_____. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. *Rede Rodoviária do PNV – Divisão em trechos 2010*. Rio de Janeiro, 2010. 383 p.

_____. *Norma DNIT/ES: Pavimentação rodoviária – Sub-Base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - ACERITA - Especificação de serviço*. Disponível em: < http://www1.dnit.gov.br/normas/download/Sub-base_acerita.pdf >. Acessado em 20 de jul. de 2009.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. *Novo dicionário da língua portuguesa*. 2 ed. rev. e aum. Rio de Janeiro: Nova Fronteira S.A. 1986. 1838 p.

FERNANDES, Gilberto. *Comportamento de estruturas de pavimentos ferroviários com utilização de solos finos e/ou resíduos de mineração de ferro associados à geossintéticos*. 253 p. (Tese de doutorado em geotecnia). Universidade de Brasília. Brasília, 2005.

FILEV, Rodrigo. *Escória de aciaria*. Ficha técnica. Universidade de São Paulo, 2002. Disponível em < http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm >. Acessado em 10 de maio. 2008.

FONSECA, Jorge Luiz Gomes da. *Um método de retroanálise de bacias de deflexão de pavimentos*. 150 p. (Dissertação de mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

FORTES, R. Moura. *Ensaio de resiliência ou triaxial de cargas repetidas ou dinâmico*. Universidade Mackenzie. Disponível em: < <http://www.mackenzie.com.br/rmfortes> >. Acessado em 29 de out. de 2009.

FRAENKEL, Benjamin B. *Engenharia rodoviária*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A, 1980. 852 p.

FRANÇA, Júnia Lessa & VASCONCELOS, Ana Cristina. *Manual para normalização de publicações técnico-Científicas*. 8 ed. Belo Horizonte, UFMG, 2008. 255 p.

FRANCO, Felipe Augusto Cinque de Proença. *Um sistema para análise mecânica de pavimentos asfálticos*. 171 f. (Dissertação de mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2000.

FREITAS, Hérica Braga de. *Misturas asfálticas de módulo elevado com uso de escória de aciaria como agregado*. 170 f. (Dissertação de mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

GEYER, Rejane Maria Tubino. *Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto*. 169 f. (Tese de doutorado em engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

GEYER, Rejane Maria Tubino et al. Adição da escória de aciaria no concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, n. 40. Ibracon, Rio de Janeiro, 1998 apud PENA, Délio Carmanhanes. *Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação*. 152 f. (Dissertação de mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2004.

GIMENES, Eduardo Antônio Mannato Sartório *et al.* Aplicação de Escória de Aciaria em Sub-Base e Base da ES-446. In; 39ª RAP/13º ENACOR. Recife, set. de 2008.

GONTIJO, P. R. A. Pavimentos Compostos com Escórias de Aciaria. *Revista Pavimentação*, ano 1, n. 3 Jul., 2006. p. 42-54 apud FREITAS, Hérica Braga de. *Misturas asfálticas de módulo elevado com uso de escória de aciaria como agregado*. 170 f. (Dissertação de mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

GRAFFITTI, Daniela Fernandes. *Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica*. 77 f. (Dissertação de mestrado em engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

GUMIERI, Adriana Guerra. *Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD com adição em cimentos*. 226 f. (Tese de doutorado em engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

GURMENDI, Alfredo C. *The Mineral Industry of Brazil*. US. Geological Survey Minerals Yearbook, Arquivo disponível em 1 CD-Rom. Doc. Microsoft compatível com Adobe Reader (PDF). 1999. 21 p.

INFOMET/PORTOS E NAVIOS. *O futuro do aço brasileiro*. apud METÁLICA - USIMINAS. Disponível em <<http://www.metallica.com.br/o-futuro-do-aco-brasileiro>>. Acessado em 29 de jun de 2010

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. *Dados estatísticos de 2008*. Disponível em < http://www.ibs.org.br/siderurgia_usos_fluxo.asp > acessado em 20 de jan. de 2009.

INSTITUTO DO ASFALTO. *Estimativa do módulo de resiliência (módulo de rigidez) de mistura asfáltica* apud ALBERNAZ, C. A. V. *Dimensionamento mecânico de*

pavimentos asfálticos: conceitos e sistemática de cálculo. Belo Horizonte: abr. de 2010. 38 p.

INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE (Instituto Internacional do Ferro e do Aço). *Dados estatísticos de out. de 2008 apud* INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. *Estatísticas nov.2008*. Disponível em <www.ibs.org.br/estatisticas>. Acessado 20 de nov. de 2008.

INSTITUTO LATINO AMERICANO DO FERRO E AÇO. *Produção de aço bruto da América Latina out. 2008, apud* INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. *Estatísticas nov.2008*. Disponível em <<http://www.ibs.org.br/estatisticas>>. Acessado 20 de nov. de 2008.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS - *JIS R 2211*: Test method for hydration resistance of basic bricks. Japão, 1991.

_____. *JIS A 5015*: Slag for Road construction. Escória siderúrgica para construção de estradas. Japão, 1992.

JUNIOR, Joacy Demétrio de Souza. *O efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do Estado do Ceará*. 211 f. (Mestrado em engenharia de transportes) Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2005.

KALYONCU R. S. *Iron and Steel Slag U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries*. 2001. p. 88 -89 *apud* NASCIMENTO, José Flávio *et al. Estudo da expansibilidade da escória de aciaria para uso em pavimentação rodoviária*. 163 f. (Dissertação de mestrado em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos – área de concentração: meio ambiente). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2003.

LANA, Paulo. *Escória de aciaria*. Excelência na utilização. Arquivo disponível em 1 CD-Rom. Doc. Microsoft Word compatível com PowerPoint. 38 p.

LANGE, Lisete Celina & NASCIMENTO, José Flávio. Escória de Aciaria Alternativa Econômica e Ambientalmente Adequada para Obras de Pavimentação e Conservação Rodoviária, *Revista Vias Gerais*, Belo Horizonte, p. 37 - 41, fev. de 2005.

LEONARDO, Alessandro. *Reciclagem de escória cristalizada para a produção de argamassas*. 68 f. (Dissertação de mestrado em ciência dos materiais para engenharia – área de concentração: polímeros e cerâmicas). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2006.

MACEDO, José Afonso Gonçalves de. *Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis*. 456 f. (Tese de doutorado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, dez. 1996.

MACHADO, Alexandre Teixeira. *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria*. 135 f. (Dissertação de mestrado em engenharia – área de concentração: engenharia de construção civil). Universidade de São Paulo. São Paulo, Nov. 2000.

MALYNOWSKYJ, A. Fabricação de aço líquido em conversor a oxigênio. *Curso Siderurgia para não Siderurgistas*. Programa de Educação Continuada. Associação Brasileira de Metalurgia. São Paulo, 06 a 10 de março de 2006 *apud* RODRIGUES, Gisele Lopes Carreiro. *Caracterização e avaliação da expansibilidade de escória de aciaria LD não tratadas e tratadas*. f. 20 (Dissertação de mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

MASUERO, Ângela Borges; DALL MOLIN, Denise Carpena Coutinho; VILELA, Antônio César Faria. *Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica*; (Stabilization and technical feasibility of electric steel slag). Disponível em: < http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=4>. Acessado em 10 de fev. de 2009.

MASUERO, A. Borges; DALL MOLIN, D. C. Coutinho; VILELA, A. C. Faria. *Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica*. In: *Ambiente Construído*. v.4, n.2, p. 57 – 81. Porto Alegre, 2004 *apud* POLESE, Mariana de Oliveira. *Estudo da expansibilidade e da microestrutura de escórias de aciaria LD e EAF*. 271 f. (Dissertação mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2007.

MEDINA, Jacques & MOTTA, Laura Maria Goretti da. *Mecânica dos pavimentos*, 2. ed., Rio de Janeiro: Imagemaker Interative, 2005. 570 p.

MENDES, João Batista de carvalho. Compactação de solos; condições de execução. *Publicação técnica*. ANT/DER/MG, Belo Horizonte, n.16, p. 7-101, Nov. 1980.

_____. *Estabilização Mecânica dos Solos*. *Publicação técnica*. ANT/DER/MG, Belo Horizonte, n. 18, p. 7-24, dez. 1982.

MENDONÇA, Ronaldo Lacourt de; RODRIGUES, Gisele Lopes Carreiro; ALVES, José Nilson. Utilização de Escória de Aciaria como Revestimento Primário. 39^a RAPv/13^o ENACOR. Recife, set. de 2008.

METSOL, M. G. et al. *Steel Processing. Parceria International Iron and Steel Institute /The University of Liverpool*. E-larning disponível em www.steeluniversity.org. Acessado em fevereiro de 2007. *apud* POLESE, Mariana de Oliveira. *Estudo da expansibilidade e da microestrutura de escórias de aciaria LD e EAF*. 271 f. (Dissertação mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2007.

MINITECNOLOGIAS - PROCESSOS DE MINITECNOLOGIAS. Disponível em: < <http://www.minitecnologias.com.br/processos.html>> Acessado em: 22 de maio de 2009.

MONTEIRO, Antonio José L. C. Legislação Ambiental. *Publicação de técnica jurídica Pinheiro Neto Advogados*. São Paulo, jan. de 2007. 5 p.

MOORE, J. J. *Chemical metallurgy*. 2 ed. Colorado. Departamento of Metallurgical Engineering, 1990. 435 p. *apud* GRAFFITTI, Daniela Fernandes. *Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica*. 77 f. (Dissertação de mestrado em engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

MOREIRA, Dimas Bahiense & LANA, Marcelo Fernandes de. *A geração da escória de aciaria LD pelo método de convertedor com sopro de oxigênio*. Companhia Siderúrgica Tubarão, 2003. 16 p. Disponível em: <<http://www.cst.com.br/bahiense/fernandes>> Acessado em fev. 2009.

MORISHITA, S.; KOIDE, H. & KOMAI, K. The development of a new aging process of steel-making slag, Sumimoto Metal Industries & Kawasaki Heavy Industries, Japão.1995.

MOTZ, H & GEISELER, J. *Products of steel slag an opportunity to save natural resources*, In: Waste Management 21, Duisburg, Alemanha, 2001, p. 285-293 *apud* RODRIGUES, Gisele Lopes Carreiro. *Caracterização e avaliação da expansibilidade de escória de aciaria LD não tratadas e tratadas*. 147 f. (Dissertação de mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

NASCIMENTO, José Flávio. *Estudo da expansibilidade da escória de aciaria para uso em pavimentação rodoviária*. 163 f. (Dissertação de mestrado em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos – área de concentração: meio ambiente). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2003.

NÓBREGA, Eduardo Suassuna. *Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos*. 365 f. (Dissertação de mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos & BRITO, Sérgio Nertan Alves de. *Geologia de engenharia*. São Paulo: ABGE: Oficina de Textos, 1998. 587 p.

OLIVEIRA, Fábio Uliana de. *Avaliação de três métodos de ensaio para determinação do potencial de expansão de escória de aciaria para uso em pavimentação*. 141 f. (Dissertação de mestrado em engenharia). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

PADULA, Flávio Renato Góes. *Ensaio de laboratório em materiais para pavimentos*. Belo Horizonte, 2007. 1 CD PowerPoint for Windows.

PAIVA, Germano Mendes de. *Posições na mineração*. Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais. Disponível em: < <http://www.bdmg.gov.br/estudos/arquivo/minas21/vol05completo.pdf> >. Acessado em 10 de jan. de 2009.

PARENTE, Everton Bezerra; BOAVISTA, Álvaro Holanda; SOARES, Jorge Barbosa. *Estudo do comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção rodoviária na região metropolitana de fortaleza*. Laboratório de Mecânica dos Pavimentos. Departamento de Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, sd.

PENA, Délio Carmanhanes. *Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação*. 152 f. (Dissertação de mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2004.

PEREIRA, Deividi. *Análise Mecanicista de Pavimentos*. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <www.ufsm.br/.../Analise_Mecanicista_de_Pavimentos.pdf>. Acessado em 10 de set. de 2010.

PERIRA, E. A. C. Aspectos técnicos da gestão de resíduos na gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS, RESÍDUOS NA SIDERURGIA, 25, 1994, Volta Redonda. *Anais...* Volta Redonda, 1994. p.187 – 199.

PEREIRA MACHADO, Marcelo Lucas. *Apostila de siderurgia: da matéria prima ao aço laminado*. Vitória. MEC - CEFET/ES. Jan. de 2006. 202 p.

PINTO, Carlos de Souza. *Curso básico de mecânica dos solos*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 355 p.

POLESE, Mariana de Oliveira. *Estudo da expansibilidade e da microestrutura de escórias de aciaria LD e EAF*. 271 f. (Dissertação mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2007.

POLESE, Mariana de Oliveira. et al. Característica microestrutural da escória de aciaria. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 11, n. 04, p.271, out./dez. 2006.

POLISSENI, Antônio Eduardo. *Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício*. 220 f. (Tese de doutorado em engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

PORTAL DO GOVERNO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. Aeroporto de Vitória Disponível em: < <http://www.es.gov.br-site-files-arquivos-imagem-aeroporto1m.jpg> >. Acessado em 10 de out. de 2010.

RAMOS, Fernando Machado. *Estudo de caso: gestão de resíduos e coprodutos*. In: Segundo workshop de sustentabilidade do setor siderúrgico brasileiro, 2008, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2008. p. 1 – 50.

RAMOS, Fernando Machado; POLISSENI, Antônio Eduardo; FREESZ, Júlio Walter Sanábio. *Gestão ambiental da escória de aciaria*. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 14ª RPU, 2007, Ribeirão Preto. Anais... Ribeirão Preto: 2007. p. 1 -21.

RAPOSO, Carlos Olympio Lima. *Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação*. 163 f. (Dissertação de mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2005.

REGOURD, M. & HORNAIN, H. *Applications de la microscopie électronique à balayage*. Revue des Matériaux de Construction. 1975. 693 p. *apud* POLESE, Mariana de Oliveira. *Estudo da expansibilidade e da microestrutura de escórias de aciaria LD e EAF*. 271 f. (Dissertação mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2007.

RIBEIRO FILHO, Armando Ataíde *et alli*. Solução em pré-misturado a frio (PMF) como alternativa para recapeamento em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO (RAPv), 36ª RAPv, 2005, Curitiba. Anais... Curitiba: 2005. p. 1 – 10.

RHODE, Luciana. *Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos- estudo laboratoriais*. 101 f. (Dissertação de mestrado em engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ROCHA FILHO, Nelson Rodrigues. *Estudo de técnicas para avaliação estrutural de pavimentos por meio de levantamentos deflectométricos*. 143 f. (Dissertação de mestrado em infraestrutura de transportes). Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 1996.

RODRIGUES, Gisele Lopes Carreiro. *Caracterização e avaliação da expansibilidade de escória de aciaria LD não tratadas e tratadas*. 147 f. (Dissertação de mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

RODRIGUES, José Carlos. *Geologia para engenheiros civis*. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1978. 205 p.

ROSSI, Luiz Antonio. A escória de aciaria e a política ambiental da CST. *Seminário escória de aciaria*. Vitória, jul. 2003

SÁ E BENEVIDES, Sérgio Armando. *Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de pavimentos: empírico do DNER e da resiliência da COPPE/UFRJ em rodovias do Estado do Ceará*. 176 f. (Dissertação de mestrado em engenharia de transportes). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2000.

SALES, Iris Rafaelle Bispo. *Tecnologias aplicadas para o aumento da capacidade produtiva da aciaria na siderurgia*. 104 f. (Trabalho final da disciplina de estágio curricular supervisionado do curso de engenharia mecatrônica). Universidade de Pernambuco. Recife, 2005.

SARAIVA, Sérgio Luiz da Costa. *Metodologia e análise experimental do comportamento geotécnico da estrutura de pavimentos rodoviários*. 123 f. (Dissertação de mestrado em geotecnia). Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2006.

SILVA, Maristela Gomes. *Pesquisa e desenvolvimento da escória de aciaria no Brasil: perspectivas*. Núcleo de Excelência em Escória de Siderúrgicas - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003. Disponível em CD-ROM, Microsoft Office PowerPoint 2007.

SILVA, P. D. E. A. da et al. Aplicação de escória de aciaria produzida na ArcelorMittal Tubarão com redução de expansão – Acerita – como camada de base na pista experimental circular do IPR/DNIT. In: *39ª RAPV/13º ENACOR*. Recife, set. de 2008.

SILVEIRA, Nocy Oliveira et al. Escória de aciaria LD, com redução da expansão. Separata da *Revista da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*. São Paulo, n. 1, v. 1, p. 1 - 5, jul. de 2004.

SINFERBASE (Sindicato Nacional da Indústria da Extração do Ferro e Metais Básicos); USGS (United States Geological Survey – Instituto de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos); DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), 2009 *apud* IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração), 2009. *Ferro produção* Disponível em <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00000039.pdf>>. Acessado em 15 de mar. 2009.

SISTEMA FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DE SANTA CATARINA - SERVIÇO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE SANTA CATARINA (SENAI/SC). *Relatório de ensaio nº 3153/09*. Criciúma. 1 p.

SOUZA, Gustavo Marçal de. *Estudo experimental de escórias de aciaria para fins de caracterização tecnológica como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas*. 124 f. (Dissertação de mestrado em engenharia geotécnica) – Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

SOUZA, Murilo Lopes de. *Método de projetos de pavimentos flexíveis*. 3. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: IPR, 1981. 35 p.

SOUZA, Murilo Lopes de. *Pavimentação rodoviária*. 2 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A DNER – IPR, 1980. 364 p.

TASHIRO, Maria Luísa Lima. *Implantação do sistema de troca rápida de ferramentas na aciaria Açonorte*. 32 f. (Trabalho final da disciplina engenharia mecânica mecatrônica). Escola Politécnica. Universidade de Pernambuco, Recife - PE, 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - LABORATÓRIO DE GEOLOGIA. *Relatório de ensaios de lixiviação e solubilização da escória de aciaria da USIMINAS*. Ouro Preto, 2009.

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS. *Produção de ferro e aço*. Disponível em: < www.exatec.unisinos.br/~fortis/arquivos/Aula2>. Acessado em 10 de Mar. de 2009.

VALE S.A. *Produção mundial de aço bruto em 2008*. Disponível em < <http://www.vale.com/vale/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?tpl=home> > acessado em 20 de jan. 2009.

VELTREN, Rodrigo Zorzal *et al.* Caracterização mecânica de misturas de solo-escória de alto-forno granulada moída para aplicações em estradas florestais. *Revista SIF (Sociedade de Investigações Florestais)*, Viçosa, n. 2, v. 30, p. 235 – 240, 2006.

WEAST, R. C. *Handbook of Chemistry and Physics*. 52 ed. Cleveland, 1971 *apud* MACHADO, Alexandre Teixeira. *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria*. 135 f. (Dissertação de mestrado em engenharia – área de concentração: engenharia de construção civil). Universidade de São Paulo. São Paulo, Nov. 2000.

ANEXO I

DIMENSIONAMENTO POR RETROANÁLISE RETRANS5-L (ALBERNAZ, 2010)

DEFINIÇÃO DOS INTERVALOS DE ESPESSURAS VÁLIDAS CASOS BÁSICOS: 1 - 2 - 3

Caso 1 ($C < A < B$)								
CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO	FAIXAS DE ESPESS. VÁLIDAS E NÃO VÁLIDAS							
FADIGA (deform. espec. horiz. de tração)	0	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim
DEF. PERM. (deform. espec. vert. de compres.)	0	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
INTERVALO FINAL DE ESPESSURAS VÁLIDAS	0	Não	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim

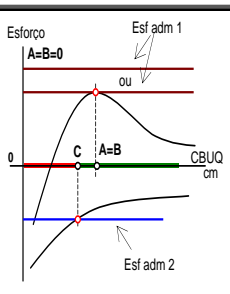
Caso 2 ($A < C < B$)								
CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO	FAIXAS DE ESPESS. VÁLIDAS E NÃO VÁLIDAS							
FADIGA (deform. espec. horiz. de tração)	0	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim
DEF. PERM. (deform. espec. vert. de compres.)	0	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
INTERVALO FINAL DE ESPESSURAS VÁLIDAS	0	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim

Caso 3 ($A < B < C$)								
CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO	FAIXAS DE ESPESS. VÁLIDAS E NÃO VÁLIDAS							
FADIGA (deform. espec. horiz. de tração)	0	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim
DEF. PERM. (deform. espec. vert. de compres.)	0	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim
INTERVALO FINAL DE ESPESSURAS VÁLIDAS	0	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim

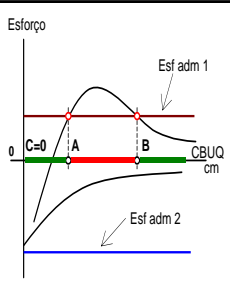
DEFINIÇÃO DOS INTERVALOS DE ESPESSURAS VÁLIDAS

CASOS BÁSICOS: 4 - 5 - 6

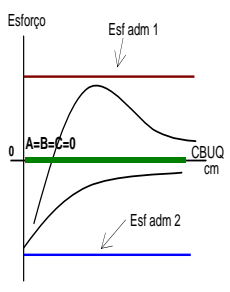
Caso 4 ($A = B$ (tangente) ou A, B indeterminados e $C > 0$)							
CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO	FAIXAS DE ESPES. VÁLIDAS E NÃO VÁLIDAS						
FADIGA (deform. espec. horiz. de tração)	0		A=B ou A, B indet.				
	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
DEF. PERM. (deform. espec. vert. de compres.)	0		C				
	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
INTERVALO FINAL DE ESPESSURAS VÁLIDAS	0		C				
	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim



Caso 5 ($A < B$ e C indeterminado)							
CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO	FAIXAS DE ESPES. VÁLIDAS E NÃO VÁLIDAS						
FADIGA (deform. espec. horiz. de tração)	0	A		B			
	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim
DEF. PERM. (deform. espec. vert. de compres.)	0	C indet.					
	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
INTERVALO FINAL DE ESPESSURAS VÁLIDAS	0	A		B			
	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim



Caso 6 ($A, B, e C$ indeterminados)							
CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO	FAIXAS DE ESPES. VÁLIDAS E NÃO VÁLIDAS						
FADIGA (deform. espec. horiz. de tração)	0	A, B indet.					
	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
DEF. PERM. (deform. espec. vert. de compres.)	0	C indet.					
	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
INTERVALO FINAL DE ESPESSURAS VÁLIDAS	0	Não necessita de reforço ou qualquer espessura é válida					
	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim



RESULTADO DE ENSAIO - EXTRAÇÃO DE BETUME - ENSAIO 02

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE MINAS GERAIS CONTROLE DE MISTURA ASFÁLTICA USINADA									
INTERESSADO: DATA: 16/09/2009 REVESTIMENTO: PMF LADO: BD - F-5			AMOSTRA: HORA: ESTACA: 209 + 19 EMPREENHEIRO:			RELATÓRIO: REGISTRO: 147 TRECHO: SANTANA DO PARAÍSO - MESQUITA			
TEMPERATURAS DA MISTURA									
1- NA SAÍDA DA USINA: 1ª DETERMINAÇÃO: 2- NO CAMINHÃO: 1ª DETERMINAÇÃO: 3- DURANTE A COMPACTAÇÃO: 1ª DETERMINAÇÃO:					2ª DETERMINAÇÃO: 2ª DETERMINAÇÃO: 2ª DETERMINAÇÃO:			3ª DETERMINAÇÃO:	
ESPESSURA DO REVESTIMENTO									
PISTA DIREITA:		ESTACA Nº:		NO BORDO:			NO EIXO:		
PISTA ESQUERDA:		ESTACA Nº:		NO BORDO:			NO EIXO:		
EXTRAÇÃO DE BETUME DE MASSA ASFÁLTICA						DENSIDADE DO CORPO DE PROVA "IN SITU"			
APARELHO SOXHLET			APARELHO ROTAREX			AMOSTRA Nº			
AMOSTRA Nº			AMOSTRA Nº 2						
CARTUCHO (P ₁)			PRATO + PAPEL (P ₁)	103,8		PESO DO CORPO DE PROVA AO AR	274,0		
AMOSTRA + CARTUCHO (P ₂)			PRATO + PAPEL + AMOSTRA (P ₂)	376,1		PESO DO CORPO DE PROVA IMERSO	148,0		
AMOSTRA (P ₂ -P ₁)			AMOSTRA (P ₂ -P ₁)	272,3		PESO DO CORPO DE PROVA PARAFINADO			
AGREGADOS + CARTUCHO (P ₃)			PRATO + PAPEL + AGREGADO (P ₃)	357,8		PESO DO CORPO DE PROVA PARAFINADO IMERSO			
AGREGADOS (P ₃ -P ₁)			AGREGADO (P ₃ -P ₁)	25,4		DENSIDADE DA PARAFINA			
LIGANTE (P ₄ -P ₁)			LIGANTE (P ₄ -P ₁)	18,3		VOLUME DO CORPO DE PROVA	126,0		
TEOR DE BETUME P ₂ -P ₁ (%)			TEOR DE BETUME P ₃ -P ₁ (%)	6,7		DENSIDADE APARENTE DO CORPO DE PROVA	2,175		
RESULTADO			RESULTADO			RESULTADO			
MEDIA			MEDIA	11,2%		MEDIA			
GRANULOMETRIA APÓS EXTRAÇÃO					GRANULOMETRIA DA MISTURA DE AGREGADOS ANTES DE INCORPORAR O LIGANTE NA USINA				
PENEIRAS	RETIDO	PASSANDO	%PASSANDO	FAIXA ESPECIFICADA	PENEIRAS	RETIDO	PASSANDO	%PASSANDO	FAIXA ESPECIFICADA
2"					2"				
1 1/2"					1/2"				
1"					3/8"				
3/4"					1/4"				
1/2"					4"				
3/8"		253,0	100		8"				
Nº 4	33,2	219,8	86,9		Nº16				
Nº 10	66,0	153,8	60,8		Nº 30				
Nº 40	78,4	75,4	29,8		Nº 50				
Nº 80	38,8	36,6	14,5		Nº 100				
Nº 200	17,8	18,8	7,4		Nº 200				
Fundo	18,8								
ENSAIO MARSHALL - 60°C - 30 min.					CURVA GRANULOMÉTRICA (PENEIRAS ASTM)				
CORPO DE PROVA Nº				MÉDIA					
DENSIDADE APARENTE									
LEITURA DO DEFLECTÔMETRO									
ESTABILIDADE ENCONTRADA									
FATOR DO C. DE PROVA									
ESTABILIDADE CORRIGIDA									
FLUÊNCIA									
ENERGIA DE COMPACTAÇÃO									
FUNÇÃOÁRIO RESPONSÁVEL: FELIPE/DARWIN					DATA: 16/09/2009		ENGENHEIRO RESPONSÁVEL:		

