



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



Dissertação de Mestrado

*“Caracterização Metalúrgica e Simulação Computacional do Parafuso Tirefond Visando a Melhoria do Seu Desempenho nas Ferrovias Brasileiras”*



**Autor: Thayene Oliveira Silotti**

**Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio de Faria**

**Abril de 2015**



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Thayene Oliveira Silotti

*“Caracterização Metalúrgica e Simulação Computacional do Parafuso Trefond Visando a Melhoria do Seu Desempenho nas Ferrovias Brasileiras”*

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: Análise e Seleção de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio de Faria

Ouro Preto, Abril de 2015.

S585c

Silotti, Thayene Oliveira.

Caracterização metalúrgica e simulação computacional do parafuso tirefond visando a melhoria do seu desempenho nas ferrovias brasileiras [manuscrito] / Thayene Oliveira Silotti. - 2015.

73f.:

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio Faria.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

1. Ferrovias - Equipamento e acessórios. 2. ferrovias. 3. Simulação (Computadores). I. Faria, Geraldo Lúcio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 625:004.383.4



**REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**UFOP - CETEC - UEMG**

Pós-Graduação em Engenharia de Materiais



**“Caracterização Metalúrgica e Simulação Computacional do Parafuso Trefon Visando a Melhoria de seu Desempenho nas Ferrovias Brasileiras”**

**Autor: Thayene de Oliveira Silotti**

Dissertação defendida e aprovada, em 29 de abril de 2015, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Geraldo Lúcio de Faria (Doutor) – Orientador  
Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Tanius Rodrigues Mansur (Doutor)  
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear / CNEN

Prof. Luiz Cláudio Cândido (Doutor)  
Universidade Federal de Ouro Preto

# Agradecimentos

Ao Professor Dr. Geraldo Lúcio de Faria meu sincero agradecimento pelo conhecimento compartilhado, pela orientação e motivação.

Agradeço o Professor Dr. Leonardo Barbosa Godefroid coordenador do convênio UFOP – VLI que proporcionou essa oportunidade de estudo.

A aluna de iniciação científica Ana Luiza pelo apoio experimental durante o estudo.

À empresa VLI-FCA pela oportunidade de aprofundamento técnico em ocorrências na ferrovia.

Agradeço a todos que me apoiaram durante a elaboração do estudo, em especial ao Paulo Azevedo, toda a minha família e a gestora da Gerdau Aços Especiais Dra. Cláudia Serantoni.

# Sumário

1. Introdução .....	15
2. Objetivos .....	20
2.1 Objetivo geral .....	20
2.2 Objetivos específicos .....	20
3. Revisão bibliográfica .....	21
3.1 Elementos da via permanente.....	21
3.2 Fixações.....	24
3.2.1 Fixação elástica.....	26
3.2.2 Fixação rígida .....	27
3.2.3 Processo de fabricação do parafuso <i>Tirefond</i> .....	29
3.3 Inovação na fabricação do parafuso <i>Tirefond</i> .....	32
3.4 Esforços na estrutura da via permanente.....	35
3.5 Fator de concentração de tensão em parafusos .....	38
3.6 Método de elementos finitos .....	41
3.6.1 <i>Software</i> ansys .....	43
4. Materiais e métodos.....	45
4.1 Materiais.....	45
4.2 Procedimentos experimentais .....	46
4.2.1 Caracterização química .....	46
4.2.2 Caracterização microestrutural.....	46
4.2.3 Caracterização mecânica .....	47
4.3 Fator de concentração de tensão.....	48
4.4 Simulação computacional .....	48
5. Resultados e discussão .....	53
5.1 Caracterização química.....	53
5.2 Caracterização microestrutural .....	53

5.3	Caracterização mecânica.....	56
5.4	Simulação computacional .....	62
5.5	Torque máximo para fixação.....	68
6.	Conclusão .....	70
7.	Sugestões para futuros trabalhos .....	72
8.	Referência bibliográfica.....	73

## Lista de Figuras

<i>Figura 1.1: Distribuição das causas dos acidentes. FONTE: ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2014.</i> .....	18
<i>Figura 1.2: Parafusos fraturados em campo.</i> .....	19
<i>Figura 3.1: Elementos da via permanente (LINCEVICIUS, 2001).</i> .....	21
<i>Figura 3.2: Evolução das fixações de trilhos ferroviários(MAGALHÃES, 2012).</i> .....	25
<i>Figura 3.3: Pregos de Linha (Russo,2012).</i> .....	28
<i>Figura 3.4: a) Parafuso Tiefond; b) Parafusos Tiefond fixado na placa de apoio ao dormente de madeira (RUSSO, 2012).</i> .....	29
<i>Figura 3.5:Corte das barras de aço ABNT 1015. a) Processo de corte das barras. b) Depósito de barras cortadas.</i> .....	29
<i>Figura 3.6: Etapa de forjamento da cabeça do Parafuso Tiefond: a) Processo de forjamento a quente. b) Rebarba da cabeça do parafuso Tiefond após forjamento a quente.</i> .....	30
<i>Figura 3.7: Aquecimento do parafuso Tiefond para laminação da rosca.</i> .....	30
<i>Figura 3.8: Processo de laminação da rosca do Parafuso Tiefond. a) Laminação; b) Fotografias de três castanhas laminadoras, para realização da rosca do Parafuso Tiefond.</i> .....	31
<i>Figura 3.9: Parafuso Tiefond após banho por imersão em óleo antioxidante.</i> 31	
<i>Figura 3.10: Equipamentos passa/não passa para aferição dimensional do Parafuso Tiefond. a) da aba da cabeça do parafuso; b) da rosca e cabeça do parafuso.</i> .....	32
<i>Figura 3.11: Região preferencial da fratura do parafuso.</i> .....	32
<i>Figura 3.12: a) pré-forma para o processo de laminação cross-wedge; b) após processo de laminação e c) placas para laminação cross-wedge. (Adaptado de: Gontarz et al. 2004 e Weroński et al., 2005).</i> .....	33

<i>Figura 3.13: Testes industriais da laminação cross-wedge na configuração dupla: a) conformação com a parte central aquecida; b) peças na esteira após a conformação; c) seção longitudinal do parafuso Tirefond. (Pater et al., 2005)</i>	34
<i>Figura 3.14: Ordem de grandeza das tensões em via permanente (Esveld, 2001).</i>	36
<i>Figura3.15: Alívio das linhas de tensão em múltiplos filetes. (Pilkey, W.ePilkey, D., 2006).</i>	39
<i>Figura 3.17: Discretização e condição de contorno do modelo matemático para o sistema roda e trilho de trem. Arslan e Kayabasa (2012).</i>	43
<i>Figura 3.16: Deformação Plástica equivalente. Arslan e Kayabasa (2012).</i>	43
<i>Figura 3.18: Distribuição dos produtos da ANSYS/Multiphysics.Ansys Help versão 14.5.</i>	44
<i>Figura 4.1: Parafuso Tirefond.</i>	45
<i>Figura 4.2: Dimensional do corpo de prova de tração.</i>	47
<i>Figura 4.3: Fluxo de realização da simulação computacional do parafuso Tirefond.</i>	49
<i>Figura 4.4: Desenho técnico do parafuso Tirefond cabeça retangular.</i>	49
<i>Figura 4.5: a) Desenho do Parafuso Tirefond e b)1/4 da simetria do parafuso Tirefond, de acordo o software ANSYS/Design Modeler.</i>	50
<i>Figura 4.6: Discretização do modelo por elementos hexaédricos.</i>	51
<i>Figura 5.1: Micrografia do Parafuso Tirefond, sem ataque 100x: a) seção transversal; b) seção longitudinal.</i>	54
<i>Figura 5.2: Micrografias da seção transversal do parafuso Tirefond - região central – MO. Ataque: Nital 2%: a) 100x; b) 400x.</i>	54
<i>Figura 5.3: Micrografias da seção longitudinal do parafuso Tirefond - região central – MO. Ataque: Nital 2%: a) 100x; b) 400x</i>	55

<i>Figura 5.4: Micrografias da seção longitudinal do parafuso Tirefond - região dos dentes da rosca – MO: a) 40x, sem ataque; b) 100x. Ataque: Nital 2%.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.5: Médias e desvios padrão dos perfis de microdurezaVickers na seção transversal do parafuso Tirefond. ....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.6: Curva tensão versus deformação de engenharia dos corpos de prova usinados a partir do parafuso Tirefond.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.7: Superfície de fratura de um CP do parafuso Tirefondensaído por tração: a) 50x e b) 2000x.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.8: Curva de tensão de cisalhamento (MPa) versus deformação em ensaio de torção para CP's do parafuso Tirefond. ....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.9: Encruamento do ABNT1015 a partir de diferentes taxas de deformação a frio. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.10: Tenacidade ao impacto do parafuso Tirefond em função da temperatura. a) fratura frágil; b) fratura dúctil; c) fratura dúctil. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.11: Aplicação da força de tração de 15kN no parafuso Tirefond na simulação computacional pelo software Ansys 14.5. ....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.12: Estado de tensão no parafuso solicitado por tração - software ANSYS.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5.14: Deformação plástica do parafuso Tirefond aço ABNT1045, simulação computacional pelo software Ansys 14.5. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.13: Deformação plástica do parafuso Tirefond aço ABNT1015, simulação computacional pelo software Ansys 14.5. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.15: a) Discretização da primeira geometria proposta por elementos hexaédricos. b) Estado de tensão da nova geometria proposta.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.16: Nova geometria proposta para parafuso Tirefond: a) Força de tração 15kN; b) Discretização do modelo, simulação computacional pelo software Ansys 14.5. ....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.17:Estado de tensão da nova geometria proposta para o parafuso Tirefond com maior raio de concordância da rosca.....</i>	<i>67</i>

*Figura 5.18: Estado de tensão do parafuso Tirefond solicitado com torque de 55kN determinado por meio simulação computacional pelo software Ansys 14.5. .... 69*

## Lista de Tabelas

<i>Tabela 1.1: Extensão da Malha Ferroviária – até novembro de 2013. FONTE: Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT, 2014.</i>	17
<i>Tabela 1.2: Principais investimentos das concessionárias. Valores em milhões de R\$ - preço corrente. FONTE: Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT, 2014.</i>	18
<i>Tabela 3.1: Função das fixações de acordo com o tipo de dormente.FONTE: AREMA -American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, 2009.</i>	26
<i>Tabela 3.2: Constante de Neuber para aços. Norton (2006).</i>	40
<i>Tabela 5.1: Composição química do aço utilizado na fabricação do parafuso Trefond (%em massa).</i>	53
<i>Tabela 5.2: Relação dos fatores de concentração de tensão de acordo a geometria e as propriedades mecânicas. Considerando: <math>r</math> = raio de concordância da rosca, <math>t</math> = profundidade do filete, <math>p</math> = distância entre dois filetes.</i>	68

## RESUMO

O parafuso *Tirefond* é um componente da via permanente ferroviária importante, pois é responsável pela fixação da placa de apoio ao dormente de madeira, por sua vez, garante a estabilidade dos trilhos. Este componente é comumente fabricado no Brasil por processos de conformação mecânica a quente de aços baixo carbono. Entretanto, com o aumento da carga transportada por eixo de locomotiva nos últimos anos, este componente tem falhado em serviço de forma recorrente. Neste contexto, esta Dissertação apresenta um estudo a respeito da caracterização química, microestrutural e mecânica do parafuso *Tirefond* utilizado atualmente nas ferrovias Brasileiras. A caracterização química foi feita por meio da técnica de espectrometria de emissão óptica, a caracterização microestrutural por microscopia óptica e eletrônica de varredura e os ensaios mecânicos executados foram de dureza, tração, torção e impacto. Além disso, foi avaliada a distribuição de tensão ao longo do parafuso *Tirefond* em carregamento estático, a partir da aplicação dos resultados obtidos na parte experimental como condições de contorno em simulações computacionais auxiliadas pelo *software* ANSYS 14.1. Por fim, foi possível entender as principais causas das falhas recorrentes do parafuso *Tirefond*. Viabilizando propostas de mudança no processo de fabricação e na geometria do parafuso atual.

**Palavras-chave:** Parafuso *Tirefond*, caracterização mecânica, distribuição de tensão, simulação computacional.

## ABSTRACT

The screw spike is an important structural component of railroads. It is a fixation component responsible by the support of the plat fixation, which guarantees the stability of rails. This component is commonly produced in Brazil by hot conformation procedures of low carbon steels. However, with the increasing of transported load per train wheel in last years, this component have been often failing in service. Aiming to understand the effects of screw fillets on mechanical behavior of screw spike, this work present a study about the stress concentration susceptibility of this component. It was realized chemical analysis, microstructural analysis, tension, impact and hardness tests. Applying computational models, supported by ANSYS 14.1 software was possible to determine the tension distribution along the actual geometry of the screw spike and to understand the main causes of recurrent failures. Using mathematical models of Fracture Mechanics in association with computational simulations, it were proposed some changes in the screw spike original project, that promise to improve the screw performance in service.

**Keywords:** screw spike, mechanical characterization, stress concentration factor, computational simulation.

# 1. INTRODUÇÃO

O transporte sobre trilhos, iniciado no século XVII em minas de carvão subterrâneas da Inglaterra, expandiu-se para a superfície no início do século XIX, amparado tecnologicamente pela Revolução Industrial inglesa, por sua vez alavancada pelas grandes reservas de carvão mineral, minério de ferro, abundância de mão-de-obra barata e expressivo mercado consumidor desse país.

No final do século XIX e início do século XX a ferrovia exerceu o monopólio absoluto sobre os transportes terrestres, fato que pode ser ilustrado pelo sentido etimológico do termo via permanente ferroviária, até hoje empregado para designar o conjunto dos elementos que constituem a estrada por onde circularão os veículos ferroviários (trilhos, dormentes, lastro, sublastro). Nesse contexto, a ferrovia era um meio de transporte permanentemente aberto ao tráfego, enquanto que as rodovias, ou mais apropriadamente caminhos carroçáveis aquela época, eram frequentemente intransitáveis em períodos de chuvas, neve e degelo, o que, portanto, reforça o caráter monopolista antes citado (BRANCO, 2008).

No Brasil, a primeira ferrovia, inaugurada em 1854, com 14,5km de extensão, ligava o Porto de Mauá, na Baía de Guanabara, a Petrópolis no Estado do Rio de Janeiro. Ela foi construída por concessão do Imperador ao Barão de Mauá, sob cuja responsabilidade operava. Com o advento dos ciclos econômicos agroexportadores, como a borracha em Rondônia e o café em São Paulo, na primeira metade do século XX, houve uma expressiva expansão da malha ferroviária brasileira, sendo que, no ano de 1953, a extensão ferroviária do país já atingia 37.200km (LINCEVICIUS, 2001).

O atraso no desenvolvimento do setor de infraestrutura pode ser explicado por vários fatores da política econômica do governo, além de problemas que envolvem as características territoriais. A topografia acidentada, e o clima tropical não foram entraves ao desenvolvimento, porém décadas

atrásdificultavam os trabalhos, em virtude das técnicas não apresentarem o mesmo desenvolvimento da atualidade (GALVÃO,1996).

A lentidão do desenvolvimento dos transportes no Brasil está também associada a uma orientação histórica de crescimento econômico, caracterizado durante mais de 400 anos por um modelo econômico exportador de produtos primários.

Segundo Katinsky (1994), a partir da segunda metade do século XIX, durante o período de implantação das estradas de ferro no Brasil, a indústria ferroviária pouco se desenvolveu em virtude da falta de uma indústria siderúrgica, que colocava o país na dependência de importações de equipamentos, em grande parte oriunda da Inglaterra. As ferrovias paulistas se desenvolveram sem um planejamento prévio e seguiram a expansão cafeeira alimentando um modelo econômico complementar em relação à Europa e América do Norte. Outra característica do sistema ferroviário paulista é a diversidade de bitolas, que até hoje, inviabiliza as conexões entre as cidades e também entre as diferentes regiões do Brasil.

O desenvolvimento da economia depende estruturalmente do desenvolvimento de meios de transporte que a suportem. Diminuição de custos e aumento de eficiência e confiabilidade nos transportes expandem os objetivos das operações de escoamento de mercadorias e aumentam o nível de comércio nacional, internacional e conseqüentemente da competitividade (FICI, 2007).

Devido ao favorecimento da formação de corredores de logística em consequência das características do território brasileiro, o transporte ferroviário torna-se de grande aplicabilidade, uma vez que este modal é comprovadamente o mais eficiente em transportar grandes volumes de cargas a longas distâncias, devido ao baixo custo, além de levar ampla vantagem do ponto vista ambiental.

A partir do Relatório da Evolução do Transporte Ferroviário 2012, bem como os dados até novembro de 2013, apresentado pela Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT, entidade vinculada ao Ministério dos Transportes - MT, tem-se que atualmente contabiliza-se uma extensão de 28.190km de malha ferroviária brasileira, como mostra a Tabela 1.1.No que

tange ao modal ferroviário, a ANTT fiscaliza doze concessões ferroviárias, dentre as quais sete são oriundas da RFFSA.

O crescimento das malhas ferroviárias das concessionárias está diretamente relacionado aos investimentos das mesmas em material rodante, capacitação de pessoas, oficinas, telecomunicação/sinalização e principalmente em superestrutura de via permanente.

*Tabela 1.1: Extensão da Malha Ferroviária – até novembro de 2013. FONTE: Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT, 2014.*

Operadoras Reguladas pela ANTT	Origem	Bitola			Total
		1,60	1,00	Mista	
América Latina Logística Malha Norte S.A. - ALLMN	-	754	-	-	754
América Latina Logística Malha Oeste S.A. - ALLMO	RFFSA	-	1.945	-	1.945
América Latina Logística Malha Paulista S.A. - ALLMP	RFFSA	1.463	243	283	1.989
América Latina Logística Malha Sul S.A. - ALLMS	RFFSA	-	7.254	11	7.265
Estrada de Ferro Carajás - EFC	-	892	-	-	892
Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A. - FERROESTE	-	-	248	-	248
Estrada de Ferro Vitória a Minas - EFVM	-	-	905	-	905
Ferrovias Centro-Atlântica S.A. - FCA	RFFSA	-	7.271	156	7.427
VALEC/Subconcessão: Ferrovias Norte-Sul - FNS	-	720	-	-	720
Ferrovias Tereza Cristina S.A. - FTC	RFFSA	-	164	-	164
MRS Logística S.A. - MRS	RFFSA	1.632	-	42	1.674
Transnordestina Logística S.A. - TLSA	RFFSA	-	4.189	18	4.207
<b>Total</b>	<b>-</b>	<b>5.461</b>	<b>22.219</b>	<b>510</b>	<b>28.190</b>

A Tabela 1.2, apresenta maior investimento em via permanente quando comparado com o investimento em via rodante e outros, o que indica o atual interesse de desenvolvimento dos componentes estruturais da via permanente para a evolução do modal ferroviário. E esse alto investimento na via permanente inclui a necessidade de estudos voltados para o desempenho do conjunto de componentes que constitui a via permanente, como: trilho, placa de apoio, parafuso *Tirefond*, entre outros.

Tabela 1.2: Principais investimentos das concessionárias. Valores em milhões de R\$ - preço corrente. FONTE: Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT, 2014.

