



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



Dissertação de Mestrado

“Avaliação da drenagem de líquidos do cadinho do alto-forno 2 da ArcelorMittal Tubarão através de modelagem física e matemática ”



Autor: Erick Torres Bispo dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio da Silva

Co-Orientadores: Prof Dr Itavahn Alves da Silva

Eng. Jorge Issamu Gushiken / Eng. Fernando Kaoru Fujihara



Julho de 2009



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Erick Torres Bispo dos Santos

“Avaliação da drenagem de líquidos do cadinho do alto-forno 2 da ArcelorMittal Tubarão através de modelagem física e matemática ”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio da Silva

Co-Orientador: Prof. Dr. Itavahn Alves da Silva

Eng. Jorge Issamu Gushiken / Eng. Fernando Kaoru Fujihara

Ouro Preto, Julho de 2009

Aos meu amores Eika, Arthur e Vitória,
aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS:

A Deus, o que seria de mim sem a fé que eu tenho nele.

Aos meus amores Eika, Arthur e Vitória pela paciência e apoio, mas principalmente pela paciência.

A toda minha família, em especial aos meus pais, que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida e meus irmãos Leo, Ray e Igor por fazerem minha vida mais feliz.

Ao professor, orientador e amigo, Dr. Carlos Antônio da Silva por seu apoio e inspiração no amadurecimento dos meus conhecimentos e conceitos.

A todos da AcerlorMittal Tubarão, pelo convívio, pelo apoio, pela compreensão e pela amizade.

Aos amigos e colegas, em especial, Gushiken, Jorge Luiz e Roney, pelo incentivo e pelo apoio constantes.

Aos co-orientadores Prof. Dr. Itavahn Alves da Silva e Eng. Fernando Fujihara pela ajuda e apoio.

A toda sociedade brasileira por mais uma vez contribuir para meu crescimento pessoal e profissional.

Resumo

A técnica de modelagem física a frio tem sido empregada com sucesso para simulação de processos industriais de fabricação de gusa e/ou aço, tais como alto-forno, carro torpedo, RH, convertedor LD, distribuidor e muitos outros. O escoamento de gusa e escória tem função importantíssima na zona inferior do alto-forno, tanto no comportamento operacional como no prolongamento de sua vida útil. O fluxo de líquidos no cadinho pode ser caracterizado de forma qualitativa e quantitativa usando-se grupos adimensionais com o foco de garantir a similaridade dinâmica entre o modelo e o equipamento real. É sabido que este fluxo sofre influência da permeabilidade do leito no interior do reator, da vazão gasosa realizada através das ventaneiras (raceway), do ritmo de produção e pelo perfil do alto-forno (cuba, ventre, rampa e cadinho). Informação adicional a respeito dos fluxos térmicos e do perfil de distribuição de temperatura, bem como o detalhamento relativo ao fluxo de metal no leito poroso (deadman, homem-morto) pode ser obtido pela utilização de modelos matemáticos. O tratamento do problema via modelagem física e matemática são complementares e se possível devem ser aplicados em conjunto. Na operação de um alto forno não são raras as flutuações em seu processo, principalmente acerca dos ciclos de abertura e fechamento do furo de gusa. A retenção de líquidos no cadinho e sua influência sobre a descida da carga são consideradas os principais resultado destas flutuações.

Neste contexto, os objetivos deste trabalho incluíram desenvolver um modelo físico a frio do cadinho do alto-forno 2 da ArcelorMittal Tubarão e aplicar um modelo matemático (CFD, computacional fluid dynamics) de fluxo de líquido e de trocas térmicas, para avaliar o efeito das principais variáveis de processo sobre a drenagem de líquidos no cadinho. Ademais, investigar o efeito das linhas de fluxo e velocidades de movimento de líquidos dentro do reator, assim avaliar os dados de post-mortem do cadinho, com o intuito de correlaciona-los ao resultados obtidos nos modelos, possibilitando uma compreensão dos fenômenos físicos e operacionais que levaram ao desgaste ocorrido.

Abstract

The technique of physical modeling has been used successfully for industrial processes simulation (hot metal and steel manufacturing), such as blast furnaces, torpedo car, RH, LD converters, tundish and many others. The hot metal and slag flows have very important functions in the blast furnace hearth, both in regard to operational performance as well to extension life. The liquid flow in the hearth can be characterized qualitatively and quantitatively using dimensionless groups with the objective of assuring dynamic similarity between model and the actual equipment. It is known that this flow is influenced by the permeability inside the reactor, the gas flow through the tuyeres (raceway), the production rate and blast furnace profile (shaft, belly, bosh and hearth geometry). Additional information about heat fluxes, temperature profiles and liquid flow in porous deadman can be accomplished by using mathematical models. The physical and mathematical modeling are complementary and can be applied together.

Fluctuations are not rare in the blast furnace process, especially those related to the cycles of opening and closing the tap hole. Fluid retention in the hearth and its influence in the burden descent are considered the main result of these fluctuations.

In this context, the objectives of this work included developing a physical model of the ArcelorMittal Tubarão blast furnace #2 hearth and applying a mathematical model (CFD, computational fluid dynamics) and heat exchange model, to evaluate the effect of main process variables on the drainage in the hearth. Furthermore, to investigate the flow and liquid velocity effects, evaluate post-mortem data of the blast furnace 2, in order to correlate them to the results obtained in the models thus allowing an understanding of physical phenomena and operational reasons of refractory wear.

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Desenho esquemático das diferentes zonas do alto-forno segundo DEFENDI (2006).

Figura 3.2 – Pontos referentes ao controle de processo e operacional do alto-forno(FUJIHARA e outros 1994)

Figura 3.3 – Cadinho de alto forno segundo Geerdes e outros (2004)

Figura 3.4 – Cadinho de alto forno com o homem morto (região cinza) flutuando no banho de metal, segundo Torrkulla e Saxén (2000).

Figura 3.5 – Esquema dos níveis dos líquidos durante o ciclo de vazamentos segundo Brännbacka e outros (2005)

Figura 3.6 – Perfil da escória, segundo Figueira 2003

Figura 3.7 – Relação entre a fração de escória retida e o coeficiente de escoamento, segundo Figueira 2003.

Figura 3.8 – Amostra do núcleo do homem morto através das ventaneiras segundo Huang e outros (2007).

Figura 3.9 – Formas e porosidade do homem morto, YAN et alli.(2004)

Figura 3.10 – Acondicionamento dos materiais no cadinho, segundo Inada e outros (2003).

Figura 3.11 – Equilíbrio de forças atuando sobre a camada de coque segundo Guimarães (2006).

Figura 3.12 – Representação esquemática do estado do leito de coque no cadinho do alto-forno, segundo OMORI (1987).

Figura 3.13 – Padrão de fluxo de gusa no cadinho para o caso do homem morto assentado (a) ou flutuando (b), segundo Guimarães (2006).

Figura 3.14 – Resistência ao fluxo e configuração do sistema homem morto/cadinho, segundo CHEN e outros (2005).

Figura 3.15 – Desenho esquemático do caminho percorrido pelo gusa e pela escória através da estrutura do leito de coque, leito da esquerda baixa resistência ao fluxo, leito da direita alta resistência ao fluxo, segundo HUSSLAGE e outros.(2001)

Figura 3.16 – Nível de gusa líquido e de escória para a situação do homem morto assentado e flutuando, segundo BRÄNNBACKA e outros (2001).

Figura 3.17. Desenvolvimento de blocos de Carbono na Nippon Steel segundo Nitta (2006).

Figura 3.18 – Projeto de revestimento Cerâmico completo na reforma do AF1 de Schwelgern (1989) segundo McNally e outros (2000).

Figura 3.19 – Projetos de cadinho. Da esquerda para direita, AF6 de Ruhrort, AF1 de Schwelgern e AF1 de Schwelgern segundo McNally e outros (2000).

Figura 3.20 – Revestimento cerâmico do cadinho do AF2 de Schwelgern – THYSSEN segundo McNally e outros (2000).

Figura 3.21 – Sistemas de refrigeração por staves (à esquerda) e por jaquetas (à direita) segundo Duarte e Fernandes (2006).

Figura 3.22 – Projeto Refratário de altos fornos a Coque segundo Duarte e Fernandes (2006).

Figura 3.23 – Índice de Resistência a Solubilidade de Blocos de Carbono. Segundo Duarte e Fernandes (2006).

Figura 3.24 – “sump volume” segundo Duarte e Fernandes (2006).

Figura 3.25 – Perfil de Desgaste do cadinho de Alto-forno, segundo Silva e outros (2000).

Figura 3.26 – Vista do estado de desgaste da parede do cadinho, FRASER e outros.(2004)

Figura 3.27 – Desgaste tipo pata de elefante no revestimento dos blocos de carbono encontrado no alto forno # 7 de ISPAT Inland's segundo Bobek e outros (2004).

Figura 3.28 - Tipos de desgaste típicos de cadinho conforme Koliijn e outros (2001)

Figura 3.29 – Contornos de temperatura (a esquerda) e perfil de desgaste (a direita) do cadinho do alto-forno No 7 da US Steel, YAN e outros.(2004)

Figura 3.30 – Efeito do cogumelo sobre a distribuição de temperatura no cadinho perto da região latetral do furo de corrida (corte transversal), ZHOU e outros(2005).

Figura 3.31 - Efeito do cogumelo sobre a distribuição de temperatura no cadinho perto da região frontal do furo de corrida (corte longitudinal), ZHOU e outros (2005).

Figura 3.32 – A distribuição da composição do cascão da parede lateral no alto-forno #7 de ISPAT Inland's, Bobek e outros (2004).

Figura 3.33 – Relação entre a queda no tamanho médio do coque entre o topo e o homem morto, e o CSR do coque nos altos-fornos 1 e 2 de ArcelorMittal Sollac, Kolijn e outros (2001).

Figura 3.34 – Relação entre o tamanho do coque enornado e o tamanho do coque no homem morto, Nippon Stell, Kolijn e outros (2001).

Figura 3.35 – Linhas de fluxo e de temperatura no cadinho, Huang e outros (2007).

Figura 3.36 – A configuração da HBCV do alto forno nº. 1 de Kwangyang: Hur e outros (1998).

Figura 3.37 – O efeito do fechamento HBCV no alto forno nº. 1 de Kwangyang: Hur e outros (1998).

Figura 3.38 – Função da massa de injeção para grouting: Miranda e outros (2003).

Figura 3.39 – Perfis de erosão e crescimento de acreção no cadinho por um período de 15 dias, SAXÉN & TORRKULLA (2000)

Figura 3.40 – Distribuições de termopares na parede lateral e no fundo do cadinho para monitoramento dos perfis de temperatura, PANJOVICK & TRUELOVE (1999)

Figura 3.41 – Influência do desgaste do refratário do cadinho sobre a distribuição de temperatura no interior do cadinho, PANJOVICK & TRUELOVE(1999)

Figura 3.42 – Efeito da erosão do revestimento refratário do cadinho sobre a distribuição de temperatura no interior do cadinho, PANJOVICK & TRUELOVE(1999)

Figuras 3.43 – Isotermas no plano simétrico do cadinho considerando o revestimento refratário original, PANJOVICK & TRUELOVE(1999)

Figuras 3.44 – Distribuições típicas de temperaturas no gusa líquido e no revestimento refratário do cadinho do alto-forno, WRIGHT et al.(2003)

Figuras 3.45 – Resultado computacional do CFD, segundo HUANG et al. (2005)

Figuras 3.46 – Estado interno do cadinho do alto-forno no 4 da usina de Mizushima, Japão, (NOUCHI et al. 2003)

Figuras 3.47 – Distribuição de fluxos na zona livre de partículas diferentes relações altura do furo de corrida / raio do cadinho (sump ratios): a) 0,2; b) 0,33 c) 0,5, segundo CHEN e outros (2005).

Figuras 3.48 – Montagem experimental NNANNA e outros (2004).

Figuras 3.49 – Instalação do sistema de monitoramento Particle Image Velocimetry, - PIV, NNANNA e outros (2004).

Figuras 3.50 – Detalhes da montagem experimental, NNANNA e outros (2004).

Figura 3.51 – Distribuição de fluxos para a injeção no ponto 6, altura do furo de corrida de 0.22m, e porosidade do homem morto = 0.3, NNANNA e outros (2004).

Figura 3.52 – Distribuição de fluxos para a injeção no ponto 6, altura do furo de corrida de 0.22m, e porosidade do homem morto = 0, NNANNA e outros (2004).

Figura 3.53 – Distribuição de fluxos no ponto 7, altura do furo de corrida de 0,14m, e porosidade do homem morto = 0, NNANNA e outros (2004).

Figura 3.54 – Distribuição de fluxos para o ponto de injeção, altura do furo de corrida de 0, 14m, e porosidade do homem morto = 0.3, NNANNA e outros (2004).

Figura 4.1 – Fluxo de produção da ArcelorMittal Tubarão Andrade e outros (2003)

Figura 4.2 – Dimensões Estruturais do Alto-Forno 02 da ArcelorMittal Tubarão

Figura 4.3 – Disposição da casa de corrida

Figura 4.4 – Refratários do cadinho do Alto-Forno 02 da ArcelorMittal Tubarão

Figura 4.5 – Desenho com os níveis discriminados para identificação dos termopares.

Figura 4.6 – Configuração da instalação dos termopares e as medidas das carcaça metálica e a massa socada

Figura 4.7 – Refrigeração externa do tipo “cortina de água”.

Figura 4.8 – Refrigeração da soleira do cadinho

Figura 4.9 – Evolução do Consumo de Carga Metálica.

Figura 4.10 – Evolução da produção

Figura 4.11 – Evolução do consumo de combustíveis

Figura 4.12 – Evolução das temperaturas do cadinho

Figura 4.13 – Evolução do consumo de ilmenita granulada

Figura 4.14 – Evolução do comprimento dos furos de gusa

Figura 4.15 – Produção acumulada do Alto-Forno 02 da ArcelorMittal Tubarão.

Figura 5.1 – Desenho esquemático do cadinho

Figura 5.2 – Detalhes da montagem experimental: 1 e 2 são os furos de gusa sobre os quais estão instalados condutivímetros; 3 sistema radial e rotativo de aspersão.

Figura 5.3 – Detalhes da montagem experimental, visão geral do conjunto: 1- bombas peristálticas de sucção pelos furos de gusa; 2- PC para leitura de dados de condutividade; 3- inversor de frequência para acionamento das peristálticas.

Figura 5.4 – Detalhes da montagem experimental, sistema de rotação e aspersão.

Figura 5.5 – Distribuição do líquido no cadinho – aspersão central

Figura 5.6 – Distribuição do líquido no cadinho – aspersão central

Figura 5.7 – Vista da disposição dos sensores

Figura 5.8 – Posicionamento dos condutivímetros no corpo do cadinho

Figura 5.9 – Malha de integração para determinação de condições de fluxo de água modelo.

Figura 5.10 – Exemplo de curva de aspersão reproduzida na modelagem numérica.

Figura 5.11 – malhas de integração para o caso real; superior mostrando a porção interna com o leito de coque e os dois furos de corrida; inferior, destacando as camadas de diferentes blocos de revestimento.

Figura 5.12 – Distribuição de refratários no cadinho.

Figura 6.1 – Dispersão de traçador em regime permanente; homem morto sentado constituído de leito homogêneo de esferas de 19mm;drenagem no furo1

Figura 6.2 – Dispersão de traçador em regime permanente; homem morto sentado constituído de leito heterogêneo de esferas de 19 mm(periferia) e 25 mm(cilindro central); drenagem no furo 1.

Figura 6.3 – Dispersão de traçador em regime permanente; homem morto flutuante constituído de leito homogêneo de esferas de 19 mm; drenagem no furo 1

Figura 6.4 – Teste 01 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

Figura 6.5 – Teste 02 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

Figura 6.6 – Teste 03 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade. 3800ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

Figura 6.7 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade. 3800ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

Figura 6.8 – Teste 1 zoom na região de início do teste

Figura 6.9 – teste de dispersão de corante leito com esferas de 19mm

Figura 6.10 – Desenho esquemático da seqüência dos condutímetros localizados na região da rampa ritmo

Figura 6.11 – Teste 01 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.12 – Teste 02 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.13 – Teste 03 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 300ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.14 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.15 – aspersão normal de líquidos segundo dois eixos normais na parte superior do cadinho

Figura 6.16 – Teste 01 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 & 25 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.17 – Teste 03 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 & 25 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.18 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 & 25 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.19 – Teste 05 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 & 25 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.20 – Teste 5 zoom na região de início do teste

Figura 6.21 – Ensaio de dispersão de corante com o leito com esferas de 19 e 25mm

Figura 6.22 – Teste 02 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 & 25 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.23 – Teste 03 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 & 25 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.24 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 & 25 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.25 – Teste 05 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 & 25 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.26 – Desenho esquemático mostrando a proteção com massa refratária no furo de corrida (lado esquerdo) e a simulação em laboratório (lado direito).

Figura 6.27 – Teste 01 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

Figura 6.28 – Teste 02 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa.

Figura 6.29 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

Figura 6.30 – Teste 05 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

Figura 6.31 – Teste 02 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

Figura 6.32 – Teste 03 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

Figura 6.33 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

Figura 6.34 – Aspersão Central de líquidos segundo dois eixos normais na parte superior do cadinho

Figura 6.35 – Teste 01 Homem morto flutuante, aspersão CENTRAL, produtividade 3800ton/dia, esferas 19&25 mm e com proteção no furo de gusa

Figura 6.36 – Teste 02 Homem morto flutuante, aspersão CENTRAL, produtividade 3800ton/dia, esferas 19&25 mm e com proteção no furo de gusa

Figura 6.37 – Teste 03 Homem morto flutuante, aspersão CENTRAL, produtividade 3800ton/dia, esferas 19&25 mm e com proteção no furo de gusa

Figura 6.38 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão CENTRAL, produtividade 3800ton/dia, esferas 19&25 mm e com proteção no furo de gusa

Figura 6.39 – Teste 05 Homem morto flutuante, aspersão CENTRAL, produtividade 3800ton/dia, esferas 19&25 mm e com proteção no furo de gusa

Figura 6.40 – Ensaio de dispersão de corante para condição homem morto flutuante com aspersão de líquidos CENTRAL, leito de esfera de 19&25mm

Figura 6.41 – zoom na região próxima ao furo de corrida, simulação de fluxo no modelo de cadinho, homem morto flutuante.

Figura 6.42 – "snapshots" de simulação de fluxo no cadinho do modelo.

Figura 6.43 – Teste 02 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa.

Figura 6.44 – Teste 03 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa.

Figura 6.45 – Teste 04 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa.

Figura 6.46 – Zoom região de início do teste 2

Figura 6.47 – Teste de dispersão de corante para a condição de homem morto assentado, leito com esferas de 19mm, produtividade 3800ton/dia e com aspersão normal de líquidos.

Figura 6.48 – Teste 03 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

Figura 6.49 – Teste 05 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

Figura 6.50 – Teste 06 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

Figura 6.51 – Teste 07 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

Figura 6.52 – Teste 08 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

Figura 6.53 – Teste 02 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.54 – Teste 03 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.55 – Teste 01 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.56 – Teste 05 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.57 – Curvas de condutividade versus tempo com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida

Figura 6.58 – Curvas de condutividade versus tempo, com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida

Figura 6.59 – Curvas de condutividade versus tempo, com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida

Figura 6.60 – Curvas de condutividade versus tempo, com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida

Figura 6.61 – Curvas com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida

Figura 6.62 – Curvas de condutividade versus tempo, com aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3800ton/dia e com proteção no furo de corrida

Figura 6.63 – Teste 02 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

Figura 6.64 – Teste 03 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.65 – Teste 04 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

Figura 6.66 – Teste 05 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

Figura 6.67 – Detalhes das linhas de fluxo nas imediações do furo de corrida, em função do tempo, após inversão dos furos de drenagem.

Figura 6.68 – Detalhes das linhas de fluxo nas imediações do furo de corrida, em função do tempo, após inversão dos furos de drenagem.

Figura 6.69 – Posição da isoterma a 1050°C logo após a inversão dos furos de drenagem, tempo em segundos: 0, 1125, 2190, 3255, 4335, 5400.

Figura 6.70 – Máquina trabalhando para limpeza do cadinho, removendo o material com o apoio da correia.

Figura 6.71 – Desenho esquemático que representa a forma que foi realizada a medição.

Figura 6.72 – Desenho esquemático que representa o desgaste no nível superior do HL4 (nível de extração do líquido).

Figura 6.73 – Desenho esquemático que representa o desgaste no nível inferior do HL4 (nível de extração do líquido).

Figura 6.74 – Cogumelo do furo de gusa 1 com os locais de desgastes evidenciados em seu redor.

Figura 6.75 – Cogumelo do furo de gusa 2 com os locais de desgastes evidenciados em seu redor.

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais refratários, segundo Araújo (1997).

Tabela 3.2 – Propriedades Típicas dos Blocos de Carbono Desenvolvidos na Nippon Steel segundo Nitta (2006).

Tabela 3.3 – Características dos materiais cerâmicos e de carbono de cadinho segundo McNally e outros (2000).

Tabela 3.4 – Refratários usados em projetos de altos fornos a coque segundo Duarte e Fernandes (2006).

Tabela 4.1 - Especificações dos Equipamentos do Alto-Forno 02 da ArcelorMittal Tubarão

Tabela 4.2 – Propriedades dos materiais de revestimento do cadinho

Tabela 4.3 – Resumo operacional do Alto-Forno 02 ArcelorMittal Tubarão

Tabela 5.1 – Propriedades físicas de alguns materiais do cadinho

Tabela 6.1 – Tabela com valores de t_{min} , $t_{transição}$, t_{pico} e de pico registrados nos ensaios na condição de Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

Tabela 6.2 – Valores médios comparativos para as situações, A = “situação de produção nominal” e B = “situação de produção reduzida e intervalo de vazamento reduzido” na condição de homem morto flutuante.

Tabela 6.3 – Comparação leito esferas de 19mm X esferas 19&25mm 3800 ton (Condição A –Leito flutuante- sem proteção no furo de gusa. Prod.3800ton/dia.19mm, Condição B -Leito flutuante- sem proteção no furo de gusa. Prod.3800ton/dia.19&25mm).

Tabela 6.4 – Comparação leito esferas de 19&25 mm produtividade 3800 ton/dia X 3000ton/dia (Condição A -Leito flutuante - sem proteção no furo de gusa. Prod.3800ton/dia, Condição B -Leito flutuante - sem proteção no furo de gusa. Prod.3000ton/dia).

Tabela 6.5 – Comparação leito esferas de 19mm produtividade 3800 ton/dia (Condição A -Leito flutuante - sem proteção no furo de gusa, Condição B -Leito flutuante - com proteção no furo de gusa.

Tabela 6.6 – Comparação de resultados na condição de homem morto flutuante com proteção no furo de corrida, produtividade 3800 ton/dia (Condição A -Leito com esferas de 19mm , Condição B -Leito com esferas de 19 & 25mm).

Tabela 6.7 – Valores dos parâmetros de análise para a condição de Homem morto assentado, aspersão normal, leito de 19mm e produtividade de 3800ton/dia

Tabela 6.8 – Comparação de resultados na condição de homem morto assentado sem proteção no furo de corrida, leito com esferas de 19mm (Condição A –Produtividade 3800ton/dia , Condição B -produtividade 3000ton/dia).

Tabela 6.9 – Comparação de resultados na condição de homem morto assentado sem proteção no furo de corrida, produtividade de 3800ton/dia (Condição A - Leito com esferas de 19mm, Condição B -Leito com esferas de 19 & 25mm)

SUMÁRIO

1 – Introdução e Definição do problema	1
2 – Objetivos Específicos	3
3 – Revisão Bibliográfica	4
3.1 – Cadinho do alto-forno	7
3.2 – Refratários para o cadinho.....	20
3.3 – Refrigerações do cadinho	30
3.4 – Projetos de cadinho	32
3.5 – Desgaste do cadinho	36
3.5.1 – Comprimento do furo de gusa.....	40
3.5.2 – Ataque de zinco e/ou álcalis	43
3.5.3 – Qualidade do coque.....	44
3.5.4 – Ataque térmico.....	46
3.6 – Alternativas para controle do desgaste no cadinho.....	48
3.7 – Modelos de controle de desgaste	52
4 – O Alto-forno 02 da ArcelorMittal Tubarão	67
4.1 – Especificações técnicas do Alto-forno 02.....	69
4.2 – O cadinho do Alto-forno 02	72
4.3 – Histórico operacional	76
4.3.1 – Primeira fase → Rating-Up (Início de Operação).....	78
4.3.2 – Segunda fase → Alta Produtividade	78
4.3.3 – Terceira fase → Redução de produtividade e elevação das temperaturas do cadinho.....	80
4.3.4 – Quarta fase → Estabilização das Temperaturas do Cadinho	82
4.4 – Parada do equipamento (blow down)	83
5 – Metodologia.....	86
5.1 – Modelagem Física	87
5.1.1 – Critério de semelhança entre o modelo e o protótipo	87
5.1.2 – Condução dos experimentos e Montagem experimental.....	94
5.2 – Modelagem Numérica via CFX	102
5.2.1 – Equações gerais de Conservação	102

5.2.2 – Fluxo em meio poroso.....	104
5.2.3 – Interações com o meio poroso.....	105
5.2.4 – Malhas de integração.....	106
5.2.5 – O modelo de turbulência.....	108
6 – Análise e discussão dos resultados.....	111
6.1 – Ensaio com Homem Morto flutuante.....	115
6.1.1 – Ensaio aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida.....	115
6.1.2 – Ensaio aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3000ton/dia e sem proteção no furo de corrida.....	122
6.1.3 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19 & 25 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida.....	125
6.1.3.1 – Comparação de resultados na condição Leito flutuante, sem proteção no furo de corrida, Produção de 3800ton/dia leito de 19 x 19 & 25mm	131
6.1.4 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19 & 25 mm, produtividade de 3000ton/dia e sem proteção no furo de corrida.....	133
6.1.5 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3800ton/dia e com proteção no furo de corrida.....	137
6.1.6 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e com proteção no furo de corrida.....	142
6.1.7 – Ensaio com aspersão CENTRAL, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e com proteção no furo de corrida.....	145
6.1.8 – Simulação numérica com o homem morto flutuante	151
6.2 – Ensaio com Homem morto em Repouso ou Assentado.....	155
6.2.1 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida.....	155
6.2.2 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3000ton/dia e sem proteção no furo de corrida.....	160
6.2.3 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3000ton/dia e sem proteção no furo de corrida.....	164
6.2.4 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 m, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida.....	168

6.2.5 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3800ton/dia e com proteção no furo de corrida	171
6.2.6 – Simulação numérica com o homem morto apoiado no fundo.....	174
6.2.7 – Simulação térmica matemática	179
6.3 – Desgastes das paredes do Alto-forno 2.....	183
7 – Conclusões	188
8 – Sugestões para trabalhos futuros.....	190
9 – Referências Bibliográfica.....	191

NOMENCLATURA

ΔP queda de pressão [Pa]

L - altura do leito – [m]

w - fração de vazios do leito

ϕ - fator de forma das partículas

η - viscosidade dinâmica - [mNsm⁻²]

ρ - massa específica do fluido – [g/cm³]

d_p - diâmetro da partícula - [m]

V_o - velocidade em vazio - [m/s]

ρ_{H_2O} – densidade da água 1000 [kg/m³]

ρ_{gusa} – densidade do Gusa - 6000 [kg/m³]

λ - fator de escala

1- Introdução e Definição do Problema

O Alto-forno 2 da ArcelorMittal Tubarão teve sua operação iniciada em Julho de 1998, desde desta data mostrou destaque devido ter conseguido atingir rapidamente a produção de projeto, em seguida apresentou altas taxas de produtividade com baixo consumo de combustíveis. A partir de 2002 os termopares de seu cadinho apresentaram elevações consideráveis na temperatura da parede e do fundo.

A capacidade de refrigeração do cadinho é fundamental para proteção contra aquecimentos localizados que levam ao desgaste do mesmo. Também se faz necessária uma geometria adequada que facilite a saída de líquidos, isto porque a relação inadequada entre altura e diâmetro, promove a movimentação mais agressiva de líquidos (aumento de produtividade por área da seção circular). Também contribui para o desgaste, através da possibilidade de formação de trincas, a utilização de blocos de carbono bipartidos na parede. Entretanto modificações geométricas e trocas de blocos de carbono são soluções que levam à necessidade de fortes investimentos, em função do projeto para reforma e perda de produção para execução do trabalho.

Outra condição que contribui para o distúrbio da vida útil do cadinho é o fluxo de gusa e, principalmente de escória, pelo homem morto, o que influencia de maneira direta nas temperaturas do cadinho. Isto se torna mais evidente neste alto-forno porque o possui a saída de líquido concentrado em somente uma região (existe somente uma casa de corrida). A escória produzida no lado oposto deve atravessar o homem morto para ser esgotada, sendo assim a condição de permeabilidade desta região mostra-se ser de fundamental importância para o esgotamento. Uma vez o escoamento através do homem morto prejudicado, o líquido busca a periferia evidenciando o fluxo de líquido nas periferias.

Ao evidenciar este fenômeno diversas ações podem ser tomadas pelo corpo técnico dos altos-fornos, com o intuito de minimizar o desgaste. Tais como mudanças de processo/operacionais, como alterações na distribuição de carga, controle da entrada de matérias primas (principalmente carvão), válvulas para controle de vazão de ar instaladas em ventaneiras, injeção de massa carbonácea no cadinho, carregamento de material titanífero, redução de produção e elevação de consumo de combustíveis. Estas duas últimas alternativas implicam normalmente em perdas financeiras.

Dada a importância dos fenômenos associados aos ciclos de drenagem do cadinho de um alto forno este projeto propõe-se a modelar fisicamente a frio a dinâmica do fluido do Alto-forno 2 da ArcelorMittal Tubarão e em combinação com um modelo matemático e análise *post mortem* do cadinho, revelar e compreender melhor os fenômenos de líquidos e como estes podem interferir no desgaste, dando possibilidade de criar soluções para o controle da temperatura mantendo altos níveis de produtividade com a vida útil do equipamento controlada.

2- Objetivos Específicos

Ao se buscar produtividade conjugada com prolongamento de vida útil dos altos-fornos deve-se praticar ações específicas de cunho operacional que irão levar a estes resultados. A conservação dos equipamentos periféricos, do corpo e do cadinho, tornam-se imprescindíveis para alcançar estes dois pontos, a princípio divergentes.

O objetivo principal deste trabalho é estudar o fenômeno de drenagem de líquido no cadinho através de modelagem física a frio e matemática. Neste sentido, enumeram-se os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo físico a frio do cadinho do alto-forno 2 da CST;
- Avaliar o efeito das principais variáveis de processo sobre a drenagem de líquidos no cadinho empregando o modelo físico desenvolvido;
- Investigar o efeito das linhas de fluxo e velocidades de movimento de líquidos sobre o desgaste do cadinho;
- Correlacionar os resultados dos modelos físicos, matemáticos e *post mortem*;
- Criar novas alternativas e/ou consolidar práticas operacionais para solucionar ou minimizar ocorrências de elevação de temperatura e desgaste no cadinho com base nos resultados anteriormente mencionados.

O entendimento dos fenômenos que são responsáveis pela drenagem e escoamento dos líquidos é de fundamental importância, visto que em diversos altos-fornos a campanha é determinada pela vida útil do cadinho. A elevação da temperatura é um fator fortemente adverso ao desempenho operacional do equipamento, tendo em vista que compromete o tempo de trabalho e/ou até mesmo o danifica ao ponto de uma parada emergencial.

3- Revisão Bibliográfica

O alto-forno é um reator químico que opera em regime de contracorrente, no qual as camadas da carga sólida descendente são aquecidas lentamente e reduzidas pelo fluxo gasoso ascendente. A necessidade de aumento da produção, a prática de injeção de combustíveis auxiliares, entre outras, têm resultado em maiores taxas de desgaste do revestimento refratário do cadinho, em particular, pelo aumento do grau de degradação do leito de coque e alterações prejudiciais à permeabilidade, forma e posicionamento do leito de coque.

Um bom desempenho de um alto-forno está forte e intimamente associado à boa qualidade das matérias-primas e do bom controle do processo, especialmente no que concerne à distribuição dos gases e distribuição da carga ao longo da operação. Mudanças na permeabilidade da carga podem ser advindas do aumento da quantidade de finos na carga; fragilização das partículas da carga aumentando a quantidade de finos bem como das variações no tamanho e posicionamento da zona coesiva ou de mudanças na distribuição da carga. Mudanças na permeabilidade da carga por sua vez afetam a distribuição de gases e, por conseguinte as distribuições de fluxos de gusa e de escória bem como de temperaturas na zona de elaboração e, por consequência a intensidade de desgaste do revestimento refratário do cadinho.

Entre os estudos referentes ao interior do alto-forno, realizados nas últimas décadas, merecem destaque especial as descrições e análises dos fenômenos que ocorrem na parte interior da cuba. Avanços significativos foram obtidos através dos resultados de análises de alto-fornos esfriados. Estas experiências deram-se a partir de 1970 no Japão, através destes foram identificados diferentes zonas no alto-forno. A figura 3.1 mostra esquematicamente estas zonas, cada qual com suas características bem definidas:

- Zona granular, que se encontra na parte superior do alto-forno e é formada por coque e minério em camadas alternadas, as posições da geometria destas cargas são parcialmente mantidas ao longo do alto-forno.
- Zona de amolecimento e fusão (zona coesiva), como o seu próprio nome refere, é onde se inicia o amolecimento das camadas de minério.
- Zona de coque ativo, zona onde gusa e escória escoam através do coque, esta zona também é chamada de zona de gotejamento.
- Zona de combustão situa-se no espaço a frente das ventaneiras provocado pelo ar soprado através delas (local da queima do coque).
- Zona do homem morto, composto por uma camada aproximadamente cônica de coque estagnado preenchendo todo o cadinho onde o gusa e escória estão contidos.

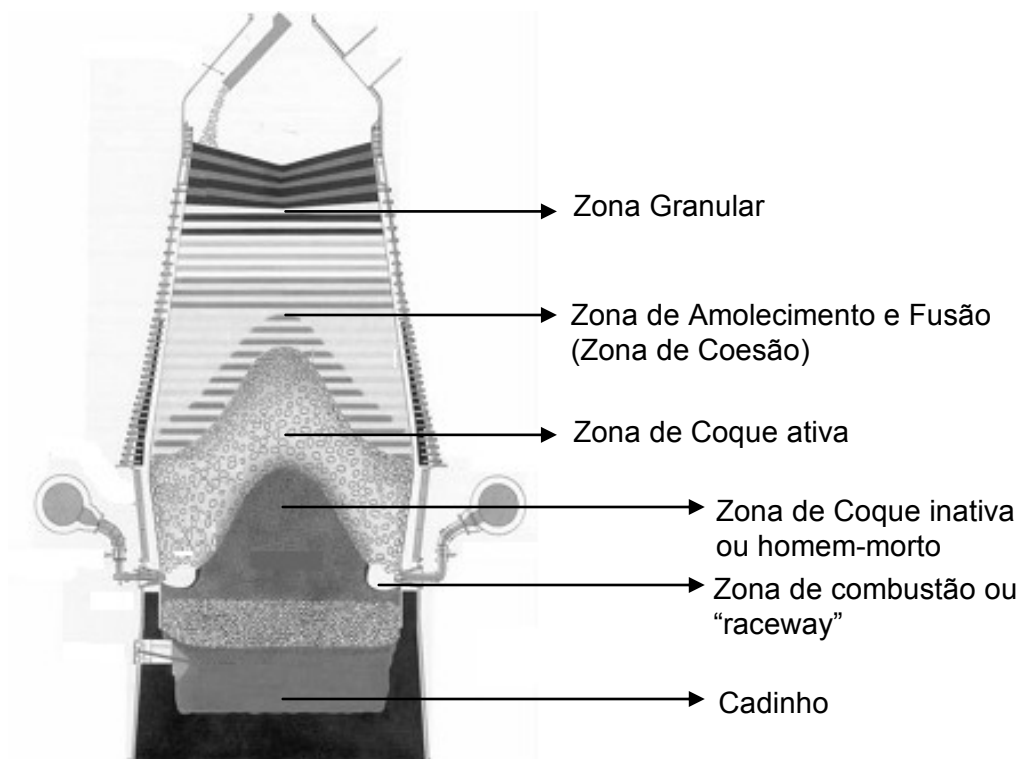


Figura 3.1 – Desenho esquemático das diferentes zonas do alto-forno segundo DEFENDI (2006).

Uma das informações importantes que se obteve desses estudos foi a existência da zona coesiva. Os efeitos da zona de coesão nas reações químicas dentro do alto-forno foram analisados em detalhe com comprovações industriais onde a posição da zona de amolecimento e fusão foi medida através de sondagens (segundo FUJIHARA 1994). Ao mesmo tempo conseguiu-se desenvolver novas técnicas de medição para a definição operacional da zona de coesão como também procedimentos matemáticos para calculá-la.

Esses métodos que permitem descrever a zona de coesão durante a operação criaram as condições para a análise (do cadinho) abaixo da zona de coesão. Devido ao difícil acesso as partes inferiores do alto-forno, existem mais grandezas medidas na parte superior do que na parte inferior à zona de coesão (figura 3.2).

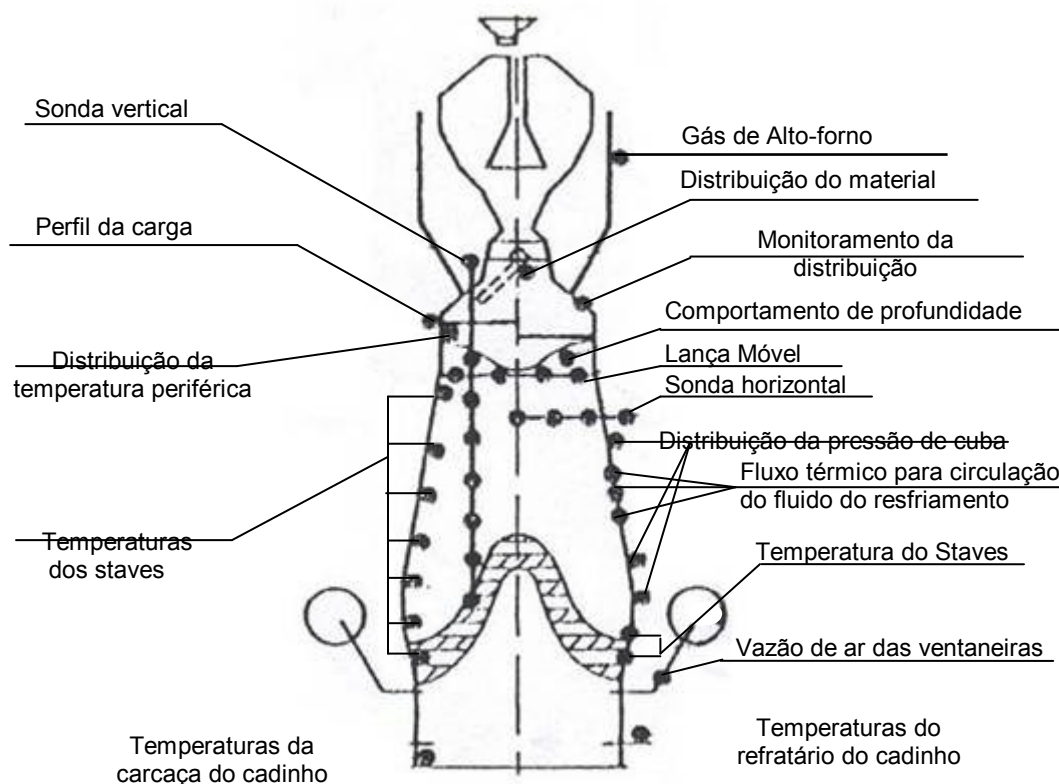


Figura 3.2 – Pontos referentes ao controle de processo e operacional do alto-forno (FUJIHARA e outros 1994)

Conseqüentemente, as informações da situação dentro da parte inferior do alto-forno estavam sendo obtidas basicamente através dos resultados de estudos em modelos simples ou por meio de descrições de alto-fornos resfriados.

Nas últimas décadas de esforços para aumentar o monitoramento e compreender melhor os fenômenos do cadinho foram intensificados. Através do crescimento do mercado do aço foi gerado a demanda do controle do custo do gusa. Uma forma interessante para suprir esta demanda foi incrementar a campanha dos altos-fornos com ações para o prolongamento da vida útil dos equipamentos.

3.1 – Cadinho do alto-forno

O cadinho é a região mais crítica do alto-forno e sua vida útil, definida principalmente pela distribuição de desgaste dos refratários do cadinho – parede, soleira, furo de corrida e canal de corrida, determina a campanha do reator industrial. A distribuição de desgaste do refratário de carbono é derivada da combinação de fenômenos químicos, hidrodinâmicos e termomecânicos. O controle das distribuições de fluxos de escória e gusa líquidos, bem como as de temperatura na estrutura do leito de coque são vitais para a determinação da campanha do alto-forno, uma vez que afetam consideravelmente o perfil de erosão do cadinho.

Dentro do cadinho existe uma massa de partículas coque, onde os líquidos produzidos acumulam-se entre os espaços vazios destas partículas e em seguida são drenados durante o vazamento após perfuração do furo de gusa (figura 3.3).

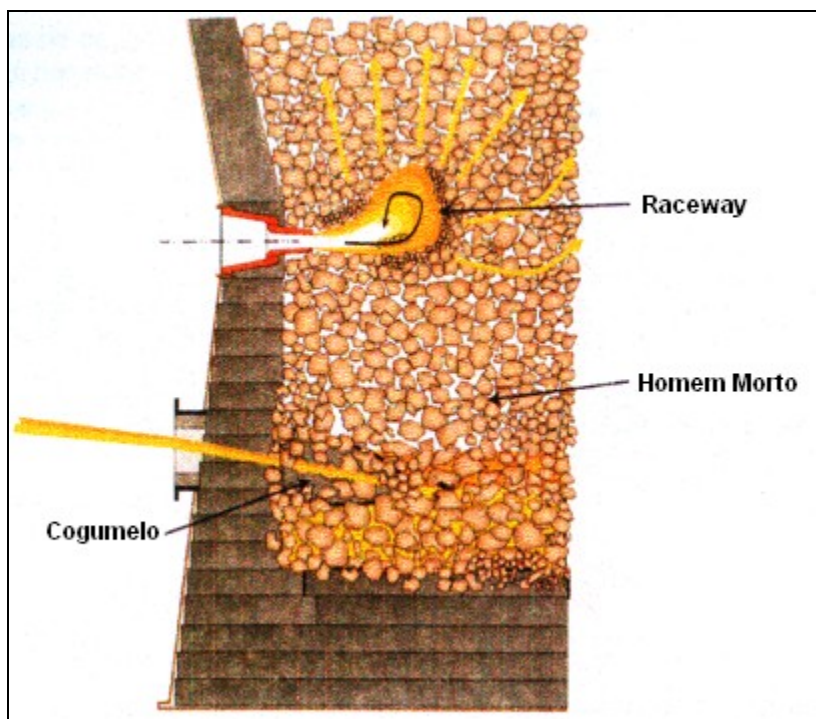


Figura 3.3 – Cadinho de alto forno segundo Geerdes e outros (2004).

Ao fechar um furo de gusa com massa refratária, esta se solidifica entre aproximadamente 15 a 30 minutos, impedindo assim sua abertura num dado intervalo de tempo posterior. Em altos-fornos com um furo de gusa isto causa um considerável período entre corridas, mas nos alto-fornos com diversos furos de gusa há geralmente um pequeno intervalo entre as mesmas. Durante este período de tempo, os níveis de líquidos aumentam. Ao abrir o furo de gusa – especialmente em altos fornos com somente um furo de gusa – a corrida inicia freqüentemente somente com fluxo de ferro, e a escória começa a fluir mais tarde quando a interface ferro-escória desce ao nível do furo de gusa; isto causa um atraso de escória, conforme pode ser visto na Figura 3.4 abaixo. Após este momento, o ferro e a escória são vazados simultaneamente até que o furo de gusa começa soprar o gás. O fechamento do furo de gusa termina o ciclo (BRÄNNBACKA e outros, 2005).

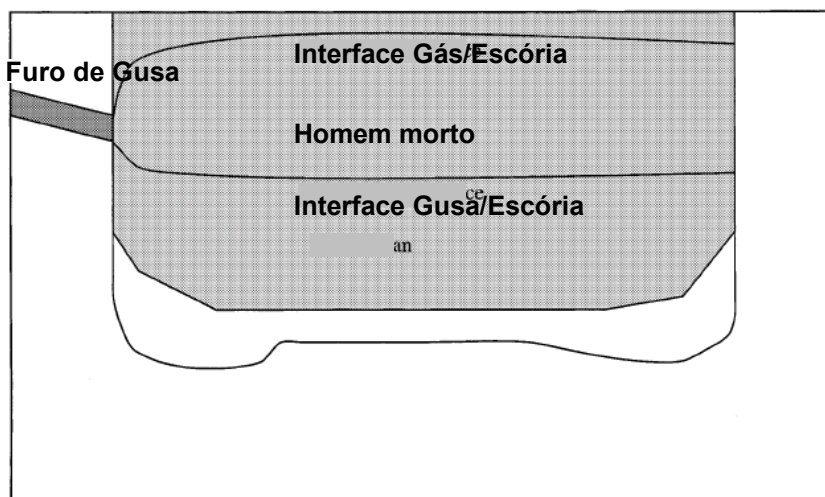


Figura 3.4 – Cadinho de alto forno com o homem morto (região cinza) flutuando no banho de metal, segundo Torrkulla e Saxén (2000).

O movimento das interfaces das fases gusa-escória, ou escória-gás, tem um papel importante na drenagem (Figura 3.5).

Devido à baixa viscosidade da fase metálica a interface ferro-escória permanece praticamente horizontal durante a primeira parte do ciclo do vazamento, mas quando se inicia um fluxo de escória viscosa, um grande gradiente de pressão forma-se perto do furo de gusa. Isto causa uma inclinação da interface ferro-escória para o furo de gusa, drenando o ferro nos níveis abaixo do furo de gusa. No fim da corrida, o grande gradiente da pressão na fase da escória no furo de gusa causa também um declínio da interface escória-gás, que eventualmente sopra o gás pelo furo de gusa mesmo que a interface média da escória-gás esteja bem acima do nível do furo de gusa (BRÄNNBACKA et al., 2005).

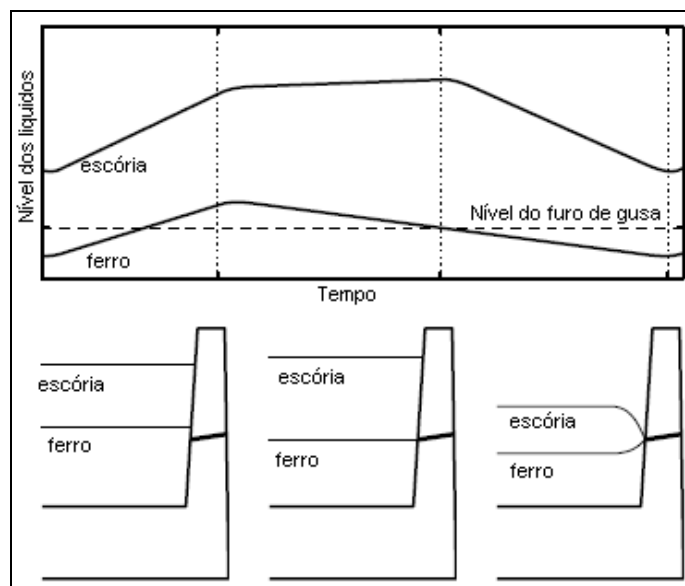


Figura 3.5 – Esquema dos níveis dos líquidos durante o ciclo de vazamentos segundo Brännbacka e outros (2005).

Outro ponto de destaque é o comportamento, no que diz respeito ao perfil de escoamento do gusa e da escória, apesar destes dois líquidos possuírem perfis distintos (Figura 3.6), ambos influenciam na drenagem do cadinho. Segundo Figueira e outros, o formato da superfície de escória varia em função do nível médio de líquidos no cadinho e da vazão de gás que sai da zona de combustão. Alguns fatores afetam a sua drenagem, destacando a viscosidade, a densidade, a tensão superficial, a molhabilidade ao coque e a condutividade térmica. As propriedades físicas da escória são fundamentais para boas condições de operação do forno, especialmente na influência à permeabilidade do gás e ao escoamento do líquido, além da preservação térmica da parte inferior do AF. Modelos matemáticos sugerem que no início do vazamento a altura da escória no centro se situa bem acima do nível das ventaneiras. Durante o vazamento o nível da escória diminui, conservando ainda maiores alturas na parte central do forno. Portanto, quando o vazamento é interrompido, certa fração de escória fica retida no forno, conforme visto na Figura 3.6. Sendo assim este material retido irá caracterizar as condições de drenagem da escória no alto-forno.

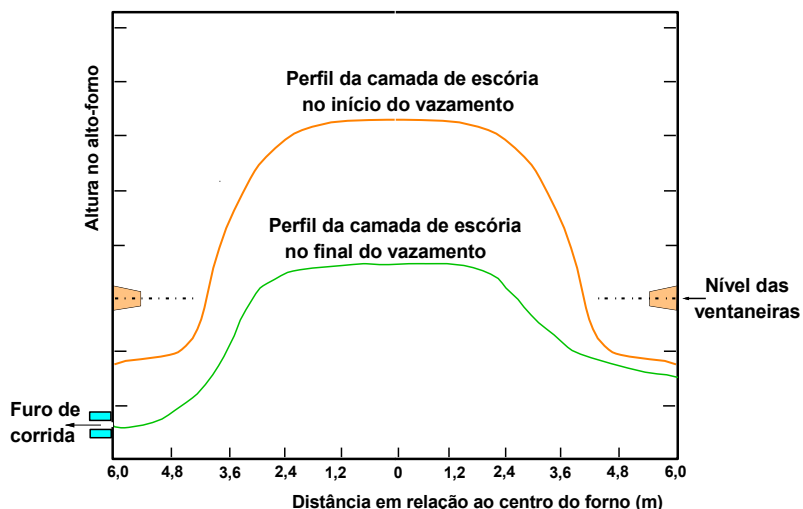


Figura 3.6 – Perfil da escória, segundo Figueira 2003.

A fração de escória retida pode ser calculada com a seguinte equação (conforme Gandra 2006):

$$F = \frac{\text{Volume de escória remanescente após o vazamento}}{\text{Volume de escória antes do vazamento}}$$

Segundo FUKUTAKE (1976) a fração da escória retida mantém uma relação com o coeficiente de escoamento - C_E - (Figura 3.7), que é definido pela equação:

$$C_E = 180 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{1}{\phi_s^3 d_p^2} \frac{\mu_L u_o}{\rho_L g} \left(\frac{D}{H} \right)^2$$

onde,

- ε = porosidade do leito de coque, (-)
- ϕ_s = fator forma das partículas de coque, (-)
- d_p = diâmetro da partícula de coque, m;
- μ_L = viscosidade da escória, Pa.s;
- ρ_L = massa específica da escória, kg/m³;
- D = diâmetro do cadinho, m;
- g = aceleração da gravidade, m/s²;
- H = altura da camada de escória, m.
- U_o = velocidade média do líquido, na área seccional do cadinho, m/s;

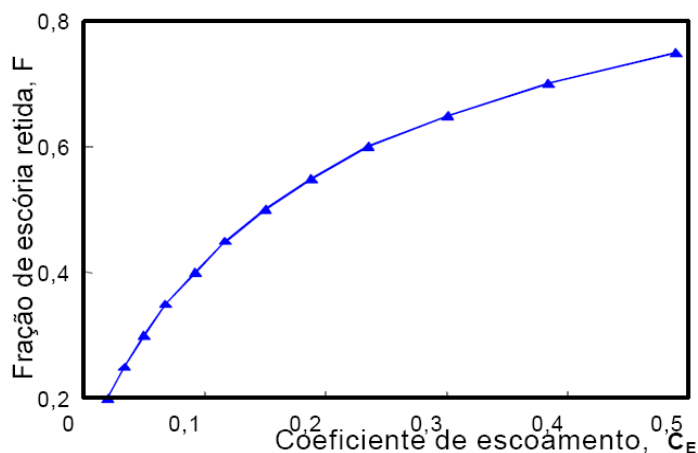


Figura 3.7 – Relação entre a fração de escória retida e o coeficiente de escoamento, segundo Figueira 2003.

Ao se estudar o comportamento do gusa com relação a sua drenagem, é notória a diferença, devido principalmente a uma grande diferença em sua viscosidade, que é cerca de 100 vezes menor que a da escória; portanto a fração de gusa retido é muito pequena. Entretanto a análise do escoamento do gusa não é menos importante pois afeta o gradiente térmico e o desgaste dos refratários no cadinho.

O estado interno do leito de coque, o homem morto (deadman), também desempenha um papel importante para as condições do fluxo, influenciando também a composição do gusa e a sua temperatura (TORRKULLA et al., 2002).

O homem morto, que tem formato cônico e está localizado no centro do cadinho, consiste principalmente de coque e escória com pequena porção de ferro (ainda que parcialmente reduzido) e é possivelmente pouco permeável aos líquidos porque possui, principalmente ao centro, uma camada muito densa (pouco porosa). A Figura 3.8 apresenta um exemplo de amostra do núcleo do homem morto obtida pelas ventaneiras (HUANG et al., 2007).

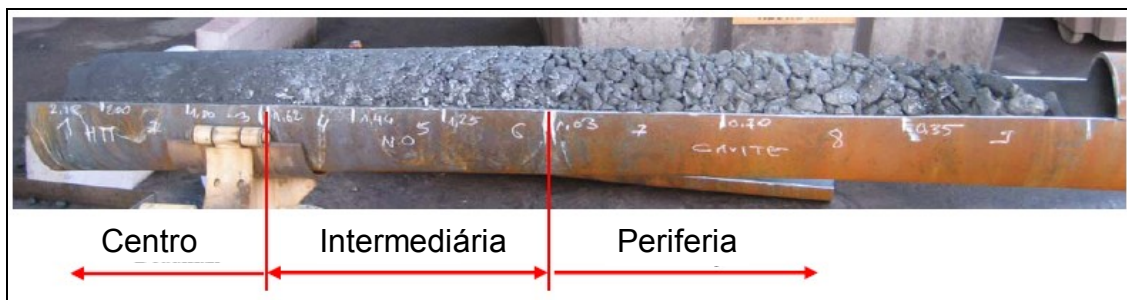


Figura 3.8 – Amostra do núcleo do homem morto através das ventaneiras segundo Huang e outros (2007).

O volume do homem morto pode ser subdividido em duas regiões distintas: zona morta e zona de coque ativo (YAN e outros - 2004), conforme figura 3.9. A porção central não é permeável aos líquidos e é denominada de zona morta. A zona de coque ativo pode ser permeável ao gusa líquido e à escória. A região externa ao homem morto é denominada zona livre de partículas ou gap, sendo permeável ao fluxo de gusa e de escória. A forma e permeabilidade do homem morto afetam significativamente os fluxos de metal líquido e de transferência de calor na região do cadinho do alto-forno.

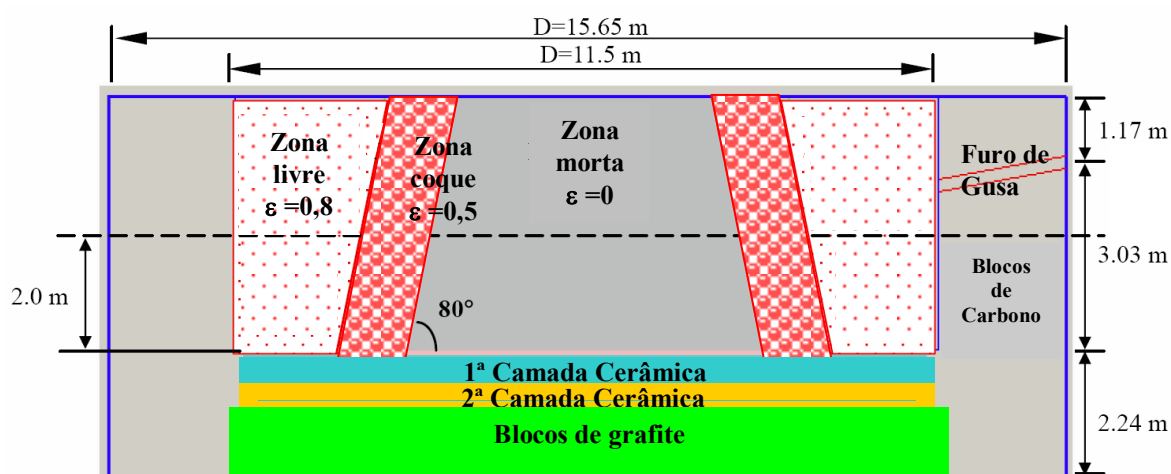


Figura 3.9 – Formas e porosidade do homem morto, YAN et alli.(2004)

Os parâmetros do homem morto anteriormente citados influenciam nos padrões de velocidade e o fluxo de gusa e da escória no cadinho, e então, também afetam na erosão ou formação de cascão e na drenagem destas duas fases líquidas. Calor e transferência de massa entre a escória e o gusa são também afetados pelo estado de homem morto, que pode ser impactado pelas condições da parte superior do forno por seu possível movimento vertical junto com as mudanças nos níveis de líquidos no cadinho.

Inada e outros (2003) comentam sobre o acondicionamento dos materiais no cadinho, conforme mostrado na Figura 3.10. Segundo Guimarães (2006) o nível de imersão do leito de coque pode ser avaliado analisando-se a interação entre a carga aplicada pelas camadas superiores de matérias primas na região superior às ventaneiras e o empuxo do líquido, ilustrado na Figura 3.11.

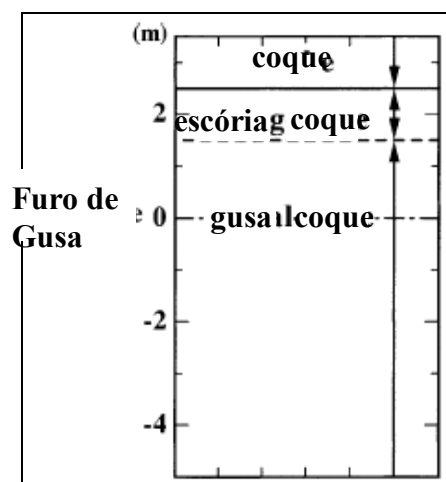


Figura 3.10 – Acondicionamento dos materiais no cadinho, segundo Inada e outros (2003).

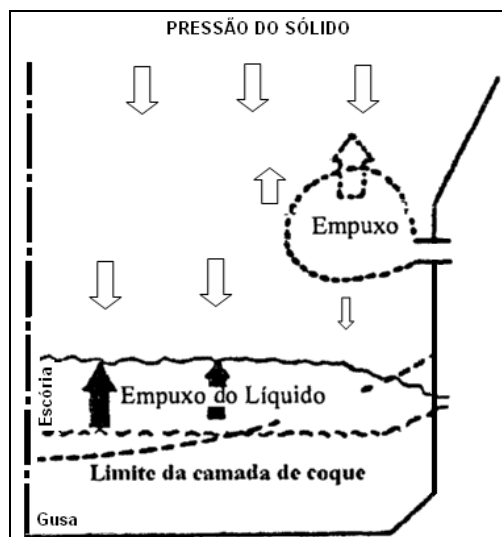


Figura 3.11 – Equilíbrio de forças atuando sobre a camada de coque segundo Guimarães (2006).

O fluxo de metal não só influencia a carga térmica na parede e no fundo do cadinho, conforme mencionado anteriormente, mas também causa erosão devido às tensões de cisalhamento, particularmente nos cantos. Padrões de fluxo diferentes podem existir como resultado dos estados diferentes do homem morto: flutuação e assentamento do mesmo, a Figura 3.12 mostra esquematicamente como seriam estas situações. Segundo TANZIL e outros (1984), se a poça no cadinho é bastante profunda, o empuxo atuante sobre o homem morto submerso pode causar a sua flutuação parcial ou total. O comportamento fluidodinâmico do gusa e da escória, na região do cadinho, é fortemente influenciada pela situação do homem morto. Mudanças na distribuição de fluxos em virtude a transição do homem morto desde o estado de repouso sobre o fundo do cadinho até o de completa suspensão podem ter efeitos positivos ou negativos sobre a operação do alto-forno. Acredita-se que estado de suspensão do homem morto geralmente melhora o processo de drenagem da escória e do gusa. Mas ao mesmo tempo, o aumento do fluxo no fundo do cadinho acelera a erosão do refratário da soleira e aumenta as mudanças na composição do metal.

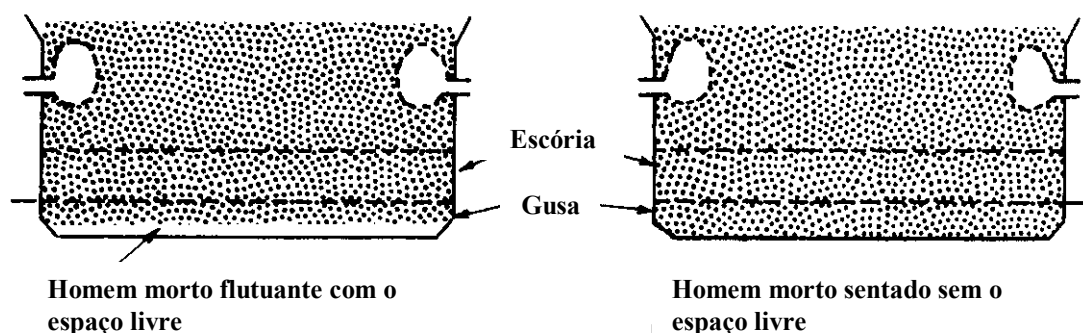


Figura 3.12 – Representação esquemática do estado do leito de coque no cadinho do alto-forno, segundo OMORI (1987).

Do ponto de vista operacional, é importante conhecer o estado de flutuação do leito de coque, na região do cadinho, de modo a aplicar ações apropriadas para a inibição ou favorecimento desta condição do homem morto e prever a possibilidade de rápida erosão do refratário. Muitos poucos métodos de detecção da flutuação encontram-se reportados na literatura especializada. Mudanças na distribuição de temperaturas podem ser determinadas através de instalações de termopares. Contudo este método não provê informações sobre as mudanças na distribuição dos fluxos de líquidos. O efeito decorrente do aumento do fluxo junto às paredes, em virtude da transição na flutuação parcial do homem morto, pode ser confundido com o provindo de mudanças na distribuição de fluxos causada pela obstrução parcial do núcleo da massa de coque. No caso da flutuação existe um canal de fluxo debaixo dele, enquanto no caso de assentamento, não há nenhum canal de fluxo debaixo do homem morto, mas pode haver um canal de coque livre nos cantos do cadinho. Quando o homem morto se assenta cobre a superfície inteira da área do fundo do cadinho. Em resumo pode-se verificar que o volume da região livre de coque entre a soleira do cadinho e o leito de material tem dependência da geometria do cadinho e das condições operacionais do alto-forno.

Brännbacka e outros (2005) comentam que um homem morto flutuante melhora geralmente a drenagem dos líquidos e previne a obstrução do mesmo, mas quando

ocorre um aumento do fluxo no fundo do cadinho acelera o desgaste do revestimento e aumenta a variação da composição química do ferro gusa. Guimarães (2006), afirma que para um homem morto flutuante os padrões da linha de escoamento de líquidos são bastante irregulares com uma evidencia de fluxo de calor forte sob o homem morto. Este fluxo pode contribuir para o desgaste do cadinho, enquanto um homem morto assentado no fundo do cadinho tem os padrões da linha de escoamento de líquidos bastante uniformes, conforme Figura 3.13.

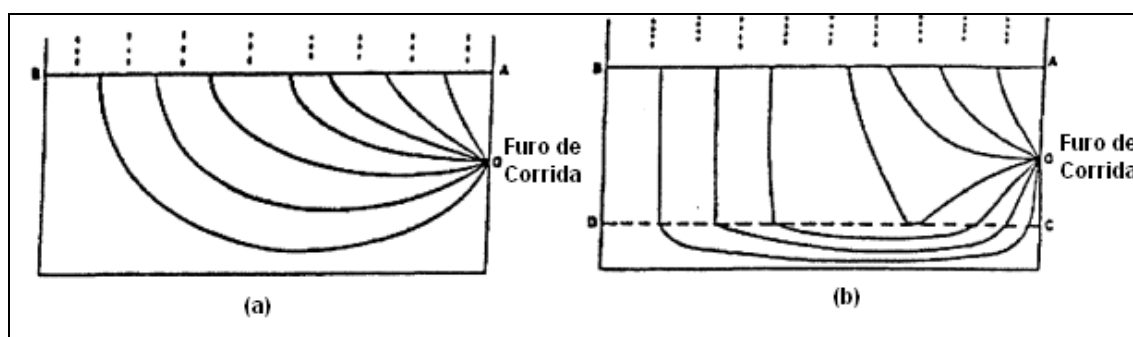


Figura 3.13 – Padrão de fluxo de gusa no cadinho para o caso do homem morto assentado (a) ou flutuando (b), segundo Guimarães (2006).

A flutuação parcial ou total do homem morto no cadinho do alto-forno influencia a distribuição de velocidades e de temperatura dos líquidos. Em virtude da existência da zona livre sobre o fundo do cadinho, o fluxo do material será acelerado preferencialmente para a região abaixo do furo de gusa através da zona livre de coque. CHEN e outros (2005) mostraram que o posicionamento do homem morto em relação ao fundo do cadinho influencia a resistência ao escoamento de gusa líquido. O aumento da altura do homem morto em relação ao fundo do cadinho mostrou diminuir a resistência ao fluxo de gusa líquido, figura 3.14.

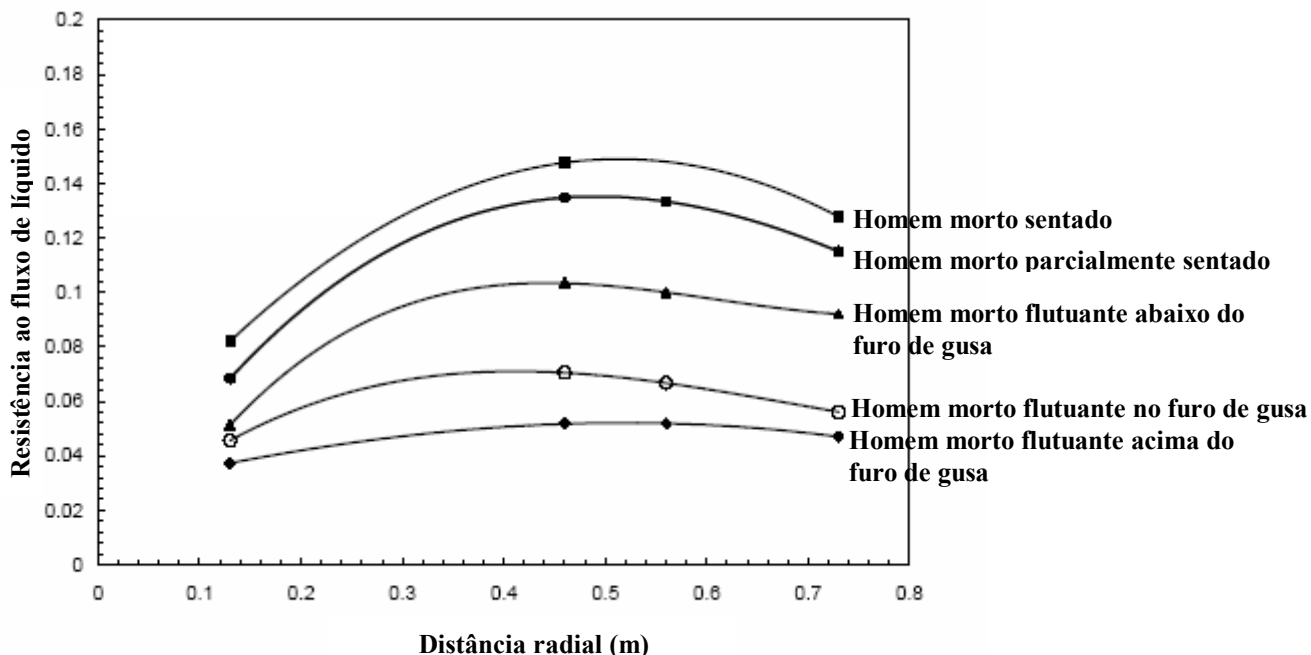


Figura 3.14 – Resistência ao fluxo e configuração do sistema homem morto/cadinho, segundo CHEN e outros (2005).

Quando a permeabilidade do leito de coque decresce, como já citado previamente, os fluxos de líquidos tendem a ser periféricos, intensificando o grau de erosão da parede do cadinho, especialmente, na região localizada abaixo do furo de corrida. Em uma estrutura de baixa permeabilidade os tempos de residência das gotículas são aumentados em comparação com aqueles relativos a um leito de coque permeável.