RESULTADOS DE ENSAIO - EXTRAÇÃO DE BETUME - ENSAIO 03

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE MINAS GERAIS CONTROLE DE MISTURA ASFÁLTICA USINADA									
INTERESSADO: DATA: 16/09/2009 REVESTIMENTO: PMF LADO:			AMOSTRA: HORA: ESTACA: 609 + 9 EMPREITEIRO:			RELATÓRIO: 209/2009 REGISTRO: 244 TRECHO: SANTANA DO PARAÍSO - MESQUITA			
TEMPERATURAS DA MISTURA									
1- NA SAÍDA DA USINA: 1ª DETERMINAÇÃO: 2- NO CAMINHÃO: 1ª DETERMINAÇÃO: 3- DURANTE A COMPACTAÇÃO: 1ª DETERMINAÇÃO:					2ª DETERMINAÇÃO: 2ª DETERMINAÇÃO: 2ª DETERMINAÇÃO:			3ª DETERMINAÇÃO:	
ESPESURA DO REVESTIMENTO									
PISTA DIREITA: PISTA ESQUERDA:			ESTACA Nº: ESTACA Nº:		NO BORDO: NO BORDO:			NO EIXO: NO EIXO:	
EXTRAÇÃO DE BETUME DE MASSA ASFÁLTICA						DENSIDADE DO CORPO DE PROVA "IN SITU"			
APARELHO SOXHLET			APARELHO ROTAREX			AMOSTRA Nº			
AMOSTRA Nº			AMOSTRA Nº 2			AMOSTRA Nº			
CARTUCHO (P ₁)			PRATO + PAPEL (P ₁)			PESO DO CORPO DE PROVA AO AR			
						499,2			
AMOSTRA + CARTUCHO (P ₂)			PRATO + PAPEL + AMOSTRA (P ₂)			PESO DO CORPO DE PROVA IMERSO			
						289,0			
AMOSTRA (P ₂ -P ₁)			AMOSTRA (P ₂ -P ₁)			PESO DO CORPO DE PROVA PARAFINADO			
AGREGADOS + CARTUCHO (P ₃)			PRATO + PAPEL + AGREGADO (P ₃)			PESO DO CORPO DE PROVA PARAFINADO IMERSO			
AGREGADOS (P ₃ -P ₁)			AGREGADO (P ₃ -P ₁)			DENSIDADE DA PARAFINA			
LIGANTE (P ₂ -P ₁)			LIGANTE (P ₂ -P ₁)			VOLUME DO CORPO DE PROVA			
						230,2			
TEOR DE BETUME $\frac{P_2-P_1}{P_1} \cdot 100$			TEOR DE BETUME $\frac{P_2-P_1}{P_1} \cdot 100$			DENSIDADE APARENTE DO CORPO DE PROVA			
RESULTADO			RESULTADO:			RESULTADO			
			7,7%						
MÉDIA			MÉDIA % RL-1C			MÉDIA			
			12,8%			2,164			
GRANULOMETRIA APÓS EXTRAÇÃO					GRANULOMETRIA DA MISTURA DE AGREGADOS ANTES DE INCORPORAR O LIGANTE NA USINA				
PENEIRAS	RETIDO	PASSANDO	%PASSANDO	FAIXA ESPECIFICADA	PENEIRAS	RETIDO	PASSANDO	%PASSANDO	FAIXA ESPECIFICADA
2"					2"				
1 1/2"					1/2"				
1"					3/8"				
3/4"		451,2	100		1/4"				
1/2"	20,7	430,5	95,4		4"				
3/8"	31,4	399,1	88,5		8"				
Nº 4	147,1	252,0	55,4		Nº16				
Nº 10	83,2	168,8	37,4		Nº 30				
Nº 40	75,3	93,5	20,7		Nº 50				
Nº 80	47,4	46,1	10,2		Nº 100				
Nº 200	25,9	20,2	4,5		Nº 200				
Fundo	20,2								
ENSAIO MARSHALL - 60°C - 30 min.					CURVA GRANULOMÉTRICA (PENEIRAS ASTM)				
CORPO DE PROVA Nº									
DENSIDADE APARENTE									
LEITURA DO DEFLECTÔMETRO									
ESTABILIDADE ENCONTRADA									
FATOR DO C. DE PROVA									
ESTABILIDADE CORRIGIDA									
FLUÊNCIA									
ENERGIA DE COMPACTAÇÃO									
MÉDIA									
MÉDIA									
FUNCIONÁRIO RESPONSÁVEL: FELIPE/DARWIN			DATA: 16/09/2009		ENGENHEIRO RESPONSÁVEL:				

ANEXO III

DETERMINAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA PTM-130 - Pennsylvania Testing Method (Método de Teste Pensilvânia)

Ensaio 01 – CP-01 - Ramo saturado (LABORATÓRIO - DER/MG, 2009).

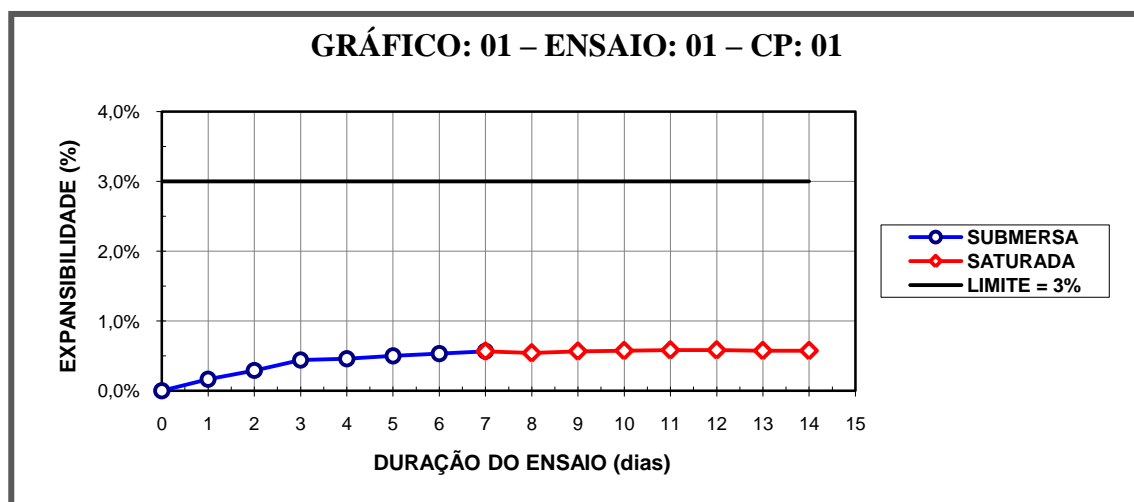
DETERMINAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA – PTM - 130

Rodovia: MG 232			Trecho: Mesquita – Santana do Paraíso			
ENS: 01	CP: 01	Amostra: Escória de aciaria da USIMINAS			Idade:	
N. cilindro: 22		Alt. cilindro (cm): 17,17		Alt. disco espaçador (cm):		
Alt. da amostra (cm): 11,70		Operador:		Rogério		
DIAS	DATA	HORÁRIO	LEITURA mm	INCHAMENTO mm	EXPANSIB. %	CONDIÇÃO DO ENSAIO
0	2/3/2009	11h30min	1,000	0,000	0,00	SUBMERSA Taxa de expansão: 0,71%
1	3/3/2009	11h30min	1,200	0,200	0,17	
2	4/3/2009	11h30min	1,300	0,300	0,26	
3	5/3/2009	11h30min	1,500	0,500	0,43	
4	6/3/2009	11h30min	1,700	0,700	0,60	
5	7/3/2009	11h30min	1,730	0,730	0,62	
6	8/3/2009	11h30min	1,760	0,760	0,65	
7	9/3/2009	11h30min	1,830	0,830	0,71	
8	10/3/2009	11h30min	1,750	0,750	0,64	SATURADA Taxa de expansão: -0,11%
9	11/3/2009	11h30min	1,750	0,750	0,64	
10	12/3/2009	11h30min	1,760	0,760	0,65	
11	13/3/2009	11h30min	1,730	0,730	0,62	
12	14/3/2009	11h30min	1,730	0,730	0,62	
13	15/3/2009	11h30min	1,700	0,700	0,60	
14	16/3/2009	11h30min	1,700	0,700	0,60	
EXPANSIBILIDADE TOTAL (14 dias):				0,60%		

Observações:

Ensaio n. 01

Umidade = ramo saturado – Umidade: 10,6%



Ensaio 01 – CP-02 – Umidade ótima (LABORATÓRIO - DER/MG, 2009).

DETERMINAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA - PTM 130

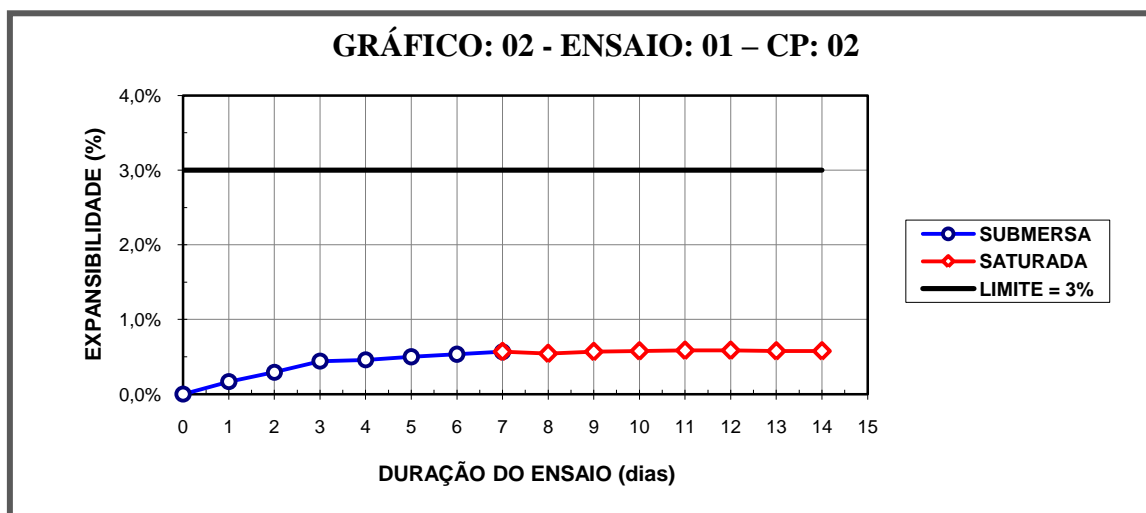
Rodovia: MG 232		Trecho: Mesquita – Santana do Paraíso				
ENS: 01 CP: 02		Amostra: Escória de aciaria da USIMINAS			Idade:	
N. cilindro: 86		Alt. cilindro (cm): 17,67		Alt. disco espaçador (cm):		
Alt. da amostra (cm): 12,00			Operador:		Rogério	
DIAS	DATA	HORÁRIO	LEITURA mm	INCHAMENTO mm	EXPANSIB. %	CONDIÇÃO DO ENSAIO
0	2/3/2009	11h30min	1,000	0,000	0,00	SUBMERSA Taxa de expansão: 0,68%
1	3/3/2009	11h30min	1,080	0,080	0,07	
2	4/3/2009	11h30min	1,350	0,350	0,29	
3	5/3/2009	11h30min	1,600	0,600	0,50	
4	6/3/2009	11h30min	1,680	0,680	0,57	
5	7/3/2009	11h30min	1,710	0,710	0,59	
6	8/3/2009	11h30min	1,780	0,780	0,65	
7	9/3/2009	11h30min	1,810	0,810	0,68	
8	10/3/2009	11h30min	1,700	0,700	0,58	SATURADA Taxa de expansão: -0,09%
9	11/3/2009	11h30min	1,710	0,710	0,59	
10	12/3/2009	11h30min	1,730	0,730	0,61	
11	13/3/2009	11h30min	1,730	0,730	0,61	
12	14/3/2009	11h30min	1,730	0,730	0,61	
13	15/3/2009	11h30min	1,700	0,700	0,58	
14	16/3/2009	11h30min	1,700	0,700	0,58	

EXPANSIBILIDADE TOTAL (14 dias): 0,58%

Observações:

Ensaio n. 01

Umidade = ótima – Umidade: 9,6%



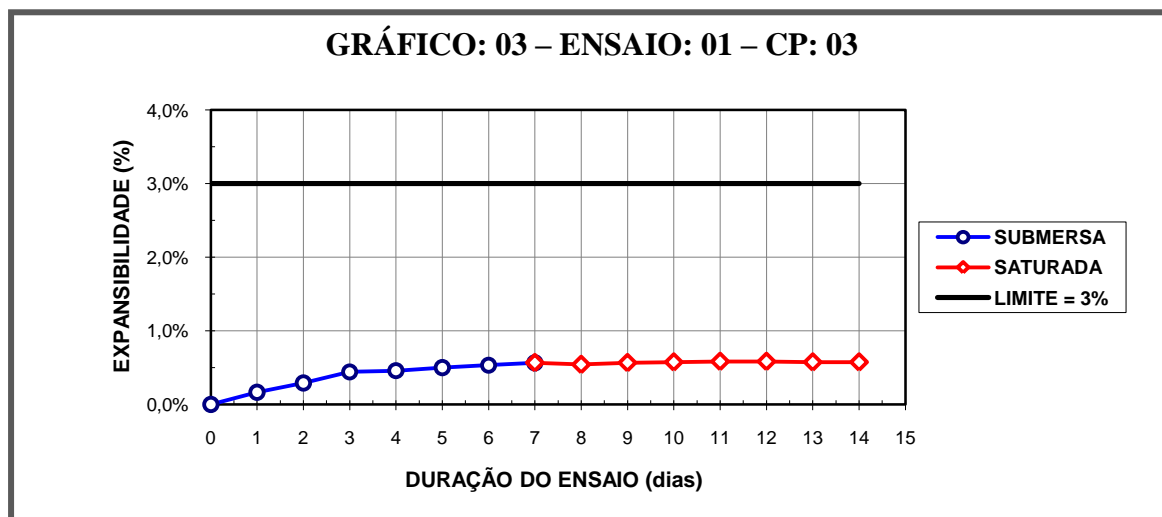
Ensaio 01 – CP-03 – Ramo seco (LABORATÓRIO - DER/MG, 2009).

DETERMINAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA - PTM 130						
Rodovia: MG 232			Trecho: Mesquita – Santana do Paraíso			
ENS: 01	CP: 03	Amostra: Escória de aciaria da USIMINAS			Idade	
N. cilindro: 32		Alt. cilindro (cm): 17,44		Alt. disco espaçador (cm):		
Alt. da amostra (cm): 11,80			Operador: Rogério			
DIAS	DATA	HORÁRIO	LEITURA mm	INCHAMENTO mm	EXPANSIB. %	CONDIÇÃO DO ENSAIO
0	2/3/2009	11h30min	1,000	0,000	0,00	SUBMERSA Taxa de expansão: 0,39%
1	3/3/2009	11h30min	1,180	0,180	0,15	
2	4/3/2009	11h30min	1,180	0,180	0,15	
3	5/3/2009	11h30min	1,330	0,330	0,28	
4	6/3/2009	11h30min	1,420	0,420	0,36	
5	7/3/2009	11h30min	1,430	0,430	0,36	
6	8/3/2009	11h30min	1,450	0,450	0,38	
7	9/3/2009	11h30min	1,460	0,460	0,39	SATURADA Taxa de expansão: 0,12%
8	10/3/2009	11h30min	1,450	0,450	0,38	
9	11/3/2009	11h30min	1,600	0,600	0,51	
10	12/3/2009	11h30min	1,610	0,610	0,52	
11	13/3/2009	11h30min	1,620	0,620	0,53	
12	14/3/2009	11h30min	1,620	0,620	0,53	
13	15/3/2009	11h30min	1,610	0,610	0,52	
14	16/3/2009	11h30min	1,600	0,600	0,51	
EXPANSIBILIDADE TOTAL (14 dias): 0,51%						

Observações:

Ensaio n. 01

Umidade = ramo seco – Umidade: 8,6%



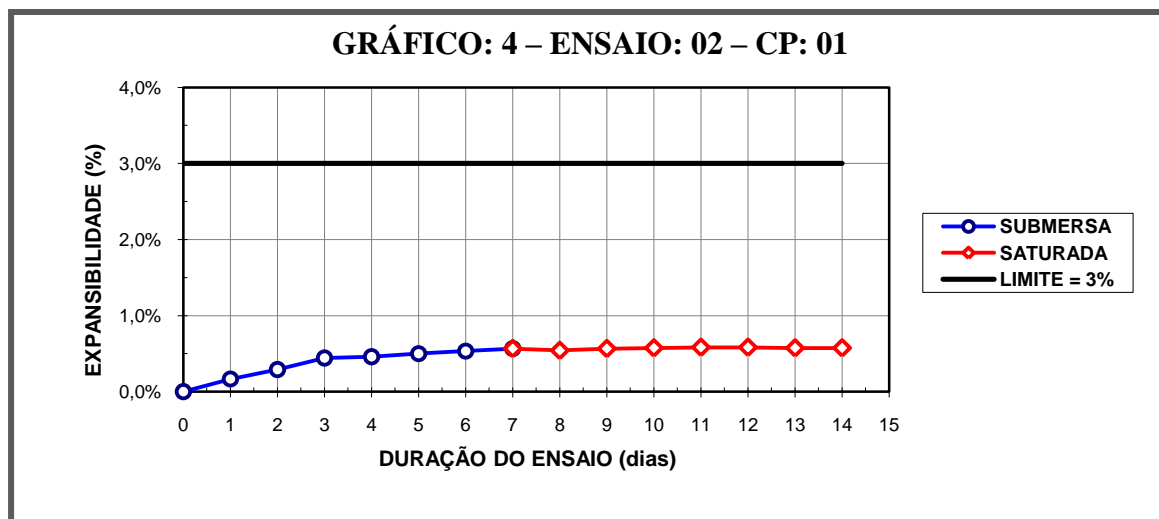
Ensaio 02 – CP-01 – Ramo saturado (LABORATÓRIO - DER/MG, 2009).

DETERMINAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA - PTM 130						
Rodovia: MG 232			Trecho: Mesquita – Santana do Paraíso			
ENS: 02	CP: 01	Amostra: Escória de aciaria da USIMINAS			Idade:	
N. cilindro: 128		Alt. cilindro (cm): 17,84		Alt. disco espaçador (cm):		
Alt. da amostra (cm): 12,00			Operador: Rogério			
DIAS	DATA	HORÁRIO	LEITURA mm	INCHAMENTO mm	EXPANSIB. %	CONDIÇÃO DO ENSAIO
0	2/3/2009	11h30min	1,000	0,000	0,00	SUBMERSA Taxa de expansão: 0,57%
1	3/3/2009	11h30min	1,200	0,200	0,17	
2	4/3/2009	11h30min	1,350	0,350	0,29	
3	5/3/2009	11h30min	1,530	0,530	0,44	
4	6/3/2009	11h30min	1,550	0,550	0,46	
5	7/3/2009	11h30min	1,600	0,600	0,50	
6	8/3/2009	11h30min	1,640	0,640	0,53	
7	9/3/2009	11h30min	1,680	0,680	0,57	
8	10/3/2009	11h30min	1,650	0,650	0,54	SATURADA Taxa de expansão: 0,01%
9	11/3/2009	11h30min	1,680	0,680	0,57	
10	12/3/2009	11h30min	1,690	0,690	0,58	
11	13/3/2009	11h30min	1,700	0,700	0,58	
12	14/3/2009	11h30min	1,700	0,700	0,58	
13	15/3/2009	11h30min	1,690	0,690	0,58	
14	16/3/2009	11h30min	1,690	0,690	0,58	
EXPANSIBILIDADE TOTAL (14 dias):				0,58%		

Observações:

Ensaio nº 2

Umidade = ramo saturado - Umidade: 10,6%



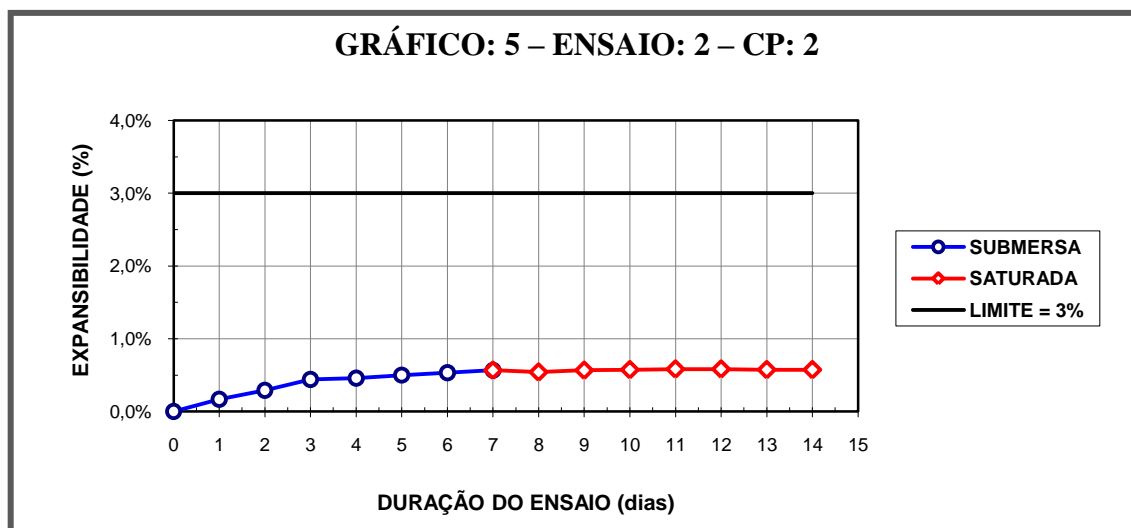
Ensaio 02 – CP-02 – Umidade ótima (LABORATÓRIO - DER/MG, 2009).

DETERMINAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA - PTM 130						
Rodovia: MG 232			Trecho: Mesquita – Santana do Paraíso			
ENS: 02	CP: 02	Amostra: Escória de aciaria da USIMINAS			Idade:	
N. cilindro: 127		Alt. cilindro (cm): 17,52		Alt. disco espaçador (cm):		
Alt. da amostra (cm): 11,09			Operador: Rogério			
DIAS	DATA	HORA	LEITURA mm	INCHAMENTO mm	EXPANSIB. %	CONDIÇÃO DO ENSAIO
0	2/3/2009	11h30min	1,000	0,000	0,00	SUBMERSA Taxa de expansão: 0,58%
1	3/3/2009	11h30min	1,040	0,040	0,04	
2	4/3/2009	11h30min	1,200	0,200	0,18	
3	5/3/2009	11h30min	1,340	0,340	0,31	
4	6/3/2009	11h30min	1,600	0,600	0,54	
5	7/3/2009	11h30min	1,610	0,610	0,55	
6	8/3/2009	11h30min	1,630	0,630	0,57	
7	9/3/2009	11h30min	1,640	0,640	0,58	
8	10/3/2009	11h30min	1,660	0,660	0,60	SATURADA Taxa de expansão: 0,02%
9	11/3/2009	11h30min	1,670	0,670	0,60	
10	12/3/2009	11h30min	1,680	0,680	0,61	
11	13/3/2009	11h30min	1,680	0,680	0,61	
12	14/3/2009	11h30min	1,670	0,670	0,60	
13	15/3/2009	11h30min	1,660	0,660	0,60	
14	16/3/2009	11h30min	1,660	0,660	0,60	
EXPANSIBILIDADE TOTAL (14 dias): 0,60%						

Observações:

Ensaio nº 2

Umidade = ótima - Umidade: 9,6%



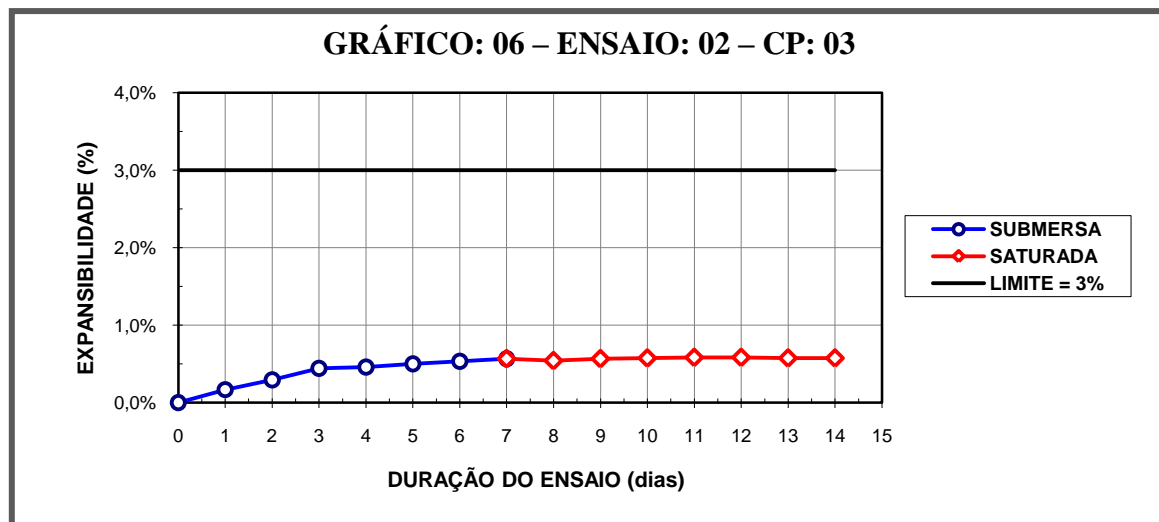
Ensaio 02 – CP-03 – Ramo seco (LABORATÓRIO - DER/MG, 2009).

DETERMINAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA - PTM 130						
Rodovia: MG 232			Trecho: Mesquita – Santana do Paraíso			
ENS: 02	CP: 03	Amostra: Escória de aciaria da USIMINAS			Idade:	
N. cilindro: 183		Alt. cilindro (cm): 17,23		Alt. disco espaçador (cm):		
Alt. da amostra (cm): 11,60			Operador: Rogério			
DIAS	DATA	HORÁRIO	LEITURA mm	INCHAMENTO mm	EXPANSIB. %	CONDIÇÃO DO ENSAIO
0	2/3/2009	11h30min	1,000	0,000	0,00	SUBMERSA Taxa de expansão: 0,53%
1	3/3/2009	11h30min	1,100	0,100	0,09	
2	4/3/2009	11h30min	1,400	0,400	0,34	
3	5/3/2009	11h30min	1,430	0,430	0,37	
4	6/3/2009	11h30min	1,420	0,420	0,36	
5	7/3/2009	11h30min	1,450	0,450	0,39	
6	8/3/2009	11h30min	1,550	0,550	0,47	
7	9/3/2009	11h30min	1,620	0,620	0,53	
8	10/3/2009	11h30min	1,640	0,640	0,55	SATURADA Taxa de expansão: 0,02%
9	11/3/2009	11h30min	1,650	0,650	0,56	
10	12/3/2009	11h30min	1,660	0,660	0,57	
11	13/3/2009	11h30min	1,660	0,660	0,57	
12	14/3/2009	11h30min	1,660	0,660	0,57	
13	15/3/2009	11h30min	1,640	0,640	0,55	
14	16/3/2009	11h30min	1,640	0,640	0,55	
EXPANSIBILIDADE TOTAL (14 dias):				0,55%		

Observações:

Ensaio nº 2

Umidade = ramo seco – Umidade: 8,6%



ANEXO IV

MCT – MINIATURA COMPACTADO E TROPICAL

Ensaio MCT 1091 (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009)

Teor de umidade do solo.

Ponto de Umidade	1		2		3		4		5	
n° Cápsula	36	76	24	66	22	68	23	83	34	37
Peso cápsula+solo úmido (g)	30,23	28,03	32,76	32,84	61,26	57,07	34,87	39,40	41,26	43,23
Peso cápsula+solo seco (g)	29,26	27,09	31,29	31,42	56,05	52,09	32,53	36,50	37,69	39,38
Peso cápsula (g)	18,81	16,87	18,43	18,43	19,03	17,02	18,11	18,68	16,77	17,28
Peso água (g)	0,97	0,94	1,47	1,42	5,21	4,98	2,34	2,90	3,57	3,85
Peso solo seco (g)	10,45	10,22	12,86	12,99	37,02	35,07	14,42	17,82	20,92	22,10
Umidade (%)	9,28	9,20	11,43	10,93	14,07	14,20	16,23	16,27	17,07	17,42
Umidade média (%)	9,2		11,2		14,1		16,3		17,2	

Aferição, moldagens e densidades dos corpos de prova.

Ac - Altura cilindro padrão (mm)	50,00				
La - Leitura de aferição (mm)	41,25	41,25	41,25	41,25	41,25
Moldagem dos Corpos de Prova na Compactação					
Cilindro	4	5	10	26	29
Diâmetro do CP (mm)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Área do CP (mm ²)	1963,50	1963,50	1963,50	1963,50	1963,50
Massa do solo úmido (g)	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0
Altura final do CP (mm)	42,40	44,41	45,26	46,00	46,66
Peso do solo seco (g)	183,08	179,89	175,23	172,04	170,59
Densidade do CP	alta	alta	alta	alta	alta

Perda por imersão.

N° Cuba	57	71	127	138	143
Peso da cuba (g)	68,10	57,00	76,70	71,20	64,30
Peso cuba + solo seco (g)	107,90	103,30	134,70	133,50	114,80
Peso do solo seco (g)	39,80	46,30	58,00	62,30	50,50
Peso solo saliente (Pp) (g)	42,52	39,86	38,09	36,79	35,96
Pi (Peso solo seco / Pp) (%)	93,60	116,15	152,26	169,34	140,45
Fator (desprendimento)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Pi considerado (%)	93,60	116,15	152,26	169,34	140,45

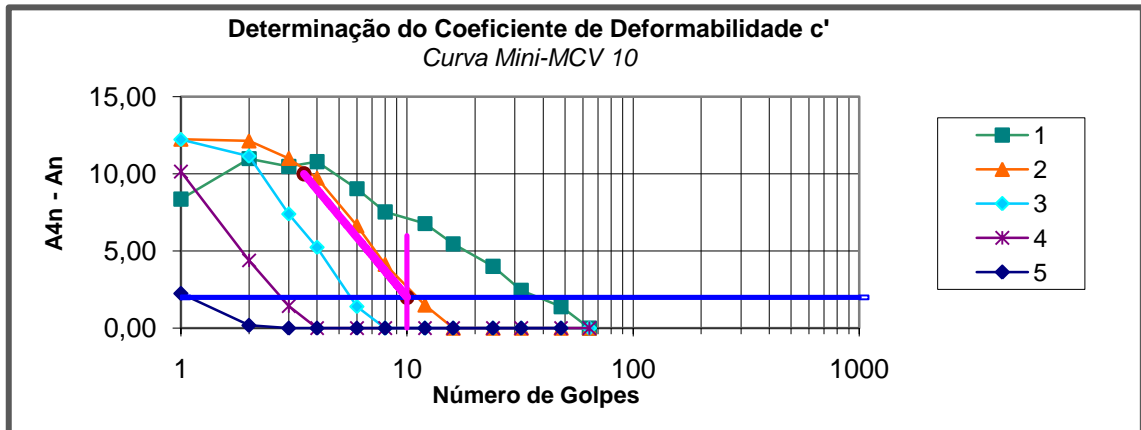
Dados dos CP submetidos à energia variável - altura final - definição do Mini-MCV.

CORPO-DE-PROVA	4	5	10	26	29
Golpes (2 mm)	39,0	11,0	5,5	2,7	1,05
Altura final (h) do CP (mm)	42,40	44,41	45,26	46,00	46,66
Mini-MCV	15,9	10,4	7,4	4,3	0,2

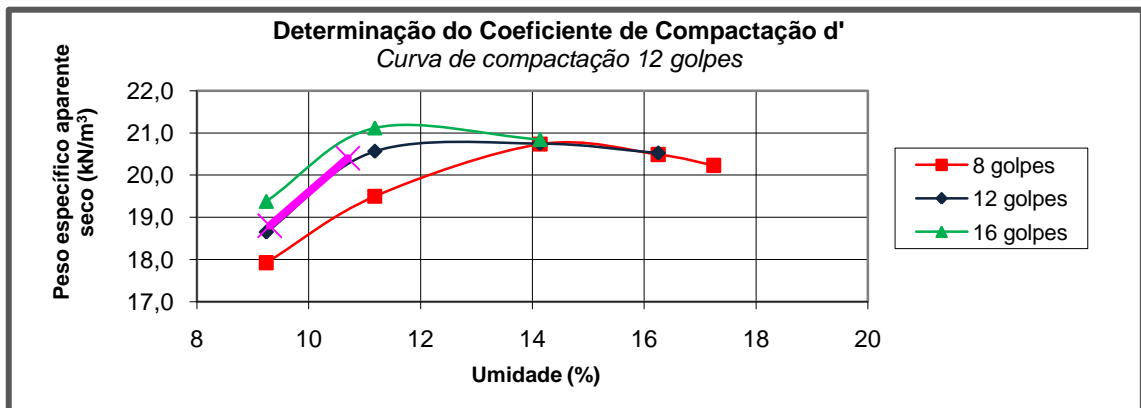
Peso específico em função da umidade e n. de golpes (8 – 12 - 16) aplicados.

CORPO-DE-PROVA	4	5	10	26	29
N. GOLPES	Peso específico do material seco = γ (kN/m³)				
8	17,925	19,499	20,735	20,489	20,231
12	18,649	20,566	20,749	20,525	..
16	19,378	21,115	20,842	..	..
Umidade (%)	9,20	11,20	14,10	16,30	17,20

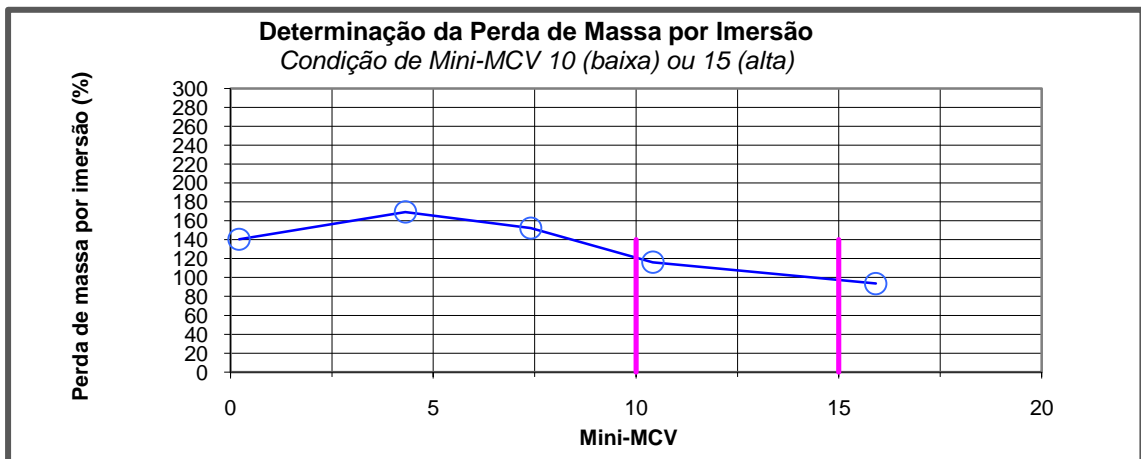
MCT 1091 - Determinação dos coeficientes (c' - d' - P_i)



Determinação do coeficiente de deformabilidade (c').



Determinação do coeficiente de compactação (d').



Determinação da perda de massa por imersão (P_i).

MCT 1092 (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009)

Teor de umidade do solo.

Ponto de Umidade	1		2		3		4		5	
n° Cápsula	15	79	1	74	31	75	4	36	30	81
Peso cápsula+solo úmido (g)	46,04	38,53	44,40	38,87	33,80	37,57	43,42	48,42	39,83	42,72
Peso cápsula+solo seco (g)	42,55	36,16	40,52	35,86	31,29	34,35	39,16	43,56	36,07	38,54
Peso cápsula (g)	17,07	18,43	16,05	16,67	17,19	16,28	17,32	19,27	17,66	17,82
Peso água (g)	3,49	2,37	3,88	3,01	2,51	3,22	4,26	4,86	3,76	4,18
Peso solo seco (g)	25,48	17,73	24,47	19,19	14,10	18,07	21,84	24,29	18,41	20,72
Umidade (%)	13,70	13,37	15,86	15,69	17,80	17,82	19,51	20,01	20,42	20,17
Umidade média (%)	13,5		15,8		17,8		19,8		20,3	

Aferição, moldagens e densidades dos CP.

Ac - Altura cilindro padrão (mm)	50,00				
La - Leitura de aferição (mm)	42,19	42,19	42,19	42,19	42,19
Moldagem dos Corpos de Prova na Compactação					
Cilindro	15	21	26	44	54
Diâmetro do CP (mm)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Área do CP (mm ²)	1963,50	1963,50	1963,50	1963,50	1963,50
Massa do solo úmido (g)	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0
Altura final do CP (mm)	49,82	48,45	49,58	51,02	50,98
Peso do solo seco (g)	176,16	172,76	169,76	167,01	166,25
Densidade do CP	baixa	baixa	baixa	baixa	baixa

Perda por imersão.

N° Cuba	81	82	87	97	129
Peso da cuba (g)	74,30	67,0	69,10	64,20	78,20
Peso cuba + solo seco (g)	114,90	67,0	94,30	97,80	116,60
Peso do solo seco (g)	40,60	0,0	25,20	33,60	38,40
Peso solo saliente (Pp) (g)	34,75	35,05	33,65	32,16	32,04
Pi (Peso solo seco / Pp) (%)	116,84	0,0	74,89	104,48	119,85
Fator (desprendimento)	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0
Pi considerado (%)	116,84	0,0	74,89	104,48	119,85

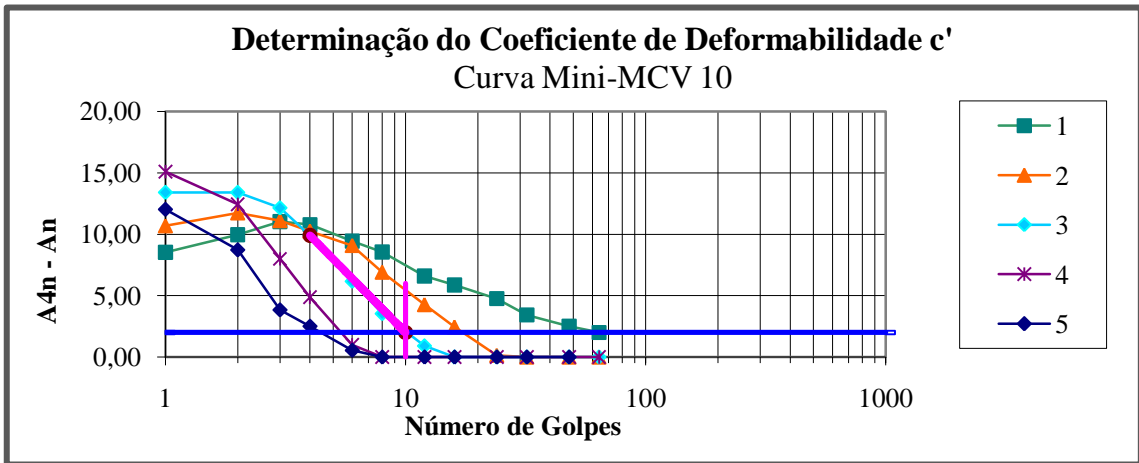
Dados dos CP submetidos à energia variável - altura final - definição do Mini-MCV.

CP	15	21	26	44	54
Golpes (2 mm)	64	17	10	5,2	4,5
Altura final (h) do CP (mm)	49,82	48,45	49,58	51,02	50,98
Mini-MCV	18,1	12,3	10,0	7,2	6,5

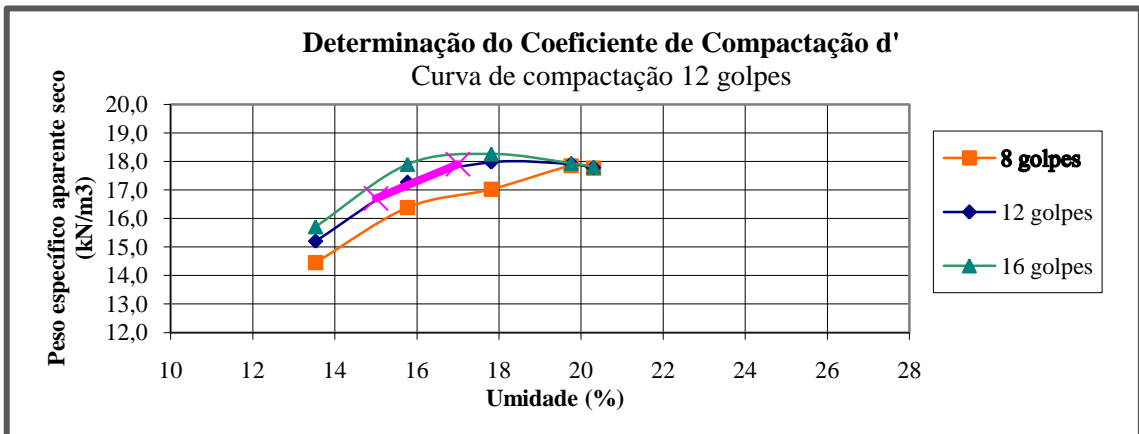
Peso específico em função da umidade e n. de golpes (8 – 12 - 16) aplicados.

CP	15	21	26	44	54
N. DE GOLPES	Peso específico do material seco = γ (kN/m ³)				
8	14,455	16,381	17,021	17,848	17,759
12	15,204	17,264	17,973	17,908	17,773
16	15,707	17,894	18,258	17,930	17,802
Umidade (%)	13,50	15,80	17,80	19,80	20,300

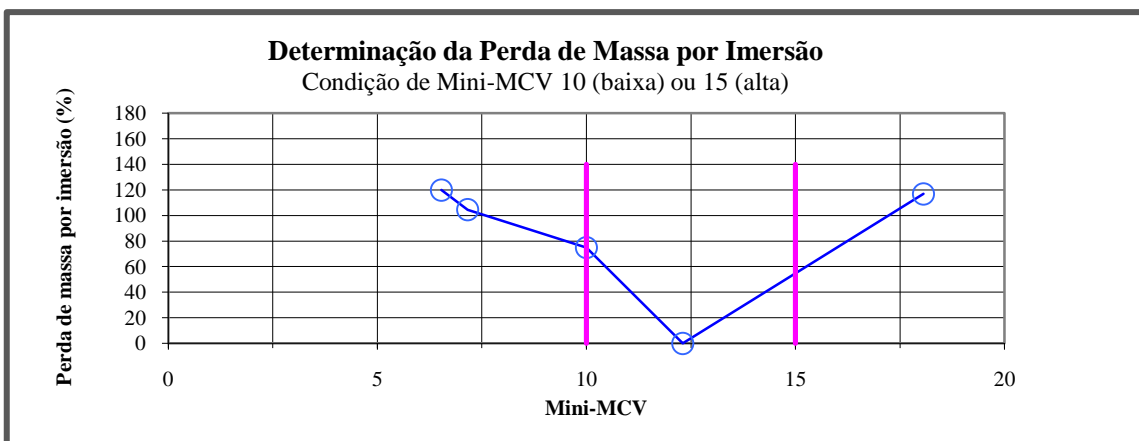
MCT 1092 - Determinação dos coeficientes (c' - d' - P_i)



Determinação do coeficiente de deformabilidade (c').



Determinação do coeficiente de compactação (d').



Determinação da perda de massa por imersão (P_i)

MCT 1093 (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009)

Teor de umidade do solo.

Ponto de Umidade	1		2		3		4		5	
n° Cápsula	39	43	35	41	5	6	61	63	29	54
Peso cápsula+solo úmido (g)	41,73	37,15	42,28	45,10	32,19	33,47	35,34	38,78	36,55	32,58
Peso cápsula+solo seco (g)	39,21	34,99	39,03	41,36	30,27	31,24	32,79	35,06	33,23	29,78
Peso cápsula (g)	17,85	16,27	18,10	16,60	19,03	17,92	19,13	15,49	17,14	15,95
Peso água (g)	2,52	2,16	3,25	3,74	1,92	2,23	2,55	3,72	3,32	2,80
Peso solo seco (g)	21,36	18,72	20,93	24,76	11,24	13,32	13,66	19,57	16,09	13,83
Umidade (%)	11,80	11,54	15,53	15,11	17,08	16,74	18,67	19,01	20,63	20,25
Umidade média (%)	11,7		15,3		16,9		18,8		20,4	

Aferição, moldagens e densidade dos CP.

Ac - Altura cilindro padrão (mm)	50,00				
La - Leitura de aferição (mm)	42,00	41,65	41,65	41,65	41,65
Moldagem dos Corpos de Prova na Compactação					
Cilindro	3	24	38	43	58
Diâmetro do CP (mm)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Área do CP (mm ²)	1963,50	1963,50	1963,50	1963,50	1963,50
Massa do solo úmido (g)	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
Altura final do CP (mm)	45,88	47,09	48,92	49,52	49,91
Peso do solo seco (g)	179,10	173,44	171,07	168,30	166,06
Densidade do CP	alta	alta	baixa	baixa	baixa

Tabela 4.35 – Perda por imersão.

N° Cuba	89	67	87	96	145
Peso da cuba (g)	67,90	72,20	69,60	70,10	68,20
Peso cuba + solo seco (g)	118,60	101,20	114,30	115,30	128,20
Peso do solo seco (g)	50,70	29,00	44,70	45,20	60,00
Peso solo saliente (Pp) (g)	38,40	36,22	34,37	33,40	32,70
Pi (Peso solo seco / Pp) (%)	132,03	80,07	130,04	135,32	183,51
Fator (desprendimento)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Pi considerado (%)	132,03	80,07	130,04	135,32	183,51

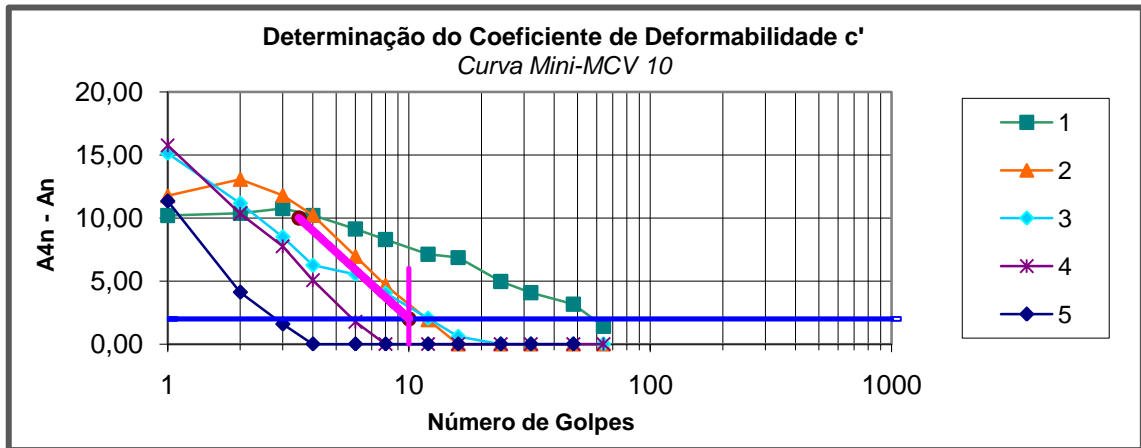
CP submetidos à energia variável - altura final e definição do Mini-MCV.

CP	3	24	38	43	58
Golpes (2 mm)	59	12	12	5,9	2,8
Altura final (h) do CP (mm)	45,88	47,09	48,92	49,52	49,91
Mini-MCV	17,7	10,8	10,8	7,7	4,5

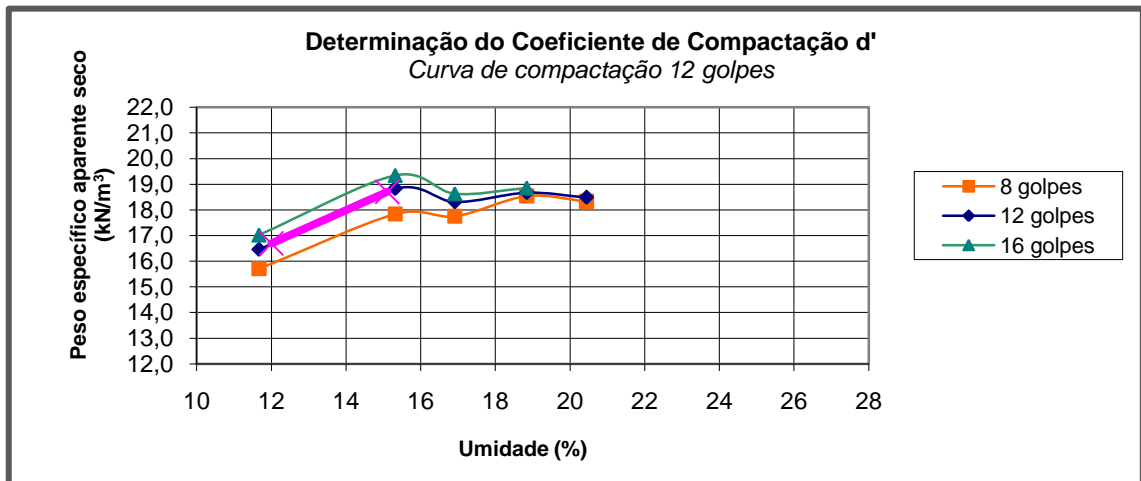
Peso específico em função da umidade e o número de golpes (8 – 12 - 16) aplicados.

CP	3	24	38	43	58
N. de golpes	Peso específico do material seco = γ (kN/m³)				
8	15,708	17,844	17,754	18,544	18,335
12	16,456	18,831	18,313	18,673	18,488
16	17,025	19,350	18,635	18,858	..
Umidade (%)	11,7	15,3	16,9	18,8	20,4

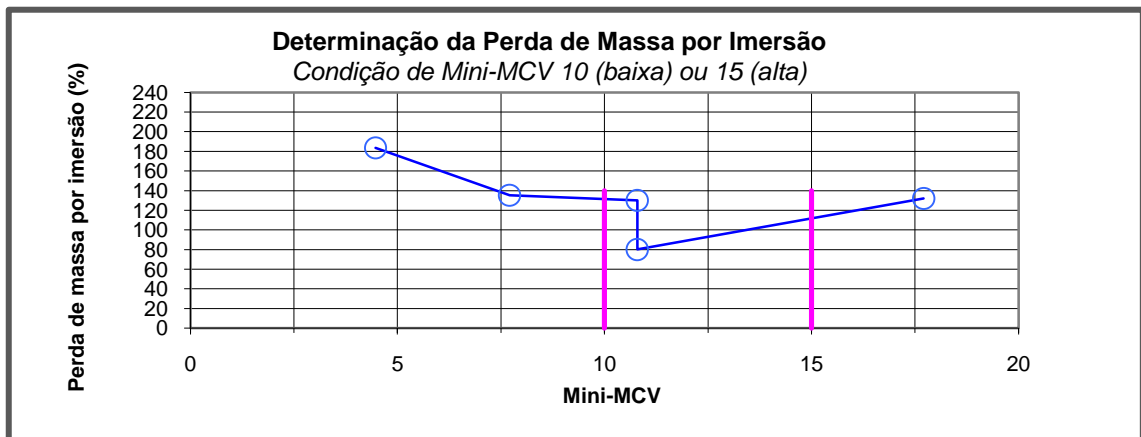
MCT 1093 - Determinação dos coeficientes (c' - d' - P_i)



Determinação do coeficiente de deformabilidade (c').