Principais investimentos	Ano							
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013*
Material rodante	1.042,40	1.076,48	2.036,34	830,05	770,10	1.537,63	933,83	721,67
via permanente	364,59	432,78	686,64	553,50	1.754,43	2.230,40	2.435,77	1.701,55
Outros	379,66	511,41	639,99	514,48	710,41	1.150,62	1.507,77	1.387,78
<b>Total</b>	<b>1.786,66</b>	<b>2.020,68</b>	<b>3.362,96</b>	<b>1.898,02</b>	<b>3.234,94</b>	<b>4.926,73</b>	<b>4.877,36</b>	<b>3.811,01</b>

\* Dados consolidados até setembro de 2013.

Segundo Silva (2002), um dos defeitos mais correntes na via permanente é afrouxamento da fixação ou até a sua ruptura, sendo necessário o reaperto ou substituição de fixações. Muitos acidentes ferroviários relacionados ao descarrilamento podem apresentar como causa, as fixações em mau estado ou em número insuficiente.

A Agência Nacional de Transportes Terrestres (2014) mostra a distribuição das causas dos acidentes no transporte ferroviário (Figura 1.1), pode-se observar que 50% dos acidentes têm como causa a falha de componentes da Via Permanente, ponto de atenção, uma vez que os componentes de fixação – parafusos *Tirefond* - estão inseridos nesse contexto.

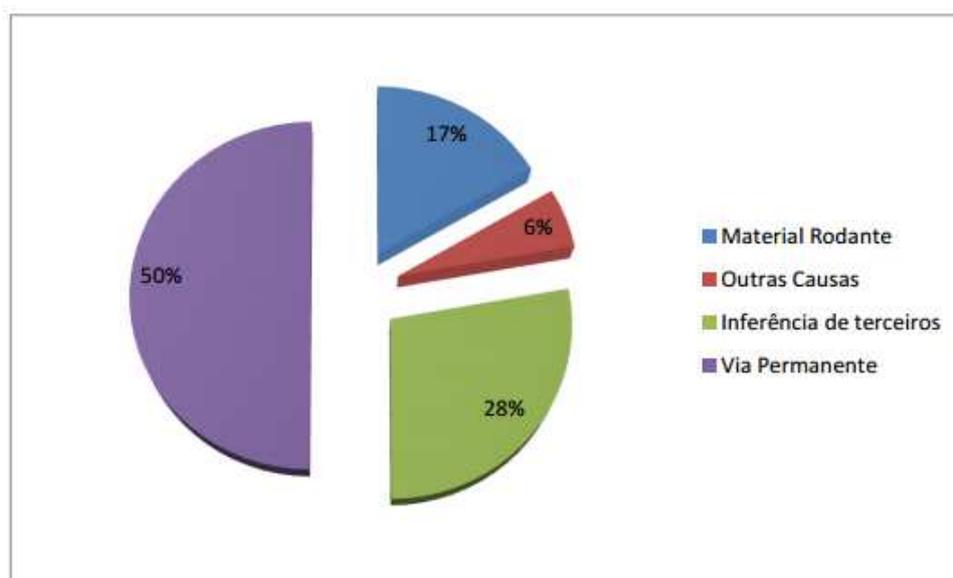


Figura 1.1: Distribuição das causas dos acidentes. FONTE: ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2014.

Alguns parafusos *Tirefond* utilizados atualmente em ferrovias brasileiras foram recolhidos quando fraturados em campo, seja fraturado logo após o primeiro aperto devido à sobrecarga ou após o reaperto, como mostra a Figura 1.2. Observa-se que há uma região preferencial para a ocorrência da fratura, em geral a região de fratura do parafuso é no 2º filete.



*Figura 1.2: Parafusos fraturados em campo.*

Com isso, o presente trabalho, com o auxílio de simulação computacional em condições de carregamento estático, e da caracterização química, estrutural e mecânica do parafuso *Tirefond* propõe modificações no projeto do parafuso *Tirefond* visando o aumento da sua vida útil na via permanente.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Por meio da caracterização química, microestrutural e mecânica do parafuso *Tirefond* utilizado atualmente no Brasil, assim como por meio da aplicação de modelos matemáticos tridimensionais de carregamento estático do mesmo, este trabalho se propõe a avaliar a distribuição de tensões do parafuso *Tirefond* por meio do *software* ANSYS 14.5, propondo assim modificações no projeto do parafuso que impactem positivamente no seu desempenho em trabalho.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Caracterização química do parafuso *Tirefond*;
- Realizar análises microestruturais e ensaios de microdureza do parafuso *Tirefond*;
- Realizar ensaios de tração, torção e impacto, e por fim fazer a análise fractográfica dos corpos de prova do parafuso *Tirefond* ensaiados;
- Determinar a curva de encruamento do aço ABNT 1015;
- Simular computacionalmente o atual estado de tensões presente no parafuso *Tirefond* quando carregado estaticamente, por meio da aplicação do modelo tridimensional gerado com o auxílio do pacote comercial ANSYS versão 14.5;
- Determinar, com o auxílio do pacote comercial ANSYS versão 14.5, o efeito das características metalúrgicas e geométricas sobre o estado de tensões do parafuso *Tirefond* quando solicitado estaticamente.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Elementos da Via Permanente

Via permanente é a denominação utilizada para o conjunto de camadas e de elementos que possibilitam a passagem de trens. Os componentes da via permanente são divididos em dois grupos: a infraestrutura e a superestrutura.

A Figura 3.1 apresenta os elementos da via permanente, como infraestrutura que se refere à camada inferior de terraplanagem, chamada de subleito ou plataforma, e a todas as obras localizadas abaixo do nível determinado por esta camada. Quanto à superestrutura, os principais componentes são os trilhos, as fixações, os dormentes, o lastro e em muitos casos, o sublastro. O conjunto formado pelos dormentes, fixações e trilhos é, comumente, denominado de grade da via (LINCEVICIUS, 2001).

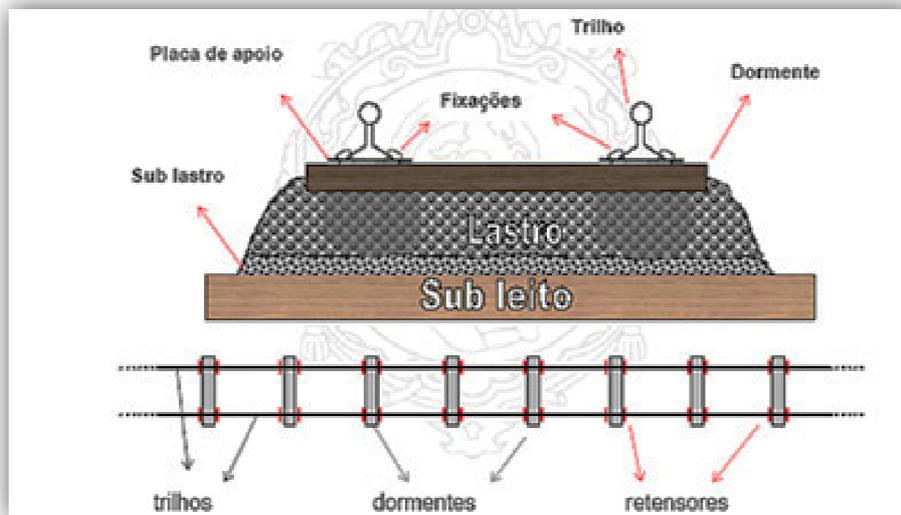


Figura 3.1: Elementos da via permanente (LINCEVICIUS, 2001).

O desempenho da via está relacionado com os alinhamentos vertical e horizontal do sistema de camadas. Para que isso ocorra, é necessário que cada componente do sistema realize suas funções adequadamente perante as condições climáticas e os carregamentos impostos pelo tráfego. As funções dos principais componentes serão, a seguir, descritas para melhor compreensão do comportamento mecânico das ferrovias (SELIG e WATERS, 1997).

Os trilhos são componentes de aço, posicionados longitudinalmente na via, responsáveis por:

- Transmitir e distribuir as cargas provenientes da passagem dos veículos nos dormentes;
- Orientar o trajeto dos trens;
- Fornecer uma superfície de rolamento adequada e distribuir as forças de aceleração e frenagem;
- Conduzir corrente elétrica para os circuitos de segurança da via.

Defeitos ou discontinuidades nos trilhos, como juntas, podem causar efeitos dinâmicos danosos à via permanente e vibração não desejada nos veículos. Os principais limitantes da vida útil dos trilhos são: o desgaste, devido ao contato metal-metal que ocorre entre a roda e o trilho, e a fadiga causada pelos carregamentos cíclicos que pode levá-los à ruptura. Além das solicitações provenientes dos veículos, os trilhos estão sujeitos a tensões provocadas pela variação da temperatura (expansão e contração térmica) (LINCEVICIUS, 2001).

Os dormentes são componentes transversais à via e perpendiculares aos trilhos cujas principais funções são:

- Garantir suporte adequado e seguro dos trilhos;
- Manter a bitola e a estabilidade vertical, lateral e longitudinal da via;
- Transmitir as cargas provenientes dos trilhos o mais uniformemente possível para o lastro;

Os materiais mais utilizados em dormentes são: madeira, concreto e aços. Esses materiais devem resistir às solicitações mecânicas e às condições ambientais da via. A madeira apresenta propriedades adequadas para utilização em dormentes, porém, devido à escassez de fontes e às exigências ambientais, além de dificuldade de reciclagem devido ao tratamento químico pelo qual os dormentes passam, utilização deste material está diminuindo(LINCEVICIUS, 2001).

Os dormentes de concreto são mais duráveis, resistentes, fáceis de fabricar e de alterar a geometria. O peso elevado dos dormentes de concreto contribui

para a estabilidade da via, mas dificulta as operações de construção e de manutenção. Entre as desvantagens dos dormentes de concreto, encontram-se a baixa capacidade de absorver vibrações, maior transmissão de cargas dinâmicas para os componentes de fixação e aumento dos riscos de dano por impacto (aumento de cerca de 25%) (ESVELD,2001).

O lastro é uma camada formada por material granular localizado acima do sublastro ou diretamente sobre o subleito cuja espessura usual varia de 250mm a 350mm. As principais funções do lastro são:

- Suportar e distribuir uniformemente as elevadas tensões verticais, que ocorrem na interface dormente/lastro decorrentes da passagem dos veículos;
- Transmitir tensões reduzidas à camada inferior e de sublastro e subleito, tornando-as aceitáveis para os materiais destas camadas;
- Garantir a estabilidade dos dormentes e trilhos perante as forças lateral, longitudinais e verticais;
- Permitir a drenagem da via;
- Facilitar a manutenção, permitindo o rearranjo das partículas durante as operações de nivelamento e alinhamento da via;
- Proporcionar a elasticidade da via que, por sua vez, minimiza as cargas dinâmicas;
- Amortecer vibrações e ruídos.

O material do lastro é usualmente obtido pela britagem de rochas. Seu comportamento mecânico é determinado pelas características das partículas e da graduação do material. Um material adequado para lastro apresenta as seguintes propriedades: forma cúbica e angular, faces britadas, rugosidade superficial, dureza elevada, graduação uniforme e a ausência de poeiras e materiais finos (LINCEVICIUS, 2001).

Apesar do conhecimento atual das características técnicas que determinam o comportamento da camada, observa-se com frequência a utilização de critérios de caráter econômico e de disponibilidade para a escolha do material (LINCEVICIUS, 2001).

O sublastro é a camada constituída por material granular, geralmente bem graduado, localizada entre o lastro e o subleito. Essa camada age como filtro, prevenindo a penetração do solo do subleito no lastro. As principais funções do sublastro são:

- Reduzir as cargas advindas do lastro, provenientes da carga rolante, para adequá-las à resistência do subleito;
- Evitar o bombeamento de finos, fenômeno no qual a “lama”, resultante da mistura do solo fino com água, é bombeada, pela ação do tráfego, para a camada de lastro, alterando suas propriedades;
- Redução da espessura da camada de lastros o que favorece a economia já que o material utilizado no sublastro é menor custo.

Subleito, ou plataforma, é a fundação da ferrovia. Pode ser constituído pelo solo natural ou por camada de solo selecionado. Sua principal função é garantir a estabilidade da função, evitando recalques excessivos(LINCEVICIUS, 2001).

As tensões resultantes da passagem dos veículos podem ser dissipadas a até cerca de 5m de profundidade a partir da parte inferior do dormente. Como as camadas de lastro são pouco espessas, geralmente inferiores a 0,5m, o subleito também tem um importante papel mecânico (LINCEVICIUS, 2001).

## **3.2 Fixações**

Os trilhos têm que ser firmados aos dormentes em uma posição rígida, para que a bitola seja mantida inalterada, para que as funções de guia e pista de rolamento sejam desenvolvidas pela via.

Ao longo do tempo as fixações utilizadas nas vias permanentes apresentaram uma evolução, como mostra a Figura 3.2, sendo dividida entre fixação direta e indireta.

O sistema direto há muito tempo foi abandonado nas ferrovias mais desenvolvidas, pois apresenta a grande desvantagem de não manter a bitola por um período longo, seja por afrouxamento da fixação, seja devido a penetração do trilho no dormente, perdendo a correta inclinação e automaticamente aumentando a bitola. Mesmo com o apoio indireto, acontece a penetração da chapa no dormente de madeira, ocasionando a perda da

inclinação inicial do trilho e aumentando a bitola. Entretanto, o sistema indireto permite que a placa de apoio atue duplamente, fixando o trilho e funcionando como um elemento fundamental de suporte, aumentando a área de distribuição das cargas no dormente. Isto é primordial nas madeiras de menor qualidade, para que resistam a esforços no sentido lateral da linha, longitudinal e na direção vertical (MAGALHÃES, 2012).

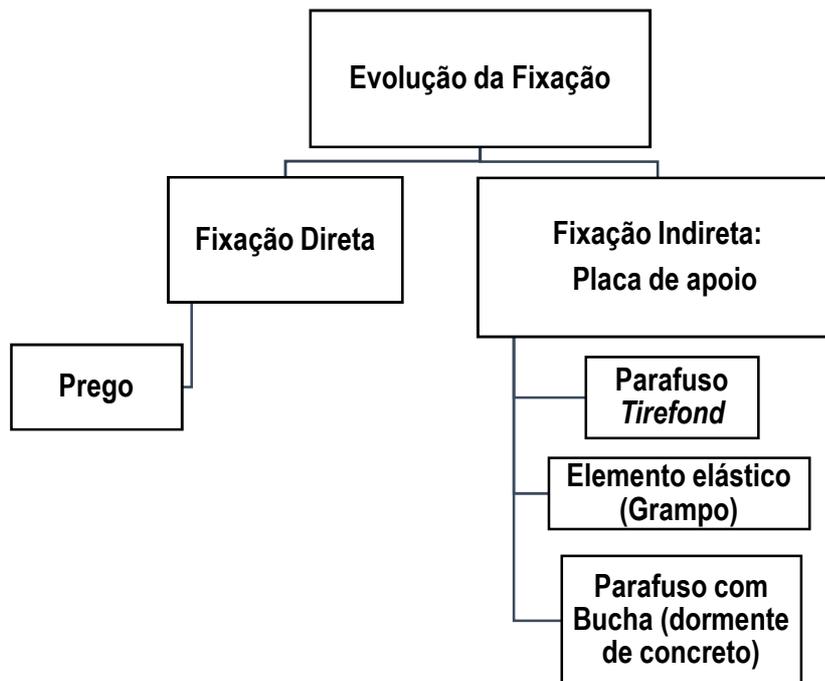


Figura 3.2: Evolução das fixações de trilhos ferroviários (MAGALHÃES, 2012).

As funções que a fixação ferroviária deve desempenhar variam muito de acordo com o tipo de dormente e o sistema de fixação adotado. Segundo a Associação AREMA 2009, de forma genérica, as fixações devem ter as seguintes características, em maior ou menor grau:

- Manutenção da bitola da via;
- Transferir os esforços vertical, horizontal e longitudinal do trilho para o dormente;
- Atenuar as cargas e impactos gerados pelo tráfego;
- Prover isolamento elétrico;
- Proporcionar ao trilho uma inclinação em relação à vertical.

A Tabela 3.1, resume as características que a fixação deve possuir, de acordo com o tipo de dormente utilizado.

Tabela 3.1: Função das fixações de acordo com o tipo de dormente. FONTE: AREMA - American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, 2009.

Tipo de Dormente	Função				
	Manutenção da bitola	Transferência de carga	Inclinação do Trilho	Atenuação de Impacto	Isolamento Elétrico
Madeira	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Concreto	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Aço	Sim	Sim	Não	Não	Sim/Não

Segundo a Associação AREMA 2009, há exigências específicas que cada fixação deve obedecer, também em função do tipo de dormente:

- 1) Para dormente de madeira: uso de placas de apoio do trilho sobre o dormente, no caso de fixações elásticas.
- 2) Para dormente de concreto: a necessidade de isolamento elétrico em vias sinalizadas que usa palmilhas resilientes devem ser avaliados segundo a aplicação a qual a via se destina, isoladores são normalmente usados para fixar e manter a bitola neste tipo de via.
- 3) Para dormente de aço: palmilha resiliente e isoladores são necessários quando adotado dormente de aço em vias sinalizadas, a fim de proporcionar isolamento elétrico adequado.

Os tipos de fixação são divididos, basicamente, em dois tipos: rígida ou elástica.

### 3.2.1 Fixação elástica

As fixações elásticas são amplamente utilizadas nos mais variados tipos de ferrovia, desde linhas de metrô até vias para o transporte de mercadorias, sendo essenciais especialmente nos dormentes de concreto. (RUSSO, 2012).

Suas exigências de desempenho podem ter variações em razão da finalidade para a qual a via se destina, mas algumas características são gerais e devem ser sempre atendidas. (RUSSO, 2012).

Ter características elásticas capazes de conter os esforços longitudinais e transversais, além de amortecer os efeitos dinâmicos das cargas verticais,

tanto para o caso de trilhos longos soldados como para o caso de trilhos conectados por talas de junção aparafusadas (RUSSO, 2012).

### **3.2.2 Fixação rígida**

As fixações rígidas são utilizadas nos dormentes de madeira, porém seu uso hoje é bastante restrito, devido ao desenvolvimento de diversos tipos de fixações elásticas, que são mais eficientes em diversos aspectos principalmente em relação ao amortecimento das vibrações produzidas pelo tráfego dos veículos (RUSSO,2012).

Tem-se como fixação rígida: prego de linha e parafuso *Tirefond*, que serão detalhados a seguir.

#### **a) Pregos de Linha**

O prego de linha (Figura 3.3) é o tipo de fixação mais simples existente. É geralmente de seção retangular, e é cravado a golpes de marreta em um furo previamente preparado no dormente – o que constitui um processo muito simples, porém com a desvantagem de ser manual.

Este material possui o inconveniente de possuir a tendência de criar trincas no dormente em razão do seu método de instalação, além de oferecer pouca resistência para ser arrancado, de aproximadamente 2200kgf. Também é desfavorável o fato de o prego perder eficiência devido aos impactos e vibrações provenientes do trilho (RUSSO,2012).



Figura 3.3: Prego de Linha (Russo,2012).

### **b) Parafuso *Tirefond***

O *Tirefond* (Figura 3.4) é um parafuso cravado no dormente, para fixar os trilhos, mediante pressão exercida pela aba existente na cabeça da peça. Normalmente a cabeça é de seção quadrada ou retangular e o comprimento do fuste varia.