A distribuição de porosidade no homem morto define a rota do gusa e da escória desde o início da zona de gotejamento até a região do cadinho, isto é a granulometria das partículas que o constituem tem compromisso direto com a boa condição de escoamento. A existência de canais estreitos na estrutura de coque dificulta o movimento de percolação de ambos os líquidos, que podem ficar parcial ou completamente acomodados na estrutura do leito de coque, apresentando velocidade de descida igual à do leito de partículas. Quando se obtém canais mais largos e maiores, a possibilidade do fluido de escoar é melhor e reduz-se o tempo de residência na região do cadinho. A Figura 3.15 apresenta estas duas condições.

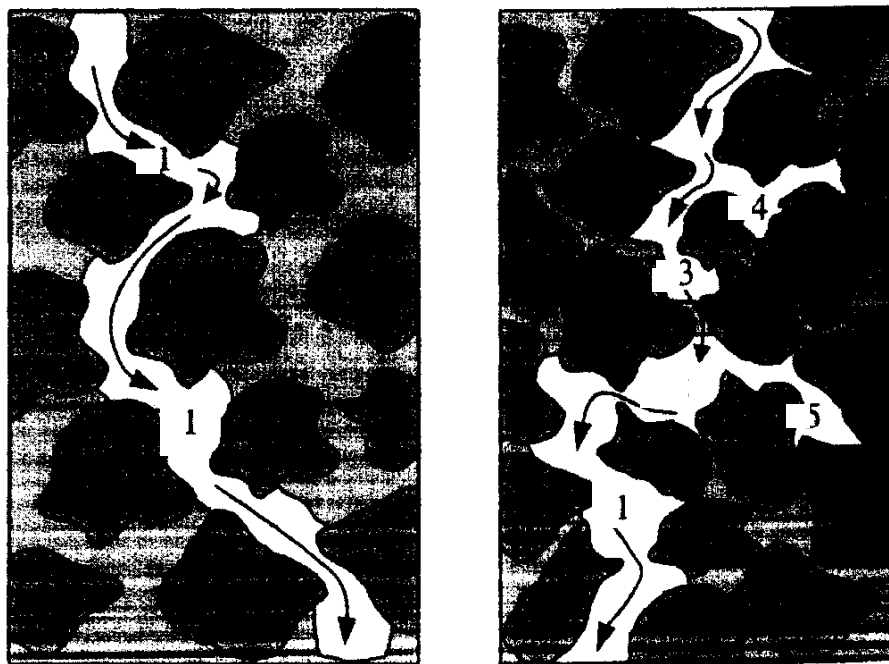


Figura 3.15 – Desenho esquemático do caminho percorrido pelo gusa e pela escória através da estrutura do leito de coque, leito da esquerda baixa resistência ao fluxo, leito da direita alta resistência ao fluxo, segundo HUSSLAGE e outros.(2001)

Pesquisas, com o foco na região do cadinho, foram realizadas com o intuito de melhorar a monitoração e viabilizar novas técnicas de controle. O líquido vazado foi monitorado através de microondas e radares montados na casa de corrida possibilitando verificar diretamente a quantidade do material extraído do cadinho; balanças de fluxo também foram utilizadas para este fim. Para a determinação do nível de líquidos dentro do cadinho foram desenvolvidas medições indiretas baseadas na geração de EMF, *electromotive force*, a diferença de potencial (ddp) fornecida por sensores colocados na carcaça ou diretamente no bloco de carbono, que prevê o nível do líquido (conforme ZULLI 2002). A diferença do potencial é creditada às reações químicas nas regiões do cadinho e da ventaneira, causada pelo circuito através da escória, gusa e paredes do cadinho e carcaça de aço. A condutividade elétrica entre o gusa, escória e homem morto é assumida ser

preponderante na causa de variações do potencial medido na carcaça de aço em virtude das variações dos níveis de gusa líquido dentro do cadinho. A força eletromotriz não é somente afetada pela escória e pelo gusa, mas por outros fatores, tais como a temperatura e pressão interna do alto-forno. A figura 3.16 mostra um comportamento típico do nível de gusa e escória e o sinal da força eletromotriz para um período de cinco corridas. Observa-se, como era de se esperar, que o nível de gusa e de escória é maior para a situação do homem morto assentado sobre o fundo do cadinho em comparação com o homem morto suspenso.

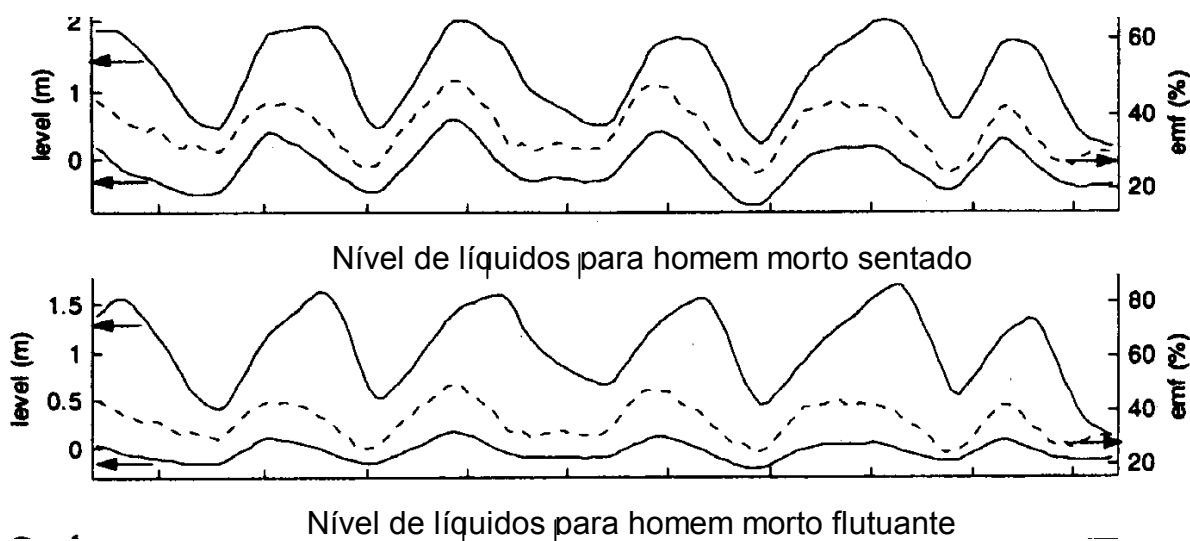


Figura 3.16 – Nível de gusa líquido e de escória para a situação do homem morto assentado e flutuando, segundo BRÄNNBACKA e outros.(2001).

3.2 Refratários para o cadinho

Na operação do alto forno, a administração do estado do revestimento do cadinho é importante, pois a erosão limita a duração da campanha do forno. A formação de uma camada de material solidificado a frente do refratário, pode trazer benefícios para o controle deste desgaste. Por outro lado, um crescimento excessivo deste material na parede do cadinho e no fundo, reduz o volume efetivo do cadinho e assim diminui também as possibilidades de manter uma alta taxa de produção e,

além disso, e perturba a distribuição de fluxo interno dos líquidos.

Blocos de carbono têm sido usados neste último meio século, como refratários para o cadinho de alto forno, pois exibem resistência à corrosão e condutividade térmica adequadas para a formação de uma camada de auto-proteção. As principais causas do desgaste dos blocos de carbono usados em cadinhos de alto forno são (NITTA, 2006):

- Penetração do ferro fundido em poros nos blocos de carbono;
- Formação de uma camada frágil na face quente (perda da capacidade de refrigeração);
- Os danos da dissolução dos blocos de carbono causados por contato direto com ferro (fusão através de carbonização).

Segundo ARAÚJO (1997), vários tipos de materiais carbonosos, impregnados ou não, prensados a frio ou a quente, amorfos ou grafitados, vem sendo usado para o revestimento do cadinho, como abaixo:

- Carbono – mistura-se material de enchimento, como antracito calcinado, coque de petróleo ou negro de fumo, com ligantes, tais como: piche de petróleo ou alcatrão. As misturas são moldadas ou extrudadas e as peças conformadas, cozidas a temperaturas em 800° e 1400°C para carbonizar o ligante. Durante a carbonização dos ligantes, os produtos voláteis tendem a escapar, causando porosidade. Os álcalis usam estes poros para infiltrar-se e atacar o carbono. Pode-se diminuir esta porosidade, impregnando o bloco sob vácuo e efetuar novo cozimento para carbonizar o ligante, porém com um custo maior. Alguns produtores usam carbetos de silício ou silício metálico para reduzir o tamanho dos poros e aumentar a resistência ao desgaste. Outro fabricante usa um molde especial, aquecido com corrente elétrica, onde a mistura de partículas de carbono e ligantes é prensada simultaneamente em várias direções, em poucos minutos. Para tornar o produto ainda mais resistente, adiciona-se quartzo ou sílica, porque o sódio ou potássio reagem preferencialmente com a sílica, formando compostos não expansivos, enquanto que, com o carbono, formariam compostos lamelares que, ao

incharem, destroem a estrutura do bloco.

- Grafita sintética – A designação aplica-se aos blocos de carbono prensados, que sofreram tratamento térmico adicional de aquecimento entre 2400° a 3000°C, para grafitizar as partículas de carbono de enchimento e do ligante, resultando em alterações na estrutura e nas propriedades.
- Semi-grafita – Trata-se de mistura de grafita artificial com ligante carbonoso, como o piche ou alcatrão e submetida a temperaturas entre 800° a 1400°C. O produto resultante tem melhor condutibilidade que os blocos de carbono, mas não tão boa como os de 100% de grafita.
- Semi-grafita prensada a quente – Utiliza o mesmo processo de prensagem a quente descrito acima para os blocos de carbono. Um dos tipos consiste em partículas de material grafitizado misturado com um ligante carbonoso e adição de sílica, para maior resistência aos álcalis. Um outro, contem carbeto de silício, para maior resistência ao desgaste, e um terceiro contem partículas de grafita com um ligante carbonoso.
- Semi-grafitizados – A designação refere-se a um material de carbono cozido que foi tratado termicamente a uma temperatura entre 1600° e 2400°C e possui melhor condutibilidade térmica e resistência ao ataque químico. Normalmente carbono e semi-grafita são usados na face quente do revestimento, em contato com o gusa liquido, enquanto a grafita é colocada na retaguarda para se auferir vantagem de sua alta condutibilidade. O material carbonoso serve como resfriador, especialmente se houver refrigeração forçada, assegurando que a penetração fique limitada a camada de cerâmica. A tabela 3.1 mostra valores de algumas propriedades destes materiais.

Classificação do produto	Temperatura de queima (°C)	Partículas	Ligante
Carbono	800 – 1400	Carbono	Carbono
Carbono prensado a quente	< 1000	Carbono	Carbono
Grafita	2,4 – 3000	Grafita	Grafita
Semi-grafita	800 – 1400	Grafita	Grafita
Semi-grafita prensado a quente	< 1000	Grafita	Carbono
Semi-grafitizados	1600 – 2000	Carbono	Carbono

Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais refratários, segundo Araújo (1997).

Segundo Nitta (2006), para prevenir a penetração do ferro fundido, o tamanho dos poros deve ser reduzido (microporos). Os microporos podem ser alcançados reduzindo o diâmetro do poro com filamentos de Si-O-N que crescem dentro dos poros em cada bloco de carbono. Além disso, para reduzir o componente carbono da área da superfície exposta ao ferro fundido, a alumina, que tem excelente resistência à alta temperatura e boa resistência ao desgaste mecânico, é somada aos blocos de carbono. Assim, foram desenvolvidos blocos de carbono que estão livres de danos por solubilização de carbono em contato com o metal. Além disso, foram desenvolvidos blocos de carbono que têm uma melhor resistência à corrosão e alta condutividade térmica para permitir um reforço da proteção do cadinho. Nitta (2006) cita o desenvolvimento de blocos de carbono pela Nippon Steel, com ênfase em uma melhor a resistência à corrosão e a alta condutividade térmica, conforme a Figura 3.17.

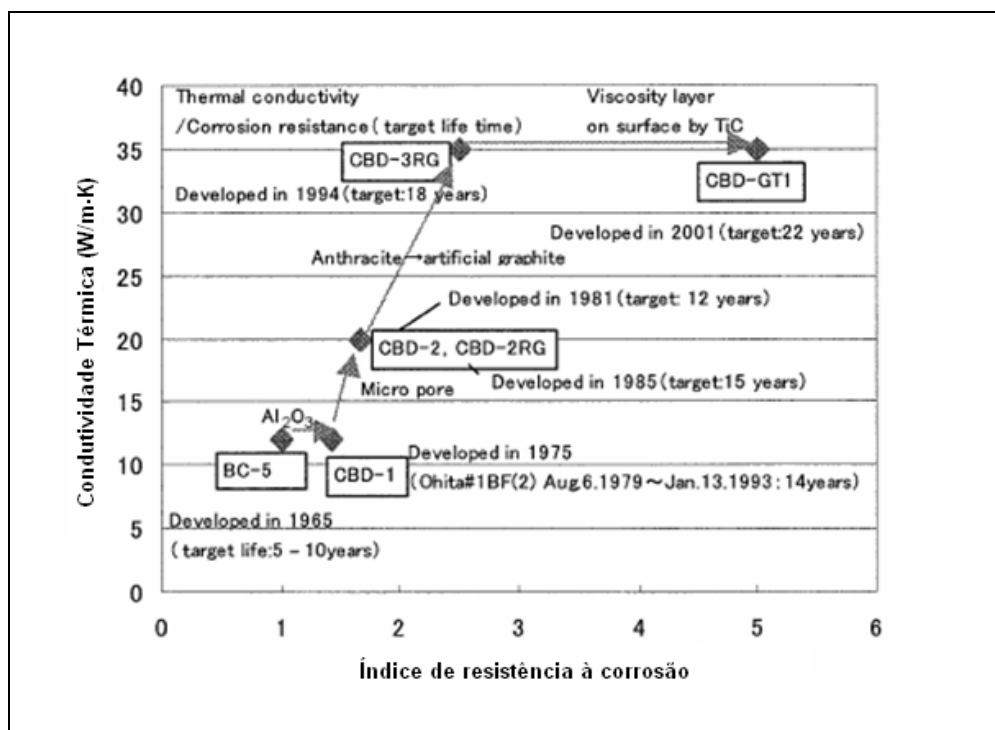


Figura 3.17. Desenvolvimento de blocos de Carbono na Nippon Steel segundo Nitta

(2006).

BC-5 é um tipo de bloco de carbono que foi usado por um longo tempo, chamado de bloco de carbono convencional (standard), combinando a boa resistência ao ferro líquido conferida pelo antracito calcinado e a alta condutividade térmica conferida pela grafita artificial. O BC-5 foi desenvolvido em 1965 usando o piche de molde-extrudável como pasta. Em 1975 foi desenvolvido o CBD-1, como meta para se obter melhor resistência ao desgaste pelo ferro líquido. Para assegurar uma boa resistência à corrosão, uma alumina com excelente resistência a escória ácida foi adicionada. O CBD-2 foi desenvolvido em 1981, e é um bloco de carbono com Si metálico adicionado, providos de microporos, contendo filamentos de Si-O-N nos poros durante o processo de cozimento. O CBD-2RG desenvolvido em 1985 é uma versão melhorada do BC-5 que foi formado por prensagem (ao invés de formação por extrusão), utilizando uma pasta resinada (em lugar da pasta de piche), o que permitiu obter um bloco de carbono mais denso. Foi desenvolvido o CBD-3RG, em 1994, com atenção ao antracito calcinado o qual oferece excelente resistência ao ferro líquido. A característica vantajosa do antracito calcinado foi alcançada pela combinação de grafita artificial e pó de alumina para desenvolver um bloco de carbono com alta condutividade térmica. As principais propriedades dos blocos de carbono são descritas no Tabela 3.2 (NITTA, 2006).

Bloco de Carbono		BC-5	CBD-1	CBD-2	CBD-2RG	CBD-3RG	CBD-GT1
Desenvolvido em (ano)		1965	1975	1981	1985	1994	2001
Propriedades	Densidade aparente	1,56	1,58	1,59	1,71	1,76	1,96
	Porosidade (%)	18,7	17,3	18,5	19,0	23,1	19,7
Força de Compressão (MPa)		40,5	43,0	15,1	66,9	63,0	76,2
Força de dobramento (MPa)		11,7	11,9	12,3	15,0	15,2	21,4
Condutividade Térmica (W/m·K)		17,1	13,2	13,8	23,3	33,3	37,0
Porosidade maior que 1µ m (%)		16	11	2,7	1	0,2	0,15
Resistência a Corrosão (índice)		100	140	140	170	250	500

Tabela 3.2 – Propriedades Típicas dos Blocos de Carbono Desenvolvidos na Nippon Steel segundo Nitta (2006).

Outros materiais cerâmicos como alta alumina, mulita e corundum também são

empregados no cadinho para reduzir a exposição ao metal fundido. Alguns preferem materiais com 40% a 50% de alumina com o objetivo de se ter um revestimento que irá fundir e vitrificar na face quente, vedando a superfície de penetração (ARAÚJO, 1997).

Estes materiais foram introduzidos em 1984 e consistiam essencialmente de um revestimento cerâmico (Ceramic Cup) que foi instalado em vários altos fornos, conduzindo a uma ótima experiência relativa ao projeto de revestimento, desenvolvimento e seleção de material refratário. Os primeiros revestimentos cerâmicos foram projetados como um “forro de desgaste” para proteger o revestimento de carbono contra o desgaste por álcalis e ferro gusa não saturado aumentando assim sua confiança. O nascimento do revestimento cerâmico foi em 1970 quando foram colocados os primeiros blocos cerâmicos usando Mulita sobre os blocos de carbono. Para solucionar o problema do desgaste dos blocos o próximo passo era empregar materiais cerâmicos para proteger a área de carbono que estava sujeito ao desgaste tipo “pata de elefante” (McNALLY et al., 2000).

Em 1984 os primeiros revestimentos cerâmicos foram instalados no alto-forno 6 de Hamborn (figura 3.18) e no alto-forno 6 de Ruhrort (figura 3.19), ambos da THYSSEN. O projeto foi chamado de mini-revestimento cerâmico porque a cerâmica estendeu-se somente até o furo de gusa. O material da parede era de Cromo/Corundum, blocos fundidos pré-fabricados. Foi notada a presença do revestimento cerâmico no alto-forno 6 de Ruhrort mesmo após 5 anos do início de operação (McNALLY et al., 2000).

Quando o alto-forno 1 de Schwelgern - THYSSEN foi reformado em 1985, os resultados dos anteriores ainda não estavam disponíveis. Foram adicionados apenas 1,1 metros de um anel cerâmico de blocos de cromo/corundum instalados dentro da parede de carbono o cadinho (Figura 3.19). Este sofreu um rompimento em 1989 aproximadamente 2 metros abaixo do furo de gusa. Análises do perfil de desgaste revelaram que o anel cerâmico foi pouco afetado considerando que o

carbono diretamente sobre e debaixo deste foi fortemente desgastado (Figura 3.19). Após este fato, foi instalado o revestimento cerâmico em todo o cadinho na reforma em 1989 e o forno produziu 21 milhões de toneladas de gusa (Figura 3.18). Após isto, uma progressão foi feita em termos de materiais empregados assim como no projeto (McNALLY et al., 2000).

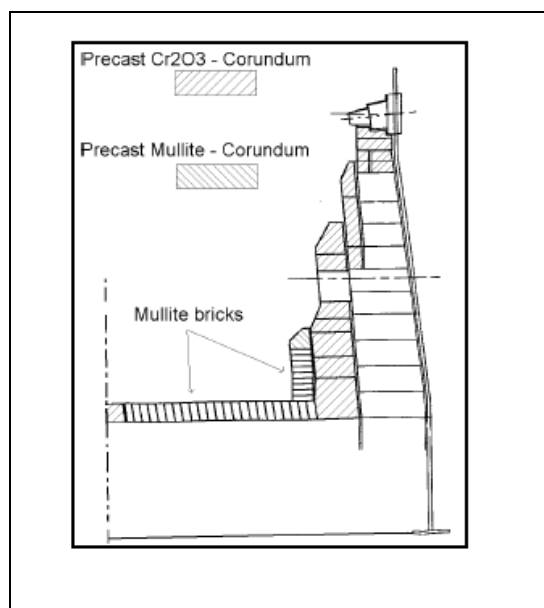


Figura 3.18 – Projeto de revestimento Cerâmico completo na reforma do AF1 de Schwelgern (1989) segundo McNally e outros (2000).

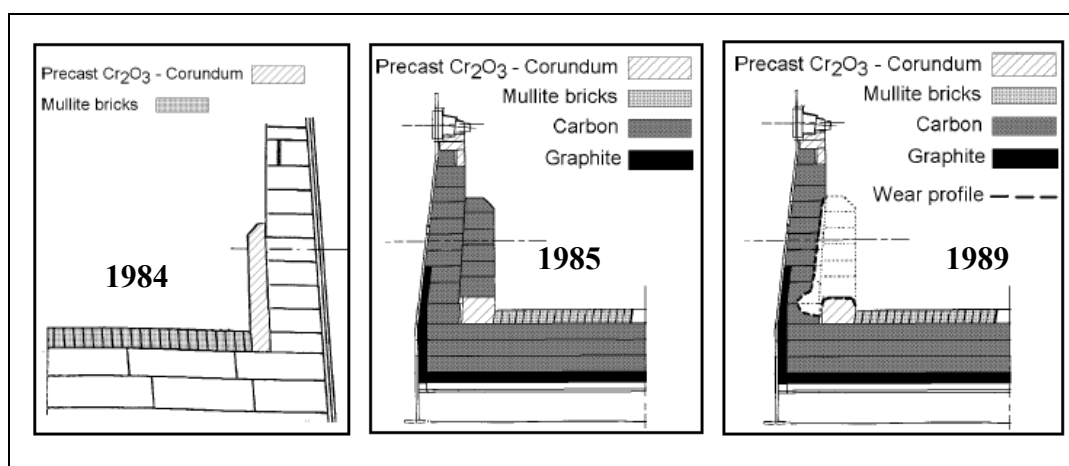


Figura 3.19 – Projetos de cadinho. Da esquerda para direita, AF6 de Ruhrort, AF1 de Schwelgern e AF1 de Schwelgern segundo McNally e outros (2000).

Os resultados com blocos de cromo/corundum foram satisfatórios, mas em alguns casos foi observado um desgaste mais alto do que esperado. Durante a operação, uma solução sólida de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ formou-se na face quente, o que forneceu uma excelente resistência mecânica a quente, esta característica foi associada com uma alta expansão térmica e uma resistência à crepitação muito alta. Neste caso foi concluído que a grande espessura de parede contribuiu para a antecipação do desgaste devido à fragmentação da face quente (Tabela 3.3). Exames de amostras dos blocos de cromo/corundum indicaram que a resistência à escória não era tão crítica quanto foi previsto. O cromo foi removido e substituído por Mulita, evitando a formação de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ e restando um nível apropriado de resistência à crepitação evitando assim a fragmentação (McNALLY et al., 2000).

Características	Bloco de Mulita	Cr_2O_3 Corundum	Mulita Corundum	Sialon Corundum	Carbono Microporo
Al_2O_3 %	70	86,5	89,5	75	1,4
SiO_2 %	28	0,5	7,0		5,5
Cr_2O_3 %		9,5			
Sialon %				25	
Densidade Aparente	2,5	3,5	3,35	3,20	1,55
Expansão térmica $10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$	5,5	8,6	7,8	5,4	2,5
Condutividade Térmica a 1000°C $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$	2,10	4,2	3,9	3,2	14
Módulo de Ruptura a 1500°C Mpa	5 (1400°C)	12	7	20	10 (1400°C)
Modulo de Young a 1500°C Gpa	19	30	40	25	8
Creptação sobre 0,5 MPa a 1500°C (5 até 29 h) %	0,8	0	1,5	0,2	0,02

Tabela 3.3 – Características dos materiais cerâmicos e de carbono de cadinho segundo McNally e outros (2000).

Assim a evolução seguiu de Cromo/Corundum para uma união de Mulita e Corundum, melhorando o equilíbrio entre a resistência à escória e esforços termomecânicos. Alguns resultados do uso desta nova geração de material podem ser obtidos da análise dos dados do alto-forno 1 e 2 de SOLLAC Fos. SOLLAC publicou a comparação da posição isoterma de 1150°C atual contra a predita, depois de cinco anos de operação o que mostrou que o revestimento cerâmico ainda estava em ação (McNALLY et al., 2000).

Pesquisas e projetos foram continuados com a meta de melhorar a resistência à corrosão pela escória e pelo ferro sem aumentar, no entanto, a possibilidade de fragmentação devido ao aumento de tensões térmicas. Como o material de corundum foi considerado o ideal e a união deste com a Mulita foi tida como um sucesso, considerou-se que a próxima geração ainda seria baseada no corundum, mas com união ao material sialon (liga cerâmica com base nos elementos silício (Si), alumínio (Al), oxigênio (O) e nitrogênio (N)). Há uma limitação no tamanho do bloco que pode ser unido com sucesso ao sialon. Isto porém não foi visto como uma desvantagem. A meta era a de minimizar o aumento da tensão usando um maior número de articulações, obtendo assim:

- Um material mais inerte a ferro e a escória a altas temperaturas;
- Nenhum risco de perda prematura devido à fragmentação / tensão.

Um único projeto foi desenvolvido, usando sialon em conjunto com os blocos de corundum, instalados no alto-forno 2 de Schwelgern - THYSEN (Figura 3.20) em 1993, com o intuito de se alcançar uma construção que teria uma boa estabilidade, evitando movimentações do conjunto e ao mesmo tempo, fornecendo níveis aceitáveis de tensão (McNALLY e outros, 2000).

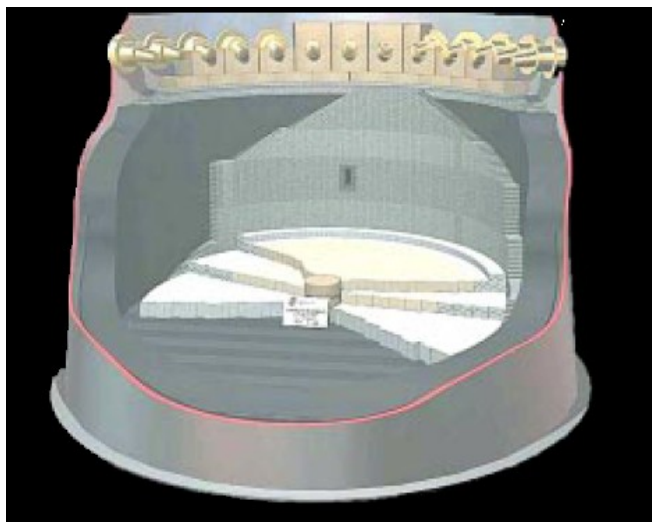


Figura 3.20 – Revestimento cerâmico do cadinho do AF2 de Schwelgem – THYSEN segundo McNally e outros (2000).

A falta de alívio para a expansão térmica, elevado gradiente de temperatura e dilatação diferenciada levam a trincas, com o subsequente ataque químico pelo gusa líquido. O projeto adequado de paredes refratárias do cadinho exige um refratário de alta condutibilidade que promova a formação de uma camada protetora de material solidificado na sua face quente. Outrossim, deve incorporar medidas efetivas para compensar as dilatações radiais e, principalmente, as diferenciais da espessura. Estas ocorrem porque a temperatura na face quente é mais elevada que a da face fria, chegando a atingir 1400°C , causando tensões elevadas no tijolo, que estão impedidos de curvar ou expandir. As trincas ocorrem paralelamente à face quente. Tais rachaduras limitam a capacidade dos blocos de, individualmente, transferirem o calor, pois cada fenda representa um espaço de ar, constituindo-se em uma barreira à efetiva transferência de calor (ARAÚJO, 1997).

Todo resfriamento da parede do cadinho depende da transferência de calor através da espessura do tijolo e daí para uma placa de resfriamento ou um “stave” na face fria, sendo essencial manter sempre o contato com o sistema de resfriamento. Senão, o espaço de ar entre a carcaça e o refratário, constitui-se como uma camada isolante, causando temperaturas elevadas e, em consequência, ocorrerá o ataque

químico da escoria e do gusa líquido. A camada de massa socada entre a carcaça (ou “staves”) e a face fria de uma parede de carbono, atua como isolante em relação ao sistema de resfriamento. Como a massa contrai durante o aquecimento e sua condutibilidade é bem menor que a do bloco de carbono, as temperaturas na face quente deste último ficam acima da temperatura de solidificação da escoria e do ferro, impedindo a formação de cascões protetores. Preferem-se refratários com módulo de elasticidade e coeficiente de expansão térmica baixa (ARAÚJO, 1997).

3.3 - Refrigerações do cadinho

Segundo Janz e outros (2003), existem diferentes métodos para a refrigeração da parede do cadinho. Um método antigo ainda muito utilizado é a refrigeração por chuveiros (spray) na carcaça externa, pois possui uma boa eficiência na refrigeração, mas possui uma desvantagem, pois forma-se um filme isolante na carcaça do cadinho. Para eliminar esse filme isolante, a refrigeração por jaquetas foi desenvolvida, melhorando a troca térmica por manter constante a qualidade e a vazão de água. De qualquer modo em ambos os métodos de refrigeração, o calor precisa atravessar a carcaça do cadinho, a qual influencia a eficiência da refrigeração. Existem outros métodos de refrigeração do cadinho por meio de placas internas à carcaça, empregando stave coolers, que podem ser feitos de ferro fundido ou de cobre:

- Refrigeração do cadinho por stave de ferro fundido: desde 1970 os staves de ferro fundido têm sido instalados na área do cadinho e tem gerado bons resultados. Eles são capazes de refrigerar os blocos de trabalho do cadinho a um nível tal que longas campanhas, de muitos anos do forno, foram possíveis, mesmo com um pouco de espessura remanescente da parede. De qualquer modo, staves de ferro fundido são incapazes de eliminar a principal ameaça no fim da campanha, normalmente uma ruptura do cadinho. Quando no contato direto com metal líquido o stave de ferro não é capaz de extrair calor como necessário, acarretando então o derretimento do mesmo.

- Refrigeração do cadinho por stave de cobre: em uma outra direção, cálculos e experimentos envolvendo staves de cobre têm demonstrado que o metal líquido se solidifica assim que alcança a superfície do cobre, evitando-se assim o derretimento. Isto também poderia ser demonstrado durante uma operação real de um alto forno a qual forneceria dados substanciais para a instalação destes no cadinho.

Os dispositivos de refrigeração podem ser vistos nas Figura 3.21.

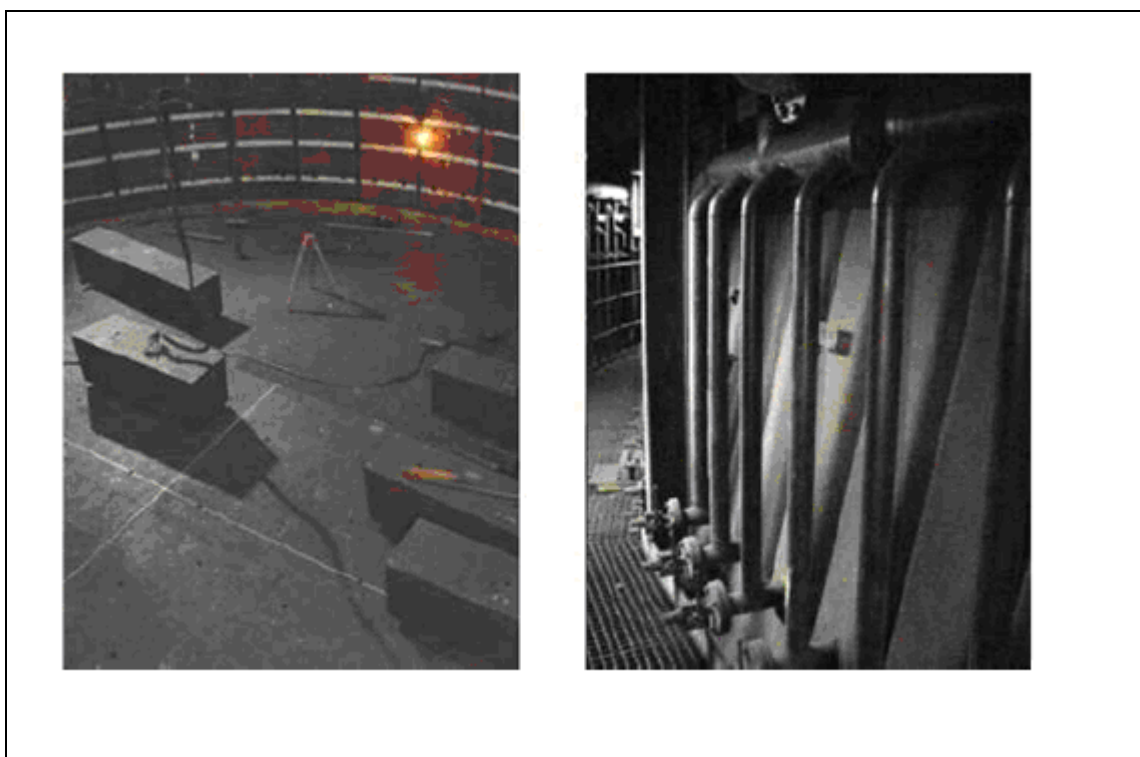


Figura 3.21 – Sistemas de refrigeração por staves (à esquerda) e por jaquetas (à direita) segundo Duarte e Fernandes (2006).

O sistema de água de refrigeração pode ser de circuito aberto ou fechado; este último utiliza água tratada, isto é, demineralizada e desgaseificada, que é resfriada em trocadores de calor (ARAÚJO, 1997).

O fundo do cadinho pode ser resfriado com ar mediante a um duto central, que distribui para vários canais radiais, ou por uma serpentina com circulação de modo a manter a temperatura dos tijolos abaixo de 400°C (ARAÚJO, 1997), mas o estado da arte é a refrigeração com tubos de água abaixo do “bottom plate”. Alguns altos-fornos adotam a separação dos tubos em setores, de modo a refrigerar de forma individualizada regiões diferentes do forno de acordo com as indicações dos termopares dos blocos de carbono (JANZ et al., 2003).

3.4 - Projetos de cadinho

Janz e outros (2003) dizem que fundamentalmente existem duas filosofias de projetos de cadinho: a primeira é a solução térmica que é caracterizada pelo refratário de carbono e/ou grafite com alta condutividade térmica; a outra é a solução refratária que é uma evolução do projeto de cadinhos com blocos de carbono onde uma camada de tijolos cerâmicos na base protege o fundo e reduz a perda de calor:

- Solução térmica: Durante duas décadas foram observados os benefícios obtidos com o desenvolvimento do bloco de carbono microporo e o supermicroporo. A experiência exemplificada pela Corus-Scunthorpe Works, onde foram usados blocos de carbono microporo com alta condutividade na parede lateral do cadinho e no fundo, sugere trabalhar com uma camada solidificada de proteção, a qual impede o contato do gusa líquido com os blocos de carbono evitando o desgaste. A espessura desta camada solidificada é determinada pelo equilíbrio entre as condições destrutivas do interior do cadinho e a eficiência do sistema de refrigeração.
- Solução refratária: a vantagem da solução refratária é o menor consumo de energia – os blocos de carbono de alta condutividade favorecem altos fluxos de calor, que aumentam as perdas térmicas e o consumo de energia do processo. Com a solução refratária é menor a possibilidade de formação de uma camada

solidificada, o que expõe o material ao desgaste. Porém, já há casos, como o de um alto-forno na Alemanha, com diâmetro de cadinho de 14,9 metros, que ainda mantém o revestimento cerâmico (camada cerâmica sobre a base e a parede) após 20 milhões de toneladas produzidas, segundo Janz e outros (2003).

É muito importante o perfeito dimensionamento dos refratários na região do cadinho. Em altos-fornos a coque são usados blocos de carbono com resistência à dissolução pelo gusa, baixo tamanho de poros para evitar a penetração do gusa e alta condutividade térmica para permitir a extração de calor. Uma adequada inclinação da carcaça permite ganhos adicionais na espessura do bloco de carbono. A introdução da técnica de proteção da parede do cadinho com o uso de “*ceramic cup*” e da soleira com o uso de óxidos cerâmicos refratários tem influência européia. O intuito é também obter um desgaste homogêneo do revestimento, sem que haja a formação do desgaste tipo pé de elefante na região de confluência entre o fundo e a parede (Figura 3.22). O “*ceramic cup*” promove uma proteção adicional aos blocos de carbonos no início da campanha.

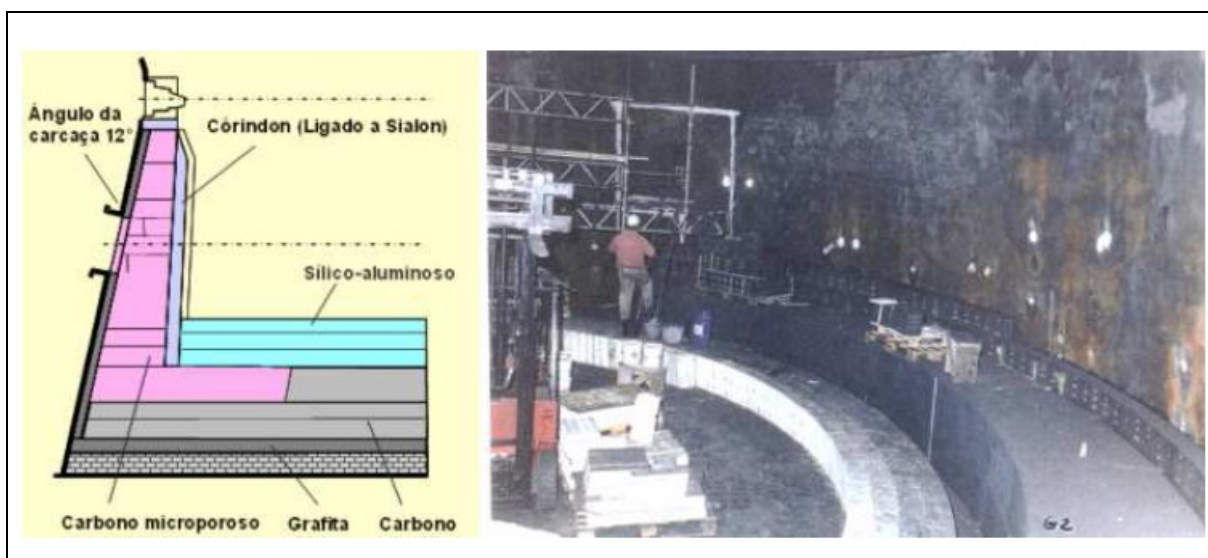


Figura 3.22 – Projeto Refratário de altos fornos a Coque segundo Duarte e Fernandes (2006).

A tabela a seguir mostra a solicitações que devem ser consideradas aos refratários de um cadinho.

Propriedades	Furo de Corrida	"Ceramic Cup"	Parede e Sola	Sub-Sola	"Back-up"
Solicitações	Choque térmico + Gusa +++ Escória +++ Álcalis +	Gusa +++ Escória +++	Escória +++ Gusa +++ Álcalis +	Proteção +	Gases ++
Refrigeração	"spray"				
Refratário	Aluminoso	Sílico-Aluminoso	Al ₂ O ₃ -SiC-C	Sílico-Aluminoso	Al ₂ O ₃ -SiC-C
Análise química (%)					
Al ₂ O ₃	94,1	47,0	75,0	47,0	47,5
SiO ₂	5,3	47,0		47,0	
SiC			7,0		30,0
C			13,0		10,0
Fe ₂ O ₃	0,1	1,2		1,2	
MEA (g/cm ³)	3,23	2,40	3,14	2,40	1,70
PA (%)	13,9	13,0	0,5	13,0	
RCTA (MPa)	127,0	70,0	110,0	70,0	40 (110°C)
DTRL até 1.000°C (%)	0,58	0,50	0,46	0,50	
até 1.400°C (%)	0,78	0,70	0,65	0,70	
VLDR a 1.600°C x 5h (%)	0,0	-0,3		-0,3	
CPE (Orton)	>38 (1.835°C)	34 (1.785°C)		35 (1.785°C)	
Creep 50h x 0,2MPa	0,2% (1450°C)	< 1,0% (1350°C)		< 1, 0% (1350°C)	
Permeabilidade (cD)		39,0	4,0	39,0	8,0
Condutividade térmica (W/mK) a 1000°C	2,4	1,4	8,5	1,4	3,5

Tabela 3.4 – Refratários usados em projetos de altos fornos a coque segundo Duarte e Fernandes (2006).

Como já mencionado, o aumento da capacidade de refrigeração dos refratários do cadinho tem desempenhado um importante papel na estabilidade da camada solidificada. O aumento da condutividade térmica e a redução do tamanho dos poros dos blocos de carbono têm se mostrado efetivo no prolongamento da vida do cadinho. Blocos de carbono com alta resistência ao ataque pelo gusa e alta condutividade térmica estão sendo usados (Figura 3.23). O método de fabricação usado para cada bloco de carbono evoluiu ao longo do tempo. A introdução da técnica de uso de água refrigerada nos "staves" do cadinho deve propiciar uma extensão ainda maior da vida desta região.

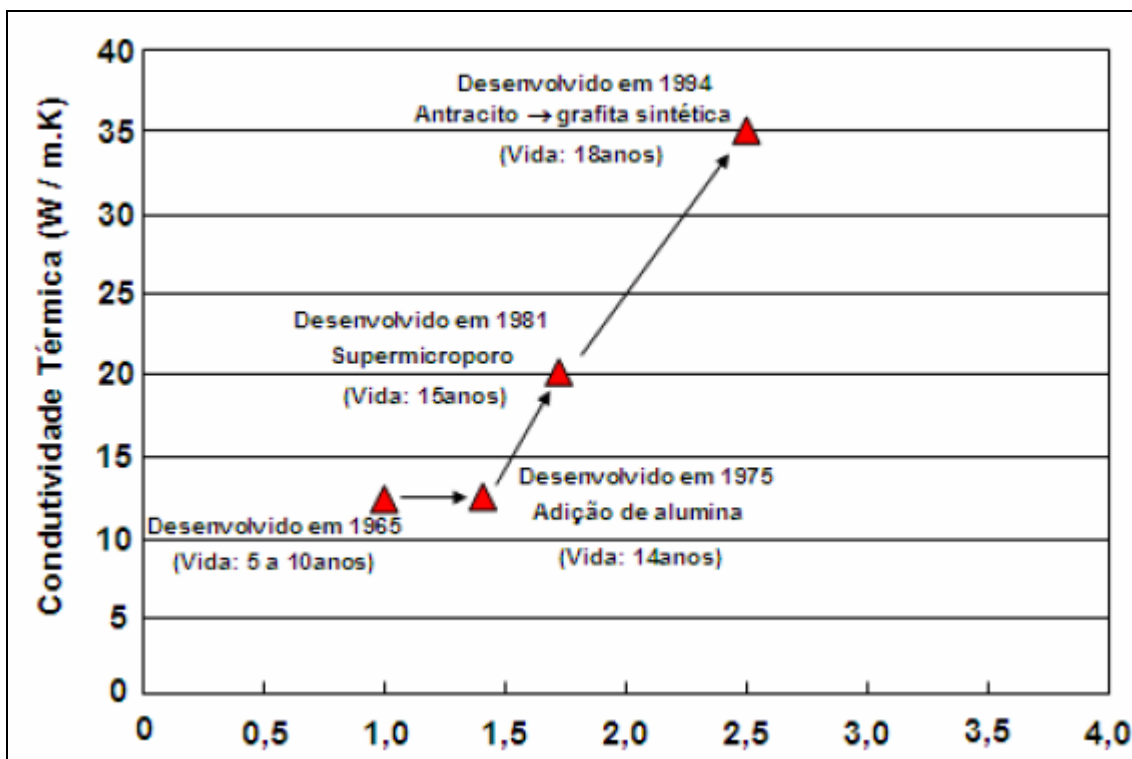


Figura 3.23 – Índice de Resistência a Solubilidade de Blocos de Carbono. Segundo Duarte e Fernandes (2006).

Outra importante variável de projeto é o chamado "sump volume" (figura 3.24), que é determinado pelo espaço compreendido imediatamente abaixo do furo de gusa. O aumento do nível de gusa líquido retido no cadinho do alto-forno decresce as velocidades do fluxo periférico na parede do cadinho, resultando em maior vida útil do mesmo. Nos últimos anos, tem-se observado uma tendência natural de elevação do "sump ratio" a cerca de 20% do diâmetro do cadinho de modo a promover este aumento do nível de líquido (JAMENSON & GORNDON - 1999).

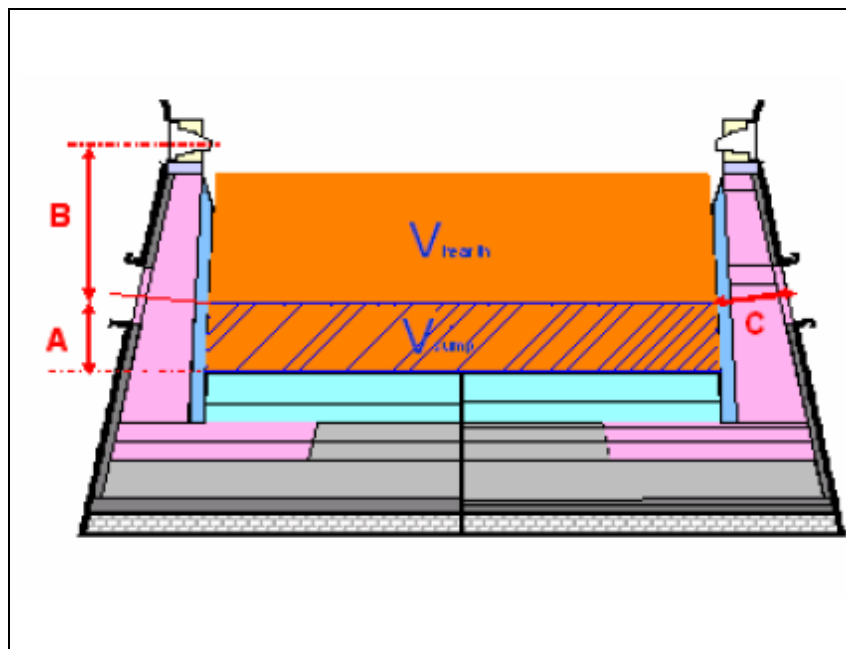


Figura 3.24 – “sump volume” segundo Duarte e Fernandes (2006).

3.5 - Desgaste do cadinho

Segundo Koliijn et alli (2001), os refratários do cadinho estão expostos aos seguintes mecanismos de ataque:

- físicos: erosão, dissolução, penetração de metal líquido;
- químicos: ataque por álcalis e zinco, oxidação, deposição de carbono;
- termomecânicos: trincas por stress térmico, lascamento (*spalling*).

Alguns destes fenômenos são imediatos, outros levam certo tempo para se manifestarem. Por exemplo, a oxidação causada por vazamento em elementos de refrigeração pode causar grande desgaste em algumas horas ou dias, enquanto o ataque pelo zinco e álcalis somente aparecem após vários anos. A temperatura influencia também no processo de desgaste, existem ataques que ocorrem somente sob um valor específico, outros somente sob uma faixa de temperatura, alguns iniciam com um nível relativamente baixo e tornam-se mais intensos com o aumento da temperatura.

Silva (2000) estudou o post mortem do cadinho dos Altos Fornos # 2 e 3 da Companhia Siderúrgica Nacional, os mesmos revelaram um perfil de desgaste ilustrado conforme Figura 3.25, pode ser observada a existência de 6 camadas distintas, da face quente para a face fria, que são as seguintes:

- Camada perdida (desgastada): os blocos de carbono foram erodidos e dissolvidos pelo gusa líquido.
- Camada de proteção: cascão de baixa condutividade térmica, depositado na face quente do bloco de carbono.
- Camada penetrada pelo gusa: os poros dos blocos de carbono foram penetrados pelo gusa líquido.
- Zona frágil: os blocos de carbono foram desintegrados.
- Camada levemente alterada: os blocos de carbono tiveram as suas propriedades físico-químicas ligeiramente alteradas.
- Camada inalterada: os blocos de carbono preservaram as suas propriedades físico-químicas originais.

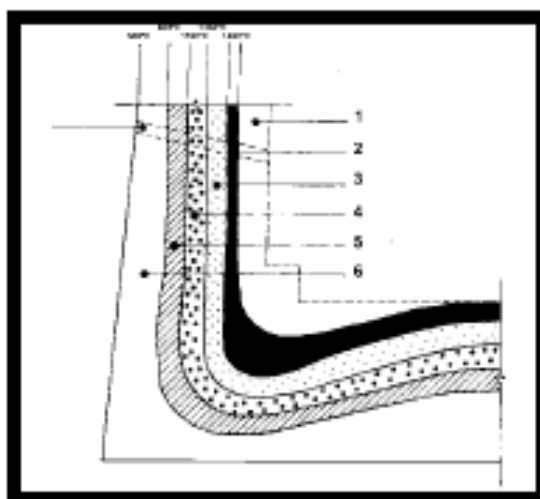


Figura 3.25 – Perfil de Desgaste do cadinho de Alto-forno, segundo Silva e outros (2000).

O estudo do desgaste dos refratários do cadinho compreende a dissecação de altos fornos após a parada para reforma, isto é após o “blown-out”, permitindo a investigação dos perfis de desgaste e a condição de deterioração dos refratários (SHINOTAKE et al., 2003).

É consenso que o desgaste do revestimento refratário do cadinho é o principal motivo de encerramento da campanha dos altos-fornos. Este fator foi acentuado nos últimos anos, devido à necessidade de aumento de produtividade, que leva a uma maior velocidade do fluxo de líquidos no cadinho, e as altas taxas de injeção de finos de carvão com redução da permeabilidade do “homem morto” aumentando o seu tamanho, resultando em um fluxo de gusa mais turbulento, acelerando ainda mais o desgaste do revestimento e a ocorrência de “zonas frágeis” que se originam no interior das paredes refratárias de carbono (SILVA et al., 2000).

Diferentemente da região da cuba do forno, onde o desgaste pode ser controlado por medidas de distribuição de carga e seleção das matérias-primas, o desgaste do cadinho parece ser determinado pela produtividade. Então, o projeto do cadinho e os materiais de revestimento interno tornam-se fatores importantes na campanha do alto-forno (FUJIHARA et al., 2005).

O fluxo de gusa varia de acordo com a geometria do reator (por exemplo, forma de fundo do cadinho e posições do furo de gusa), condições operacionais do alto-forno (por exemplo, método de uso dos furos de gusa), a condição de carregamento, (matérias-primas enforadas, distribuição dos materiais no topo que irão determinar o formato da zona coesiva) e por fim, da manutenção ou flutuação da estabilidade operacional.

A figura 3.26 ilustra três regiões distintas de desgaste do cadinho do alto forno, sendo que a zona intermediária III apresentando-se mais fraca do que a regiões ais próximas da face fria do revestimento do cadinho (zonas I e II).



Figura 3.26 – Vista do estado de desgaste da parede do cadinho, FRASER e outros.(2004)

Na década de 80 surgiram novas idéias sobre o mecanismo de desgaste do cadinho. A idéia mais aceita se refere ao desgaste da parede do cadinho como função do fluxo periférico de líquidos provocando um desgaste tipo pata de elefante (do termo “elephant foot”), conforme pode ser visto na figura 3.27. Logo, para minimizar o desgaste da parede do cadinho busca-se manter um fluxo central de líquidos através do homem-morto (Fujihara e outros - 2005).



Figura 3.27 – Desgaste tipo pata de elefante no revestimento dos blocos de carbono encontrado no alto forno # 7 de ISPAT Inland's segundo Bobek e outros (2004).

Além do desgaste tipo pata de elefante, Koliijn e outros (2001) avaliam também outro formato comum de desgaste em cadinhos de altos-fornos, chamado de formato arredondado e os mostra conforme figura 3.28. Os dois tipos têm causas diferentes, o primeiro ocorre quando se opera com baixa permeabilidade no homem morto, por baixa qualidade de coque ou por injeção de carvão em taxas inadequadas à qualidade do coque, situação típica de elevação de produção. O desgaste arredondado ocorre quando há boa permeabilidade do homem morto ou quando o diâmetro do cadinho é suficientemente pequeno e as demais condições favoráveis para que o homem morto flutue.

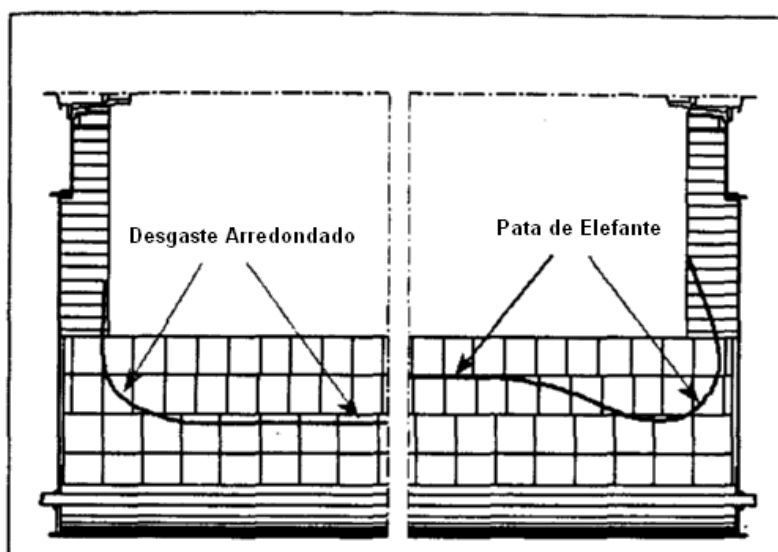


Figura 3.28 - Tipos de desgaste típicos de cadinho conforme Koliijn e outros (2001)

3.5.1 – Comprimento do furo de gusa

Conforme TORRKULLA e SAXÉN (2000), a formação de cascão ou a erosão na parede são, em muitos casos, determinados pelas condições do fluxo no cadinho, e a prática de vazamentos afeta claramente as condições de cadinho. Por isto é desejável manter, sempre que possível, um longo furo de gusa para mover a região com taxas de fluxo longe do furo de gusa. A prática de vazamento provavelmente é

o modo mais rápido e mais eficiente para controlar o estado do fundo do cadinho por causa de seu efeito imediato nas condições de fluxo. Infelizmente, a duração dos períodos de fechamento e aberturas dos furos de gusa é na prática determinadas por fatores, como a qualidade da massa de furo de gusa, a viscosidade e composição química da escória, e até mesmo em logísticas de potes ou transporte de carro de torpedo nas indústrias metalúrgicas.

ZHAO e outros (1999) comentam sobre a importância de um bom entendimento a respeito do comprimento apresentado pelo furo de gusa. Um furo de gusa mais longo drena o líquido da parte mais interna do cadinho e o fluxo periférico ao longo da parede do cadinho diminui. É fácil entender que uma perda de massa caracterizada por um furo de gusa de tamanho menor aumentaria a carga de calor para o revestimento refratário e exporia este a um ataque físico ou químico. ZHAO e outros (1999) descrevem que as seguintes contramedidas podem ser adotadas quando um furo de gusa está menor do que o desejado:

- Melhoria na prática de fechamento do furo de gusa;
- Correção de problemas no equipamento de fechamento de furo de gusa;
- Melhoria na qualidade da massa de fechamento;
- Redução do volume de sopro prioritariamente ao fechamento do furo de gusa;
- Fechamento de ventaneiras (ou redução no diâmetro das mesmas) sobre o furo de gusa;
- Verificação de entradas de água.

Outro ponto importante que deve ser mencionado é como o desgaste apresenta-se na região do furo de gusa. YAN e outros (2004) estudaram sobre a temperatura para as seções vertical e horizontal do furo de corrida. As distribuições de temperatura correspondem bem a distribuição de velocidades do gusa líquido. A figura 3.29 mostra a distribuição de temperatura do gusa líquido no cadinho do alto-forno N^o 13 da US Steel, nas seções vertical e horizontal do furo de corrida e a distribuição de erosão na região ao lado do furo de corrida devido as maiores

velocidades do gusa líquido que estão associadas as maiores temperaturas. Segundo YAN e outros (2004) com distribuição de temperatura pode-se obter que o perfil de erosão na linha de 1150°C.

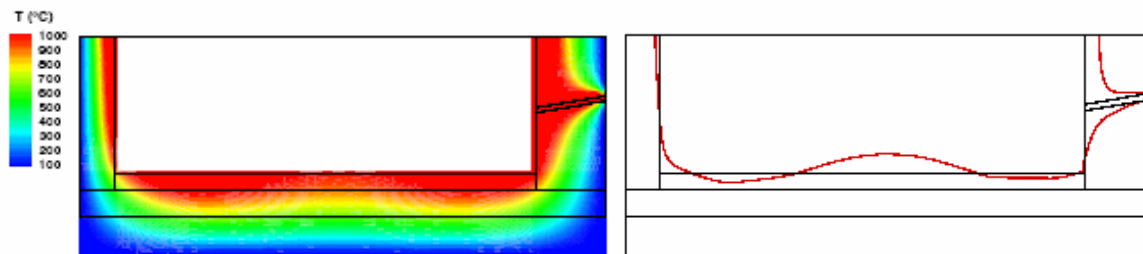


Figura 3.29 – Contornos de temperatura (a esquerda) e perfil de desgaste (a direita) do cadinho do alto-forno No 7 da US Steel, YAN e outros.(2004)

ZHOU e outros (2005) estudaram sobre o comprimento do furo de gusa, comparando a inexistência e a existência do cogumelo (em 1, 0 e 1,5m de raio). Observa-se na figura 3.30 que com o aumento do tamanho da proteção a velocidade periférica do fluxo de gusa líquido muda, afastando-se para o interior do cadinho, que segundo ZHOU e outros (2005), diminui intensidade de desgaste da parede lateral do cadinho junto ao furo de corrida. Sob o ponto de vista de distribuição de temperaturas, um aumento no volume o cogumelo resulta em afastamento das linhas de maiores temperaturas da carcaça, conforme figura 3.31, menores fluxos periféricos de gusa líquido e de escória, resultando em menores intensidades de desgaste do cadinho (ZHOU e outros 2005).

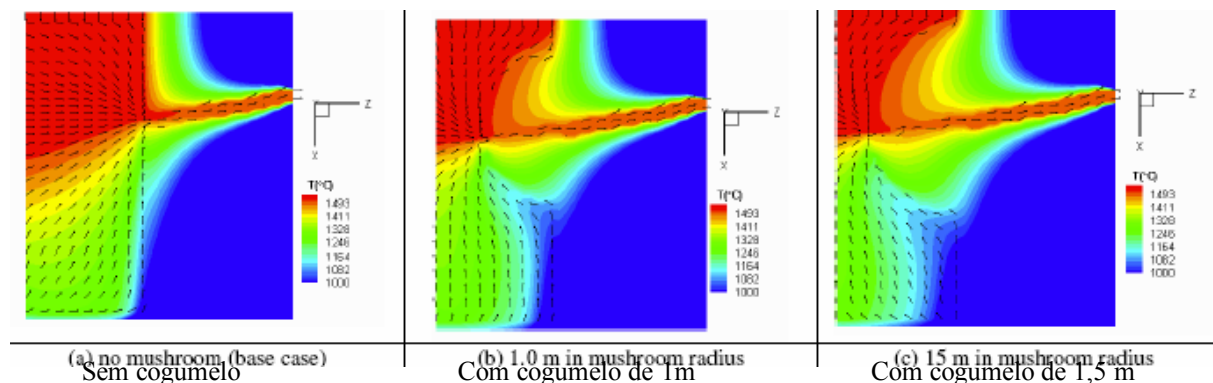


Figura 3.30 – Efeito do cogumelo sobre a distribuição de temperatura no cadinho perto da região lateral do furo de corrida (corte transversal), ZHOU e outros(2005).

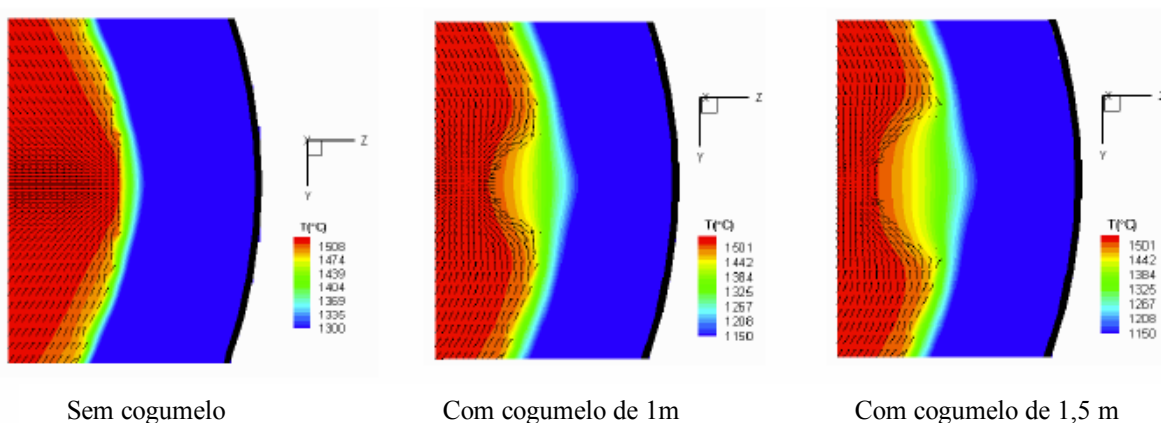


Figura 3.31 - Efeito do cogumelo sobre a distribuição de temperatura no cadinho perto da região frontal do furo de corrida (corte longitudinal), ZHOU e outros (2005).

3.5.2 – Ataque de zinco e/ou álcalis

De acordo com EL-GEASSY e outros (1986), o conteúdo do zinco é muito pequeno no minério de ferro natural, mas com sua baixa temperatura de redução e baixo ponto de ebulição, é quase impossível para a escória e o metal quente absorver o zinco líquido, que é facilmente concentrado no alto-forno. Sendo assim, o ataque do zinco no cadinho não pode ser ignorado. O zinco encontra-se na forma de óxido junto com a ferrita ($ZnO.Fe_2O_3$), e silicato ($2ZnO.SiO_2$) ou na forma de Sulfeto (ZnS). O sulfeto pode ser transformado em um complicado óxido que pode ser reduzido pelo CO como zinco gasoso em uma zona de alta temperatura ($>1000^\circ C$). O vapor de zinco, que tem ponto de ebulição em $907^\circ C$, sobe com o gás de dentro do forno, alcança uma área de baixa temperatura ($580^\circ C$) e re-oxida. Os finos re-oxidados do óxido de zinco entram novamente na zona de alta temperatura unindo-se as cargas descendentes, este ciclo conduz a uma concentração de zinco. Se o vapor de zinco em recirculação penetrar no revestimento do cadinho, o revestimento do refratário poderá se expandir e tornar-se frágil. Aproximadamente, 85% do zinco no alto forno provém do minério sinterizado, sendo então crítico o controle do nível de zinco do material que será consumido para a produção de gusa. Além do zinco o ataque pelos álcalis no revestimento do refratário do cadinho reduz a sua vida útil.

BOBEK e outros (2004) apresentam um exemplo de ataque por álcalis e zinco, nos tijolos de carbono do alto-forno #7 de ISPAT Inland's. Baseado na análise do cascão da parede lateral dos tijolos foi possível identificar os danos apresentados por álcalis e zinco, de acordo com a alta concentração destes materiais (figura 3.32). Também foram encontrados depósitos de zinco na interface desses tijolos na área, a maioria dos depósitos estava nas interfaces próximas à carcaça.

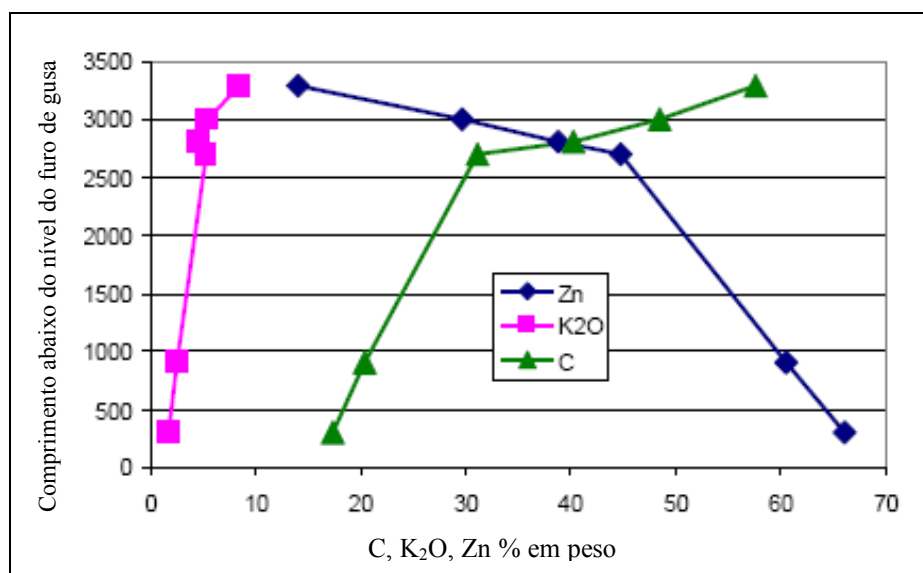


Figura 3.32 – A distribuição da composição do cascão da parede lateral no alto-forno #7 de ISPAT Inland's, Bobek e outros (2004).

3.5.3 – Qualidade do coque

Kolijn e outros (2001) citam os estudos conduzidos em ArcelorMittal Sollac, que mostraram a relação entre o CSR (índice que mede a resistência do coque sob reação) e a degradação do coque dentro do alto-forno, conforme a figura 3.33. A qualidade do coque não somente influencia a estabilidade operacional do alto forno e a permeabilidade da carga, mas também tem uma forte influência na parte inferior do forno na permeabilidade do homem morto e no funcionamento do cadinho. A deterioração do coque na parte inferior do forno tem uma direta influência na permeabilidade de todo o alto-forno.

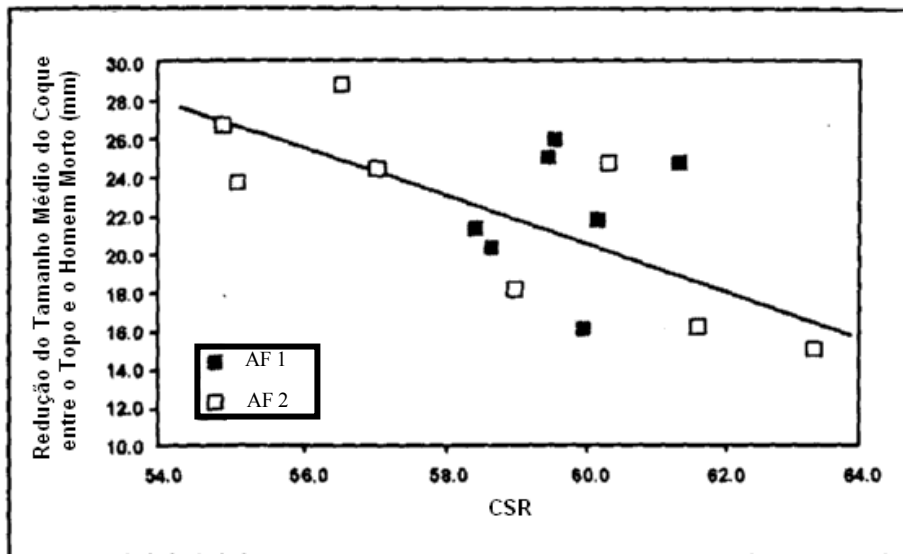


Figura 3.33 – Relação entre a queda no tamanho médio do coque entre o topo e o homem morto, e o CSR do coque nos altos-fornos 1 e 2 de ArcelorMittal Sollac, Kolijn e outros (2001).

Kolijn e outros (2001) reuniram evidências das relações entre qualidade do coque e tamanho do coque no cadinho. Um estudo citado por ele é o da Nippon Steel, empresa japonesa, que encontrou uma relação entre o tamanho do coque enornado e o tamanho do coque no homem morto, de acordo com a figura 3.34.

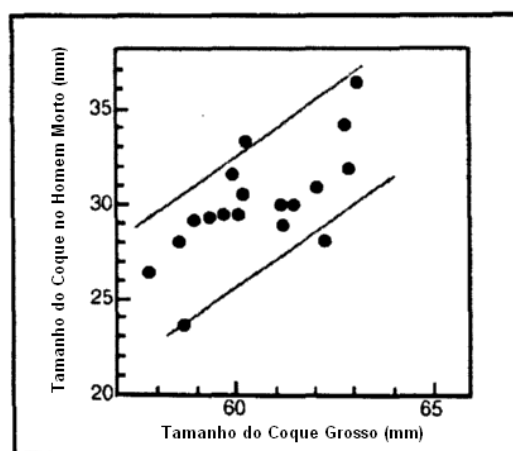


Figura 3.34 – Relação entre o tamanho do coque enornado e o tamanho do coque no homem morto, Nippon Stell, Kolijn e outros (2001).

3.5.4 – Ataque térmico

MIYAMOTO e outros (1981) descrevem que os refratários do cadinho de altos fornos são restringidos pela carcaça metálica, só que eles são mais ou menos sujeitos ao estresse térmico pelo aumento de temperatura no início da campanha e mudanças de temperatura durante a operação. Direção e grau de estresse dependem do tipo de refratários, construção do revestimento e das condições operacionais. Se a tensão ou compressão excede a resistência, isto levará ao início de trincas e falhas nos refratários.