Determinação do coeficiente de compactação (d').



Determinação da perda de massa por imersão (P_i).

MCT 1094 (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/UFRJ, 2009)

Teor de umidade do solo.

Ponto de Umidade	1		2		3		4		5	
n° Cápsula	59	99	41	90	61	63	5	26	39	43
Peso cápsula+solo úmido (g)	43,22	36,50	37,69	32,19	35,96	36,76	39,41	44,62	44,80	40,40
Peso cápsula+solo seco (g)	40,14	33,78	34,52	29,85	33,22	33,37	35,85	39,98	39,80	35,89
Peso cápsula (g)	19,73	15,69	16,48	16,54	19,04	15,39	18,92	18,03	17,87	16,28
Peso água (g)	3,08	2,72	3,17	2,34	2,74	3,39	3,56	4,64	5,00	4,51
Peso solo seco (g)	20,41	18,09	18,04	13,31	14,18	17,98	16,93	21,95	21,93	19,61
Umidade (%)	15,09	15,04	17,57	17,58	19,32	18,85	21,03	21,14	22,80	23,00
Umidade média (%)	15,1		17,6		19,1		21,1		22,9	

Aferições, moldagens e densidade dos CP.

Ac - Altura cilindro padrão (mm)	50,00				
La - Leitura de aferição (mm)	42,53	42,53	42,53	42,53	42,06
Moldagem dos Corpos de Prova na Compactação					
Cilindro	4	10	23	43	55
Diâmetro do CP (mm)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Área do CP (mm ²)	1963,50	1963,50	1963,50	1963,50	1963,50
Massa do solo úmido (g)	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0
Altura final do CP (mm)	49,13	49,39	50,06	51,51	51,91
Peso do solo seco (g)	173,82	170,10	167,94	165,18	162,74
Densidade do CP	baixa	baixa	baixa	baixa	baixa

Perda por imersão.

N° Cuba	61	65	68	79	79
Peso da cuba (g)	74,00	74,50	71,00	66,60	66,71
Peso cuba + solo seco (g)	122,30	108,40	105,50	108,90	116,94
Peso do solo seco (g)	48,30	33,90	34,50	42,30	50,23
Peso solo saliente (Pp) (g)	34,77	33,85	32,97	31,50	30,79
Pi (Peso solo seco / Pp) (%)	138,90	100,15	104,65	134,28	163,12
Fator (desprendimento)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Pi considerado (%)	138,90	100,15	104,65	134,28	163,12

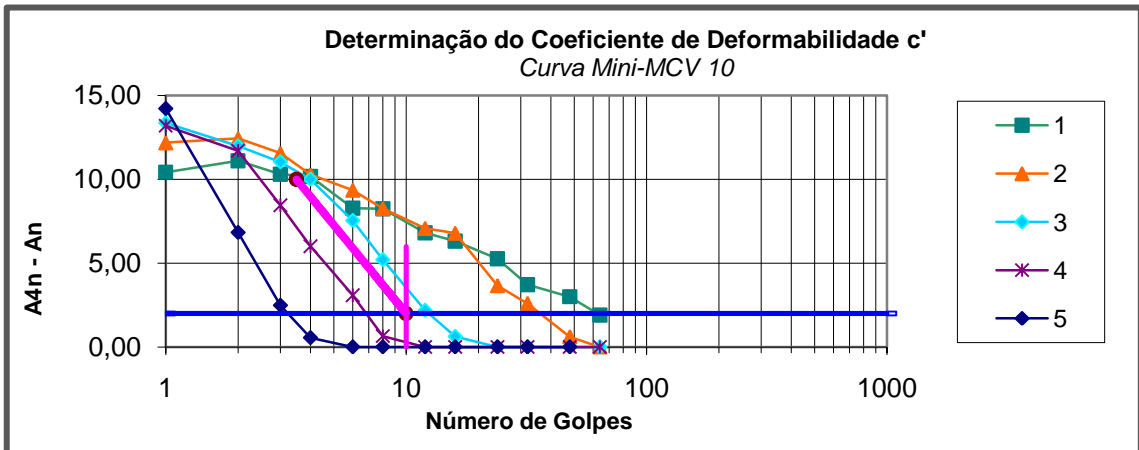
CP submetidos a energias variáveis - altura final e definição do Mini-MCV.

CP	4	10	23	43	55
Golpes (2 mm)	63,0	36,0	13,0	6,9	3,2
Altura final (h) do CP (mm)	49,13	49,39	50,06	51,51	51,91
Mini-MCV	18,0	15,6	11,1	8,4	5,1

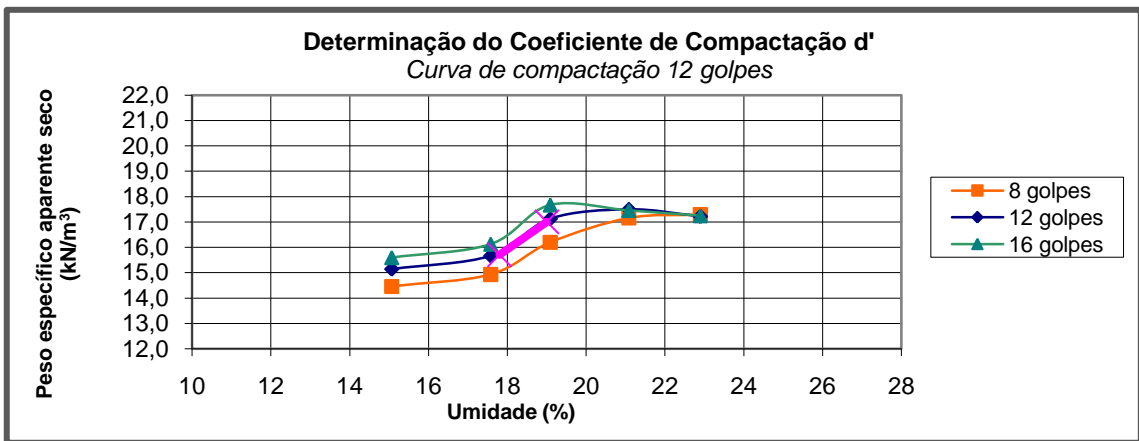
Peso específico em função da umidade e o número de golpes (8 – 12 - 16) aplicados.

CP	4	10	23	43	55
N. de golpes	Peso específico do material seco = γ (kN/m³)				
8	14,456	14,928	16,196	17,160	17,294
12	15,143	15,666	17,126	17,495	17,220
16	15,594	16,122	17,666	17,450	17,243
Umidade (%)	15,51	17,6	19,1	21,1	22,9

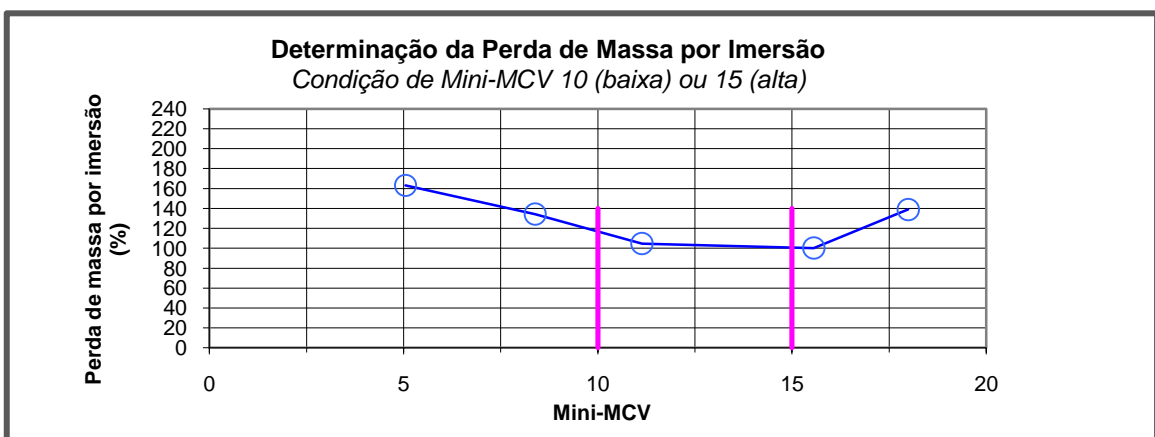
MCT 1094 - Determinação dos coeficientes (c' - d' - P_i)



Determinação do coeficiente de deformabilidade c'.

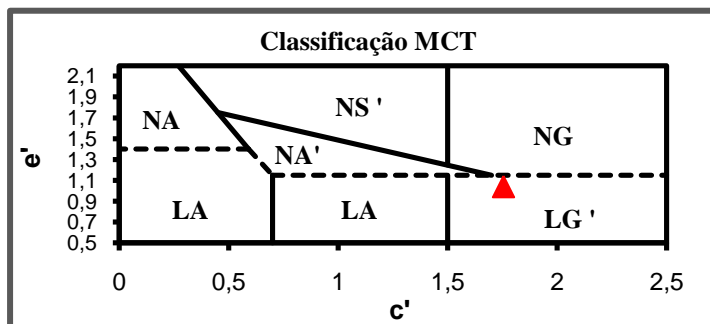


Determinação do coeficiente de compactação d'.



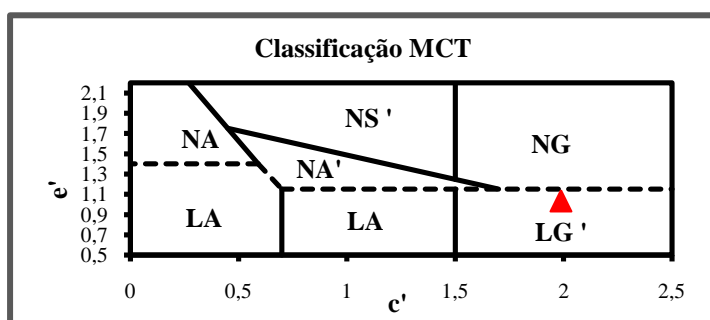
Determinação da perda de massa por imersão.

CLASSIFICAÇÃO MCT - MINIATURA COMPACTADO TROPICAL



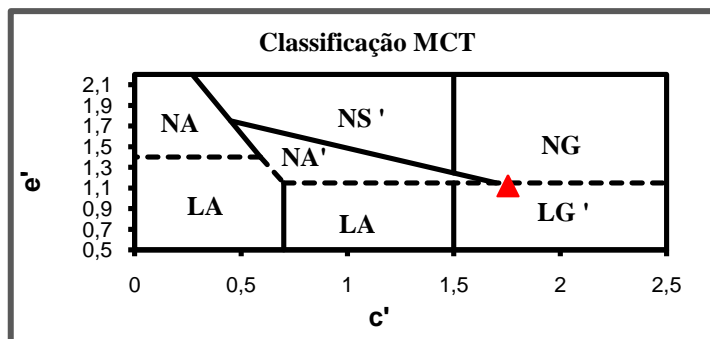
$c' = 1,75$
 $d' = 114,3$
 $P_i = 95,0$
 $e' = 1,04$
 Classificação MCT
 1091: **LG' (laterítico argiloso)**.

Classificação MCT 1091 (COPPE/UFRJ, 2009).



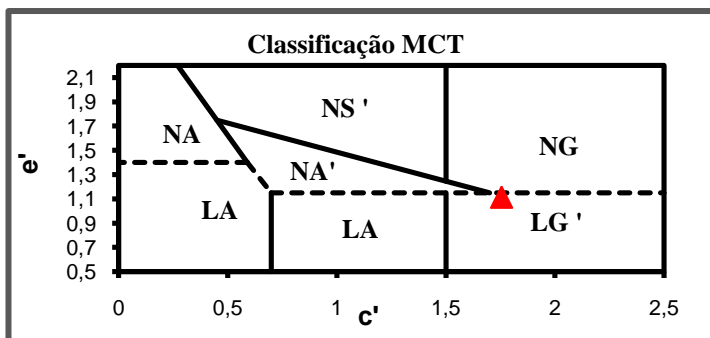
$c' = 1,99$
 $d' = 60,0$
 $P_i = 78,0$
 $e' = 1,04$
 Classificação MCT 1092:
LG' (laterítico argiloso)

Classificação MCT 1092 (COPPE/UFRJ, 2009).



$c' = 1,75$
 $d' = 64,5$
 $P_i = 10,0$
 $e' = 1,12$
 Classificação MCT 1093:
LG' (laterítico argiloso)

Classificação MCT 1093 (COPPE/UFRJ, 2009).



$c' = 1,75$
 $d' = 108,3$
 $P_i = 120,0$
 $e' = 1,11$
 Classificação MCT 1094:
LG' (laterítico argiloso)

Classificação MCT 1094 (COPPE/UFRJ, 2009).

ANEXO V

RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\DONIZETTI\1089.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: Esc c/20% Arg	Origem: DER-MG	C.P. No.: 1089
Rodovia: MG 232	Trecho: 509+1E	Est/Km: F 06
Operador: ROBERTO VIANNA	Interess.: MSc. Donizetti	Data: 15-05-2009
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: MODIFICADA	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Especifica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.010922	0.000055	376
0.021	0.041	0.023894	0.000120	344
0.021	0.062	0.046744	0.000235	263
0.034	0.034	0.012167	0.000061	562
0.034	0.069	0.045771	0.000230	299
0.034	0.103	0.076993	0.000386	267
0.051	0.051	0.018778	0.000094	541
0.051	0.103	0.066855	0.000336	307
0.051	0.155	0.106351	0.000534	290
0.069	0.069	0.026842	0.000135	510
0.069	0.137	0.084472	0.000424	324
0.069	0.206	0.119564	0.000600	343
0.103	0.103	0.039735	0.000199	516
0.103	0.206	0.095987	0.000482	427
0.103	0.309	0.130015	0.000653	473
0.137	0.137	0.044683	0.000224	612
0.137	0.275	0.098249	0.000493	557
0.137	0.412	0.142149	0.000714	577

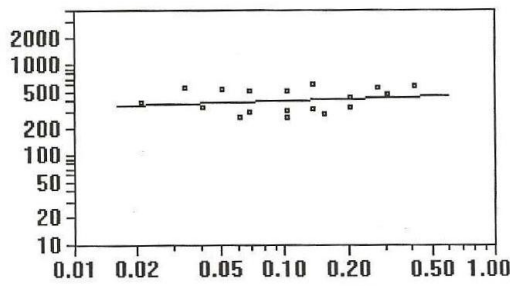
Def. Cond.: 0.7050 mm

Def. Total: 0.8380 mm

Altura final C.P.: 199.162 mm

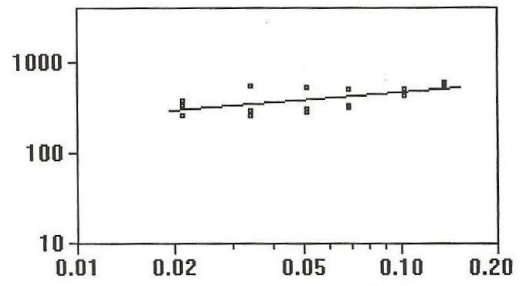
Sigmatd (MPa) x M.R.(MPa)

Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



$$Y = 473.3 X^2$$

$$R = 0.0357$$



$$Y = 920.2 X^2$$

$$R = 0.4072$$

RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\DONIZETTI\s 1090.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: Escória pura	Origem: DER-MG	C.P. No.: 1090
Rodovia: MG 232	Trecho: EST 710+5	Est/Km: F 8
Operador: ROBERTO VIANNA	Interess.: MSc. Donizetti	Data: 18-05-2009
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Modificada	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Especifica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021			
0.021	0.041	0.010052	0.000050	816
0.021	0.062	0.033054	0.000166	372
0.034	0.034			
0.034	0.069	0.035582	0.000179	384
0.034	0.103	0.068456	0.000344	300
0.051	0.051	0.013630	0.000068	745
0.051	0.103	0.062781	0.000315	327
0.051	0.155	0.096371	0.000484	320
0.069	0.069	0.030269	0.000152	452
0.069	0.137	0.074047	0.000372	369
0.069	0.206	0.107880	0.000542	380
0.103	0.103	0.035459	0.000178	578
0.103	0.206	0.086548	0.000434	474
0.103	0.309	0.119699	0.000601	514
0.137	0.137	0.039053	0.000196	700
0.137	0.275	0.089600	0.000450	610
0.137	0.412	0.129731	0.000651	632

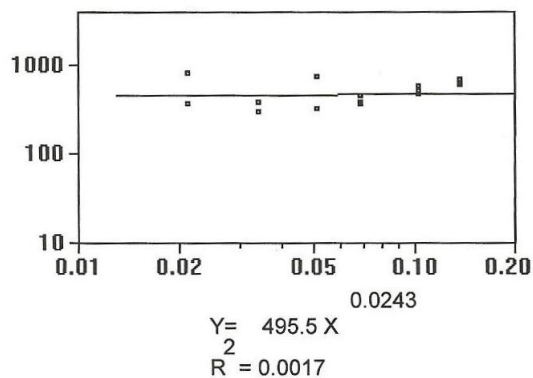
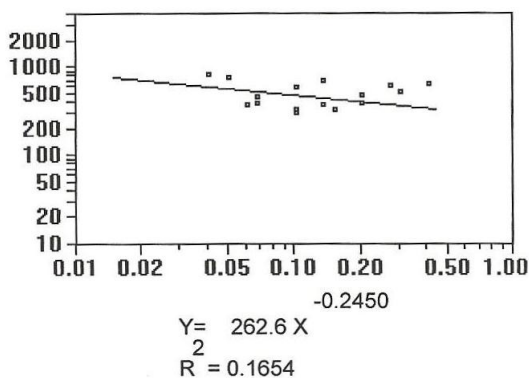
Def. Cond.: 0.7640 mm

Def. Total: 0.8480 mm

Altura final C.P.: 199.152 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)

Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\DONIZETE\1091 R.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: sub-leito argila	Origem: DER-MG	C.P. No.: 1091
Rodovia: MG 232	Trecho: 09+120	Est/Km: F 01
Operador: ROBERTO VIANNA	Interess.: MSc. Donizetti	Data: 15-05-2009
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: NORMAL	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Especifica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.010975	0.000056	370
0.021	0.041	0.033870	0.000172	240
0.021	0.062	0.052792	0.000268	231
0.034	0.034	0.019042	0.000097	355
0.034	0.069	0.048919	0.000248	277
0.034	0.103	0.109160	0.000554	186
0.051	0.051	0.044395	0.000225	226
0.051	0.103	0.078484	0.000398	259
0.051	0.155	0.141640	0.000719	216
0.069	0.069	0.049727	0.000252	272
0.069	0.137	0.108382	0.000550	250
0.069	0.206	0.175037	0.000888	232
0.103	0.103	0.057335	0.000291	354
0.103	0.206	0.156448	0.000794	259
0.103	0.309	0.228356	0.001159	267
0.137	0.137	0.083268	0.000423	325
0.137	0.275	0.178029	0.000904	304
0.137	0.412	0.277237	0.001408	293

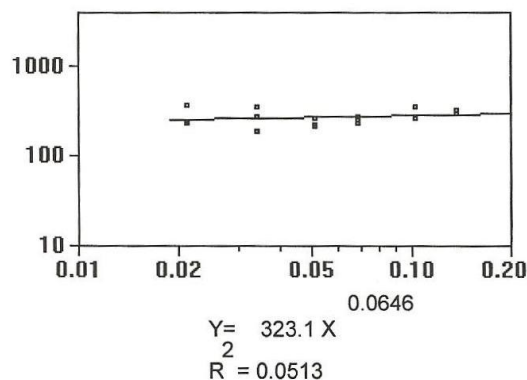
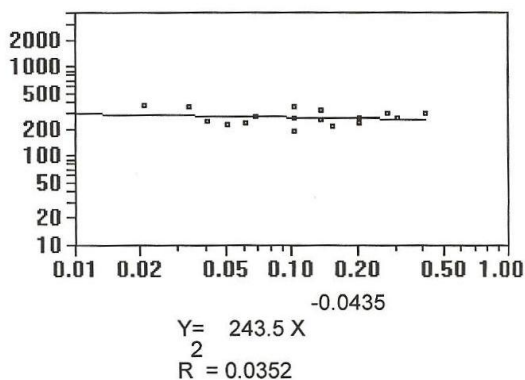
Def. Cond.: 2.8050 mm

Def. Total: 3.1130 mm

Altura final C.P.: 196.887 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)

Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\DONIZETE\1092.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: sub-leito argila	Origem: DER-MG	C.P. No.: 1092
Rodovia: MG 232	Trecho: 309+19D	Est/Km: F 04
Operador: ROBERTO VIANNA	Interess.: MSc. Donizetti	Data: 15-05-2009
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: NORMAL	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.008193	0.000041	498
0.021	0.041	0.025021	0.000126	326
0.021	0.062	0.039914	0.000201	307
0.034	0.034	0.011763	0.000059	578
0.034	0.069	0.037736	0.000190	361
0.034	0.103	0.090912	0.000459	224
0.051	0.051	0.020666	0.000104	489
0.051	0.103	0.076566	0.000386	267
0.051	0.155	0.138265	0.000698	222
0.069	0.069	0.040307	0.000203	337
0.069	0.137	0.112943	0.000570	241
0.069	0.206	0.214379	0.001082	190
0.103	0.103	0.059158	0.000299	345
0.103	0.206	0.186828	0.000943	218
0.103	0.309	0.309974	0.001565	197
0.137	0.137	0.084445	0.000426	322
0.137	0.275	0.241545	0.001220	225
0.137	0.412	0.416208	0.002104	196

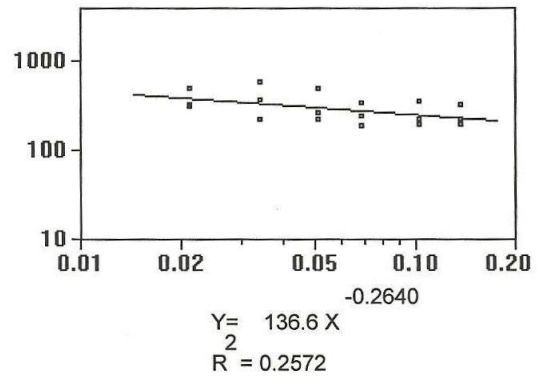
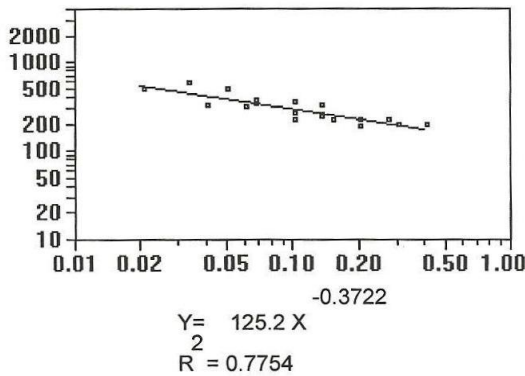
Def. Cond.: 1.7580 mm

Def. Total: 2.2100 mm

Altura final C.P.: 197.790 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)

Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\DONIZETE\S 1093 I.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: sub-leito argila	Origem: DER-MG	C.P. No.: 1093
Rodovia: MG 232	Trecho: 710+5e	Est/Km: F 08
Operador: ROBERTO VIANNA	Interess.: MSc. Donizete	Data: 14-05-2009
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: INTERNORMAL	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Especifica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.011951	0.000061	339
0.021	0.041	0.033503	0.000170	242
0.021	0.062	0.059408	0.000302	205
0.034	0.034	0.023362	0.000119	289
0.034	0.069	0.061179	0.000311	221
0.034	0.103	0.153093	0.000777	132
0.051	0.051	0.025134	0.000128	400
0.051	0.103	0.116613	0.000592	174
0.051	0.155	0.200608	0.001019	152
0.069	0.069	0.052258	0.000265	259
0.069	0.137	0.168450	0.000856	160
0.069	0.206	0.257526	0.001308	157
0.103	0.103	0.072884	0.000370	278
0.103	0.206	0.221130	0.001124	183
0.103	0.309	0.356390	0.001812	171
0.137	0.137	0.093561	0.000476	289
0.137	0.275	0.267725	0.001361	202
0.137	0.412	0.430868	0.002192	188

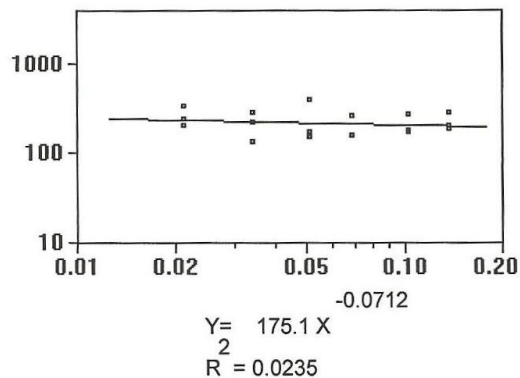
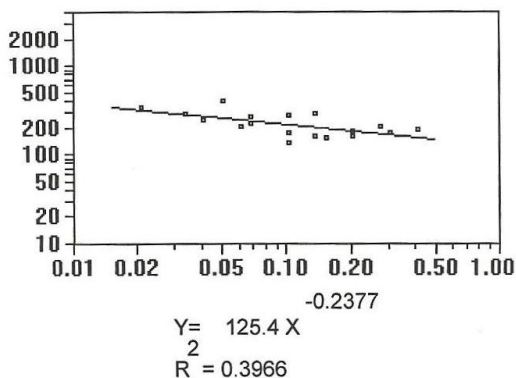
Def. Cond.: 2.9880 mm