Brina (1988) define *Tirefond* como um parafuso de “rosca soberba” – roscas comuns que começam finas e vão engrossando devido ao aumento da distância entre filetes, e no qual o próprio parafuso abre a rosca caracterizando-os como auto-atarraxantes. Além disso, a cabeça do *Tirefond* pode-se adaptar a uma chave especial ou ao cabeçote de máquina “tirefonadeira”, que é um instrumento de pequeno porte que aparafusa o *Tirefond* na madeira. A cabeça do *Tirefond* tem uma base alargada, em forma de aba de chapéu, que na face inferior tem a mesma inclinação do patim do trilho, de modo a adaptar-se ao mesmo.

O Parafuso *Tirefond* é um tipo de fixação superior ao prego de linha, pois, como é aparafusado, fica mais solidário à madeira do dormente, sacrifica menos as suas fibras e, conseqüentemente, oferece resistência ao arrancamento mais elevada, em torno de 7000kgf (RUSSO,2012).

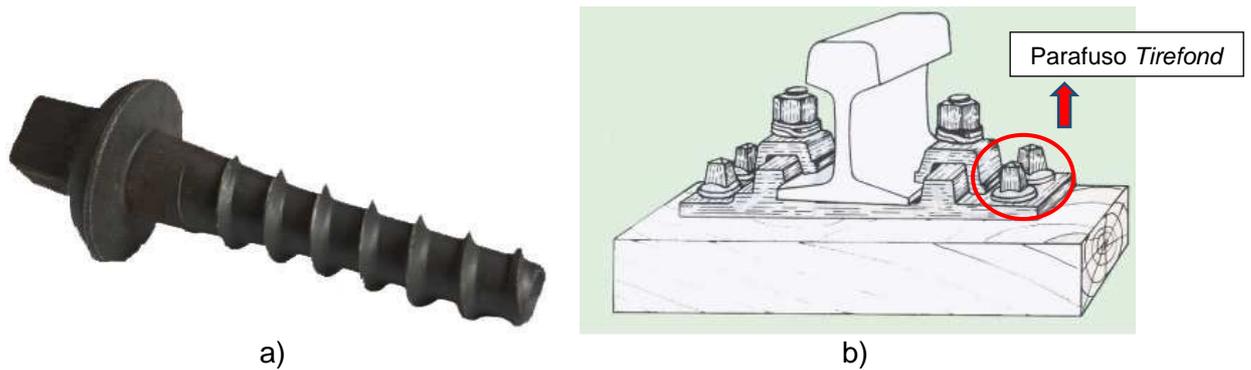


Figura 3.4: a) Parafuso Trefond; b) Parafusos Trefond fixado na placa de apoio ao dormente de madeira (RUSSO, 2012).

Atualmente, os parafusos *Trefond* apresentam as seguintes especificações, que atendem às recomendações da AREMA:

- a) Resistência à pressão de 65000psi (em torno de 448,2MPa);
- b) Revestimento resistente à corrosão;

### 3.2.3 Processo de Fabricação do Parafuso *Trefond*

Fornecedor brasileiro de parafuso *Trefond* apresenta, atualmente, processo de produção tradicional que consiste em forjamento e laminação a quente, em que o parafuso *Trefond* é produzido a partir de barras redonda de aço ABNT 1015 bitola de 22mm com certificado de qualidade que atenda a norma NBR 8855. Após a inspeção da matéria prima, ocorre o corte das barras com comprimento de 192mm, como apresentado pela Figura 3.5.



Figura 3.5: Corte das barras de aço ABNT 1015. a) Processo de corte das barras. b) Depósito de barras cortadas.

Em seguida, apenas uma das extremidades da barra é aquecida em um forno a gás natural até uma temperatura de 1100°C por aproximadamente 5 minutos, para a realização do processo de forjamento a quente da cabeça do parafuso *Tirefond*, como mostra a Figura 3.6a). É feita, então, a retirada da rebarba da cabeça, conseqüente do processo de forjamento a quente. A Figura 3.6b) mostra a rebarba gerada devido ao forjamento da cabeça do parafuso *Tirefond*.



a)



b)

Figura 3.6: Etapa de forjamento da cabeça do Parafuso *Tirefond*: a) Processo de forjamento a quente. b) Rebarba da cabeça do parafuso *Tirefond* após forjamento a quente.

Após o forjamento e completo resfriamento da peça, é realizado o aquecimento da região da rosca do parafuso *Tirefond*, no forno a gás natural a temperatura de 1100°C por aproximadamente 5 minutos, como mostra a Figura 3.7.



Figura 3.7: Aquecimento do parafuso *Tirefond* para laminação da rosca.

Com isso, é feita a laminação a quente da rosca do parafuso com o auxílio de três castanhas laminadoras, como apresenta a Figura 3.8.

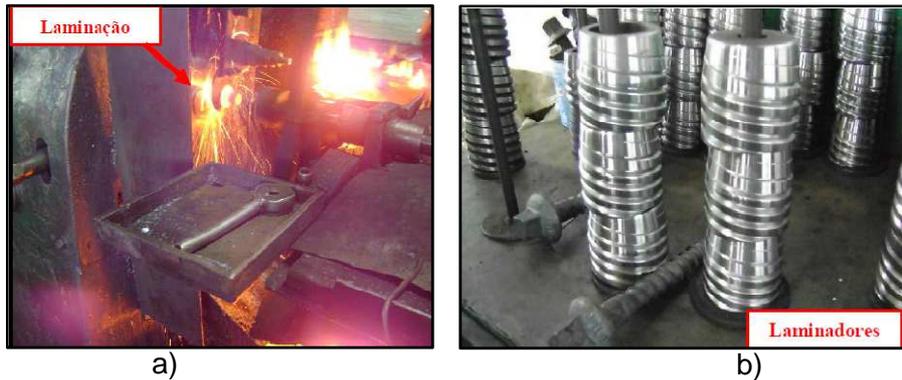


Figura 3.9: Processo de laminação da rosca do Parafuso Trefond. a) Laminação; b) Fotografias de três castanhas laminadoras, para realização da rosca do Parafuso Trefond.

Para finalizar o processo de fabricação, os parafusos passam por um banho por imersão em óleo antioxidante (Figura 3.9), para obtenção de uma proteção contra a corrosão.



Figura 3.8: Parafuso Trefond após banho por imersão em óleo antioxidante.

A inspeção dos lotes de parafuso *Trefond* fabricados é realizada por amostragem. São feitos alguns testes para controle da qualidade do parafuso, como: aferição dimensional, ensaio de tração, ensaio de resistência ao dobramento e ensaio de dureza. Um durômetro de bancada é utilizado para controle informativo da dureza HRB (Dureza Rockweel B) em superfície cortada e desbastada na região da cabeça do *Trefond*.

A aferição dimensional é realizada por alguns dispositivos denominados “passa/não passa”, que são apresentados na Figura 3.10.



Figura 3.10: Equipamentos passa/não passa para aferição dimensional do Parafuso *Trefond*. a) da aba da cabeça do parafuso; b) da rosca e cabeça do parafuso.

A norma NBR 8497: 08/2008 – Metroferroviário (Trefão) estabelece as condições e características para a fabricação, fornecimento e recebimento do parafuso e aceitação do parafuso *Trefond*. Cita que o parafuso *Trefond* deve ser produzido em uma só peça, a partir de barra redonda de aço laminado ou trefilado, conforme classe de resistência 4.6 em que o limite de resistência deve ser no mínimo de 392MPa. O valor da dureza especificada é 66 a 88HRB dada pela média dos 03 pontos distintos.

Parafusos *Trefond* fabricado por fornecedor brasileiro de acordo a Norma NBR 8497 citada anteriormente, apresenta recorrente fratura prematura na região do segundo filete da rosca, como mostra a Figura 3.11.



a)



b)

Figura 3.11: Região preferencial da fratura do parafuso.

### 3.3 Inovação na fabricação do parafuso *Trefond*

Gontarz et al. (2004) desenvolveram na Universidade de Lublin na Polônia um método de laminação dupla da rosca do parafuso *Trefond*. Este método consiste na tecnologia de laminação *crosswedge*, em que duas placas com

ranhuras especiais determinam o formato da rosca (Figura 3.12). Além disso, propõe o forjamento por matriz fechada da cabeça do parafuso, objetivando o processo *flashless*, em que não se tem a perda de material por rebarba. A laminação simultânea de dois parafusos é possível devido à aplicação de uma operação final de corte.

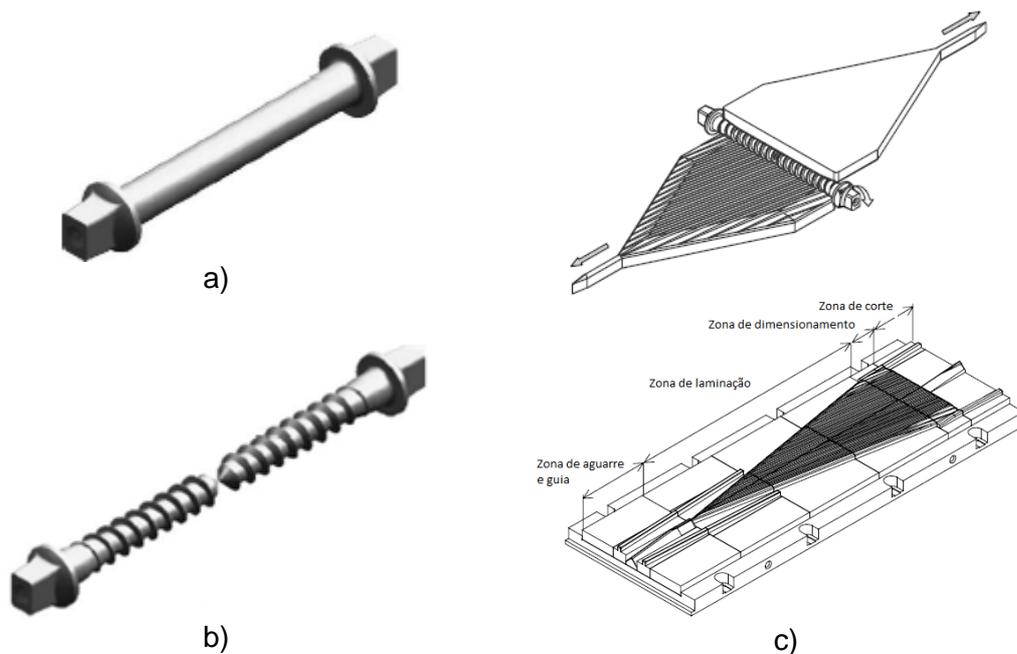


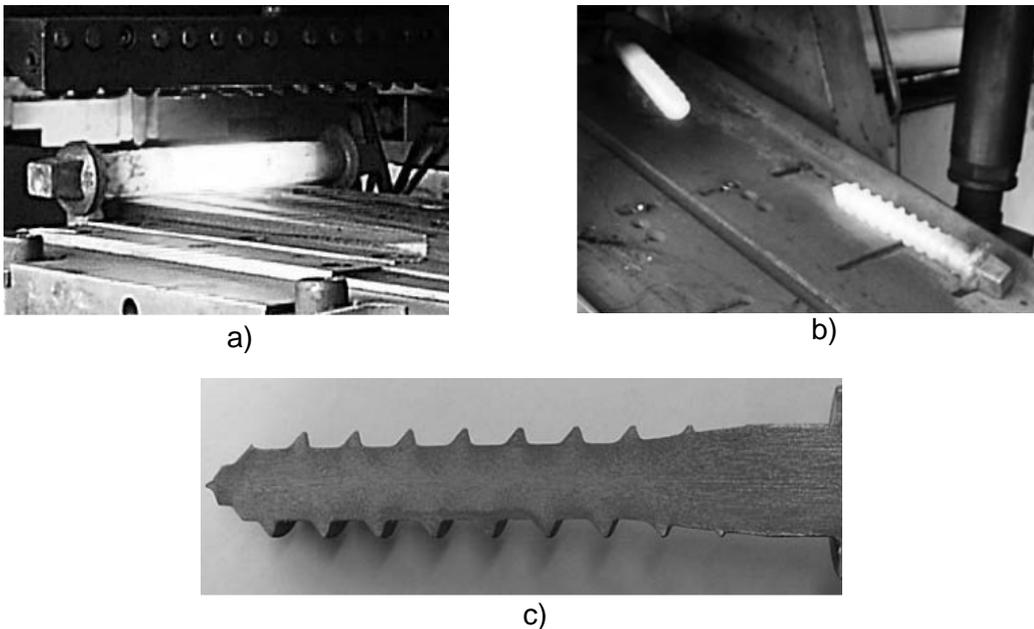
Figura 3.12: a) pré-forma para o processo de laminação cross-wedge; b) após processo de laminação e c) placas para laminação cross-wedge. (Adaptado de: Gontarz et al. 2004 e Weroński et al., 2005).

Simulações numéricas foram feitas a partir do método de elementos finitos (FEM) e de volume finito (FVM), além de produzir alguns parafusos *Tirefond* pelo processo de laminação *crosswedge* em escala laboratorial e industrial, para validação do desenvolvimento do processo de produção (GONTARZ et al., 2004).

Segundo Pater et.al (2005) os testes industriais de forjamento e laminação *crosswedge* confirmaram a eficiência da nova tecnologia (Figura 3.13). A nova tecnologia de fabricação de parafuso *Tirefond* apresenta as seguintes vantagens:

- Parafusos fabricados atendem aos requisitos de qualidade dimensional e superficial;

- As qualidades funcionais foram melhoradas devido a obtenção da forma cônica na parte final da rosca;
- A fabricação de dois parafusos com apenas um passe de laminação aumenta a produtividade;
- A implantação de forjamento *flashless* da cabeça do parafuso permitiu eliminar processo de corte da rebarba e melhorou o índice de consumo de material;
- O novo método é um método de conformação sem resíduos, menor tempo e menor consumo de energia do que o método utilizado atualmente.



*Figura 3.13: Testes industriais da laminação cross-wedge na configuração dupla: a) conformação com a parte central aquecida; b) peças na esteira após a conformação; c) seção longitudinal do parafuso Tirefond. (Pater et al., 2005)*

Foi analisado por Pater e Tofil (2007) o processamento de *crosswedge* a frio com a conformação de entalhe V em barras de aço. Para possível análise da força de conformação necessária foi feito um estudo por meio do método de elementos finitos (FEM) da distribuição da deformação plástica e o fluxo de material. Por fim, foi detectada a viabilidade técnica de conformação a frio pelo método *crosswedge*, além de determinara deformação laminar na zona do entalhe V e a máxima tensão alcançada na camada mais externa do entalhe, por meio da simulação computacional e dados empíricos.

A Norma ISO 898-1 apresenta as propriedades mecânicas que devem ser alcançadas nos parafusos de acordo com a classe e bitola de cada um deles. A fim de garantir estas propriedades, os parafusos geralmente são produzidos de aço carbono e passam pelo processo de têmpera e revenimento após a conformação.

Os aços microligados estão cada vez mais sendo utilizados para a produção de parafusos, estes que apresentam os mecanismos de endurecimento denominados precipitação, redução de tamanho de grão e outros. São aços que apresentam elementos microligantes como: Nb, V e Ti, utilizados em pequenas adições, normalmente menores que 0,1%, e por terem, em geral, a capacidade de formarem carbonetos, nitretos e carbonitretos (GLADMAN, 1997).

O processo utilizado para a produção de parafusos a partir de aço microligado apresenta redução de etapas de processo comparado ao processo de fabricação de parafuso a partir de aço carbono, uma vez que não se faz necessário a etapa de tratamento térmico para atingir as propriedades mecânicas especificadas na norma ISO 898-1: Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel.

### **3.4 Esforços na Estrutura da Via Permanente**

O conjunto de elementos que constituem a via permanente possibilita a transferência das cargas provenientes da passagem dos veículos para a fundação. Cada um dos elementos absorve parte das tensões que nele chegam, transmitindo tensões menores para a camada seguinte.

Esveld (2001) fornece a ordem de grandeza das tensões em cada camada para uma carga de 20kN por eixo, típica de trens de passageiros. Entre a roda e o trilho ocorrem as maiores tensões, da ordem de 300MPa. No exemplo dado, para a carga de 100kN por roda, obtém-se tensões entre o trilho e a placa de apoio de aproximadamente 3,0MPa. Na interface placa de apoio e dormente, como a área de contato é maior, as tensões serão menores com valores de aproximadamente 1,2MPa. Entre os dormentes e o lastro (Figura

3.14), a tensão cai para 0,3MPa. E, finalmente, na fundação chegam tensões da ordem de 0,05MPa.

Considerando que o parafuso *Tirefond* atua na fixação da placa de apoio, e a ordem de grandeza relatada anteriormente entre trilho e placa de apoio, pode ser citado que o parafuso *Tirefond* está submetido a uma força trativa de aproximadamente 60kN.

Para compreender as tensões que atuam na camada do lastro é necessário conhecer os esforços que atuam na via permanente e a maneira como ocorre à transmissão de tensões de um elemento para outro. Os esforços originais pela passagem de veículos podem ser classificados segundo sua direção de atuação: longitudinal, vertical e transversal (AL SHAER, 2005).

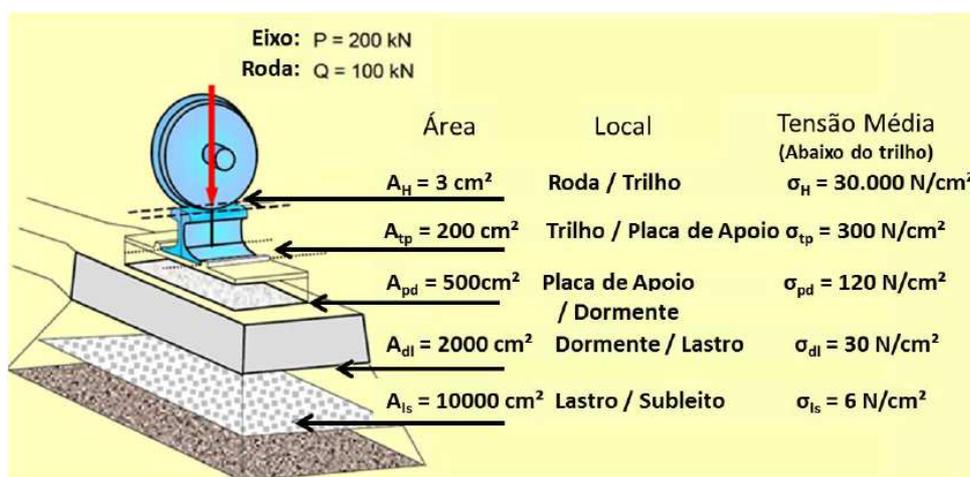


Figura 3.14: Ordem de grandeza das tensões em via permanente (Esveld, 2001).

Os esforços longitudinais são causados essencialmente por forças decorrentes da variação da temperatura, do caminhamento da via, da aceleração e da frenagem dos veículos. Caminhamento da via é a denominação utilizada para o fenômeno no qual o trilho desloca-se longitudinalmente da sua posição inicial ou quando o trilho e o dormente afastam-se da sua posição em relação ao lastro. A magnitude desses esforços não influencia o desempenho da via a não ser em algumas pontes e obras de arte (AL SHAER, 2005).