Conforme QING e outros (2005) mencionam, pensava-se anteriormente que, somente a exposição do revestimento do cadinho ao metal quente em temperaturas elevadas de 1150°C (esta é a temperatura do eutético do carbono saturado no ferro) poderia ocorrer penetração do metal e o desgaste do revestimento. Entretanto, se a expansão térmica do revestimento não puder ser acomodada corretamente, na temperatura média de 500°C, grandes blocos trincarão devido ao estresse térmico. O desgaste por estresse térmico pode causar perdas rápidas no revestimento do cadinho. O refratário de carbono exposto sob metal quente insaturado, perde alguns centímetros por semana devido ao desgaste. Assim é de suma importância a refrigeração dos materiais refratários. Todas as aberturas dos blocos e das junções devem ser preenchidas com cimentos de elevadas condutividades térmicas durante a construção, a fim de certificar-se do máximo de contato entre os blocos.

Huang e outros (2007) comentam que em uma simulação de fluxo líquido dentro do cadinho a velocidade do metal quente é de apenas alguns milímetros por segundo e é inferior a 5 mm/s em uma região de até 2 metros de distância do furo de gusa. Essa velocidade lenta não poderia ser suficiente para gerar um stress térmico para desgastar o revestimento do cadinho. A alta velocidade do metal quente acelera a erosão da região do furo de gusa. A distribuição da velocidade do metal quente também não correspondeu ao padrão de desgaste referido tipo pata de elefante. A

distribuição do estresse térmico que causa desgaste tipo pata de elefante são observadas em muitos altos-fornos que não têm refrigeração suficiente nas paredes laterais. Ainda segundo Huang, o elevado estresse térmico no interior do furo de gusa também é a principal razão das flutuações no comprimento do furo de gusa. Com base nestas informações, Huang e outros (2007), relatam que, exceto no caso da erosão na região do furo de gusa, a força de cisalhamento dos fluxos de metal quente poderia não ser a principal razão para o desgaste do cadinho. A principal razão deve ser o estresse térmico e à dissolução de carbono pelos metais quentes. As linhas de fluxo dos metais quentes linhas mostrada na figura 3.35 (linhas verdes), mostram que o metal quente no cadinho é renovado durante sua drenagem, é sabido que o metal quente não tem carbono saturado. Considerando que o coque não alcance a parte inferior do cadinho, devido à uma força de flutuabilidade, tendo assim um caso de homem morto flutuante, o metal quente produzido recentemente irá dissolver mais carbono a partir do revestimento de carbono, pois não há coque presente, desgastando assim o canto e/ou a parte do fundo do cadinho.

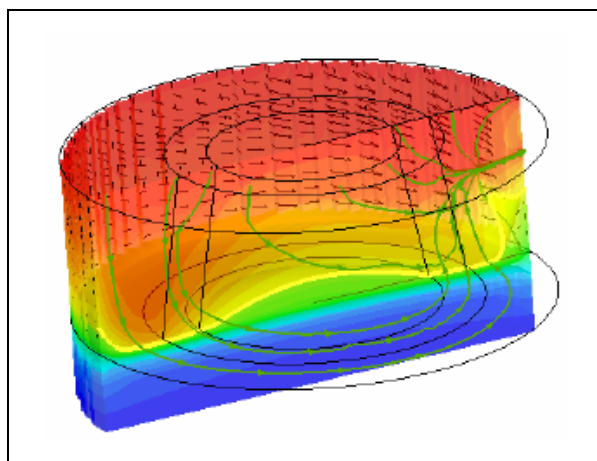


Figura 3.35 – Linhas de fluxo e de temperatura no cadinho, Huang e outros (2007).

3.6 – Alternativas para controle do desgaste no cadinho

Kolijn e outros (2001) relacionam a extensão da campanha do cadinho a alguns pontos operacionais. O primeiro deles é a prática de esgotamento, manter um ciclo de corridas que propicie ao cadinho a melhor retirada de material possível. Outro tópico é a elevada qualidade do coque (melhora de resistência, tamanho e estabilidade). É destacado também um bom sistema de detecção de vazamentos de água, excelente refrigeração na região do furo de gusa, fechamento seletivo de ventaneiras, ajustes de diâmetros de ventaneiras e uso de ilmenita, estes quatro últimos mais no sentido de atuar já quando o desgaste está mais crítico.

Segundo Fujihara e outros (2005), o controle das matérias-primas, dos equipamentos e da instrumentação, quando somados ao controle da permeabilidade gasosa (associada à distribuição de carga) e a estabilidade operacional, levam a uma campanha longa do cadinho e por consequência do alto-forno.

O trabalho de Upadhyay e outros (2002) citam que algumas ações foram tomadas para evitar o desgaste dos refratários do alto-forno “G” na companhia Tata Steel:

- Carregamento de coque com tamanho maior do que 44 milímetros, na taxa de 120 kg/t exclusivamente no centro, para aumentar a porosidade da do homem morto, a fim de que o líquido nos furos de gusa flua através da cama e não circunferencialmente, atacando assim a parede.
- Longos comprimentos de furos de gusa (> 2,7 m) e taxa de vazamento controlado (< 3,2 toneladas/minuto) para mover o ponto de sucção do líquido para o homem morto.
- Alta resistência do coque - com CSR de 65-66 resultando em boa permeabilidade do homem morto. A temperatura do fundo do cadinho aumenta devido ao fluxo de líquido através da cama de coque.

Segundo Tomita e outros (1995), algumas contramedidas podem ser tomadas para proteção do revestimento do cadinho como segue abaixo:

- Termopares: o número de termopares na parede do cadinho pode ser aumentado para detectar temperaturas com melhor precisão;
- Sistema de refrigeração: um novo sistema de refrigeração do cadinho usando refrigerador para refrigeração com água do fundo do cadinho para estabilizar a proteção dos blocos de carbono da carga de calor provido pelo metal quente;
- Injeção de massa na parede do cadinho: Injeção de massa na parede do cadinho pode ser efetuada em cada linha para preenchimento de espaços entre os blocos de carbono. A injeção é efetiva para manter a taxa de transferência de calor e também proteger a parede da intrusão do metal quente em espaços abertos;
- Injeção de material rico em TiO_2 através das ventaneiras: para proteger a parede do cadinho localmente, é injetado material fino contendo TiO_2 através da ventaneira.

Instalação de conjuntos de HBCV (Válvulas de controle de ar quente) foi mostrado por Hur e outros (1998) e tem a finalidade de controlar o fluxo de ar quente sobre a região de alta temperatura do cadinho (figura 3.36). O efeito do fechamento da válvula pode ser visto após 3 a 5, de acordo com a Figura 3.37.

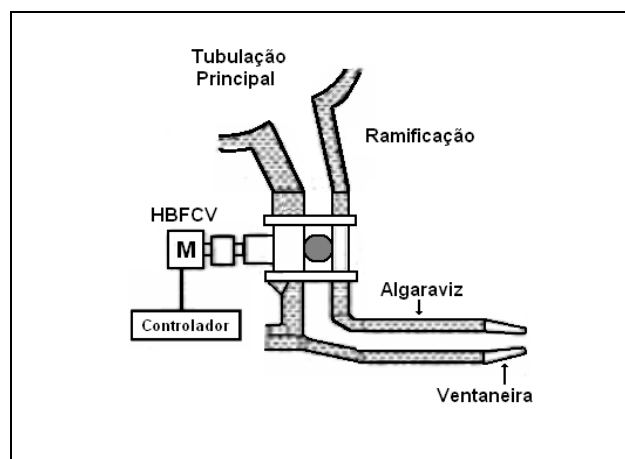


Figura 3.36 – A configuração da HBCV do alto forno nº. 1 de Kwangyang: Hur e outros (1998).

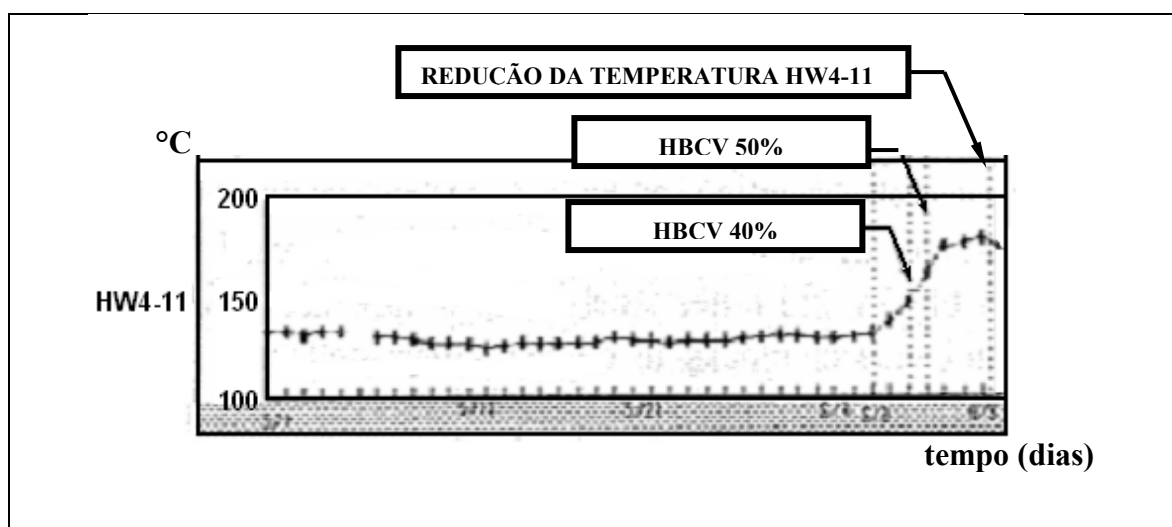


Figura 3.37 – O efeito do fechamento HBCV no alto forno nº. 1 de Kwangyang: Hur e outros (1998).

À medida que a campanha do cadinho do alto-forno avança, movimentos diferenciais entre a carcaça metálica do cadinho e o revestimento refratário podem provocar a ocorrência de vazios (*gap*) nas camadas de massa socada no revestimento de carbono (Figura 3.38). Esses vazios causam danos na transferência de calor entre o revestimento refratário (blocos de carbono) e o sistema de refrigeração e permitem a passagem de gases quentes que criam canais na camada de massa socada. Nos canais, os vazios se não fechados, aceleram a velocidade de desgaste do revestimento e podem causar o surgimento de pontos

quentes (*hot spots*). A massa carbonosa de injeção é composta de materiais grafiticos e metálicos que aglomerados formam um produto plástico na temperatura ambiente e que se solidifica por aquecimento resultando em um material de alta resistência a temperaturas elevadas. A massa é injetada sob baixa pressão, e apresenta como resultado final o preenchimento dos vazios na camada de massa socada, eliminando a passagem de gás e restabelecendo a conexão térmica entre o revestimento refratário e o sistema de refrigeração, o que resulta em um prolongamento da vida do cadinho (Miranda e outros, 2003).

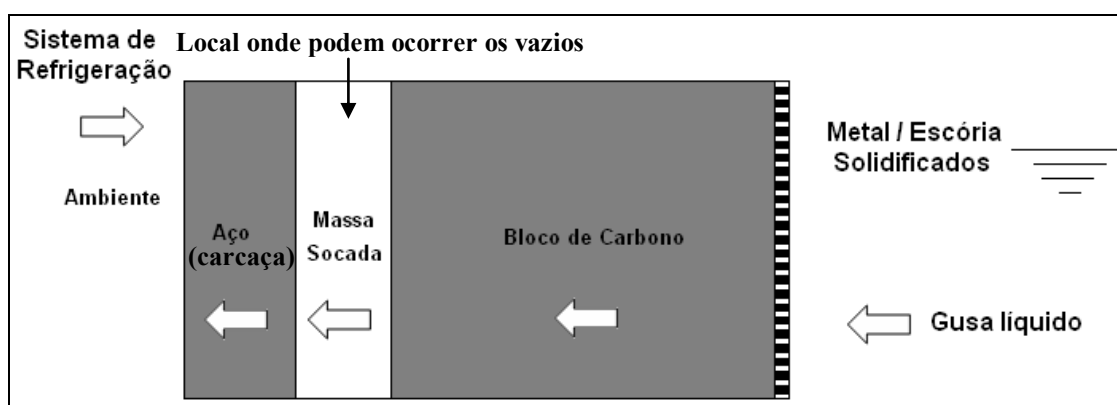


Figura 3.38 – Função da massa de injeção para grouting: Miranda e outros (2003).

Para obter os resultados esperados com a utilização da massa de injeção, as principais características que esta deve ter são as seguintes (Miranda, 2003):

- Temperatura de solidificação compatível com as temperaturas presentes nos pontos de aplicação;
- Injetabilidade: a injetabilidade da massa deve ser controlada por meio de sua viscosidade cujo ajuste se faz pela adição de aglomerante. Uma massa com alta viscosidade apresenta baixo conteúdo de aglomerante e normalmente requer alta pressão de injeção (acima de 15 kg/cm^2), o que é perigoso para a integridade do revestimento refratário que na fase final da campanha do forno apresenta espessuras remanescentes reduzidos. Por sua vez, uma massa de baixa viscosidade contém alta participação de

aglomerante e tem sua condutividade térmica reduzida porque durante o aquecimento o aglomerante será volatilizado o que provocará a formação de poros. Um grande volume de poros tem um efeito negativo sobre a condutibilidade térmica do material, logo, quanto mais viscosa, a massa tenderá a uma maior quantidade de sólidos e mais eficiente será o fechamento dos vazios presentes na camada socada. Como consequência, melhor será a transferência de calor do revestimento para o sistema de refrigeração.

- Condutividade térmica: a condutividade térmica do material deve ser a maior possível porque tem o objetivo de aperfeiçoar a transferência de calor entre o revestimento refratário do cadinho para seu sistema de resfriamento. A parte da porosidade, o grau de cristalinidade da fonte de carbono é igualmente um fator decisivo na condutividade térmica da massa de injeção.

3.7 – Modelos de controle de desgaste

No passado, a supervisão das operações de alto-forno estava baseada na monitoração de dispositivos em salas de controle central. Operadores eram obrigados a tirar conclusões sobre uma base de informações não-processadas de uma rede limitada de sensores e também baseados em experiências passadas. Porém, freqüentemente estes processos não eram bem apoiados no acesso a um banco de dados confiável, para quantificar as circunstâncias passadas pertinentes. Em tal regime, uma padronização e melhora de práticas era difícil de alcançar. Nas últimas décadas, modernos altos-fornos são então equipados com uma grande ordem de sensores e dados podem ser manipulados e recuperados quando necessário. Isto possibilitou desenvolver aplicativos que permitem visualizar tendências de variáveis do processo, imediatamente. Cálculos simples ou até mesmo modelamentos complexos podem ser executados automaticamente.

O revestimento do cadinho deteriora-se lentamente com o tempo de operação. Além desse esperado desgaste, incidentes com vazamentos de gás, ataque por água, paradas prematuras e flutuações térmicas podem causar danos intensos em áreas locais e eventualmente toda a estrutura provocando uma redução na produtividade e aumento da preocupação com a segurança. Avaliações confiáveis na qualidade e na espessura do revestimento do refratário são importantes para auxiliar a obtenção de uma campanha produtiva e longa. Extensões na campanha de um alto forno requerem controles efetivos do desgaste do cadinho. Assim, por sua vez, requer conhecimento do fluxo dos fluidos e transferência de calor no cadinho para se estimar o desgaste sob vários regimes operacionais. Modelos de transferência de calor são usados comumente para monitorar a erosão do cadinho de alto forno e a formação de cascão nas paredes do cadinho.

Técnicas computacionais têm sido amplamente utilizadas para tal propósito. Resultados têm mostrado os efeitos fortes das distribuições de líquidos e de transferência de calor sobre a longevidade do revestimento refratário do cadinho, sob diversas condições operacionais. A figura 3.39 mostra a evolução da erosão e crescimento do desgaste tipo pé-de-elefante no cadinho ao longo da campanha do alto-forno.

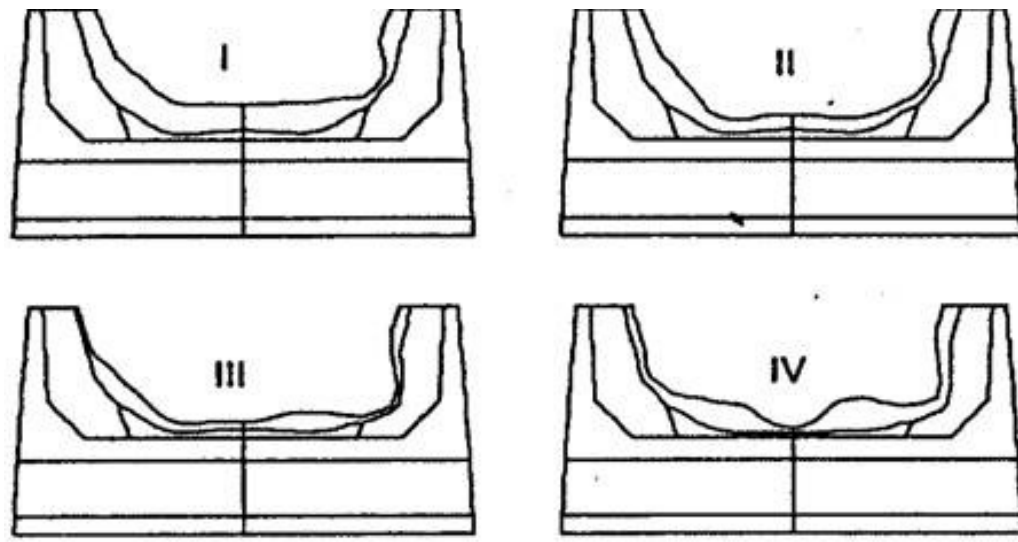


Figura 3.39 – Perfis de erosão e crescimento de acreção no cadinho por um período de 15 dias, SAXÉN & TORRKULLA (2000)

A detecção e monitoramento constante da distribuição de desgaste do cadinho constituem uma ferramenta preciosa e imprescindível para o entendimento e controle do processo de desgaste e proteção do cadinho. O método mais popular de detecção do perfil ou nível de desgaste é conduzido através de medições da distribuição de temperaturas por meio de termopares alocados em diferentes posições nas paredes do cadinho, figuras 3.40 a 3.42, fluxo de calor é associado a uma determinada espessura de refratários ou profundidade da salamandra.

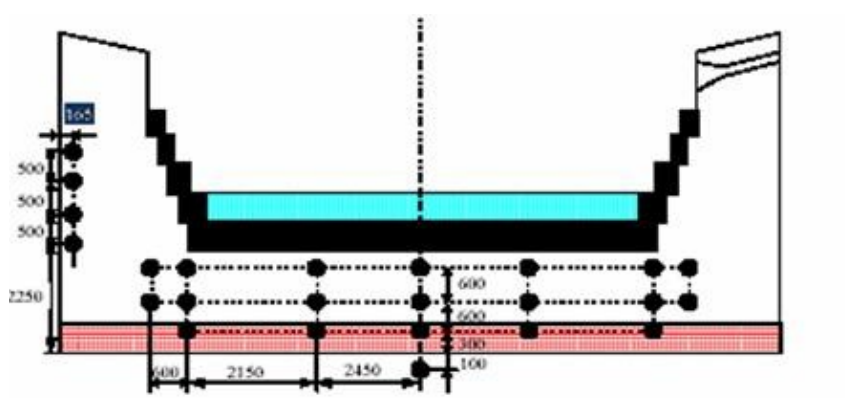


Figura 3.40 – Distribuições de termopares na parede lateral e no fundo do cadinho para monitoramento dos perfis de temperatura, PANJOVICK & TRUELOVE (1999)

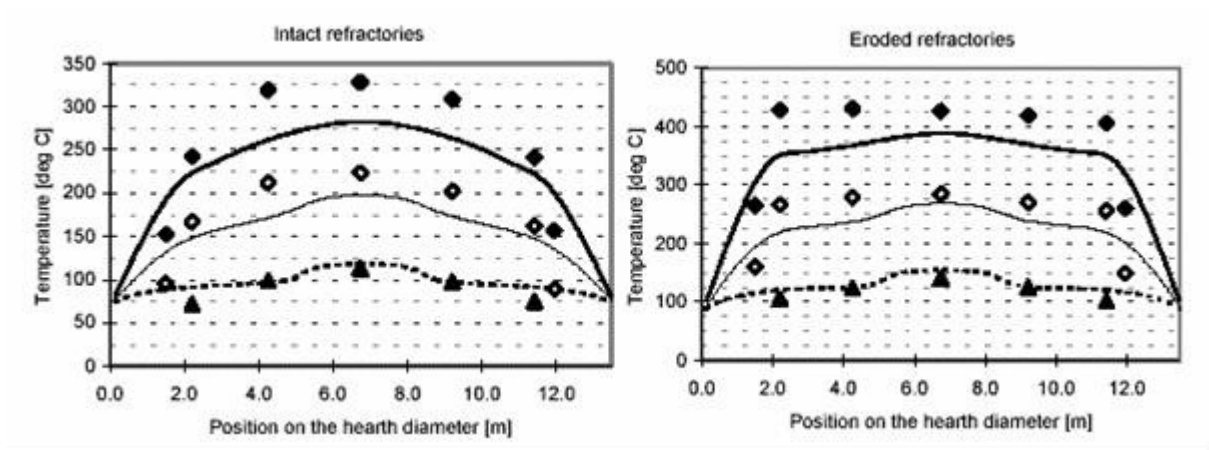


Figura 3.41 – Influência do desgaste do refratário do cadinho sobre a distribuição de temperatura no interior do cadinho, PANJOVICK & TRUELOVE(1999)

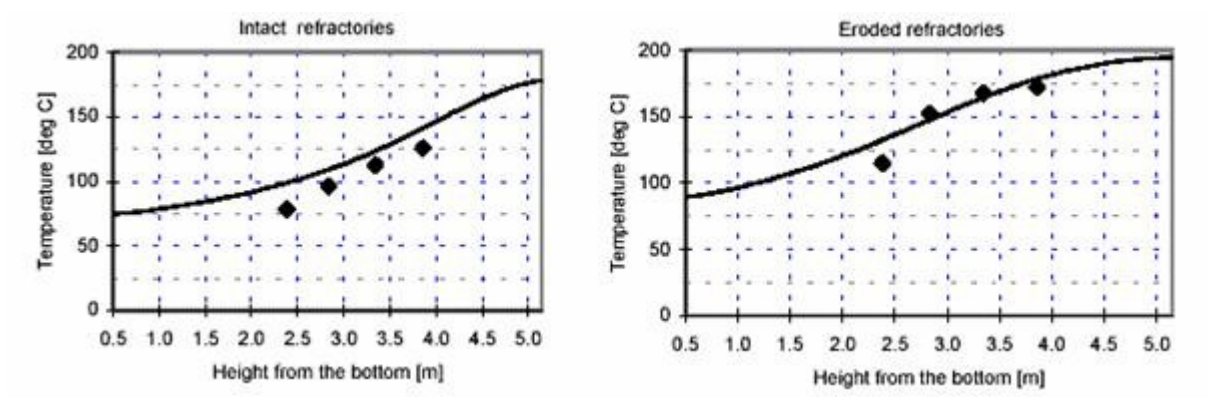
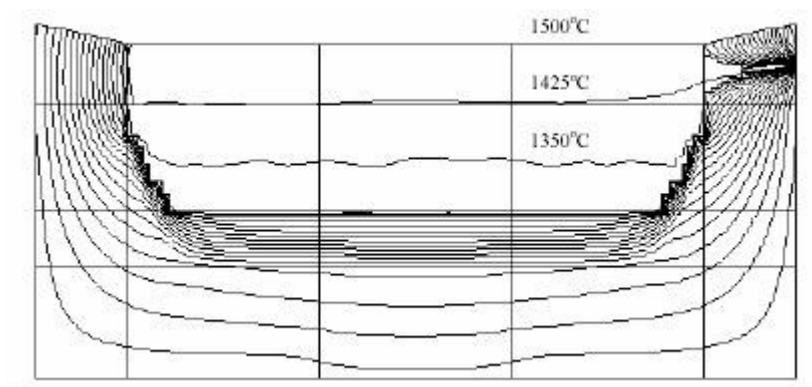
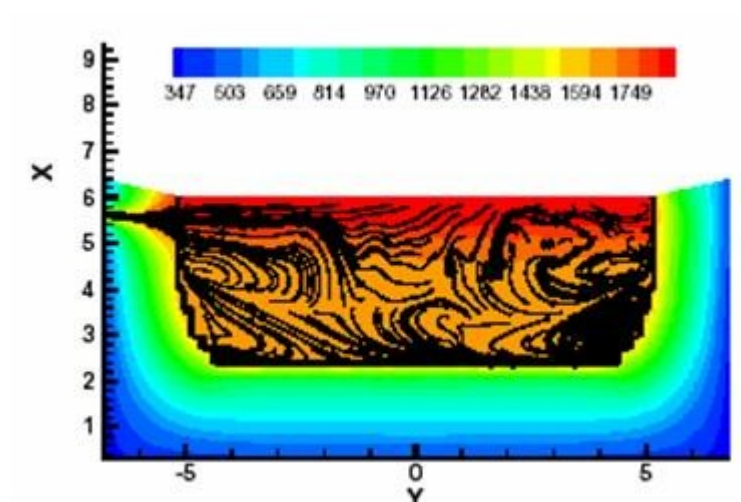


Figura 3.42 – Efeito da erosão do revestimento refratário do cadinho sobre a distribuição de temperatura no interior do cadinho, PANJOVICK & TRUELOVE(1999)

A figura 3.43 ilustra um perfil típico de temperatura no cadinho de um alto-forno, onde o revestimento refratário apresenta a integridade física original, enquanto a figura 3.44 apresenta um perfil térmico.



Figuras 3.43 – Isotermas no plano simétrico do cadiño considerando o revestimento refratário original, PANJOVICK & TRUELOVE(1999)



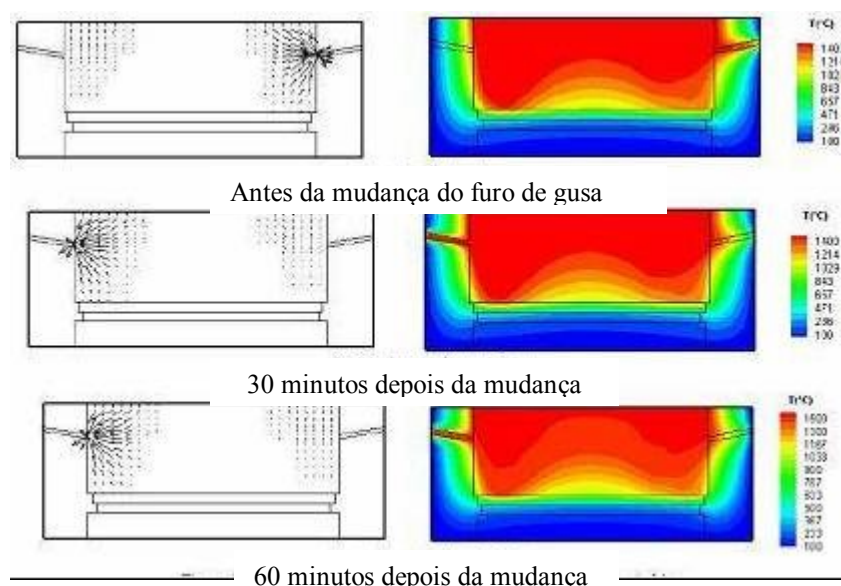
Figuras 3.44 – Distribuições típicas de temperaturas no gusa líquido e no revestimento refratário do cadiño do alto-forno, WRIGHT et al.(2003)

Várias pesquisas têm sido feitas para o entendimento dos mecanismos de desgaste. Esses mecanismos são significativamente afetados pela viscosidade e a distribuição de temperatura do ferro-gusa e a distribuição da temperatura ao longo do refratário. Então, é crítico investigar o fluxo do ferro-gusa e a transferência de calor para maximizar a vida do forno.

Recentemente, com o avanço de tecnologias de computacional, esforços foram feitos para se usar técnica CFD para elucidar as condições internas do cadiño.

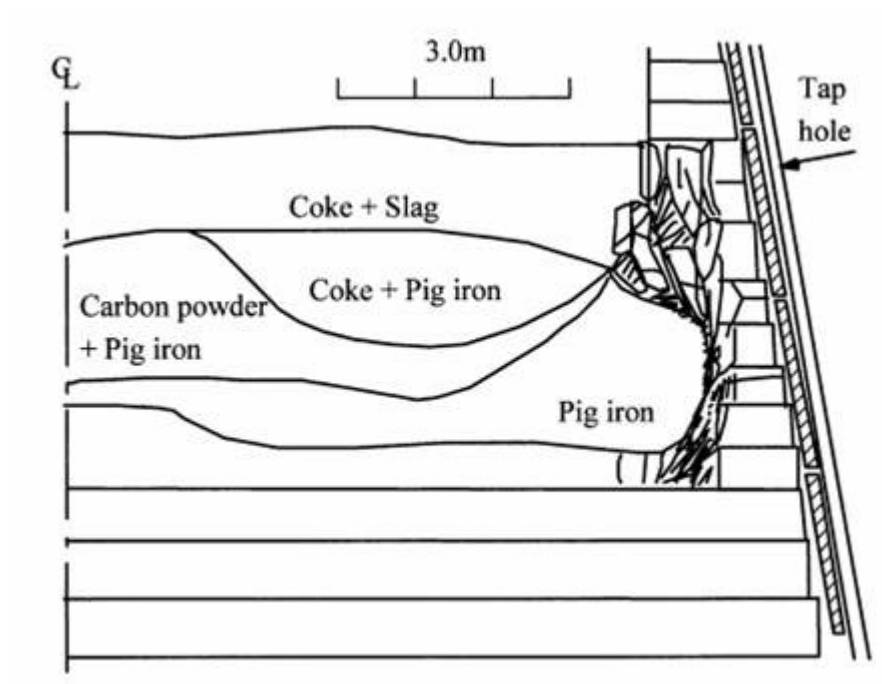
Simulações de CFD se tornaram uma ferramenta útil que pode ser usada para visualizar padrões de fluxo e investigar impactos da operação e parâmetros geométricos no desempenho de sistemas de fluxo. Estratégias para retardar a taxa de desgaste do refratário são relacionadas à condição do homem morto no cadinho, níveis refrigeração dos refratários, distribuição de fluxo, etc.

Em investigações presentes, os modelos descritos predizem o fluxo de líquidos e a transferência de calor no cadinho do alto-forno, especialmente o fluxo e a distribuição de temperatura do ferro-gusa, e as distribuições de temperatura no refratário. Estes modelos podem ser utilizados para se avaliar o desgaste do refratário do cadinho considerando fatores internos do mesmo. Por ser um modelo complexo e necessitar de grande recurso computacional, ele deve ser utilizado somente para estudos de tendência operacionais e desgaste dos refratários em períodos de médio prazo. Ele não é recomendado para acompanhamento do desgaste em curto prazo. Atualmente pode-se utilizar um software numérico CFD que resolve as equações governadas das propriedades de fluxo e com condições de contorno especificadas e condições iniciais. O fluxo é assumido como fluxo laminar 3-D. O nível do líquido é considerado constante. A Figura 3.45 apresenta o resultado de uma simulação do fluxo transiente para um alto-forno com 2 furos de gusa, esquerdo e direito. O desenho superior simula a condição do fluxo correndo pelo furo da direita, o segundo desenho mostra o perfil de temperatura com a mudança do fluxo para o furo da esquerda e o terceiro desenho mostra o perfil de temperatura após 60 minutos de corrida.



Figuras 3.45 – Resultado computacional do CFD, segundo HUANG et al. (2005)

A distribuição de desgaste do cadinho por erosão depende da distribuição dos campos de velocidades que por sua vez dependem do estado interno do alto-forno. A distribuição de líquidos, partículas de coque e de espaço livre de coque dependem do estado do cadinho: estado de acumulação ou drenagem. A guia de exemplo, na figura 3.46 é mostrado o estado interno do cadinho do alto-forno nº4 da usina de Mizushima, Japão, obtida pela dissecação do AF. NOUCHI e outros (2003) reportam que o espaço livre de coque formado no furo de corrida decresce significativamente o nível máximo de líquido. Quando o espaço livre de coque circunda uma porção da zona de coque compactada, o efeito é proporcional ao tamanho do espaço livre de coque. O aumento do espaço livre de coque decresce o nível máximo de líquido dentro do cadinho, causando a diminuição do tempo de corrida através da zona compacta.



Figuras 3.46 – Estado interno do cadinho do alto-forno no 4 da usina de Mizushima, Japão, (NOUCHI et al. 2003)

Resultados oriundos das dissecações e obtidos por intermédio de modelamentos físicos e matemáticos têm informado sobre as distribuições de erosão e o estado de acreções protetoras do cadinho de alto-fornos. As distribuições de velocidades e de temperaturas, as quais dependem das condições operacionais, grau de aporte de calor requerido, distribuição das partículas da carga, geometria e configuração do cadinho, entre outros, são fatores que afetam significativamente a vida útil do cadinho de um alto-forno. Poucas simulações com base no fluxo dinâmico das condições de fluxos no cadinho encontram-se disponíveis na literatura especializada.

Certamente os modelos matemáticos e físicos apresentam-se cada vez mais desenvolvidos, promovendo melhor entendimento dos fenômenos que acontecem dentro do cadinho. As utilizações de modelos físicos a frio bidimensionais e tridimensionais contribuem para compreensão, das linhas de fluxo estabelecidas na drenagem do fluido, sendo esta a opção de estudo aqui referida.

CHEN e outros (2005), realizaram estudos via modelagem física, com o propósito de investigar o fluxo de gusa e de escória na região do cadinho do alto-forno e os efeitos da dimensão e forma da camada livre de coque, posição do furo de corrida, formato do fundo do cadinho e a estrutura do homem morto (porosidade). As distribuições de fluxos foram visualizadas por intermédio do emprego de traçadores coloridos e filmagens. Das experiências conduzidas, observaram que:

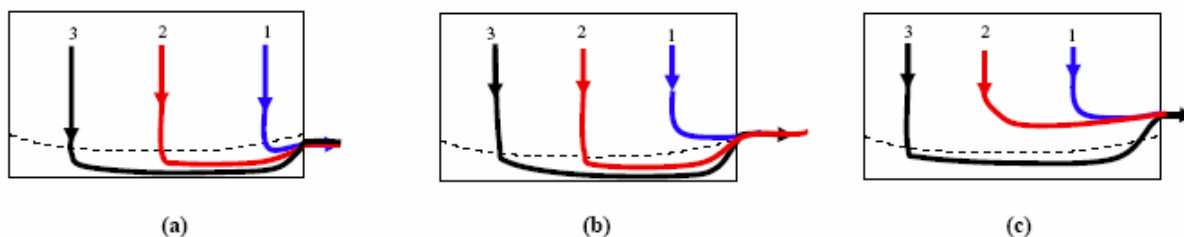
- Quando da posição de assentamento do homem morto, a distribuição de fluxos é estável em todos os casos;
- Para qualquer tamanho do espaço livre, o qual serve de trajeto com menor resistência, o fluxo abandona o leito na direção perpendicular à superfície do homem morto e, em alguns casos conduz a uma circulação estável de líquido;
- O valor da relação altura do furo de corrida / raio do cadinho (*sump ratio*) tem mais impacto sobre a resistência ao fluxo do que a distribuição de fluxos;

a distribuição de fluxos pode ser determinada principalmente pelo tamanho e forma do espaço livre de partículas.

O fundo do cadinho sofre erosão gradual ao longo da campanha do alto-forno. A relação efetiva da altura do furo de corrida / raio do cadinho (*sump ratio*), a qual é uma característica do projeto do cadinho, pode ser escolhida com uma variável que influencia sobre o comportamento fluidodinâmico no cadinho. Em virtude do fluxo gasoso que sai das zonas de combustão, a porção superior do homem morto deve ser curva nas proximidades da parede em qualquer posição de flutuação ou assentamento.

A porosidade do leito de coque afeta as taxas de enchimento do cadinho em gusa e escória e as condições de fluxos no interior do cadinho. A espessura e forma da zona livre de coque são variáveis que afetam sobremaneira a distribuição de fluxos na região do cadinho. Uma condição de baixa porosidade do leito, resultando aumento dos fluxos periféricos de escória e de gusa na parede lateral do cadinho, propicia a ocorrência de erosão tipo pé-de-elefante. Os efeitos da ocorrência de

fluxos periféricos de líquido e suas conseqüência sobre a erosão tipo pé-de-elefante devem ser considerados. A figura 3.47 mostra que quando aumenta o *sump ratio*, decresce a importância relativa do fluxo periférico.



Figuras 3.47 – Distribuição de fluxos na zona livre de partículas diferentes relações altura do furo de corrida / raio do cadinho (*sump ratios*): a) 0,2; b) 0,33 c) 0,5, segundo CHEN e outros (2005).

De acordo com ELSAADAWY & LU (2005), as distribuições de fluxos e de tensões de cisalhamento no o fundo do cadinho do alto-forno e nas paredes do mesmo dependem da altura da zona livre e do *sump ratio*. As seguintes conclusões puderam ser obtidas:

- Um aumento do *sump ratio* reduz a tensão de cisalhamento sobre o fundo do cadinho e conseqüentemente decresce a taxa de erosão do refratário e da taxa de transferência de calor;
- A localização da tensão de cisalhamento máxima depende do *sump ratio*. Quanto maior o *sump ratio* maior o valor máximo da tensão;
- Para um mesmo valor de distância do homem morto ao fundo do cadinho, maior a tensão de cisalhamento para menor valor do *sump ratio*. Logo, o processo de transferência de calor e de erosão do refratário do fundo do cadinho seria mais acentuado no caso de poça rasa de gusa, isto é, baixo valor do *sump ratio*. Para o homem morto assentado observou-se uma tensão de cisalhamento mínima sobre o fundo do cadinho em comparação com a situação do homem morto flutuante, desconsiderando o *sump ratio*.

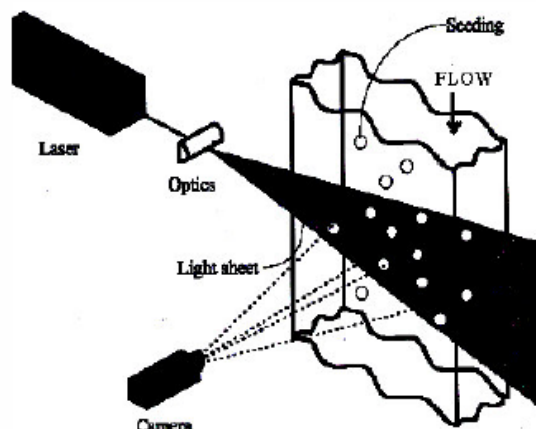
NNANNA e outros (2004) operaram um modelo no qual o homem morto com

porosidade entre 0 e 0,3, assentado sobre na região central do fundo do cadinho, se encontrava circundado somente por líquido, figura 3.48. Para diferentes alturas do furo de corrida, a velocidade máxima do fluxo de líquido foi obtida na área próxima ao furo de corrida.



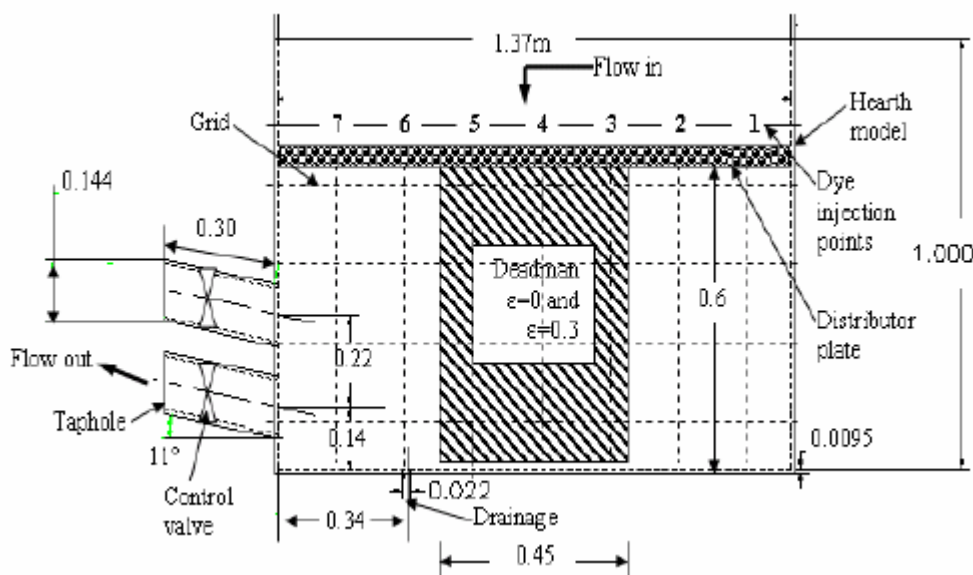
Figuras 3.48 – Montagem experimental NNANNA e outros (2004).

Para a visualização da distribuição de fluxos, no interior do cadinho, injetou-se corante fluorescente, álcool e leite. Foram utilizados quatro conjuntos de experimentos, usando-se furo de corrida com 0.051m de diâmetro, locados a uma altura de 0.14 e 0.22m. Foram considerados um homem morto impermeável e outro permeável. A figura 3.49 mostra detalhes do sistema de monitoramento da movimentação de fases no interior do cadinho, durante a simulação física, pelo emprego da técnica de Laser Sheet Visualization, NNANNA e outros (2004).



Figuras 3.49 – Instalação do sistema de monitoramento *Particle Image Velocimetry*, - PIV, NNANNA e outros (2004).

Uma placa perfurada, colocada acima do homem morto, foi utilizada com o objetivo básico de uniformizar a distribuição (gotejamento) do gusa líquido (água). Foram utilizados duas alturas do furo de corrida e duas situações do homem morto: homem morto compacto e homem morto permeável. O local de injeção do corante, posição e forma do furo de corrida, porosidade do homem morto, sistema de controle da vazão de corrida, posicionamento dos furos da placa perfurada estão mostrados na figura 3.50.



Figuras 3.50 – Detalhes da montagem experimental, NNANNA e outros (2004).

As figuras 3.51 e 3.52 mostram a distribuição de fluxos para a porosidade do homem morto igual a 0.3 e 0, respectivamente, e altura do furo de corrida de 0.22m. Observa-se que a distribuição de fluxos é dependente da porosidade da estrutura do homem morto. A figura 3.51 indica uma recirculação quando a porosidade do homem morto é igual a 0.3. Isto é atribuído ao misturamento do fluido que deixa a estrutura do homem morto e se incorpora a zona livre de partículas. Este fenômeno não pode ser observado na figura 3.52.

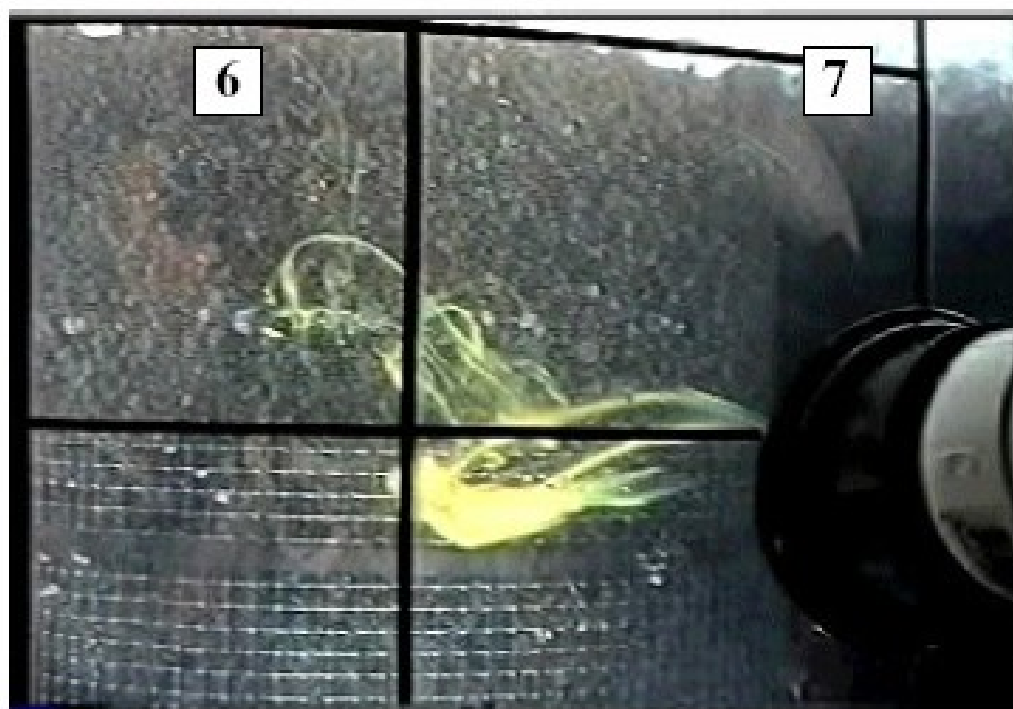


Figura 3.51 – Distribuição de fluxos para a injeção no ponto 6, altura do furo de corrida de 0.22m, e porosidade do homem morto = 0.3, NNANNA e outros (2004).

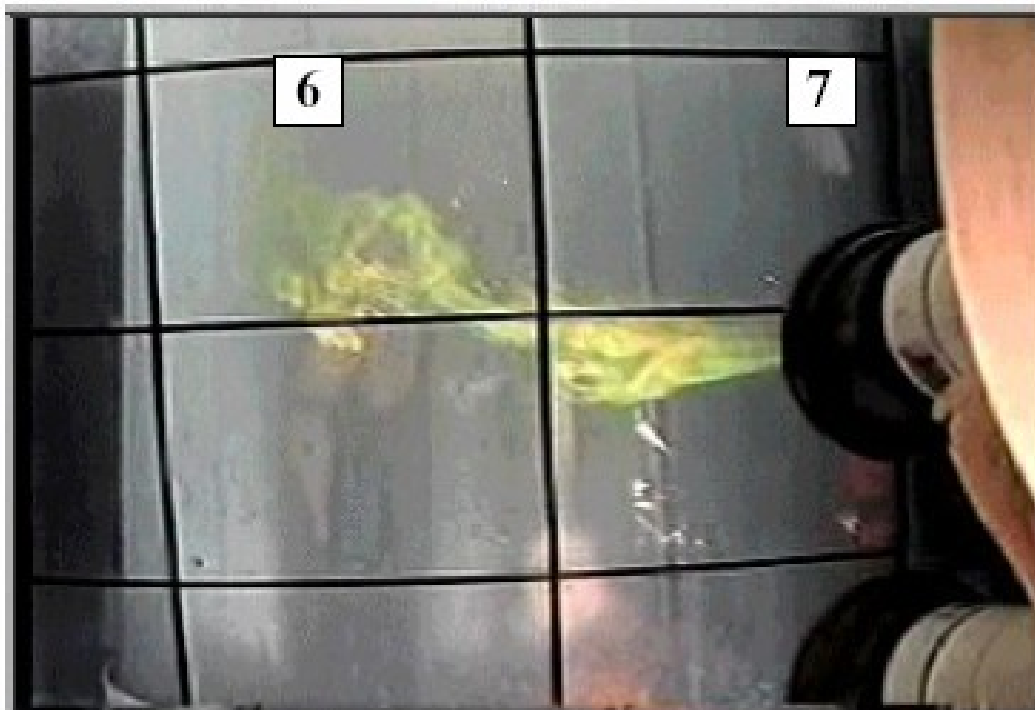


Figura 3.52 – Distribuição de fluxos para a injeção no ponto 6, altura do furo de corrida de 0.22m, e porosidade do homem morto = 0, NNANNA e outros (2004).

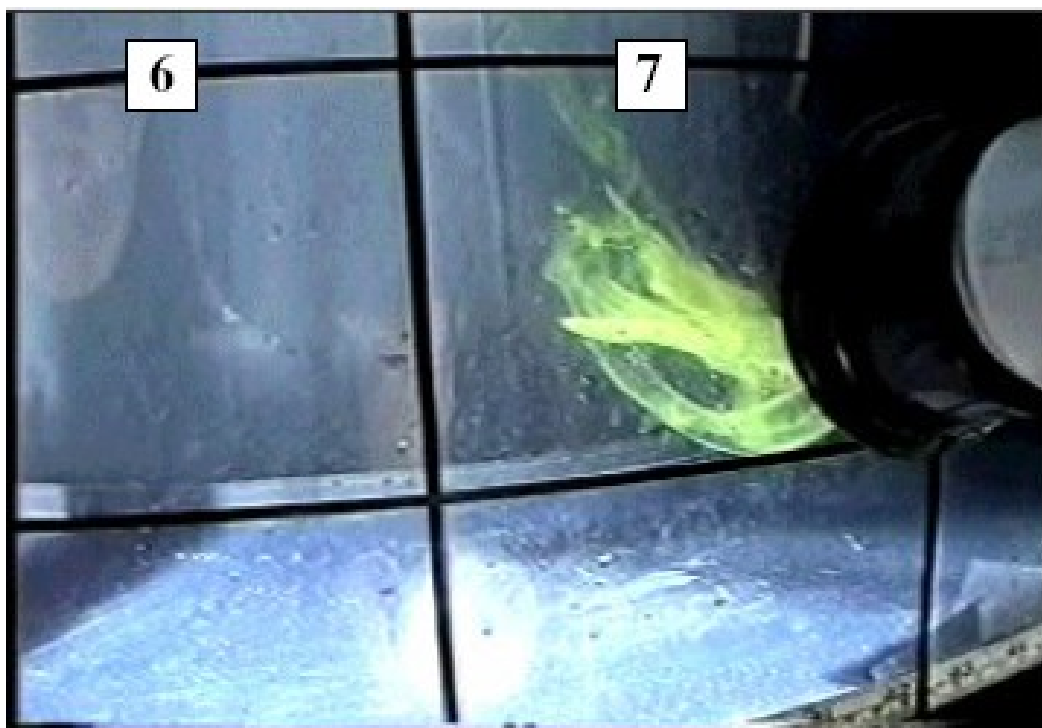


Figura 3.53 – Distribuição de fluxos no ponto 7, altura do furo de corrida de 0,14m, e porosidade do homem morto = 0, NNANNA e outros (2004).

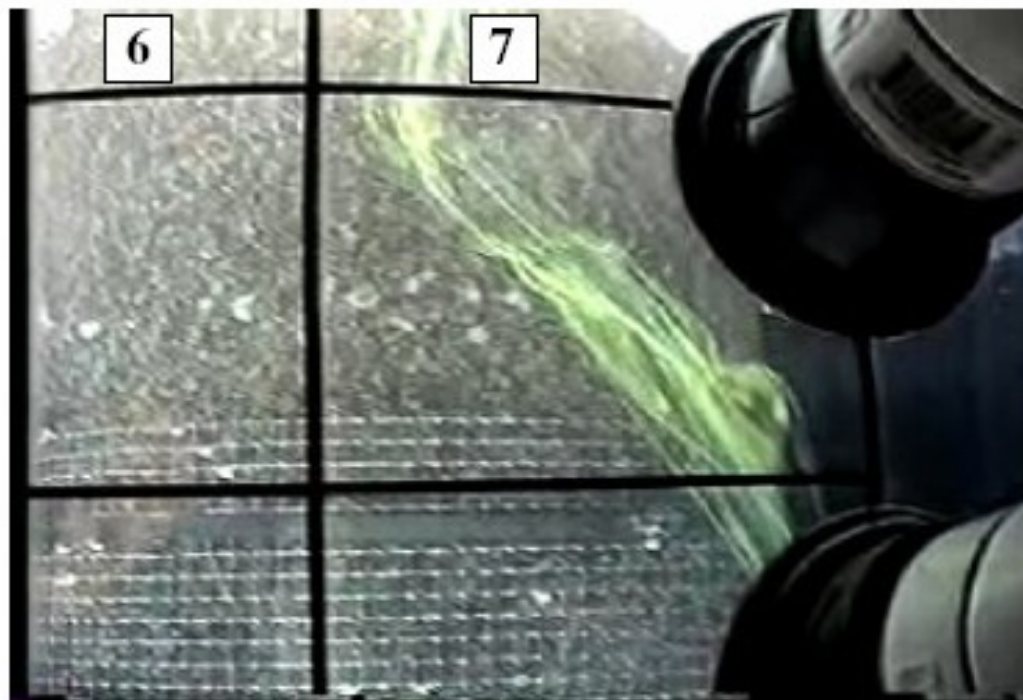


Figura 3.54 – Distribuição de fluxos para o ponto de injeção, altura do furo de corrida de 0, 14m, e porosidade do homem morto = 0.3, NNANNA e outros (2004).

Os resultados experimentais mostraram uma influencia considerável da porosidade do homem morto e da altura do furo de corrida sobre a distribuição de fluxos na região livre de coque. O aumento da altura do furo de corrida resultou em decréscimo do “*flow turning* (reversão de fluxo, recirculação),” causado pela superfície do fundo do cadinho como pode ser observado em um comparativo das figuras 3.53 e 3.54 com as 3.51 e 3.52. Este fenômeno pode resultar em erosão do refratário da parede do cadinho.

4- O Alto-forno 02 da ArcelorMittal Tubarão

A ArcelorMittal Tubarão é uma usina integrada para produção de placas e bobinas a quente, localizada no Espírito Santo. Como uma área industrial de 7.000.000 m², iniciou suas operações com o *blow-in* de seu Alto-Forno 01 em 30 de novembro de 1983. Para uma produção prevista de 3.000.000 toneladas por ano, contava com (Andrade e outros, 2003):

- 1 Coqueria com 3 baterias de 49 fornos;
- 1 Máquina de Sinter de 440 m²;
- 1 Alto-forno com 4.415 m³;
- 1 Aciaria com 2 Convertedores;
- 1 Lingotamento convencional / Laminador Desbastador.

A partir da privatização, em 1992, novos investimentos foram feitos na empresa, tais como:

- Lingotamento contínuo em 01 de Abril de 1995
- Sistema de Injeção de finos PCI em Abril de 1996
- Turbina de Topo (TRT) em Novembro de 1996.

Em 1998, foi colocado em marcha o alto forno 2 no dia 1º de julho com uma nova tecnologia assim como o lingotamento contínuo 02 que elevou o nível de produção da companhia para 5.000.000 de toneladas de aço e posteriormente em 2002 iniciou-se a operação do Laminador de Tiras a Quente – LTQ.

No ano de 2007, entra em uma nova fase de expansão da produção para 7.500.000 de toneladas de aço, com a entrada em operação do alto-forno 3 em 21 de julho além de uma nova coqueria *Heat-Recovery* e o Lingotamento Contínuo 3 como mostrado na Figura 4.1.

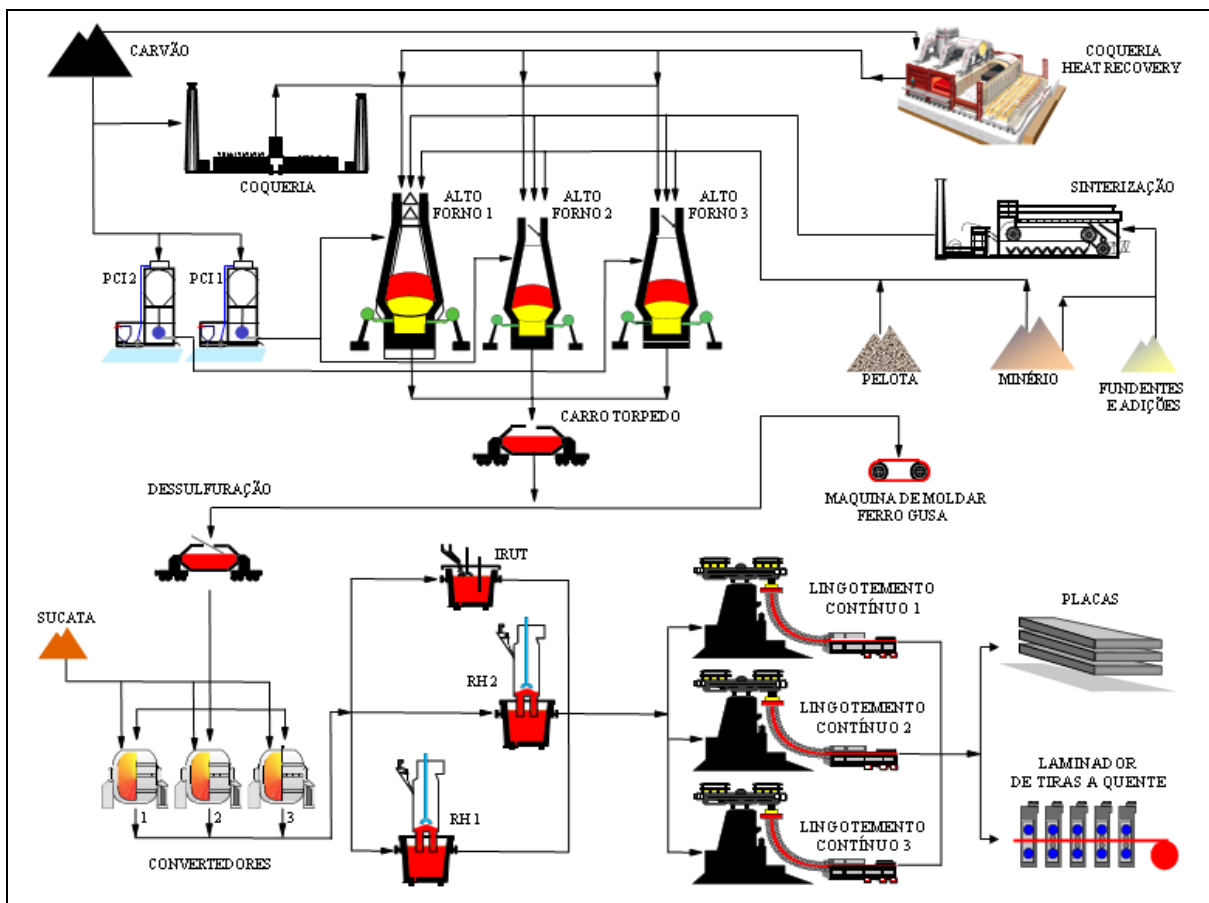


Figura 4.1 – Fluxo de produção da ArcelorMittal Tubarão Andrade e outros (2003)

O Alto-Forno 02 foi concebido pelo consórcio, sendo baseado em projeto europeu, novas tecnologias foram implementadas visando melhorar o controle operacional, através da introdução de novos equipamentos:

- Staves de cobre na cuba (03 níveis);
- Topo sem cone;
- Perfilômetro;
- Sonda penetrante para análise de gás;
- Sondas tipo radar;

- Pré-aquecimento de ar e gás nos regeneradores;
- Granulação de escória INBA;
- Sistema de limpeza de gás;
- Sistema digital de controle;

4.1 – Especificações técnicas do alto-forno 02

As principais especificações técnicas do Alto-forno 02 da ArcelorMittal Tubarão estão listadas na Tabela 4.1 abaixo:

ALTO-FORNO	ESPECIFICAÇÕES
Produção	1.200.000 ton/ano
Tipo	<i>Free Standing</i>
Volume Interno	1550 m ³
Volume de Trabalho	1374 m ³
Diâmetro do Cadinho	8 m
Furos de Gusa	2
Ventaneiras	22
Sistema de Refrigeração	Fundo: Tubo de refrigeração Carcaça: <i>Stave Cooler</i> (03 níveis de cobre)
Analizador de Gás da Cuba	Embolo de 4154 mm
REGENERADORES	ESPECIFICAÇÕES
Tipo	DME
Quantidade	3 + 1 base civil
Área de Aquecimento	36329 m ² x 3
Temperatura de Sopros	1250 °C
LIMPEZA DE GÁS	ESPECIFICAÇÕES
Coletor de Pó	Tipo vertical assentamento por gravidade
<i>Bischoff</i>	3 elementos
Saída de Pó	5 mg/Nm ³
CARREGAMENTO	ESPECIFICAÇÕES
Tipo	Calha Rotativa - PW
Sistema de Carregamento	Correia Transportadora
Capacidade de Carregamento	214/dia onde 2-Batches - 1 Carga
Silos do Topo	30m ³ x 2

CONTROLE DA PRESSÃO DE TOPO	ESPECIFICAÇÕES
Tipo	<i>Bischoff</i> : 3 Elementos
Pressão de Topo	Máximo 1,7 kg/cm ²
Sistema de Equalização	Primário: Gás Semi-Limpo
CASA DE CORRIDA	ESPECIFICAÇÕES
Canhão de Lama	2 x Tipo Acionamentos Hidráulicos
Perfuradores	PW/DMV hidráulico
Canais de Corrida	Tipo fixo
Granulação de Escória	INBA (PW) x 1
Capacidade	1200 t/d
<i>Dry Pit</i>	700 m ² x 2
Sistema de Despoeiramentos	Tipo <i>Bag Filter</i> com 7300 Nm ³ /min x 1
SISTEMA DE INJEÇÃO DE CARVÃO	ESPECIFICAÇÕES
Sistema de Moagem	
Tipo	<i>Kuttner</i>
Tipo	Rolos Fixos (02)
Capacidade	40 t/h
Gases	Gás de alto forno e GNP (chama piloto)
Silo armazenamento carvão grosso	500 m ³
Transporte de carvão	Correia Transportadora
Sistema de Injeção	
Tipo	<i>Paul Wurth</i> – Fase densa
Capacidade	30 t/h x 2 linhas
Gases	Nitrogênio
Consumo	90 Nm ³ /t - carvão
Pressão	Maximo em 15 kg/cm ²
Vasos de Injeção	3 – Conjuntos em paralelo
Silo de Armazenamento de Finos de Carvão	2300 m ³ (BF1 + BF2)

Tabela 4.1 - Especificações dos Equipamentos do Alto-Forno 02 da ArcelorMittal Tubarão

A Figura 4.2 a seguir mostra o formato do alto-forno ressaltando suas dimensões estruturais.

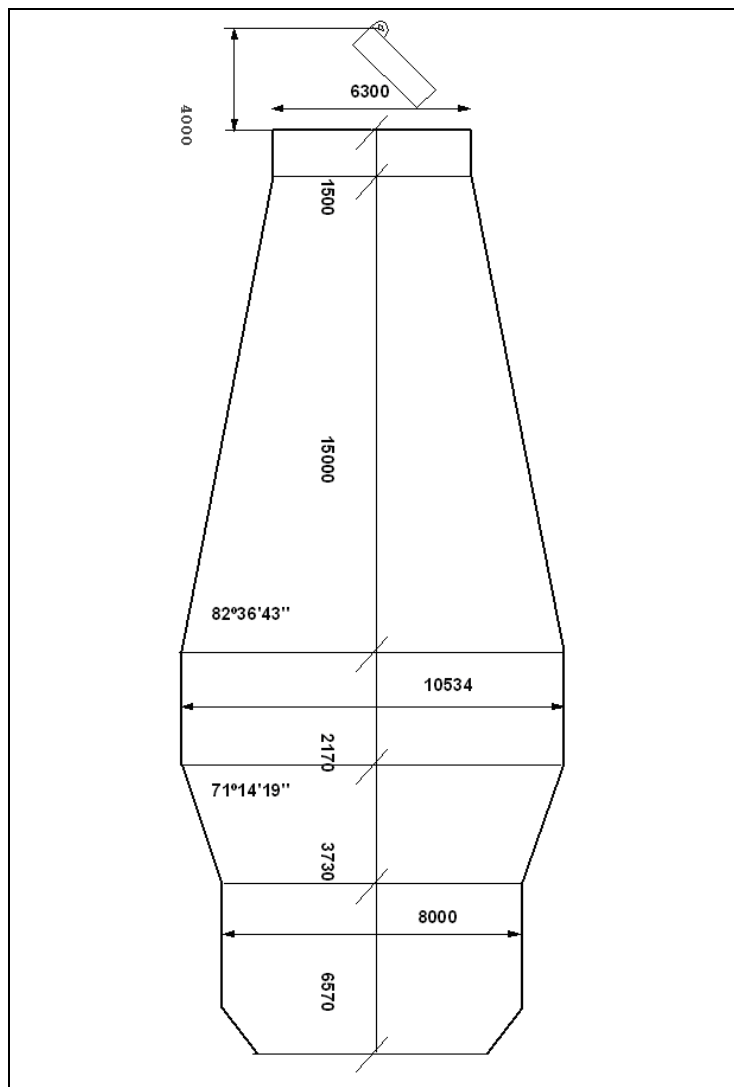


Figura 4.2 – Dimensões Estruturais do Alto-Forno 02 da ArcelorMittal Tubarão

A casa de corrida dispõe de dois canais de corrida para gusa e escória, dispostos conforme a Figura 4.3, onde mostra todas subdivisões dos canais.

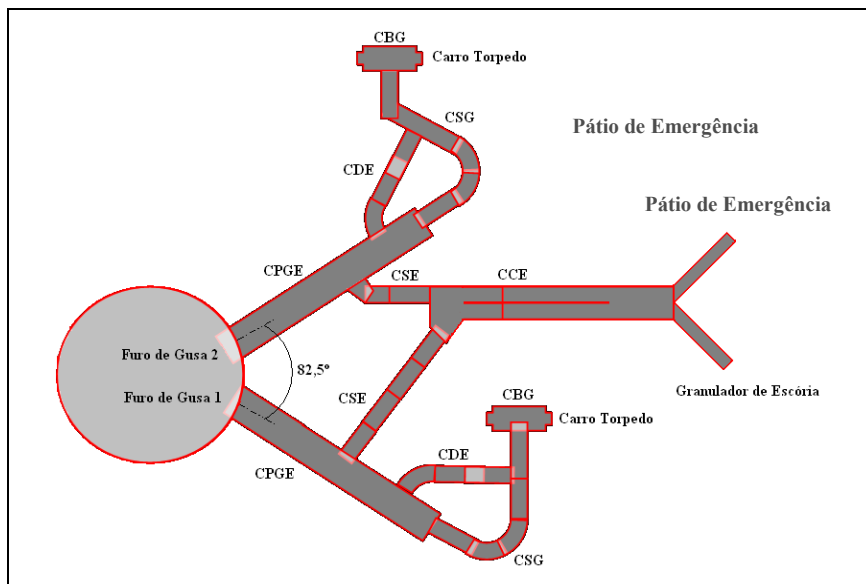


Figura 4.3 – Disposição da casa de corrida

4.2 – O cadinho do Alto-forno 02

O cadinho apresenta a configuração dos refratários conforme a Figura 4.4.

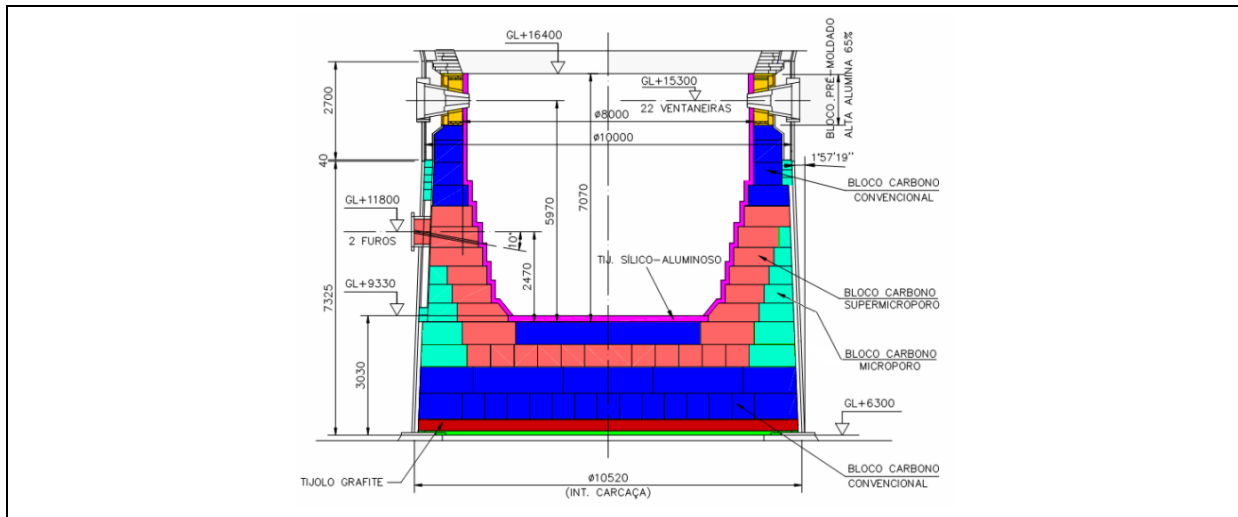


Figura 4.4 – Refratários do cadinho do Alto-Forno 02 da ArcelorMittal Tubarão

As propriedades de condutividade térmica do revestimento do cadinho podem ser visualizadas na Tabela 4.2.