Def. Total: 3.4610 mm

Altura final C.P.: 196.539 mm

Sigmat (MPa) x M.R.(MPa)

Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\DONIZETE\1094 I.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: sub-leito argila	Origem: DER-MG	C.P. No.: 1094
Rodovia: MG 232	Trecho: 509+100E	Est/Km: F 06
Operador: ROBERTO VIANNA	Interess.: MSc. Donizete	Data: 14-05-2009
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: INTERNORMAL	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

T. Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.011078	0.000056	367
0.021	0.041	0.025216	0.000128	323
0.021	0.062	0.043928	0.000222	278
0.034	0.034	0.015787	0.000080	429
0.034	0.069	0.048105	0.000244	282
0.034	0.103	0.090884	0.000460	224
0.051	0.051	0.025905	0.000131	389
0.051	0.103	0.085808	0.000435	237
0.051	0.155	0.181218	0.000918	169
0.069	0.069	0.044582	0.000226	304
0.069	0.137	0.140145	0.000710	193
0.069	0.206	0.269798	0.001367	151
0.103	0.103	0.075901	0.000385	268
0.103	0.206	0.244902	0.001241	166
0.103	0.309	0.420692	0.002133	145
0.137	0.137	0.110672	0.000561	245
0.137	0.275	0.317495	0.001610	171
0.137	0.412	0.556226	0.002826	146

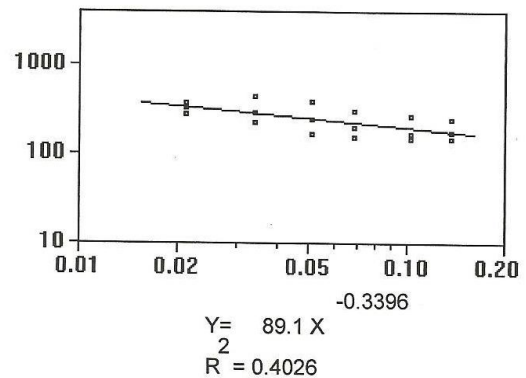
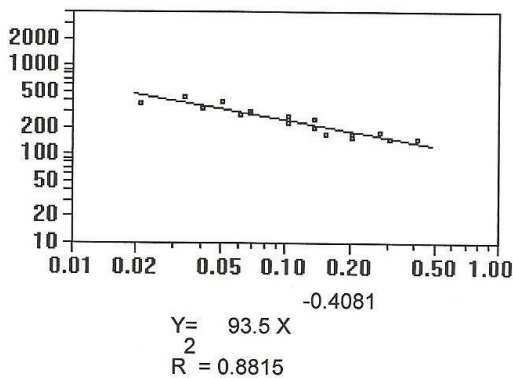
Def. Cond.: 2.5160 mm

Def. Total: 3.1770 mm

Altura final C.P.: 196.823 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)

Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\DONIZETTI\1095.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: cascalho	Origem: DER-MG	C.P. No.: 1095
Rodovia: MG-232	Trecho:	Est/Km:
Operador: ROBERTO VIANNA	Interess.: DONIZETTI	Data: 24/09/2009
Diametro C.P.(cm): 10	Energia: Modificada	Dist. Apoios(mm): 200
Altura C.P.(cm): 20		

TABELA DE RESULTADOS

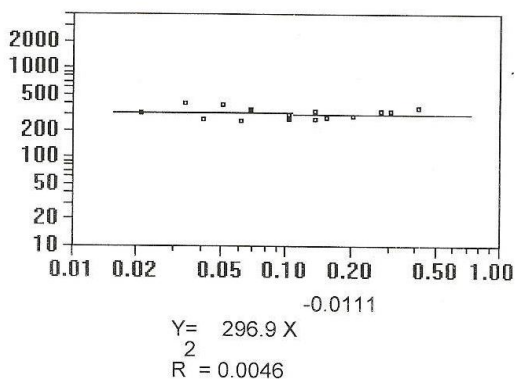
T. Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.013127	0.000066	311
0.021	0.041	0.030651	0.000154	267
0.021	0.062	0.048467	0.000244	253
0.034	0.034	0.017312	0.000087	393
0.034	0.069	0.040622	0.000205	335
0.034	0.103	0.077575	0.000391	263
0.051	0.051	0.026560	0.000134	381
0.051	0.103	0.075226	0.000379	272
0.051	0.155	0.111429	0.000562	276
0.069	0.069	0.042808	0.000216	318
0.069	0.137	0.104408	0.000526	261
0.069	0.206	0.143661	0.000724	284
0.103	0.103	0.068095	0.000343	300
0.103	0.206	0.145871	0.000735	280
0.103	0.309	0.189720	0.000956	323
0.137	0.137	0.084451	0.000426	323
0.137	0.275	0.165656	0.000835	329
0.137	0.412	0.228122	0.001150	358

Def. Cond.: 1.5670 mm

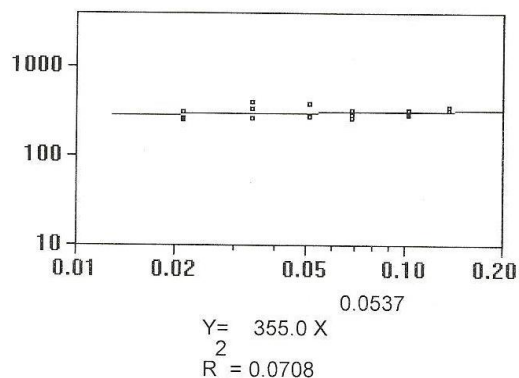
Def. Total: 1.6650 mm

Altura final C.P.: 198.335 mm

Sigmatd (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\dados\DONIZETTI\1096.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: sub base	Origem: DER-MG	C.P. No.: 1096
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Roberto Vianna	Interess.: Donizetti	Data: 10/06/10
Diametro C.P.(cm): 10		
Altura C.P.(cm): 20	Energia: intermediária	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

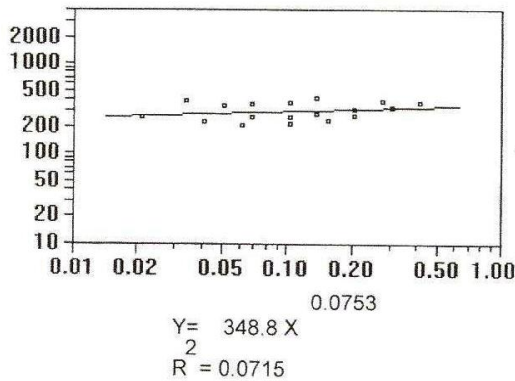
T. Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Especifica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.016195	0.000082	253
0.021	0.041	0.036249	0.000182	226
0.021	0.062	0.059292	0.000298	207
0.034	0.034	0.017619	0.000089	387
0.034	0.069	0.054398	0.000274	251
0.034	0.103	0.095489	0.000481	214
0.051	0.051	0.029483	0.000148	344
0.051	0.103	0.080881	0.000407	253
0.051	0.155	0.131838	0.000664	233
0.069	0.069	0.038877	0.000196	351
0.069	0.137	0.100998	0.000509	270
0.069	0.206	0.156396	0.000788	261
0.103	0.103	0.054790	0.000276	373
0.103	0.206	0.129168	0.000651	317
0.103	0.309	0.191892	0.000967	320
0.137	0.137	0.064957	0.000327	420
0.137	0.275	0.144592	0.000729	377
0.137	0.412	0.222419	0.001121	367

Def. Cond.: 1.1860 mm

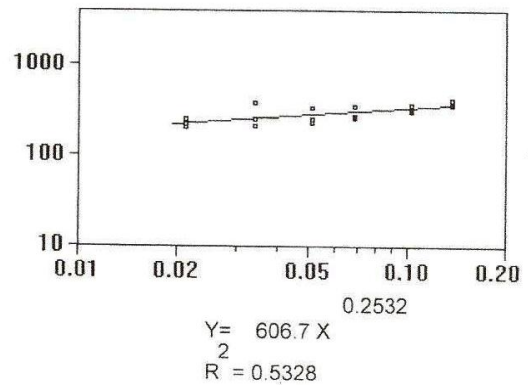
Def. Total: 1.6020 mm

Altura final C.P.: 198.398 mm

Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



ANEXO VI

RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\DADOS\30-09\11564.DAT

DADOS DO ENSAIO

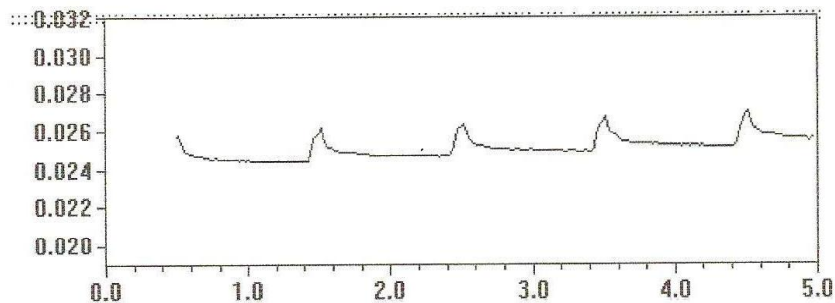
Amostra: UFOP - TESE	Origem: DER MINAS	C.P. No.: 11564
Rodovia:	Trecho: SANTANA DO PARAISO MEEst/Km: GAB. 1	
Operador: ROBERTO VIANNA	Interess.: DONIZETTI	Data: 04/06/2009
Diâmetro C.P.(cm): 9.89	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 6.08

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	62.47	0.002462	2326
CICLO 2 -->	62.47	0.002211	2591
CICLO 3 -->	62.47	0.002292	2500

Valor Médio: 2472 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\DADOS\30-09\11564R.DAT

DADOS DO ENSAIO

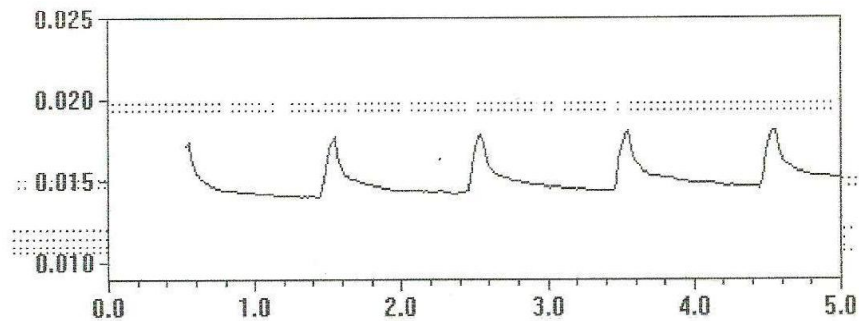
Amostra: UFOP - TESE	Origem: DER MINAS	C.P. No.: 11564
Rodovia:	Trecho: SANTANA DO PARAISO MEEst/Km: GAB. 1	
Operador: ROBERTO VIANNA	Interess.: DONIZETTI	Data: 04/06/2009
Diâmetro C.P.(cm): 9.89	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 6.08

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	92.95	0.005429	1570
CICLO 2 -->	92.95	0.004874	1749
CICLO 3 -->	92.95	0.005427	1570

Valor Médio: 1630 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\DADOS\30-09\11565.DAT

DADOS DO ENSAIO

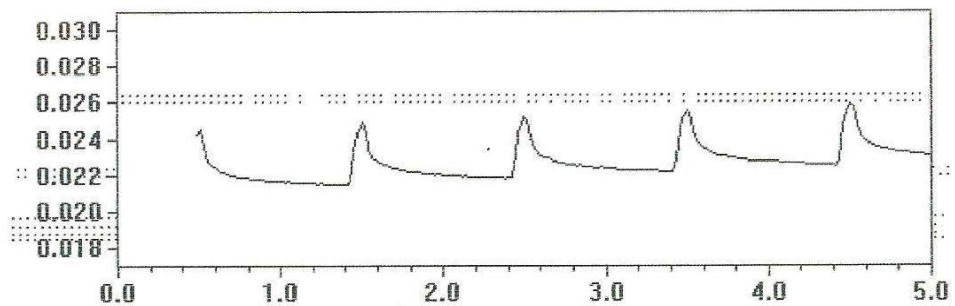
Amostra: ENVELHECIMENTO	Origem: PLACA 4	C.P. No.: 11565
Rodovia:	Trecho:	Est/Km: GAB. 1
Operador: ROBERTO VIANNA	Interess.: CENPES	Data: 04/06/2009
Diâmetro C.P.(cm): 9.92	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 3.44

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	92.95	0.004811	3131
CICLO 2 -->	92.95	0.004987	3020
CICLO 3 -->	92.95	0.004910	3068

Valor Médio: 3073 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\DADOS\30-09\11566.DAT

DADOS DO ENSAIO

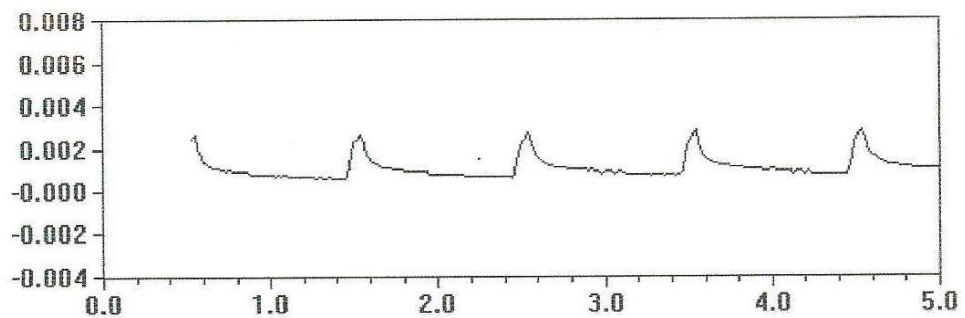
Amostra: UFOP - TESE	Origem: DER MINAS	C.P. No.: 11566
Rodovia:	Trecho: SANTANA DO PARAISO MEEst/Km: GAB. 1	
Operador: ROBERTO VIANNA	Interess.: DONIZETTI	Data: 04/06/2009
Diâmetro C.P.(cm): 9.97	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 4.57

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	123.42	0.003189	4722
CICLO 2 -->	123.42	0.003085	4880
CICLO 3 -->	123.42	0.003132	4807

Valor Médio: 4803 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\DADOS\30-09\11567.DAT

DADOS DO ENSAIO

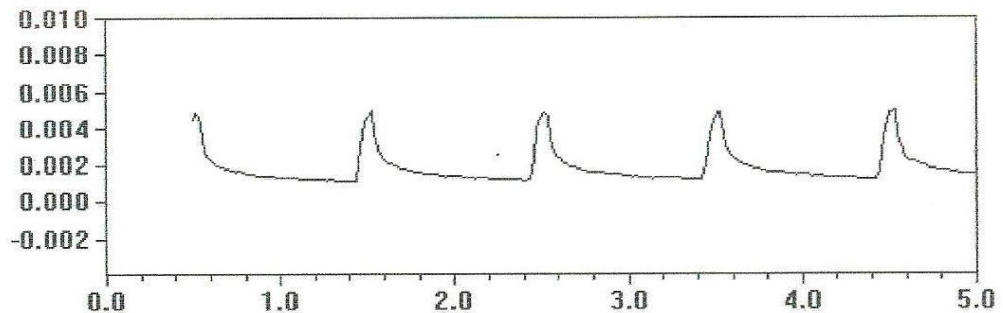
Mostra: UFOP - TESE	Origem: DER MINAS	C.P. No.: 11567
Rodovia:	Trecho: SANTANA DO PARAISO ME Est/Km: GAB. 1	
Operador: ROBERTO VIANNA	Interess.: DONIZETTI	Data: 04/06/2009
Diâmetro C.P.(cm): 10.00	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 4.1

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	184.38	0.006246	3956
CICLO 2 -->	184.38	0.006400	3861
CICLO 3 -->	184.38	0.006239	3961

Valor Médio: 3926 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\DADOS\30-09\11568.DAT

DADOS DO ENSAIO

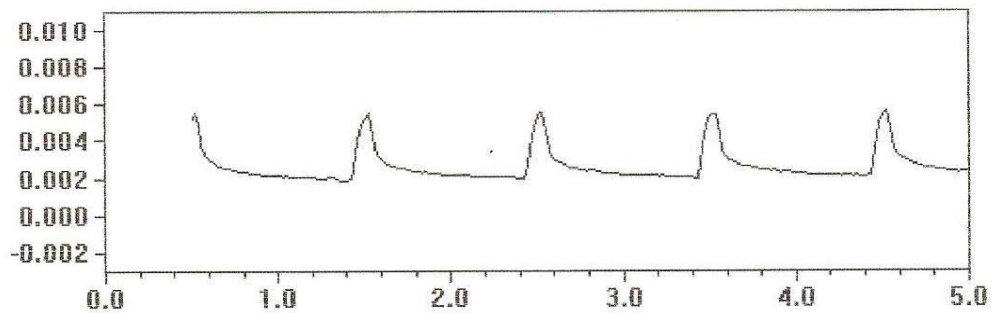
Amostra: UFOP - TESE	Origem: DER MINAS	C.P. No.: 11568
Rodovia:	Trecho: SANTANA DO PARAISO MEEst/Km: GAB. 1	
Operador: ROBERTO VIANNA	Interess.: DONIZETTI	Data: 04/06/2009
Diâmetro C.P.(cm): 9.94	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 4.

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	214.86	0.005664	4873
CICLO 2 -->	214.86	0.005581	4945
CICLO 3 -->	214.86	0.005725	4821

Valor Médio: 4880 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\DADOS\30-09\11569.DAT

DADOS DO ENSAIO

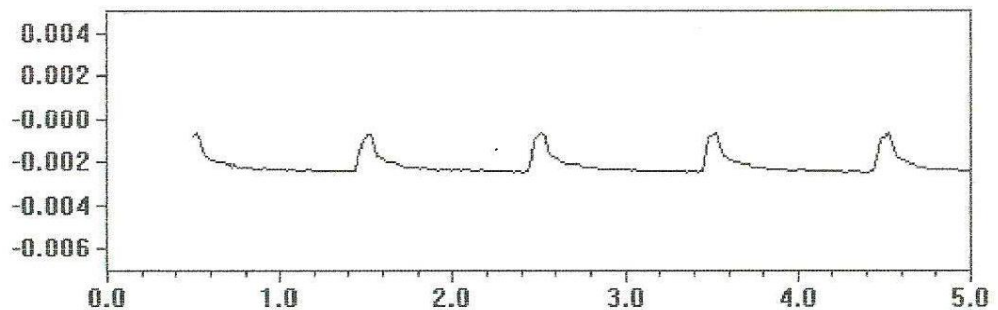
Amostra: UFOP - TESE	Origem: DER MINAS	C.P. No.: 11569
Rodovia:	Trecho: SANTANA DO PARAISO MEEst/Km: GAB. 1	
Operador: ROBERTO VIANNA	Interess.: DONIZETTI	Data: 04/06/2009
Diâmetro C.P.(cm): 9.96	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 4.

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	92.95	0.003600	3075
CICLO 2 -->	92.95	0.002705	4093
CICLO 3 -->	92.95	0.003615	3063

Valor Médio: 3410 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



ANEXO VII
DEFLEXÕES MÁXIMAS - RODOVIA MG-323
TRECHO: MESQUITA – SANTANA DO PARAÍSO - (DER/MG, 2010).

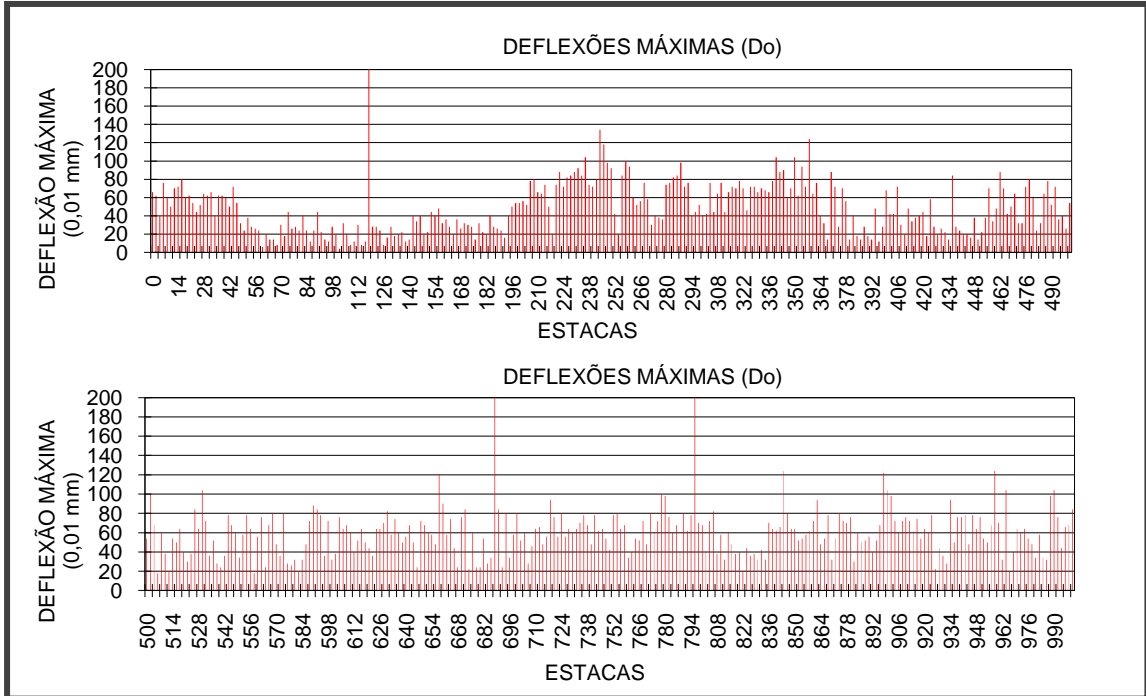


GRÁFICO DEFLEXÕES MÁXIMAS (D₀) - LADO DIREITO.

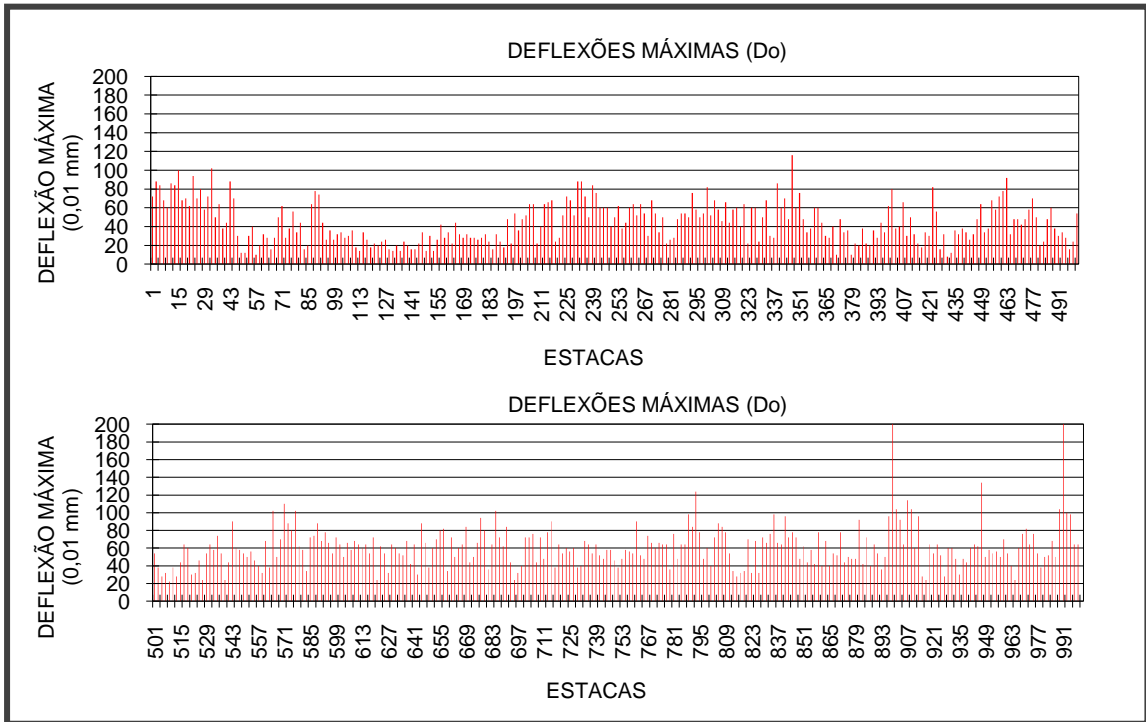


GRÁFICO DEFLEXÕES MÁXIMAS (D₀) - LADO ESQUERDO.

ANEXO VIII

GRÁFICOS - RAIOS DE CURVATURA - RODOVIA MG-323 TRECHO: MESQUITA – SANTANA DO PARAÍSO - (DER/MG, 2010).