As solicitações transversais são mais difíceis de estudar teoricamente do que as solicitações verticais. Os trilhos são submetidos a esforços secundários de

torção devido à excentricidade de aplicação de carga e à exigência de uma folga entre o friso das rodas e o trilho. Os esforços transversais resultantes de forças aplicadas no sentido longitudinal dos dormentes são, principalmente, causados por:

- Forças centrífugas não compensadas geradas pela existência de uma curva;
- Ação de ventos laterais;
- Forças de origem térmica;
- Contato entre friso e trilho em curvas;
- Componentes dinâmicos devido a irregularidades da via.

Apesar de apresentarem menores intensidades que as forças verticais, as forças transversais são importantes, pois o lastro é menos rígido e menos resistente no sentido transversal (AL SHAER, 2005).

Além disso, a razão entre os valores dos esforços transversais (T) e os esforços verticais (V), detalhado a seguir, é um fator importante para a análise da estabilidade do veículo quanto ao descarrilamento.

As cargas verticais impostas à via pela passagem de veículos podem ser separadas em estáticas e dinâmicas. As cargas estáticas resultam, principalmente, do peso dos vagões, obtidos pela soma da tara por propriedades da via, como a presença de irregularidades geométricas ou variações de rigidez, quanto pelas características de rolagem no contato roda/trilho, como a existência de irregularidades nos trilhos nas rodas e por descontinuidades nas junções de trilhos.

A carga dinâmica pode ser decomposta em duas componentes. A primeira, com frequência elevada (superior à 500Hz), causada essencialmente por irregularidades nas rodas ou nas soldas e ondulação nos trilhos cuja intensidade aumenta continuamente com a velocidade. A outra, com frequências mais baixas (inferiores a 100Hz) é condicionada pela geometria e características mecânicas da via e é pouco influenciada pela velocidade do trem (ESVELD, 2001).

Quando as cargas dinâmicas de baixa frequência se localizam na banda de frequência de 70 a 90Hz, elas podem gerar um fenômeno de ressonância da superestrutura que provoca a desagregação do lastro e o assentamento da via. Conforme a massa não suspensa aumenta, a banda de frequência de ressonância se desloca para menores valores (LINCEVICIUS, 2001).

Observa-se que as maiores tensões, e conseqüentemente as maiores deformações, ocorrem quando as cargas estáticas se somam como máximo das cargas dinâmicas. Como os esforços dinâmicos exatos que solicitam a via são de difícil previsão, eles são considerados em projeto por um fator de incremento dinâmico que pode chegar a 2,4 vezes a carga estática (LINCEVICIUS, 2001).

O comportamento dinâmico de um veículo ferroviário é consideravelmente afetado por forças de interação entre roda e trilho. Essas forças dependem da adesão, escorregamento e de características de uso. A geometria da roda e do trilho afeta a adesão, escorregamento e as características de uso, tanto quanto o comportamento dinâmico do veículo, uma vez que as forças de escorregamento são influenciadas pelas áreas de contato e pelas tensões de contato entre a roda e o trilho. A rugosidade da superfície, os materiais das rodas e do trilho ou mesmo as condições do ambiente tais como contaminação por água, óleo, sujeira, entre outros também influenciam a adesão (LINCEVICIUS, 2001).

### **3.5 Fator de Concentração de Tensão em Parafusos**

Segundo Pilkey, W. e Pilkey, D. (2008) um único filete de rosca, com geometria bem definida e usinada em um aço com propriedades mecânicas específicas, possui um fator de concentração de tensão para aplicação de tensão normal.

Por meio do Modelo de Neuber é possível determinar o fator de concentração de tensão geométrico teórico  $K_t$  em um único filete com o auxílio da Equação 3.1. Considerando:  $t$  = altura do filete e  $r$  = raio de concordância do filete.

$$K_t = 1 + 2 \sqrt{\frac{t}{r}} \quad \text{Equação 3.1}$$

Já no caso dos parafusos *Tirefond* têm-se uma seqüência de filetes iguais e de mesmo espaçamento e neste caso, segundo modelos de mecânica de fratura, há um alívio de tensões. Considerando uma analogia com fluxo, pode-se inserir que um fluxo mais suave é obtido na Figura 3.15b) e c) comparado com o fluxo na Figura 3.15a).

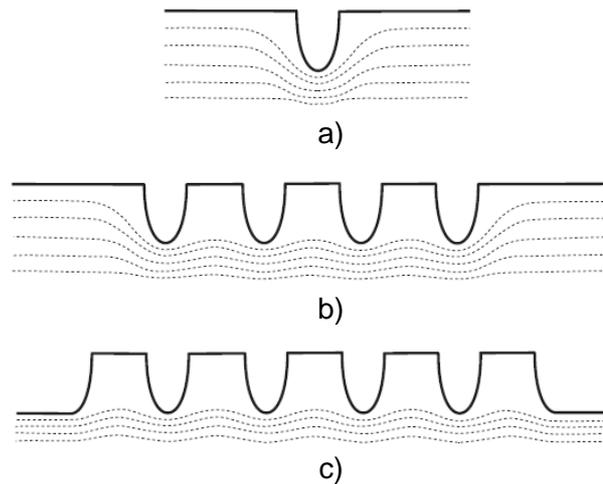


Figura3.15: Alívio das linhas de tensão em múltiplos filetes. (Pilkey, W.ePilkey, D., 2006)

É possível determinar o fator de alívio de carga ( $\gamma$ ) pela presença de múltiplos filetes aplicando-se a Equação 3.2 para geometria com múltiplos filetes. Este fator é apresentado nos modelos como um fator de correção para cálculo da concentração de tensão geométrica ( $K_t$ ) em parafusos compostos por seqüência de filetes, considerando  $t$  = profundidade do filete;  $P$  = distância entre dois filetes de rosca (CASTAGNETTI e DRAGONI, 2013).

$$\gamma = \left(\frac{P}{\pi t}\right) Tgh\left(\frac{\pi t}{P}\right) \quad \text{Equação 3.2}$$

Como pode ser visto, o fator de concentração  $K_t$  é meramente geométrico. Neste contexto Neuber propôs um modelo que considera a aplicação de cargas variáveis, como por exemplo cargas cíclicas que geralmente promovem a nucleação de trincas nestes pontos críticos por fadiga, além disso, neste modelo as características metalúrgicas do material são consideradas. Por meio

da Equação 3.3 determinou-se o fator de concentração de tensões para cargas dinâmicas ( $K_f$ ), onde  $a$  é uma constante determinada em função do limite de resistência a tração e/ou dureza do material (NORTON, 2006).

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\frac{a}{r}}} \quad \text{Equação 3.3}$$

Norton (2006) traz a relação da constante de Neuber ( $\sqrt{a}$ ) com o Limite de Resistência do aço ( $S_{ut}$ ) utilizado para a fabricação do parafuso, como pode ser visto na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Constante de Neuber para aços. Norton (2006)

$S_{ut}(\text{ksi})$	$\sqrt{a}(\text{in}^{0,5})$
50	0,13
55	0,11
60	0,108
70	0,093
80	0,08
90	0,07
100	0,062
110	0,055
120	0,049
130	0,044
140	0,039
160	0,031
180	0,024
200	0,018
220	0,013
240	0,009

Além disso, é proposto pelo Modelo de Neuber o fator de concentração de tensão sob carregamento cíclico  $K_{f*}$  para parafuso que apresenta diferença no diâmetro ao longo da rosca por meio da Equação 3.4 (Norton, 2006). Considerando  $D$ =maior diâmetro e  $d$ =menor diâmetro ao longo da rosca do parafuso.

$K_{f*} = \left(\frac{D}{d}\right)^2 K_f$	Equação 3.4
---	-------------

### **3.6 Método de Elementos Finitos**

Muitos problemas na engenharia são extremamente difíceis ou impossíveis de serem resolvidos por métodos analíticos convencionais, que envolvem equações matemáticas que determinam a variável requerida. Por exemplo, a distribuição de tensão ou a deformação ao longo de um componente sólido com geometria complexa, a pressão ou velocidade de escoamento de um fluido, podem ser requeridas.

No passado era comum a prática de simplificar o problema apenas no ponto que a solução analítica poderia ser obtida, e este resultado era posto como a solução do problema real. Em função da incerteza presente nesse método de simplificação, muitos fatores de segurança foram criados. Com o avanço, relativamente recente, na velocidade de processamento e na capacidade de armazenamento dos computadores, a análise de problemas de engenharia tem migrado de forma versátil para métodos numéricos e um desses métodos é conhecido como Método de Elementos Finitos.

O desenvolvimento na área de análise numérica durante o século XX proporcionou o surgimento de vários métodos que apresentam solução aproximada de equações com derivadas parciais. A grande capacidade de resolução de equações com inerente complexidade devida, em parte, pelos domínios de integração, como por exemplo, na resolução de um problema real da indústria, levou o método de elementos finitos a tornar-se relevante no desenvolvimentotecnológicodasegunda metade do século XX (CHASKALOVIC, 2008).

O método de elementos finitos surgiu fortemente na engenharia civil e aeronáutica como autores de alguns livros no assunto, como Zienkiewicz (1971), Desai e Abel (1972) e Nath (1974). O método é muito usado por engenheiros mecânicos, particularmente para análise de tensão em componentes sólidos.

A resolução de um problema físico, por meio do método de elementos finitos, envolve a divisão do sistema sólido ou fluido contínuo, em pequenas sub-regiões ou elementos, assim tem-se a discretização do modelo computacional.

Cada elemento é uma unidade o qual seu comportamento pode ser analisado. A complexidade de todo o sistema é acomodada usando um grande número de elementos com uma sofisticada base matemática que desenvolvem soluções analíticas (FENNER, 1996).

A soma das respostas de todos os elementos do modelo dará a resposta final a uma determinada solicitação dada ao modelo.

A utilização do método de elementos finitos proporciona a redução da quantidade de protótipos teste, devido à viabilidade de múltiplas simulações computacionais testadas rapidamente e eficientemente, também viabiliza a simulação de cenários impossíveis de gerar protótipos para teste (implantes cirúrgicos), além de apresentar muitas vezes custo mais baixo, menor tempo gasto e resultados confiáveis.

Gontarz et al. (2004) realizou um estudo da viabilidade operacional do novo processo de forjamento da cabeça do parafuso *Tirefond*, objetivando a não geração de rebarba. Por meio de dados experimentais e teóricos, e com auxílio de simulação computacional usando o método de elementos finitos (FEM), o processo de forjamento da cabeça do parafuso *Tirefond* foi estabelecido devido a coerência dos dados de força aplicada e cinética, obtidos experimentalmente e determinados teoricamente.

Segundo Komori (2002) a análise do ensaio de tração por meio do método de elementos finitos, é viável para uma análise dos parâmetros na resolução das equações, gerando resultados analíticos. O material é assumido como fraturado quando a fração volumétrica vazia apresenta um determinado valor. Foi gerada a análise analítica de três corpos de prova de materiais diferentes: aço, cobre e alumínio, e foram comparados com os resultados experimentais.

Segundo Arslan e Kayabasa (2012) os engenheiros ferroviários estão aplicando com sucesso a técnica de elementos finitos no complexo sistema de contato de roda e trilho objetivando uma análise de tensão e deformação consequente do contato desses componentes ferroviários. Na elaboração do modelo matemático a malha gerada e as condições de contornos consideradas são ilustradas pela Figura 3.16.

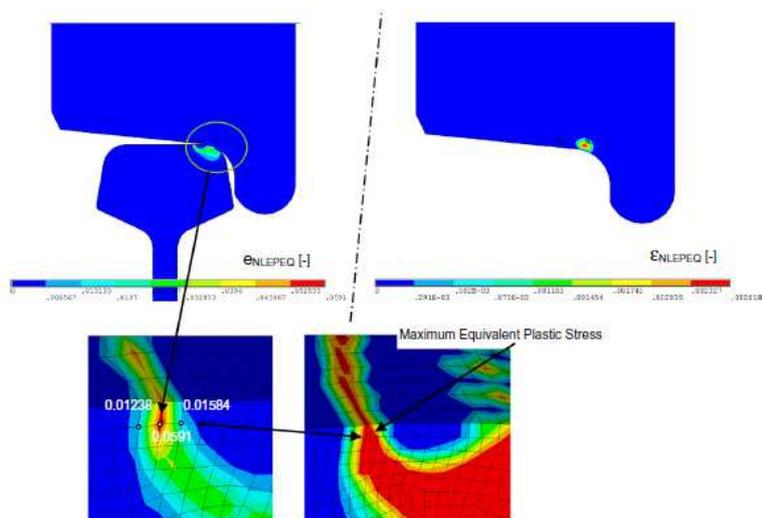


Figura 3.17: Deformação Plástica equivalente. Arslan e Kayabasa (2012).

Ao final do processamento do modelo de elementos finitos é possível realizar análise de tensão e deformação da roda e no trilho (Figuras 3.17).

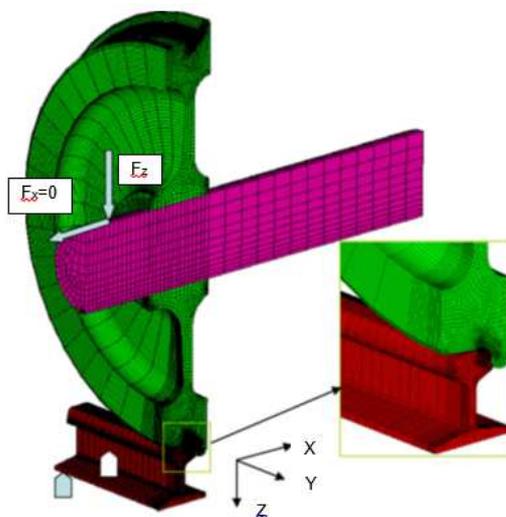


Figura 3.16: Discretização e condição de contorno do modelo matemático para o sistema roda e trilho de trem. Arslan e Kayabasa (2012).

### 3.6.1 Software ANSYS

O software ANSYS é um pacote comercial de elementos finitos usado por engenheiros por todo o mundo em várias áreas da engenharia: estrutural, trocas térmicas, fluidodinâmica, eletromagnética e outras.

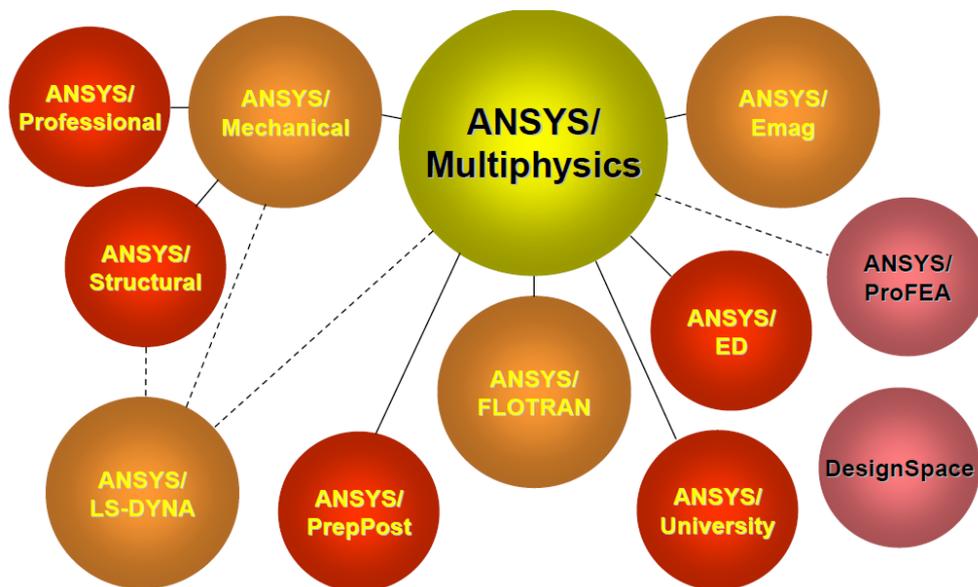
O ANSYS/Multiphysics contém os produtos da ANSYS que apresentam todos os conceitos da engenharia. Os três principais produtos são:

- 1) ANSYS/Mechanical – análise estrutural e térmica;
- 2) ANSYS/Emag – eletromagnetismo;
- 3) ANSYS/Flotran – análise fluidodinâmica (CFD).

Há outros produtos que são utilizados para uma análise mais específica, como:

- 1) ANSYS/LS-DYNA – para problemas com alta não-linearidade;
- 2) DesignSpace – para geração de geometria simples e ferramentas para análise feita no CAD de forma relativamente rápida;
- 3) ANSYS/ProFEA – otimização de análise e design com o Pro/ENGINEER.

Assim, tem-se a seguinte distribuição dos produtos da ANSYS/Multiphysics na Figura 3.18.



*Figura 3.18: Distribuição dos produtos da ANSYS/Multiphysics. Ansys Help versão 14.5.*

ANSYS Mechanical é uma aplicação do Workbench que pode ser utilizado em várias simulações de engenharia, como simulações de tensão, térmica, vibração, termoelétrica e magnetismo.

O software possibilita simular aspectos estruturais de um componente usando uma análise estática linear e não-linear ou análise de mecanismos. Os produtos da ANSYS apresentam ampla capacidade de solução dinâmica.

A análise de mecanismos dinâmicos com ANSYS/LS-DYNA é viável para simulações de grandes deformações, em que as forças de inércia são dominantes. Como nos casos de simulação de impacto e fratura, por exemplo.

## 4. Materiais e Métodos

### 4.1 Materiais

Para a realização dos procedimentos experimentais relacionados à caracterização estrutural, química e mecânica dos parafusos *Tirefond*, foram recebidos alguns destes parafusos novos (Figura 4.1) nos laboratórios do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Estes parafusos foram fornecidos pela Empresa VLI-FCA como parte de um convênio de pesquisa.



*Figura 4.1: Parafuso Tirefond.*

Foram selecionados alguns parafusos para os procedimentos de caracterização deste componente de fixação utilizado em vias permanentes. Estes parafusos são advindos do processo de forjamento e laminação a quente, a partir de barras laminadas do aço ABNT1015, como já descrito na revisão bibliográfica.

## **4.2 Procedimentos Experimentais**

### **4.2.1 Caracterização química**

Uma amostra representativa do parafuso *Tirefond* foi retirada na região da cabeça e destinada à caracterização química por meio do emprego da técnica de espectrometria de emissão óptica. A determinação da composição química é importante para se conhecer o aço utilizado na fabricação dos parafusos *Tirefond*.

### **4.2.2 Caracterização microestrutural**

O início dos procedimentos de preparação consistiu no corte refrigerado do parafuso, com o objetivo de se obter amostras representativas para caracterização metalográfica.

O parafuso foi seccionado em três regiões distintas, sendo elas: uma amostra para caracterização da seção transversal (retirada próxima à cabeça do parafuso) e duas para caracterização na seção longitudinal (retiradas na região onde se encontra a rosca do parafuso).

A amostra destinada à caracterização microestrutural da seção transversal e longitudinal foi submetida a procedimentos padrão de preparação metalográfica (Desbaste Lixamento e Polimento). Uma análise no microscópio óptico e algumas imagens sem e com ataque químico Nital 2% foram realizadas a partir das amostras embutidas.

Foram embutidas as seções longitudinais do parafuso, buscando facilidades para o manuseio das amostras nos procedimentos de preparação metalográfica e para se obter uma boa qualidade de preparação metalográfica nas extremidades das peças, em que fosse possível fazer uma caracterização precisa na região dos dentes.