Tipo de Material	Faixa (°C)	Condutividade
Tijolo Silico-Aluminoso	200	1,14 kcal/h·m·k
	400	1,16 kcal/h·m·k
	600	1,19 kcal/h·m·k
	800	1,23 kcal/h·m·k
	1000	1,26
Bloco Carbono Convencional Tipo 1	100	5 W/(K·m)
	400	7 W/(K·m)
	800	10 W/(K·m)
Bloco Carbono Convencional Tipo 2	100	3 W/(K·m)
	400	5 W/(K·m)
	800	8 W/(K·m)
Bloco de Carbono Supermicroporo	100	6 W/(K·m)
	400	8 W/(K·m)
	800	11 W/(K·m)
Bloco de Carbono Supermicroporo de alta condutividade	-	20 W/(K·m)
Bloco de Grafite	-	160 W/(K·m)
<i>Rammer</i> Tipo 1	-	14 W/(K·m)
<i>Rammer</i> Tipo 2	400	2,86 W/(K·m)
	600	2,80 W/(K·m)
	1000	3,00 W/(K·m)
<i>Rammer</i> Tipo 3	100	≥ 35 W/(K·m)
	400	≥ 30 W/(K·m)
	1000	≥ 22 W/(K·m)

Tabela 4.2 – Propriedades dos materiais de revestimento do cadinho

A Figura 4.5 mostra outro desenho esquemático do cadinho, detalhando os diversos níveis de altura, desde o nível mais baixo (BL1) até o nível mais alto (HL8) assim como a indicação da localização dos níveis dos blocos de carbono monitorado por termopares. A parede inferior (HL2) e a parede nas regiões dos Furos de Gusa (HL4) foram as regiões onde ocorreram as maiores temperaturas registradas.

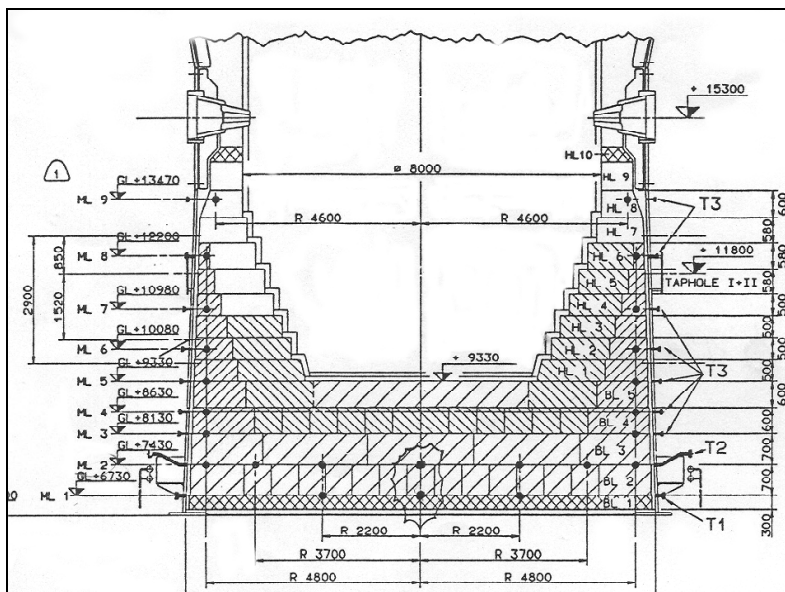


Figura 4.5 – Desenho com os níveis discriminados para identificação dos termopares.

Um detalhe aproximado de como os termopares são inseridos no bloco de carbono podem ser vistas na figura 4.6, onde pode ser visualizadas também, em detalhes, a seqüência dos materiais, assim como a espessuras dos mesmos em relação à carcaça metálica do cadinho.

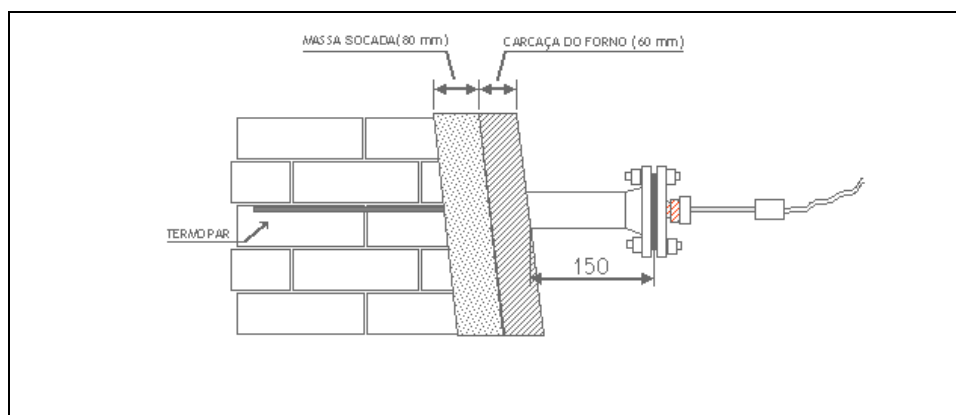


Figura 4.6 – Configuração da instalação dos termopares e as medidas das carcaça metálica e a massa socada

Em relação à refrigeração do cadinho, esta é realizada por jatos de água industrializada, em formato de *sprays* (cortina de água), que se iniciam na região do nível do HL8 até a região do BL2, onde é captada em calhas e retornada para o sistema, conforme podemos notar na Figura 4.7.



Figura 4.7 – Refrigeração externa do tipo “cortina de água”.

Além disto, o sistema conta ainda com refrigeração da soleira, que é feita por tubulações que passam sob o cadinho (figura 4.8). Esses tubos são percorridos por água desmineralizada, em um circuito fechado, ligadas aos trocadores de calor.

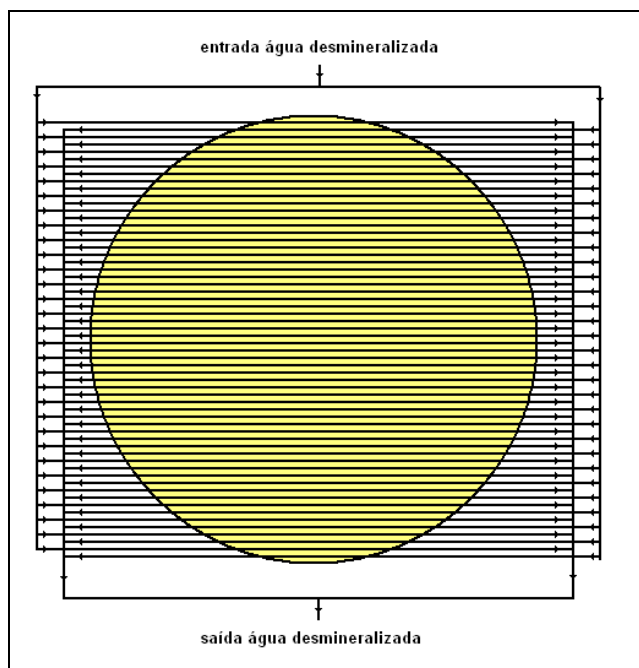


Figura 4.8 – Refrigeração da soleira do cadinho

Em somatória, os dois furos de gusa também são refrigerados com duas placas de staves de ferro fundido cada um, inseridas no mesmo circuito de água desmineralizada da refrigeração da soleira do cadinho.

4.3 – Histórico operacional

O Alto-Forno apresentou uma grande estabilidade ao longo de 4.9, sendo os consumos médios de aproximadamente 60% de Sinter, 30% de Pelota e 10% de Minério granulado, com pequenas oscilações devido a ajustes de abastecimento e custos operacionais. Esta configuração de consumo se mostrou ideal para o balanço de sinter da usina, permeabilidade do leito e custo operacional do Alto-Forno.

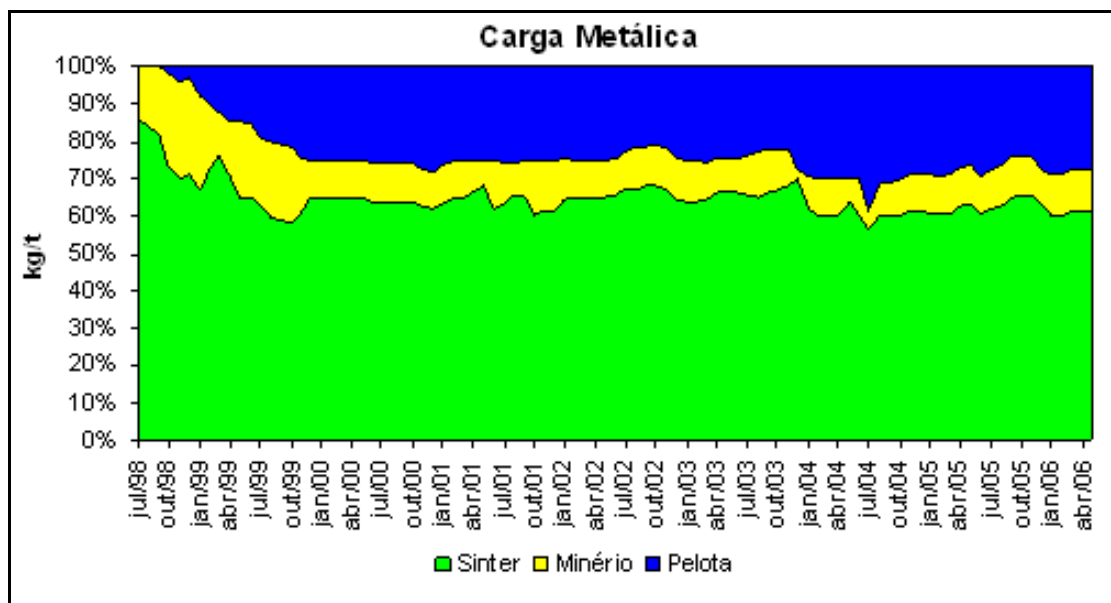


Figura 4.9 – Evolução do Consumo de Carga Metálica.

O histórico operacional pode ser dividido em quatro fases distintas, onde cada fase apresentou uma particularidade de extrema importância para a evolução operacional do Alto-Forno 02. Estas fases serão mais bem apresentadas a seguir, os resumos dos dados podem ser vistos na tabela 4.3 abaixo.

	Unidade	1° Fase	2° Fase	3° Fase	4° Fase
Produção	t/dia	3.223	3.900	3.666	3.700
Produtividade	t/m3/dia	2,08	2,52	2,36	2,40
Coque Rate	Kg/t	368,83	298,08	315,62	321,4
Coque Grosso	Kg/t	342,9	273,45	281,55	263,0
Small Coque	Kg/t	25,93	24,63	34,07	58,40
PCR	Kg/t	130,27	180,68	156,36	154,4
Fuel Rate	Kg/t	499,1	478,76	471,98	475, 8
Max. Temp. HL2	° C	144	424	481	470
Max. Temp. HL4	° C	176	503	499	451
Max. Temp. BL2	° C	400	422	443	416

Tabela 4.3 – Resumo operacional do Alto-Forno 02 ArcelorMittal Tubarão

4.3.1 – Primeira fase → *Rating-Up* (Início de Operação)

O início de operação, compreendido entre sua partida em julho de 1998 a novembro de 1999, foi marcado pela rápida elevação da produtividade, atingindo 2,0 t/m³/dia no 11° dia de produção. Durante este período o equipamento trabalhou com produtividade média de 2,08 t/d/m³, como mostrado na Figura 4.10, para que os parâmetros de controles operacionais fossem conhecidos, ajustados e avaliados, bem como adequar ao novo método de carregamento de topo sem cone “*bell less top*”. A rápida redução do consumo de combustíveis, associada à injeção de carvão pulverizado iniciada no 35° dia de operação, também são características desta fase de operação do Alto-forno 02.

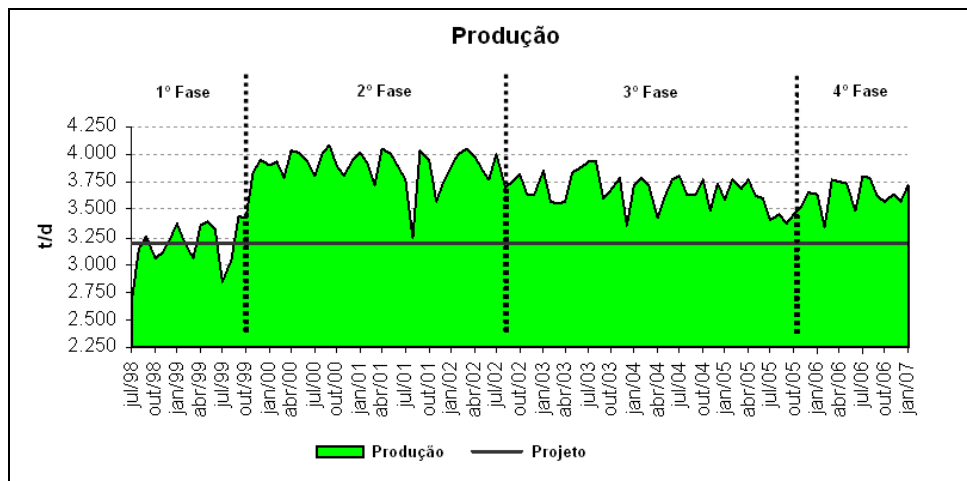


Figura 4.10 – Evolução da produção

4.3.2 – Segunda fase → Alta Produtividade

O período de alta produtividade, compreendido entre de Dezembro de 1999 a Agosto de 2002, além da elevada produção, baixo consumo de coque, associado à elevada taxa de injeção de carvão pulverizado. Neste período foi introduzida uma nova distribuição de carga permitindo melhorar o controle das marchas periféricas e centrais.

O alto-forno trabalhou com elevada produtividade $2,52 \text{ t/d/m}^3$, e baixo consumo de combustíveis, *fuel rate* 478,76 kg/t de gusa, como mostrado nas Figuras 4.10 e 4.11 respectivamente.

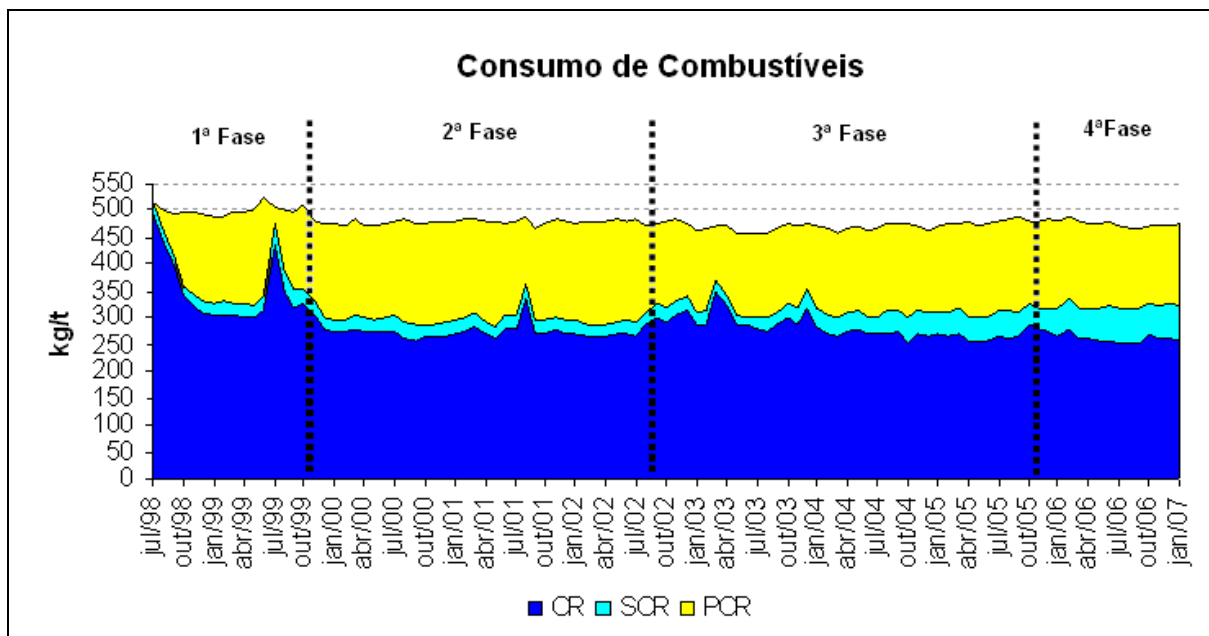


Figura 4.11 – Evolução do consumo de combustíveis

Neste período de elevada produtividade e baixo consumo de combustíveis granulados, as temperaturas da soleira (BL2), parede (HL2) e da região dos furos de gusa (HL4) apresentavam-se estáveis, com ligeira tendência de elevação, mas dentro do esperado para os elevados níveis de produtividade. Nota-se que ao final deste período ocorreu uma súbita elevação das temperaturas do cadinho nos níveis HL2 e HL4 em agosto de 2002, conforme mostrado na Figura 4.12, interrompendo uma operação de alta produção e temperaturas estáveis.

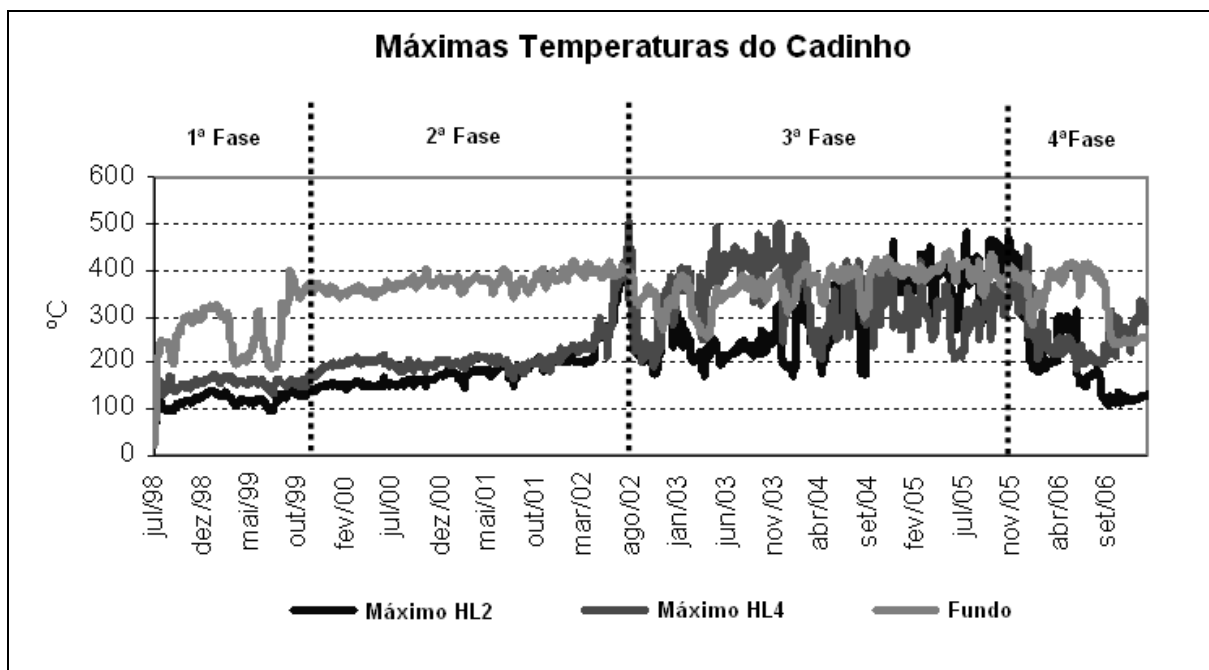


Figura 4.12 – Evolução das temperaturas do cadinho

4.3.3 – Terceira fase → Redução de produtividade e elevação das temperaturas do cadinho

O período de redução de produtividade devido a elevação das temperaturas do cadinho, compreendido entre Setembro de 2002 a Outubro de 2005, é caracterizado por altas temperaturas, sendo necessárias grandes atuações para a redução das mesmas. Foi necessário readequar a distribuição de carga, melhorando a precisão na distribuição de coque privilegiando a marcha central.

Neste período o Alto Forno 02 trabalhou com produtividade de $2,36 \text{ t/d/m}^3$, e baixo consumo de combustíveis, *fuel rate* 471,98 kg/t, conforme mostrado nas figuras 04 e 05 respectivamente. Após a súbita elevação das temperaturas das paredes (HL2 e HL4), que interromperam a fase de alta produtividade anteriormente relatada, foram necessárias algumas ações visando redução das temperaturas:

- Fechamento de ventaneiras sobre regiões de elevadas temperaturas, visando minimizar produção de ferro gusa sobre estas regiões;

- Redução da produtividade, visando reduzir vazão de líquidos no cadinho;
- Elevação do coque rate, visando elevação da permeabilidade do homem morto (*deadman*), para melhorar o fluxo de gusa e escória em seu interior;
- Consumo de Ilmenita granulada objetivando 0,1% de [Ti] no gusa, como mostrado na figura 4.13, visando formação de nitreto/carbeto de titânio no cadinho;
- Elevação do comprimento dos furos de gusa, como mostrado na figura 4.14, visando melhor proteção dos furos de gusa e ajuste no fluxo de líquidos no cadinho.
- Instalação de válvulas de controle de vazão de ar por ventaneira;
- Injeção de massa carbonácea no cadinho.

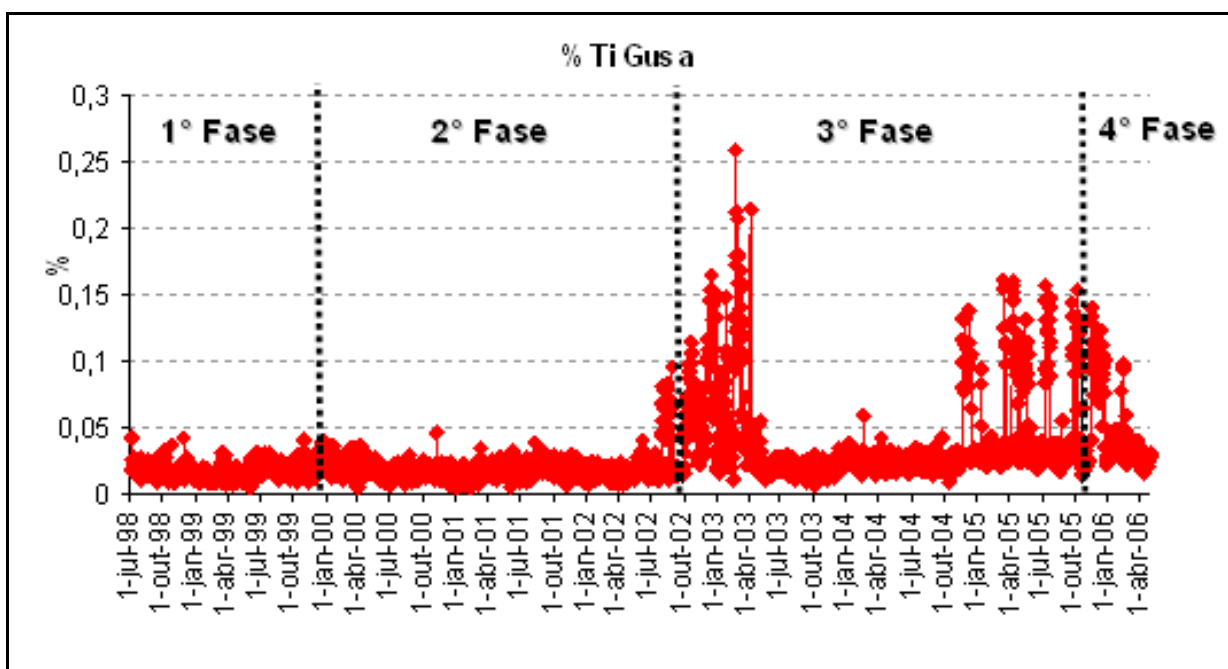


Figura 4.13 – Evolução do consumo de ilmenita granulada

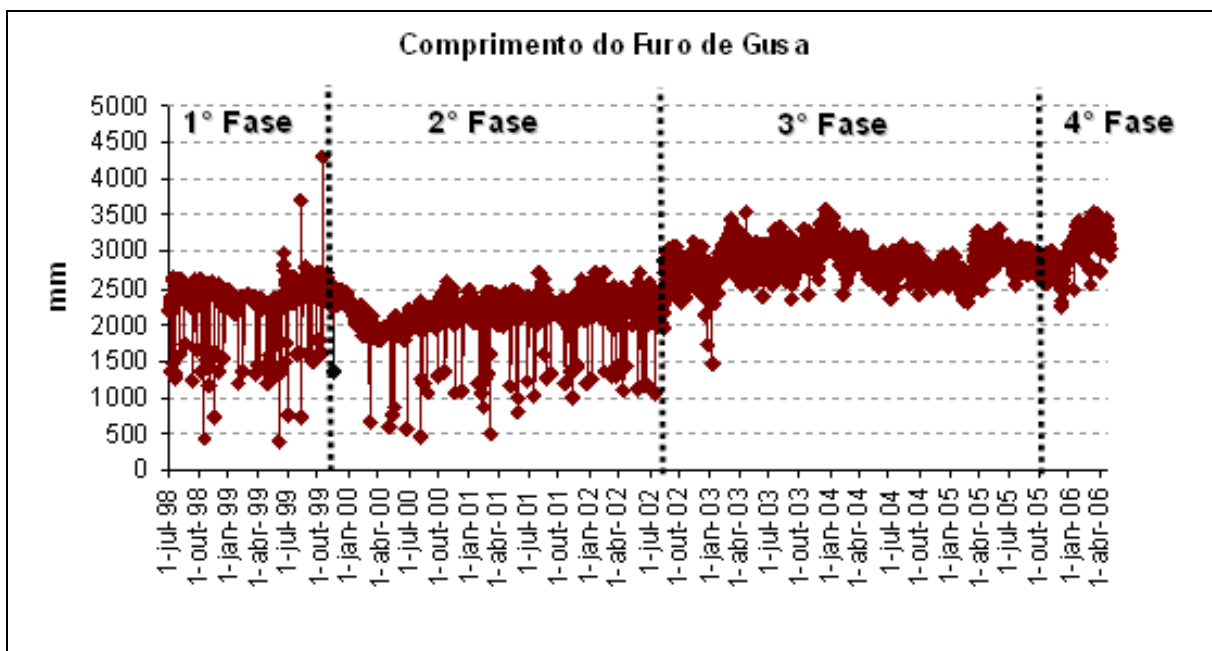


Figura 4.14 – Evolução do comprimento dos furos de gusa

4.3.4 – Quarta fase → Estabilização das Temperaturas do Cadinho

O período de estabilização das temperaturas do cadinho, compreendido entre novembro de 2005 até maio 2006, é caracterizado pela redução e estabilização das temperaturas do cadinho, como mostrado na Figura 96, com elevação do ritmo operacional. Neste período o Alto-Forno 02 trabalhou com produtividade de 2,34 t/d/m³, como mostrado na Figura 4.10, e fuel rate 480,38 kg/t, como mostrado no gráfico 4.11. A partir de Novembro de 2005 algumas ações foram implantadas, visando estabilização e controle das temperaturas do cadinho:

- Evolução na distribuição de carga, alterando os pesos dos materiais em cada “batches”, e elevando a participação de *small coque* para melhor controle das marchas periféricas e centrais;
- Consolidação do coque rate em 320 kg/t, (coque grosso 252 kg/t e *small coque* 68 kg/t), como mostrado no gráfico 05, visando elevação da

permeabilidade do *deadman*, e controle das marchas periféricas e centrais;

Após este período foi possível retornar a elevar o ritmo de produtividade de 2,34 t/d/m³ para valores atuais de 2,45 t/d/m³ até 2008. É importante ressaltar que os dados de 2008 foram retirados de análise em função da crise mundial que forçosamente levou a redução de produção, e em dezembro (2008) ocorreu parada do equipamento (*blow down*).

4.4 – Parada do equipamento (*blow down*).

Em função da crise econômica mundial que se instalou a partir de 2008, foi realizado o blowdown no dia 02 de dezembro deste mesmo ano às 04:58h, totalizando a marca de 13,3 milhões de toneladas produzidas, em 10 anos e 5 meses de operação.

Em todo o seu período de operação, o Alto-Forno 02 da ArcelorMittal Tubarão apresentou os seguintes resultados acumulados:

- Tempo de operação: 3.808 dias;
- Índice de Disponibilidade campanha: 98,90%
- Produção Acumulada na Campanha: 13.392.508,5 toneladas, figura 4.15;
- Produção Média Diária: 3.526,2 t/dia;
- Produtividade média campanha (volume interno): 2,27 t/m³/dia;
- Produtividade média campanha (volume trabalho): 2,57 t/m³/dia;
- Produtividade Acumulada na Campanha: 8.640,33 t/m³;
- Quantidade de Corridas: 46702 corridas.

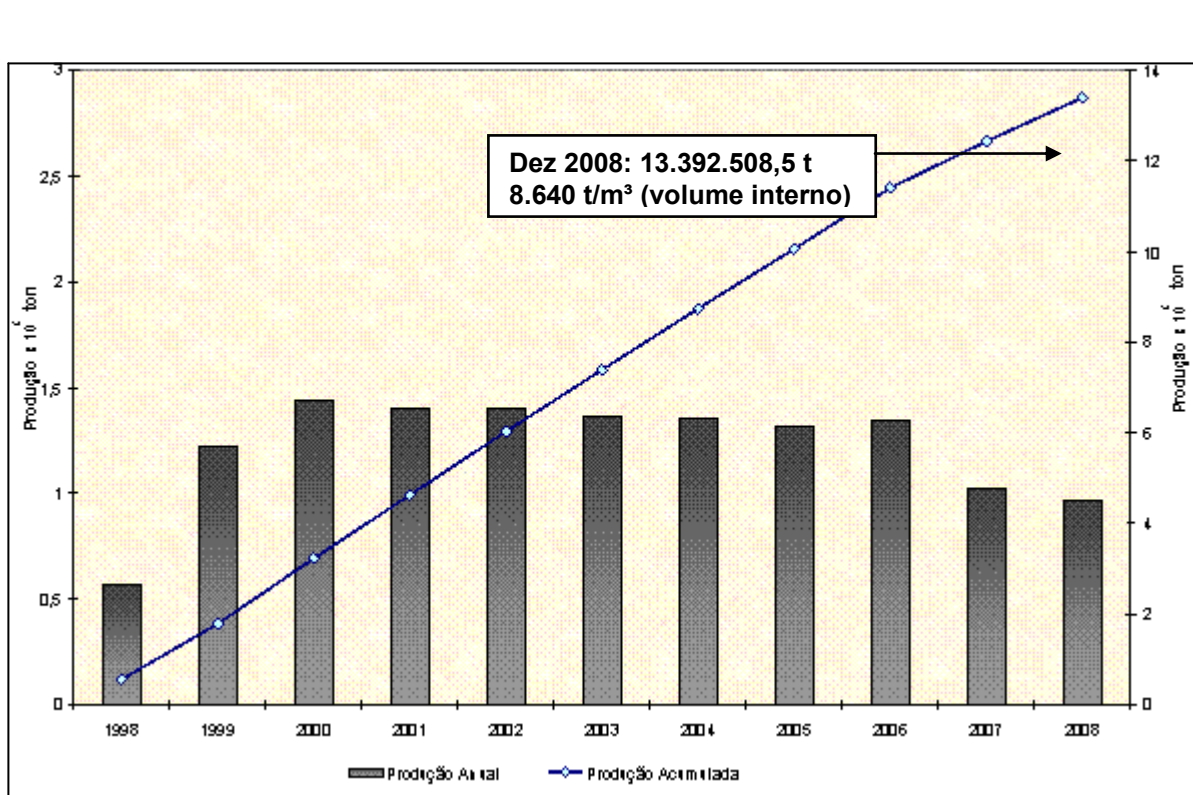


Figura 4.15 – Produção acumulada do Alto-Forno 02 da ArcelorMittal Tubarão.

É importante esclarecer que o *blowdown* é uma operação onde a carga é abaixada até o nível das ventaneiras, tendo como resultado final um cadinho cheio de coque com um mínimo remanescente de material líquido no interior do mesmo, ficando então o alto-forno vazio do nível das ventaneiras ao topo. Antes da execução propriamente dita desta operação, são realizados diversos testes e ajustes visando efetuar corretamente, mas principalmente com segurança. Para que se torne possível o procedimento de abaixamento de carga, corrida da salamandra (última corrida feita através de um furo ao fundo do cadinho), apagamento do forno (*quenching*) e a medição/limpeza das paredes internas do forno e do cadinho, existem a necessidade dos seguintes preparativos:

- Aumento da marcha periférica: o aumento do fluxo periférico visa à retirada de possíveis cascões na parede do forno.
- Redução da basicidade da escória: com o objetivo de evitar a formação cascões.

- Aumento da permeabilidade do cadinho: Uma boa permeabilidade do cadinho permitirá uma boa drenagem na corrida da salamandra, reduzindo assim o esforço para a limpeza posterior do mesmo.
- Alteração da carga do forno até o blowdown: visando redução da produção de escória, algumas vezes se faz o uso da alteração da carga metálica.
- Paradas preparatórias para o blowdown: Como a operação de abaixamento de carga de um Alto-Forno é uma atividade extremamente crítica necessita-se que alguns equipamentos sejam instalados anteriormente, para que seja possível a realização deste evento.

5 – Metodologia

De modo a permitir investigar as características – tridimensionalidade, transiência – do fluxo no cadinho foi construído um modelo em três dimensões. Modelos bidimensionais, na forma de ranhura, já foram empregados e são fáceis de operar, mas não refletem a complexidade do fluxo, como se pretende mostrar neste trabalho. O vaso de contenção consiste essencialmente um cilindro em acrílico (~15 mm de espessura) contendo um enxerto tronco-cônico que representa a geometria do refratário. A escala de construção empregada, 1:10, resultam em dimensões finais da ordem de 1,0m x 1,0m. Para as caracterizações dos fluxos, sob várias condições de permeabilidade do leito, de taxa de produtividade e de distribuição de gotejamento no cadinho, foram usados dois princípios: adição de corante ao líquido e adição de traçador salino. O primeiro permite uma avaliação apenas qualitativa e limitada (pelo fato do fluxo se dar no interior da porosidade do homem morto) das linhas de fluxo; já o segundo, através dos sinais percebidos por condutímetro dispostos em pontos predeterminados do vaso, permite uma avaliação quantitativa do fluxo.

Com o intuito de melhorar a compreensão acerca do fluxo reinante no interior do cadinho, da transferência de energia no interior do reator e com o fim de complementar a avaliação possibilitada pelo modelo físico, foi utilizado um código numérico comercial de CFD (CFX, da Ansys). Naturalmente métodos matemáticos como os empregados pelo CFX se baseiam em Balanços de Conservação de Energia, de Espécie e de Quantidade de Movimento. A opção escolhida para a representação dos fluxos no interior dos poros do homem morto foi semi-macroscópico, com a utilização da equação de Ergun para a representação da resistência interna do reator à passagem do material líquido e de um “lumped factor” conjugando as condutibilidades térmicas do gusa e das partículas de coque.

Assim, de posse das informações providas dos modelos físico e matemático, foi possível realizar a interligação dos resultados ao “post-mortem” realizado no alto-forno 2 da ArcelorMittal Tubarão a fim de mostrar correlações entre os resultados da modelagem com os dados apresentados no cadinho após a sua parada para reparo.

Busca-se com esta metodologia a ampliação dos resultados do trabalho levando a conclusões mais efetivas e próximas da real necessidade operacional de conservação do equipamento.

5.1 – Modelagem Física

5.1.1 - Critério de semelhança entre o modelo e o protótipo

Além da semelhança geométrica entre o modelo e o protótipo, é importante garantir a similitude dinâmica entre ambos os recipientes de estudo.

Grupos adimensionais relevantes à operação do modelo seriam o de Froude (típico de sistemas em drenagem), o de Reynolds modificado, envolvendo a porosidade do leito (tomando a equação de Ergun como ponto de partida), e o de Euler. Este último porque o tamponamento do furo de corrida começa quando gás começa a sair através do mesmo. Pressurização poderia ser garantida por um modelo fechado e pelo emprego de ar comprimido, por exemplo. Entretanto, como em outras situações típicas de modelagem, não se faz possível atender a todos os critérios simultaneamente, de modo que optou-se por não pressurizar o sistema. Não se faz necessário que todos os elementos constitutivos do modelo estejam na razão de escala citada, desde que respeitados os critérios. Assim é conveniente empregar esferas de cerca de 20 ~25 mm de diâmetro (por questão de disponibilidade comercial) para a construção do homem morto; tal facilita a visualização e mantém na prática a mesma superfície de contato de leito (coque coletado no cadinho apresenta esta dimensão, em média).

O fluxo na região do cadinho pode ser considerado, na pior das hipóteses, trifásico, com escória e gusa no sentido descendente e gás no sentido ascendente. No caso mais simples o gusa percola através da estrutura do leito de coque. Assumindo que, neste caso, a equação de Ergun se aplique, tem-se que:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 (1-w)^2 \varphi^2 \eta}{w^3 d_p^2} V_o + \frac{1,75 (1-w) \varphi \rho}{w^3 d_p} V_o^2$$

Onde, ΔP queda de pressão; L altura do leito; w fração de vazios do leito; φ fator de forma das partículas; η viscosidade dinâmica; ρ massa específica do fluido; d_p diâmetro da partícula; V_o velocidade em vazio.

Multiplicando ambos os termos pela quantidade

$$d_p^3 \rho / \eta^2$$

encontra-se a equação na forma adimensional

$$\frac{w^3 d_p^3 \rho \Delta P}{(1-w)^3 \varphi \eta^2 L} = 150 \left\{ \frac{\rho d_p V_o \varphi}{\eta (1-w)} \right\} + \frac{1,75}{\varphi^2} \left\{ \frac{\rho d_p V_o \varphi}{\eta (1-w)} \right\}^2$$

a qual permite identificar os Grupos de Semelhança

$$Re \text{ (modificado)} = \frac{\rho d_p V_o \varphi}{\eta (1-w)} \qquad Ga \text{ (modificado)} = \frac{d_p^3 \rho^2 g w^3}{(1-w) \eta^2}$$

$$Euler = \frac{\Delta P}{\rho V_o^2} \qquad Froude \text{ (modificado)} = \frac{V_o^2}{(1-w)^2 \varphi d_p g} \frac{d_p}{L}$$

Estes representam critérios os quais deveriam ser obedecidos simultaneamente, para que fosse observada similaridade completa.

A escolha mais comum de líquido para simulação é água a 25 °C, para a qual

$$\rho_{H_2O} = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad \eta_{H_2O} = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

e, também se sabe serem,

$$\rho_{\text{gusa}} = 6000 \text{ kg/m}^3 \quad \eta_{H_2O} = 6 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

Portanto, desde que para partículas esféricas (no modelo e no reator industrial) seguindo a mesma distribuição espacial a fração de vazios não se altera, o critério de Reynolds fornece.

$$\frac{\rho d_p V_o \varphi}{\eta (1-w)}_{\text{modelo}} = \frac{\rho d_p V_o \varphi}{\eta (1-w)}_{\text{indústria}} \quad \text{ou}$$

$$\{d_p V_o\}_{\text{modelo}} = \{d_p V_o\}_{\text{indústria}}$$

Como a velocidade em vazio se calcula como a razão entre a vazão volumétrica e a área de seção reta do reator,

$$V = \frac{Q}{A}$$

a expressão anterior pode ser reescrita, considerando ainda o fator de escala λ , isto é,

$$\frac{A_{\text{modelo}}}{A_{\text{indústria}}} = \lambda^2,$$

como:

$$\{d_p Q\}_{\text{indústria}} \lambda^2 = \{d_p Q\}_{\text{modelo}}$$

Na situação específica se construiu um modelo na escala $\lambda = 1:10$. Deste modo, se o diâmetro médio do coque no homem morto for em torno de 30 mm e, sendo as esferas utilizadas no modelo de diâmetro médio de 17 mm ou de 19 mm, se encontra:

Indústria		Modelo(19 mm)	Modelo (17 mm)
Ton/dia de gusa	Lpm de gusa	Lpm de água	Lpm de água
3000	347 ($5,78 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	5,48	6,13
3800	440 ($7,33 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	6,95	7,77
4000	462 ($7,70 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	7,29	8,16

Se o adimensional de Froude for tomado como o mais significativo

$$\frac{V_o^2}{(1-w)^2 \varphi d_p g} \frac{d_p}{L_{\text{industria}}} = \frac{V_o^2}{(1-w)^2 \varphi d_p g} \frac{d_p}{L_{\text{modelo}}}$$

cálculos semelhantes permitem escrever

$$\frac{V_o^2}{L_{\text{industria}}} = \frac{V_o^2}{L_{\text{modelo}}} \quad \text{ou} \quad \frac{Q^2}{A^2 L_{\text{industria}}} = \frac{Q^2}{A^2 L_{\text{modelo}}}, \text{ isto é,}$$

$$Q_{\text{industria}}^2 \lambda^5 = Q_{\text{modelo}}^2$$

De acordo com este critério se obtém:

Indústria		Modelo (19 mm)	Modelo (17 mm)
Ton/dia de gusa	Lpm de gusa	Lpm de água	Lpm de água
3000	347	1,09	1,09
3800	440	1,39	1,39
4000	462	1,46	1,46

Alguns consideram como adimensional modificado de Froude:

$$\frac{V_o^2}{(1-w)^2 \varphi d_p g}_{industria} = \frac{V_o^2}{(1-w)^2 \varphi d_p g}_{modelo}$$

o que implicaria em:

Indústria		Modelo(19 mm)	Modelo(17 mm)
Ton/dia de gusa	Lpm de gusa	Lpm de água	Lpm de água
3000	347	2,76	2,61
3800	440	3,50	3,30
4000	462	3,67	3,47

É fácil inferir que a aplicação direta do adimensional de Galileu como critério de semelhança implica em que os diâmetros das partículas, no modelo e reator industrial deveria ser iguais, o que, por conveniência, não foi respeitado neste caso.

Finalmente parece conveniente lembrar que os adimensionais citados podem ser vistos com razões entre forças, por exemplo,

$$Re = \frac{\text{Inércia}}{\text{Viscosa}} \quad Fr = \frac{\text{Inércia}}{\text{Gravidade}} \quad Ga = \frac{\text{Inércia} \times \text{Gravidade}}{\text{Viscosa}^2}$$

de maneira que, no reator industrial:

$$Re = \frac{\varphi \rho d_p V_o}{\eta (1-w)} = \frac{1 \cdot 6000 \cdot 0,030 V_o}{6 \cdot 10^{-3} \cdot (1-0,45)} = \frac{1 \cdot 6000 \cdot 0,030}{6 \cdot 10^{-3} \cdot (1-0,45)} \frac{Q}{A}$$

onde a área de irrigação vale aproximadamente (considerando 8 m de diâmetro de cadinho) , $A = 50,24 \text{ m}^2$ Logo o número de Reynolds se encontra na faixa $6,27 < \text{Re} < 8,36$ o que sugere que forças viscosa e de inércia são da mesma ordem de grandeza.

De maneira análoga, o número de Froude pode ser estimado como

$$\text{Fr} = \frac{V_o^2}{(1-w)^2 \varphi d_p g} \frac{d_p}{L} = \frac{Q^2}{A^2 (1-w)^2 \varphi d_p g} \frac{d_p}{L}$$

e o valor deste adimensional se situa, considerando $L = 6 \text{ m}$, na faixa $1,48 \cdot 10^{-7} < \text{Fr} < 2,63 \cdot 10^{-7}$. Estes cálculos sugerem que, comparativamente à força de gravidade, a força de inércia pode ser desprezada.

Alternativamente

$$\text{Fr} = \frac{V_o^2}{(1-w)^2 \varphi L g} = \frac{Q^2}{A^2 (1-w)^2 \varphi L g}$$

fornece $7,38 \cdot 10^{-8} < \text{Fr} < 1,31 \cdot 10^{-9}$

Finalmente o número de Galileu

$$\text{Ga} = \frac{d_p^3 \rho^2 g w^3}{(1-w) \eta^2} = \frac{0,030^3 6000^2 9,81 0,45^3}{(1-0,45) (6 \cdot 10^{-3})^2} = 43 \times 10^6$$

A correlação entre forças seria do tipo (Inércia ~ Viscosa) \lll Gravidade, isto é, a gravidade domina o fluxo.

Note que o número de Euler pode ser estimado, para uma vazão de $5,78 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$,

$$\frac{\Delta P}{\rho V_o^2} = \frac{150 (1-w)^2 \varphi^2}{w^3} \frac{\eta L}{\rho V_o d_p^2} + \frac{1,75 (1-w) \varphi L}{w^3 d_p}$$

como da ordem de 30966. Portanto a força de inércia também não é importante em relação à queda de pressão no leito.

Com base nestes argumentos o modelo foi operado sob condições de similaridade próximas àquelas ditadas pelo adimensional de Froude. Discussão semelhante a esta pode ser encontrada em **Luomala, M.J., Matilla, J., Harkki, J.J., *Physical modelling of hot metal flow in a blast furnace hearth*, *Scandinavian Journal of Metallurgy* 2001, 30, 225-231.**

Para fins de cálculo do tempo médio de residência de líquido no cadinho considerou-se que o mesmo (no modelo) pode ser considerado tronco cônico, de acordo com a Figura. 5.1.

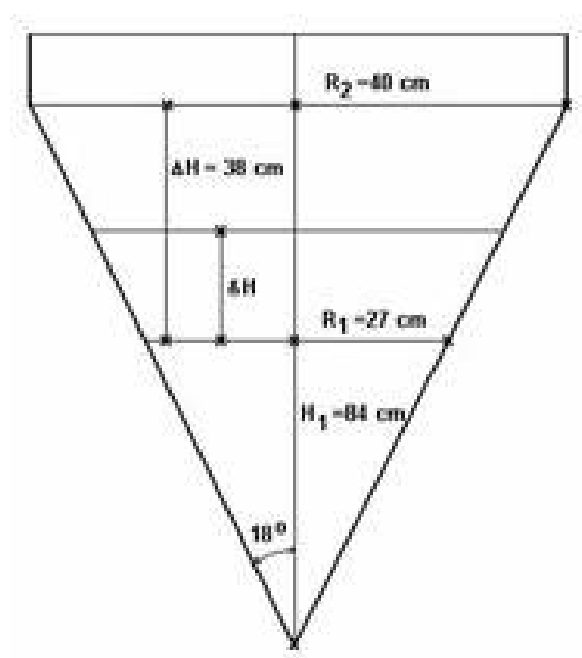


Figura 5.1 – Desenho esquemático do cadinho

Deste modo o volume interno do cadinho, preenchido com água até um nível δH , medido a partir do fundo, seria dado por

$$V_T = \frac{\pi}{3} \{(27 + \delta H \tan 18) (84 + \delta H) - 27^2\} / 1000 \text{ litros}$$

ou, considerando uma fração de vazios w , um volume útil igual a

$$V = V_T w$$

Para um valor típico de δH igual a 21 cm, o qual corresponde à situação em que o nível de líquido atinge o furo de corrida, e ainda se $w = 0,42$, se encontra

$$V (\delta H = 21 \text{ cm}; w = 0,42) = 61,66 \times 0,42 \sim 25,9 \text{ litros}$$

Deste modo uma estimativa do tempo médio de residência, para vazão de 3,3 lpm, seria

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{25,9}{3,3} = 7,8 \text{ minutos}$$

5.1.2 - Condução dos experimentos e Montagem experimental

Estabelece-se, na prática um ciclo de drenagem durante o qual os furos são abertos e fechados em seqüência, fazendo com que o nível de líquidos no cadinho se altere. São, portanto experimentos em transiência em que a vazão de entrada é mantida fixa e a de saída varia de nula até o valor típico de vazamento. Deste modo a primeira seqüência do ciclo não importa em termos de geração de dados válidos.

A alimentação do líquido que simula o gusa precisa seguir uma distribuição presumidamente semelhante àquela encontrada na zona de gotejamento; portanto não deve ser uniforme. Entretanto não é viável reproduzir detalhes como aqueles referentes ao não gotejamento de gusa através de cada um dos "raceways". Desta

forma optou-se por uma aspersão por meio de um sistema de chuveiros rotativos, ver Figura 5.2. Como se nota são 6 tubos dispostos simetricamente e na direção radial; cada tubo apresenta uma série de furos na sua porção longitudinal inferior. A Alimentação (de água, de água e corante, de solução salina) foi realizada através de tubulação única coincidente com o eixo de rotação e ligada aos tubos de distribuição, Figura 5.3. Então a distribuição de líquido aspergido sobre o leito de esferas (bolas de gude, ver Figuras 5.2 a 5.4) pode ser controlada pela obturação ou não de furos individuais. A rotação do conjunto foi garantida por um sistema eletromecânico, constituído de fonte de corrente contínua, motor DC(limpador de pára-brisas), pinhão, cremalheira de corrente de transmissão, Figura 5.3. Finalmente o modo da distribuição de aspersão foi determinado um conjunto de pequenos recipientes, dispostos em cruz na direção radial, logo abaixo do sistema aspersor; após operação do sistema por alguns minutos os copos eram recolhidos e pesados para a definição da curva de distribuição de gotas.

A vazão de alimentação (tipicamente 2,6lpm a 3,3 lpm) e a vazão de esgotamento (3,2lpm a 4lpm) foram reguladas através de bombas (peristálticas e conjuntos bomba-inversor), Figura 5.3.



Figura 5.2 – Detalhes da montagem experimental: 1 e 2 são os furos de gusa sobre os quais estão instalados condutivímetros; 3 sistema radial e rotativo de aspersão.



Figura 5.3 – Detalhes da montagem experimental, visão geral do conjunto: 1- bombas peristálticas de sucção pelos furos de gusa; 2- PC para leitura de dados de condutividade; 3- inversor de frequência para acionamento das peristálticas.



Figura 5.4 – Detalhes da montagem experimental, sistema de rotação e aspersão.

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam curvas de distribuição de líquido ou curva de aspersão de líquido no cadinho. Neste exemplo observa-se que a região intermédia – locada entre a porção central e a parede do cadinho – apresenta maior intensidade ou maior frequência de gotejamento. Os resultados indicam que o fluxo preferencial de líquido percolante pelo homem morto deu-se nas posições 3 e 6 (20%), 4 e 5 (~19%). As posições 2 e 7 (<10%) indicam uma condição de fluxo intermediário. Enquanto que nas posições 1 e 8, especialmente, na posição 1, o fluxo de líquido foi o minoritário (<2,5%).

A caracterização qualitativa do fluxo foi realizada pela adição, em pulso, de água tingida com anilina(em substituição ao transparente) através do sistema de chuveiros; estes experimentos foram filmados e digitalizados..

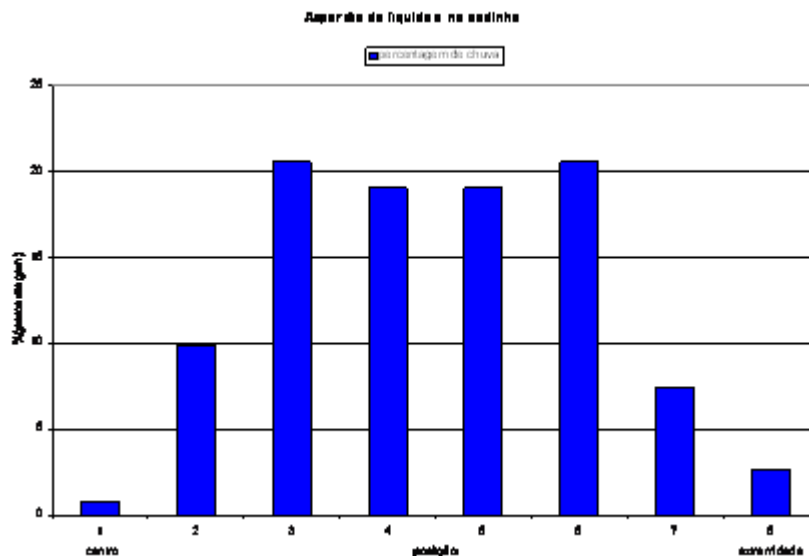


Figura 5.5 – Distribuição do líquido no cadinho – aspersão central

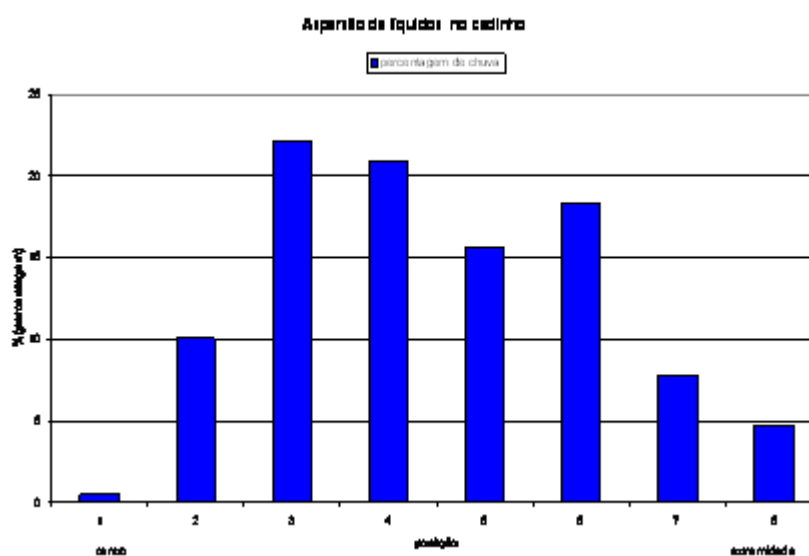


Figura 5.6 – Distribuição do líquido no cadinho – aspersão central

A avaliação quantitativa foi realizada via determinação de curvas de tempo de residência, com injeção dos sais em pulso em diferentes partes do ciclo da operação. Os valores das variáveis no ciclo se alteram também conforme o furo em esgotamento. Os parâmetros de controle são, neste caso, o tempo mínimo de residência e a forma da curva (unimodal ou não). Foram utilizados, para coleta das

curvas de condutividade, até 10 condutímetro dispostos nos dois furos de corrida e em outras(oito) posições no interior do leito, Figura 5.7 e 5.8

Os condutímetros, sonda ou sensores denominados cd1 e cd2 foram localizados nos furos de corrida. A sonda cd3 foi localizada no fundo do cadinho ao centro, então no interior da ranhura entre HOMEM MORTO e fundo do cadinho. O sensor cd4 também foi posicionado nesta ranhura, a meio raio do centro do cadinho. Os sensores cd5 e cd6 foram posicionados ao nível do furo de corrida, o cd5 no centro do cadinho enquanto o cd6 na rampa. Posteriormente foram colocados os condutímetros cd7, cd8 e d9 no mesmo plano vertical do cd1 sendo que o cd7 está localizado na ponta do furo de corrida 1, o cd8 a meia altura da rampa e o cd9 no encontro da rampa com o fundo do cadinho. Já o cd10 foi colocado na parte central do cadinho a meia altura entre o cd5 e cd3.

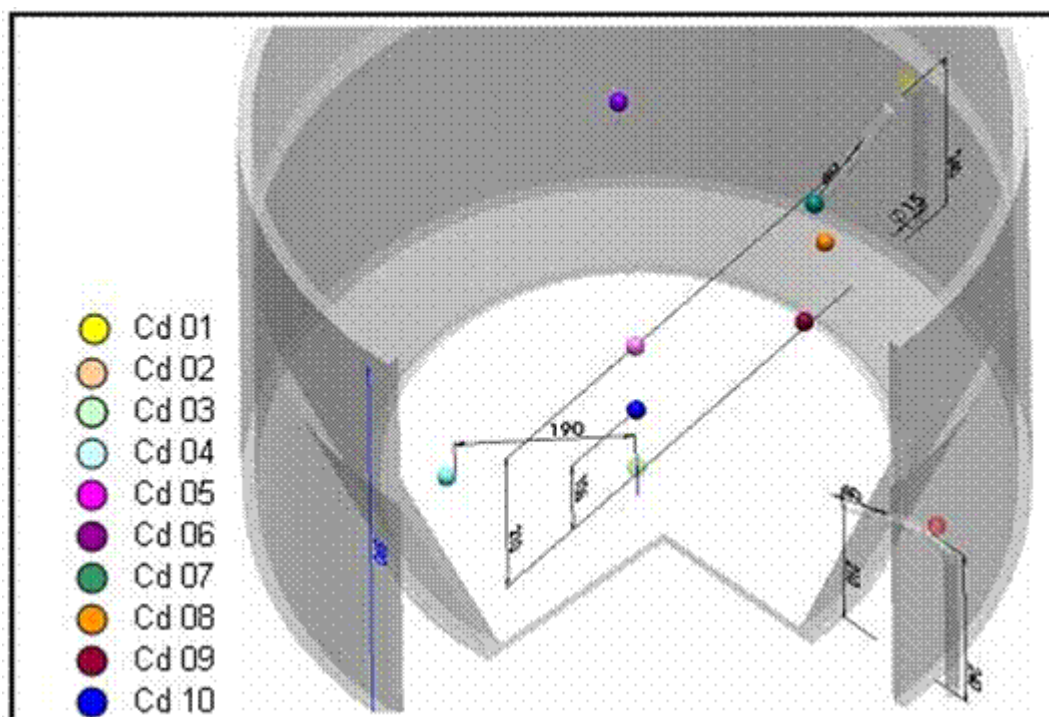


Figura 5.7 – Vista da disposição dos sensores

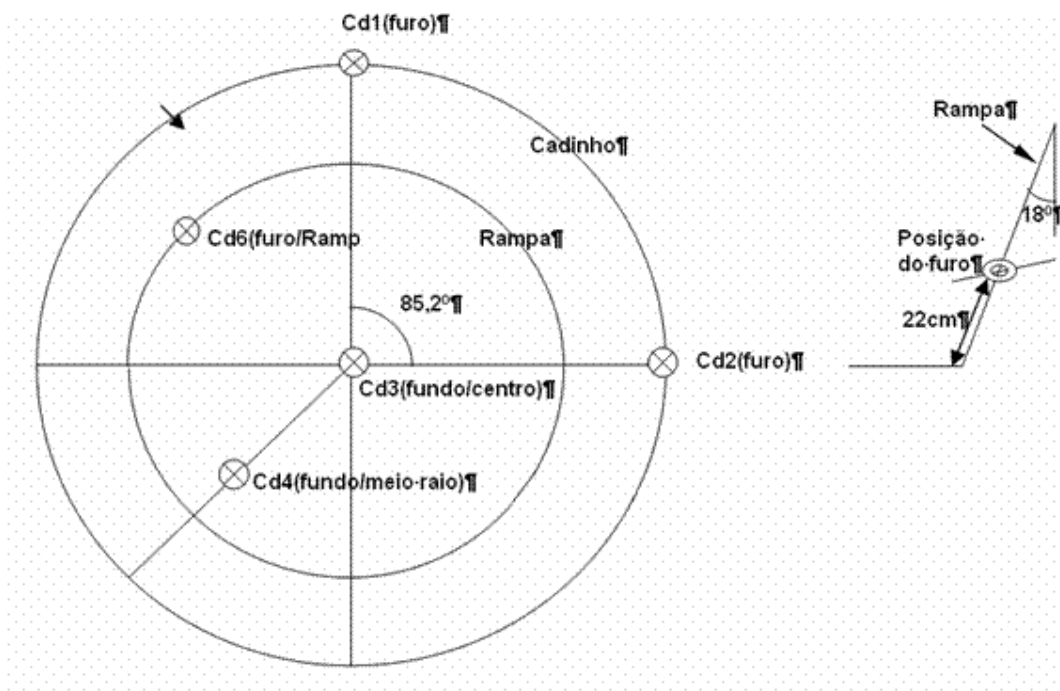


Figura 5.8 – Posicionamento dos condutivímetros no corpo do cadinho

A adição de traçador salino, 20 ml de solução (40g KCl/600 ml) foi realizada, na forma de pulso, após cinco ciclos de drenagem, no instante de abertura do furo número 1. O regime de fluxo é transiente, porém cíclico. Deste modo estabeleceu-se o momento de adição do traçador após 5 ciclos porque um número de ciclos maior não demonstrou influenciar as curvas-resposta dos condutivímetros. A curva primária de condutividade obtida em cada sensor é fornecida em volts, sendo transmitida a um PC através de uma placa de conversão A/D. De modo a permitir algum tipo de comparação foi feita inicialmente uma leitura de fundo, que corresponde aos sensores imersos em água limpa. Dos valores reais foram então abatidos os valores de fundo, o que indica que as curvas resultantes devem começar do zero e terminar no zero (quando todo o sal tiver sido expulso do HOMEM MORTO).

De acordo com a configuração geométrica, e com o ciclo de drenagem, um condutivímetro locado num furo de corrida pode se encontrar temporariamente

imerso em ar (quando a drenagem é feita através do outro furo). Durante este período as leituras são então negativas, denotando a presença de ar junto ao condutivímetro ou ausência de solução líquida. A mesma possibilidade ocorre para os condutivímetros cd5 e cd6, mas não, em princípio, para os denominados cd3 e cd4, sempre imersos em água.

Para ensaiar a condição de HOMEM MORTO flutuante, o leito de esferas (19 mm de diâmetro médio) foi afastado do fundo do cadinho através de uma grelha e tela de inox. Separadores de acrílico, de 1,5 cm de espessura, foram utilizados para tal fim. Para ensaiar a condição de Homem morto assentado, retirou-se a tela de inox fazendo com que as esferas ficassem distribuídas sobre o fundo do cadinho.

Como já citado, os testes procuram repetir um ciclo de vazamento segundo o qual o metal é drenado através de um dado furo de corrida até que se observe sopro de gás; segue-se a obturação do mesmo e, na seqüência, a abertura do outro. Admitiu-se 13,5 corridas ao dia, ao nível de 3800 ton/dia, o que implica em 280 ton/corrída ou 47 m³/corrída. Ainda se admitiu que a duração média de cada corrida seria de 90 minutos, acarretando uma vazão por furo da ordem de 0,520 m³ de gusa/minuto.

No modelo mediu-se uma fração de vazios do HOMEM MORTO próxima de 0,42. Considerando uma taxa de irrigação de 3,3 lpm e taxa de drenagem de 4,0lpm ficou estabelecido que a drenagem deveria ser alternada entre os furos de modo que o nível de líquido no modelo estivesse contido entre 21 e 23cm. Foi então operado com vazão de entrada constante e igual a 3,3 lpm, alternando o vazamento pelos furos de corrida, com vazão de extração de 4 lpm, de tal modo que o nível flutuasse entre 21 e 23 cm.

Os dados, na forma visual e quantitativa, foram dispostos de acordo com as diferentes combinações de forma, porosidade do homem morto, sua separação em relação ao fundo e às paredes, posição e inclinação (profundidade e proteção) dos

furos de drenagem, duração dos períodos do ciclo (volume de material produzido - produtividade), vazões. Estes dados constituem conhecimento básico no que diz respeito à operação e projeto de cadinhos.

5.2 – Modelagem Numérica via CFX

Nesta seção apresenta-se apenas um breve relato dos fundamentos empregados na simulação numérica. Maiores detalhes devem ser procurados no manual do CFX (ANSYS - CFX solver, Theory Guide, release 11, December 2006).

5.2.1 – Equações gerais de Conservação

As equações utilizadas pelo CFX são as equações de Conservação de espécie, de energia e de quantidade de movimento, reescritas em termos de valores médios (Reynolds averaging). Então, para fluxos turbulentos aparecem termos adicionais a serem quantificados a partir de um modelo de turbulência. As equações seriam:

$$\text{Continuidade } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0$$

$$\text{Navier -Stokes } \frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M$$

Nesta equação, o tensor de esforços, τ , se relaciona com a taxa de deformação do elemento de fluido

$$\tau = \eta(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U)$$

enquanto o termo relativo ao trabalho devido aos esforços viscosos é dado por $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$; e S_M contabiliza o aporte de quantidade de movimento devido a fontes externas.

Por outro lado o Balanço de conservação de entalpia (ou de energia total) é escrito da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E$$

onde h_{tot} é a entalpia total, relacionada à entalpia estática h (T, p) através de $h_{tot} = h + \frac{1}{2}U^2$; o termo $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ indica o trabalho realizado via esforços viscosos; $U \cdot S_M$ representa o trabalho devido a fontes externas.

Uma equação alternativa de conservação de energia, indicada para fluxo a baixas velocidades e fluidos incompressíveis, pode ser obtida pelo produto escalar entre a velocidade, U , e a equação de conservação de quantidade de movimento,

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U K) = -U \cdot \nabla p + U \cdot (\nabla \cdot \tau) + U \cdot S_M$$

onde, $K = \frac{1}{2}U^2$ é a energia cinética.

Subtraindo esta expressão daquela correspondente à equação de conservação de entalpia resulta em:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + U \cdot \nabla p + \tau : \nabla U + S_E$$

O termo $\tau : \nabla U$ é sempre negativo e fornece a taxa de dissipação devida a efeitos viscosos.

Finalmente, relacionando entalpia estática a energia interna por

$$h = e + \frac{p}{\rho}$$

resulta

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U e) = \nabla \cdot (\lambda T) + \rho \nabla \cdot U + \tau : \nabla U + S_E.$$

5.2.2 – Fluxo em meio poroso

A descrição do estado de porosidade no interior de um homem morto, para fins de modelagem numérica, é impraticável em termos de custos de computação. Por esta razão utiliza-se um modelo que representa uma generalização da equação de Navier-Stokes e da Lei de Darcy, para fluxo em meios porosos. O modelo retém as contribuições convectivas e difusivas e assume que os volumes de controle e suas superfícies são grandes em relação ao espaçamento intersticial dos poros, embora pequenos comparativamente à escala global de fluxo.

Então, volumes de controle e superfícies de controle podem conter fluidos e sólidos. Além das contribuições usuais o termo fonte, S, contém também termos relativos à interação entre o fluido e as porções sólidas do meio poroso. As equações relevantes seriam agora,

$$\text{Continuidade} \quad \frac{\partial \gamma \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho K \cdot U) = 0$$

$$\text{Navier –Stokes} \quad \frac{\partial(\gamma \rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(K \cdot U) \otimes U) - \nabla \cdot (\eta_{ef} K \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T)) = -\gamma R \cdot U - \gamma \nabla p$$

Onde se define a porosidade volumétrica, γ , razão entre o volume disponível para o fluxo no interior do volume de controle e o volume deste; e K um tensor simétrico de segunda ordem, o qual multiplicado pela superfície do volume de controle fornece a área de fluxo; η_{ef} é a viscosidade efetiva, laminar ou turbulenta; U a velocidade verdadeira nos poros e R representa a resistência ao fluxo nos poros.

A transferência de calor pode ser modelada de maneira semelhante, resultando em,

$$\frac{\partial(\gamma\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho K U H) - \nabla \cdot (\Gamma_e K \nabla H) = \gamma S^H$$

onde Γ_e representa uma difusividade térmica efetiva e o termo fonte S^H contempla interações com o meio poroso.

5.2.3 – Interações com o meio poroso

Do ponto de vista da dinâmica de fluidos considera-se a equação generalizada de Darcy

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\eta}{K_{perm}} U + K_{loss} \frac{\rho}{2} |U| U$$

Neste contexto permeabilidade e perdas, no homem morto se calculam como,

$$K_{perm} = \frac{d^2}{150\phi^2} \frac{\gamma^3}{(1-\gamma)^2}$$

$$K_{loss} = 3,5 \frac{d}{\phi} \frac{(1-\gamma)}{\gamma^3}$$

Onde γ é a porosidade do leito; ϕ é o fator de forma das partículas; d é o diâmetro das partículas.

A condutibilidade térmica média do conjunto coque – gusa foi estimada de acordo com **KUMAR,S. (ISIJ International, Vol. 45 (2005), No. 8, pp. 1122–1128, Heat Transfer Analysis and Estimation of Refractory Wear in an Iron Blast Furnace Hearth Using Finite Element Method)**

$$\lambda_{ef} = \left[\frac{2\gamma\lambda_{iron} + (3-2\gamma)K_{coke}}{(3-\gamma)\lambda_{iron} + \gamma\lambda_{coke}} \right]$$

5.2.4 – Malhas de integração

Foram simulados dois problemas diferentes, um relativo ao fluxo de água no modelo, outro relativo ao fluxo de metal e de calor no cadinho do AF em estudo.

O grid de integração para o primeiro caso é apresentado na Figura 5.9. São cerca de 108548 nós e 589430 tetraedros representando somente a parte interna do cadinho. As condições de contorno são simples neste caso: paredes impermeáveis e sujeitas a condição de não deslizamento, com energia cinética e taxa de dissipação de energia igual a zero nestas superfícies; condições específicas de vazão nos furos de corrida; distribuição não uniforme de água na porção superior, tal como sugerido pelas medidas de dispersão, Figura 5.10.

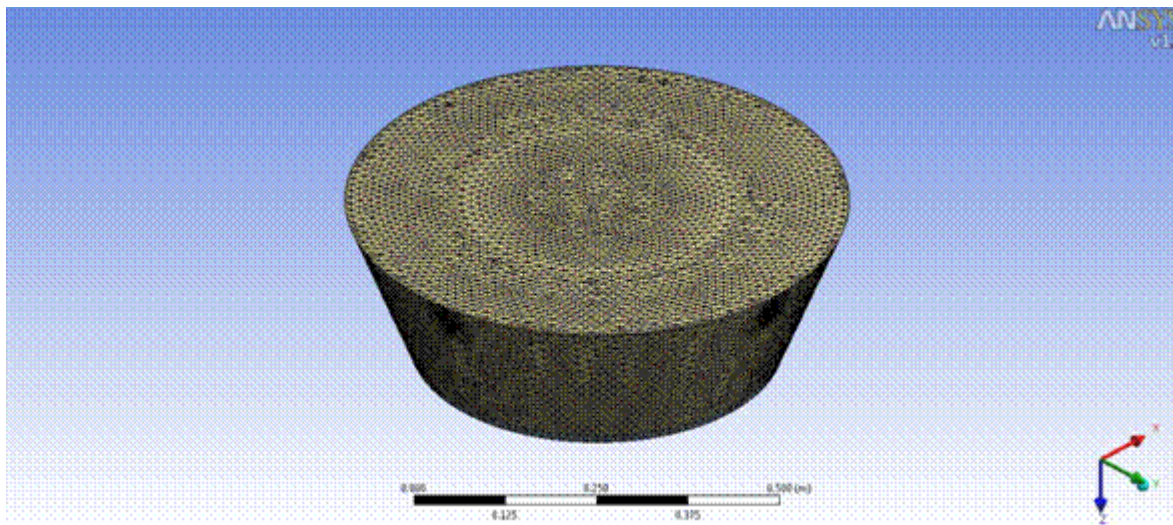


Figura 5.9 – Malha de integração para determinação de condições de fluxo de água modelo.