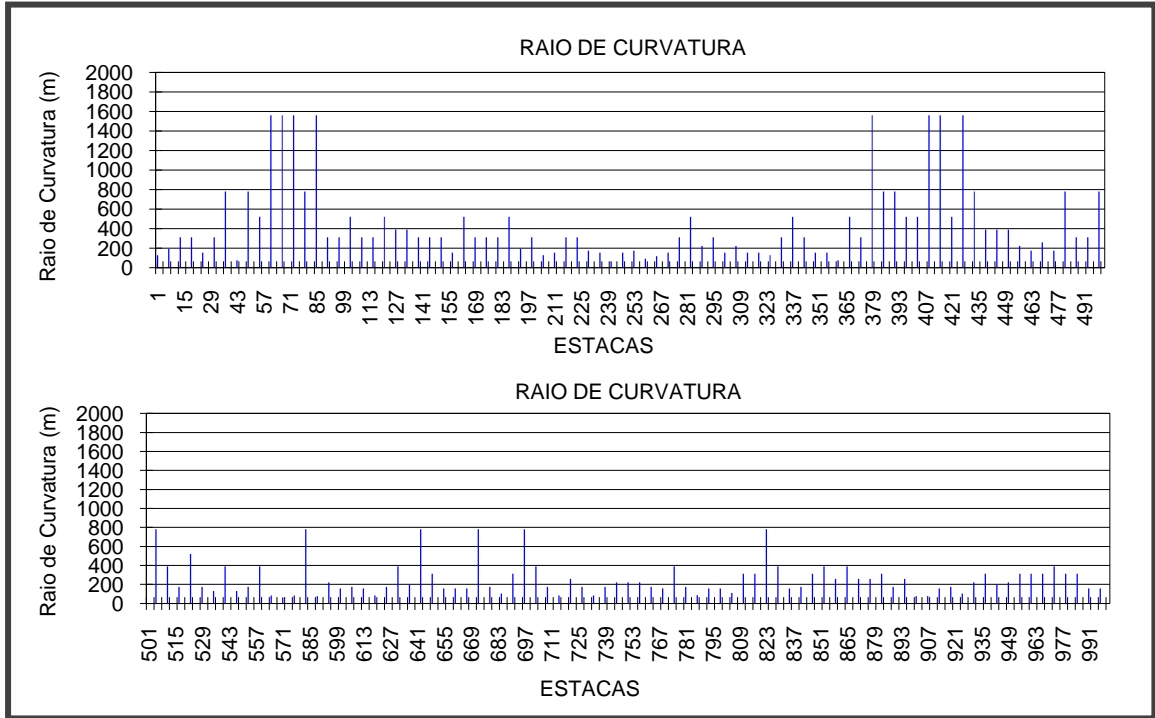


GRÁFICO RAIOS DE CURVATURA - LADO DIREITO.

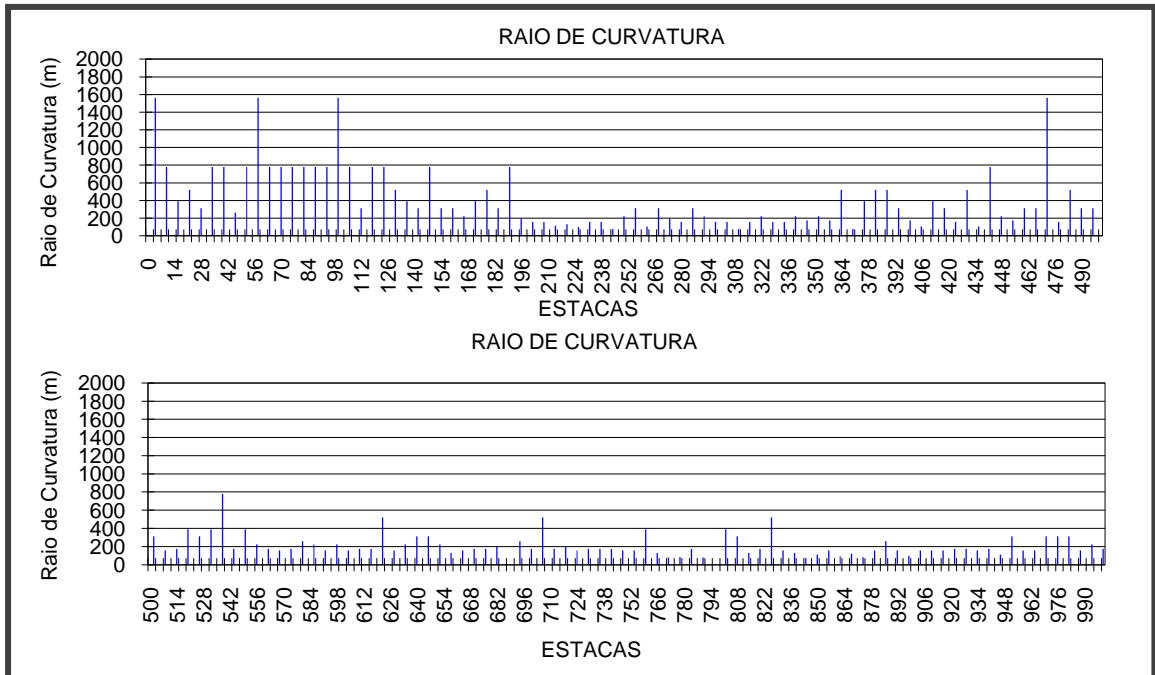


GRÁFICO RAIOS DE CURVATURA - LADO ESQUERDO.

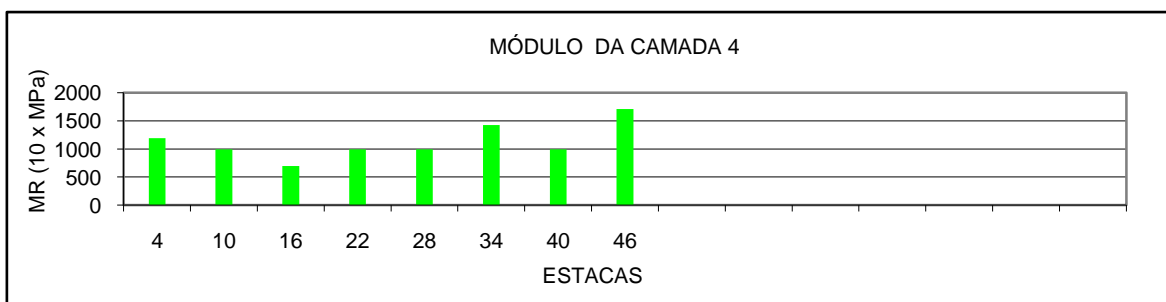
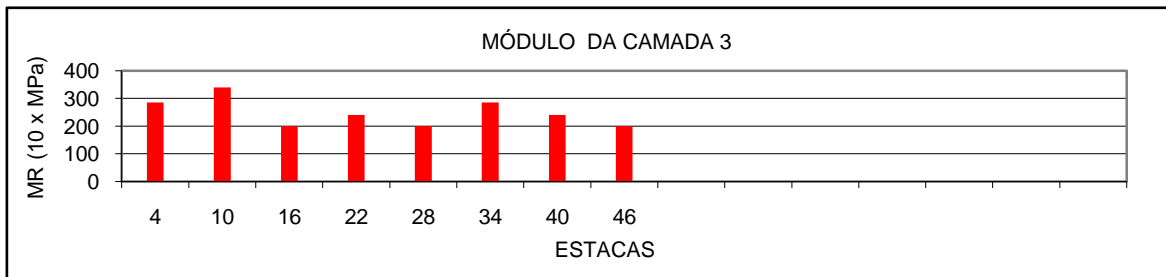
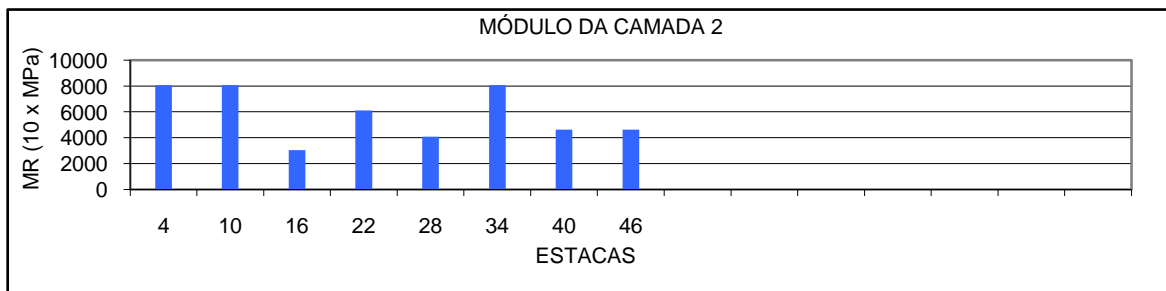
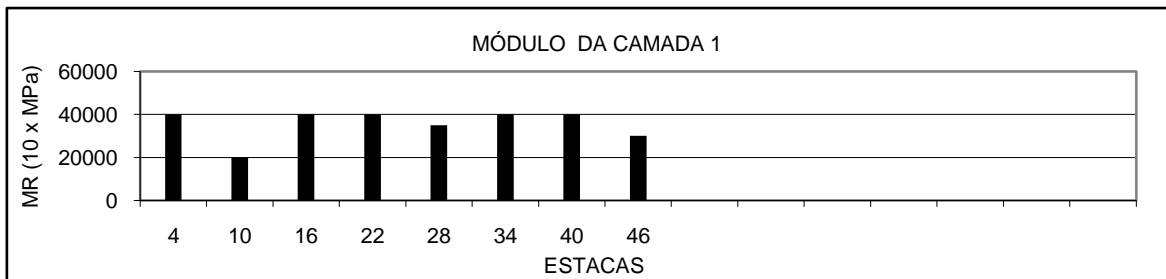
ANEXO IX

RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETRANS5-L

GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232

Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-1 - Est.: 0 - 49 - FD - Ext.: 980 m

SEÇÃO	CAMADA 1	CAMADA 2	CAMADA 3	CAMADA 4
	Revestimento (PMF + LA)	Base (escória)	Sub-base (cascalho)	Subleito (areia argilosa)
ESPESSURA (cm)	6,0	17,0	19,0	Infinito

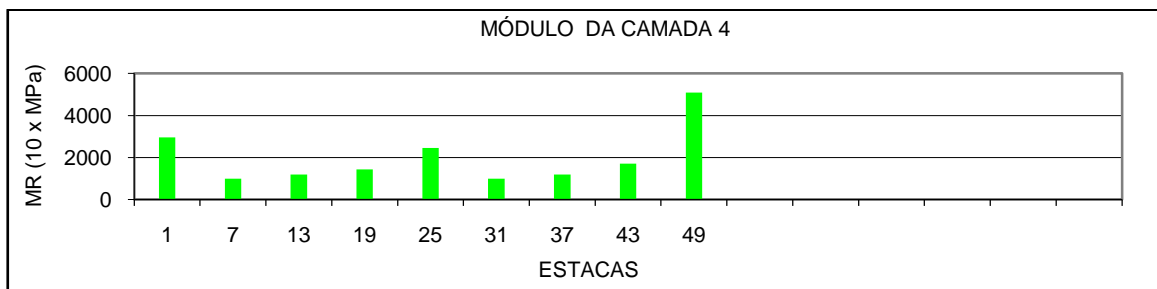
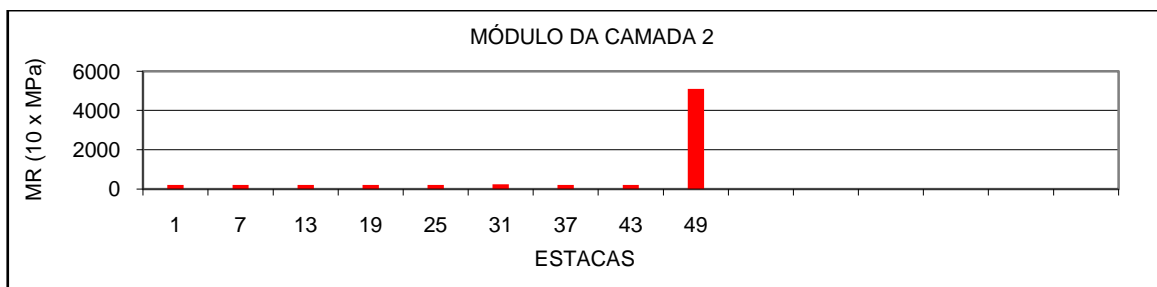
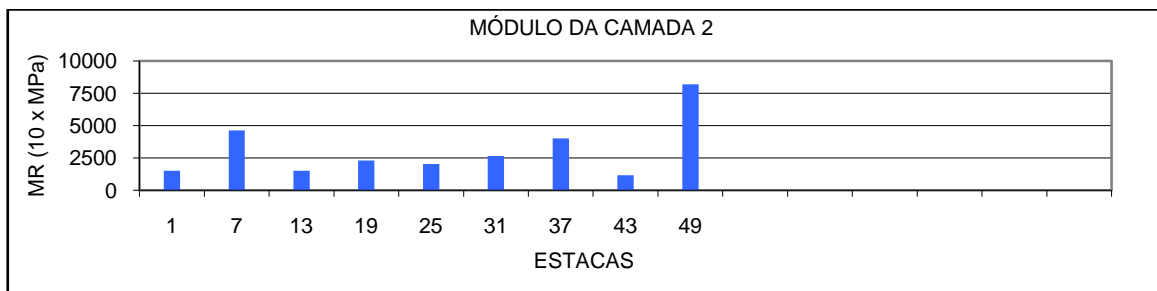
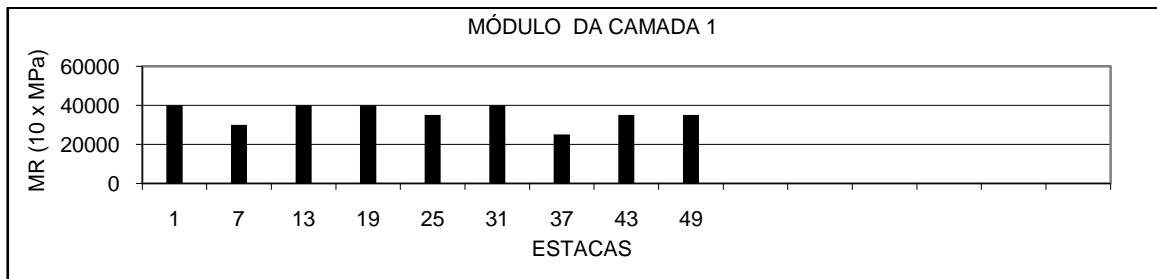


RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETRANS5-L

GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232

Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-1 - Est.: 0 - 49 - FE - Ext.: 980 m

SEÇÃO	CAMADA 1	CAMADA 2	CAMADA 3	CAMADA 4
	Revestimento (PMF + LA)	Base (escória)	Sub-base (cascalho)	Subleito (areia argilosa)
ESPESSURA (cm)	6,0	17,0	19,0	Infinito

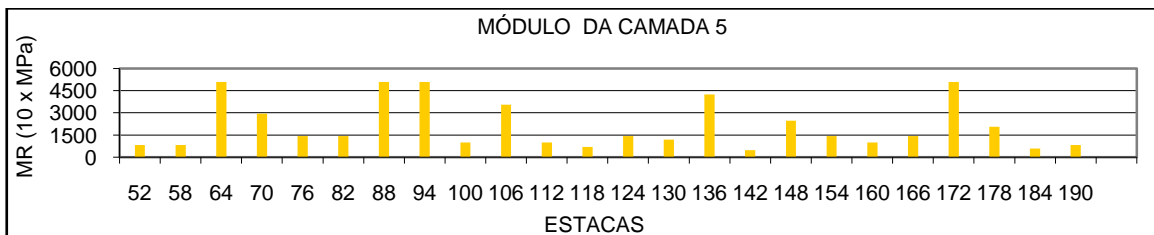
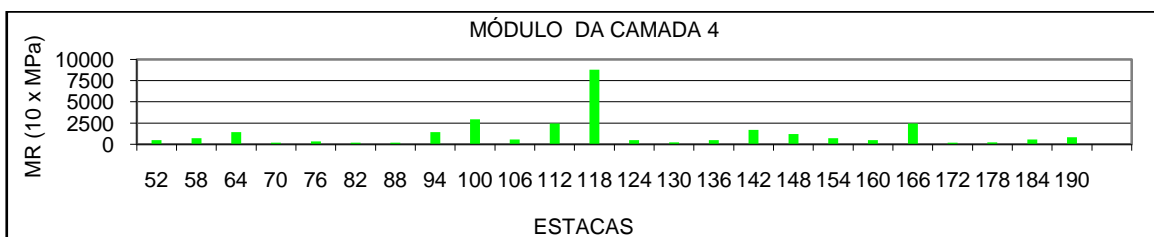
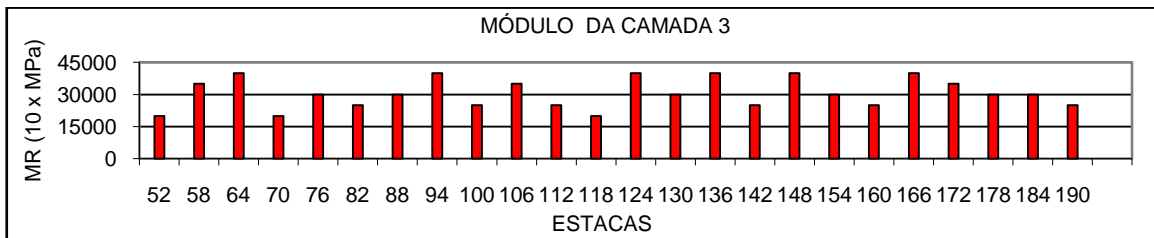
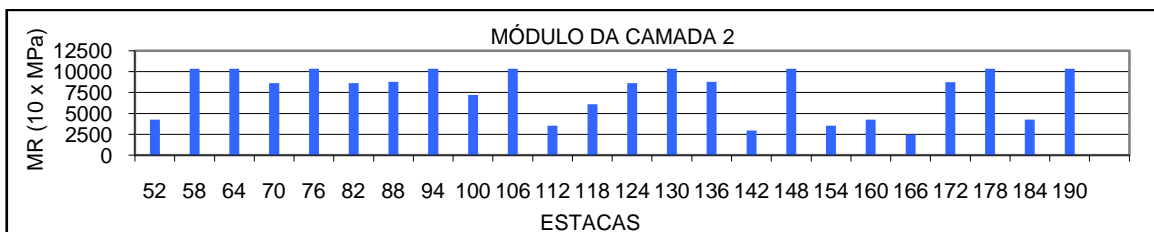
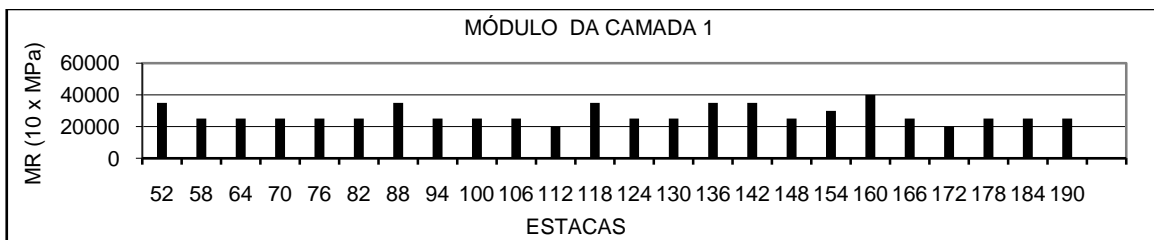


RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETRANS5-L

GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232

Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-2 - Est.: 49 - 192 - FD - Ext.: 2.860 m

SEÇÃO	CAMADA 1	CAMADA 2	CAMADA 3	CAMADA 4	CAMADA 5
	Revestimento (PMF)	Base (escória + 20% de argila)	Sub-base (revestimento antigo em PMF)	Sub-base (antiga Base de escória + Sub-base de cascalho)	Subleito de argila
ESPESSURA (cm)	8,0	21,0	3,0	40,0	Infinito

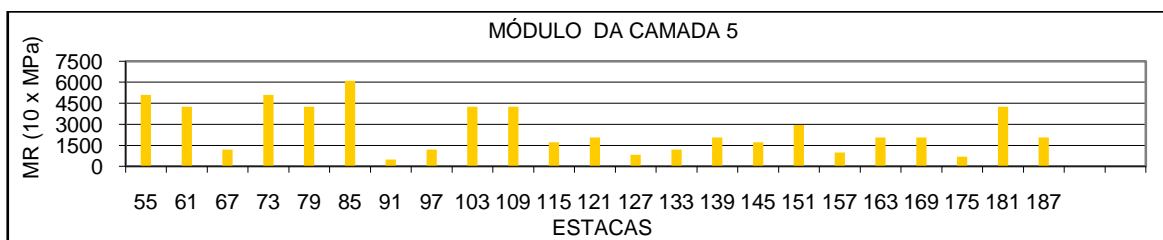
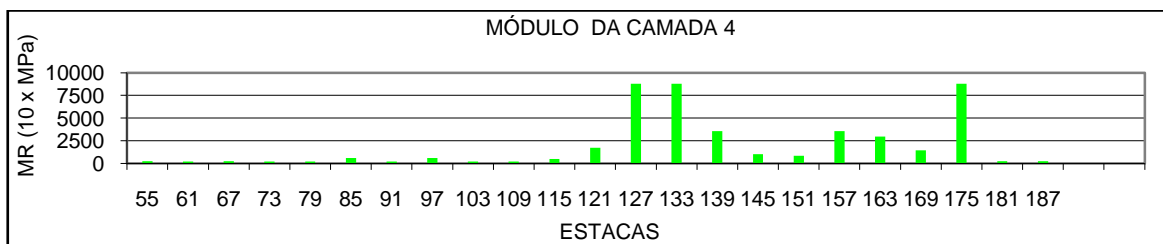
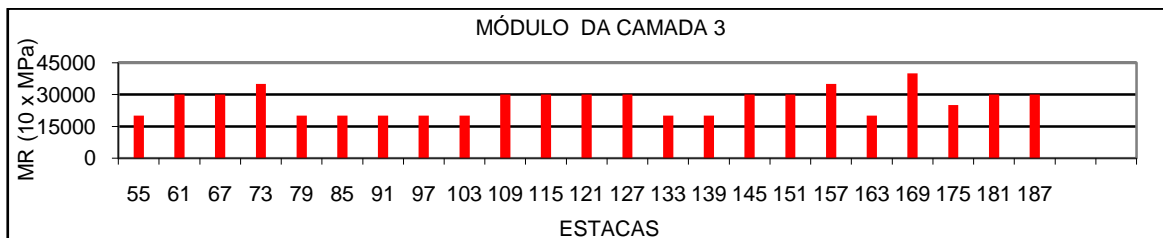
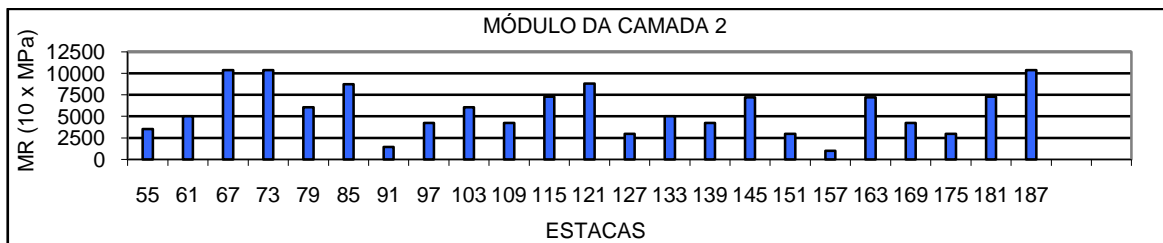
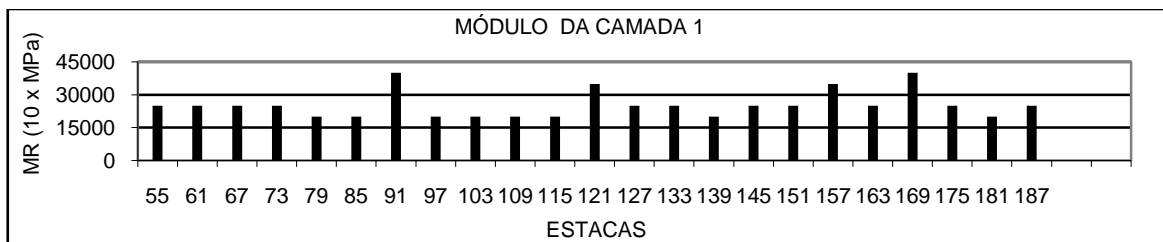


RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETRANS5-L

GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232

Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-2 - Est.: 49 - 192 - FE - Ext.: 2.860 m

SEÇÃO	CAMADA 1	CAMADA 2	CAMADA 3	CAMADA 4	CAMADA 5
	Revestimento (PMF)	Base (escória + 20% de argila)	Sub-base (revestimento antigo em PMF)	Sub-base (antiga Base de escória + Sub-base de cascalho)	Subleito de argila
ESPESSURA (cm)	8,0	21,0	3,0	40,0	Infinito

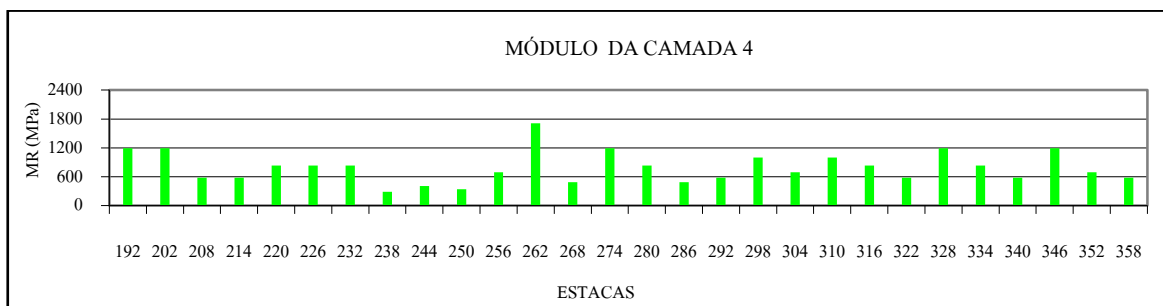
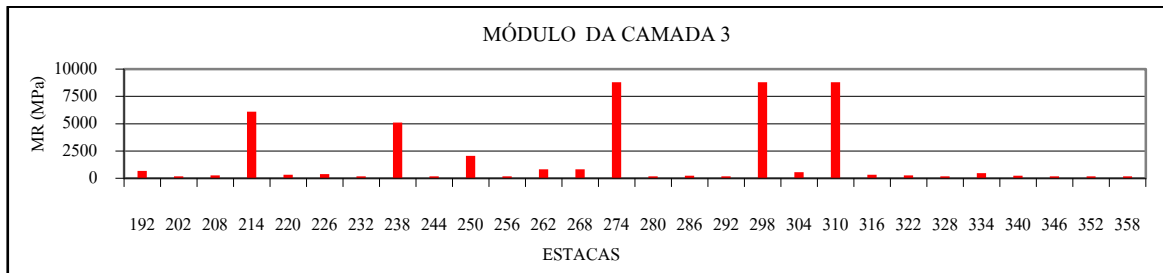
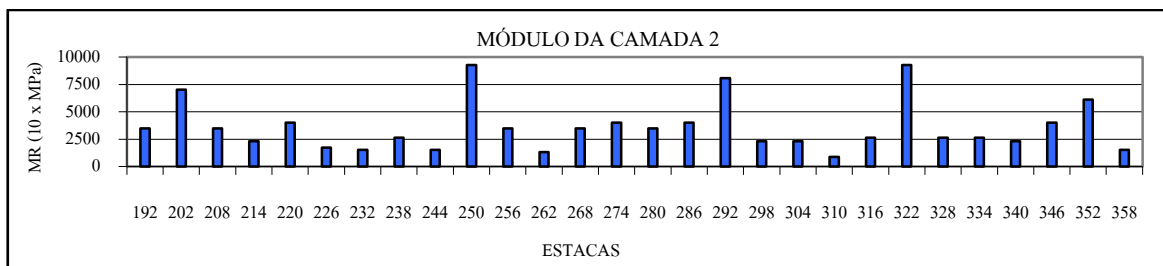
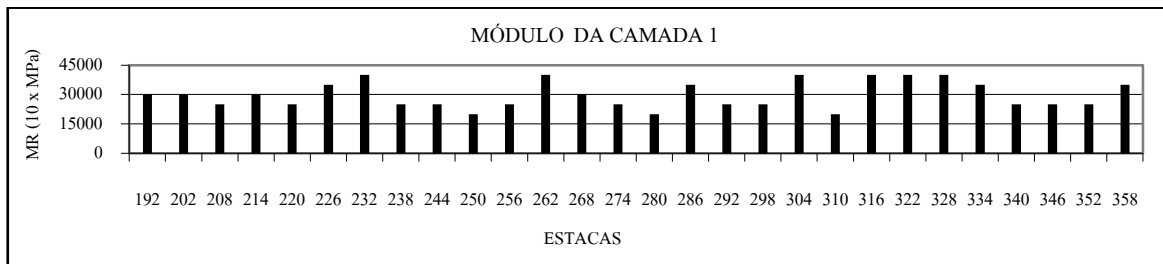


RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETRANS5-L

GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232

Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-3 - Est.: 192 - 362 - FD - Ext.: 3.400 m

SEÇÃO	CAMADA 1	CAMADA 2	CAMADA 3	
	Revestimento (PMF + LA)	Base (cascalho)	Sub-base (cascalho)	CAMADA 4
ESPESSURA (cm)	4,0	18,0	12,0	Subleito (arenosiltoso)
				Infinito

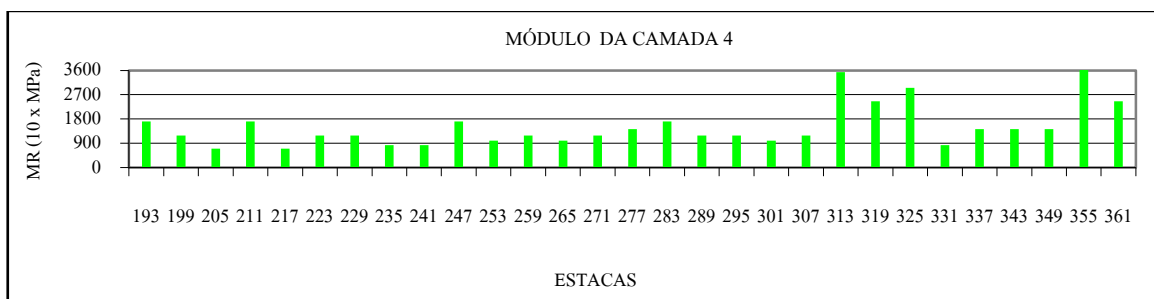
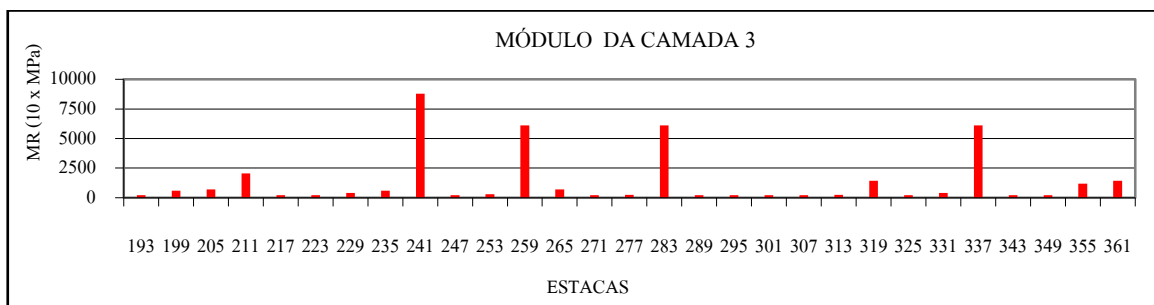
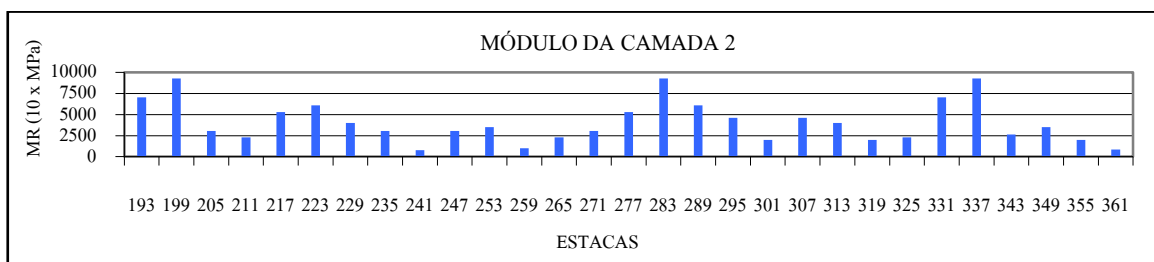
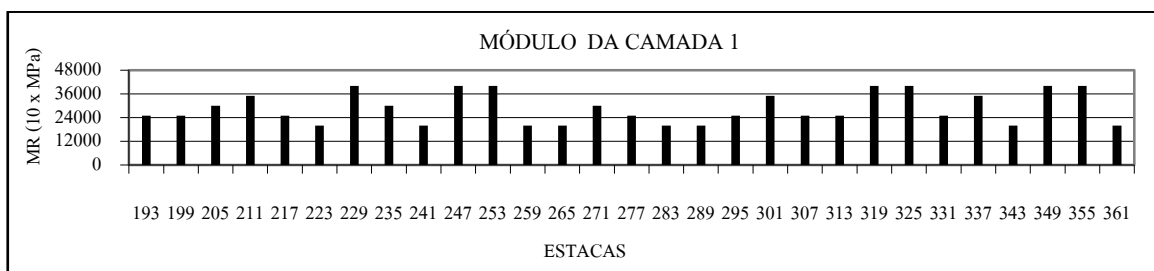


RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETRANS5-L

GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232

Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-3 - Est.: 192 - 362 - FE - Ext.: 3.400 m

SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (PMF + LA)	CAMADA 2 Base (cascalho)	CAMADA 3 Sub-base (cascalho)	CAMADA 4 Subleito (areno-siltoso)
ESPESSURA (cm)	4,0	18,0	12,0	Infinito

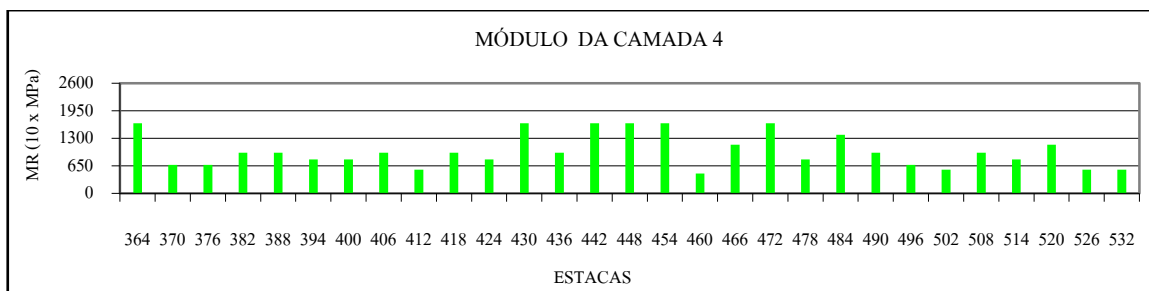
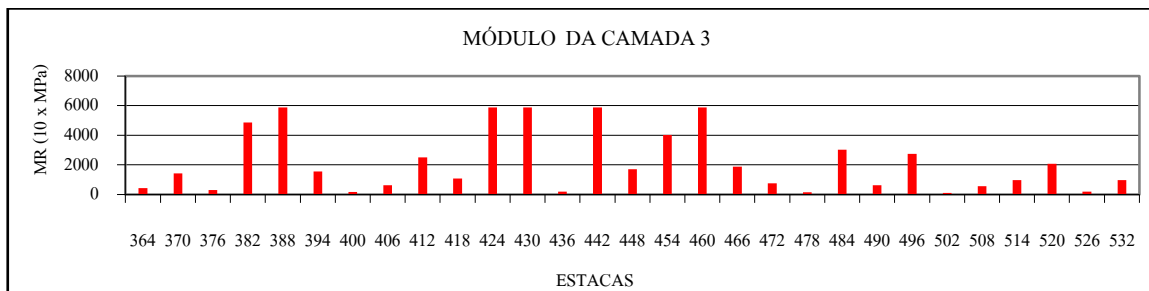
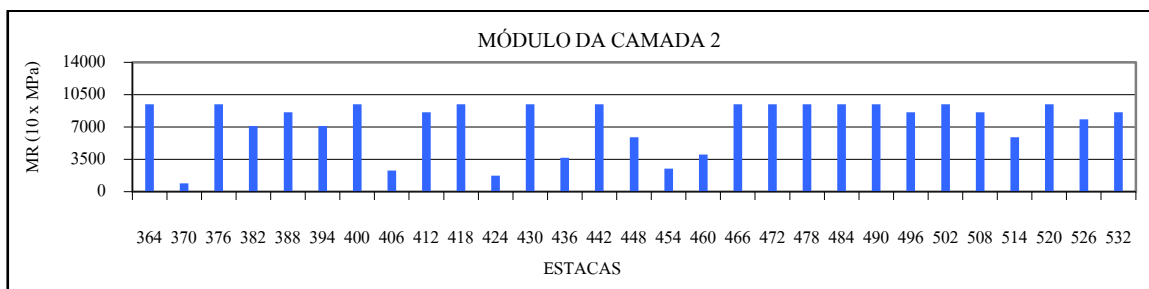
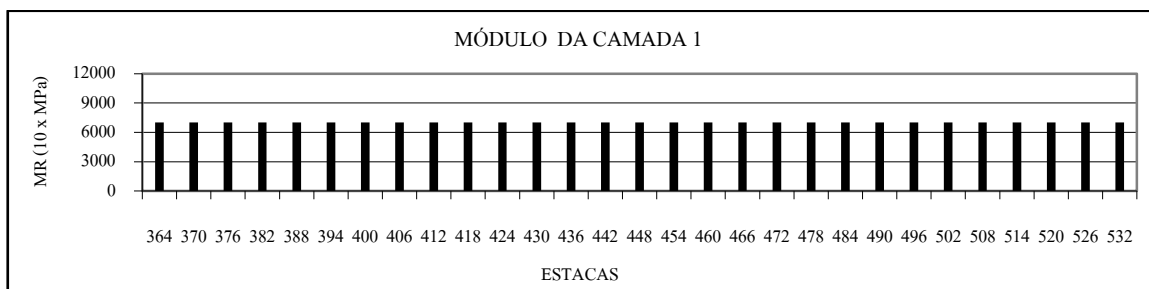


RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETRANS5-L

GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232

Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-4 - Est.: 362 - 533 - FD - Ext.: 3.420 m

SEÇÃO	CAMADA 1	CAMADA 2	CAMADA 3	CAMADA 4
	Revestimento	Base (escória + 20% de argila)	Reforço do subleito (argila)	Subleito (areno-argiloso)
ESPESSURA (cm)	3,0	18,0	12,0	Infinito
	(TSD + LA E TSD)			

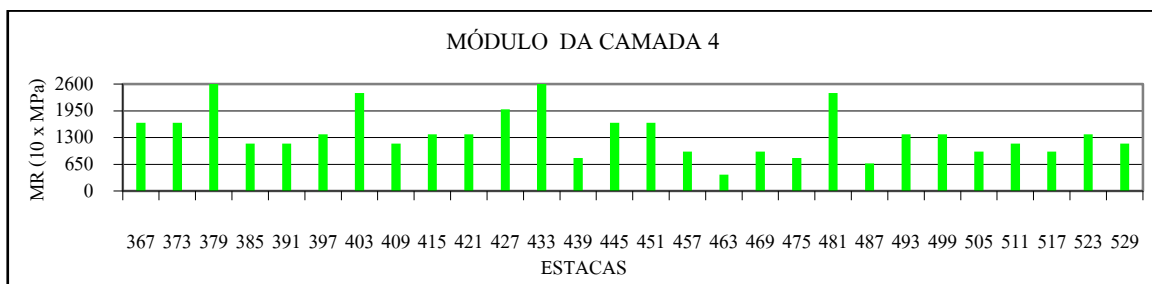
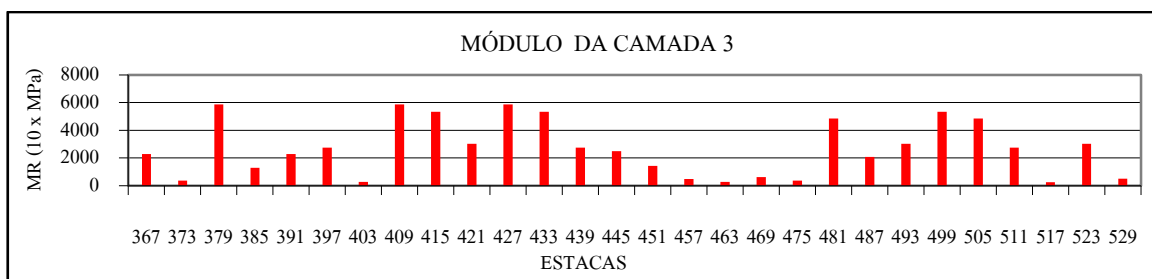
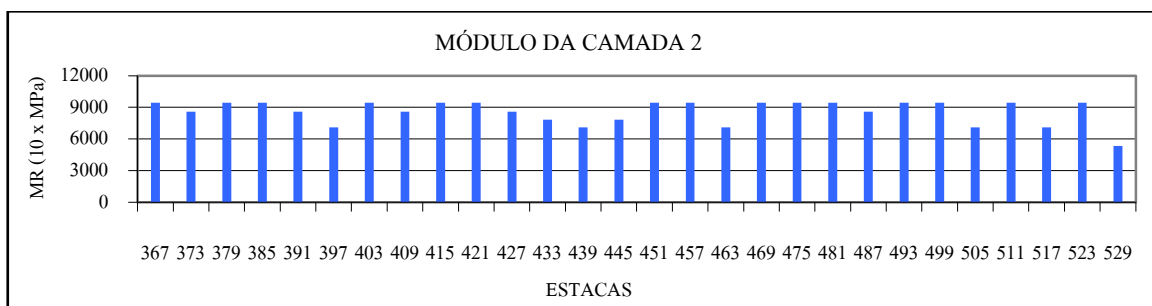
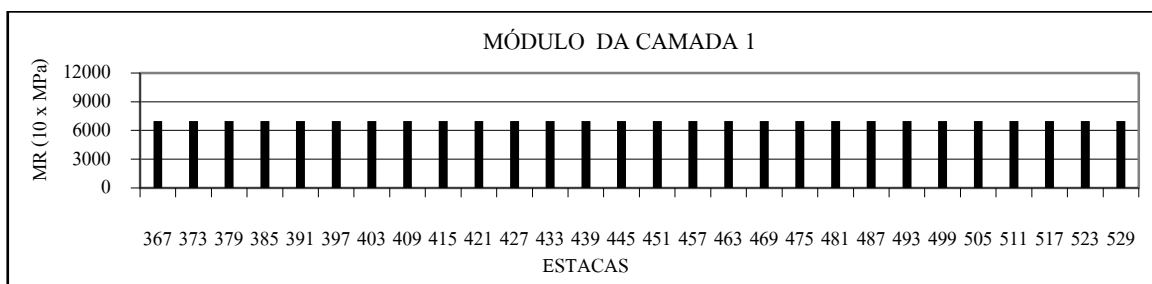


RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETRANS5-L

GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232

Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-4 - Est.: 362 - 533 - FE - Ext.: 3.420 m

SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (TSD + LA E TSD)	CAMADA 2 Base (escória + 20% de argila)	CAMADA 3 Reforço do subleito (argila)	CAMADA 4 Subleito (areno- argiloso)
ESPESSURA (cm)	3,0	18,0	12,0	Infinito

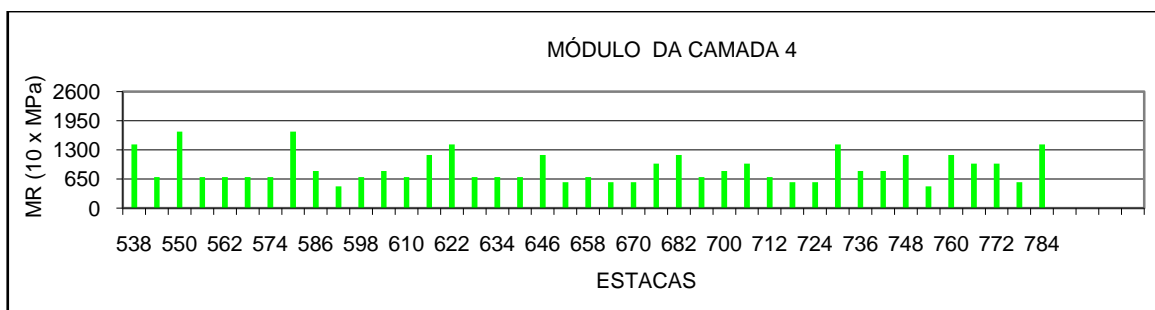
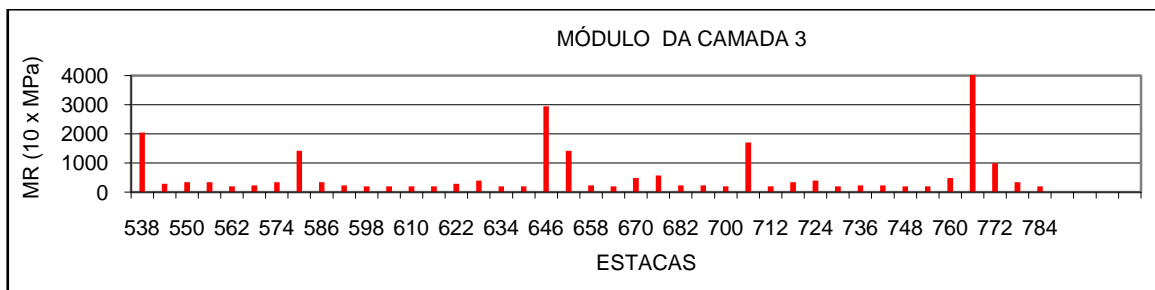
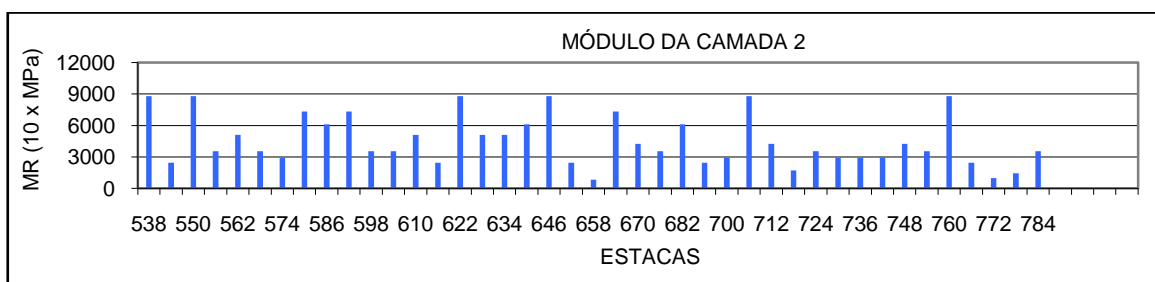
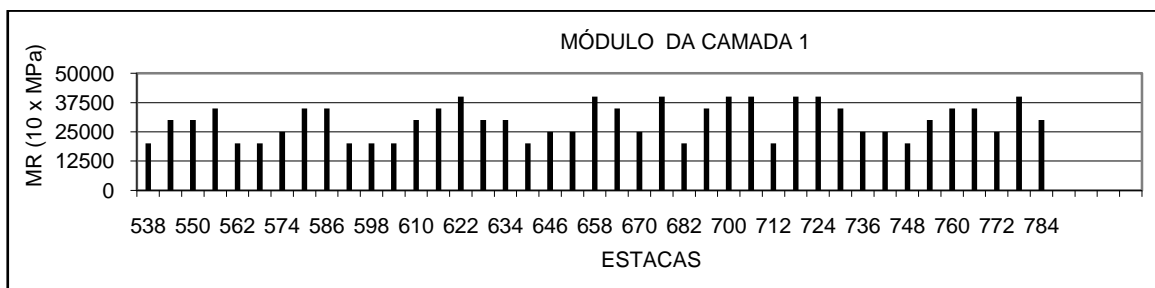


RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETRANS5-L

GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232

Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-5 - Est.: 533 - 784 - FD - Ext.: 5.020 m

SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (PMF)	CAMADA 2 Base (escória)	CAMADA 3 Reforço do subleito (argila)	CAMADA 4 Subleito (areno-argiloso)
ESPESSURA (cm)	4,0	22,0	20,0	Infinito

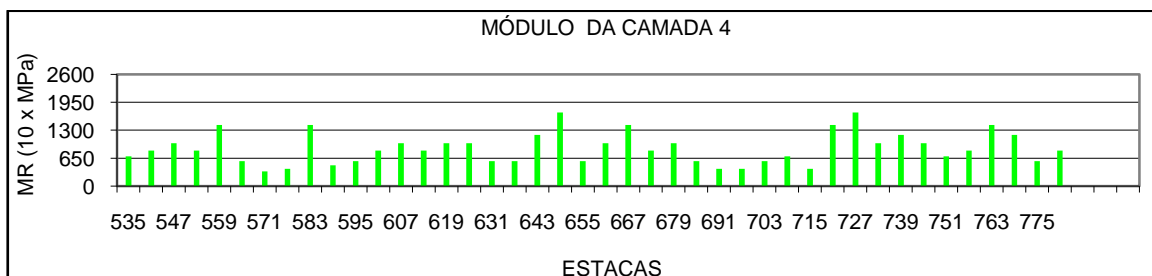
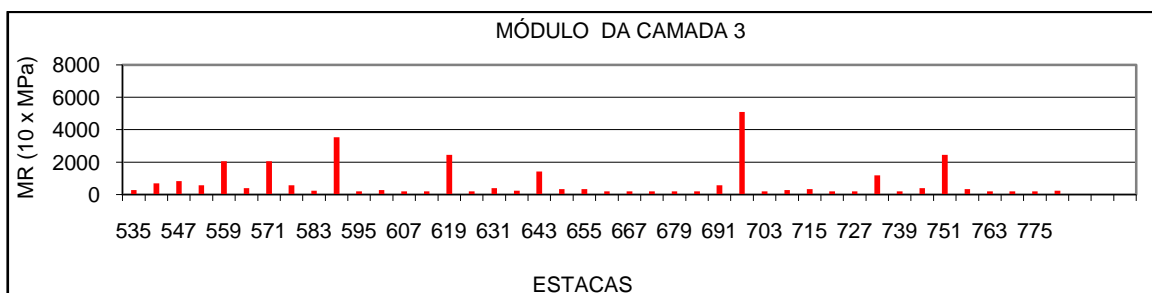
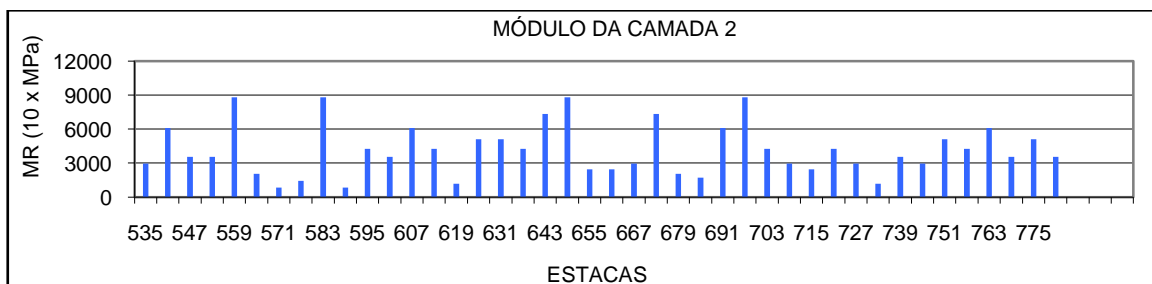
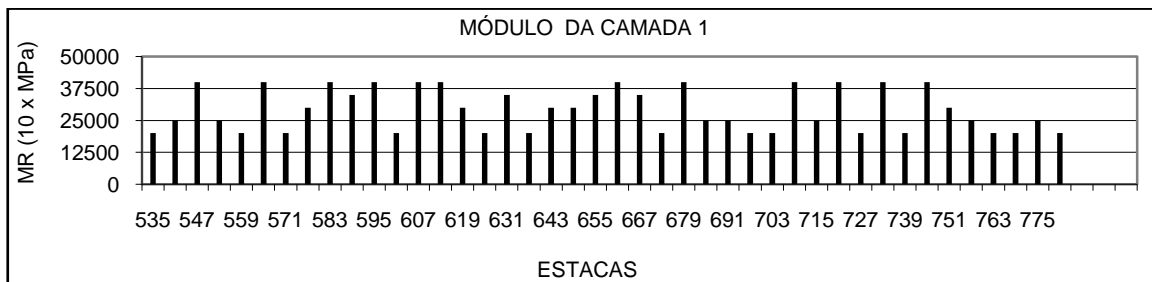


RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETRANS5-L

GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232

Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-5 - Est.: 533 - 784 - FE - Ext.: 5.020 m

SEÇÃO	CAMADA 1 Revestimento (PMF)	CAMADA 2 Base (escória)	CAMADA 3 Reforço do subleito (argila)	CAMADA 4 Subleito (areno-argiloso)
ESPESSURA (cm)	4,0	22,0	20,0	Infinito

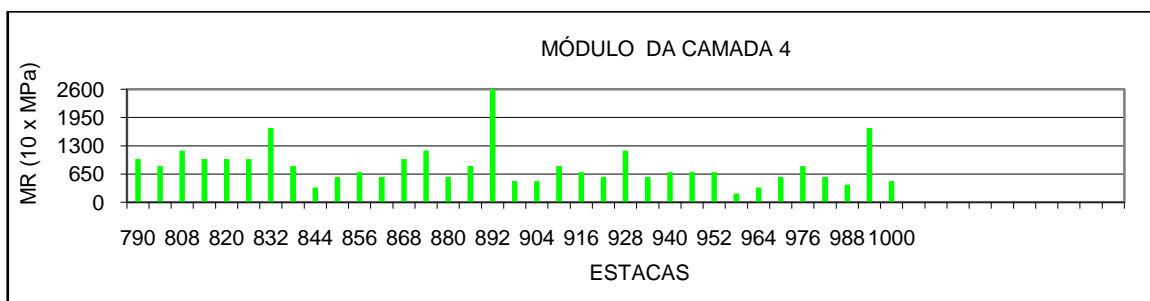
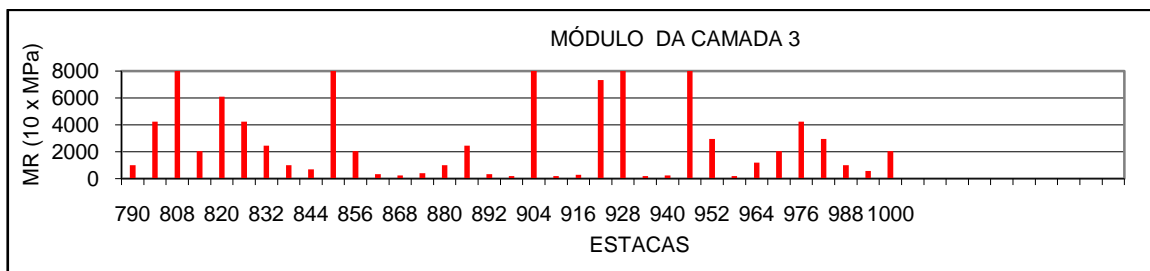
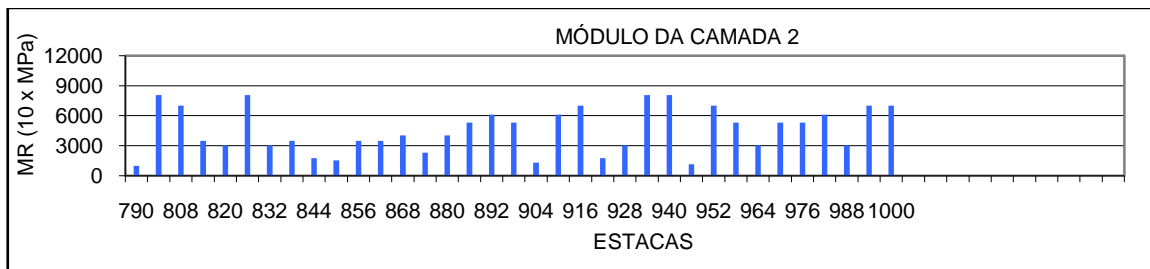
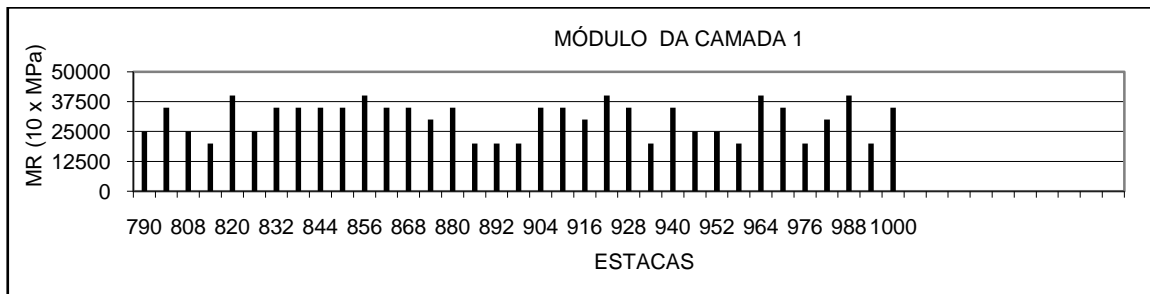


RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETRANS5-L

GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232

Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-6 - Est.: 784 - 1.000 - FD - Ext.: 4.320 m

SEÇÃO	CAMADA 1	CAMADA 2	CAMADA 3	CAMADA 4
	Revestimento (PMF + LA)	Base (cascalho)	Sub-base (cascalho)	Subleito (argila-siltosa)
ESPESSURA (cm)	4,0	12,0	12,0	Infinito

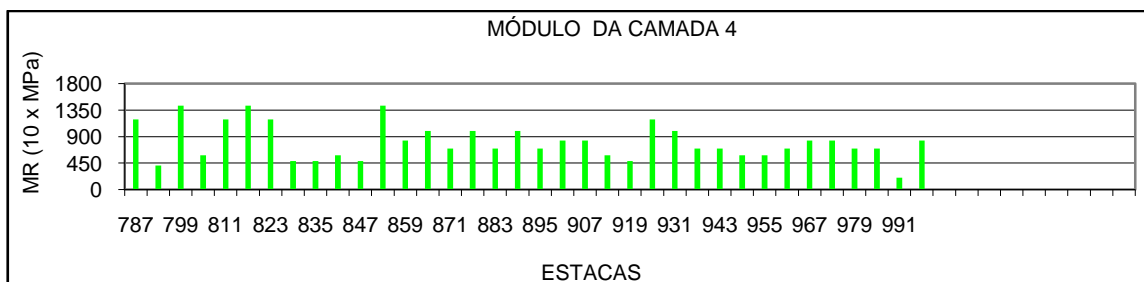
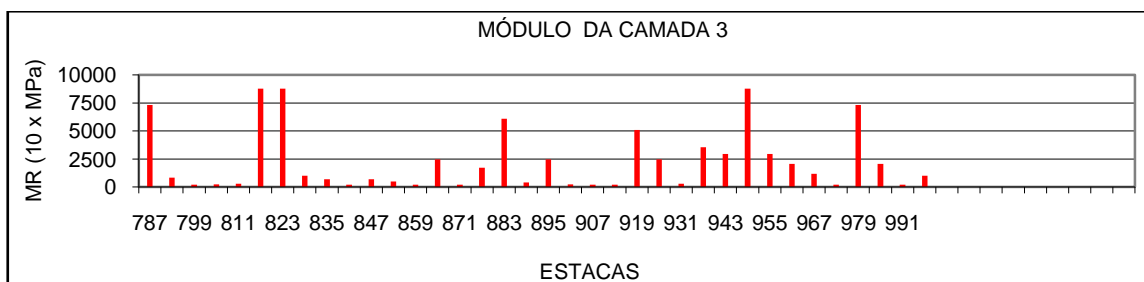
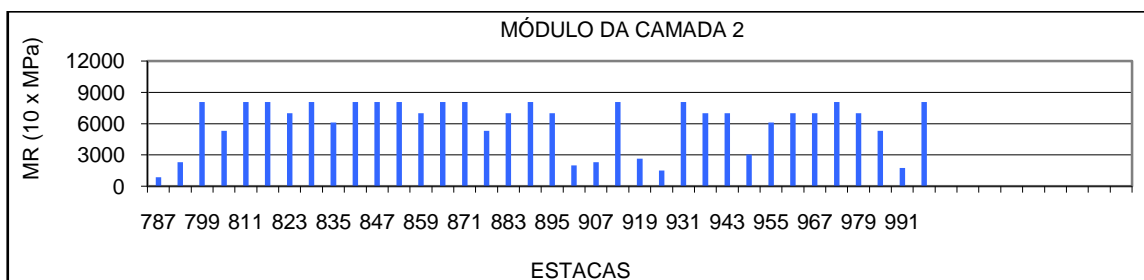
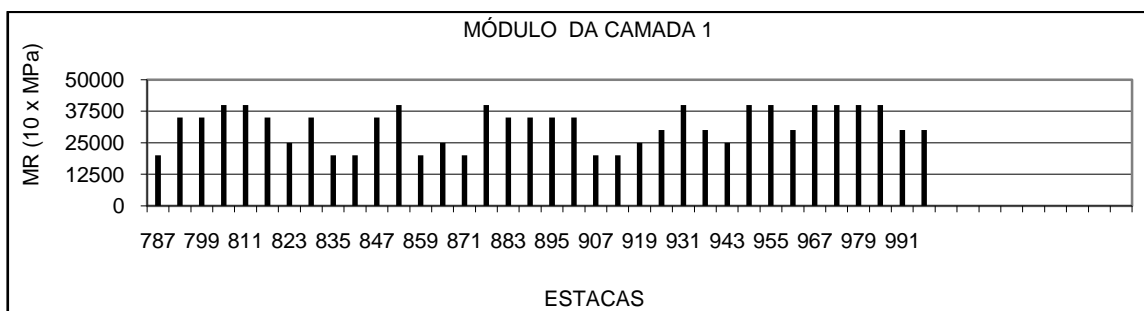


RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETRANS5-L

GRÁFICOS LINEARES DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E DO SUBLEITO DA RODOVIA MG-232

Trecho: Mesquita - Santana do Paraíso - SH-6 - Est.: 784 - 1.000 - FE - Ext.: 4.320 m

SEÇÃO	CAMADA 1	CAMADA 2	CAMADA 3	CAMADA 4
	Revestimento (PMF + LA)	Base (cascalho)	Sub-base (cascalho)	Subleito (argila-siltosa)
ESPESSURA (cm)	4,0	12,0	12,0	Infinito



ANEXO X

DIMENSIONAMENTO (REFORÇO EM CBUQ) - 2010 - 2020

RETROANÁLISE/RETRANS5-L (DER/MG, 2010)

RODOVIA MG-232 - TRECHO: MESQUITA - SANTANA DO PARAÍSO

ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ

SH 1 – LD – EST. 0 - 49 – BASE: ESCÓRIA DE ACIARIA

SEGMENTO HOMOGÊNEO 1 – LD - EST. 0 – 49 (BASE: ESCÓRIA ACIARIA)			
EST.	ESPESSURA PERMITIDA (cm)		ESPESSURA PERMITIDA (cm)
	(REF. (CBUQ) - ϵ_t adm. = $1,70 \times 10^{-4}$)		(REF. CBUQ) - ϵ_v adm. = $- 4,33 \times 10^{-4}$
	EYY – 15 cm	EYY – 30 cm	EZZ -15 cm
04
10
16
12
28
34
40
46
Obs.: NÃO NECESSITA REFORÇO ESTRUTURAL			

ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ

SH 1 – LE – EST. 0 - 49 – BASE: ESCÓRIA DE ACIARIA

SEGMENTO HOMOGÊNEO 1 – LE - EST. 0 – 49 (BASE: ESCÓRIA ACIARIA)			
EST.	ESPESSURA PERMITIDA (cm)		ESPESSURA PERMITIDA (cm)
	(REF. CBUQ) - ϵ_t adm. = $1,70 \times 10^{-4}$		(REF. CBUQ) - ϵ_v adm. = $- 4,33 \times 10^{-4}$
	EYY – 15 cm	EYY – 30 cm	EZZ -15 cm
01
07
13
19
25
31
37
43
49
Obs.: NÃO NECESSITA REFORÇO ESTRUTURAL			

ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ**SH 3 – LD – EST. 192 - 362 – BASE: CASCALHO**

SEGMENTO HOMOGÊNEO 3 – LD - EST. 192 – 362 (BASE: CASCALHO)			
EST.	ESPESSURA PERMITIDA (cm)		ESPESSURA PERMITIDA (cm) (REF.
	(REF. CBUQ) - ϵ_t adm. = $1,70 \times 10^{-4}$		- CBUQ) - ϵ_v adm. = $- 4,33 \times 10^{-4}$
	EYY – 15 cm	EYY – 30 cm	EZZ -15 cm
192	> 3,00
202
208	> 7,50
214	> 7,50
220	> 3,80
226	> 7,20
232	> 5,00
238	> 12,0
244	> 12,5
250	> 9,00
256	> 4,00
262
268	> 12,0
274
280
286	> 13,0
292
298
304	> 9,00
310	> 4,00
316	> 6,00
322
328
334	> 7,00
340	> 8,80
346	< 4,50	< 4,50	..
358	< 4,50	< 4,50	..

ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ
SH 3 – LE – EST. 192 - 362 – BASE: CASCALHO

SEGMENTO HOMOGÊNEO 3 – LE - EST. 192 – 362 (BASE: CASCALHO)			
EST.	ESPESSURA PERMITIDA (cm)		ESPESSURA PERMITIDA (cm)
	(REF. CBUQ) - ϵ_t adm. = $1,70 \times 10^{-4}$		(REF. CBUQ) - ϵ_v adm. = $- 4,33 \times 10^{-4}$
	EYY – 15 cm	EYY – 30 cm	EZZ -15 cm
193
199	> 9,00
205
211
217
229
233
235	> 7,00
241	> 6,00
247
253
259	> 4,00
265	> 7,00
271
277
283
289
295	> 2,60
301
307
313
319
325
331
337
343	< 3,50	< 3,50	..
349	< 5,00	< 5,00	..
355	< 4,50	< 4,50	..
361	< 3,00	< 3,00	..

ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ

SH 4 – LD – EST. 362 - 533 – BASE: ESCÓRIA DE ACIARIA COM ADIÇÃO DE 20% DE ARGILA

SH-4 LD - EST. 362 – 533 (BASE: ESCÓRIA ACIARIA + 20% ARGILA)			
EST.	ESPES. PERMITIDA (cm) (REF. CBUQ) - ϵ_t adm. = $1,70 \times 10^{-4}$		ESPES. PERMITIDA (cm) (REF. CBUQ) - ϵ_v adm. = $- 4,33 \times 10^{-4}$
	EYY – 15 cm	EYY – 30 cm	EZZ -15 cm
364	..	..	..
370	> 18,00	> 18,00	> 11,50
376	..	..	..
382	..	..	..
388	..	..	..
394	..	..	> 3,50
400	..	..	..
406	(< 4,00) e (> 15,00)	(< 3,50) e (> 15,00)	> 7,00
412	..	..	> 4,00
418	..	..	..
424	(< 4,00) e (> 19,00)	(< 3,00) e (> 19,00)	..
430	..	..	..
436	(< 6,00) e (> 14,00)	(< 5,00) e (> 14,00)	> 7,00
442	..	..	..
448	..	..	..
454	(< 4,00) e (> 7,00)	(< 3,50) e (> 7,00)	..
460	..	..	> 3,50
466	..	..	..
472	..	..	..
478	..	..	..
484	..	..	..
490	..	..	..
496	..	..	> 3,00
502	..	..	..
508	..	..	..
514	< 3,50	< 3,00	> 4,00
520	< 3,50	< 3,00	..
526	..	..	..
532	..	..	..

ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ

SH 4 – LE – EST. 362 - 533 – BASE: ESCÓRIA DE ACIARIA COM ADIÇÃO DE 20% DE ARGILA

SH-4 LE - EST. 362 – 533 (BASE: ESCÓRIA ACIARIA + 20% ARGILA)			
EST.	ESPESSURA PERMITIDA (cm) (CBUQ) - ϵ_t adm. = $1,70 \times 10^{-4}$		ESPESSURA PERMITIDA (cm) (REF. CBUQ) - ϵ_v adm. = $- 4,33 \times 10^{-4}$
	EYY – 15 cm	EYY – 30 cm	EZZ -15 cm
367
373
379
385
391
397
403
409
415
421
427
433
439
445
451
457
463	> 7,50
469
475
481
487	> 3,50
493
499
505
511
517	< 3,50	< 3,00	..
523
529

ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ
SH 5 – LD – EST. 533 - 784 – BASE: ESCÓRIA DE ACIARIA

SEGMENTO HOMOGÊNEO 5 – LD - EST. 533 – 784 (BASE: ESCÓRIA DE ACIARIA)			
EST.	ESPESSURA PERMITIDA (cm) (REF. CBUQ) - ϵ_t adm. = $1,70 \times 10^{-4}$		ESPESSURA PERMITIDA (cm) (REF. CBUQ) - ϵ_v adm. = $- 4,33 \times 10^{-4}$
	EYY – 15 cm	EYY – 30 cm	EZZ -15 cm
538
544
550
556
562
568
574	> 3,00
580
586
592
598
604
610
616
622
628
634
640
646
652	> 7,50
658	> 7,00
664
670	> 3,50
670
676
682
694	< 5,00	< 5,00	..
700	< 5,00	< 5,00	..
706	< 7,00	< 7,00	..
712	< 4,00	< 4,00	..
718	> 7,00
724	> 4,00
730
736
742
748
754	> 3,50
760
766
772	> 5,00
778	> 7,50
784

ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ
SH 5 – LE – EST. 533 - 784 – BASE: ESCÓRIA DE ACIARIA

SEGMENTO HOMOGÊNEO 5 – LE - EST. 533 – 784 (BASE: ESCÓRIA DE ACIARIA)			
EST.	ESPESSURA PERMITIDA (cm) (REF. CBUQ) - et adm. = $1,70 \times 10^{-4}$		ESPESSURA PERMITIDA (cm) (REF. CBUQ) - ev adm. = $- 4,33 \times 10^{-4}$
	EYY – 15 cm	EYY – 30 cm	EZZ -15 cm
	535
541
547
553
559
565	> 7,00
571	> 12,50
577	> 12,00
583
589	> 7,50
595
601
607
613
619	> 3,00
625
631
637
643
649
655	> 6,00
661
667
673
679
685	< 4,00	< 4,00	> 6,00
691	< 5,00	< 5,00	..
697
703
709
715	> 9,00
721
727
733	> 3,50
739
745
751
757
763
769
775
781
787	> 6,00

ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ
SH 6 – LD – EST. 784 - 1000 – BASE: CASCALHO

SEGMENTO HOMOGÊNEO 6 – LD - EST. 784 – 1000 (BASE: CASCALHO)			
EST.	ESPESSURA PERMITIDA (cm) (REF. CBUQ) - ϵ_t adm. = $1,70 \times 10^{-4}$		ESPESSURA PERMITIDA (cm) (REF. CBUQ) - ϵ_v adm. = $- 4,33 \times 10^{-4}$
	EYY – 15 cm	EYY – 30 cm	EZZ -15 cm
790	> 9,00
802	> 6,00
808
814	> 8,00
820	> 6,00
826	> 5,00
832	> 3,50
838	> 10,00
844	> 17,50
850	> 9,00
856	> 11,00
862	> 10,00
868	> 3,50
874	> 5,50
880	>12,50
886	> 9,00
892
898	> 10,00
904	> 10,00
910	> 3,00
916	> 7,00
922	> 8,00
928	> 3,00
934	> 6,00
940	> 4,00
946	< 4,00	< 4,00	> 8,00
952	< 5,00	< 5,00	..
958	< 5,00	< 5,00	..
964	< 5,50	< 5,50	..
970	> 12,00
976	> 7,50
982	> 10,50
988	> 15,00
994
1000	> 12,00

ESPESSURAS PERMITIDAS - REFORÇO CBUQ
SH 6 – LE – EST. 784 - 1000 – BASE: CASCALHO

SEGMENTO HOMOGENEO 6 – LE - EST. 784 – 1000 (BASE: CASCALHO)			
EST.	ESPESSURA PERMITIDA (cm) (REF. CBUQ) - ϵ_t adm. = $1,70 \times 10^{-4}$		ESPESSURA PERMITIDA (cm) (REF. CBUQ) - ϵ_v adm. = $- 4,33 \times 10^{-4}$
	EYY – 15 cm	EYY – 30 cm	EZZ -15 cm
787	> 6,00
793	> 15,50
799
805	> 7,50
811
817
823
829	> 12,00
835	> 12,50
841	> 6,00
847	> 12,00
859	> 3,00
865	> 7,00
871	> 4,00
877	> 7,50
883	> 7,00
889	> 3,00
895	> 9,00
901	> 7,00
907	> 7,50
913	> 6,00
919	> 12,00
925	> 7,50
931
937	< 5,50	< 5,50	> 7,50
943	< 5,00	< 5,00	..
949	< 5,00	< 5,00	..
955	< 7,00	< 7,00	..
961	> 9,00
967	> 7,50
973
979	> 5,00
985	> 10,00
991	> 20,00
997	> 7,50

ANEXO XI

GRÁFICOS DAS FLECHAS NAS TRILHAS DE RODAS - RODOVIA MG-232 TRECHO: MESQUITA – SANTANA DO PARAÍSO (DER/MG, 2010).

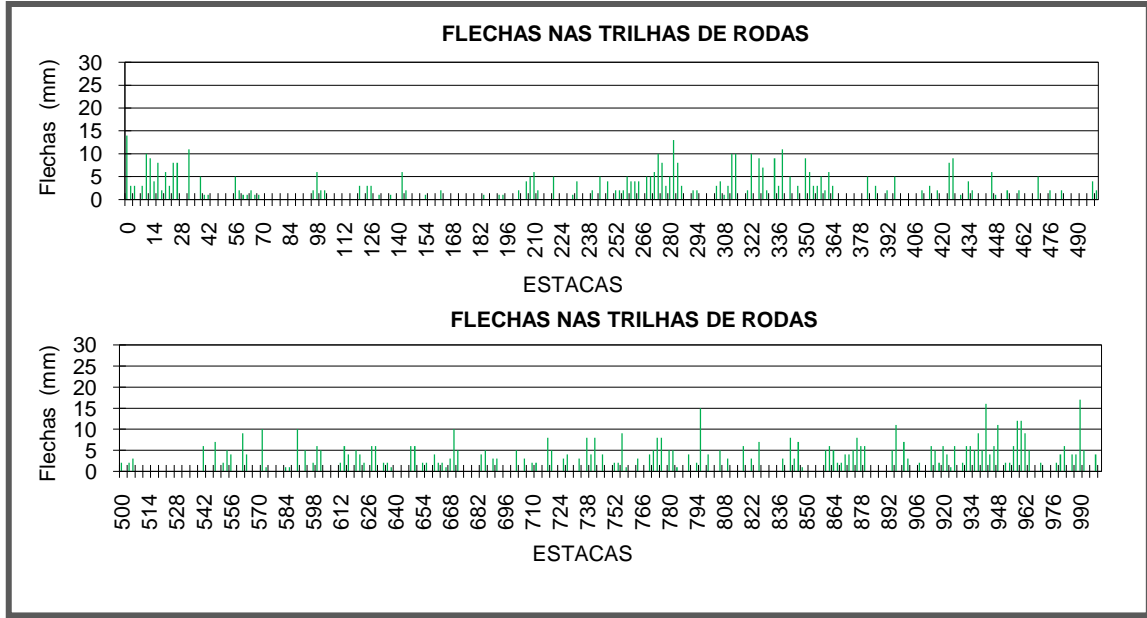


GRÁFICO DAS FLECHAS NAS TRILHAS DE RODAS- LADO DIREITO.

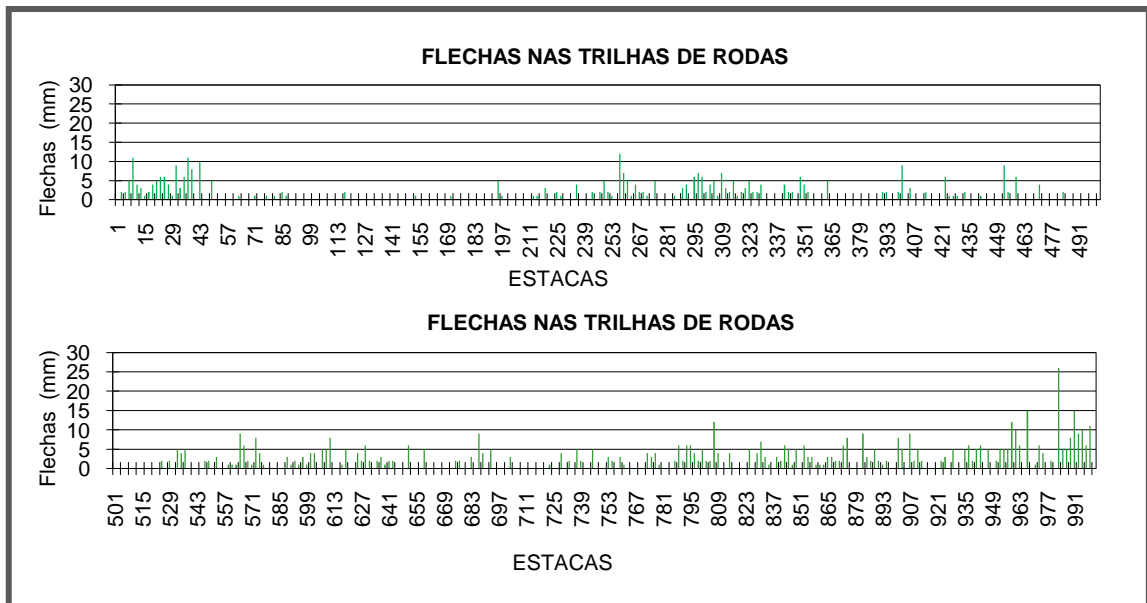


GRÁFICO DAS FLECHAS NAS TRILHAS DE RODAS - LADO ESQUERDO.