### 4.2.3 Caracterização mecânica

#### ✓ **Ensaio de tração**

Três corpos de prova padronizados (ASTM E8M) para ensaio de tração foram confeccionados a partir dos parafusos *Tirefond* recebidos no Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEMET (Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Os corpos de prova foram produzidos de acordo as dimensões ilustradas na Figura 4.2. O ensaio de tração foi realizado em uma máquina eletromecânica com taxa de deformação de  $10^{-3} \text{s}^{-1}$ .

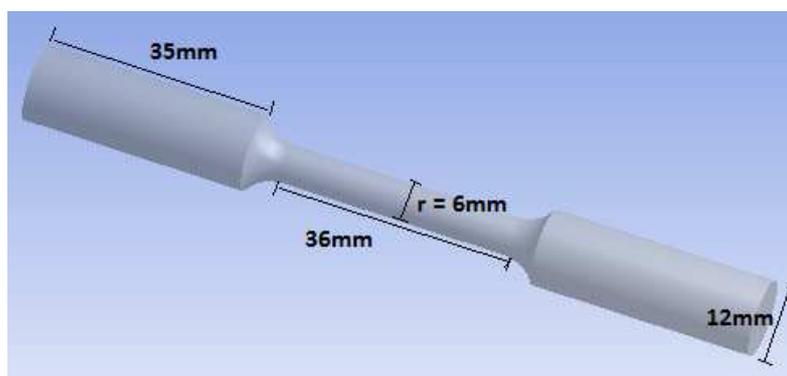


Figura 4.2: Dimensional do corpo de prova de tração.

#### ✓ **Ensaio de Torção**

Cinco corpos de prova foram ensaiados de acordo a norma ASTM A938, para a realização do ensaio de torção em uma máquina de torção Amsler. Os corpos de prova com dimensões similares ao corpo de prova de tração citado anteriormente, foram confeccionados a partir dos parafusos *Tirefond* recebidos

#### ✓ **Curva de encruamento do aço ABNT1015**

Foram confeccionados corpos de prova de tração a partir de barras do aço do ABNT1015 trefiladas com diferentes taxas de redução. Estes corpos de prova foram tracionados até a ruptura e parâmetros mecânicos como limites de escoamento e resistência, assim como deformação total foram determinados. Por meio da análise destes dados avaliou-se o efeito dos níveis de deformação a frio sobre as propriedades do aço ABNT 1015.

### ✓ **Ensaio de Impacto Charpy**

Corpos de prova padronizados (ASTM E23) foram confeccionados a partir de parafusos *Tirefond* para a realização de ensaios de Impacto Charpy. Os ensaios foram realizados nas temperaturas de -196°C, 0°C, 20°C, 90°C e 280°C. Viabilizando a análise da tenacidade ao impacto do material, em várias temperaturas de trabalho.

### ✓ **Ensaio de Microdureza**

A partir das amostras utilizadas para a realização da caracterização metalográfica e química foi medido o perfil de microdureza da superfície ao interior do parafuso *Tirefond*. Inicialmente as amostras foram submetidas aos procedimentos de retífica, desbaste, lixamento, polimento e ataque químico para serem submetidas a ensaios de microdureza. Na seção transversal foram traçados três perfis de microdureza da superfície para o centro e a média aritmética e desvios padrão da média foram calculados. Destaca-se que a escala de microdureza utilizada foi a Vickers, assim como a carga e o tempo de aplicação da mesma foram de 10kgf e 10s, respectivamente.

## **4.3 Fator de Concentração de Tensão**

Foi determinado por meio do Modelo Neuber o fator de concentração de tensão  $K_t$  (Equação 3.1) considerando apenas carregamento estático,  $K_f$  (Equação 3.3) e  $K_{f*}$  (Equação 3.4) que considera carregamento dinâmico do parafuso *Tirefond*. Os parâmetros geométricos para determinação dos fatores de concentração de tensão foram  $t=4\text{mm}$ ,  $p=12\text{mm}$  e  $r=3\text{mm}$ .

## **4.4 Simulação Computacional**

Devido à necessidade de análise do estado de tensão da atual configuração do parafuso *Tirefond* para posteriores propostas de melhorias, essa análise é viável a partir de simulação mecânica do parafuso *Tirefond* por meio do software ANSYS, o presente trabalho realizou a simulação de acordo a sequência de passos apresentados na Figura 4.3.

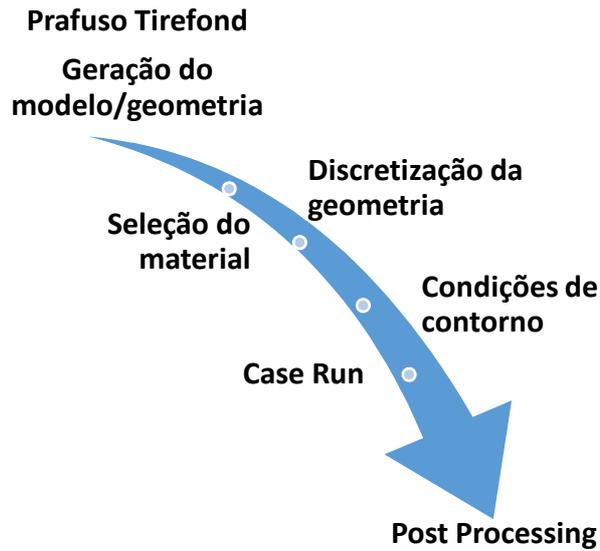


Figura 4.3: Fluxo de realização da simulação computacional do parafuso Tirefond

A solução de um problema no ANSYS iniciou-se pela definição da região de interesse, e, posteriormente, pela confecção de sua geometria. Foi confeccionada a geometria do parafuso *Tirefond* com o auxílio do ANSYS/Design Modeler, a partir do desenho técnico apresentado na Figura 4.4.

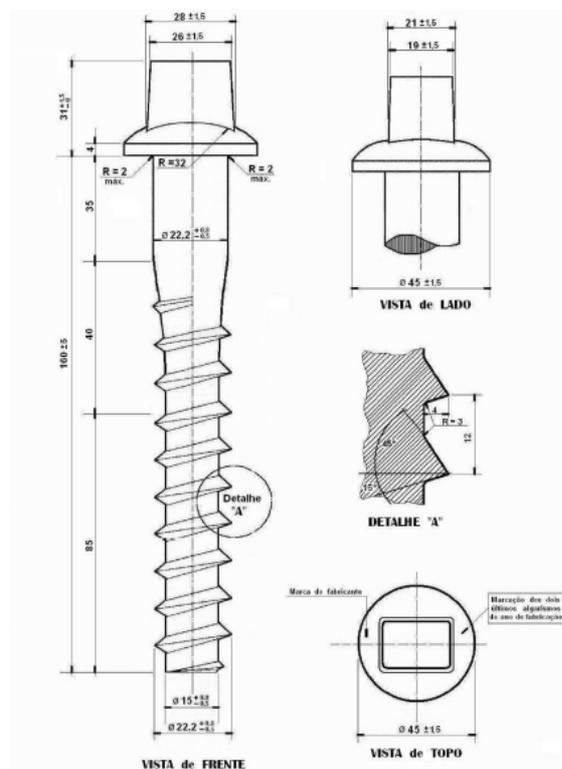


Figura 4.4: Desenho técnico do parafuso Tirefond cabeça retangular.

Nesse ponto foi analisada todas as simplificações que poderiam ser realizadas no domínio escolhido, a partir de simetria geométricas, para diminuir ao máximo o seu tamanho e simplificar ao máximo os contornos físicos, de modo a facilitar a etapa da geração de malha.

A Figura 4.5 mostra a geometria do Parafuso *Tirefond* gerada por meio do ANSYS/Design Modeler de acordo as dimensões especificadas pelo desenho técnico. O desenho gerado viabiliza a análise de apenas  $\frac{1}{4}$  da simetria do parafuso, simplificação que facilita as próximas etapas da simulação computacional.

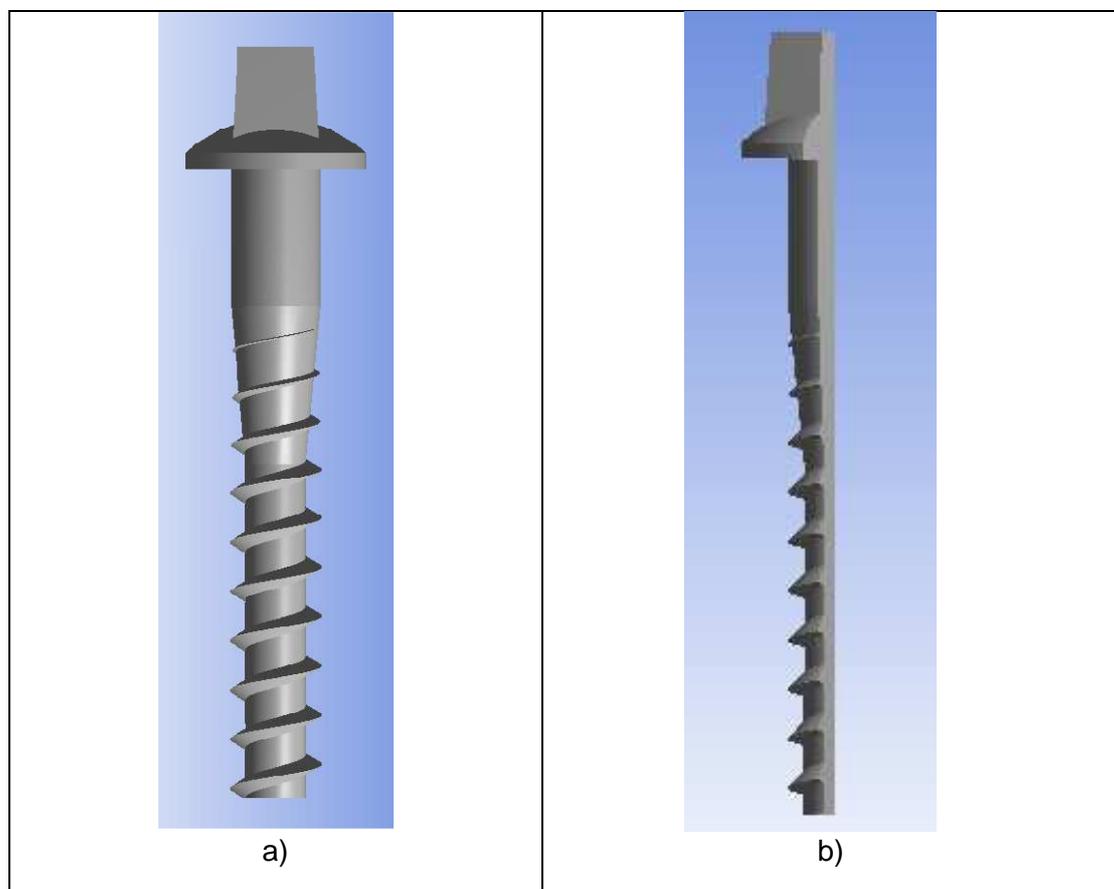
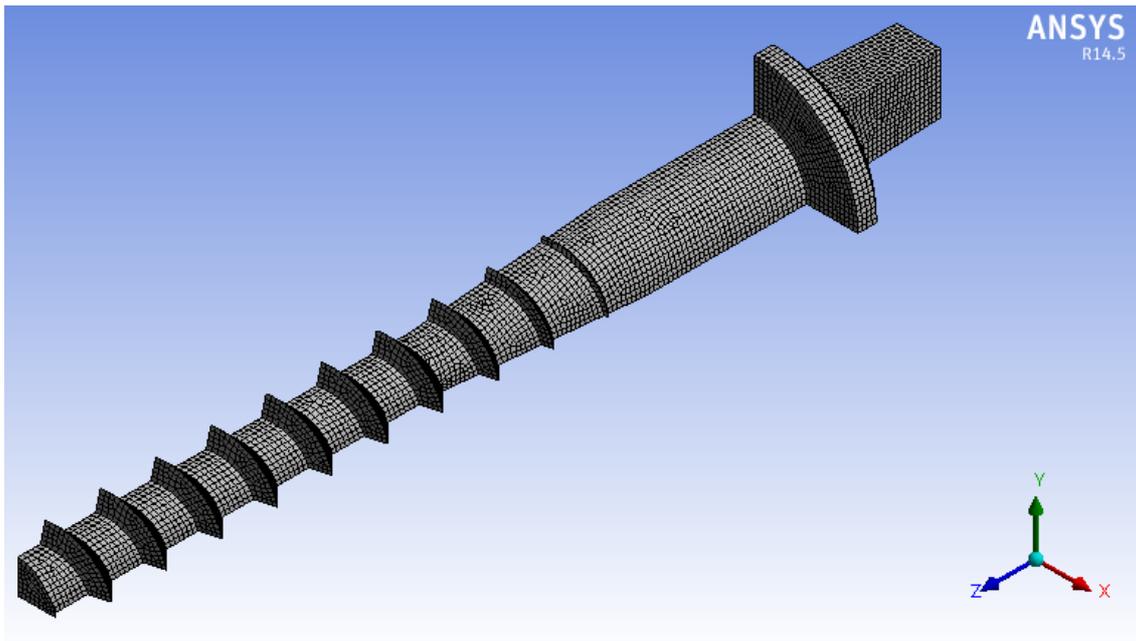


Figura 4.5: a) Desenho do Parafuso *Tirefond* e b)  $\frac{1}{4}$  da simetria do parafuso *Tirefond*, de acordo o software ANSYS/Design Modeler.

Em seguida, iniciou-se a geração de malha, em que é realizada a discretização do domínio em pequenos elementos finitos. Tem-se melhor qualidade da malha com o controle de alguns fatores como: a escolha dos tipos de elementos utilizados (tetraédricos, prismáticos e hexaédricos); a faixa de tamanhos

desses elementos; regiões com diferentes concentrações de elementos; e progressões de crescimento do tamanho dos elementos.

Assim, após a geração da geometria foi feita a geração de malha estrutura, ou seja, houve em seguida a discretização do modelo por elementos hexaédricos, visto que a geometria é tridimensional e regular. A malha hexaédrica gerada apresenta 177301 nós e 65923 elementos, como mostra a Figura 4.6.



*Figura 4.6: Discretização do modelo por elementos hexaédricos.*

Após a geração da malha, foram especificadas: as propriedades físicas do sistema; os principais modelos e parâmetros envolvidos na análise desejada; e as condições iniciais e de contorno para a resolução numérica do sistema.

No *Solver*, o sistema de equações diferenciais é resolvido por meio da técnica dos elementos finitos. Os principais passos seguidos são:

- As equações diferenciais parciais são integradas em todos os volumes de controle da região de interesse.
- Essas equações integrais são convertidas para um sistema de equações algébricas através de uma série de aproximações para os termos contidos nas equações integrais;
- O sistema composto pelas equações algébricas é resolvido iterativamente.

Essa aproximação iterativa é requerida em função da natureza não linear das equações e à medida que a solução se aproxima da solução exata, é dito que o sistema se aproxima da convergência. Para cada iteração, um erro, ou um resíduo, é informado levando em consideração a todas as equações de conservação do escoamento.

É selecionado para o presente trabalho na galeria de materiais não-lineares a base de dados de aço estrutural não-linear a ser aplicada no modelo computacional. O limite de escoamento de 262MPa foi tido como o dado de entrada necessário desse modelo. O limite de escoamento foi determinado no ensaio de tração de corpos de prova retirados a partir de parafusos *Tirefond*, este ensaio de tração será discutido em detalhe posteriormente

No *Post-Processing*, várias opções encontram-se disponíveis para avaliar os resultados da solução numérica. É possível obter resultados pontuais, vetoriais ou, até mesmo, animações complexas, facilitando assim a compreensão dos fenômenos físicos presentes na simulação, e viabilizando a identificação da veracidade dos resultados obtidos. As principais características desta etapa final da simulação são: a capacidade de visualizar a geometria e a malha; a opção de realizar gráficos de vetores e de contornos; a confecção de gráficos sobre superfícies tridimensionais; a visualização de linhas de correntes e trajetória de partículas.

Assim, a partir da simulação computacional do parafuso *Tirefond* foi possível analisar o gradiente de deformação plástica e de tensão presente no parafuso *Tirefond*, além dos vetores de tensão, ao simular os esforços no parafuso de acordo a realidade das ferrovias. De acordo Esveld 2001, foram determinadas as forças a serem aplicadas no parafuso *Tirefond* como condições de contorno da simulação computacional.

Na simulação computacional realizada foi aplicada como condição de contorno um carregamento estático de 15kN em  $\frac{1}{4}$  de simetria do parafuso *Tirefond*. Baseado na descrição de Esveld (2001) de tensão  $300\text{N/cm}^2$  na região Trilho/Placa de Apoio onde está localizado o parafuso *Tirefond*.

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1 Caracterização Química

Uma amostra representativa do parafuso *Tirefond* foi retirada na região da cabeça e foi destinada à caracterização química. A Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.1: Composição química do aço utilizado na fabricação do parafuso *Tirefond* (%em massa).

Composição Química (% em massa)						
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr
0,14	0,50	0,016	0,024	0,12	0,036	0,058
Mo	Al	Cu	N	Sn	Co	Fe
0.005	0,003	0,17	0,0073	0,0122	0,006	98,88

De acordo a classificação normativa ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), o aço utilizado para produção do parafuso *Tirefond* é um aço carbono do tipo ABNT 1015, portanto trata-se de um aço carbono simples.

Pode-se observar que o parafuso *Tirefond* é constituído por um aço baixo carbono, com aproximadamente 0,14% de carbono, e apenas traços de elementos como Vanádio, Nióbio e Titânio.

O resultado encontrado está coerente com a caracterização metalográfica e com os resultados de ensaios de dureza apresentados posteriormente.

### 5.2 Caracterização Microestrutural

A Figura 5.1 apresenta micrografias da seção transversal e longitudinal do parafuso *Tirefond*, sem ataque com aumento de 100x, na região central ao longo da rosca do parafuso *Tirefond*. Pode-se observar que a amostra possui inclusões que, em função das características morfológicas, aparentam ser inclusões de óxido globular, presentes em pequena quantidade, o que é aceitável para este tipo de aço.



Figura 5.1: Micrografia do Parafuso Tirefond, sem ataque 100x: a) seção transversal; b) seção longitudinal.

Após obtenção de imagens sem ataque químico, a amostra foi atacada com Nital 2% por 5s, lavada em água corrente e álcool etílico. Finalmente a superfície foi secada com o auxílio de um secador para evitar a ocorrência de manchas superficiais.

A Figura 5.2 apresenta micrografias da seção transversal do parafuso *Tirefond* após ataque químico com aumentos de 100x e 400x. A amostra é constituída por ferrita e perlita, como era esperado. Não foram observados sinais de bandeamento da estrutura nem quaisquer outros sinais evidentes de conformação mecânica, mas há indícios de que possivelmente se trata de uma estrutura proveniente de um resfriamento relativamente rápido ao ar.