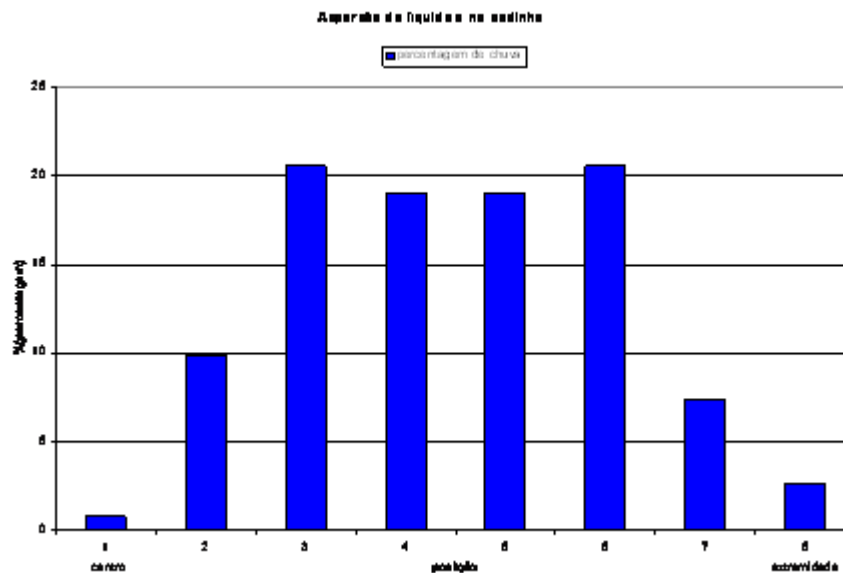


Figura 5.10 – Exemplo de curva de aspersão reproduzida na modelagem numérica.

As simulações envolvendo o cadinho real, para determinação de fluxo de metal e térmico levam em consideração, além do leito de homem morto, as várias camadas de revestimento de bloco de carbono. As espessuras dos blocos, bem como as condutividades térmicas em temperaturas ambientes são conhecidas como dados de projeto. A taxa de gotejamento foi estimada a partir da produtividade média do forno e, novamente considerou-se aspersão não uniforme de um líquido à temperatura constante. Na ausência de maiores informações relativas aos fluxos térmicos e/ou temperatura nas diversas posições do cadinho admitiu-se, como condição de contorno, temperatura externa da chaparia constante.

Uma visão limitada do grid de integração, com 140030 nós e 724638 tetraedros é apresentada na Figura 5.11.

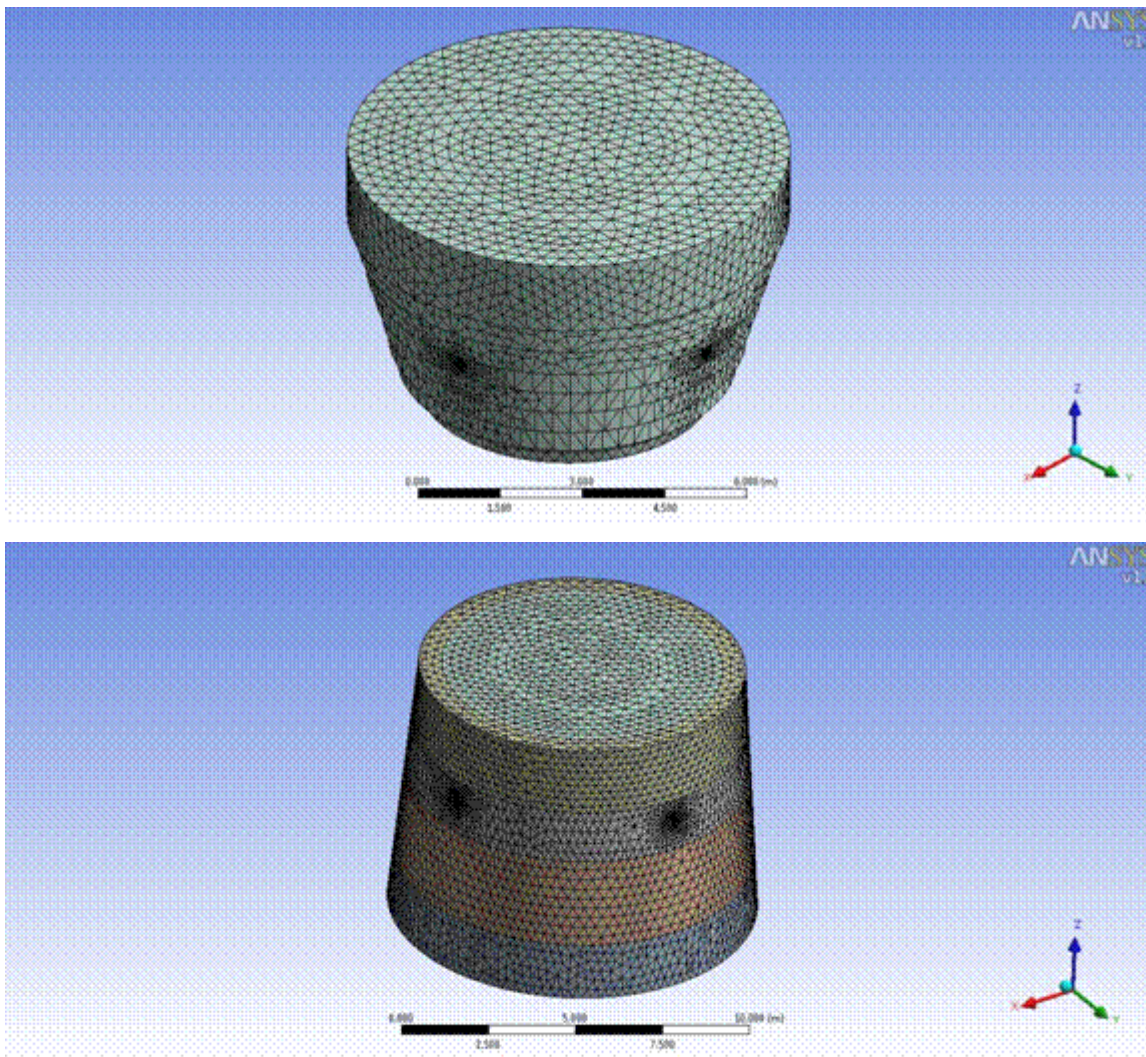


Figura 5.11 – malhas de integração para o caso real; superior mostrando a porção interna com o leito de coque e os dois furos de corrida; inferior, destacando as camadas de diferentes blocos de revestimento.

5.2.5 – O modelo de turbulência

No modelo $k-\varepsilon$ do CFX, k é a energia cinética de turbulência, definida como a variância das flutuações de velocidade; ε é a taxa de dissipação de turbulência nos redemoinhos (a taxa segundo a qual as velocidades de flutuação se dissipam).

São introduzidas duas novas variáveis no sistema de equações. Deste modo a

equação de conservação de quantidade de movimento passa a ser

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\eta_{ef} \nabla U) = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta_{ef} \nabla U)^T + B$$

onde B representa as forças de campo e η_{ef} é a viscosidade efetiva. A viscosidade efetiva se calcula como

$$\eta_{ef} = \eta_{molecular} + \eta_{turbulenta}$$

Esta última, viscosidade turbulenta, se estima a partir de

$$\eta_t = C_\eta \rho \frac{K^2}{\varepsilon}$$

sendo fornecidas equações para o cálculo de energia cinética de turbulência e taxa de dissipação,

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U K) = \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_K} \right) \nabla K \right] + P_K - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{K} (C_{\varepsilon 1} P_K - C_{\varepsilon 3} \rho \varepsilon)$$

P_K representa a produção de turbulência devida efeitos viscosos e de empuxo, sendo fornecida por

$$P_K = \eta_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\eta_t \nabla \cdot U + \rho K) + p_{kb}$$

e, finalmente, $C_\eta, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_K, \sigma_\varepsilon$ são constantes, escolhidas de modo que haja concordância do fluxo predito pelo modelo com um conjunto significativo de fluxos experimentais.

Dados específicos para estas simulações foram: diâmetro médio do coque, 0,03 m; fração volumétrica de vazios, 0,35; vazão de trabalho, 51,9 kg s⁻¹; viscosidade do gusa = 0.00715 Pa s ; densidade do gusa, 6000 kg m⁻³; condutividade térmica do gusa , 16,5 W m⁻¹ k⁻¹ ; condutividade térmica do coque, 2 W m⁻¹ k⁻¹ ; temperatura de entrada do gusa, 1450 °C; temperatura da carcaça, 70 C; temperatura de fusão do gusa, 1150 C, calor específico do gusa, 850 j kg⁻¹ k⁻¹ ; calor específico do blocos , 1260 j kg⁻¹ k⁻¹; permeabilidade , 6.0888e-7 m²; perda = 1768,71 m⁻¹.

Valores de condutividade e a distribuição de blocos ao longo do cadinho são mostrados na Tabela 5.1 e Figura 5.12.

	Unidades	Padrões	Massa grafitada para socagem	Blocos de carbono GAI	Blocos de carbono AI	Blocos de carbono R	Blocos de carbono A
Densidade aparente	g/cm ³	DIN 51918	1,75	1,7	1,63	1,57	>1,52
Porosidade	%	DIN 51918		21	19	17	15
Coefficiente de expansão térmica (20 a 200°C)		DIN 51909		2,5	3,3	3,3	
Modulo de ruptura	Mpa			7	11		6
Resistência a alcalis		ASTM C-454-77		U/LC	U/LC	U/LC	U/LC
Resistência a compressão	N/mm ²	DIN 51910	7	40	58	35	40
Condutividade térmica 100°C	W/mK	DIN51908	50	20	6	3	
400°C				17	8	5	5
800°C				15	11	7	7
Diâmetro médio dos poros		DFI*		0,15	0,06	5	10
Proporção de poros >1µ		DFI*		<5	<2	13	
Composição química	%	DIN 51011					
ASH			<8	<2		<7	<5
Carbono fixo				>77	>73	92	>92
Si total				>13	>13		
Al2O3				>7	>9		
					<2		

* Didier Research Institute

Tabela 5.1 – Propriedades físicas de alguns materiais do cadinho

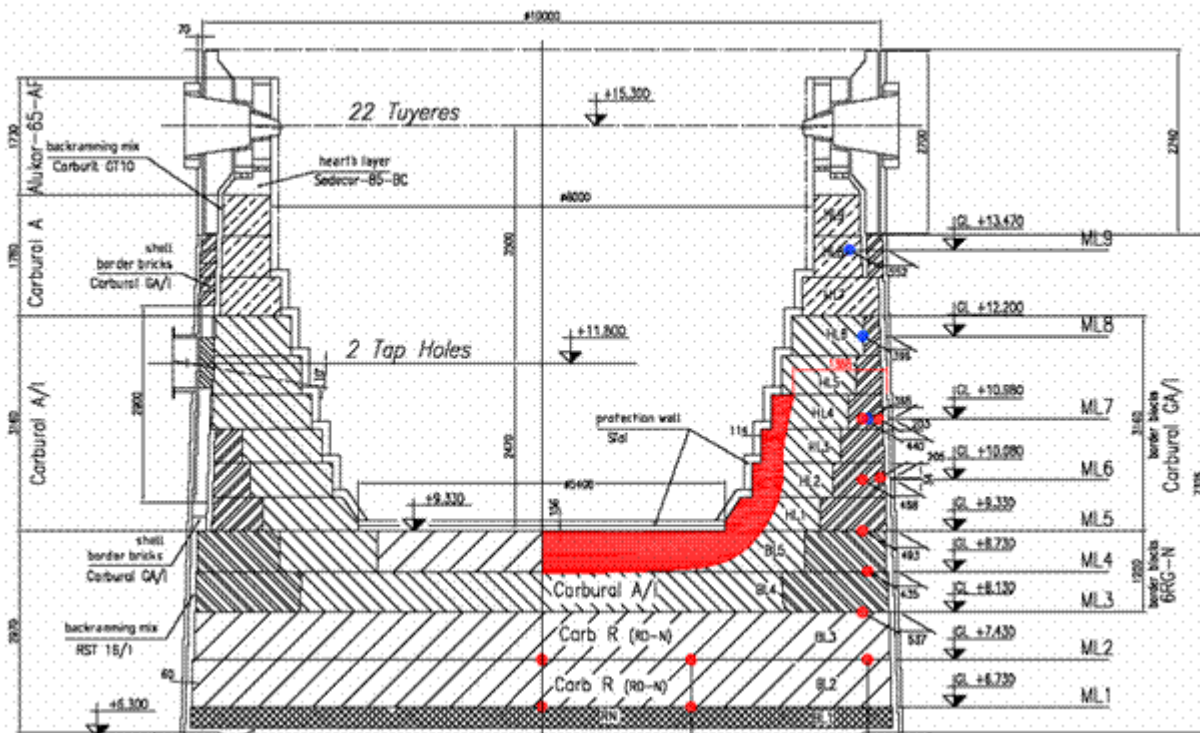


Figura 5.12. Distribuição de refratários no cadinho.

6 – Análise e discussão dos resultados

Os ensaios foram conduzidos em diferentes condições de permeabilidade, produtividade, aspersão de líquidos, posição relativa do homem morto (assentado ou flutuante), e ainda houve simulação da influência da presença de proteção de massa refratária no furo de corrida, também chamado de *cogumelo*.

Neste trabalho quando se refere à aspersão de líquidos normal, indica-se uma distribuição de líquido assim como mostrado na Figura 6.15 (a aspersão normal é periférica).

Para cada condição analisada foi feito uma série de 5 testes buscando verificar a manutenção do comportamento das curvas e foram utilizados valores médios para comparar diferentes condições.

Para caracterizar o estado de dispersão medido em cada condutivímetro, além da inspeção visual das curvas, optou-se por recolher os valores dos parâmetros seguintes:

- t_{min} – período de tempo requerido para que as primeiras quantidades de líquido com traçador atinjam o condutivímetro; tempos curtos sugerem fluxo preferencial junto a este condutivímetro.
- **pico** – valor máximo de voltagem(condutividade) detectada pelo sensor; em geral valores pequenos de tempo mínimo estão associados a altos valores de pico.
- t_{pico} – local(na escala de tempo) de ocorrência do pico.
- $t_{transição}$ – período de tempo transcorrido entre a primeira detecção de sal e a ausência definitiva do sinal de traçador junto ao sensor; valores altos do período de transição em geral indicam alto grau de dispersão, isto é fluxo não preferencial próximo a este sensor.

Uma das premissas deste trabalho é que os resultados inferidos de testes em modelos operados em regime permanente devem ser diferentes daqueles provindos do mesmo modelo, porém operado de modo a reproduzir o ciclo de drenagem.

As Figuras 6.1 a 6.3 exemplificam curvas típicas de adição de solução salina, na forma de pulso, sob condições de regime permanente (vazão de aspersão constante e igual à vazão de drenagem).

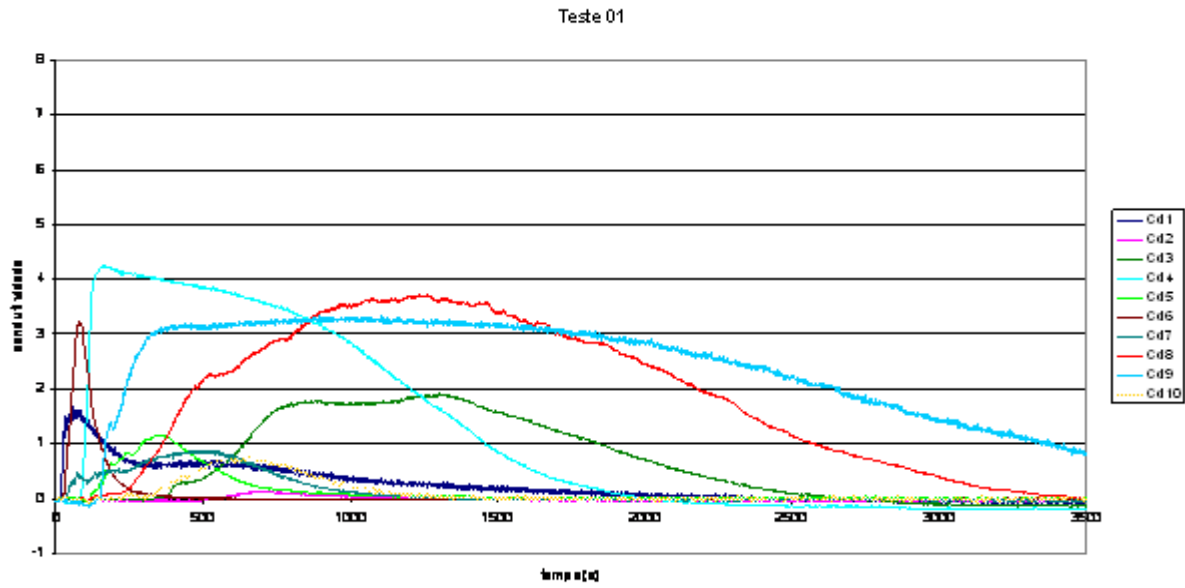


Figura 6.1 – Dispersão de traçador em regime permanente; homem morto sentado constituído de leito homogêneo de esferas de 19 mm; drenagem no furo 1

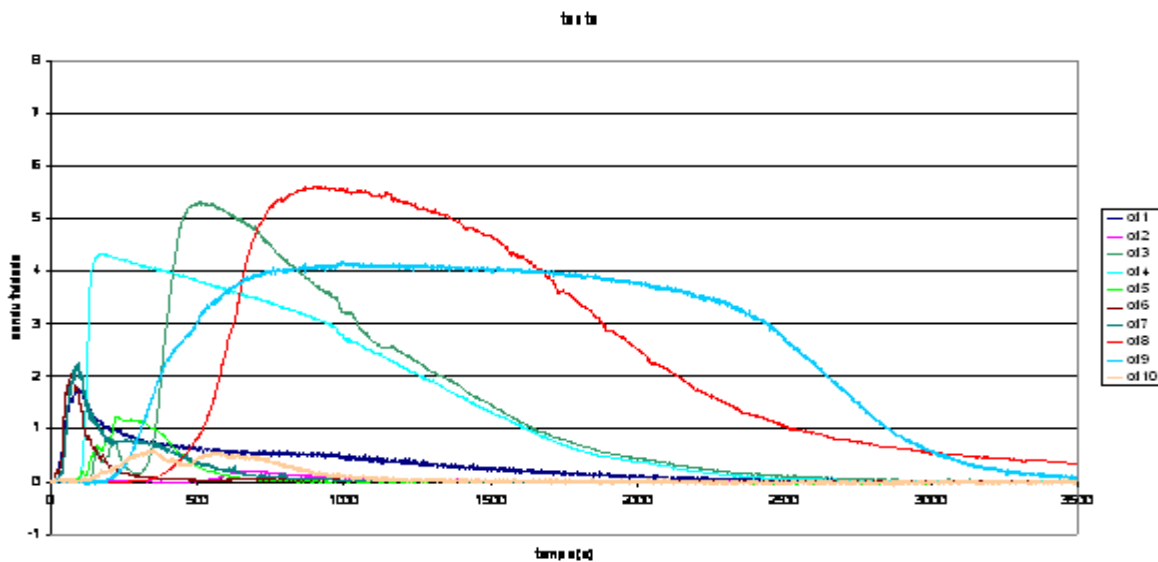


Figura 6.2 – Dispersão de traçador em regime permanente; homem morto sentado constituído de leito heterogêneo de esferas de 19 mm(periferia) e 25 mm(cilindro central); drenagem no furo 1.

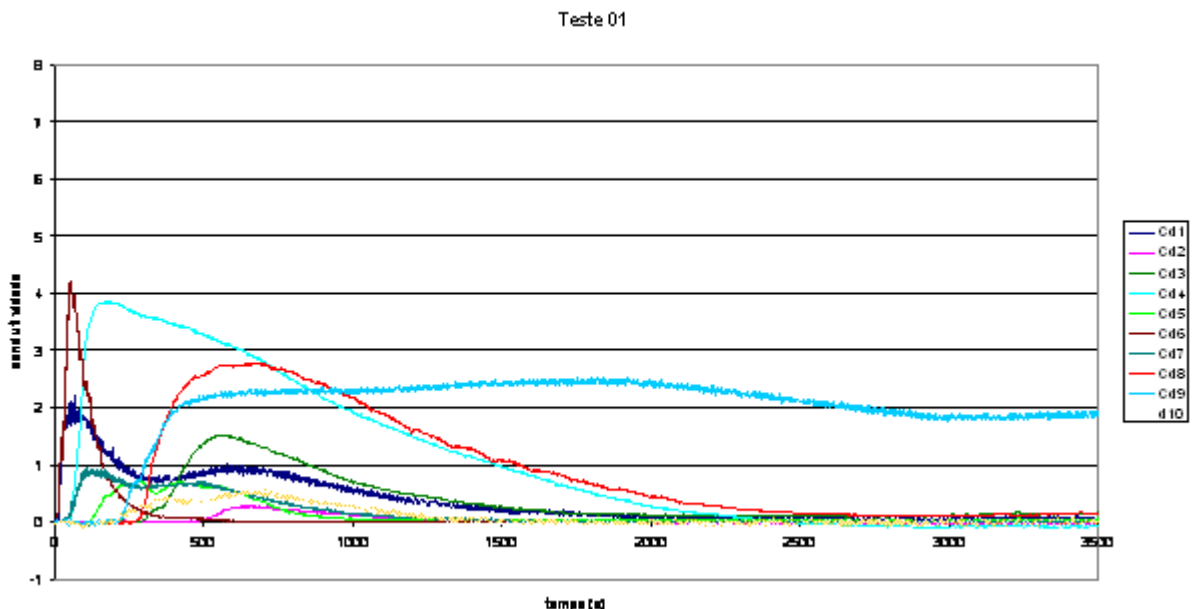


Figura 6.3 – Dispersão de traçador em regime permanente; homem morto flutuante constituído de leito homogêneo de esferas de 19 mm; drenagem no furo 1

Como se nota, em todos os casos, as curvas são unimodais e típicas de experimentos de determinação de curvas DTR (distribuição de tempos de residência): após um atraso, característico da posição do sensor no cadinho e do padrão de fluxo ditado pela permeabilidade do leito e do modo de aspersão de líquido, a condutividade sobe até um valor máximo e desce aos valores relativos à água pura. Nestes testes a drenagem foi mantida através do furo onde estava instalado o condutivímetro cd1; o outro furo permanecia obturado. Nota-se então diferença significativa dos tempos de resposta (em relação a cd1) evidenciando uma tendência de retenção de material no interior do leito poroso.

A seguir serão apresentados alguns resultados dos ensaios realizados sob o regime de transiência já definido, relativo à alternância de drenagem entre os dois furos de corrida. As diferenças são de fato significativas e o comportamento do fluido será melhor elucidado com a combinação das modelagens física e numérica empregadas.

6.1 – Ensaios com Homem Morto flutuante

6.1.1 – Ensaios aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida.

Os primeiros testes realizados visavam obter resultados de modelagem de fluxo no cadinho, sobre uma condição de distribuição granulométrica homogênea, uma distribuição de líquidos normal, sendo a produtividade normal de 3800ton/dia, na condição de homem morto flutuante.

Como se nota, Figuras 6.4 a 6.8, valores altos de concentração de sal são obtidos junto no condutivímetro 6, seguido pelo condutivímetro 1, 7 8 e 9. Além disso valores de t_{min} e $t_{transição}$ são menores para os condutivímetros 6, 7 e 1. Esta situação sugere fluxo periférico na região da rampa. Os outros condutivímetros só entram em contato com o traçador após significativa dispersão, de modo que os valores de condutividade são muito menores.

O condutivímetro 9 apresenta um comportamento bem particular, localizado no encontro da rampa com o fundo do cadinho e próximo ao furo de corrida 1, os valores de condutividade são oscilantes e apresentam valores de pico quando a corrida é feita no furo 1. Este comportamento oscilatório parece ser devido ao fato de que quando inicia-se a corrida a solução de maior concentração salina se desloca para a região próxima ao furo de corrida, e as porções superiores são renovadas com líquidos isentos de sal, levando a uma redução gradual dos valores de pico, quando se repete o ciclo no furo de corrida 1. O condutivímetro 8 tende a ter um comportamento semelhante ao cd 9, mas com valores de picos menores.

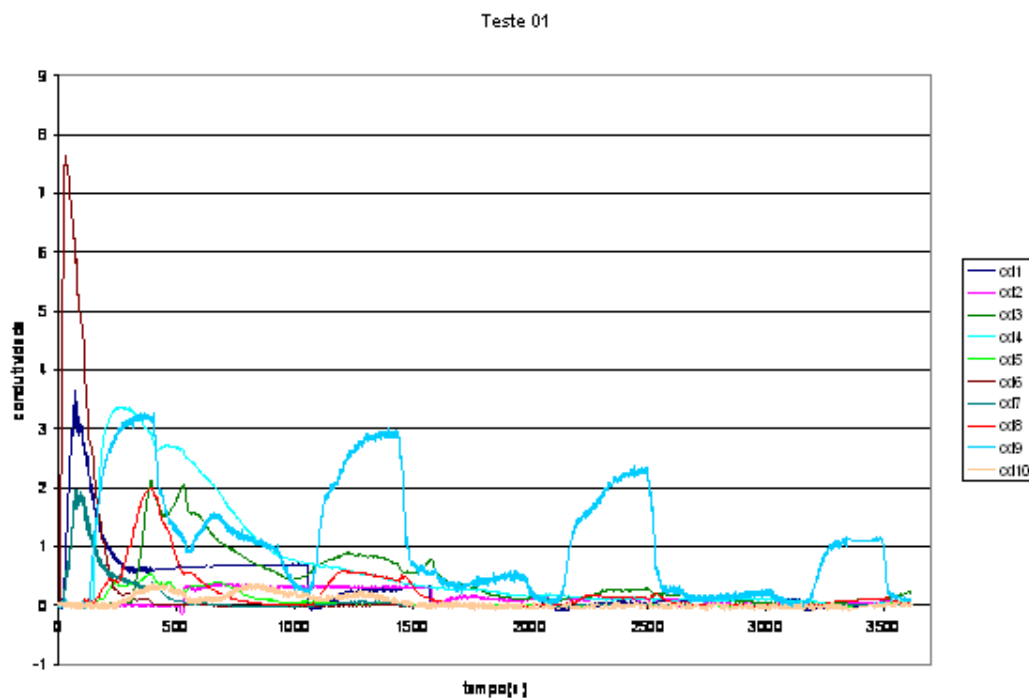


Figura 6.4 – Teste 01 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

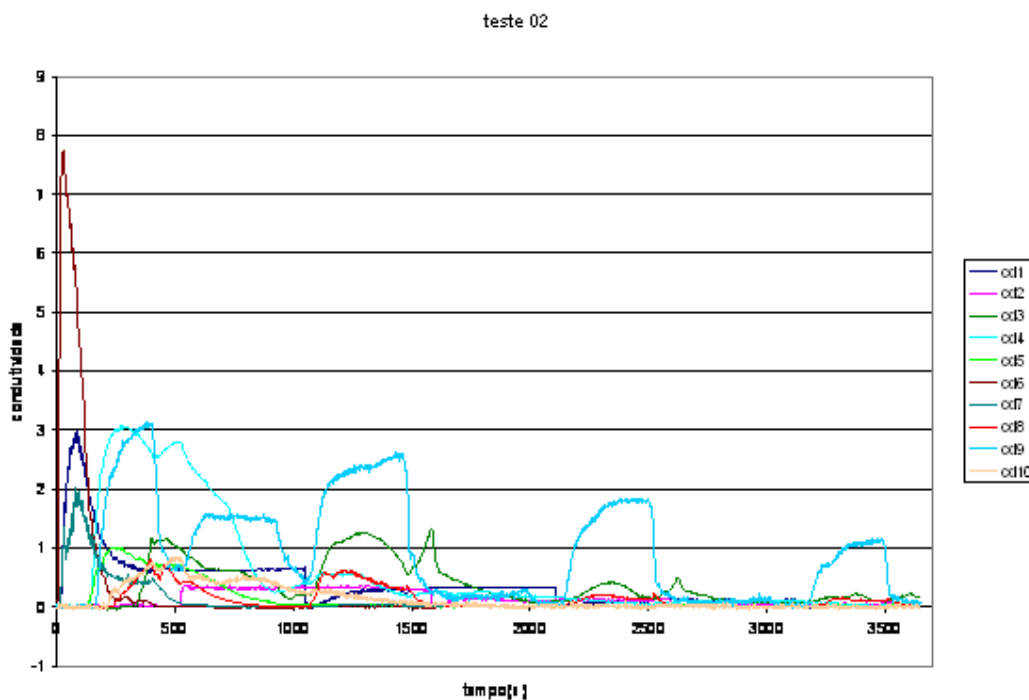


Figura 6.5 – Teste 02 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

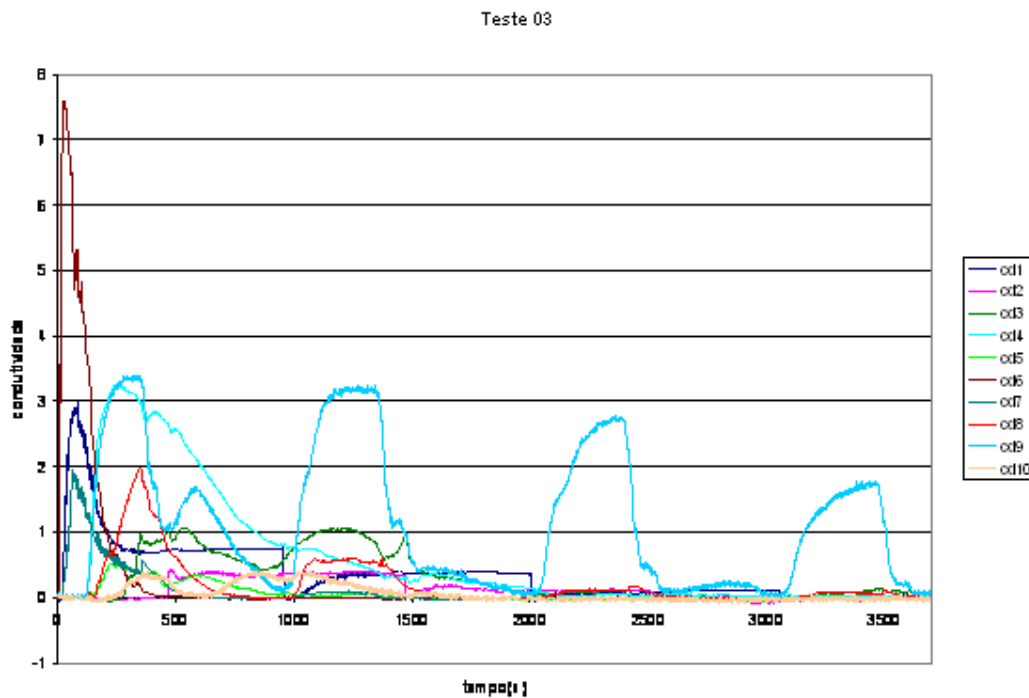


Figura 6.6 – Teste 03 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade. 3800ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

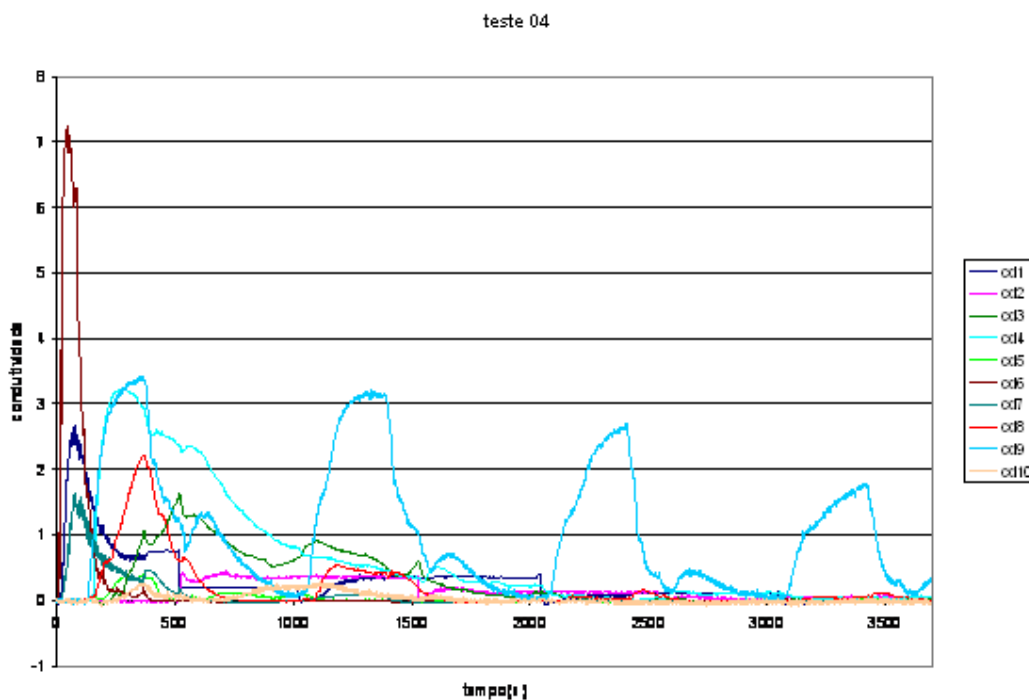


Figura 6.7 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade. 3800ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

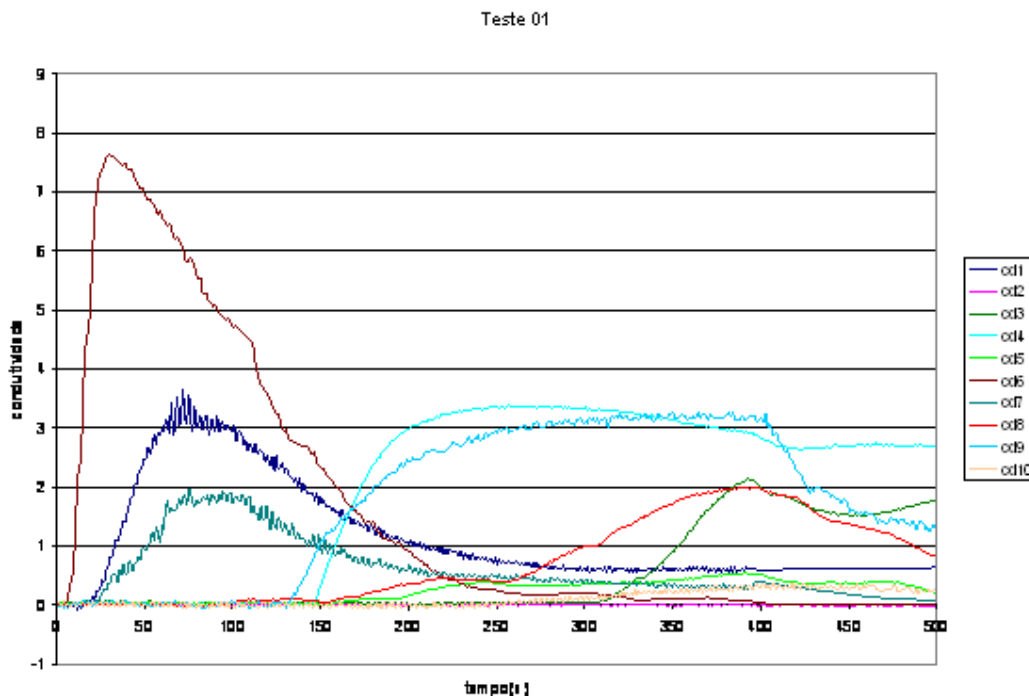


Figura 6.8 – Teste 1 zoom na região de início do teste

Existe alguma irrigação central, condutivímetro cd5, mas esta não é capaz de garantir fluxo central importante no Homem Morto. Deste modo se justificam os valores significativamente altos de tempo mínimo, determinado pelo condutivímetro cd3, localizado no centro e fundo do cadinho. Este só é atingido pelo fluxo periférico no fundo do cadinho, na direção radial. cd1 e cd2 representam os furos de corrida. O traçador é adicionado no instante de abertura do furo 1. O furo 2 só é acionado no meio do ciclo, sendo assim apresenta diferença de comportamento.

Uma câmera digital foi disposta debaixo do modelo, focalizando o fundo do cadinho. Anilina azul foi adicionada ao influxo, para fins de visualização. Como mostra a Figura 6.9 o fluxo é de fato periférico, junto à rampa do cadinho. A frente de dispersão do corante progride no espaço entre o homem morto, de fora para dentro, simetricamente em relação ao ponto central onde está locado o condutivímetro cd3.

Não parecem existir caminhos preferenciais, junto ao fundo do cadinho ou na região central do Homem Morto.

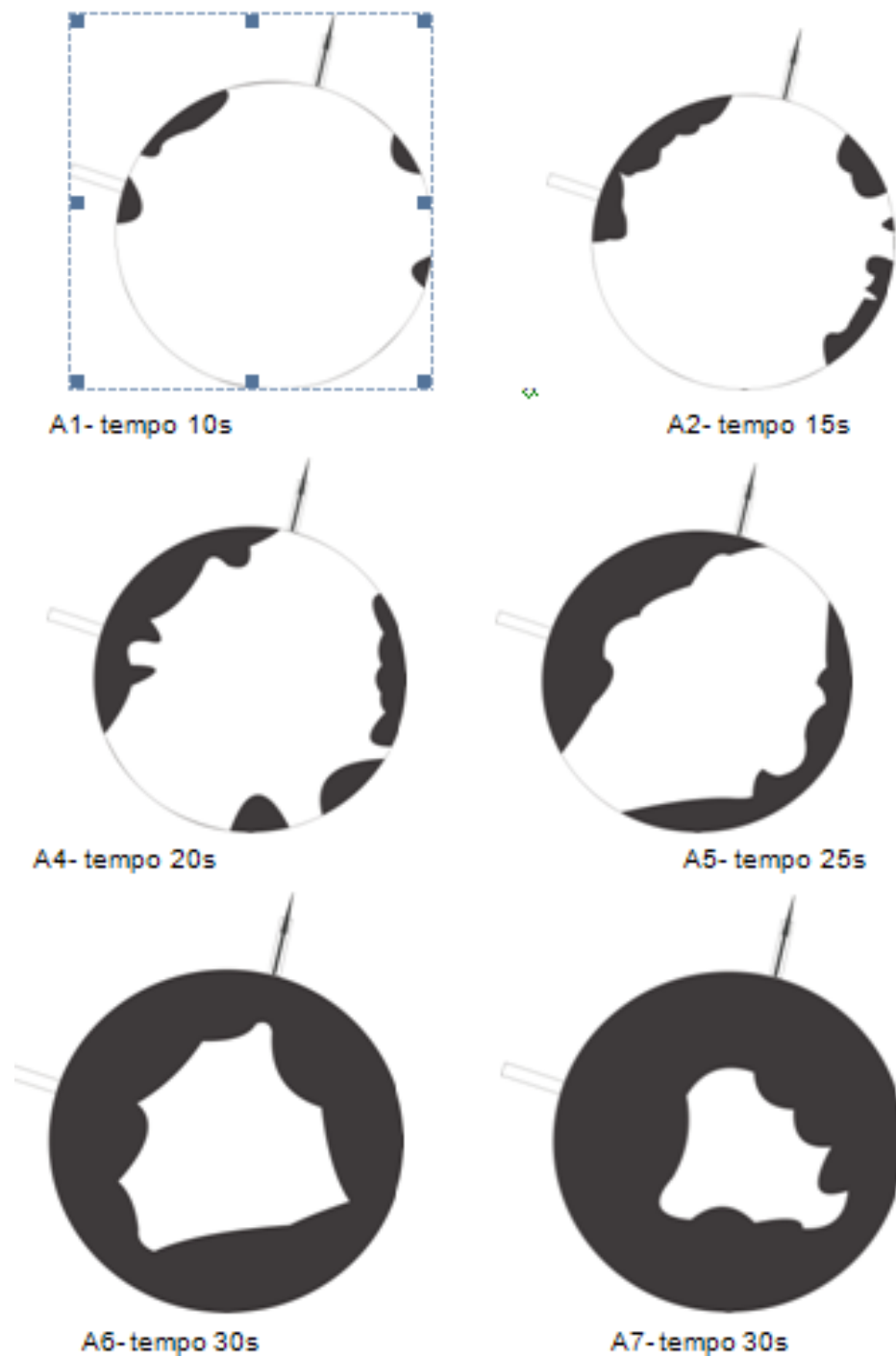


Figura 6.9 – teste de dispersão de corante leito com esferas de 19mm

Estes testes indicam distribuição totalmente periférica de fluxo; nota-se que o sal chega aos condutivímetros na seguinte ordem: cd6, cd1, cd7, cd8, cd9. Estes condutivímetros localizam-se sobre a rampa segundo uma vertical mostrada na Figura 6.10. Observa-se, também, que para o condutivímetro cd6 a transição é bem mais rápida que para os demais, pois suas respectivas curvas possuem os picos mais elevados e com transição bem mais rápida.

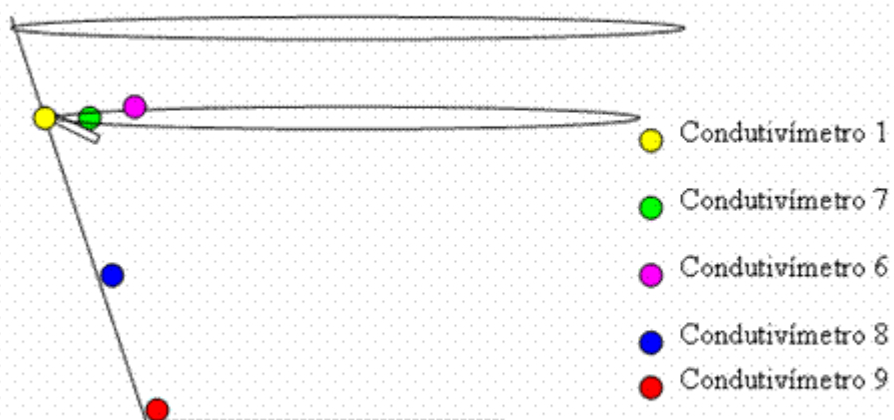


Figura 6.10 – Desenho esquemático da seqüência dos condutivímetros localizados na região da rampa ritmo

A Tabela 6.1 apresenta os valores de t_{min} , $t_{transição}$, t_{pico} e $de\ pico$ para cada condutivímetros nos cinco experimentos realizados nesta condição. Foi verificado que as curvas no geral apresentavam um comportamento semelhante e os valores para cada um dos parâmetros citados acima não apresentam grandes variações. Desta forma a média dos valores obtidos poderia ser utilizada como parâmetro de comparação dos resultados nas diferentes condições analisadas.

cd1				
	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
teste 01	21	3.55	74	1598
teste 02	14	2.99	84	3102
teste 03	20	2.99	83	3068
teste 04	17	2.67	76	3065
teste 05	11	2.75	85	2979
média	17	2.99	80	2762

cd2				
	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
teste 01	554	0.29	560	2103
teste 02	539	0.32	560	2126
teste 03	483	0.37	495	2055
teste 04	540	0.33	547	2019
teste 05	525	0.42	538	1985
média	528	0.35	540	2058

cd3				
	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
teste 01	327	2.06	397	2373
teste 02	348	1.08	418	2479
teste 03	287	1.04	554	1763
teste 04	235	1.53	524	1942
teste 05	270	0.92	680	2230
média	293	1.33	515	2157

cd4				
	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
teste 01	172	3.34	278	2288
teste 02	145	3.03	306	2355
teste 03	151	3.25	263	1999
teste 04	153	3.24	292	2102
teste 05	180	2.72	355	2320
média	160	3.12	299	2213

cd5				
	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
teste 01	193	0.43	410	819
teste 02	141	1	264	859
teste 03	151	0.56	257	783
teste 04	209	0.36	374	936
teste 05	175	0.45	363	1239
média	174	0.56	334	927

cd6				
	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
teste 01	6	7.5	33	430
teste 02	7	7.74	29.77	426
teste 03	4.5	7.54	35	434
teste 04	7	7.23	45	420
teste 05	7	6.54	34	400
média	6	7.31	35	422

cd7				
	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
teste 01	22	1.87	105	559
teste 02	15	2	77	645
teste 03	22	1.98	67	660
teste 04	20	1.6	100	583
teste 05	29	1.24	104	532
média	22	1.74	91	596

cd10					
$t_{\min}(s)$	pico1	$t_{\text{pico}} 1(s)$	pico 2	$t_{\text{pico}} 2(s)$	$t_{\text{transição}}$
274	0.3	441	0.32	859	1240
221	0.69	421	0.79	529	1379
267	0.35	392	0.38	879	1233
288	0.22	382	0.18	1087	1418
230	0.28	373	0.43	1093	1391
262.5	0.39	409	0.4175	839	1318

cd8									
	$t_{\min}(s)$	pico1	$t_{\text{pico}} 1(s)$	pico 2	$t_{\text{pico}} 2(s)$	pico3	$t_{\text{pico}} 3(s)$	pico4	$t_{\text{pico}} 4(s)$
teste 01	170	1.89	407	0.56	1240	0.17	2274		
teste 02	256	0.73	404	0.58	1224	0.19	2311	0.15	3321
teste 03	166	2	353	0.57	1274	0.14	2466	0.1	3499
teste 04	168	2.15	375	0.5	1210	0.15	2480	0.1	3487
teste 05	196	1.31	3.63	0.73	1171	0.14	2397	0.1	3434
média	191	1.62	309	0.59	1224	0.16	2386	0.11	3435

cd9												
	$t_{\min}(s)$	pico1	$t_{\text{pico}} 1(s)$	pico 2	$t_{\text{pico}} 2(s)$	pico3	$t_{\text{pico}} 3(s)$	pico4	$t_{\text{pico}} 4(s)$	pico5	$t_{\text{pico}} 5(s)$	$t_{\text{transição}}$
teste 01	144	3.26	402	1.5	693	2.9	1443	2.25	2499	1.08	3493	-
teste 02	188	3.08	404	1.55	651	2.52	1465	1.77	2506	1.07	3495	-
teste 03	140	3.35	354	1.61	606	3.15	1349	2.7	2400	1.72	3475	-
teste 04	133	3.3	376	1.25	658	3.1	1393	2.57	2414	1.75	3425	-
teste 05	152	2.77	365	1.14	662	2.96	1327	2.25	2353	1.45	3379	-
média	151	3.25	384	1.4775	652	2.92	1413	2.32	2455	1.41	3472	-

Tabela 6.1 – Tabela com valores de t_{\min} , $t_{\text{transição}}$, t_{pico} e de *pico* registrados nos ensaios na condição de Homem morto flutuante, aspensão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

6.1.2 – Ensaio aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3000ton/dia e sem proteção no furo de corrida.

Estes ensaios foram realizados mantendo as mesmas condições iniciais do teste anterior, apenas mudando a produtividade que antes era de 3800ton/dia e agora de 3000ton/dia. Esta mudança de produtividade é simbolizada pela mudança da vazão de alimentação de 3.3 lpm para 2.6 lpm e drenagem de 4lpm para 3.2lpm.

Como citado a vazão de entrada de 2,6 lpm corresponde a uma taxa de produção de 3000 toneladas ao dia, indicando uma situação de perda severa de produção. A redução da taxa de extração restabelece a duração do ciclo de drenagem. Portanto, do período de vazamento. Neste caso procurou-se analisar a influência da mudança de produtividade no perfil de fluxo de líquidos na região interna do cadinho.

Nas Figuras 6.11 a 6.14 são apresentadas algumas curvas dos ensaios obtidos em laboratório, para esta condição.

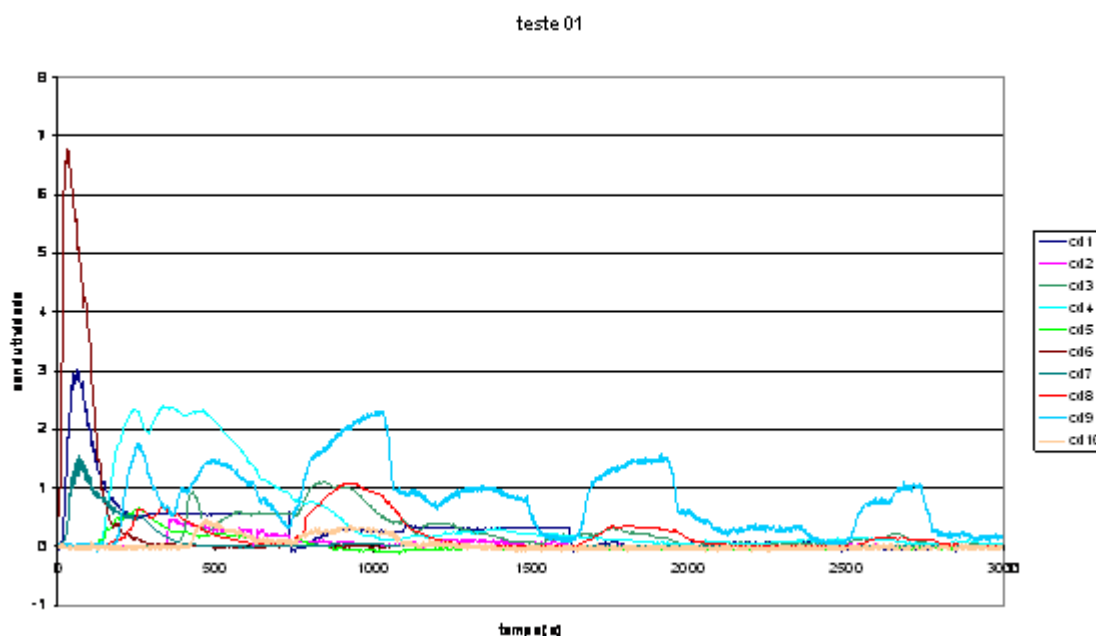


Figura 6.11 – Teste 01 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

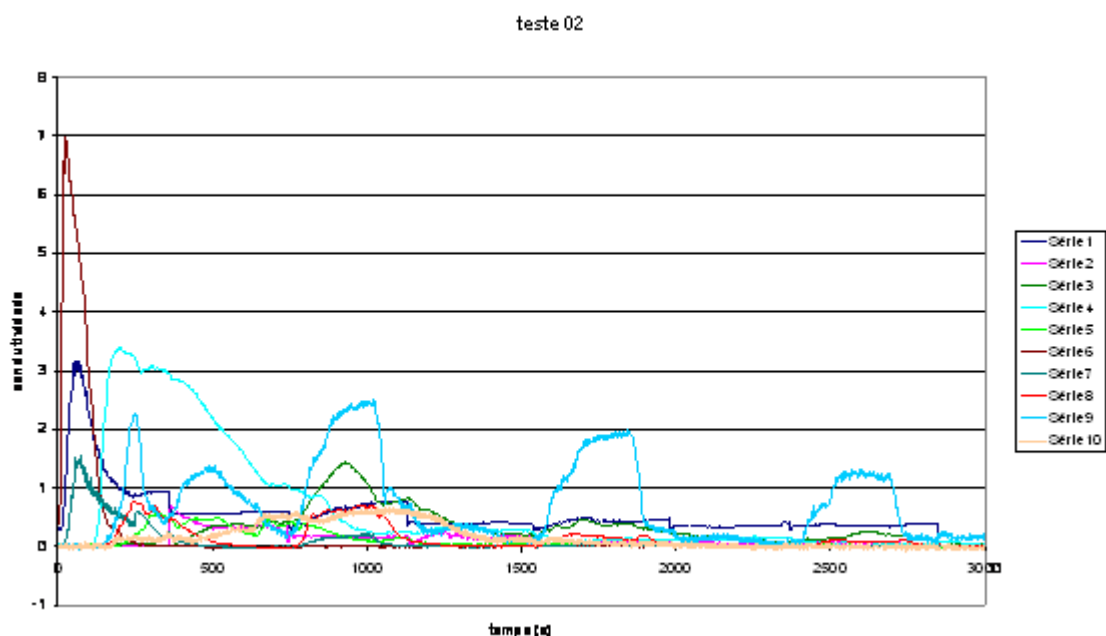


Figura 6.12 – Teste 02 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

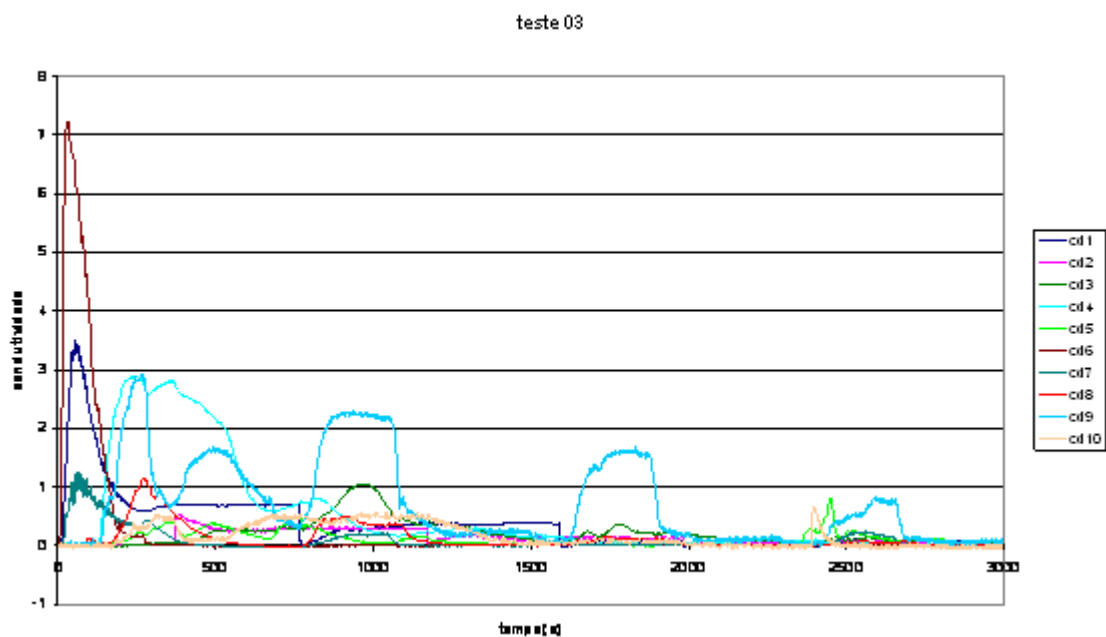


Figura 6.13 – Teste 03 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 300ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

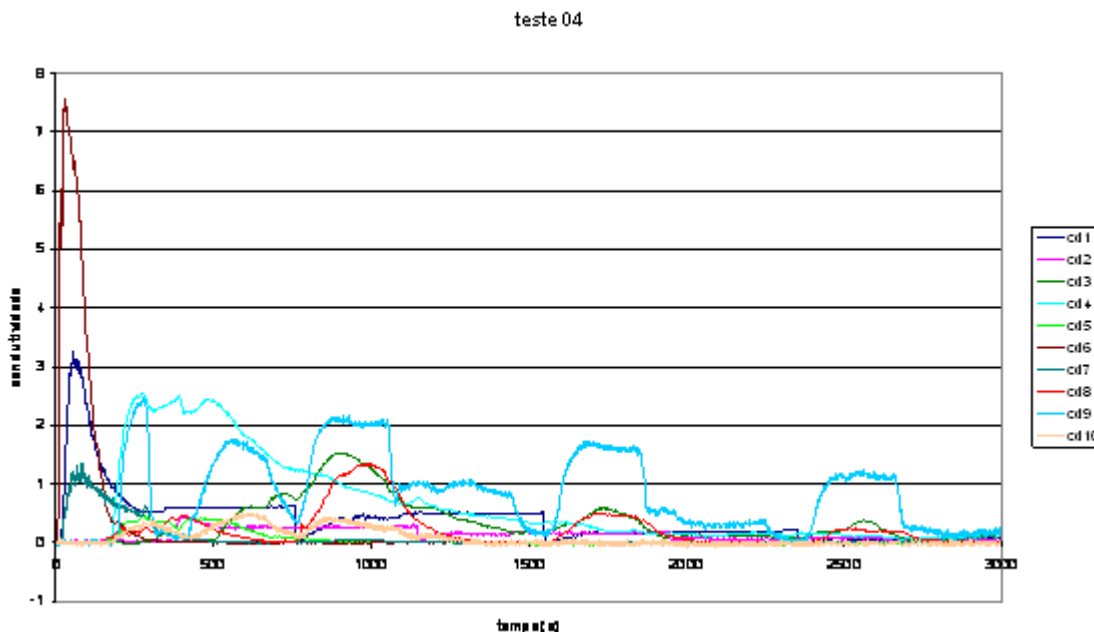


Figura 6.14 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

Foi verificado que nesta condição de redução da produtividade as curvas apresentam um comportamento semelhante ao anterior. Para verificação dos dados foi feita comparações entre os valores médios de t_{min} , $t_{transição}$, t_{pico} e de $pico$.

A Tabela 6.2 sintetiza, de forma comparativa, os resultados, em termos de médias. Os sufixos A e B indicam, respectivamente, “situação de produção nominal” e “situação de produção reduzida e intervalo de vazamento reduzido”. Os dados que possibilitariam comparação mais confiável são aqueles de sinal mais forte, o que corresponde a tempos mínimos menores e valores maiores de pico. Como se nota os condutímetro não indicam, em função das mudanças no ciclo de produção e vazamento, mudanças no padrão de fluxo no cadinho.

	$t_{\min}(s)$	pico1	$t_{\text{pico 1}}(s)$	pico 2	$t_{\text{pico 2}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd10A	245	0.46	535	0.44	984	1133
Cd10B	256	0.37	402	0.42	889	1332

	$t_{\min}(s)$	pico1	$t_{\text{pico 1}}(s)$	pico 2	$t_{\text{pico 2}}(s)$	pico3	$t_{\text{pico 3}}(s)$	pico4	$t_{\text{pico 4}}(s)$	pico5	$t_{\text{pico 5}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd9A	172	2.27	270	1.54	525	2.24	1041	1.63	1881	1.03	2669	-
Cd9B	151	3.15	360	1.41	654	2.93	1395	2.31	2434	1.41	3453	-

	$t_{\min}(s)$	pico1	$t_{\text{pico 1}}(s)$	pico 2	$t_{\text{pico 2}}(s)$	pico3	$t_{\text{pico 3}}(s)$	pico4	$t_{\text{pico 4}}(s)$
Cd8A	163	0.72	306	0.89	954	0.29	1741	0.13	2560
Cd8B	191	1.62	309	0.59	1224	0.16	2386	0.11	3435

	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd7A	19	1.4	74	730
Cd7B	22	1.74	91	596

	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd6A	6	7.11	31	299
Cd6B	6	7.31	35	422

	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd5A	180	0.53	409	882
Cd5B	174	0.56	334	927

	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd4A	143	2.74	248	2104
Cd4B	160	3.12	299	2213

	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd3A	347	1.27	919	2457
Cd3B	293	1.33	515	2157

	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd2A	376	0.5	366	1407
Cd2B	528	0.35	540	2058

	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd1A	14	3.19	62	2109
Cd1B	17	2.99	80	2762

Tabela 6.2 – Valores médios comparativos para as situações, A = “situação de produção nominal” e B = “situação de produção reduzida e intervalo de vazamento reduzido” na condição de homem morto flutuante.

6.1.3 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19 & 25 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida.

Neste ensaio procurou-se mudar as condições de permeabilidade do leito adicionando-se na região do homem morto esferas com diâmetro de 25 mm. Criou-se um cilindro com o diâmetro de 35 cm, onde foi concentrado as esferas de 25mm, a extremidade do leito foi preenchida com esferas de 19mm, tornando assim a região central do homem morto mais permeável.

Foi feito novamente um ensaio para verificação da aspersão de líquidos na região superior do cadinho, desta vez foram coletadas amostras em dois eixos perpendiculares, buscando verificar a simetria da distribuição dos líquidos, como mostrado na Figura 6.15.

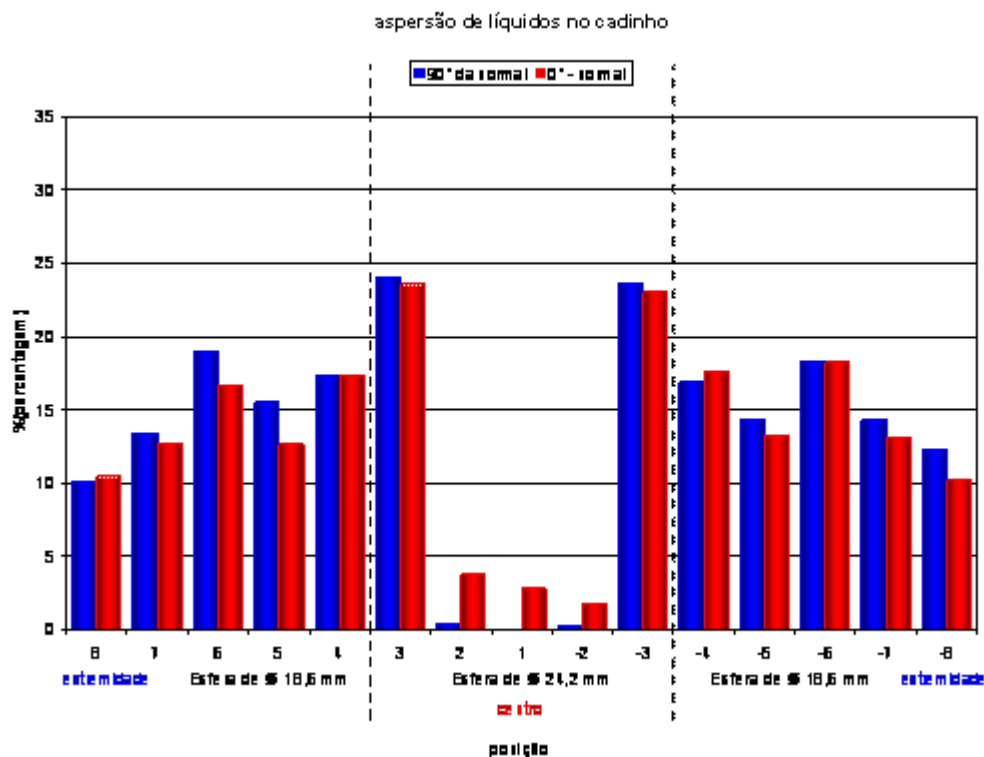


Figura 6.15 – aspersão normal de líquidos segundo dois eixos normais na parte superior do cadinho

A mudança de permeabilidade no leito influencia diretamente no perfil de fluxo interno, neste caso como as esferas de diâmetro maior estavam localizadas na porção central do homem morto houve uma facilitação na percolação de líquidos nesta região.

Como mostrado nas Figuras 6.16 a 6.20 as curvas de condutimetria para esta nova condição apresentam um comportamento diferente quando ao anterior. Os condutivímetros 6 e 7 que antes apresentavam altos valores de pico, agora apresentam valores modestos porém mantendo os mesmos valores para t_{\min} . Já os condutivímetros 8 e 9 tiveram um aumento no valor de pico, e mantiveram o mesmo

comportamento sem uma transição bem definida. O comportamento dos condutivímetros 8 e 9 sugere que naquela região em que estão localizados há uma contribuição de fluxos tanto da região periférica quanto do fluxo proveniente da parte central, sendo fluxo proveniente da parte central foi facilitado pelo aumento da permeabilidade naquela região.