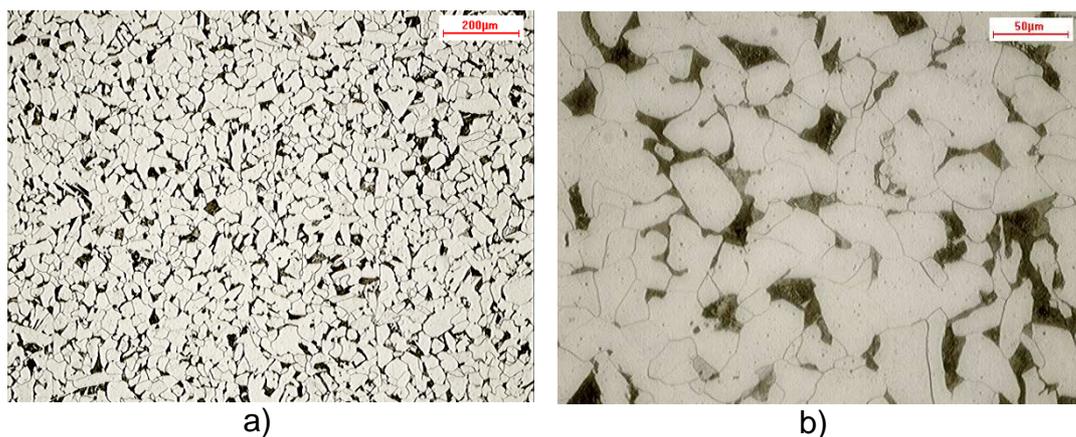
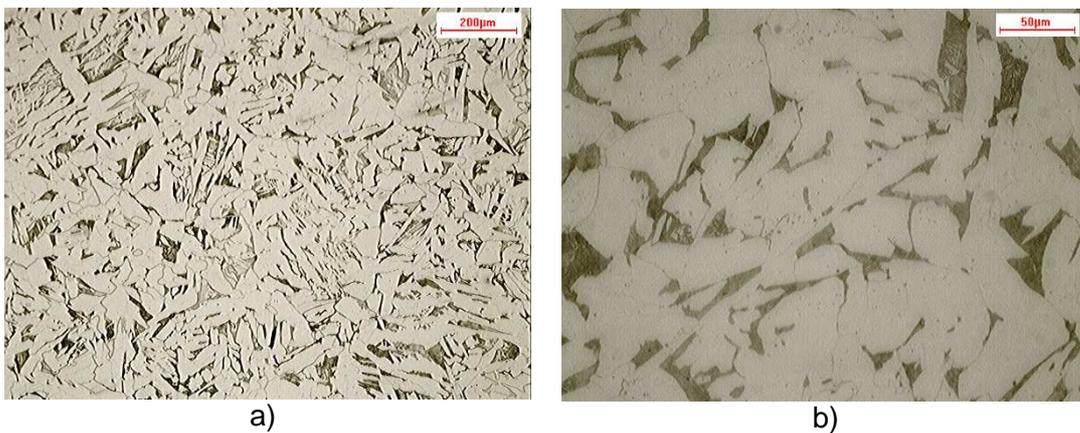


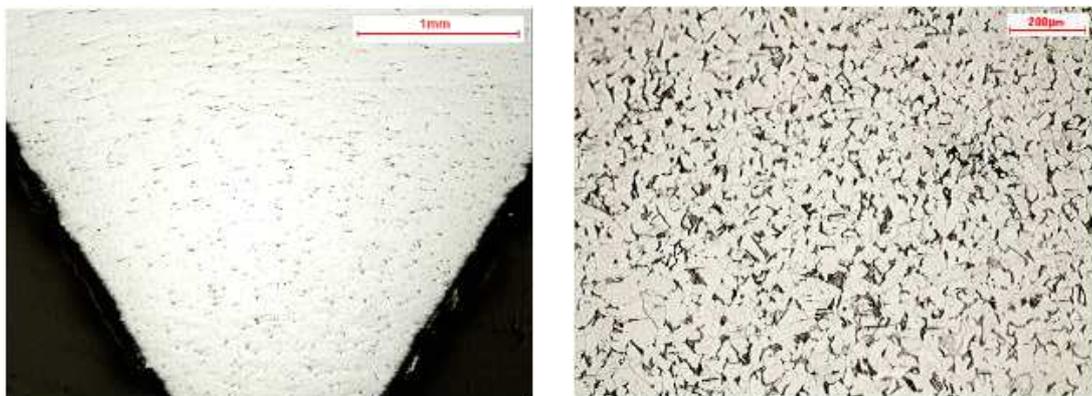
Figura 5.2: Micrografias da seção transversal do parafuso Tirefond - região central – MO. Ataque: Nital 2%: a) 100x; b) 400x.

A Figura 5.3 apresenta micrografias da seção longitudinal, após submissão das amostras ao ataque químico com Nital 2%, com aumentos de 100x e 400x. A amostra é constituída por ferrita e perlita coerente ao aço baixo carbono caracterizado para o parafuso *Tirefond*. Não foram observados sinais de bandeamento da estrutura nem quaisquer outros sinais evidentes de conformação mecânica.



*Figura 5.3: Micrografias da seção longitudinal do parafuso Tirefond - região central – MO. Ataque: Nital 2%: a) 100x; b) 400x*

Na micrografia da seção longitudinal da região dos dentes da rosca é observado na Figura 5.4 a) que há inclusões de óxido globular presentes em pequena quantidade, o que é aceitável para este tipo de aço. E na Figura 5.4 b) é caracterizado microestrutura ferrita e perlita. Não foi detectado nenhum bandeamento na estrutura que não apresenta qualquer sinal evidente de conformação frio, o que confirma a conformação a quente apresentada pelo fabricante.



*Figura 5.4: Micrografias da seção longitudinal do parafuso Tirefond - região dos dentes da rosca – MO: a) 40x, sem ataque; b) 100x. Ataque: Nital 2%*

### 5.3 Caracterização Mecânica

#### ✓ *Ensaio de Microdureza*

Foi determinado o perfil de microdureza da superfície ao centro do parafuso *Tirefond* utilizando a escala de microdureza Vickers, assim como a carga e o tempo de aplicação da mesma foram de 10kgf e 10s, respectivamente.

Pode-se observar na Figura 5.5 que considerando os desvios padrão da média, não há uma variação significativa entre os valores obtidos próximos à superfície (valores próximos de zero) e valores próximos ao centro (valores próximos de doze). Observa-se que alguns valores de microdureza são um pouco mais altos e outros mais baixos, mas isto está associado ao fato de algumas endentações incidiram em grãos de ferrita e outras em colônias de perlita.

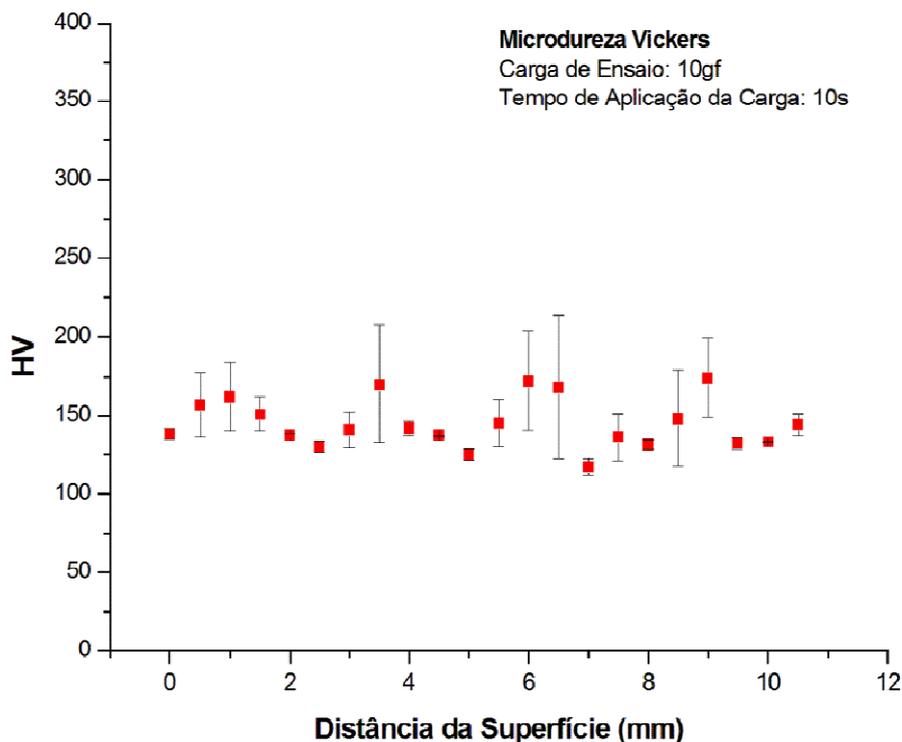


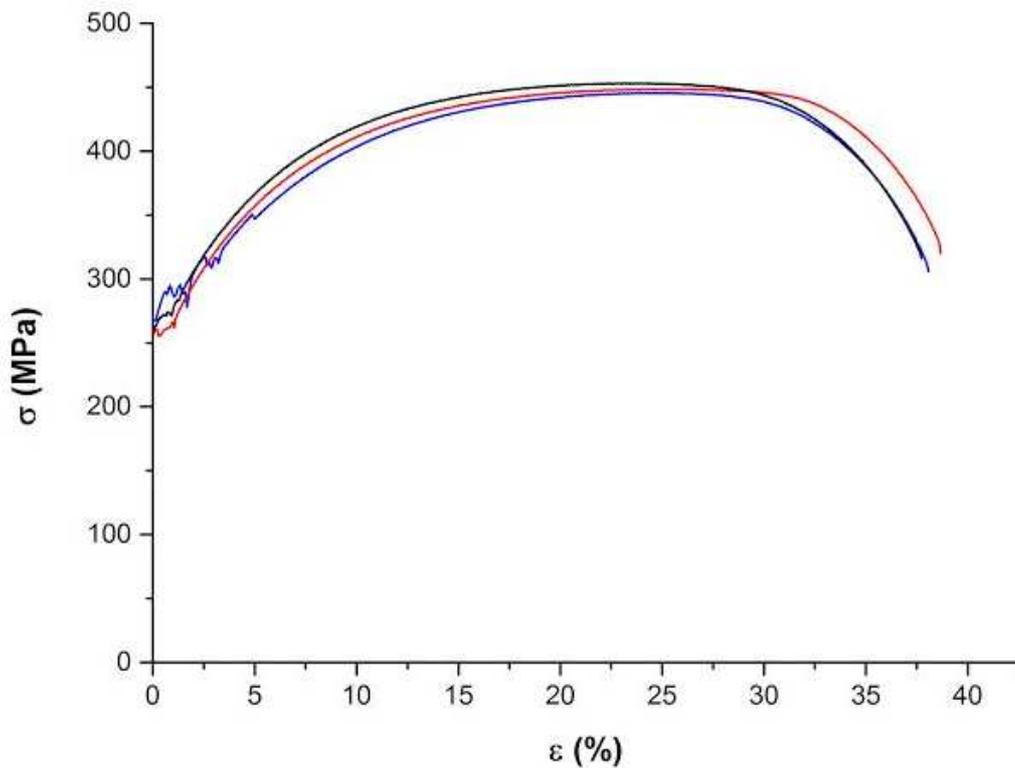
Figura 5.5: Médias e desvios padrão dos perfis de microdureza Vickers na seção transversal do parafuso *Tirefond*.

Pode-se afirmar que os resultados de microdureza estão de acordo com a microestrutura caracterizada anteriormente, perlita e ferrita. Não foram

observadas diferenças de dureza significativas entre os dentes e o centro do parafuso *Tirefond*.

### ✓ **Ensaio de tração**

Três corpos de prova padronizados (ASTM E8M) para ensaio de tração foram confeccionados a partir dos parafusos *Tirefond*. Os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina eletromecânica com taxa de deformação de  $10^{-3}\text{s}^{-1}$ . A Figura 5.6 apresenta as curvas tensão versus deformação de engenharia obtida.



*Figura 5.6: Curva tensão versus deformação de engenharia dos corpos de prova usinados a partir do parafuso *Tirefond*.*

Em média o aço utilizado para a fabricação do parafuso *Tirefond* apresenta limite de escoamento de 262MPa, limite de resistência de 449MPa, alongamento de 38% e redução de área de 65%.

As propriedades de tração encontradas atendem a classe de resistência 4.6 da Norma ISO 898-1: Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and

alloy steel. O que condiz com a Norma NBR 8497: Metroferroviário – Trefilado que especifica a produção de parafuso *Tirefond* conforme a Classe de Resistência 4.6.

Os corpos de prova ensaiados em tração foram submetidos a uma análise fractográfica com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV). A Figura 5.7 apresenta a superfície de fratura dos corpos de prova onde pode-se observar a presença de *dimples*, o que indica que o mecanismo é de fratura dúctil, com nucleação e coalescimento de microcavidades.

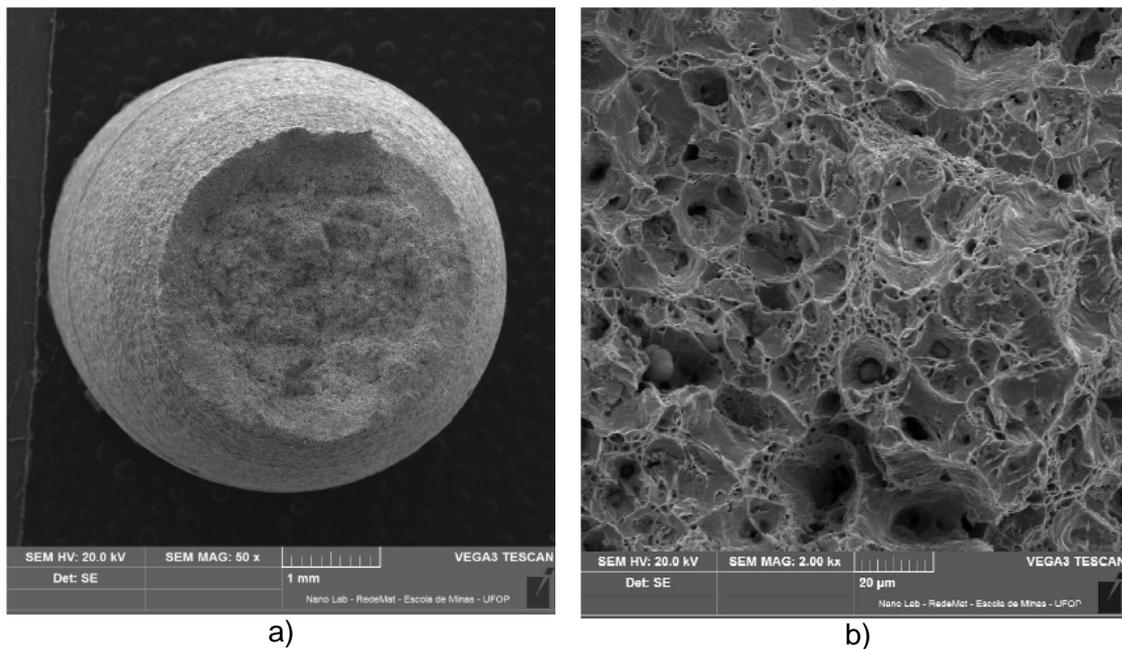


Figura 5.7: Superfície de fratura de um CP do parafuso *Tirefond* ensaiado por tração: a) 50x e b) 2000x.

### ✓ **Ensaio de Torção**

Com relação ao ensaio de torção foi determinado que o aço utilizado para a produção do parafuso *Tirefond* apresenta limite de escoamento em torção de aproximadamente 268MPa, como apresenta a Figura 5.8.

Com base na determinação do limite de escoamento por torção do aço e desconsiderando quaisquer forças trativas no parafuso, tem-se que o torque para início de deformação plástica do parafuso *Tirefond*, considerando o diâmetro de 22,2mm, seria aproximadamente 575N.m. Essa determinação é de extrema importância, uma vez que se aplica determinada força de torque para

a fixação do parafuso *Tirefond* na ferrovia, essa força não deve ocasionar deformação plástica e assim não favorecer a fratura prematura do componente de fixação.

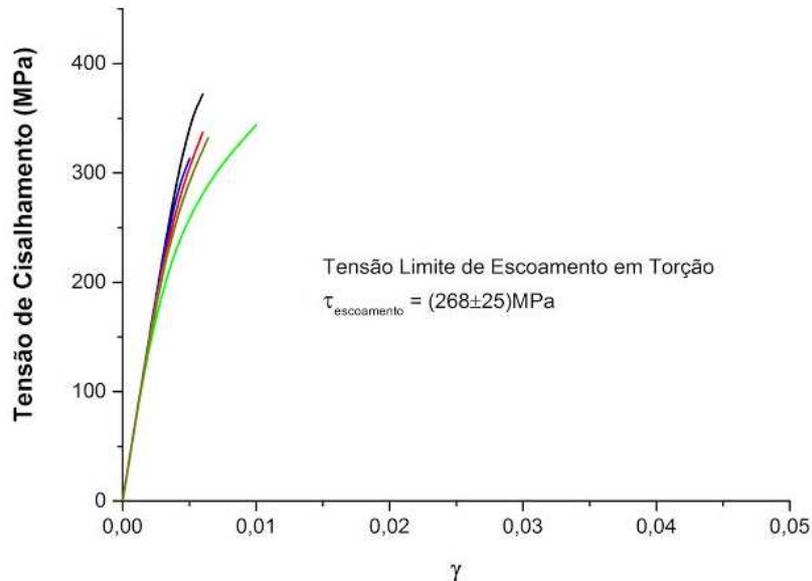


Figura 5.8: Curva de tensão de cisalhamento (MPa) versus deformação em ensaio de torção para CP's do parafuso *Tirefond*.

A partir de simulador “online” de torque máximo, como o simulador no site da Futek, é possível determinar o torque máximo de 538N.m para o parafuso *Tirefond* considerando diâmetro de 22,2mm e propriedades mecânicas.

#### ✓ **Curva de Encruamento do aço ABNT1015**

Os parafusos *Tirefond* são produzidos a partir de aço com teor de carbono baixo, portanto apresentam resistência mecânica relativamente baixa e tenacidade e ductilidade relativamente altas. Deste modo, uma análise da possibilidade do parafuso *Tirefond* ser forjado a frio torna-se totalmente viável.

Afinal, a partir da alta tenacidade e a ductilidade que o aço ABNT1015 viabiliza o processo de forjamento a frio para a produção do parafuso *Tirefond*, objetivando ganho na resistência mecânica no produto final devido ao grau de encruamento nas peças que essa conformação a frio proporciona.

A Figura 5.9 apresenta a variação das propriedades mecânicas do aço ABNT1015 conforme a porcentagem de conformação a frio dando redução de

diâmetro em barra inicialmente com 22mm. Sendo assim, foi possível construir a curva de encruamento para este aço quando deformado a frio.