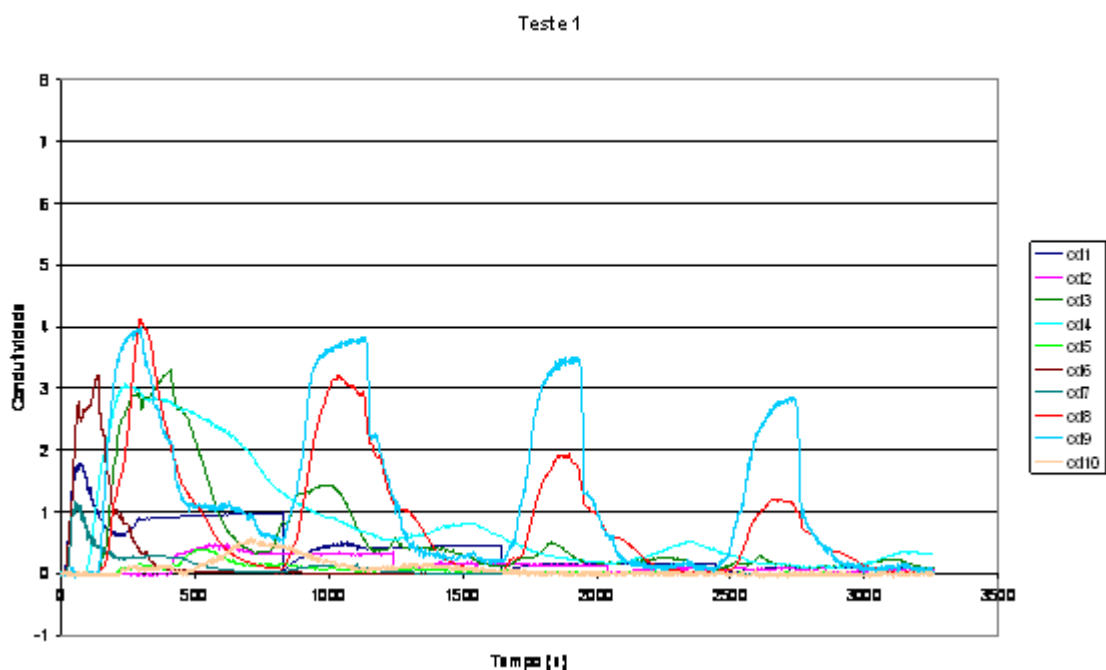


Figura 6.16 – Teste 01 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 & 25 mm e sem proteção no furo de gusa

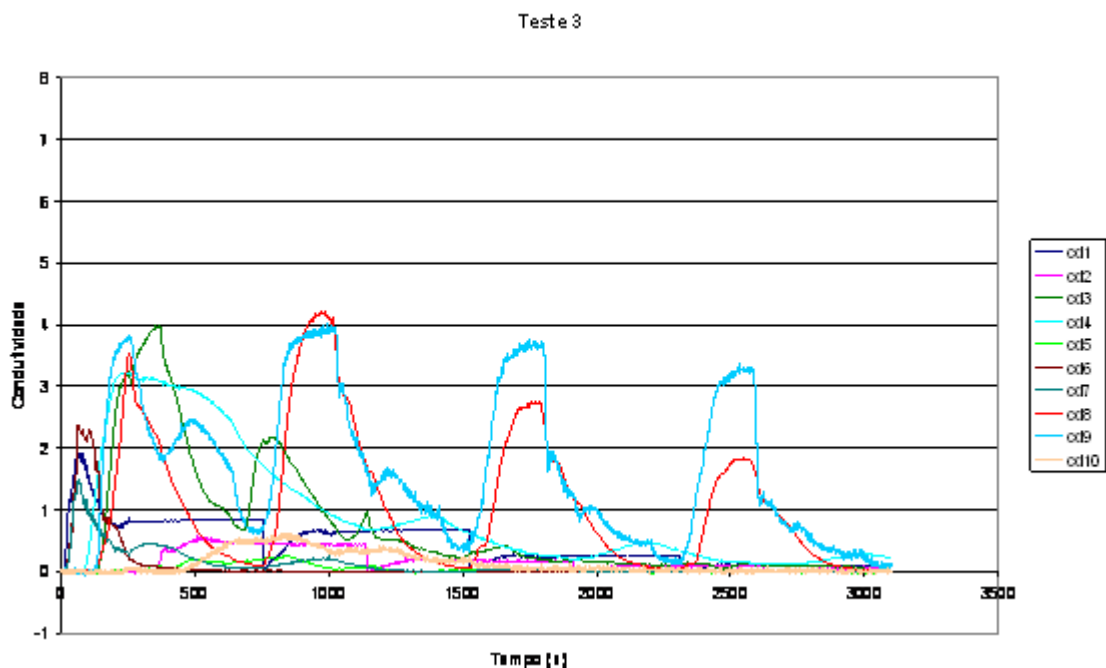


Figura 6.17 – Teste 03 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 & 25 mm e sem proteção no furo de gusa

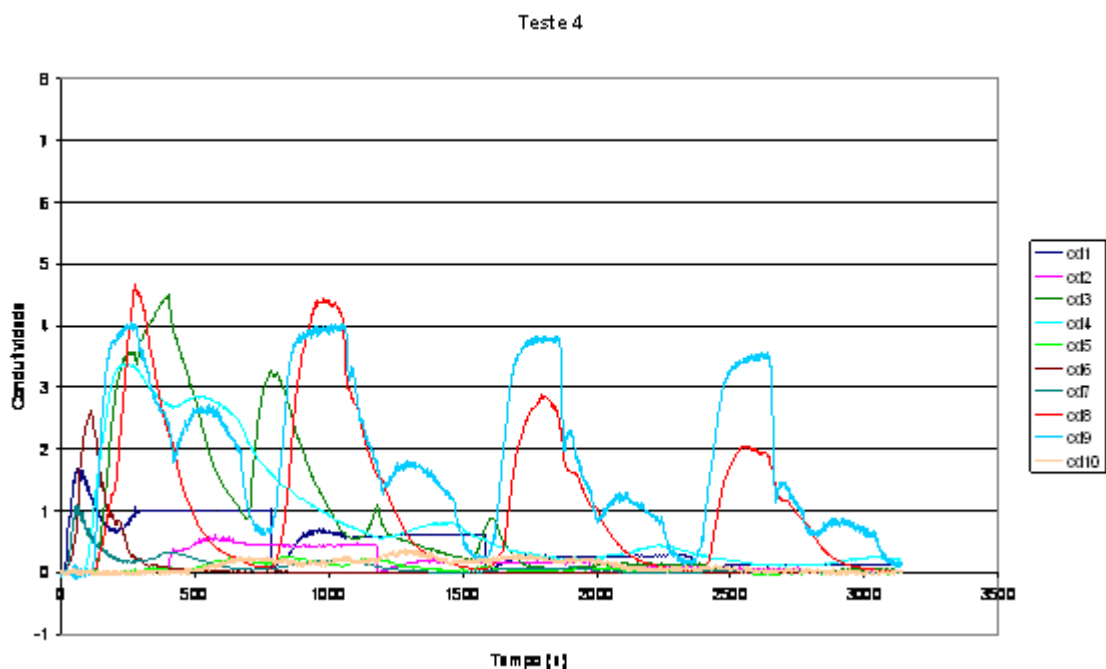


Figura 6.18 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 & 25 mm e sem proteção no furo de gusa

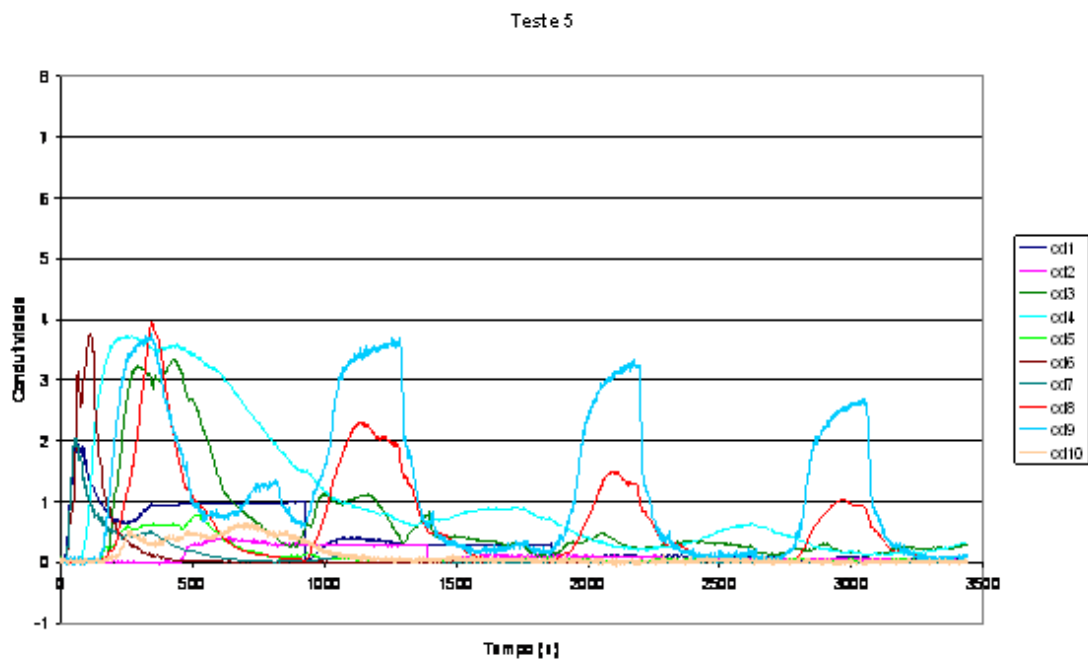


Figura 6.19 – Teste 05 Homem morto flutuante, aspersion normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 &25 mm e sem proteção no furo de gusa

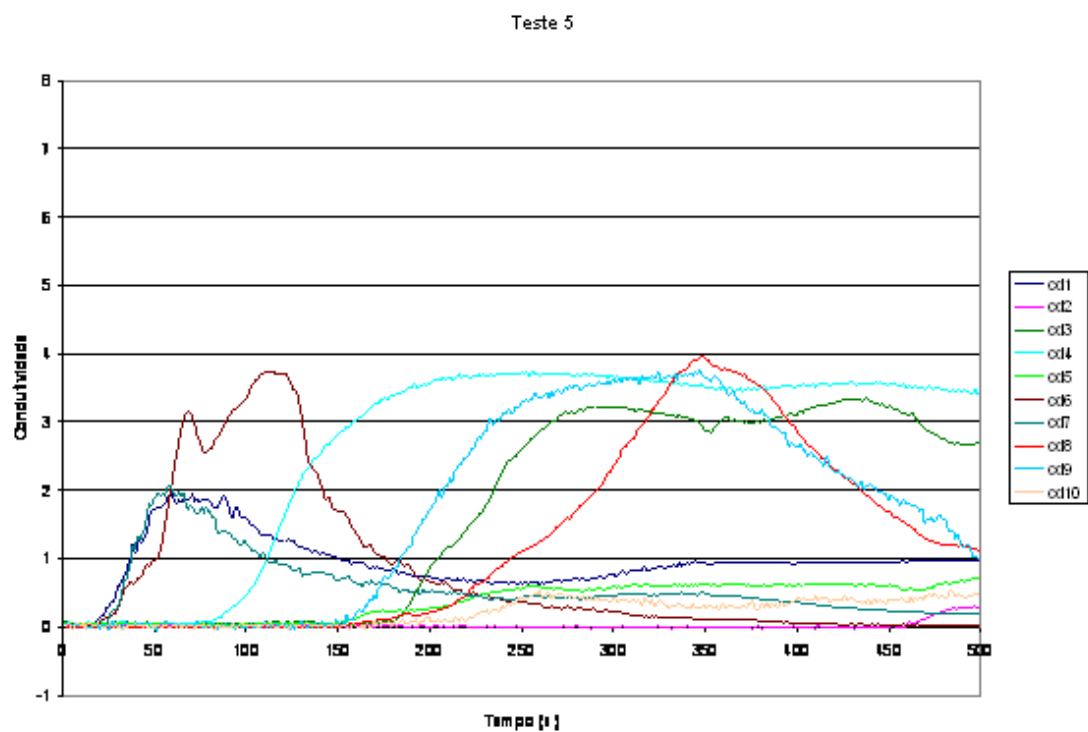


Figura 6.20 – Teste 5 zoom na região de início do teste

O aumento da permeabilidade, na parte central do cadinho, provocou um aumento da irrigação central; apesar dos condutímetro cd5 e cd10, localizados no eixo central do cadinho, não apresentarem uma grande alteração em seus valores de t_{\min} e valores de pico, os condutímetro cd3 e cd4 tiveram seus t_{\min} reduzidos e um aumento nos valores de pico. Quando analisados separadamente os condutímetro cd4 e cd9, ambos localizados no fundo do cadinho, sendo o cd4 a meio raio e o cd9 no encontro da rampa, o cd4 apresentam um t_{\min} menor que cd9 nos experimentos realizados. Estes resultados indicam que o fluxo central atinge o condutímetro cd4 mesmo antes do fluxo periférico, embora o fluxo de líquidos nesta região se dá pela soma dos dois.

Novamente a câmera digital foi disposta debaixo do modelo, focalizando o fundo do cadinho. Anilina azul foi adicionada ao influxo, para fins de visualização. A Figura 6.21 apresenta uma seqüência de fotos tiradas da filmagem, que mostra de fato a influencia o aumento da permeabilidade na parte central altera significativamente o fluxo, caracterizado pelo um aumento da velocidade do líquido no interior do cadinho e pela contribuição de fluxos tanto periféricos como proveniente da parte central. Na ultima condição anterior o corante demorava cerca de 60s para cobrir totalmente o fundo do cadinho, com o aumento da permeabilidade este tempo caiu pela metade, o que representa o aumento da velocidade de líquidos no interior do cadinho.

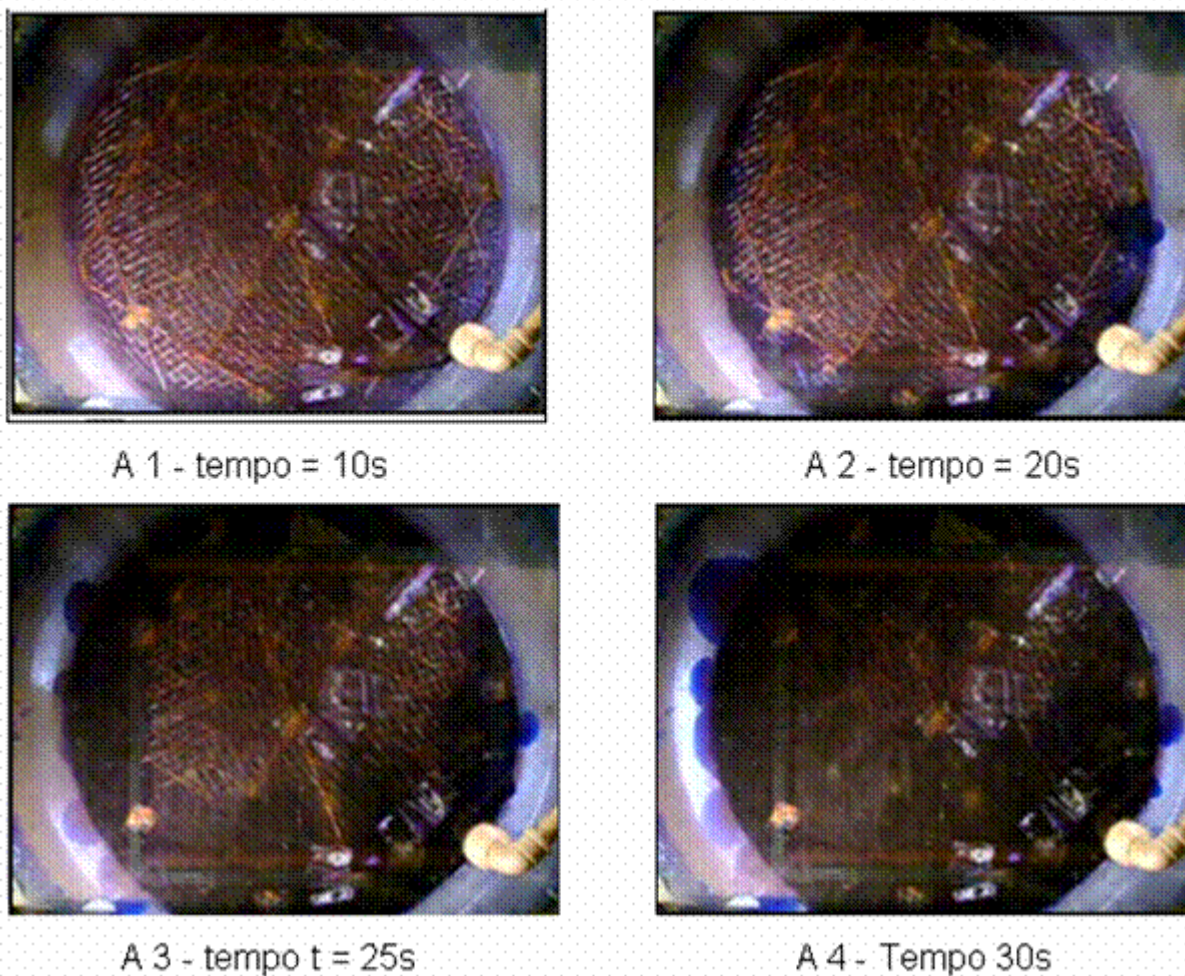


Figura 6.21 – Ensaio de dispersão de corante com o leito com esferas de 19 e 25mm

6.1.3.1 – Comparação de resultados na condição Leito flutuante, sem proteção no furo de corrida, Produção de 3800ton leito de 19 x 19 & 25mm

A Tabela 6.3 sintetiza, de forma comparativa, os resultados, em termos de médias dos valores de t_{\min} , t_{pico} , $t_{\text{transição}}$ e valor de pico. Ambas as condições A e B apresentam-se leito flutuante, produção nominal de 3800ton/dia, sendo a condição A com leito de esferas de 19mm e a condição B leito de esferas 19 & 25 mm. Como se nota, os condutímetro indicam, em função das mudanças no ciclo de permeabilidade, mudanças no padrão de fluxo no cadinho. Os condutímetro cd9 e cd8 tiveram seus valores de pico aumentados, porem mantendo o mesmo valor

para t_{\min} e tempos de pico. O condutivímetro cd6 teve seu valor de pico reduzido, já os condutivímetros 3 e 4 tiveram seus valores de t_{\min} reduzido, sendo que o 3 teve um aumento considerável do valor de pico. O que sugere o aparecimento de caminhos preferências na porção central do homem morto devido ao aumento da permeabilidade nesta região.

		cd10				
	$t_{\min}(s)$	pico1	$t_{\text{pico}1}(s)$	pico2	$t_{\text{pico}2}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd.10A	256	0,37	402	0,42	889	1332
Cd.10B	325,6	0,602			873	1852,2

		cd9										
	tmin(s)	pico1	$t_{\text{pico}1}(s)$	pico2	$t_{\text{pico}2}(s)$	pico3	$t_{\text{pico}3}(s)$	pico4	$t_{\text{pico}4}(s)$	pico5	$t_{\text{pico}5}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd.9A	151,4	3,152	380,2	1,41	654	2,93	1395,4	2,308	2434,4	1,414	3453,4	-
Cd.9B	151,6	3,478	292,4	1,64	630,8	3,56	1107,2	3,244	1900,4	2,78	2706,8	-

		cd8							
	$t_{\min}(s)$	pico1	$t_{\text{pico}1}(s)$	pico2	$t_{\text{pico}2}(s)$	pico3	$t_{\text{pico}3}(s)$	pico4	$t_{\text{pico}4}(s)$
Cd.8A	191,2	1,62	308,526	0,588	1223,8	0,158	2385,6	0,1125	3435,25
Cd.8B	151,6	3,48	292	1,64	631	3,56	1107	3,24	1900

		cd7			
	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$	
Cd.7A	21,6	1,74	90,6	595,8	
Cd.7B	20,8	1,30	62,4	570,6	

		cd6			
	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$	
Cd.6A	6,3	7,31	35,354	422	
Cd.6B	21,6	2,79	103,2	348	

		cd5			
	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$	
Cd.5A	173,8	0,56	333,6	927,2	
Cd.5B	185	0,47	644,4	1113,6	

		cd4							
	$t_{\min}(s)$	pico1	$t_{\text{pico}1}(s)$	pico2	$t_{\text{pico}2}(s)$	pico3	$t_{\text{pico}3}(s)$	$t_{\text{transição}}$	
Cd.4A	160,2	3,12	298,8					2212,8	
Cd.4B	101,6	3,09	296,2	0,858	1509,2	0,54	2332,6	-	

		cd3			
	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$	
Cd.10A	293,4	1,33	514,6	2157,4	
Cd.10B	159,8	3,40	379,6	1899,2	

		cd2			
	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$	
Cd.2A	528,2	0,35	540	2057,6	
Cd.2B	412,6	0,48	559,4	1652,4	

		cd1			
	$t_{\min}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$	
Cd.1A	16,6	2,99	80,4	2762,4	
Cd.1B	16	1,67	67,4	2335,2	

Tabela 6.3 – Comparação leito esferas de 19mm X esferas 19&25mm 3800 ton (Condição A –Leito flutuante- sem proteção no furo de gusa. Prod.3800ton/dia.19mm, Condição B -Leito flutuante- sem proteção no furo de gusa. Prod.3800ton/dia.19&25mm).

6.1.4 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19 & 25 mm, produtividade de 3000ton/dia e sem proteção no furo de corrida.

Foi realizada também nesta condição uma simulação de perda severa de produção, reduzindo a produção diária para 3000 ton/dia as curvas de condutividade permaneceram praticamente inalteradas, sendo o comportamento semelhante a condição de produtividade normal no leito de maior permeabilidade. As Figura 6.22 a 6.25 mostram alguns destes resultados.

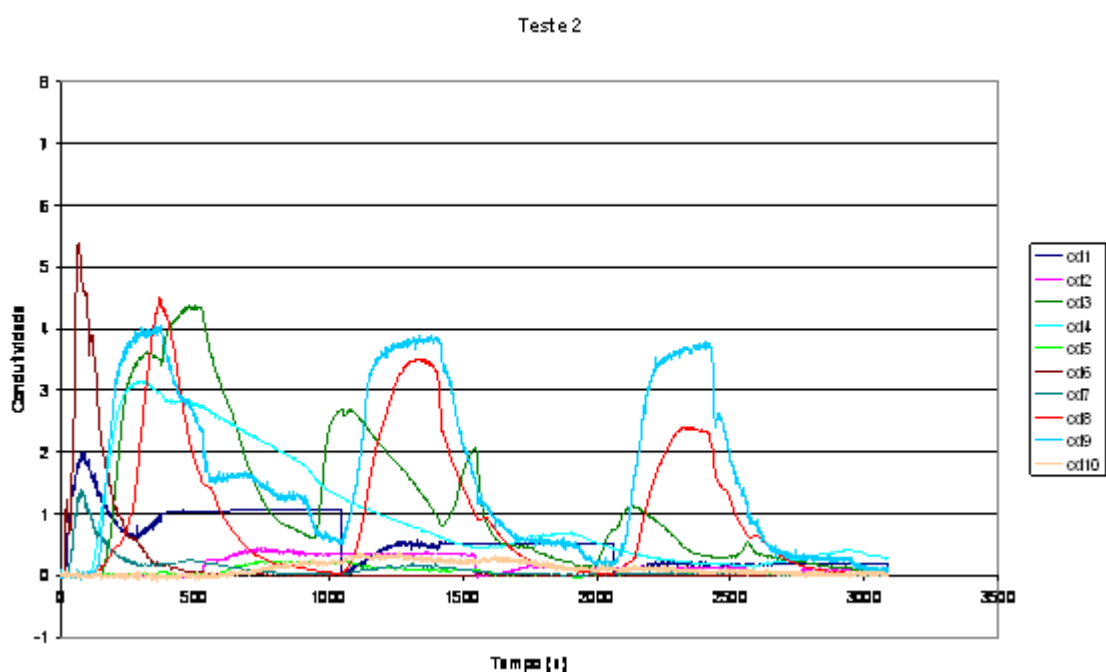


Figura 6.22 – Teste 02 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 &25 mm e sem proteção no furo de gusa

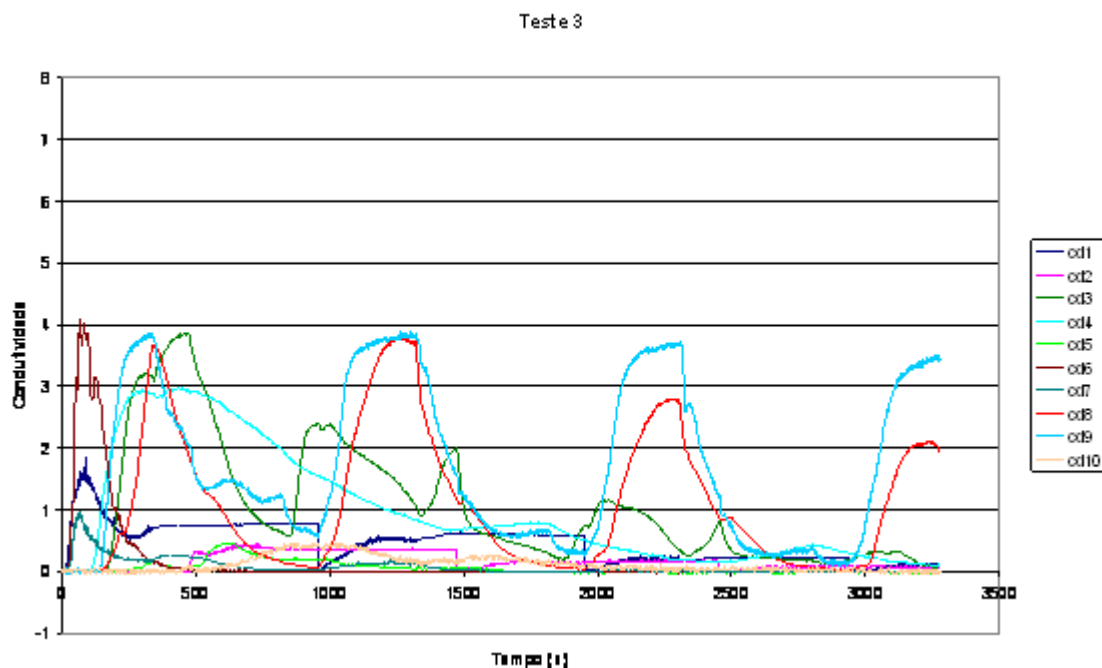


Figura 6.23 – Teste 03 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 &25 mm e sem proteção no furo de gusa

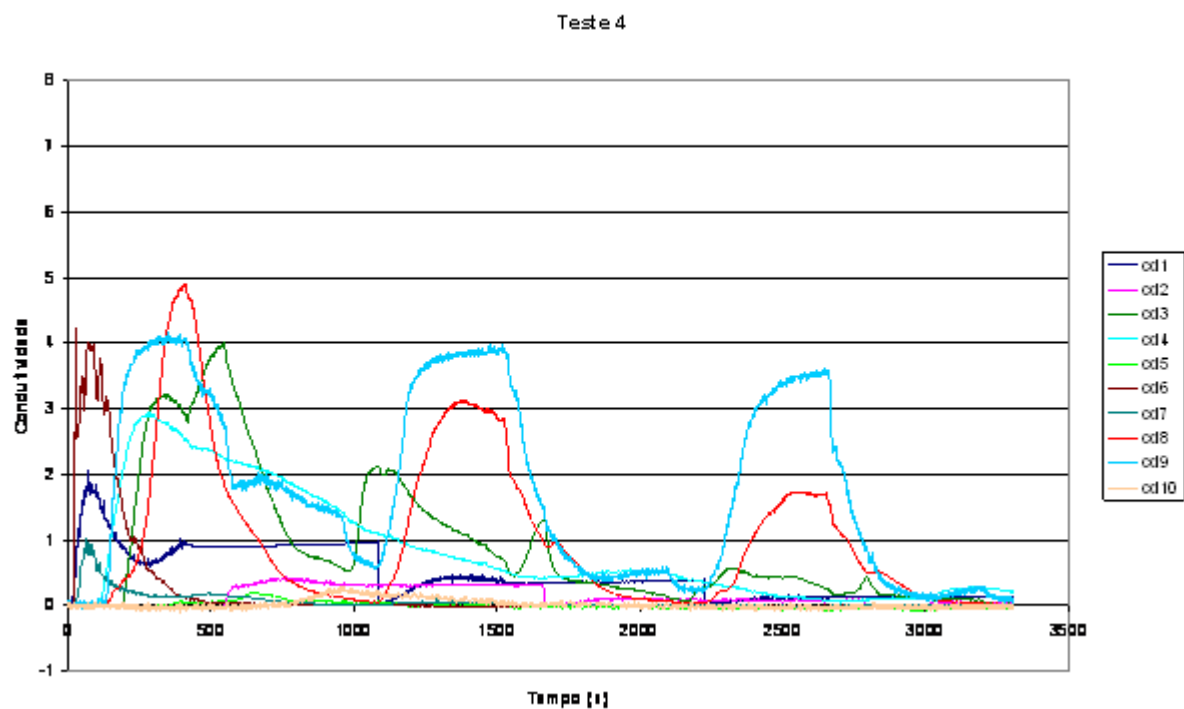


Figura 6.24 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 &25 mm e sem proteção no furo de gusa

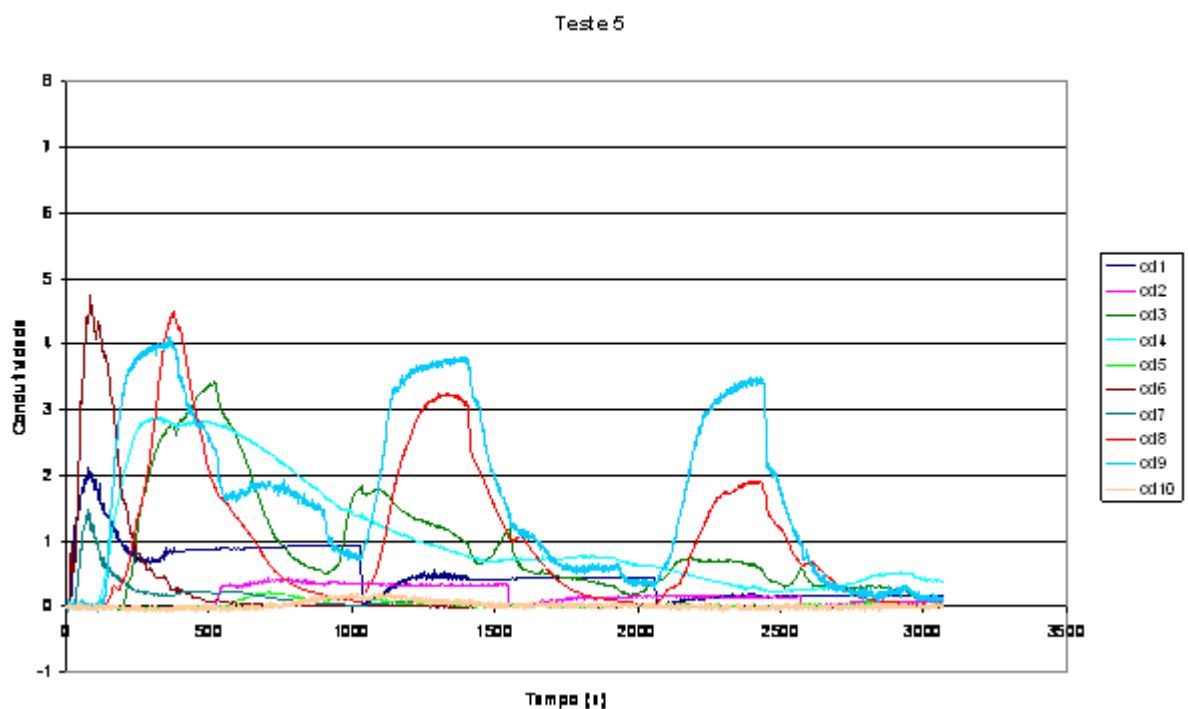


Figura 6.25 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 & 25 mm e sem proteção no furo de gusa

A tabela 6.4 sintetiza, de forma comparativa, os resultados, em termos de médias. Os sufixos A e B indicam, respectivamente, “situação de produção nominal” e “situação de produção reduzida e intervalo de vazamento reduzido”. Mostrando novamente que mesmo na condição de maior permeabilidade, a perda de produção não altera significativamente o fluxo.

cd10						
	t _{min} (s)	pico1	t _{pico 1} (s)	pico 2	tpico 2(s)	t _{transição}
Cd.10A	325,6	0,602	873	-	-	1852
Cd.10B	680,6	0,348	1174,2	-	-	1964,6

cd9												
	t _{min} (s)	pico1	t _{pico 1} (s)	pico 2	tpico 2(s)	pico3	t _{pico 3} (s)	pico4	t _{pico 4} (s)	pico5	t _{pico 5} (s)	t _{transição}
Cd.9A	152	3,48	292	1,642	630,8	3,56	1107	3,24	1900	2,78	2707	-
Cd.9B	139,4	4,054	361,6	1,73	678,2	3,93	1390,6	3,704	2455,4	-	-	-

cd8									
	t _{min} (s)	pico1	t _{pico 1} (s)	pico 2	tpico 2(s)	pico3	t _{pico 3} (s)	pico4	t _{pico 4} (s)
Cd.8A	147	3,50	295,6	3,08	1045	1,978	1881	1,316	2672
Cd.8B	139,4	4,05	362	1,73	678	3,93	1391		

cd7				
	t _{min} (s)	pico	t _{pico} (s)	t _{transição}
Cd.7A	20,8	1,30	62,4	570,6
Cd.7B	27,8	1,19	73	672,2

cd6				
	t _{min} (s)	pico	t _{pico} (s)	t _{transição}
Cd.6A	21,6	2,79	103,2	348
Cd.6B	19,4	5,14	66,4	423

cd5				
	t _{min} (s)	pico	t _{pico} (s)	t _{transição}
Cd.5A	185	0,47	644,4	1113,6
Cd.5B	459,75	0,22	802	1481,5

cd4								
	t _{min} (s)	pico1	t _{pico1} (s)	pico2	t _{pico2} (s)	pico3	t _{pico3} (s)	t _{transição}
Cd.4A	101,6	3,09	296,2	0,858	1509,2	0,54	2332,6	-
Cd.4B	101,4	3,08	320,2	0,704	1887,4	0,42	2953,8	-

cd3				
	t _{min} (s)	pico	t _{pico} (s)	t _{transição}
Cd.3A	159,8	3,40	379,6	1899,2
Cd.3B	175,6	4,08	513,4	2560,6

cd2				
	t _{min} (s)	pico	t _{pico} (s)	t _{transição}
Cd.2A	412,6	0,48	559,4	1652,4
Cd.2B	521	0,46	751,6	2028,2

cd1				
	t _{min} (s)	pico	t _{pico} (s)	t _{transição}
Cd.1A	16	1,67	67,4	2335,2
Cd.1B	19	2,02	85,4	2077,2

Tabela 6.4 – Comparação leito esferas de 19&25 mm produtividade 3800 ton/dia X 3000ton/dia (Condição A -Leito flutuante - sem proteção no furo de gusa. Prod.3800ton/dia, Condição B -Leito flutuante - sem proteção no furo de gusa. Prod.3000ton/dia).

6.1.5 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3800ton/dia e com proteção no furo de corrida.

Uma das regiões mais críticas do cadinho é a região próxima aos furos de corrida, devido aos altos gradientes térmicos, ataque químico pela escória e principalmente condição de fluxo intenso de líquidos.

Pensando nisso, técnicas de reparo têm sido desenvolvidas com o objetivo de reduzir o desgaste do refratário naquela região. A principal delas consiste na criação de uma camada protetora de massa refratária ao redor do furo de corrida como mostra a Figura 6.26 (lado esquerdo).

Dessa forma, foram desenvolvidas em laboratório condições para simular uma proteção e massa refratária ao redor do furo de corrida numero 1 como mostra a Figura 6.26 (lado direito), com o objetivo de verificar a influencia da mesma sobre o perfil de distribuição de fluxos na parte interna do cadinho.

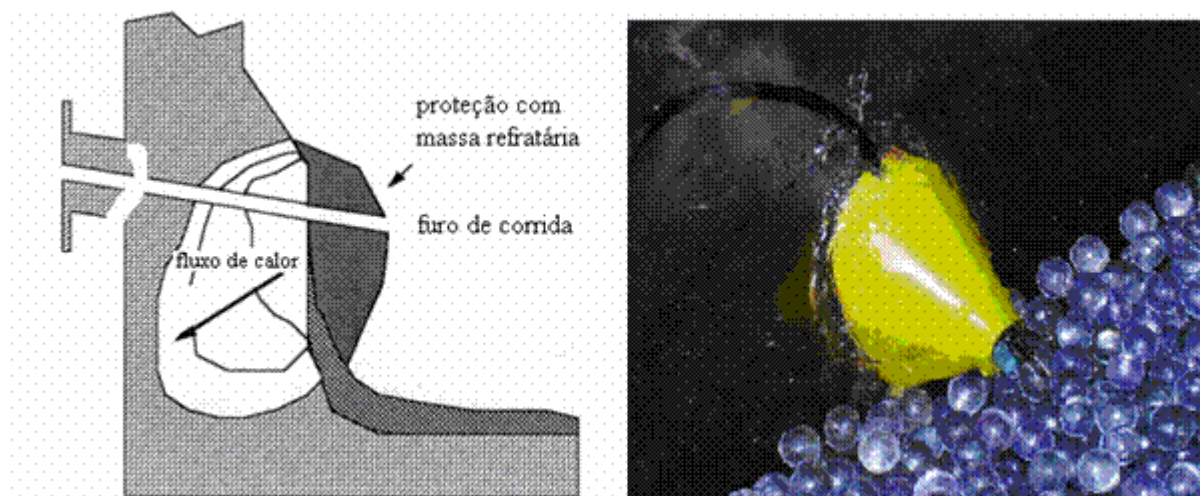


Figura 6.26 – Desenho esquemático mostrando a proteção com massa refratária no furo de corrida (lado esquerdo) e a simulação em laboratório (lado direito).

As figuras 6.27 a 6.30 mostram resultados de ensaios realizados para esta condição. Observa-se que as curvas no geral apresentaram um mesmo comportamento, mas os condutivímetros 6,7 e 8 situados na região próxima ao furo de corrida sofreram uma ligeira redução nos valores de pico e t_{min} , como era de se esperar.

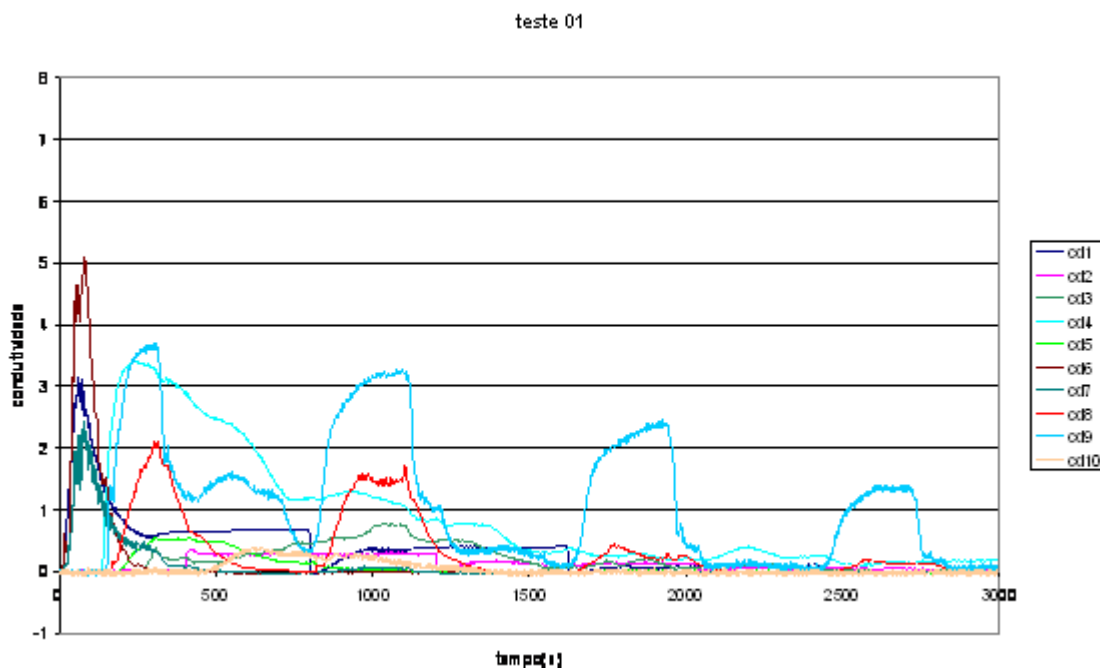


Figura 6.27 – Teste 01 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

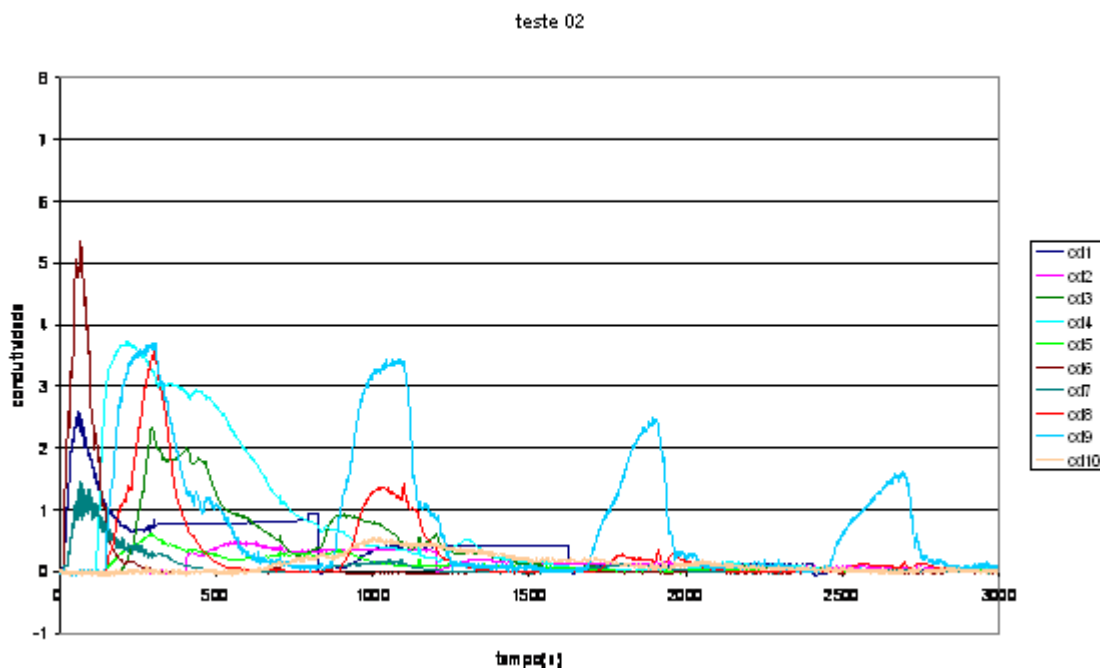


Figura 6.28 – Teste 02 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa.

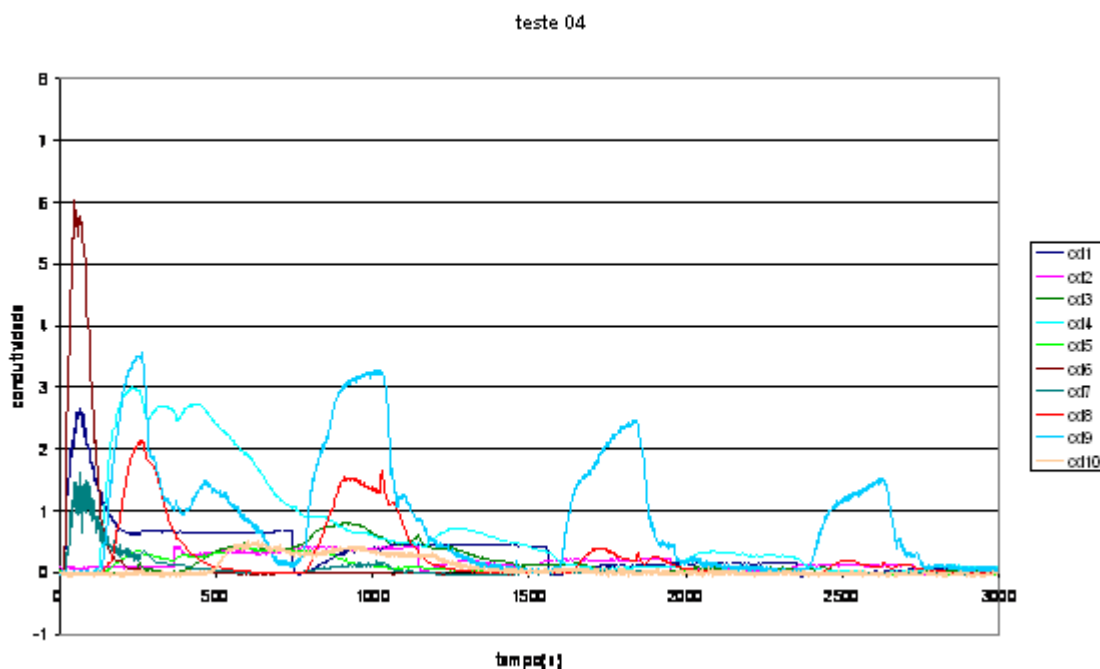


Figura 6.29 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

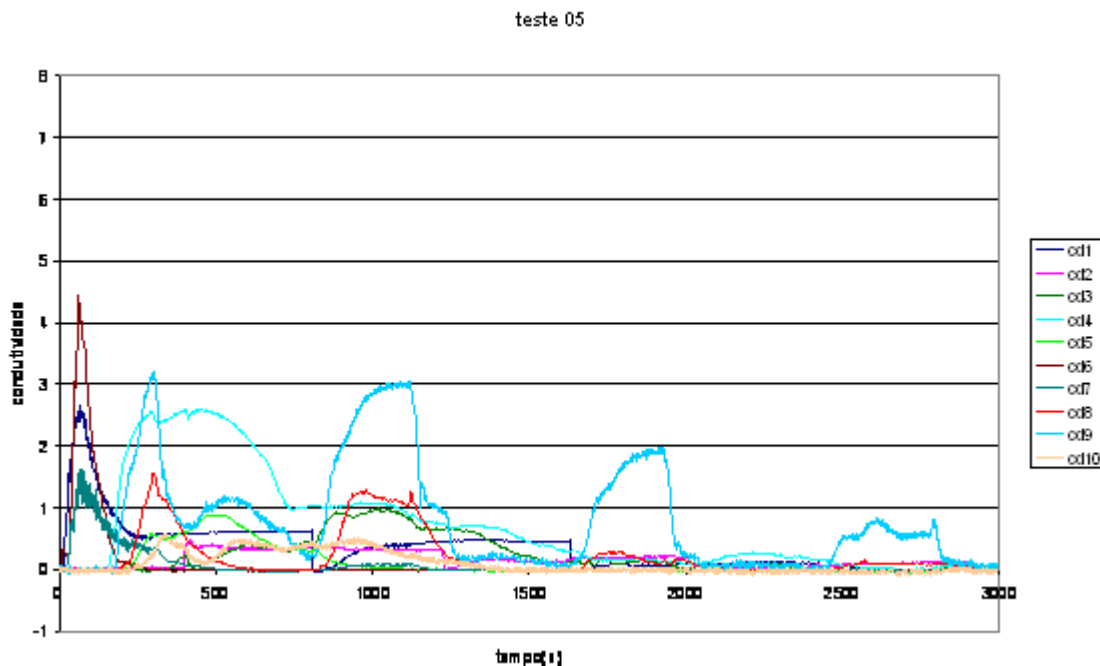


Figura 6.30 – Teste 05 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

A proteção com massa refratária provocou uma redução de intensidade de fluxo nas regiões próximas ao furo de corrida, simbolizada pelos condutivímetros 6, 7 e 8. Como mostra na Tabela 6.5 que compara as diferentes condições A e B que representam respectivamente, “situação sem a proteção de massa refratária” e “situação com proteção de massa refratária” na condição de produtividade normal, leito com esferas de 19mm.

	$t_{\text{mín}}(s)$	pico1	$t_{\text{pico 1}}(s)$	pico 2	$t_{\text{pico 2}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd10A	245	0,46	535	0,44	984	1133
Cd10B	467,4	0,46	664			1227,8

	$t_{\text{trun}}(s)$	pico1	$t_{\text{pico 1}}(s)$	pico 2	$t_{\text{pico 2}}(s)$	pico3	$t_{\text{pico 3}}(s)$	pico4	$t_{\text{pico 4}}(s)$	pico5	$t_{\text{pico 5}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd9A	172	2,27	270	1,54	525	2,24	1041	1,63	1881	1,03	2669	-
Cd9B	155	3,52	300	1,43	421	3,20	1101	2,23	1922	1,20	2670	-

	$t_{\text{mín}}(s)$	pico1	$t_{\text{pico 1}}(s)$	pico 2	$t_{\text{pico 2}}(s)$	pico3	$t_{\text{pico 3}}(s)$	pico4	$t_{\text{pico 4}}(s)$
Cd8A	163	0,72	306	0,89	954	0,29	1741	0,13	2560
Cd8B	167	2,16	304	1,54	1033	0,36	1789	0,17	2579

	$t_{\text{mín}}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd7A	19	1,4	74	730
Cd7B	15	1,88	71	500

	$t_{\text{mín}}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd6A	6	7,11	31	299
Cd6B	11	5,41	62	306

	$t_{\text{mín}}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd5A	180	0,53	409	882
Cd5B	179	0,624	401	1058

	$t_{\text{mín}}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd4A	143	2,74	248	2104
Cd4B	135	3,13	259	2528

	$t_{\text{mín}}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd3A	347	1,27	919	2457
Cd3B	317	1,18	881	1953

	$t_{\text{mín}}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd2A	376	0,5	386	1407
Cd2B	402	0,41	450	1801

	$t_{\text{mín}}(s)$	pico	$t_{\text{pico}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd1A	14	3,19	62	2109
Cd1B	12	2,898	65	2415

Tabela 6.5 – Comparação leito esferas de 19mm produtividade 3800 ton/dia (Condição A -Leito flutuante - sem proteção no furo de gusa, Condição B -Leito flutuante - com proteção no furo de gusa.

6.1.6 – Ensaios com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e com proteção no furo de corrida.

Ainda com a presença da proteção refratária no furo de corrida um, foram feitos ensaios com simulações de aumento de permeabilidade na porção central da região do homem morto. Quando comparado à condição anterior o aumento da permeabilidade proporcionou algumas alterações nas curvas de condutimetria como mostrado nas Figuras 6.31 a 6.33. O condutímetro 6, que localizado próximo ao furo de corrida 1 na periferia sofre influência tanto da proteção refrataria no furo de corrida quando do aumento da permeabilidade na porção central da região do homem morto, provocando uma redução no seu valor de pico, o que representa uma redução do fluxo naquela região. O condutímetro 3 teve seu valor de tempo mínimo reduzido e seu valor de pico aumentado, de fato como era de se esperar, pois com o aumento da permeabilidade na parte central facilita a percolação de líquidos diminuindo o tempo mínimo para que a solução salina atinja o fundo do cadinho. O condutímetro 8 apresentou um ligeiro aumento nos seus valores de pico, mas mantendo seus valores de tempo mínimo e tempo de pico quando comparado a condição anterior. Este comportamento sugere um aumento do fluxo na parte central, e uma redução do fluxo periférico.

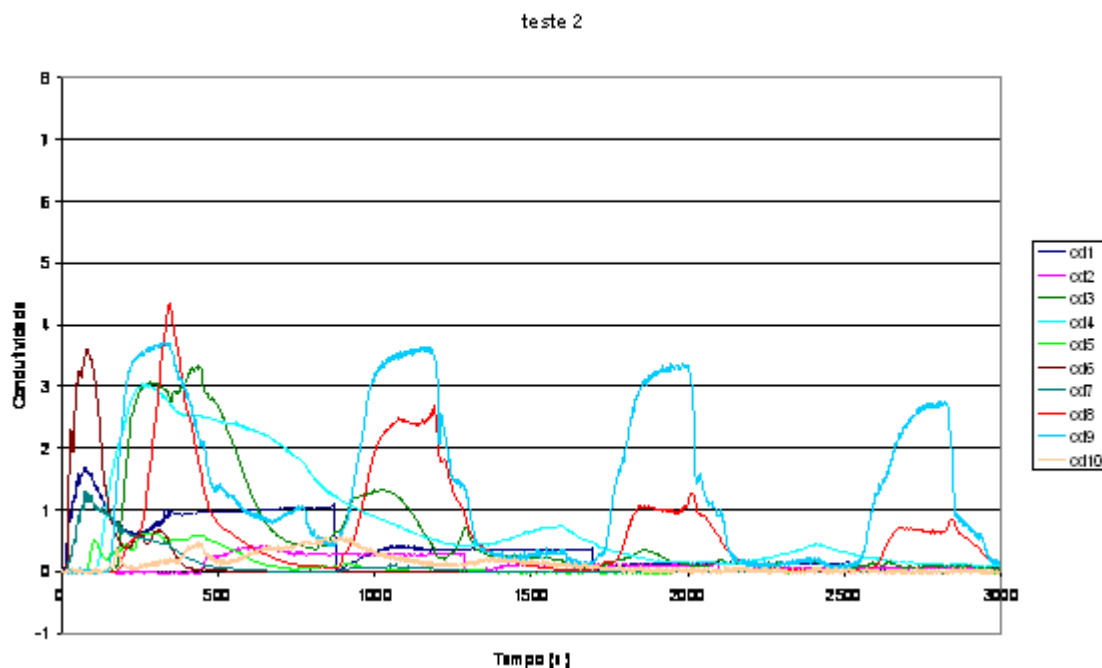


Figura 6.31 – Teste 02 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

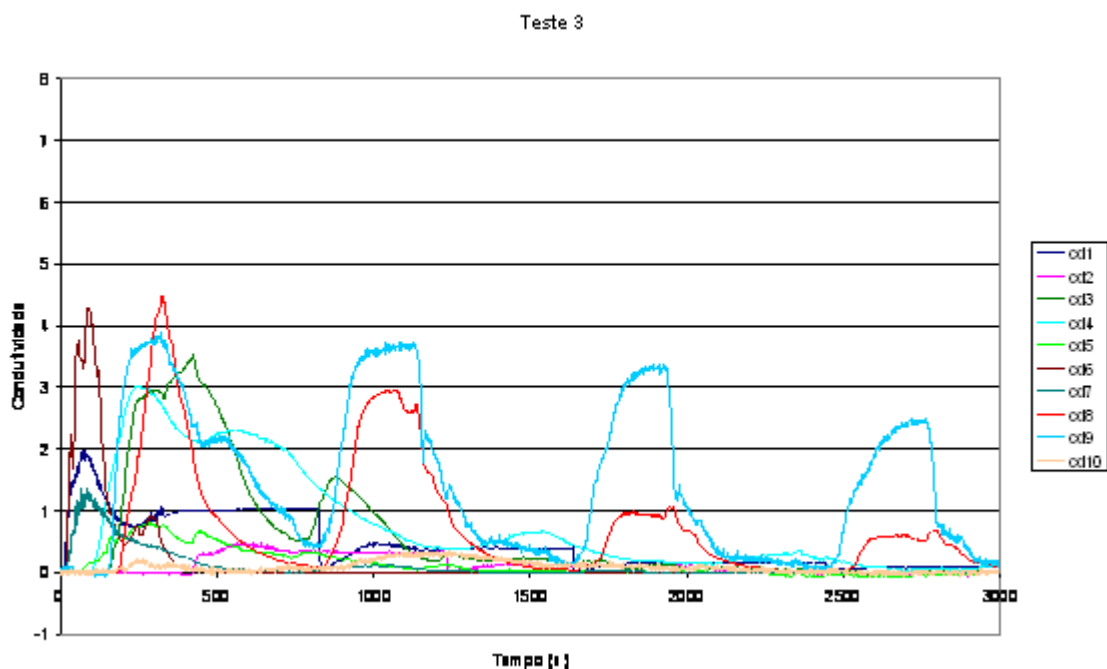


Figura 6.32 – Teste 03 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

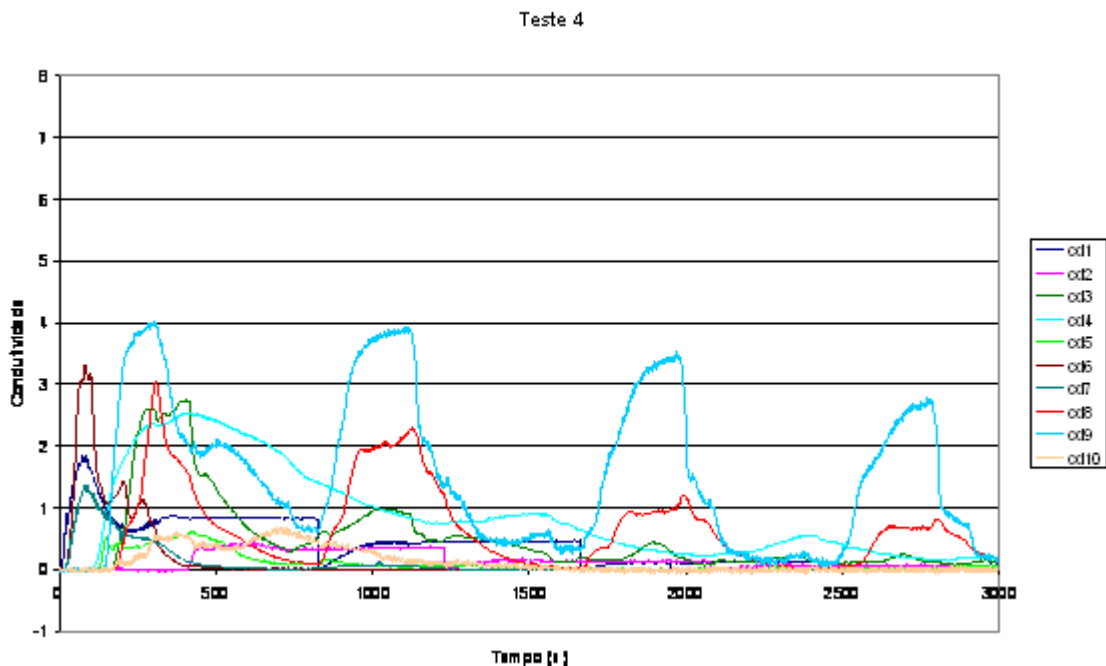


Figura 6.33 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

A Tabela 6.6 mostra valores de comparação na condição de homem morto flutuante, produtividade de 3800ton, com a proteção de massa refratária. Sendo a condição A com o leito homogêneo de esferas de 19mm, e a condição B com leito de esferas de 19 & 25mm.

		cd10				
	t _{min} (s)	pico1	t _{pico 1} (s)	pico 2	t _{pico 2} (s)	t _{transição}
Cd.10A	457,4	0,46	664	-	-	1,228
Cd.10B	222,4	0,544	907,2	-	-	1786,6

		cd9										
	t _{min} (s)	pico1	t _{pico 1} (s)	pico 2	t _{pico 2} (s)	pico3	t _{pico 3} (s)	pico4	t _{pico 4} (s)	pico5	t _{pico 5} (s)	t _{transição}
Cd.9A	155	3,52	299,8	1,432	421,364	3,20	1101	2,23	1922,2	1,196	2669,8	-
Cd.9B	170,8	3,598	320,6	1,67	604,4	3,56	1138,4	3,13	1959,8	2,378	2815	-

		cd8									
	t _{min} (s)	pico1	t _{pico 1} (s)	pico 2	t _{pico 2} (s)	pico3	t _{pico 3} (s)	pico4	t _{pico 4} (s)	t _{transição}	
Cd.8A	167,2	2,16	304,2	1,536	1032,8	0,366	1788,6	0,174	2578,6	-	
Cd.8B	200	3,34	327	2,26	1148	1,08	1998	0,73	2821	-	

		cd7			cd6			
	t _{min} (s)	pico	t _{pico} (s)	t _{transição}	t _{min} (s)	pico	t _{pico} (s)	t _{transição}
Cd.7A	14,6	1,876	70,8	500,4	11	5,41	62	306
Cd.7B	17	1,26	76,2	552,8	18,6	3,65	81,2	378,8

		cd5			cd4							
	t _{min} (s)	pico	t _{pico} (s)	t _{transição}	t _{min} (s)	pico1	t _{pico1} (s)	pico2	t _{pico2} (s)	pico3	t _{pico3} (s)	t _{transição}
Cd.5A	178,6	0,62	401	1057,8	135	3,132	258,6	-	-	-	-	2526,4
Cd.5B	93,2	0,65	318,8	1121,6	108	2,65	333,2	0,76	1560,4	0,506	2417,4	-

		cd3			cd2			
	t _{min} (s)	pico	t _{pico} (s)	t _{transição}	t _{min} (s)	pico	t _{pico} (s)	t _{transição}
Cd.3A	316,6	1,18	881,4	1953,2	402	0,41	450,4	1800,8
Cd.3B	167,2	3,01	413,8	2104,4	11	1,74	76,6	2543

		cd1		
	t _{min} (s)	pico	t _{pico} (s)	t _{transição}
Cd.1A	11,94	2,90	64,6	2415,26
Cd.1B	11	1,74	76,6	2543,00

Tabela 6.6 – Comparação de resultados na condição de homem morto flutuante com proteção no furo de corrida, produtividade 3800 ton/dia (Condição A -Leito com esferas de 19mm , Condição B -Leito com esferas de 19 & 25mm).

6.1.7 – Ensaios com aspersão CENTRAL, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e com proteção no furo de corrida.

Mantendo as condições de aumento da permeabilidade na parte central do cadinho e a condição de Homem morto flutuante, para produtividade normal de 3800ton/dia foram feitos ensaios simulando uma distribuição de líquidos na região superior do cadinho concentrada na parte central, assim como mostrado na Figura 6.34. Nestes

ensaios a região central é a mais permeável e ao mesmo tempo a mais irrigada, sendo que a extremidade recebe uma pequena alimentação de líquidos.

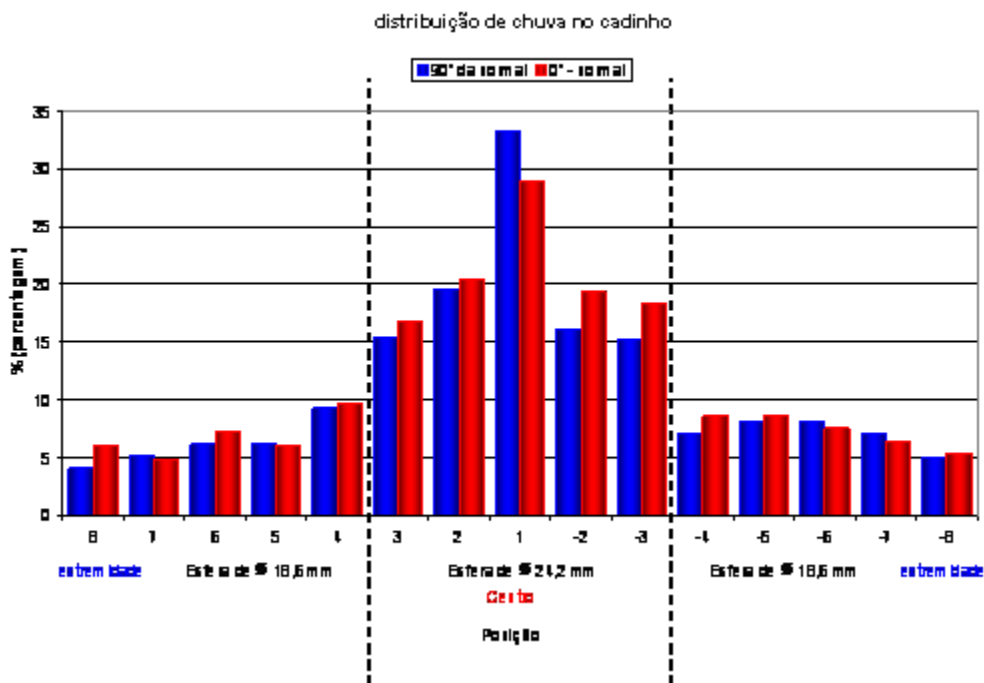


Figura 6.34 – Aspersão Central de líquidos segundo dois eixos normais na parte superior do cadinho

Nesta condição pode-se dizer de certa forma que foi forçado um fluxo central, pois além do aumento da permeabilidade nesta região a distribuição de líquidos se dá quase que totalmente nesta região. De fato como se pode observar nas figuras 6.35 a 6.39, os condutivímetros localizados na porção central do homem morto, cd5 e cd10, apresentaram um aumento nos seus valores de pico e ao mesmo tempo uma redução no valor de tempo mínimo. O que representa um aumento do fluxo na região central. Além disso, o condutivímetro 6 teve seu valor de pico extremamente reduzido, quando comparado com as outras condições, mostrando que para esta condição o fluxo periférico é realmente muito baixo.

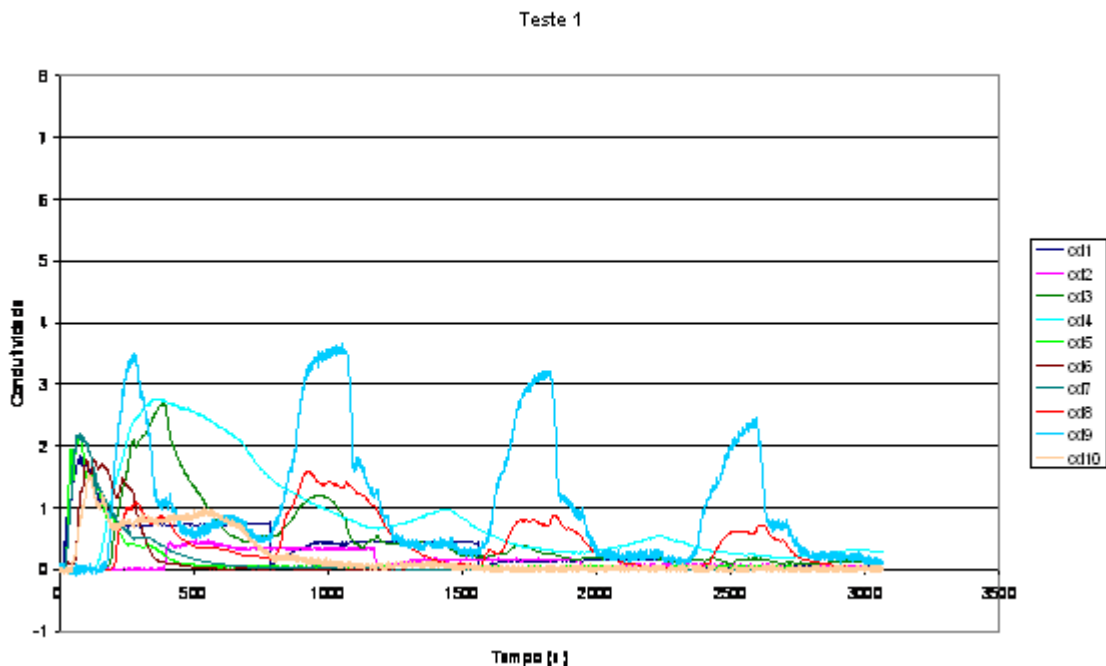


Figura 6.35 – Teste 01 Homem morto flutuante, aspersão CENTRAL, produtividade 3800ton/dia, esferas 19&25 mm e com proteção no furo de gusa

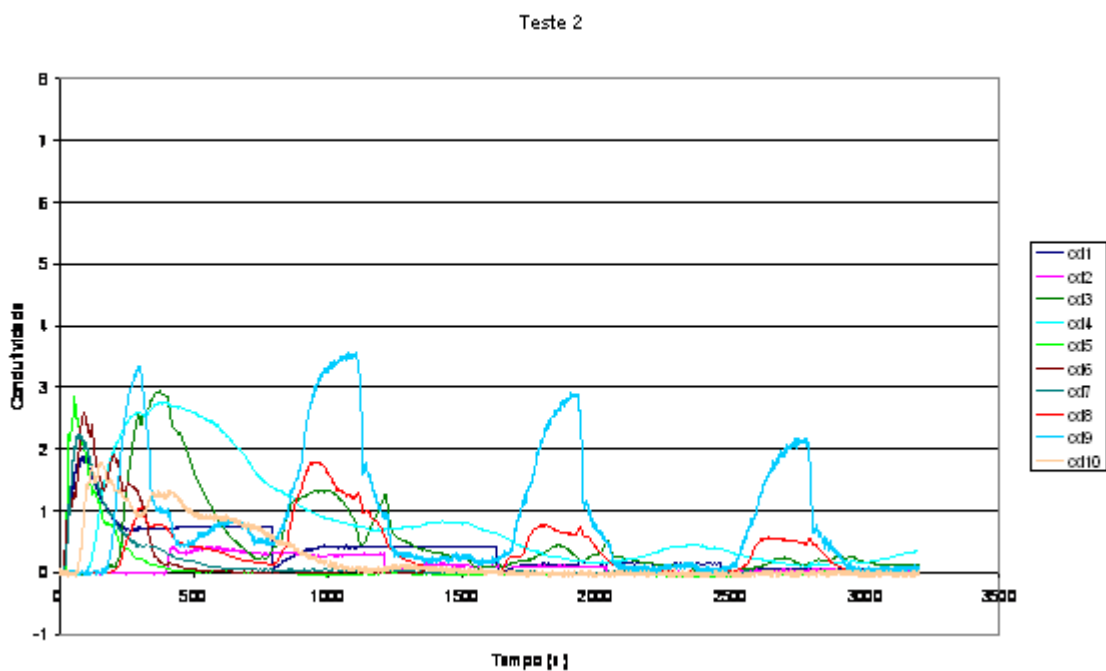


Figura 6.36 – Teste 02 Homem morto flutuante, aspersão CENTRAL, produtividade 3800ton/dia, esferas 19&25 mm e com proteção no furo de gusa

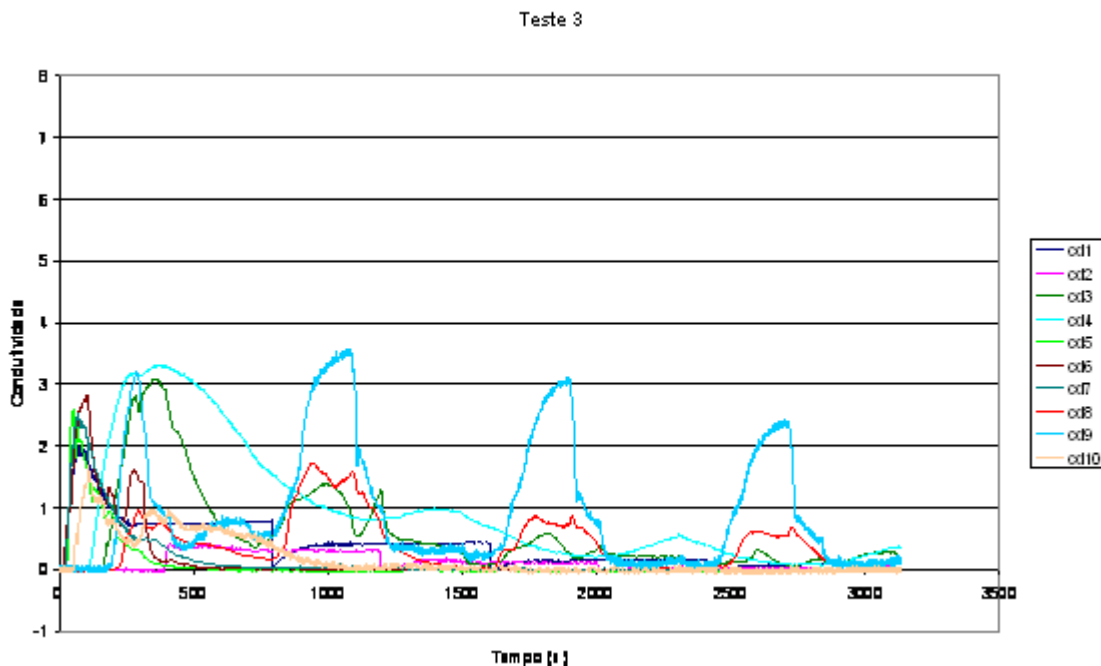


Figura 6.37 – Teste 03 Homem morto flutuante, aspersão CENTRAL, produtividade 3800ton/dia, esferas 19&25 mm e com proteção no furo de gusa

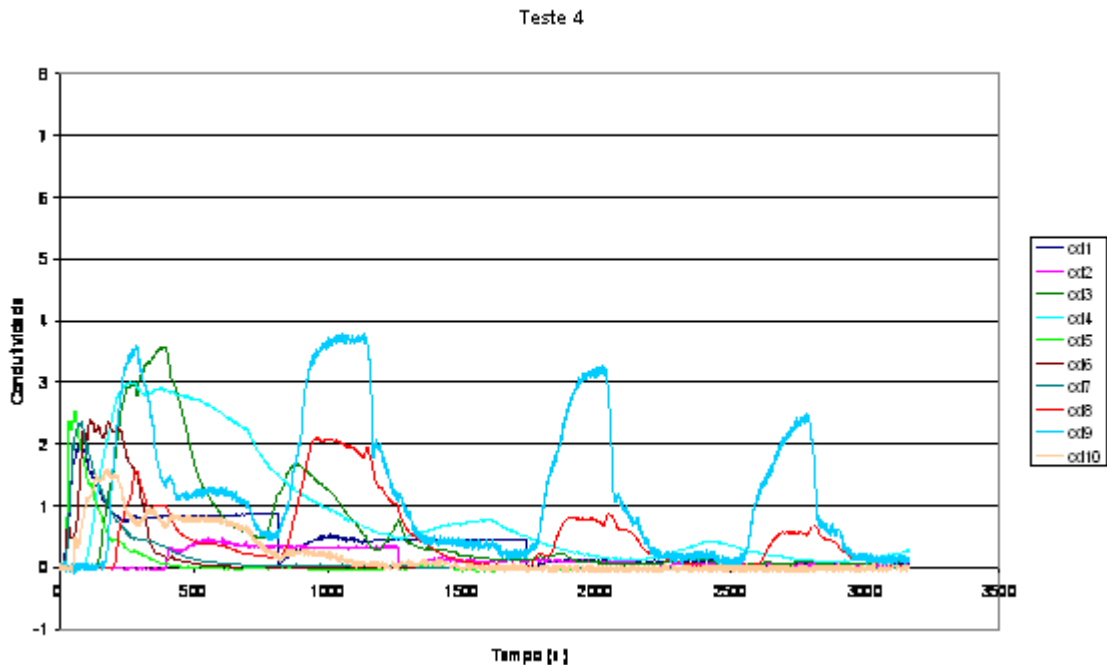


Figura 6.38 – Teste 04 Homem morto flutuante, aspersão CENTRAL, produtividade 3800ton/dia, esferas 19&25 mm e com proteção no furo de gusa

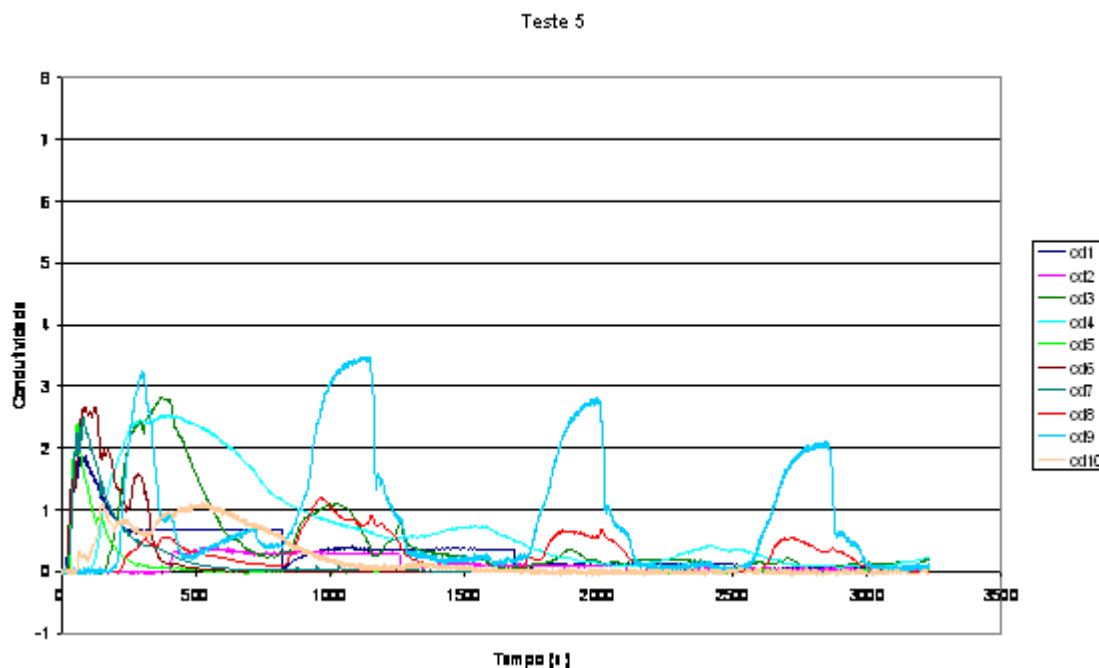


Figura 6.39 – Teste 05 Homem morto flutuante, aspersão CENTRAL, produtividade 3800ton/dia, esferas 19&25 mm e com proteção no furo de gusa

Para uma melhor compreensão do fluxo, foi feito para esta condição uma filmagem da região inferior do cadinho buscando verificar a dispersão do corante no leito do cadinho. Para isso tirou-se fotos em diferentes tempos da filmagem como se pode observar na Figura 6.40, onde mostra que boa parte do fluxo atinge o fundo do cadinho pela região central e o fluxo provindo da região periférica e baixo. Novamente o aumento da permeabilidade proporcionou um aumento da velocidade de líquidos no interior do cadinho facilitado também pela aspersão de líquidos na parte central.

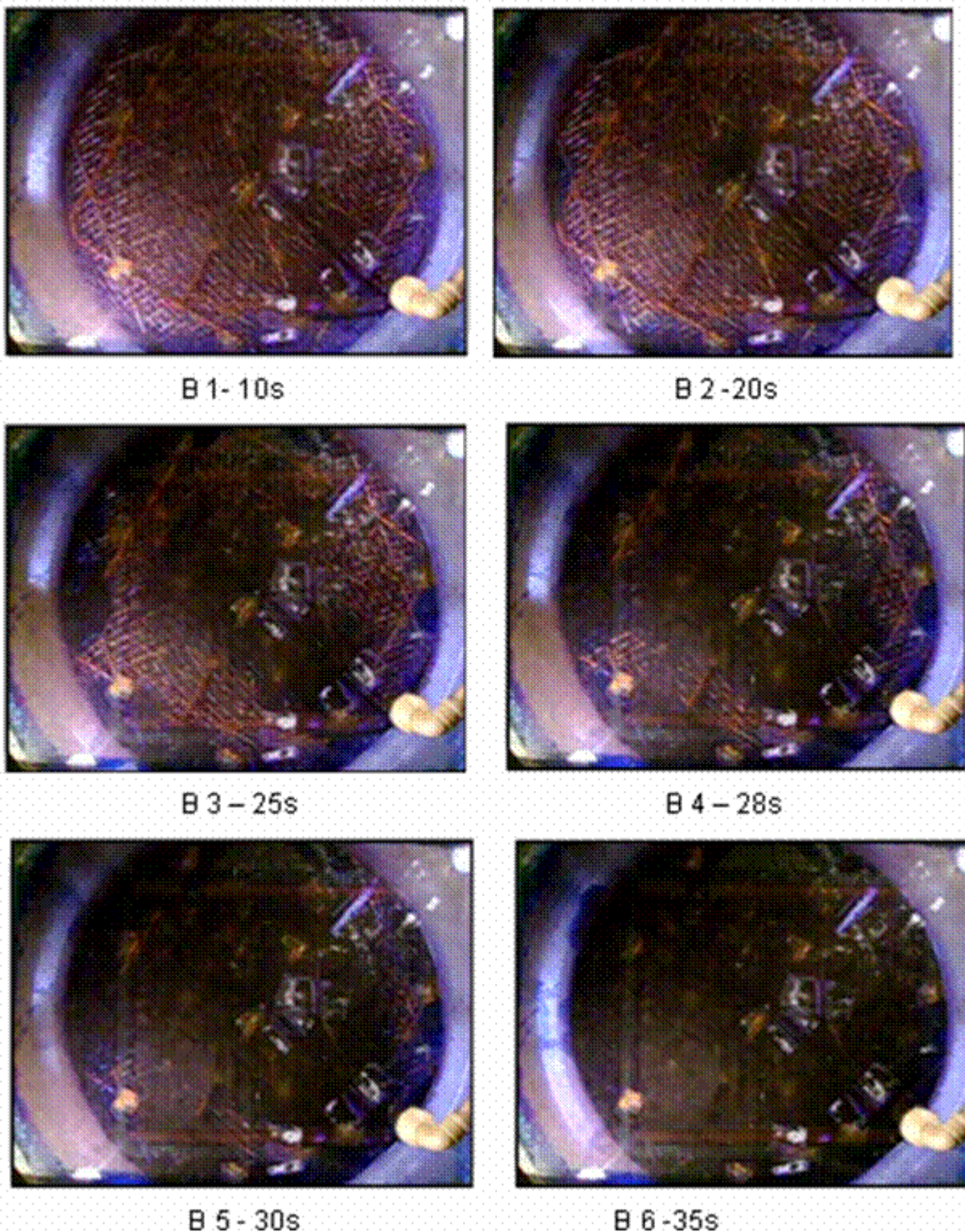


Figura 6.40 – Ensaio de dispersão de corante para condição homem morto flutuante com aspensão de líquidos CENTRAL, leito de esfera de 19&25mm

6.1.8 – Simulação numérica com o homem morto flutuante

As Figuras 6.41 e 6.42 mostram o resultado de simulação numérica, via CFX, referente ao fluxo no cadinho do modelo em condições de homem morto flutuante. Um vídeo também foi realizado para melhor visualização. Procurou-se ensaiar a condição transiente segundo a qual a drenagem é subitamente revertida ao segundo furo de corrida. Portanto não foi considerado o intervalo de repouso relativo ao período entre a obturação do furo anterior e abertura do furo seguinte. Os "snapshots", dispostos em ordem cronológica, ressaltam o fluxo importante no canal situado entre o fundo do cadinho e o homem morto flutuante; além do mais o reposicionamento das linhas de fluxo no interior do meio poroso, levando em consideração que o processo é cíclico, justifica o aparecimento dos vários picos nas curvas de condutividade.

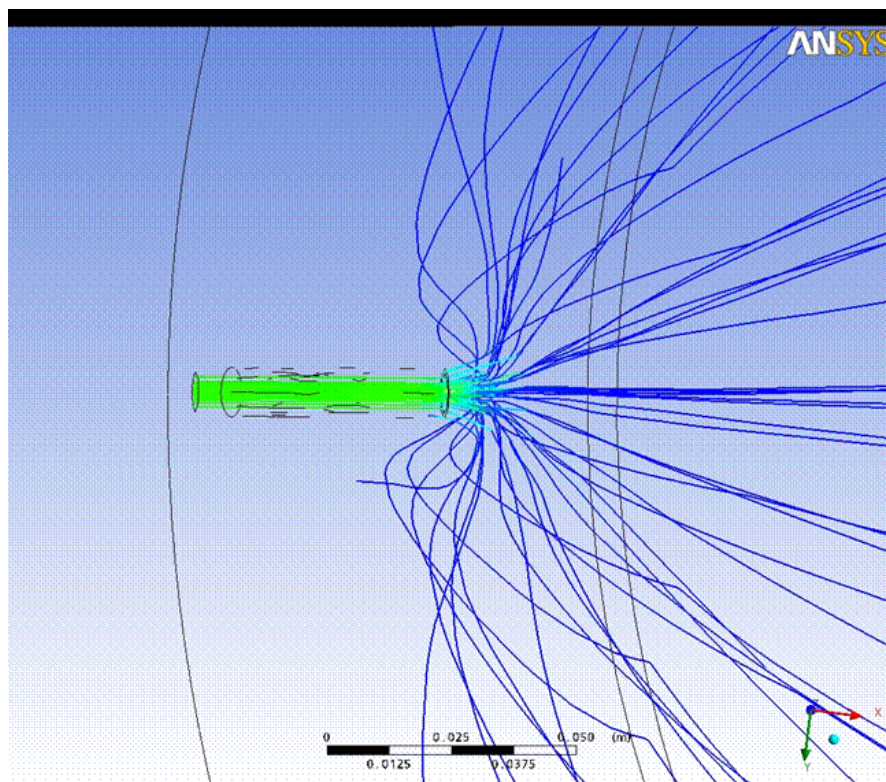
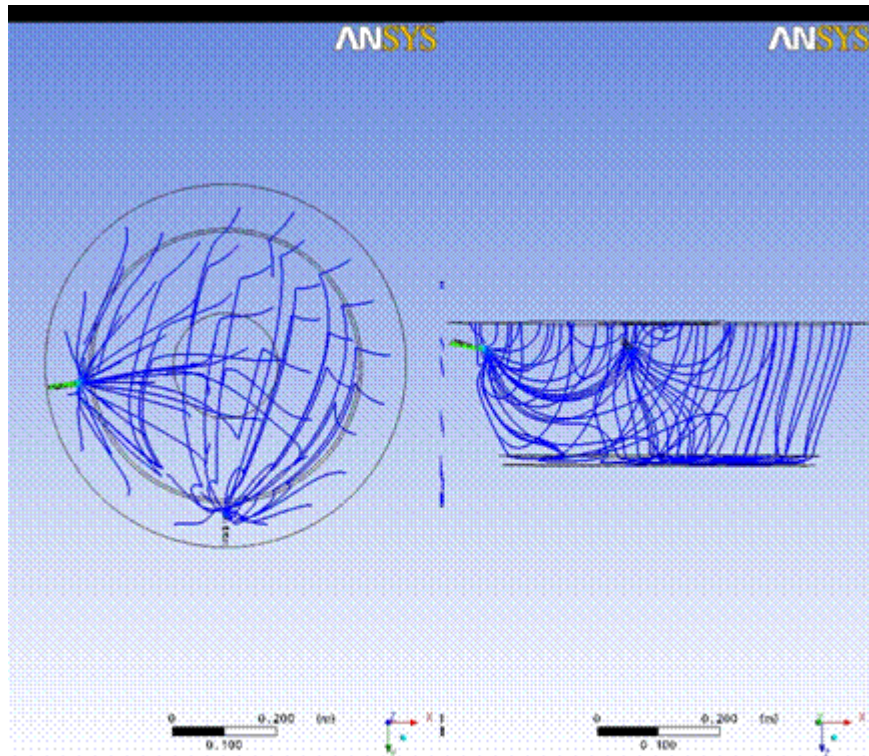
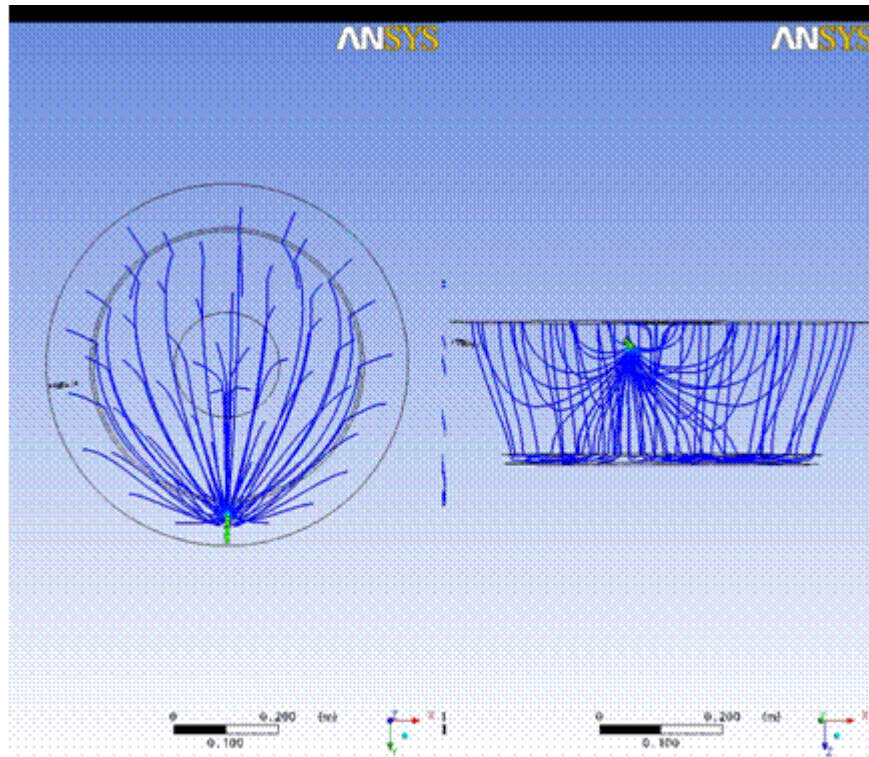
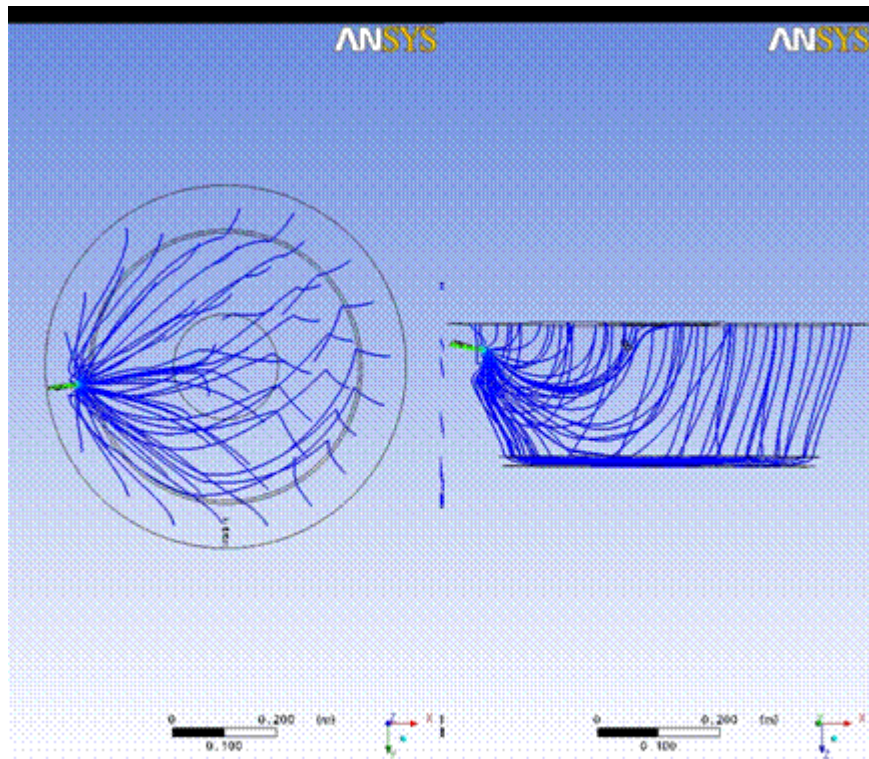
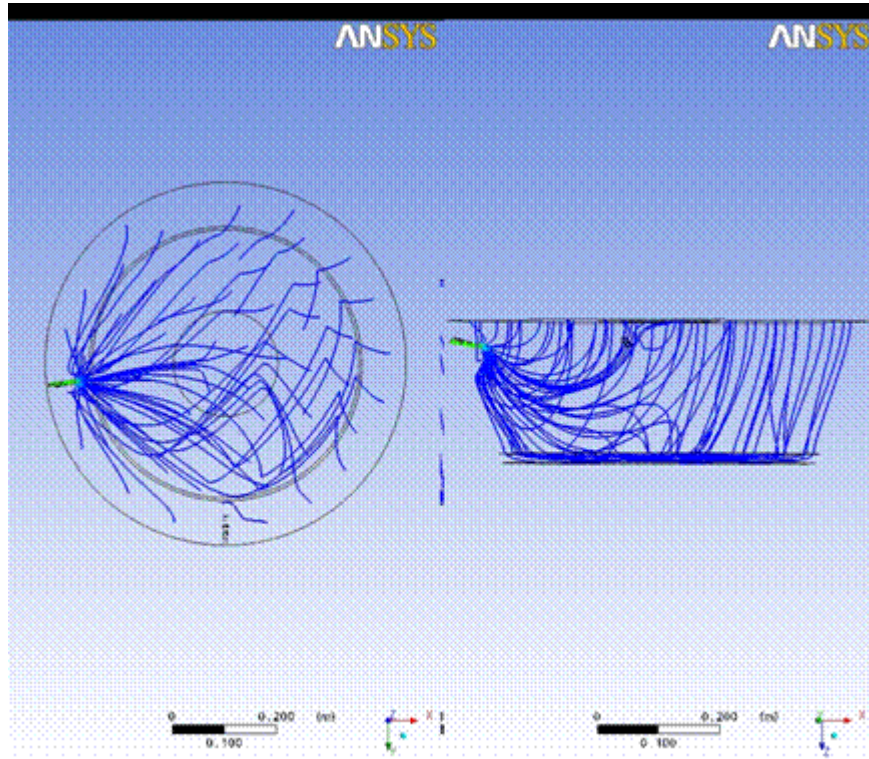


Figura 6.41 – zoom na região próxima ao furo de corrida, simulação de fluxo no modelo de cadinho, homem morto flutuante.





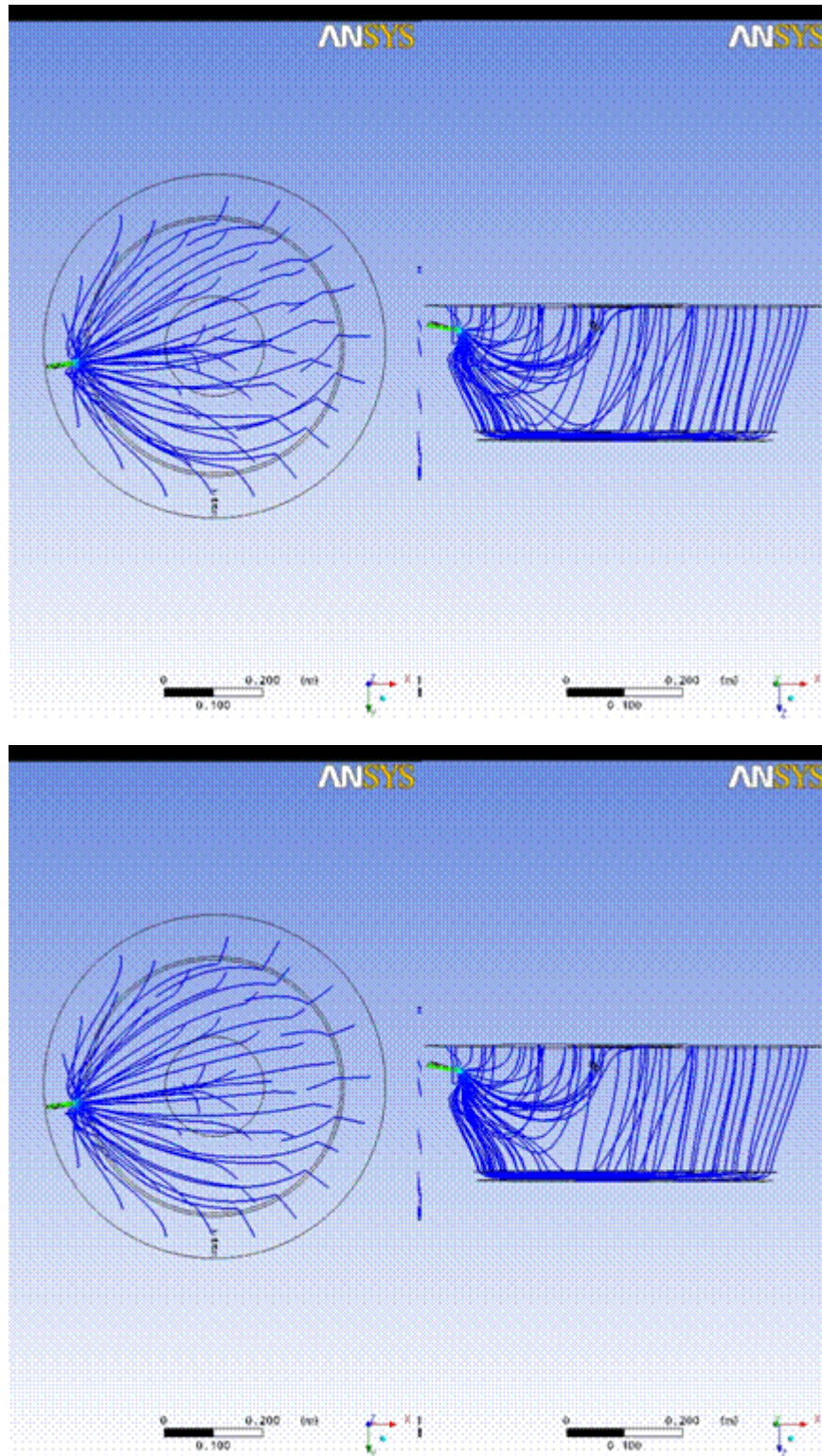


Figura 6.42 – "snapshots" de simulação de fluxo no cadinho do modelo.

Também se nota que, em função do "mushroom" formado pela massa de obturação, o qual confere ao sistema de drenagem diferentes comprimentos de furos, as linhas de fluxo são obrigadas a se defletir na base deste (mushroom). Esta deflexão brusca pode sugerir condições de erosão mais pronunciadas no pé do "mushroom". Estes aspectos serão tratados novamente quando forem comentados os resultados de blowout.

6.2 – Ensaio com Homem morto em Repouso ou Assentado

Para medida de comparação foram todos os ensaios realizados na condição de Homem morto flutuante foram repetidos para a condição de Homem morto assentado. A seguir serão apresentados resultados destes ensaios, assim como comparações das diferentes condições analisadas.

6.2.1 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida.

Estes ensaios foram realizados buscando verificar o se comportamento dos condutivímetros para esta condição apresenta alguma diferença quando comparado a condição de Homem morto flutuante. De fato, como se pode observar nas Figuras 6.43 a 6.46 as curvas de condutimetria para esta condição apresentam um comportamento particular. Quando analisados os tempos mínimos de cada condutivímetro a ordem de detecção dos primeiros traços de solução salina se da na seguinte seqüência: cd6, cd1, cd7 e logo em seguida cd4, cd9 e cd8. Os condutivímetros cd6, cd1, cd7 apesar de apresentar pequenos valores para t_{min} , o que representaria um possível fluxo periférico, apresentam baixos valores de pico quando comparados com as curvas de condutimetria dos condutivímetros cd4, cd9 e cd8. Um fato interessante observado para esta condição foi que o condutivímetro 4 apresentou valores para t_{min} menores até mesmo do que o cd8 e cd9, indicando que o fluxo, os traços de solução salina, chega ao fundo do cadinho mesmo antes de

passar pela periferia no cd8 e cd9. No entanto, como para esta condição não há mais a região livre de coque no fundo do cadinho, parece que há naquela região uma estagnação de líquidos devido a diminuição da permeabilidade. Este fenômeno é bem representado pelo condutivímetro 3, uma vez que recebe os primeiros traços de solução salina atinge valores de pico alto, e em seguida sofre pequenas oscilações apresentando picos consecutivos e ao mesmo tempo apresentou um longo tempo de transição. O que dá a idéia que parte da solução salina ficou aprisionada naquela região devido a restrição do fluxo. Outro fato que se deve observar é que como os condutivímetros 5 e 10 não possuem valores significativos de picos; o fluxo na região central do cadinho é praticamente inexistente, o que dá a idéia que a solução salina que atinge o Cd3 é proveniente da região periférica.

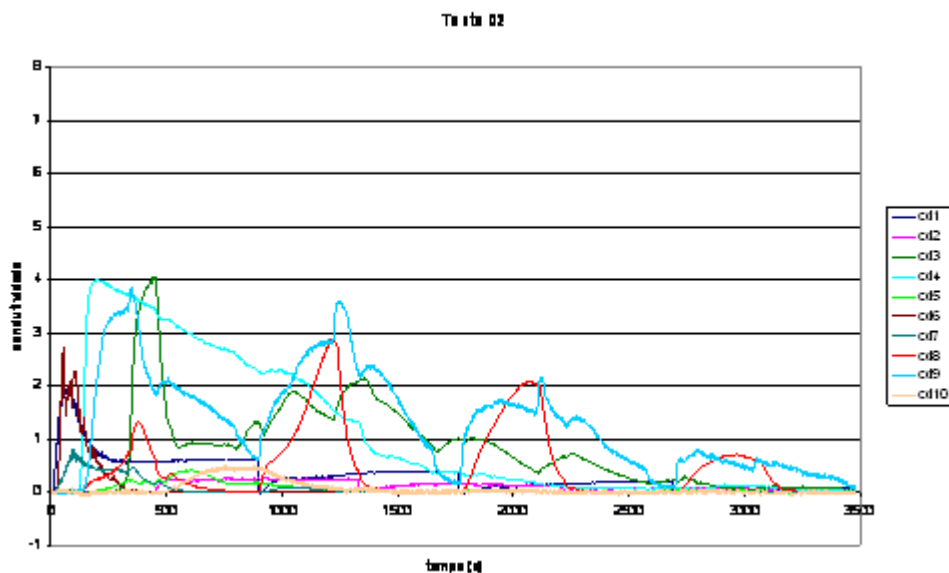


Figura 6.43 – Teste 02 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa.

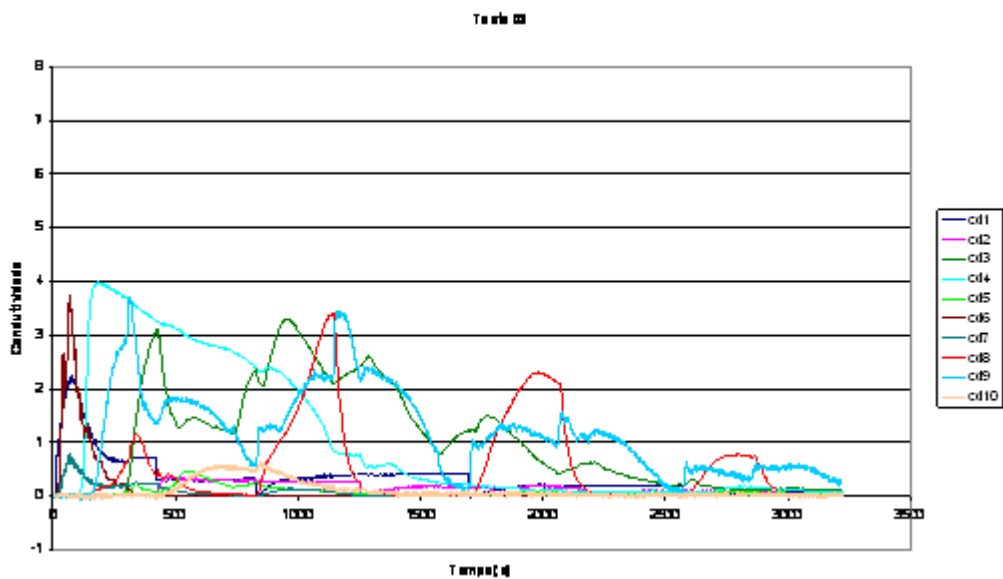


Figura 6.44 – Teste 03 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa.

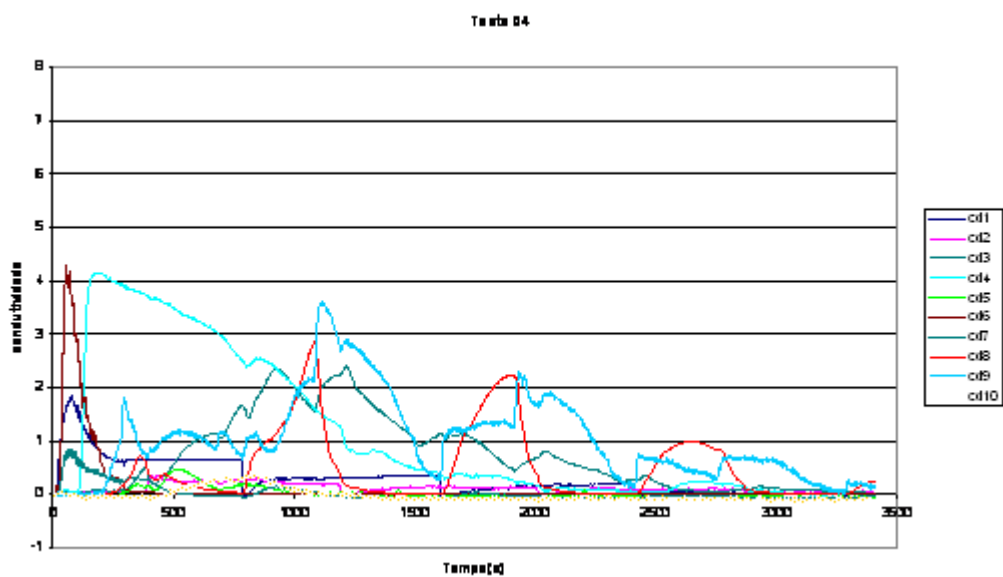


Figura 6.45 – Teste 04 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa.

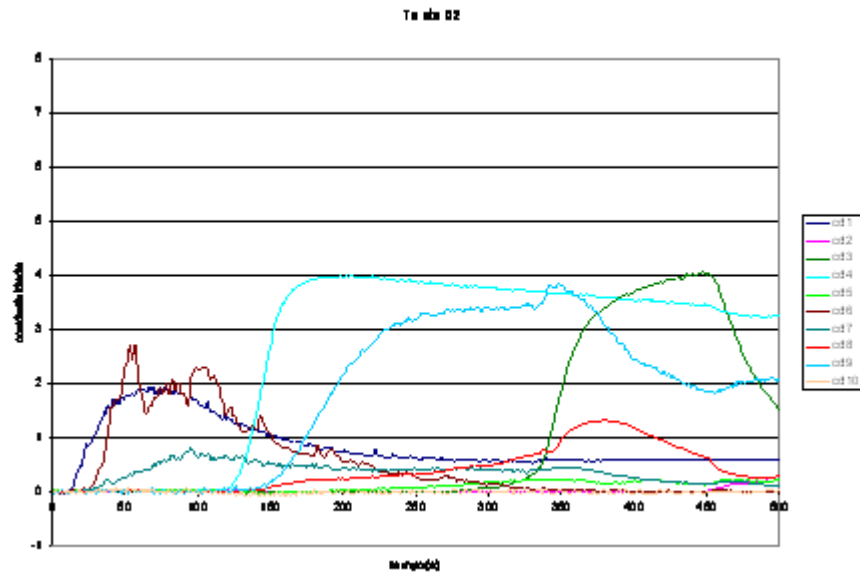


Figura 6.46 – Zoom região de início do teste 2

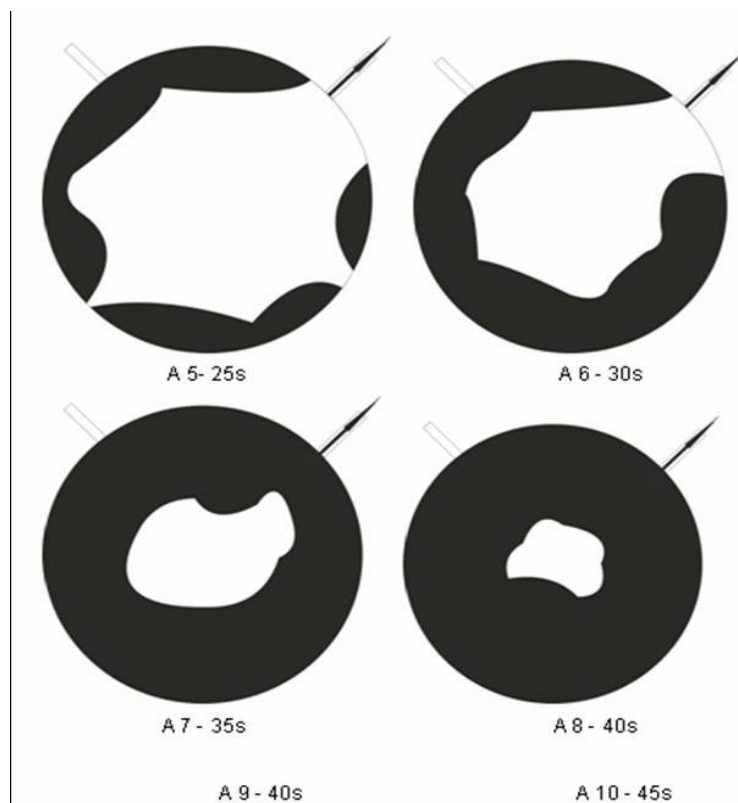


Figura 6.47 – Teste de dispersão de corante para a condição de homem morto assentado, leito com esferas de 19mm, produtividade 3800ton/dia e com aspensão normal de líquidos.

A Tabela 6.7 mostra valores médios dos parâmetros de análise (t_{\min} , pico, $t_{\text{transição}}$, t_{pico}) para os ensaios realizados nesta condição. De fato os condutivímetros 1, 6 e 7 apresentaram os menores valores para t_{\min} , porém não apresentando valores de pico tão acentuados para a mesma condição com o homem morto flutuante. Já o condutivímetro 4 apresentou um valor para t_{\min} menor que os condutivímetros 8 e 9, e o maior valor de pico, mostrando que a solução salina atinge o fundo do cadinho antes mesmo de passar pela periferia. O condutivímetro 3 teve um alto valor de t_{\min} , mas teve um alto valor de pico, como os condutivímetros 5 e 10 não tiveram valores expressivos de pico e apresentaram uma transição lenta, sugere-se que o fluxo na parte central seja baixo e fluxo detectado no condutivímetro 3 seja proveniente da direção radial.

	$t_{\min}(s)$	pico1	$t_{\text{pico 1}}(s)$	pico 2	$t_{\text{pico 2}}(s)$	pico3	$t_{\text{pico 3}}(s)$	pico4	$t_{\text{pico 4}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd10	485	0,44	789							839,00
Cd9	174	3,07	324	3,48	1187	1,96	2049	0,71	2832	-
Cd8	188	1,03	133	3,01	1153	2,16	2001	-	-	2929
Cd7	27	0,79	84	-	-	-	-	-	-	757
Cd6	23	3,57	61	-	-	-	-	-	-	376
Cd5	252	0,44	565	-	-	-	-	-	-	1060
Cd4	113	4,04	198	-	-	-	-	-	-	2083
Cd3	256	3,14	600	-	-	-	-	-	-	2438
Cd2	427	0,3	483	-	-	-	-	-	-	1709
Cd1	13	1,95	79	-	-	-	-	-	-	2699

Tabela 6.7 – Valores dos parâmetros de análise para a condição de Homem morto assentado, aspersão normal, leito de 19mm e produtividade de 3800ton/dia

6.2.2 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3000ton/dia e sem proteção no furo de corrida.

Para a condição de Homem morto assentado também foram simuladas condições de perda severa de produtividade. Diferentemente da condição de homem morto flutuante, agora com a mudança de produtividade foi observado algumas mudanças no comportamento de alguns condutivímetros, como mostrado nas figuras 6.48 a 6.52. Os condutivímetros que sofreram maiores efeitos foram os condutivímetros 8, 9 e 6, sendo que os outros permaneceram praticamente inalterados. Os Condutivímetros 8 e 9 tiveram seus valores de pico aumentados e não sofreram grandes alterações nos valores de t_{\min} e t_{pico} . Já o condutivímetro 6, contrariamente aos condutivímetros 8 e 9, teve seu valor de pico ligeiramente reduzido.

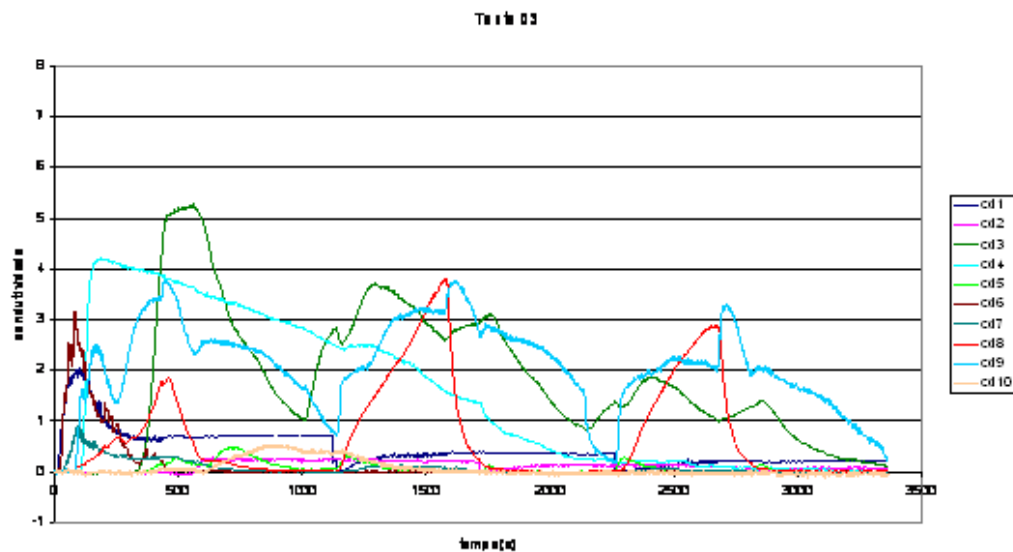


Figura 6.48 – Teste 03 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

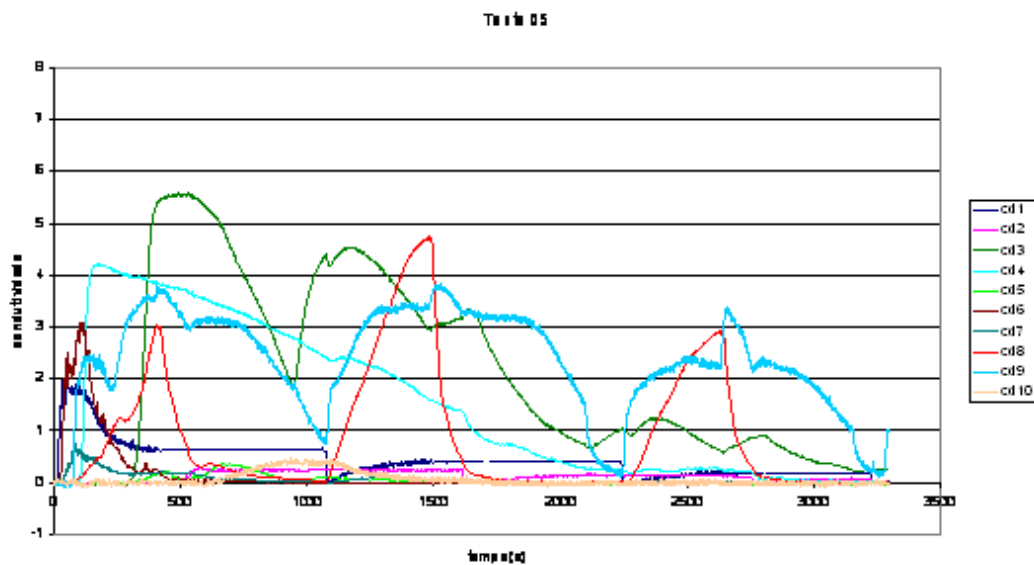


Figura 6.49 – Teste 05 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

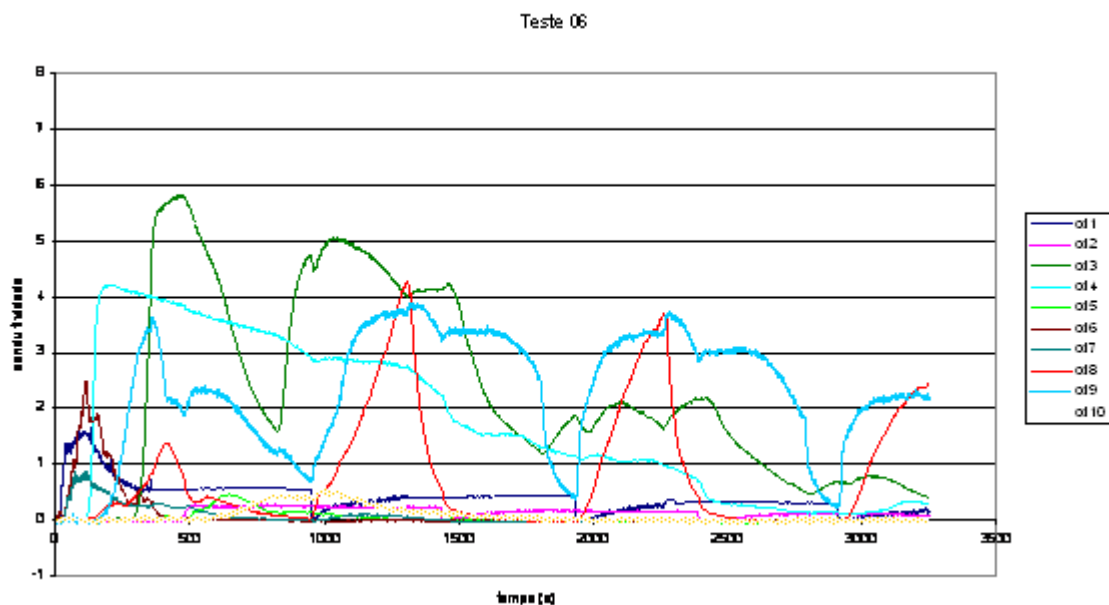


Figura 6.50 – Teste 06 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

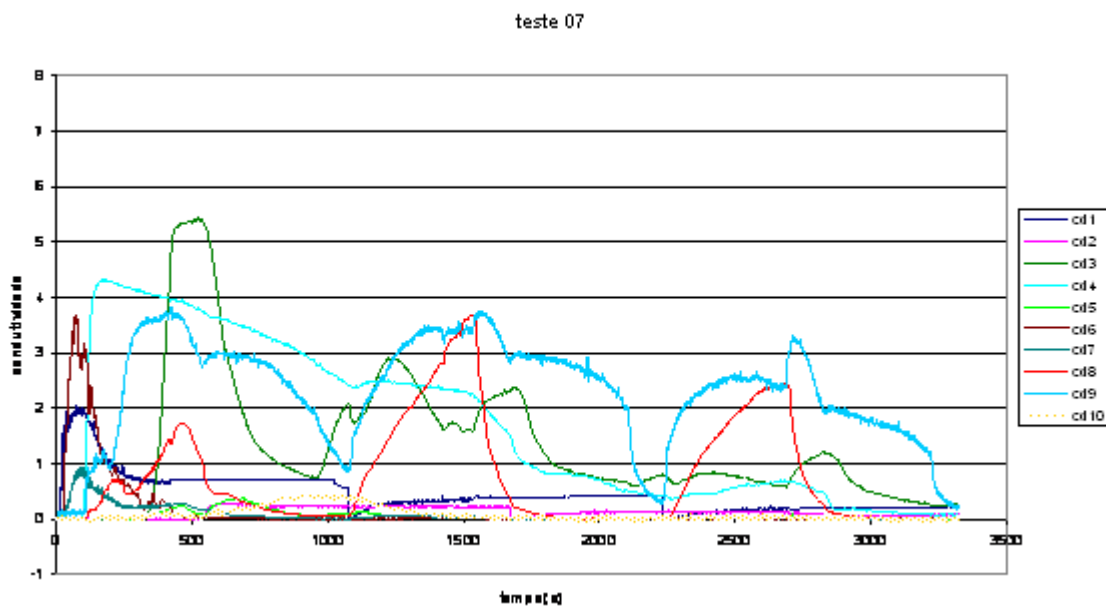


Figura 6.51 – Teste 07 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

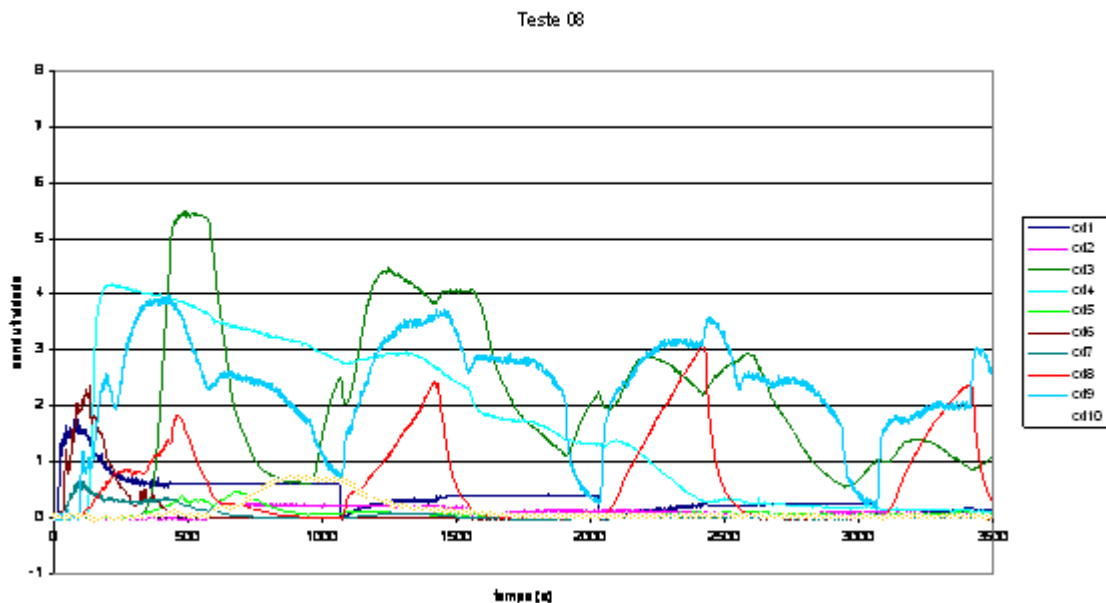


Figura 6.52 – Teste 08 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa.

A tabela 6.8 mostra valores médios dos parâmetros t_{\min} , t_{pico} , $t_{\text{transição}}$ e t_{pico} para a condição de homem morto assentado, sem proteção no furo de corrida, com o leito de esferas 19 mm. De fato como se pode observar houve uma ligeira alteração nos valores de alguns parâmetros dos condutivímetros 6,8 e 9. Mas não se pode afirmar que houve uma expressiva mudança no fluxo em função da redução de produtividade.

	$t_{\min}(s)$	pico1	$t_{\text{pico 1}}(s)$	pico 2	$t_{\text{pico 2}}(s)$	pico3	$t_{\text{pico 3}}(s)$	pico4	$t_{\text{pico 4}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd10A	485.33	0.44	789.33	-	-	-	-	-	-	839
Cd10B	612	0.4425	896.5	-	-	-	-	-	-	866.75
Cd9A	174	3.07	324	3.48	1187	1.96	2049	0.71	2832	-
Cd9B	111	2.45	218	3.4075	467	3.75	1518.75	3.38	2599.25	-
Cd8A	188	1	133	3	1153	2	2001	-	-	-
Cd8B	111	2	440	4	1479	3	2573	-	-	-
Cd7A	27	1	84	-	-	-	-	-	-	757
Cd7B	34	1	98	-	-	-	-	-	-	694
Cd6A	23	4	61							376
Cd6B	24	3	96							512
Cd5A	252	0.4	565		-	-	-	-	-	1060
Cd5B	358	0.4	600		-	-	-	-	-	774
Cd4A	113	4	198		-	-	-	-	-	2083.3
Cd4B	105	4	175		-	-	-	-	-	2595.5
Cd3A	256	3	600							2438
Cd3B	321	6	505							3044
Cd2A	427	0.3	483		-	-	-	-	-	1709
Cd2B	533	0.3	597		-	-	-	-	-	2440
Cd1A	13	2	79		-	-	-	-	-	2699
Cd1B	16	2	85.75		-	-	-	-	-	2894

Tabela 6.8 – Comparação de resultados na condição de homem morto assentado sem proteção no furo de corrida, leito com esferas de 19mm (Condição A – Produtividade 3800ton/dia , Condição B -produtividade 3000ton/dia).

6.2.3 – Ensaios com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3000ton/dia e sem proteção no furo de corrida

Para a condição de homem morto em repouso ou assentado também foram realizados ensaios com simulação do aumento da permeabilidade. Estes foram conduzidos nas mesmas condições do homem morto flutuante, ou seja, a parte mais permeável do leito, porção de esferas de 25mm continuam localizadas na região central do homem morto para a mesma aspersão de líquidos. Novamente o aumento da permeabilidade provocou uma alteração no perfil de distribuição de líquidos no interior do cadinho. Como se pode observar nas Figuras 6.53 a 6.56 os condutivímetros 7, 6 e 1 localizados na periferia praticamente não sofreram influência da mudança de permeabilidade. Já os condutivímetros 8, 9, 4 e 3

sofreram uma elevação nos seus valores de pico e para alguns experimentos apresentaram uma redução nos valores de tempo mínimo. Para o condutivímetro 4, sendo o seu valor menor até do que o tempo mínimo do condutivímetro 9, o que representa um aumento da velocidade de líquidos nesta região devido ao aumento da permeabilidade. Nesta condição o fluxo parece ter caminhos preferenciais tanto pela periferia quanto na parte central, apesar dos condutivímetros 5 e 10, situados na parte central não apresentarem valores acentuados de pico e baixos valores de tempos mínimos. Dessa forma, comportamento do condutivímetro 3 sugere que o fluxo que o atinge seja proveniente da direção radial do fundo do cadinho.

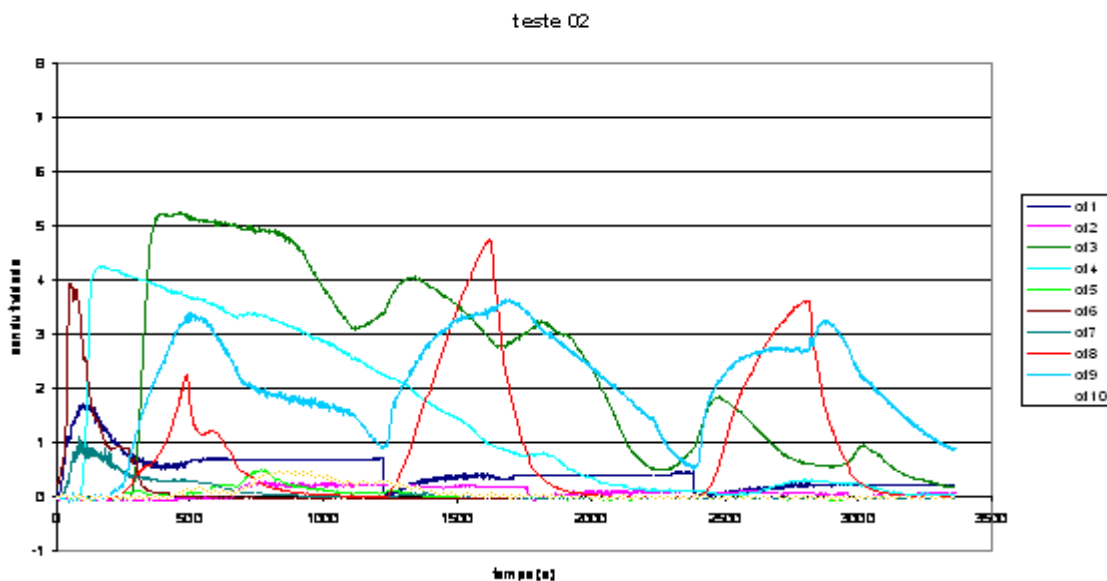


Figura 6.53 – Teste 02 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

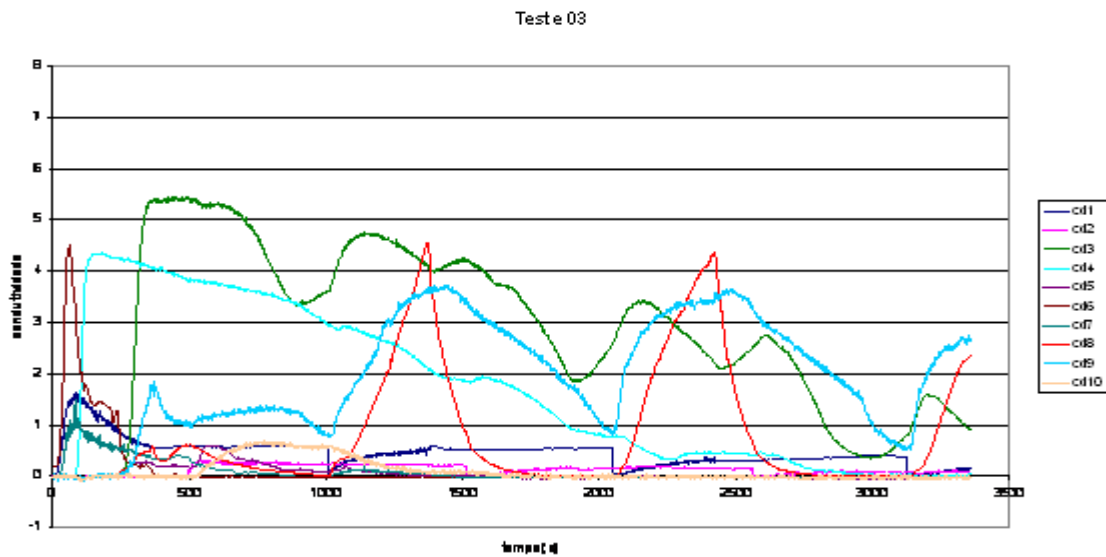


Figura 6.54 – Teste 03 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

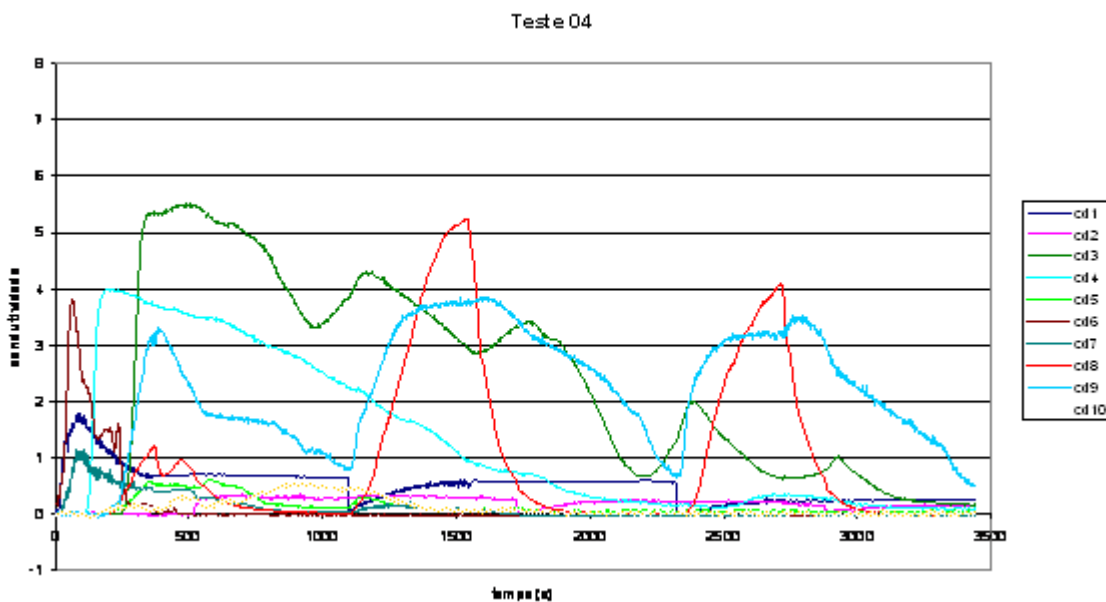


Figura 6.55 – Teste 01 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

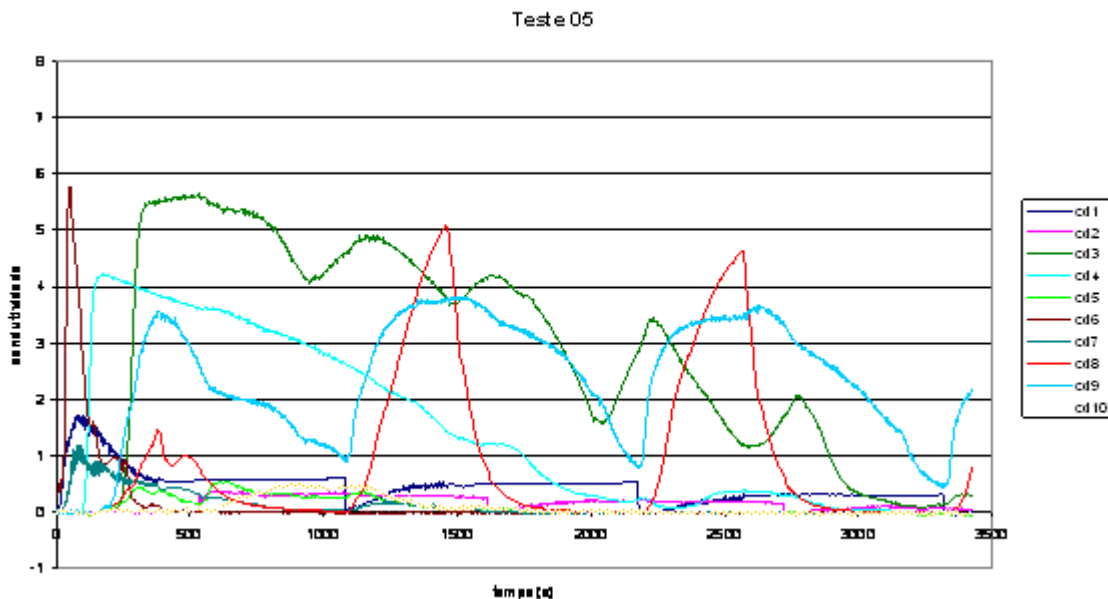


Figura 6.56 – Teste 05 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

A Tabela 6.9 mostra a comparação de valores médios obtidos nos experimentos para a condição de homem morto assentado produtividade normal de 3800ton/dia, sendo a condição A com leito de esferas de 19mm e a condição B leito de esferas de 19&25mm. Que mostra que de fato as maiores alterações ocorreram nos condutímetros 9, 8,4 e 3.

	$t_{\min}(s)$	pico1	$t_{\text{pico 1}}(s)$	pico 2	$t_{\text{pico 2}}(s)$	pico3	$t_{\text{pico 3}}(s)$	pico4	$t_{\text{pico 4}}(s)$	$t_{\text{transição}}$
Cd10A	485,33	0,44	789,33	-	-	-	-	-	-	839,00
Cd10B	434,4	0,546	848,2	-	-	-	-	-	-	1126,40
Cd9A	174	3,07	324	3,48	1187	1,96	2049	0,71	2832	-
Cd9B	213	3,13	431	3,7	1608	3,382	2789	-	-	-
Cd8A	188	1,03	133	3	1153	2	2001	2929		
Cd8B	223	1,27	412	5	1542	4	2712	3222		
Cd7A	27	0,79	84							757
Cd7B	18	1,19	93							1038,4
Cd6A	23	3,57	61							376
Cd6B	10	4,47	60							453
Cd5A	252	0,44	564,5		-	-	-	-	-	1060
Cd5B	204	0,55	646,75		-	-	-	-	-	1273,25
Cd4A	113	4,04	198							2083
Cd4B	105	4,15	206,4							2674,2
Cd3A	256	3,14	600							2438
Cd3B	273	5,06	474	4	1254	3,614	1713,4	2,522	2407	3227,4
Cd2A	427	0,30	483		-	-	-	-	-	1708,667
Cd2B	580,8	0,31	641,2		-	-	-	-	-	2411,2
Cd1A	12,66667	1,95	79		-	-	-	-	-	2699
Cd1B	14,4	1,69	100,4		-	-	-	-	-	2875,8

Tabela 6.9 – Comparação de resultados na condição de homem morto assentado sem proteção no furo de corrida, produtividade de 3800ton/dia (Condição A - Leito com esferas de 19mm, Condição B -Leito com esferas de 19 & 25mm)

6.2.4 – Ensaios com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida.

As Figuras 6.57 a 6.61 exibem resultados dos experimentos com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida.

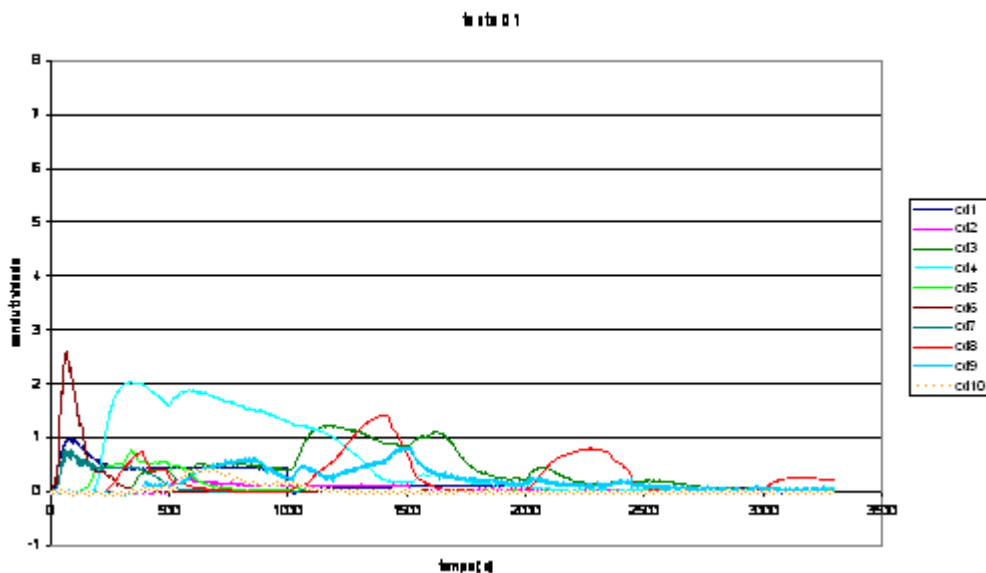


Figura 6.57 – Curvas de condutividade versus tempo com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida

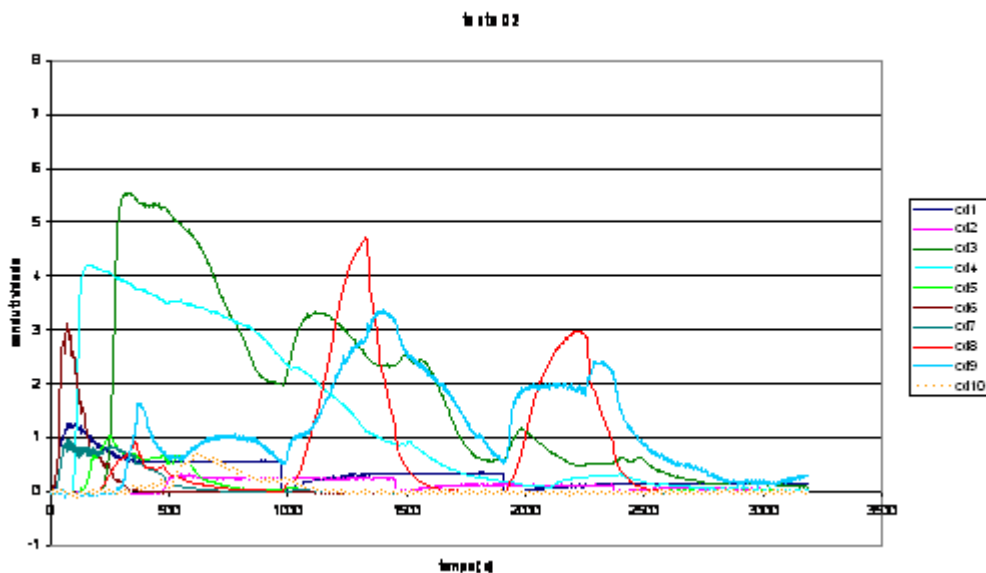


Figura 6.58 – Curvas de condutividade versus tempo, com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida

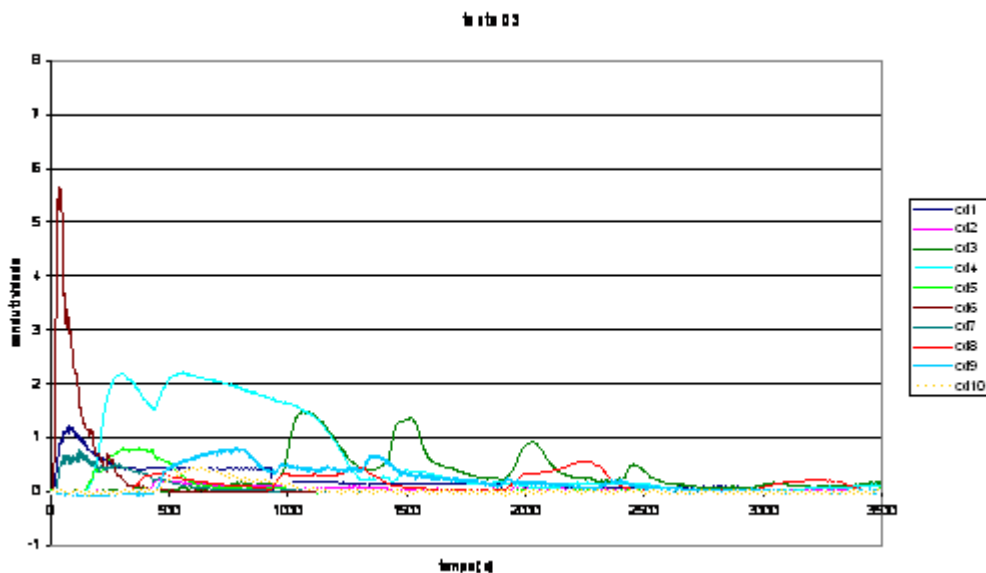


Figura 6.59 – Curvas de condutividade versus tempo, com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida

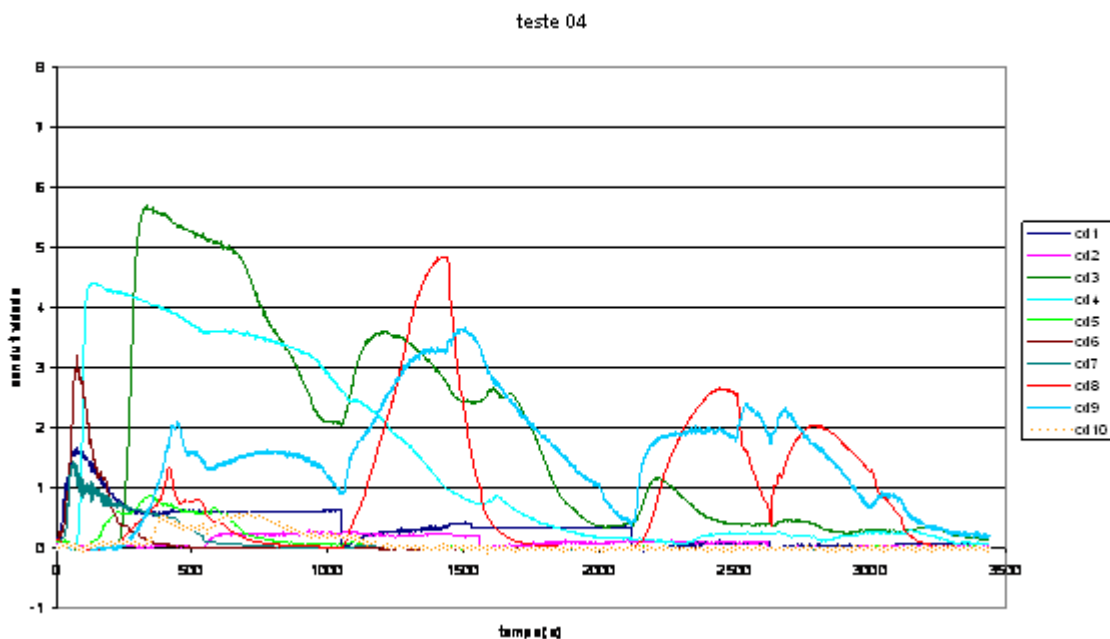


Figura 6.60 – Curvas de condutividade versus tempo, com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida

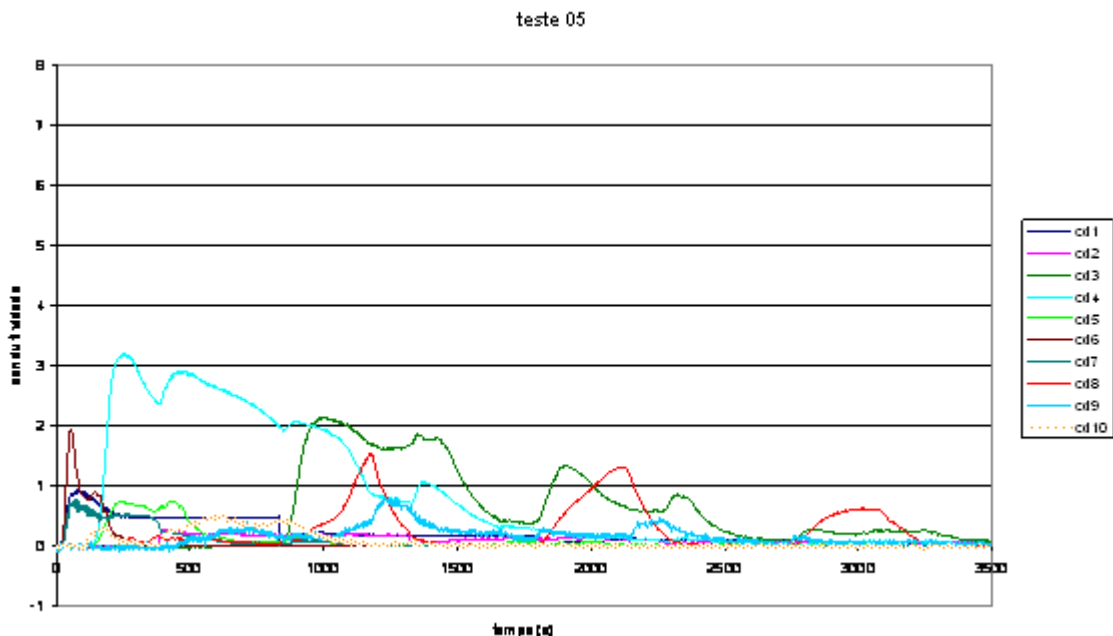


Figura 6.61 – Curvas com aspersão normal, leito com esferas de 19&25 mm, produtividade de 3800ton/dia e sem proteção no furo de corrida

6.2.5 – Ensaio com aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3800ton/dia e com proteção no furo de corrida.