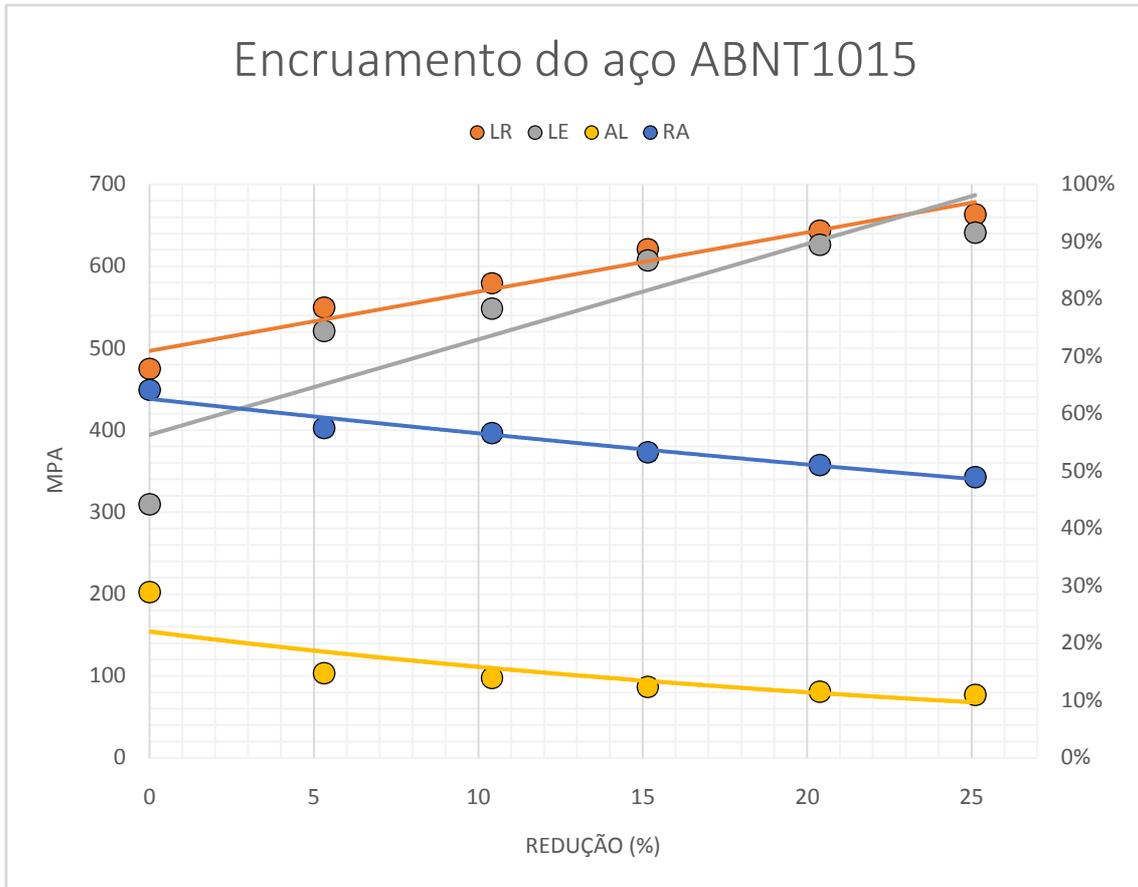


Figura 5.9: Encruamento do ABNT1015 a partir de diferentes taxas de deformação a frio.

A partir dos ensaios de tração realizados em corpos de prova de materiais que sofreram as diferentes reduções é verificado que quanto maior a porcentagem de redução maior são os limites de escoamento (LE) e de resistência (LR) do produto final devido ao encruamento sofrido pelo mesmo, e por outro lado, o alongamento (AL) e a redução de área (RA) diminuem. Em uma redução de 25% o material apresentará limite de resistência 660MPa e limite de escoamento 610MPa bastante superior quando comparado ao material sem conformação a frio que apresenta limite de resistência de 449MPa $\pm$ 55 e limite de escoamento de 262MPa. Enquanto que a redução de área e o alongamento reduzem apenas 10%, para mesma taxa de deformação.

Além disso, quando se tem a conformação a frio ocorre o encruamento que determina altos valores de resistência mecânica, porém o centro tende a ser

mais tenaz, e isso é muito importante no que diz respeito a nucleação e propagação de trinca por fadiga.

### ✓ **Ensaio de Impacto**

Corpos de prova padronizados (ASTM E23) foram confeccionados a partir de parafusos *Tirefond* para a realização de ensaios de Impacto Charpy. Os ensaios foram realizados nas temperaturas de -196°C, 0°C, 20°C, 9 0°C e 280°C. A Figura 5.10 apresenta a tenacidade ao Impacto do aço em função da temperatura de ensaio.

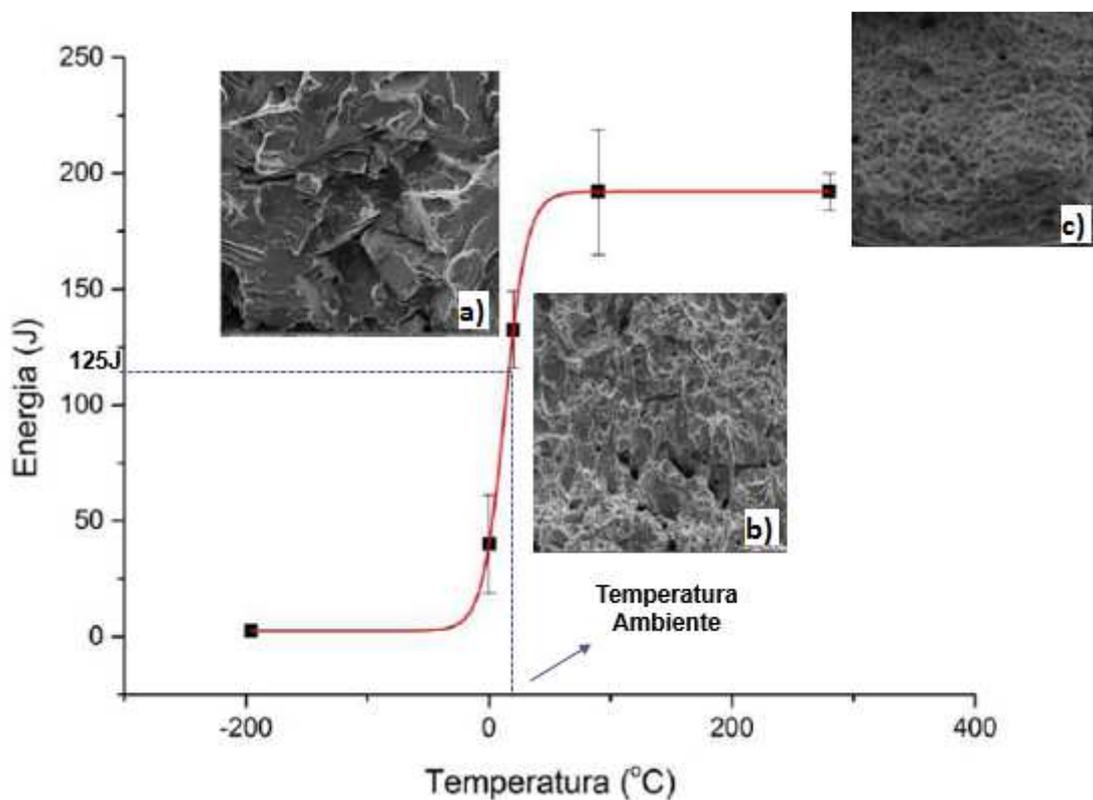


Figura 5.10: Tenacidade ao impacto do parafuso *Tirefond* em função da temperatura. a) fratura frágil; b) fratura dúctil; c) fratura dúctil.

Pode-se observar que o aço utilizado na confecção do parafuso *Tirefond*, com sua microestrutura constituída por ferrita e com pequena fração de perlita absorveu aproximadamente 125J à temperatura ambiente, assim como apresentou transição dúctil-frágil, possuindo 90% de fratura frágil a 0°C.

As amostras ensaiadas foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura. Observa-se que para os ensaios realizados a -196°C e 0°C na Figura

5.10(a) há presença majoritária de facetas de clivagem, comprovando a fratura frágil. Para as demais temperaturas na Figura 5.10(b) e (c) observa-se a presença de *dimples* confirmando o comportamento dúctil.

## 5.4 Simulação Computacional

A simulação computacional irá inicialmente auxiliar a análise da atual configuração do parafuso *Tirefond* para melhor entender as recorrentes falhas descritas pelas concessionárias de ferrovias brasileiras e avaliar possíveis pontos de melhoria.

Sendo assim, a partir do *software* Ansys foi gerada a geometria do parafuso *Tirefond* e posteriormente seguida a discretização por elementos hexaédricos, devido a geometria gerada ser relativamente simples, conseqüentemente se tem menor tempo de processamento.

A fim de viabilizar a análise do estado de tensão que o parafuso *Tirefond* apresenta quando solicitado por tração, foi necessária a determinação das condições de contornos adequadas, em que uma força vertical de 15kN foi aplicada na parte superior do parafuso como mostra a Figura 5.11 para análise de estado de tensão quando solicitado por força de tração.

A força vertical aplicada no modelo foi baseada em Esveld (2001) que determina uma força de 60000N na região de placa de apoio e o dormente, região em que o parafuso *Tirefond* exerce sua função de fixação. Como visto, a simulação foi feita com apenas  $\frac{1}{4}$  da simetria geométrica, por isso, tem-se como condição de contorno de aplicação de 15kN no modelo matemático.

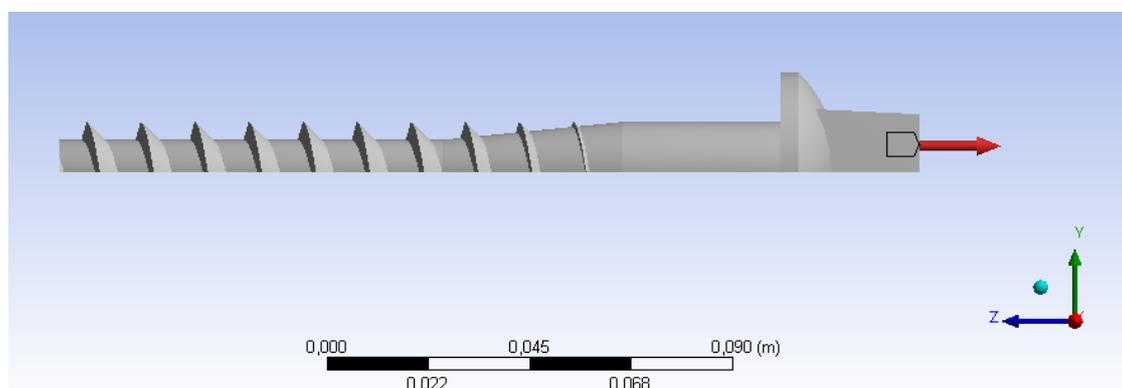


Figura 5.11: Aplicação da força de tração de 15kN no parafuso *Tirefond* na simulação computacional pelo software Ansys 14.5.

Posteriormente,foifeita uma análise do estado de tensão no parafuso *Tirefond* em toda sua extensão quando solicitado por tração uniaxial, como mostra a Figura 5.12. Nota-se que as regiões que apresentam os níveis mais altos de tensão (acima da tensão nominal aplicada) estão alocadaslogoacima dos filetes de rosca próximos a cabeça do parafuso. A tensão de maior magnitude foi de 268MPa que ultrapassa um pouco o limite de escoamento do aço ABNT1015 conformado a quente.

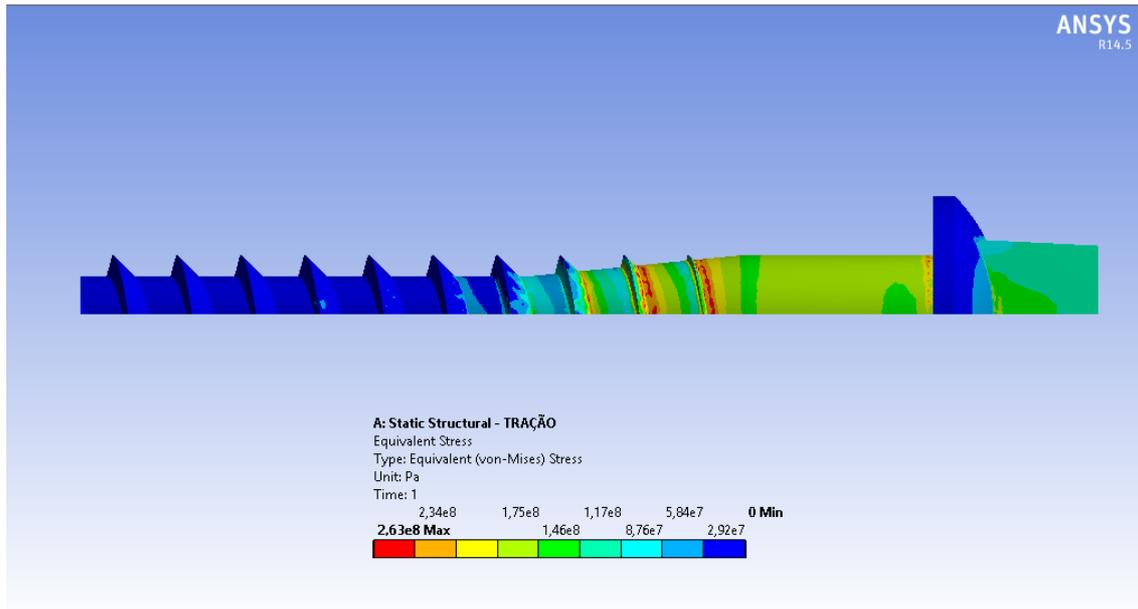


Figura 5.12: Estado de tensão no parafuso solicitado por tração - software ANSYS.

A região do modelo matemático em que foi observada tensão de maior magnitude é exatamente a região de fratura da maioria das ocorrências de falha do parafuso em campo, como mostramos Figuras 1.2 e 3.11. Os parafusos fraturados recolhidos em campo apresentam a fratura preferencialmente próxima do 2º filete da rosca.

A Figura 5.13 ilustra a deformação plástica do parafuso composto com o aço ABNT1015 quando solicitado por uma força de tração de 15kN. A maior deformação plástica está alocada nos primeiros filetes da rosca próximos a cabeça do parafuso, sendo a mesma região de maior ocorrência de fratura dos parafusos em campo.

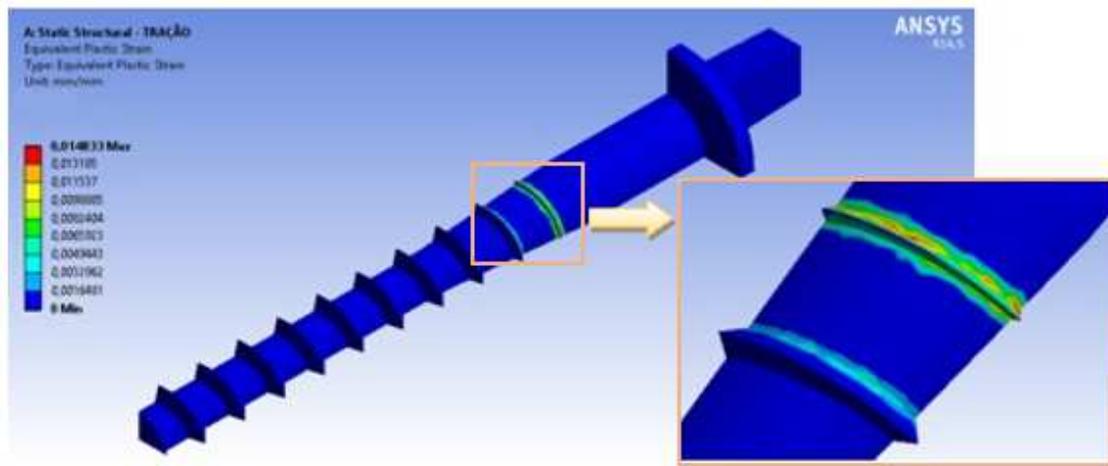


Figura 5.13: Deformação plástica do parafuso Tirefond aço ABNT1015, simulação computacional pelo software Ansys 14.5.

Na Figura 5.14 tem-se a análise do perfil de deformação plástica do parafuso com maior limite de escoamento em torno de 300MPa, em que nas mesmas condições de simulação do ABNT1015, que apresenta limite de escoamento aproximadamente 260MPa, apresenta menor região em estado de deformação plástica.

Uma possibilidade para aperfeiçoar as propriedades mecânicas do parafuso *Tirefond* seria aplicar um aço carbono com maior teor de carbono como, por exemplo, os aços ABNT1030 – 1045 de maneira a ter um aço com maior limite de resistência e relativamente alta ductilidade. Há possibilidade de aplicar um aço microligado visando ganho tanto em resistência mecânica e de ductilidade, porém deve ser feita uma análise de custo do aço microligado determinando a viabilidade para a aplicação desta produção do parafuso *Tirefond*.

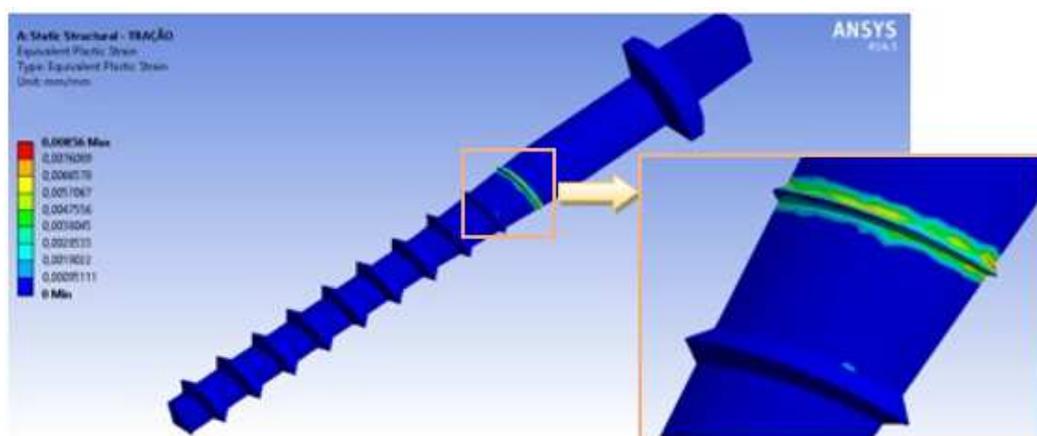
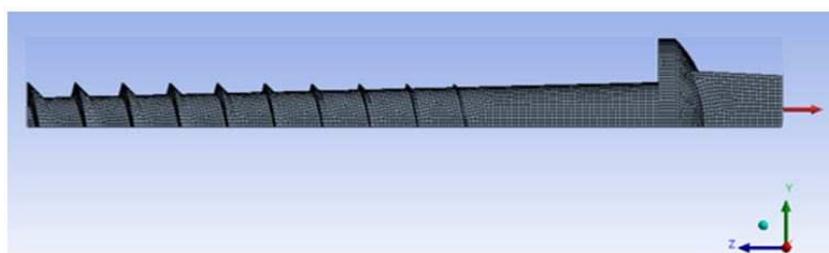


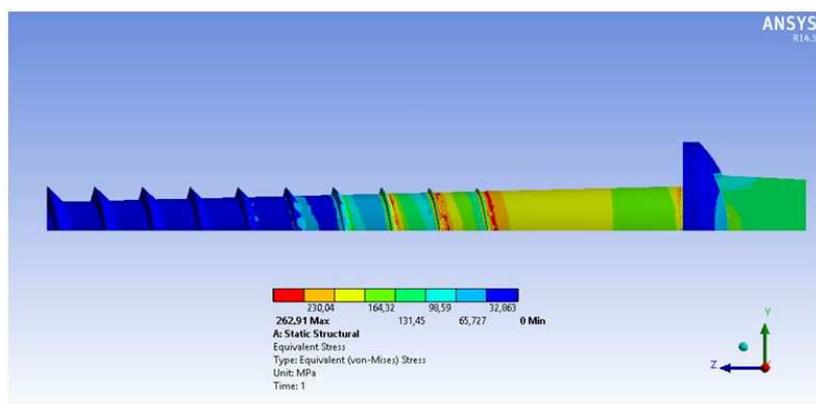
Figura 5.14: Deformação plástica do parafuso Tirefond aço ABNT1045, simulação computacional pelo software Ansys 14.5.