As figuras 6.62 a 6.66 ilustram resultados dos experimentos, com aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3800ton/dia e com proteção no furo de corrida.

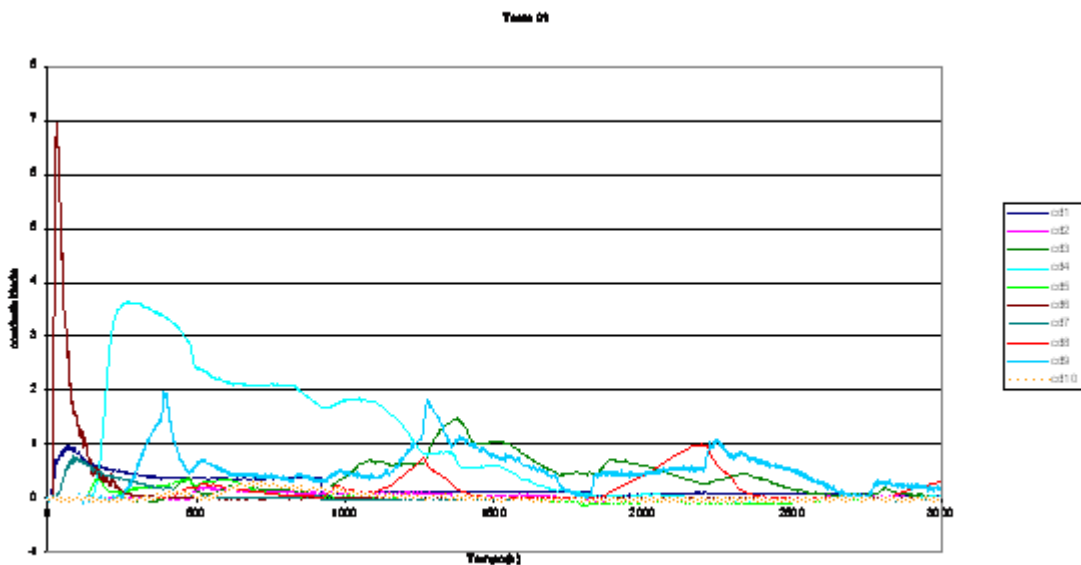


Figura 6.62 – Curvas de condutividade versus tempo, com aspersão normal, leito com esferas de 19 mm, produtividade de 3800ton/dia e com proteção no furo de corrida

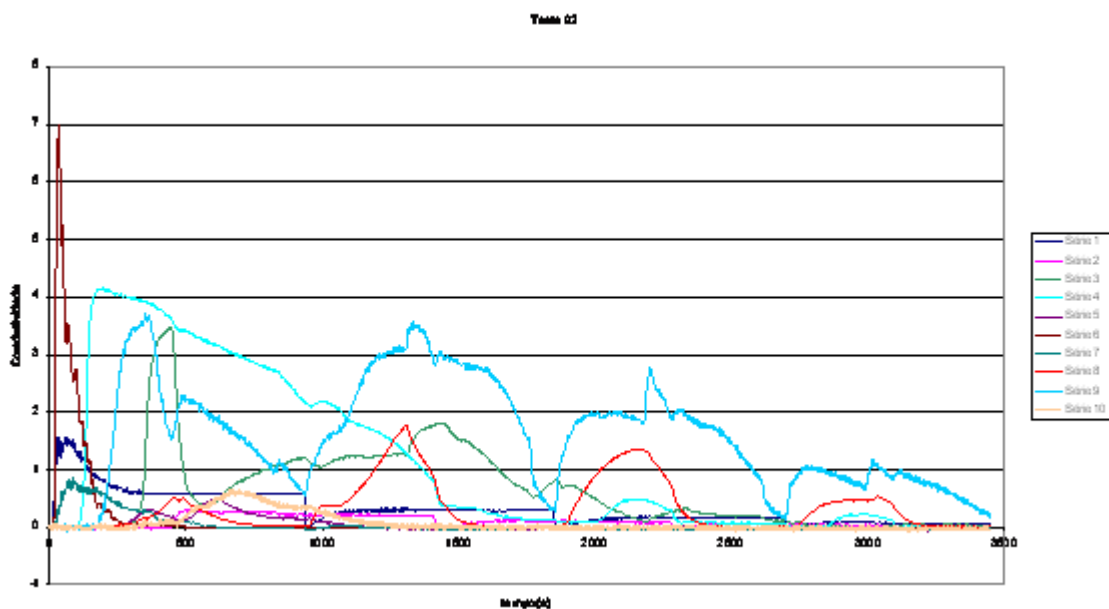


Figura 6.63 – Teste 02 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

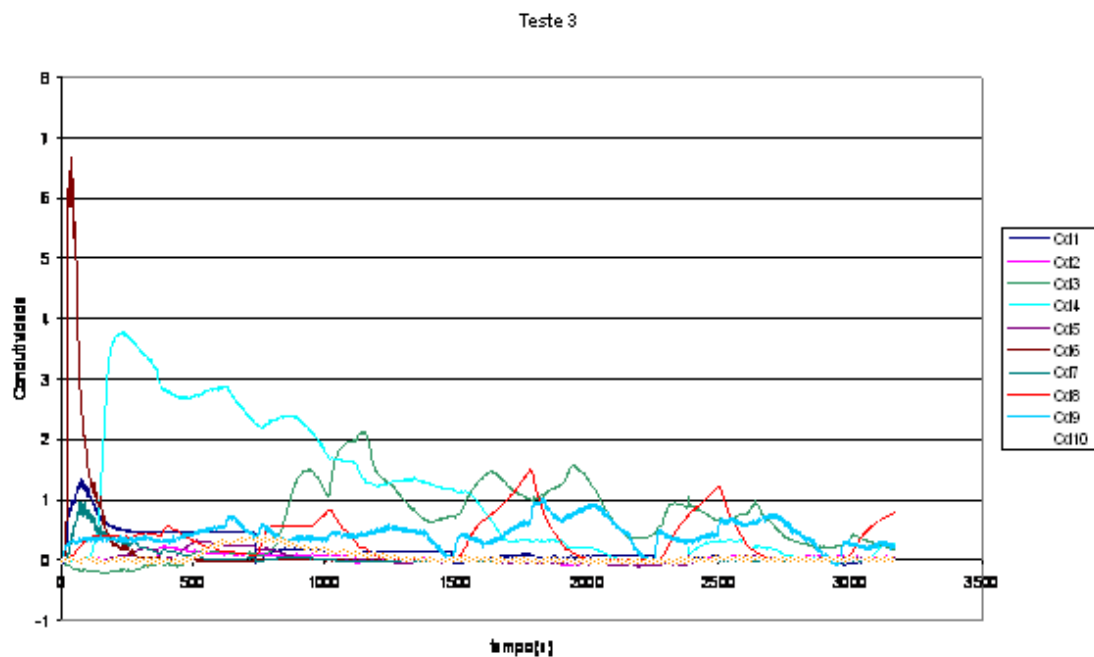


Figura 6.64 – Teste 03 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

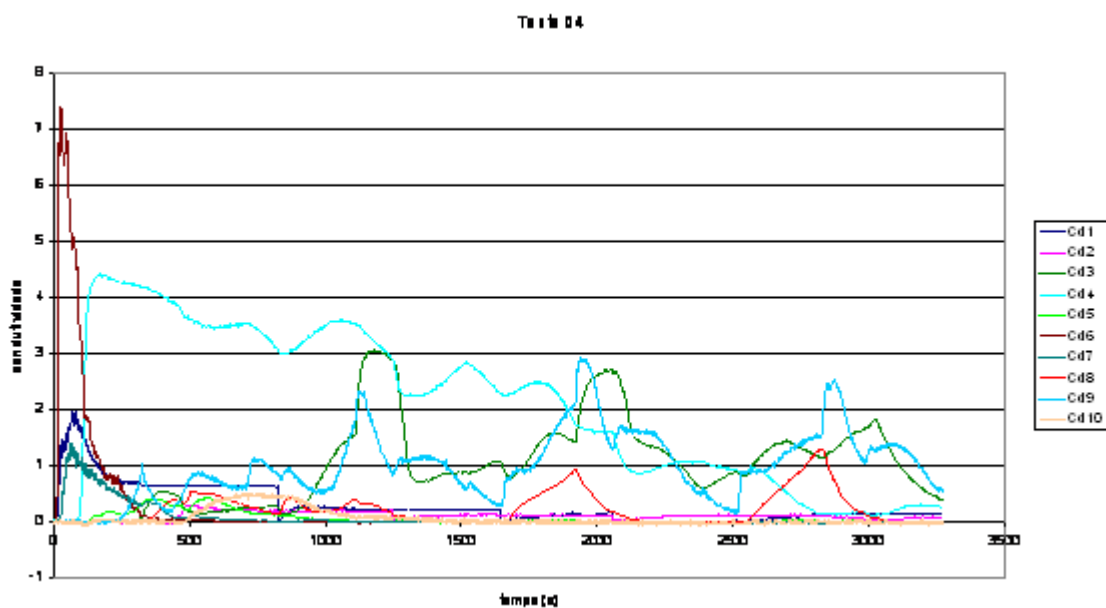


Figura 6.65 – Teste 04 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3000ton/dia, esferas 19 mm e sem proteção no furo de gusa

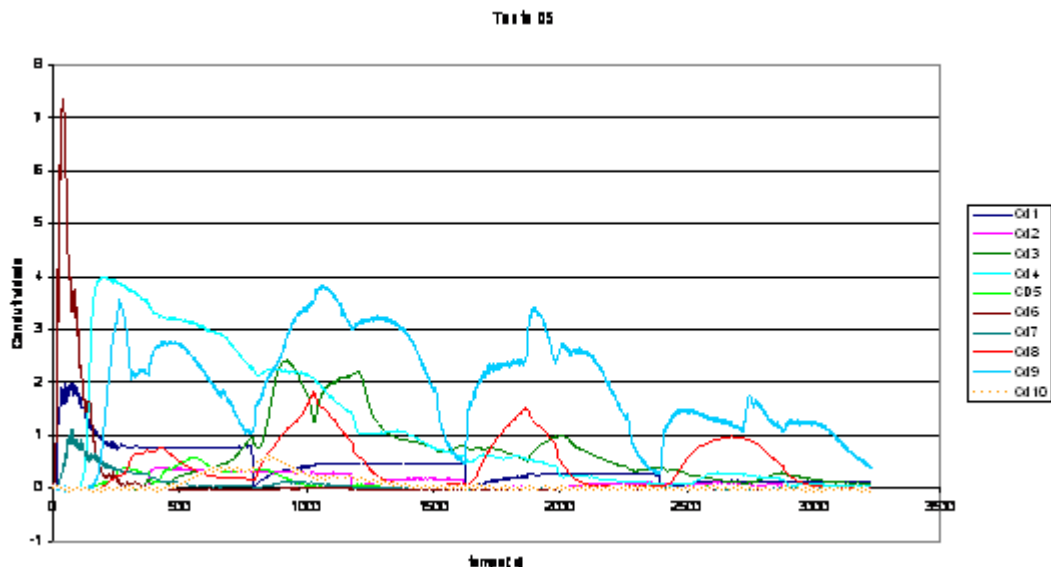
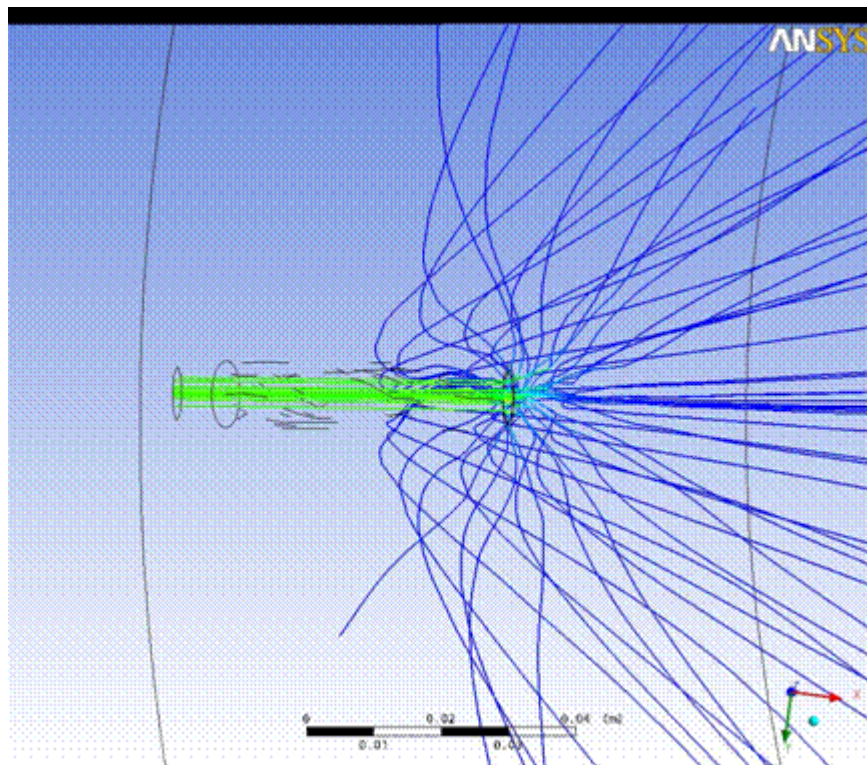
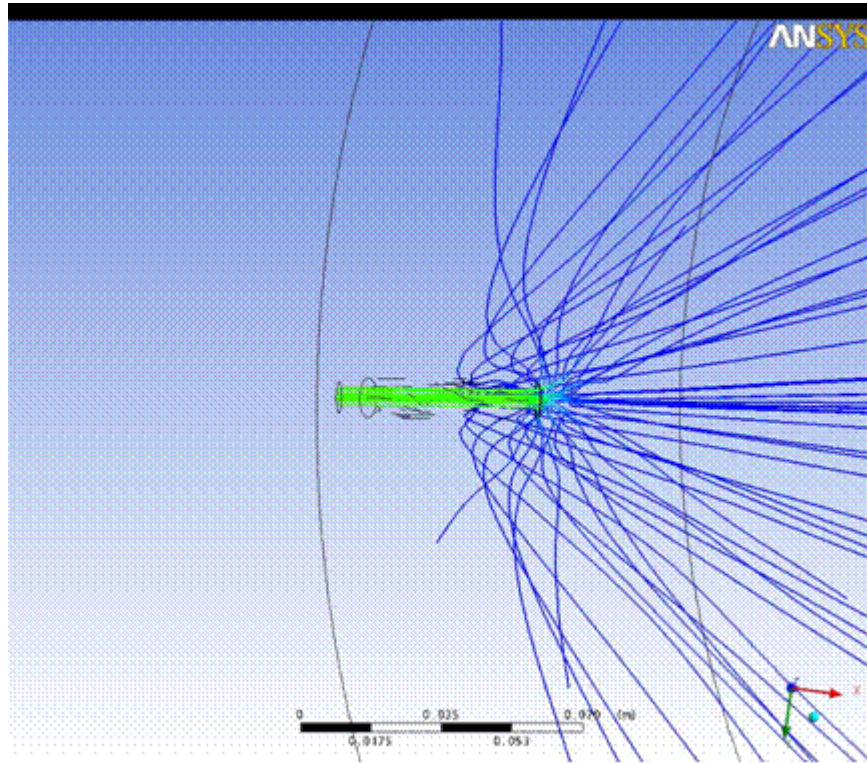


Figura 6.66 – Teste 05 Homem morto assentado, aspersão normal, produtividade 3800ton/dia, esferas 19 mm e com proteção no furo de gusa

6.2.6 – Simulação numérica com o homem morto apoiado no fundo

A condição de homem morto sentado (apoiado no fundo do cadinho) também foi objeto de simulação numérica. No caso do fluxo no molde alguns dos resultados são mostrados, em ordem temporal, nas Figuras 6.67 e 6.68. Novamente investigou-se o caso em que a drenagem é subitamente revertida de um furo de corrida a outro. Primeiramente, observa-se que o fluxo de líquido é obrigado a se defletir no pé do mushroom formado pela massa de tamponagem; provavelmente submetendo esta região a maiores cargas termomecânica. Não existe fluxo preferencial na região do fundo, dado à inexistência de um canal, característico da situação de homem morto flutuante. Não obstante a melhor distribuição de linhas de fluxo no leito poroso é patente seu redirecionamento ocasionado pela troca de furos de drenagem. Como do caso de homem morto flutuante, ao redirecionamento de linhas de fluxo em porções significativas do cadinho deve ser creditada a forma plurimodal das curvas de condutividade.



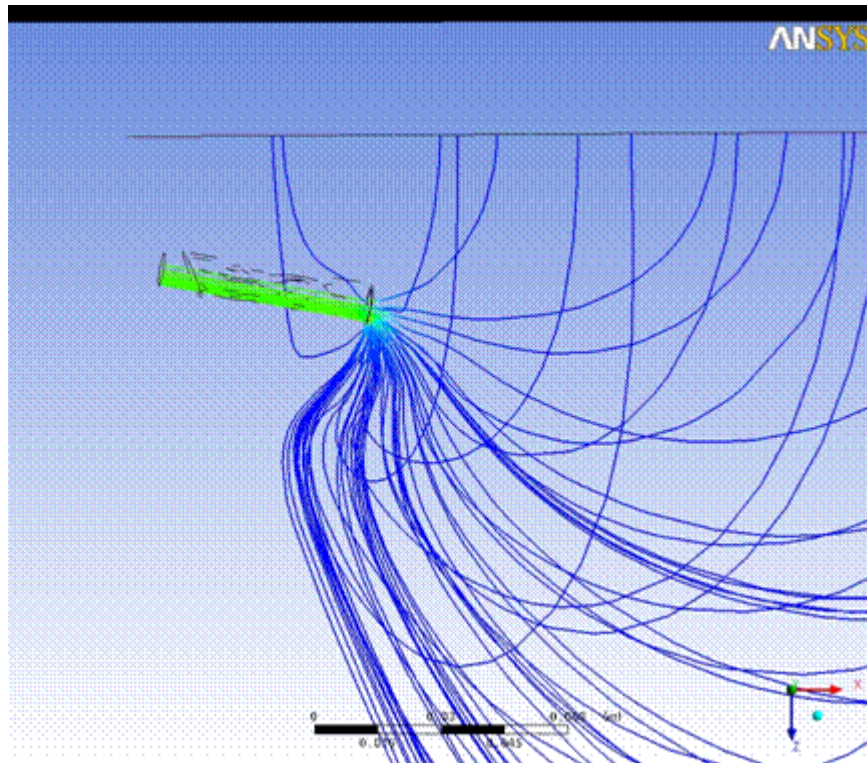
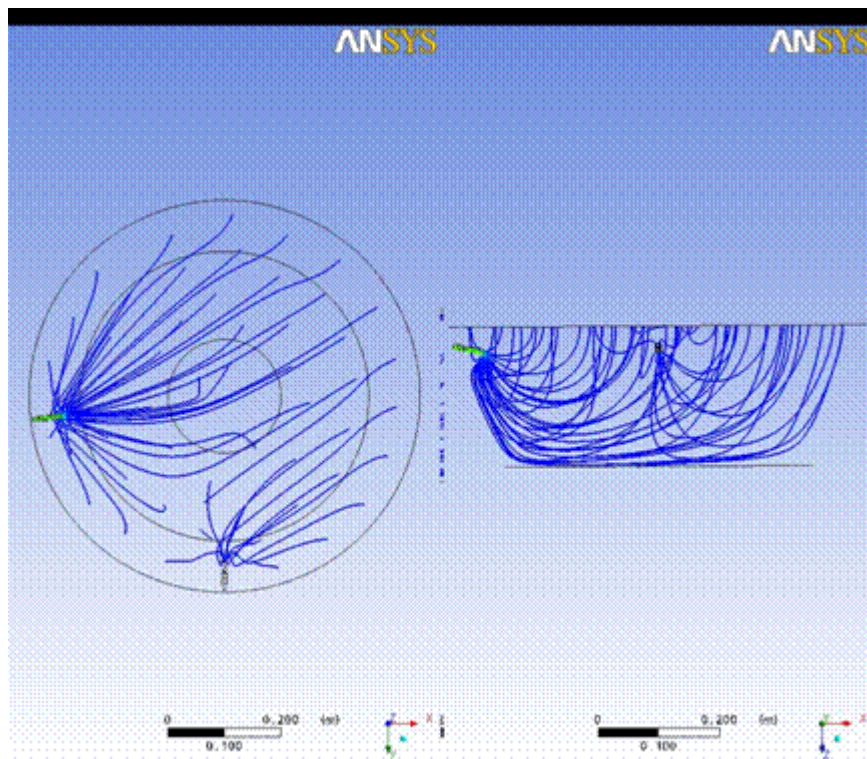
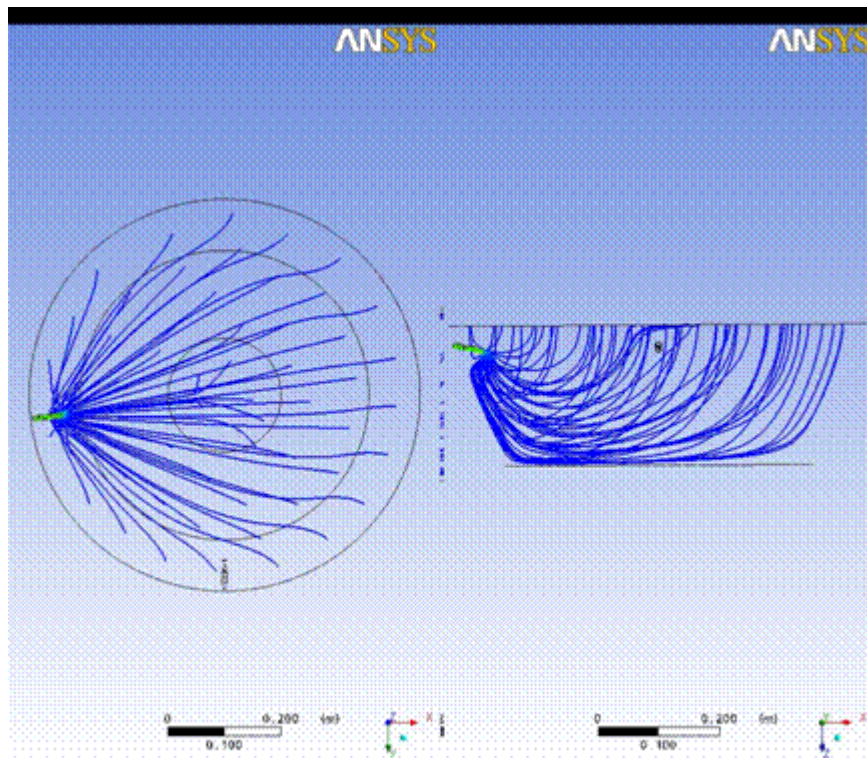
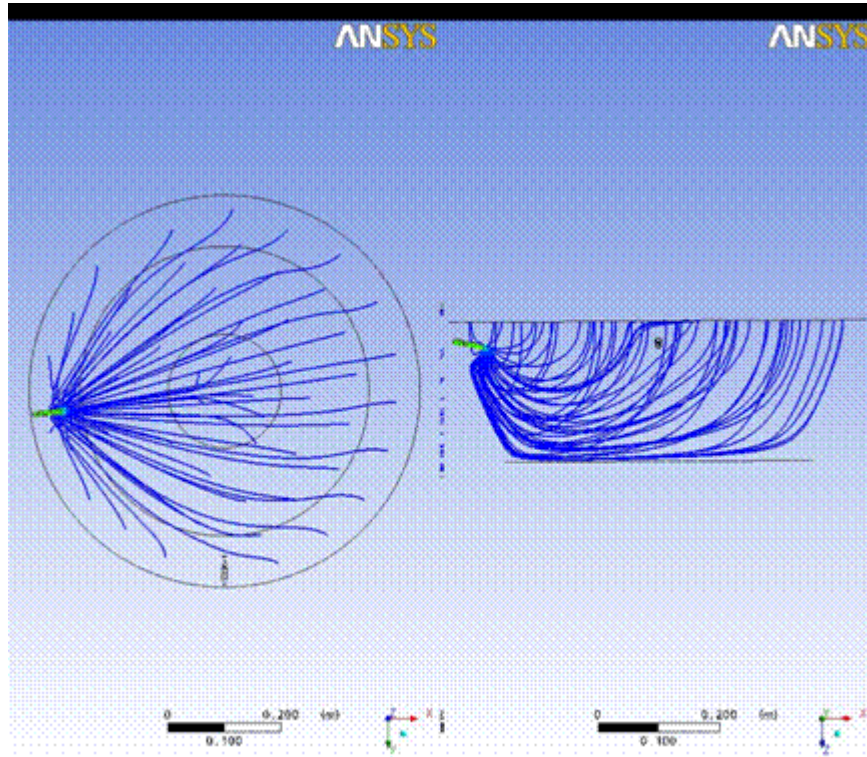


Figura 6.67 – Detalhes das linhas de fluxo nas imediações do furo de corrida, em função do tempo, após inversão dos furos de drenagem.





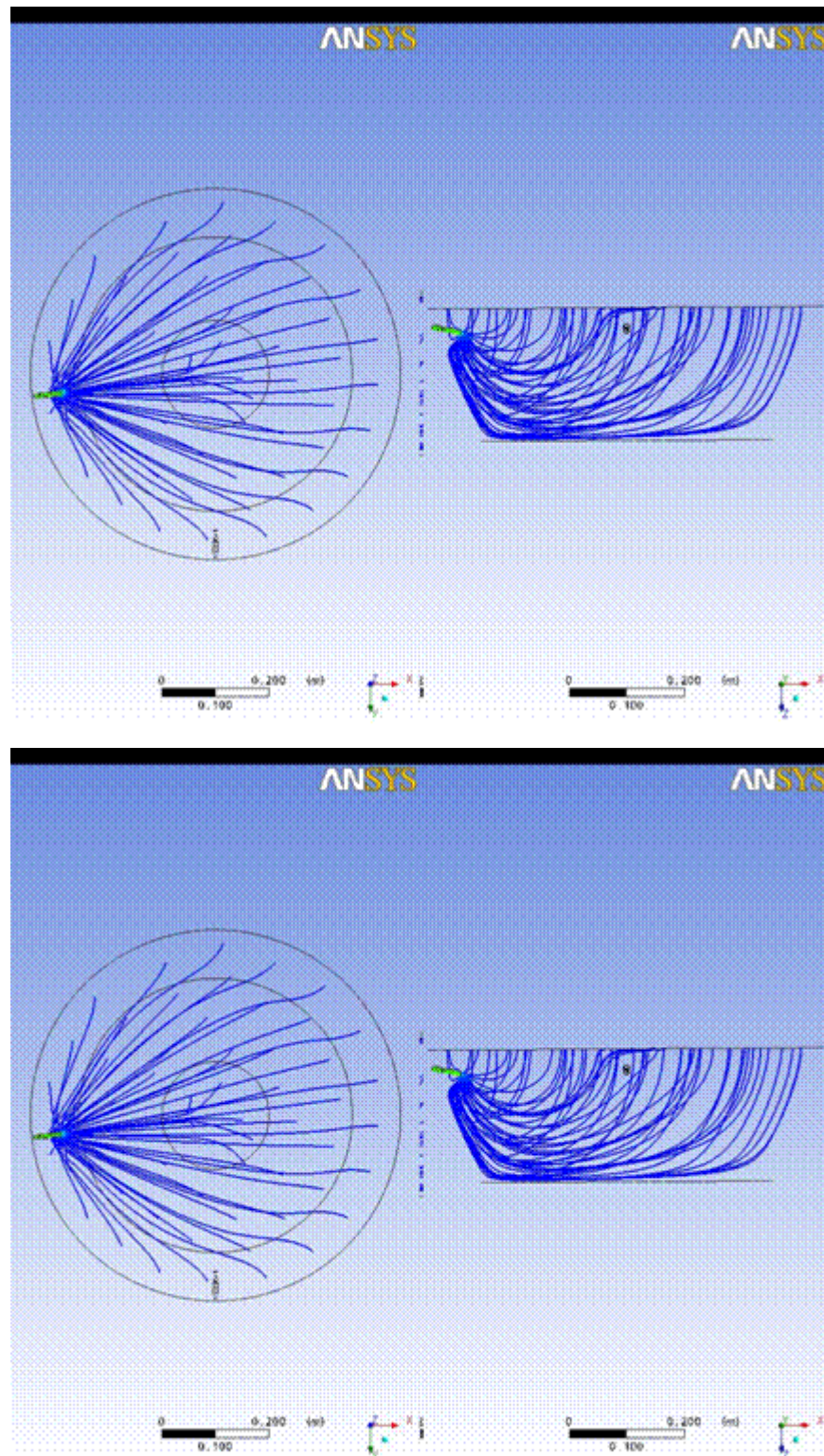
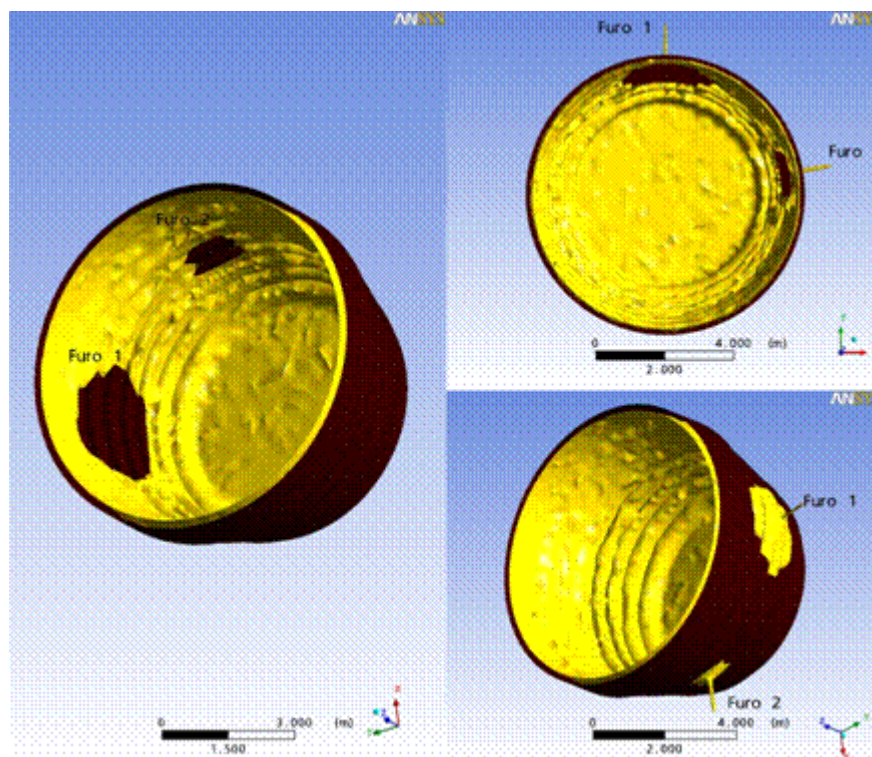
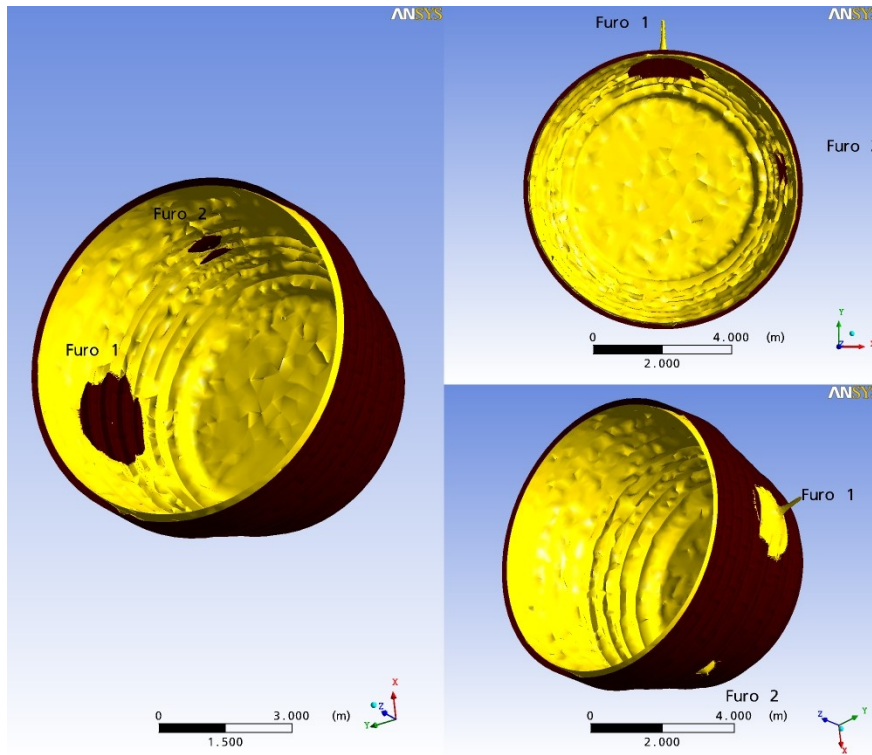
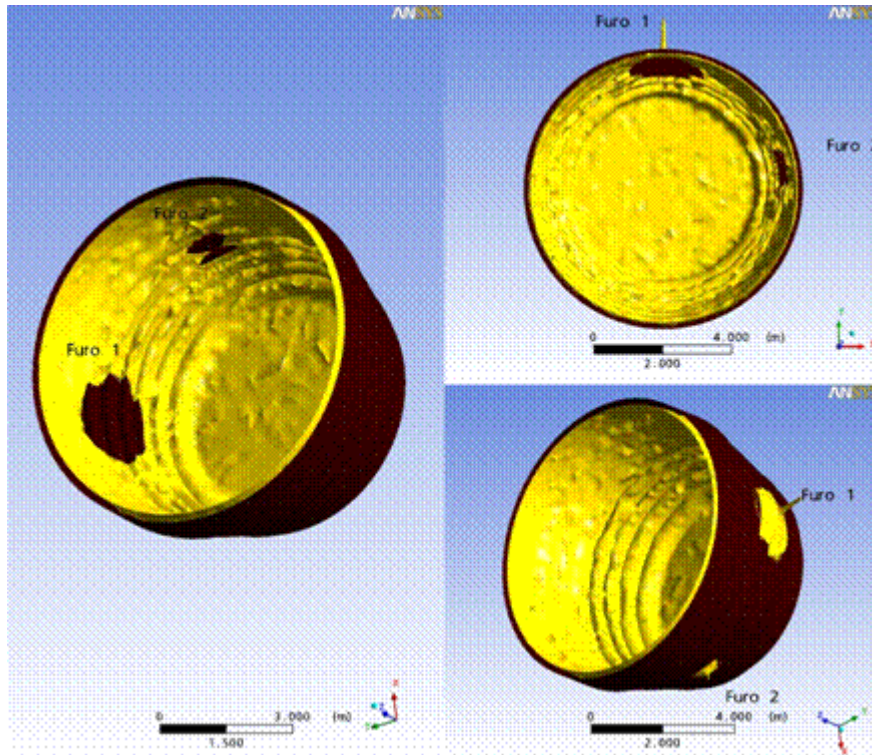


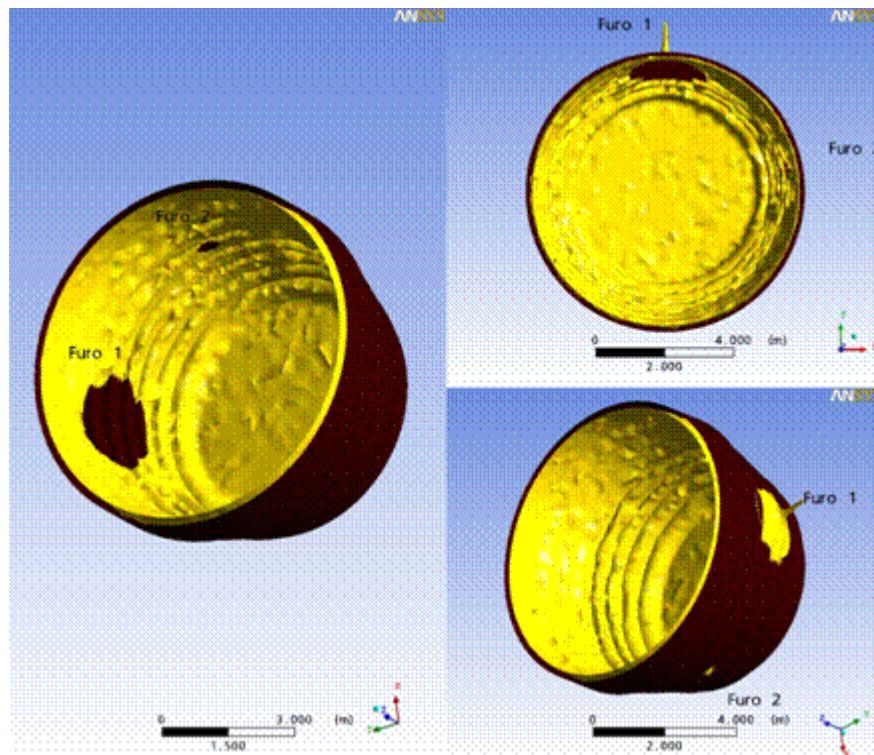
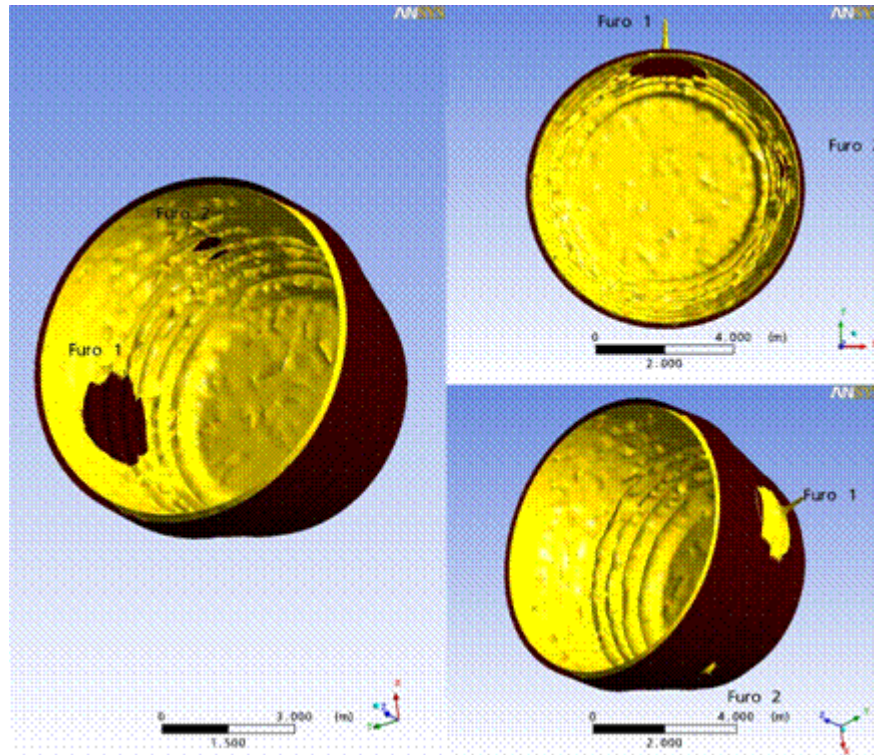
Figura 6.68 – Detalhes das linhas de fluxo nas imediações do furo de corrida, em função do tempo, após inversão dos furos de drenagem.

6.2.7 – Simulação térmica matemática

Quando da realização deste trabalho o perfil real de desgaste do cadinho não estava disponível. Portanto simulações envolvendo também o fluxo térmico só foram possíveis tomando em consideração o perfil original do cadinho, ver seção de Metodologia. É de se esperar que o regime de transiência de fluxo de fluidos seja acompanhado por um regime de transiência térmica. Nas regiões onde o fluxo de líquido é mais significativo, por exemplo, no canal entre o fundo do cadinho e o homem morto flutuante, as temperaturas são mais altas. Tradicionalmente se toma a isoterma a 1150°C , temperatura do eutético no sistema ferro-carbono, com a linha provável de desgaste devido à solubilização do refratário pelo metal. Obviamente esta é uma sugestão da posição de linha de desgaste se equilíbrio for envolvido; fatores cinéticos relativos ao grau de subsaturação do metal em contato com o bloco de carbono e ao tempo de exposição colocam um limite ao desgaste efetivo. Levando em conta estas restrições a posição da superfície isotérmica a 1050°C representa o “worst case scenario”; deste modo utilizou-se o CFX para a predição da posição desta isoterma durante o período de transição, logo após a inversão dos furos. Resultados em ordem temporal estão na Figura 6.69.







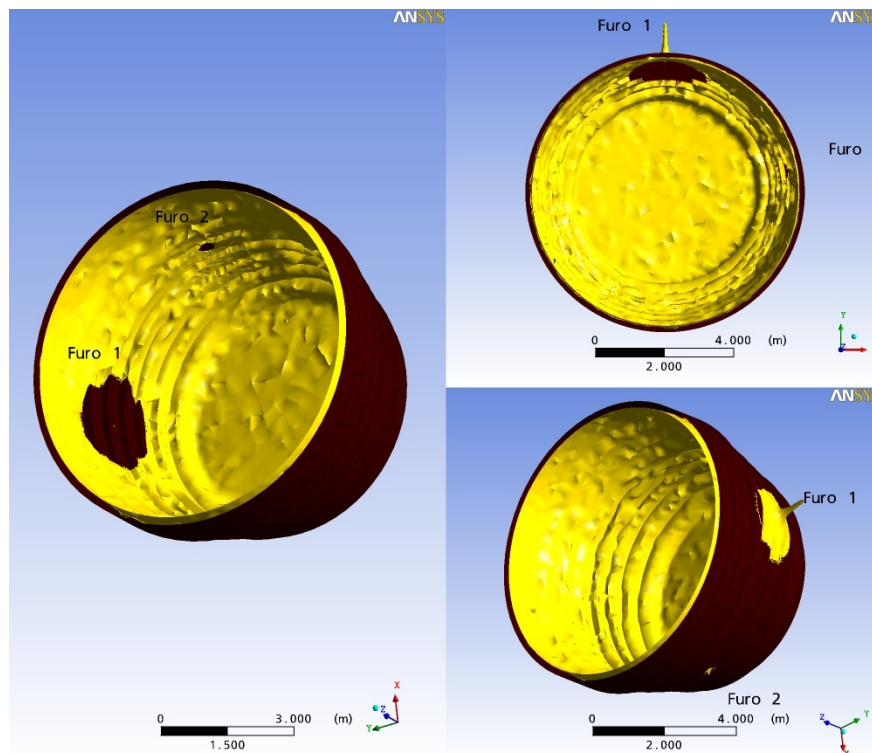


Figura 6.69 – Posição da isoterma a 1050°C logo após a inversão dos furos de drenagem, tempo em segundos: 0, 1125, 2190, 3255, 4335, 5400.

Nota-se que os refratários na região do furo de drenagem são submetidos a um ciclo térmico considerável; tal se torna evidente em vista da penetração crescente da isoterma à medida que o vazamento (neste caso, furo 1) se prolonga. Embora neste estágio se trate apenas de inferência (pois não foram calculadas as tensões de cisalhamento), as combinações dos resultados de modelagens físicas e numéricas apontam o pé do mushroom como região de alta carga mecânica e térmica.

6.3 – Desgastes das paredes do Alto-forno 2

O Alto-forno 2 da ArcelorMittal Tubarão passa no momento por uma reforma em seu cadinho. Embora detalhes do *blow down* estejam fora do escopo deste trabalho alguma evidência pode ser retirada, que dá suporte às afirmativas feitas anteriormente com as respostas apresentadas nos modelos.

Após a parada do alto-forno é necessário a limpeza do cadinho para que seja possível medir a espessura residual dos blocos, bem como os locais mais crítics de desgastes. Para isso foi utilizada uma máquina, colocada dentro do cadinho, que juntamente com uma correia, posta no piso das ventaneiras, removeu o material, conforme mostra a figura 6.70.



Figura 6.70 – Máquina trabalhando para limpeza do cadinho, removendo o material com o apoio da correia.

Para a realização da medição espessura residual, por um método não-destrutivo dos blocos, criou-se um dispositivo visando realizar medições indiretas a partir de um referencial fixo. O desenho esquemático da figura 6.71 nos remete a compreensão da metodologia, conhecendo as medidas Y e Y' e realizando a medição do ponto X , se obtêm a medição Z que é a medida do perfil remanescente do bloco, tendo como referência a carcaça do cadinho.

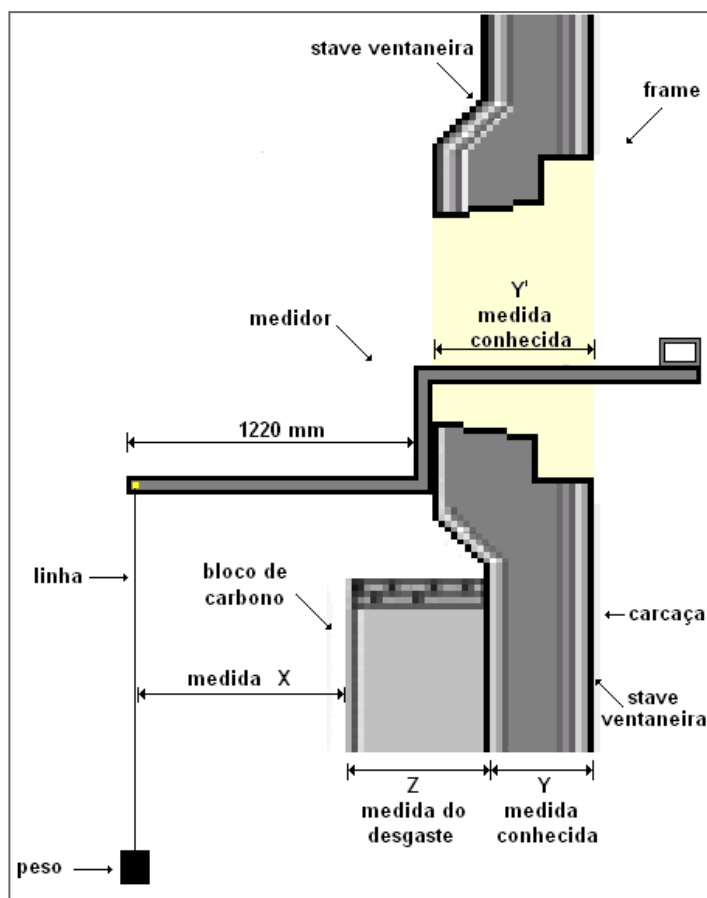


Figura 6.71 – Desenho esquemático que representa a forma que foi realizada a medição.

Com as medições realizadas, conforme já era esperado, no nível onde ocorre a extração do líquido dentro do cadinho foram encontradas as menores espessuras residuais, sendo nas regiões dos furos de gusa as mais críticas destes níveis. As figuras 6.72 e 6.73 mostram os perfis de material residual nestes dois níveis.

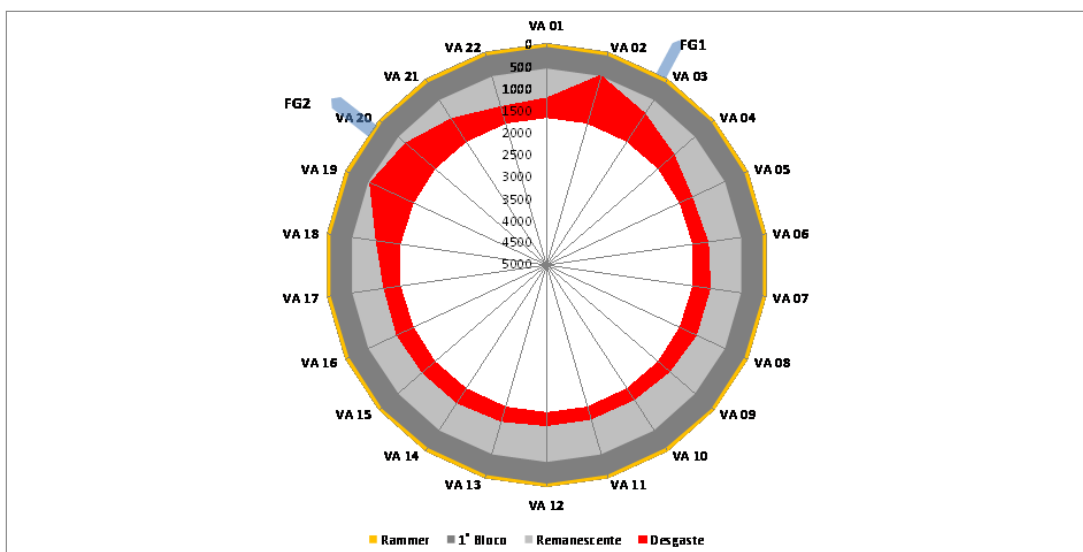


Figura 6.72 – Desenho esquemático que representa o desgaste no nível superior do HL4 (nível de extração do líquido).

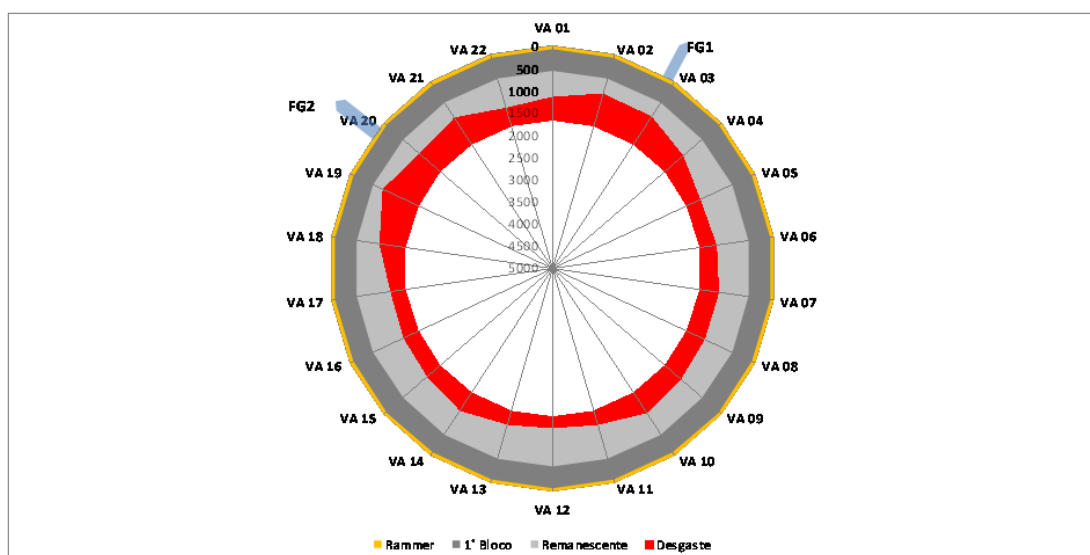


Figura 6.73 – Desenho esquemático que representa o desgaste no nível inferior do HL4 (nível de extração do líquido).

A Figura 6.74 e 6.75 mostra o aspecto (superfície externa, morfologia) dos furos de corrida. Esta forma se assemelha de fato a uma couve-flor (cogumelo, mushroom); os maiores valores de temperatura, acusados pelo sistema de termopares se

encontravam frequentemente na região ao redor do mushroom, evidenciando uma combinação de maior carga térmica (metal aquecido, velocidades altas de metal) e menores espessuras residuais de refratário. Deste modo existe boa evidencia experimental que suporta este modelamento.

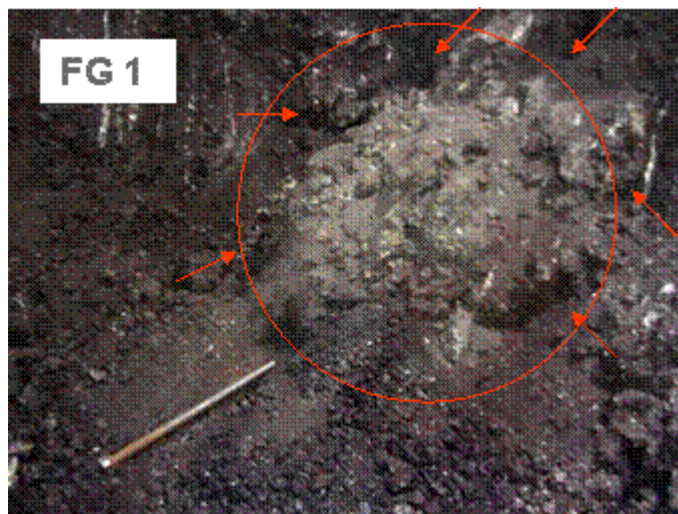


Figura 6.74 – Cogumelo do furo de gusa 1 com os locais de desgastes evidenciados em seu redor.



Figura 6.75 – Cogumelo do furo de gusa 2 com os locais de desgastes evidenciados em seu redor.

7 – Conclusões

Dos resultados obtidos as seguintes conclusões puderam ser alcançadas:

Da modelagem física:

- i. As curvas de variação de condutividade do líquido que percola no homem morto são plurimodais. Isto se deve ao caráter de transiência do fluxo o qual é devido à alternância de drenagem pelos dois furos de corrida e como tal não pode ser evidenciada por experimentos realizados em condições de regime permanente.
- ii. A variação de produtividade não pareceu influenciar de forma significativa sobre a distribuição dos líquidos e nem sobre o tempo de residência para as condições analisadas, porém é perceptível que os termopares do cadinho, que indicam desgaste, durante a operação diminuem seu nível ao reduzir a produção;
- iii. A distribuição granulométrica do coque ao longo do raio, no interior do cadinho, tem forte influência sobre as linhas de fluxo de líquido, e conseqüentemente, na sua retenção; entretanto este fator não foi significativamente evidenciado nestes experimentos dado ao caráter periférico de aspersão de líquidos no cadinho;
- iv. A mudança de permeabilidade mostrou-se influenciar significativamente sobre as linhas de fluxo, criando caminhos preferenciais devido à facilidade da percolação de líquidos; isto se torna evidente quando são comparadas as condições de homem morto sentado e flutuante;

Da modelagem matemática:

- i. A distribuição de fluxo de líquido parece mostrar-se mais densificada, na região do furo de corrida, ao longo da operação de drenagem do gusa líquido, indicando uma tendência forte de desgaste do refratário do furo de corrida e nas imediações do mesmo;
- ii. O caráter cíclico do fluxo de líquido no cadinho, causado pela alternância de furos de corrida, se reflete em condições também cíclicas de carga térmica aos refratários; este aspecto é evidenciado pelo avanço e recuo alternados da isoterma de 1150°C nas imediações dos furos de corrida.
- iii. No caso do homem flutuante, a distribuição de fluxo de líquido é intensa na região do furo de corrida e entre a base do homem morto e a soleira do cadinho, indicando maior tendência de desgaste do revestimento refratário nestas porções do cadinho;

As indicações deste modelamento físico e matemático são suportadas por evidências retiradas do blowout do alto-forno utilizado como referencia para este trabalho. Particularmente se destaca o furo de corrida proeminente na direção central do cadinho (como resultado da massa de tamponamento) na forma denominada de cogumelo, porém apresentando acentuado desgaste no pé do mesmo.

8 – Sugestões para trabalhos futuros

1. Incluir, no modelo, a presença de gases gerados nas raceways e a eventual influência deste fluxo gasoso sobre a distribuição radial de líquido.
2. Incluir, no modelo, a presença da zona de amolecimento e fusão e a eventual influência da espessura, posicionamento e formato da ZAF sobre a distribuição radial de líquido.
3. Analisar a influência da restauração da atividade do homem morto inicialmente inativo (***homem morto densificado***) sobre a distribuição de fluxo de líquido na região do cadinho.
4. Alterar a geometria do cadinho de maneira a determinar a situação que leva aos menores esforços termomecânicos sobre a parede refratária.

9 – Referências Bibliográfica

1. ARAUJO, Luiz Antonio de. Manual de Siderurgia. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997. V. 1
2. BOBEK, James et alli. Hearth Waer and Bottom Skulls. ISPAT Inland's #7 Blast Furnace. AISTech 2004 Proceedings. pag 23-34 – Volume I. 2004.
3. BRANNBACKA, J &. SAXEN, H “Modeling the Liquid Levels in the Blast Furnace Hearth”, *ISIJ International*, Vol. 41, No. 10, 2001, pp. 1131-1138.
4. BRÄNNBACKA, J, SAXÉN, H & POMEROY, D. - Identifying and Quantifying a Floating Dead-man State in the Blast Furnace Hearth, AISTech 2005 Proceedings - Volume I, p.173-182
5. CHEN, A. et al. Phisical Modelling of flows in the Blast Furnace. AISTech The Iron & Steel Technology Conference, vol 1, p. 47, May. Charlotte, N.C., USA, 2005.
6. DEFENDI, Guilherme. Caracterização da cinética de reação e comportamento das cinzas dos carvões minerais injetados no alto-forno. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2006. p.9. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
7. DUARTE, A.K., FERNANDES, J. E.. Projeto Refratário para Altos-Fornos a Carvão Vegetal e a Coque. Curso de Fabricação de Ferro Gusa em Alto-Forno – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – 22 a 26 de Maio de 2006 – Belo Horizonte – MG. 2006.
8. EL-GEASSY, A. A.. Effect of Alkalies on the Performance of Blast Furnace. *ISIJ International* - Technical Report. Vol 26, pp 865-874. 1986.
9. ELSAADAWY, E. A & LU, W. K Mathematical Modeling of Flows in the Coke-Free Layer of a Blast Furnace Hearth. AISTech 2005 Proceedings - Volume I, p. 271-281

10. FIGUEIRA, R. M.; TAVARES, R. P. Aerodinâmica do Alto-Forno: Fenômenos Aero e Hidrodinâmicos na Zona Úmida.– Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais. Abril, 2003.
11. FRASER, B., CUMMINS, J., BROWN, G & DWIGHT, R. In-Service Performance of Micropore Carbon at Newcastle BF 3 , AISTech 2004 Proceedings - Volume I, p. 57-58
12. FUJIHARA, F. K. – Aspectos Tecnológicos Relativos à preparação de Carga e Operação de Alto Forno – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM: São Paulo 1994.
13. FUJIHARA, F. K. – Campanha do Alto Forno Nº. 1 da CST – 60º Congresso Anual da ABM – 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte-MG p. 105-107.
14. FUJIHARA, F. K. - “CST nº 1 Blast Furnace – 22 years of burden distribution control”. In: ATS – International Steelmaking Days, Paris, 2005. p.261-267
15. FUKUTAKE, T. & OKABE, K. Experimental studies of slag flow in the blast furnace heart during tapping operation. Trans.ISIJ,16: 309 - 16, 1976.
16. GEERDES, M.; TOXOPEUS, H.; VLIET, C. V. Modern Blast Furnace Ironmaking; an Introduction. 1.ed. Dusseldorf: Stahl Eisen, 2004. p. 118.
17. GUIMARÃES, Vagner A. Fabricação de Ferro-Gusa em Alto Forno: Aerodinâmica do Alto Forno. Apostila. ABM: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Maio de 2006. Cursos ABM. Belo Horizonte.
18. HUANG, Frank. Simulation of Hearth Draining Process and Thermal Stress of BF Hearth. Iron & Steel Technology Conference Proceedings, AISTech 2007. Indianápolis. Maio 7 a 10. USA. 2007. p. 475-485
19. HUANG, Frank. Numerical Investigation of Transient Hot Metal Flows in a Blast Furnace Hearth. In: The Iron & Steel Technology Conference and Exposition and ICS 2005, 2005, AISTECH 2005 PROCEEDINGS, Volume 1, Charlotte: AISTECH , 2005. p. 199-207.
20. HUR, N.S.. Hearth Wear Control at Kwangyang nº 1 Blast Furnace. 1998 ICSTI / Ironmaking of Conference Proceedings, Vol. 57. pag 581-585. Toronto. Canada

21. HUSSLAGE, W. M., STEEGHS, A. G. S., BAKER, T., HEEREMA, R. H & REUTER, M. A - Flow Experiment of Slag and Metal at 1400-1600°C Through a Packed Coke Bed. Ironmaking Conference Proceedings, 2001, p. 337-348
22. INADA, T.. The Effect of the Change of Furnace Profile with the Increase in Furnace Volume on Operation. . ISIJ International, Vol. 43, nº 8, pp 1143-1150. 2003.
23. JAMENSON, D & GORDON, R.; The taphole Zone – The Critical Factor in Long Campaign Life, Ironmaking Conference Proceedings, 1999, p. 625-631
24. JANZ. J. et alli. Installation of Cooper Staves in Blast Furnace Hearths and Their Influence on Refractory Design. AISE STEEL TECHNOLOGY, May 2003. p. 42-51.
25. KOLINJ, Cornelis J.. Coke Quality and Hearth Life. In: First International Meeting on Ironmaking, 2001, Belo Horizonte. ABM, 2001 p. 78-89
26. McNALLY, R.. Advances & advantages With Ceramic Cup Technology. Paper Saint-Gobain. Asociacion Latino Americana de Fabricantes de Refractarios - ALAFAR. October México 2000. p. 23
27. MIYAMOTO, Manabu. Deformation and Failure Behavior of Refractories for the Blast Furnace at Elevated Temperatures. Published in Testu-to-Hagané. 1981. Japan. Iron and Steel Institute of Japan vol.21 No.12 pp.887-894
28. MIRANDA, Jorge. Desarrollo de Masa Carbonosa de Inyección para Crisoles de Alto-Hornos. 4th IAS Ironmaking Conference, 2003. San Nicolas. Argentina.
29. NITTA, Michio. Investigation of Used Carbon Blocks for Blast Furnace Hearth and Development of Carbon Blocks with High Thermal Conductivity and High Corrosion Resistance. Nippon Steel Technical Report nº 94. pag 122-126. July 2006.
30. NNANNA, G. A.; ULUDOGAN, A.; ROLDAN, D ; ZHOU, C. Q.; CHAUBAL, P. & . HUANG, “Water Model of a Blast Furnace Hearth for Flow Pattern Investigation”, *AISTech Proceedings*, Vol I, 2004, pp. 35-46.

31. NOUCHI, T; YASUI, M & TAKEDA, K“Effects of Particle Free Space on Hearth Drainage efficiency”, *ISIJ International*, Vol. 43, No. 2, 2003, pp. 175-180.
32. OMORI, Y. Blast Furnace Phenomena and Modelling Elsevier Applied and Science. London, 1987
33. PANJKOVIC, V & TRUELOVE, J. S. “Computational Fluid Dynamics Modeling of Iron Flow and Heat Transfer in the Iron Blast Furnace Hearth”, *Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, CSIRO, Melbourne, Australia, 6-8 December, 1999.
34. QING, Li Xiao. Baosteel #1 BF Hearth Safety and Long Life Management. Baoshan Iron & Steel Co. Ltd. Ironmaking. Vol 24, nº 1. 2005.
35. SAXEN, H & TORRKULLA J, “Model of the State of the Blast Furnace Hearth,” *ISIJ International*, Vol. 40, 2000, No. 5, pp. 438-447.
36. SHINOTAKE, Akihiko. Investigation of Blast-furnace Hearth Sidewall Erosion by Core Sample Analysis and Consideration of Campaign Operation. *ISIJ International*, Vol. 43, nº 3, pp 321-330. 2003.
37. SILVA, Sidiney N.. Mecanismos de Desgaste do Revestimento Refratário de Cadinho de Alto Forno. XXXI Seminário de Redução de Minério de Ferro. 2000. São Paulo. ABM. Vol. 2. p. 817 -836.
38. SILVA, Sidiney N.. Mecanismos de Formação das Camadas Penetradas por gusa e Zona Frágil em de Cadinho de Alto Forno. XXXI Seminário de Redução de Minério de Ferro. 2000. São Paulo. ABM. Vol. 2. pág. 789 -802.
39. TANZIL, W.B.U., ZULLI, P., BURGESS, J. M., AND PINCZEWSKI, W. V., “Experimental Model Study of the Physical Mechanisms Governing Blast Furnace Hearth Drainage”, *Trans. ISIJ*, Vol. 24, 1984, Article No. 197.
40. TOMITA, Yukio. Terayama, O; Ohishi, T; Funakoshi, T; Hosikuma, Y; Nunomura, S; Hirota, N. Technical Improvement to Keep the High Productivity Operation for Long Period at Kuke nº 1 Blast Furnace, 1995. p. 32-46
41. TORRKULLA,, J. BRANNBACKA, J; SAXEN, H &. WALLER, M“Indicators of the Internal State of the Blast Furnace Hearth”, *ISIJ International*, Vol. 42, No. 5, 2002, pp. 504-511.

42. YAN, F., ZHOU, C. Q, HUANG, D., CHAUBAL, P & ZHAO, Y, "3-D Computational Modeling of a Blast Furnace Hearth", *AISTech Proceedings*, Vol. I, 2004, pp. 249-260.
 43. WRIGHT, R; ZULLI, P; BIERBRAUER, F & PANJKOVIC, V "Assessment of Refractory condition in a Blast Furnace Hearth Using computational Fluid Dynamics", *Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, CSIRO, Melbourne, Australia, 10-12 December 2003. pp. 125-132
 44. ZHAO, Y.F.. Computer Monitoring System for Gary N° 13 Blast Furnace Hearth. McMaster Symposium on Iron & Steelmaking, n° 27. May 1999. Ontario. Canada.
 45. ZHOU, C. Q.. "Evaluation of Internal Conditions in a Blast Furnace Hearth Using a 3-D CFD Model", AIST 2005, v 1, p 283-292.
- ZULLI, P.. "Mathematical Modelling of flow and temperature distribution in the blast furnace hearth". Fifth International Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia 13-15 December 2006. p 1-6