Há também a possibilidade de mudança no processo de fabricação do parafuso que determine aumento de propriedades mecânica, sem necessidade de modificar a matéria-prima (ABNT1015). Ao invés de conformação a quente, teria a fabricação do parafuso *Tirefond* via processo de forjamento/laminação a frio que proporcionará aumento na resistência mecânica devido ao encruamento, o que se torna uma proposta inovadora, visando otimização de desempenho e custo do parafuso.

A partir análise do estado de tensão da atual geometria do parafuso *Tirefond*, foi proposta mudança geométrica. A primeira proposta consiste em eliminar a redução abrupta do diâmetro existente entre a região lisa e a dos filetes, tornando-a gradual. A Figura 5.15(a) apresenta o modelo para a primeira proposta e ilustra (seta vermelha) a simulação de aplicação de uma força trativa uniaxial de 15kN na cabeça do parafuso.



a)



b)

Figura 5.15: a) Discretização da primeira geometria proposta por elementos hexaédricos. b) Estado de tensão da nova geometria proposta.

A Figura 5.15(b) apresenta o resultado da simulação computacional, onde é possível observar que a maior tensão é de aproximadamente 263MPa e em

pontos situados acima dos filetes da rosca, próximos a cabeça do parafuso, não há mudança significativa no estado de tensão. Usando como referência o Modelo de Neuber, uma segunda mudança geométrica no parafuso *Tirefond* foi proposta com o objetivo de aumentar o raio de concordância superior dos filetes de rosca de 3mm para 8mm, pois, de acordo a Equação 3.3 quanto maior o raio menor será o fator de concentração de tensão. Sendo assim, tem-se que para a geometria de raio de 8mm o fator de concentração de tensão teórico é  $K_t=2,22$  e o fator de concentração de tensão para cargas dinâmicas  $K_f=2,18$  e  $K_f^*=4,77$  (NORTON, 2006).

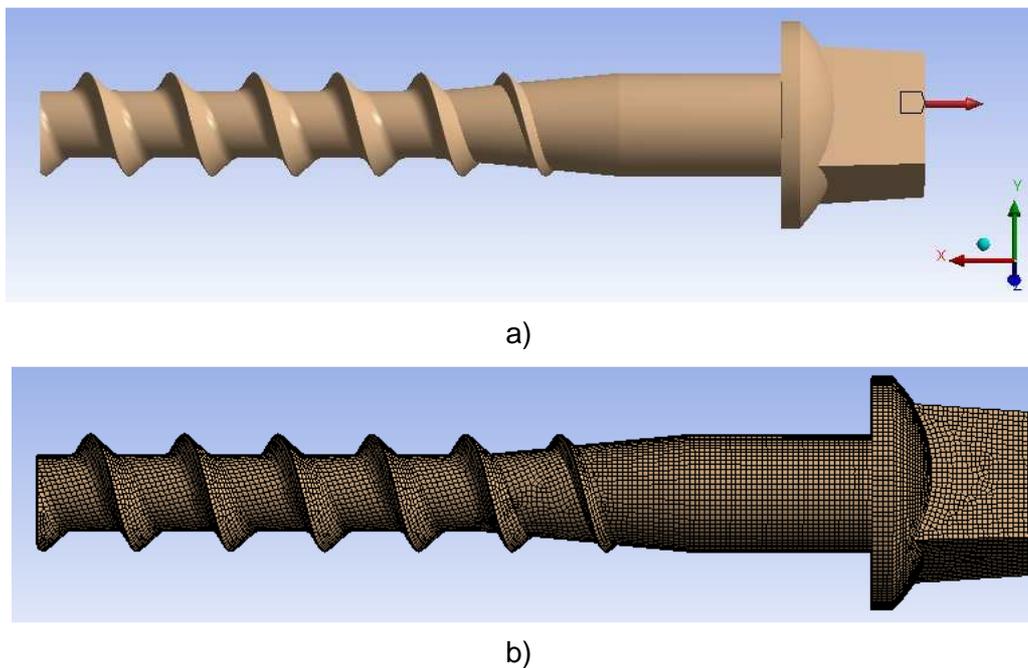


Figura 5.16: Nova geometria proposta para parafuso *Tirefond*: a) Força de tração 15kN; b) Discretização do modelo, simulação computacional pelo software Ansys 14.5.

Ao se aplicar a força de tração de 15kN na geometria do parafuso *Tirefond* gerada no software Ansys com raio de concordância de 8mm Figura 5.16 tem-se a análise do estado de tensão da segunda geometria proposta quando solicitada por tração uniaxial Figura 5.17. De acordo a análise do estado de tensão, observa-se drástica redução na tensão máxima presente ao longo do parafuso, sendo ela de aproximadamente 84MPa, tensão essa muito abaixo do limite de escoamento do ABNT 1015.

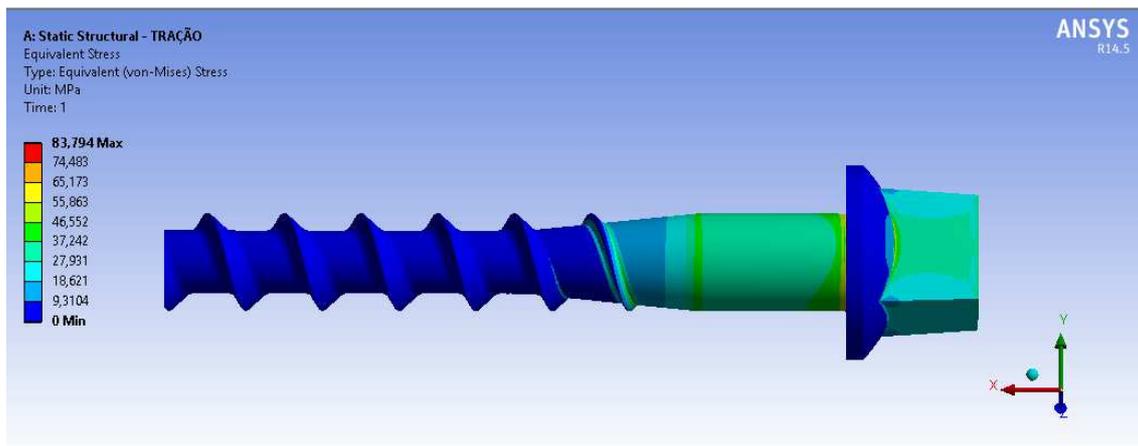


Figura 5.17: Estado de tensão da nova geometria proposta para o parafuso *Tirefond* com maior raio de concordância da rosca.

Neste contexto de otimização do parafuso, a Tabela 5.2 mostra a variação dos fatores de concentração de tensão, calculados a partir do Modelo de Neuber, ao se variar a geometria e as propriedades mecânicas com a mudança de processamento do parafuso, tendo como referência a curva de encruamento apresentada na Figura 5.9. A geometria A foi a primeira proposta com o objetivo de eliminação da redução de diâmetro abrupta ao longo do corpo do parafuso (Figura 5.15). A geometria B foi a segunda proposta com o objetivo de redução do fator de concentração de tensão com o aumento do raio de concordância dos filetes (Figuras 5.16 e 5.17).

Pode-se observar que para a Geometria B, mantendo-se o atual processo de produção do parafuso *Tirefond* a redução dos fatores de concentração de tensão é drástica comparada com a condição atual desse componente. E com a aplicação de até 25% de deformação a frio no aço ABNT1015 para produção do parafuso *Tirefond* com a geometria B, é possível obter alta resistência mecânica e baixo fator de concentração de tensão em relação às outras condições.

Tabela 5.2: Relação dos fatores de concentração de tensão de acordo a geometria e as propriedades mecânicas. Considerando:  $r$  = raio de concordância da rosca,  $t$  = profundidade do filete,  $p$  = distância entre dois filetes.

	Parafuso Atual	Geometria A			Geometria B		
		Sem Encruamento a Frio	15% de deformação a frio	25% de deformação a frio	Sem Encruamento a Frio	15% de deformação a frio	25% de deformação a frio
<b>Limite de Resistência (MPa)</b>	449	449	620	665	449	620	665
<b>t (mm)</b>	4	3	3	3	4	4	4
<b>r (mm)</b>	3	3	3	3	8	8	8
<b>P (mm)</b>	12	12	12	12	12	12	12
$\gamma$	0,80	0,83	0,83	0,83	0,75	0,75	0,75
<b>K<sub>t</sub></b>	3	2,83	2,83	2,83	2,22	2,22	2,22
<b>K<sub>f</sub></b>	2,88	2,73	2,75	2,77	2,18	2,19	2,20
<b>K<sub>f</sub>*</b>	6,3	5,97	6,03	6,06	4,77	4,80	4,81

## 5.5 Torque Máximo para Fixação

Durante a fixação do parafuso *Tirefond* por meio da “tirefonadeira”, um instrumento de pequeno porte, aplica-se um torque para fixação do *Tirefond* no dormente de madeira. Com isso, a partir do modelo matemático construído nas atuais condições geométrica e de propriedade mecânica do parafuso, foi proposto a análise do estado de tensão ao se aplicar um torque na cabeça do parafuso *Tirefond*.

Tendo em vista que o parafuso *Tirefond* atual apresenta limite de escoamento por torção de 268MPa, comocitado anteriormente a partir do ensaio de torção. Foi simulado com o auxílio do software Ansys a aplicação de um torque de 550N.m na cabeça do parafuso, e a distribuição de tensão de cisalhamento ao longo do *Tirefond* mostrou tensão máxima de 265MPa alocada nas

concordâncias dos filetes de rosca. Com isso, é possível determinar que com a aplicação de torque de 550N.m se tem em regiões do parafuso tensão de cisalhamento próximo ao limite de escoamento por torção do material, como mostra a Figura 5.18.

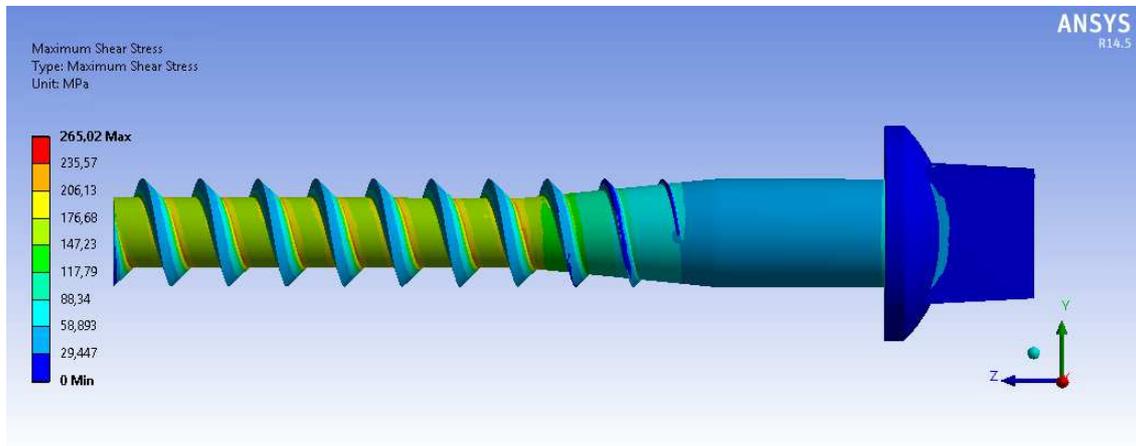


Figura 5.18: Estado de tensão do parafuso *Tirefond* solicitado com torque de 55kN determinado por meio simulação computacional pelo software Ansys 14.5.

Sendo assim, com base no torque máximo determinado no ensaio de torção sendo 575N.m, e por meio do simulador online sendo 538N.m citados no Capítulo 5.3, e por fim, pela simulação computacional sendo 550N.m, é possível determinar o torque máximo a ser aplicado no parafuso *Tirefond* de aproximadamente 540N.m.

## 6. Conclusão

O Parafuso *Tirefonda* atualmente é fabricado por forjamento e laminação a quente a partir de aço baixo carbono (ABNT1015) apresentando aproximadamente limite de escoamento de 262MPa, limite de resistência de 449MPa, alongamento 38% e redução de área 65%.

Para o aço e a geometria do atual parafuso *Tirefond*, foi verificado o fator de concentração de tensão  $K_t=3$  e  $K_f=6,3$  por causa da variação abrupta de secção presente principalmente na região da rosca, o que torna o parafuso susceptível a fratura a níveis de carregamento a que ele normalmente é submetido em serviço.

Foi possível verificar, por meio da simulação computacional do modelo tridimensional gerado da geometria atual do parafuso que a região com maiores magnitudes de tensão é próxima ao 2° filete da rosca, exatamente na região em que ocorre a maioria das fraturas do parafuso em campo.

Objetivando o aumento da vida útil do parafuso *Tirefond* foi apresentada a proposta de mudança da matéria-prima do *Tirefond* para aços médio carbono (ABNT1030 – 1045). Por meio da simulação, mostrou ser uma solução viável uma vez que o parafuso irá apresentar maior resistência mecânica. Porém, existe um limite no aumento do carbono do aço, afinal devido às solicitações cíclicas inerentes da via ferroviária o parafuso deve apresentar alta ductilidade, além de alta resistência mecânica.

E por meio da curva de encruamento construída para o aço ABNT1015 verificou-se que o processamento a frio traria ganho em propriedade mecânica por encruamento. Esta seria uma proposta inovadora de mudança de processo para fabricação de parafuso *Tirefond* com melhor desempenho. O encruamento determina elevados valores de resistência mecânica, porém o centro tende a ser mais tenaz, o que é importante no que diz respeito a nucleação e propagação de trinca por fadiga. Além disso, a conformação a frio é um processo de menor custo e com menor perda de material.

Quanto as propostas de variações geométricas, foi visto por meio de simulações computacionais que maior raio de concordância na região dos filetes da rosca, objetivando menor fator de concentração de tensão, viabiliza maior vida útil do parafuso *Tirefond*. O modelo tridimensional gerado para raio de concordância 8mm apresenta fator de concentração de tensão  $K_t$  de 2,22 e o  $K_f$  igual a 4,77. O resultado de distribuição de tensão da simulação computacional desse modelo de maior raio de concordância mostrou uma redução abrupta na magnitude de tensão distribuída ao longo do parafuso quando solicitado por tração.

Objetivando uma manutenção apropriada ao sistema de fixação das vias ferroviárias, foi visto que é necessário a aplicação de uma pré-carga de torção com a "Tirefonadeira" para a fixação do parafuso no trilho de no máximo 540N.m para que não ocorra deformação plástica do parafuso.

## 7. Sugestões para futuros trabalhos

- 1) Construir protótipos de parafuso *Tirefond* com raio de concordância maior por meio da conformação/laminação a frio da rosca. E seguir com a caracterização em campo e em laboratório.
- 2) Realizar simulação computacional para avaliação da vida em fadiga do componente em condições de propriedade mecânica e geometria diferentes.

## 8. Referência Bibliográfica

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT. Evolução do transporte ferroviário. 2014. Disponível em: <[http://ww.antt.gov.br/index.php/content/view/15884/Evolucao\\_do\\_Transporte\\_Ferrovioario.html](http://ww.antt.gov.br/index.php/content/view/15884/Evolucao_do_Transporte_Ferrovioario.html)> Acesso em: 01 fevereiro 2014.
- [2] ANSYS HELP, Software Ansys versão 14.5.
- [3] AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE OF WAY ASSOCIATION – AREMA. 2014. Disponível em: <[https://www.arema.org/arema\\_publications.aspx](https://www.arema.org/arema_publications.aspx)> Acesso em: 01 fevereiro 2014.
- [4] AL SHAER, A. Analyse des deformations permanentes des voies ferrees ballastees–approche dynamique. Tese de doutorado, Ecole Nationale de Ponts e Chaussees, 2005,147p.
- [5] ARSLAN, M. A. KAYABASA, O. 3-D Rail–Wheel contact analysis using FEA. Gebze Institute of Technology, Mechanical Engineering Department, 2012.
- [6] BRANCO, J. E. A segregação da infraestrutura como elemento reestruturador do sistema ferroviário de carga no Brasil. Tese de Doutorado - UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Transportes, 2008.
- [7] BRINA, H. L. Estrada de Ferro I. Belo Horizonte, Editora UFMG, 1988.
- [8] CASTAGNETTI, D. DRAGONI, E. Stress concentrations in periodic notches: a critical investigation of Neuber’s method. 2013.
- [9] CHASKALOVIC, J. Finite Element Methods for Engineering Sciences. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 267 pp, 2008.
- [10] ESVELD, C. Modern railway track. MRT Productions, 2001, 654p.
- [11] FENNER, R. T. Finite Element Methods for Engineers. Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine. London. 1996. 190pp.
- [12] FICI, R. P. As Ferrovias Brasileiras e a Expansão Recente para o Centro-Oeste. Programa de Pós-Graduação em Geografia Humana, USP, São Paulo, 2007.

- [13] FUTEK – Cálculo online de torque máximo para parafuso. Disponível em: <<http://www.futek.com/boltcalc.aspx?mode=metric>> Acesso em: 18 de março 2015.
- [14] GALVÃO, O. J. A. Desenvolvimento dos Transportes e Integração Regional no Brasil - Uma Integração Histórica. Planejamento e Políticas Públicas PPP, n. 13, jun. 1996, p. 184-211.
- [15] GLADMAN, T. The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels, School of Materials, University of Leeds, 2006.
- [16] GONTARZ, A., PATER, Z., WEROŃSKI, W. Head forging aspects of new forming process of screw spike. Journal of Materials Processing Technology, 153-154p, 2004.
- [17] ISO 898-1: Mechanical Properties of Fasteners made of Carbon Steel and Alloy Steel.
- [18] KATINSKY, J. R. Tecnologia e Industrialização. In: Ferrovias Nacionais, São Paulo: UNESP, 1994, cap.2, p.37-65.
- [19] KOMORI, K. Simulation of tensile test by node separation method. Journal Processing Technology, 125-126p, 2002.
- [20] LINCEVICIUS, M. G. Y. Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2001.
- [21] MAGALHÃES, P. SILVA, M. W. P., FILHO, E. D. Curso de Especialização em Engenharia Ferroviária. Programa de especialização de Engenharia Ferroviária, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- [22] NORTON, R. L. Machine Design. An Integrated approach, Third Edition, 2006.
- [23] NORMA NBR 8497. Metroferroviário (Tirafão), 2008.
- [24] NORMA ISO 898. Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel, 2013.
- [25] PATER, Z. GONTARZ, A. WEROŃSKI, W. New method of thread rolling. Journal of Materials Processing Technology, 2004, p. 722–728.
- [26] PATER, Z., TOFIL A. Experimental and theoretical analysis of the cross-wedge rolling process in cold forming conditions. Volume 52, 2007.

- [27] PILKEY, W. D. PILKEY, D. F. Stress Concentration Factors. Third Edition, 2008.
- [28] RUSSO, L. E. A. Contribuição ao processo de avaliação técnica e seleção dos componentes da grade ferroviária para a implantação em ferrovias de transporte de carga. Dissertação de Mestrado, Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2012.
- [29] SELIG, E. T., WATERS, J. M. Track geotechnology and substructures Management. Thomas Telford Services Ltd., Londres, 1994, p.446.
- [30] SILVA, L. F. M. Fundamentos teórico-experimentais da mecânica dos pavimentos ferroviários e esboço de um sistema de gerência aplicado à manutenção da via permanente. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- [31] WERONSKI, W. S, GONTARZ, A., PATER, Z. Forming process of screw spike in double configuration. VIII International Conference on Computational Plasticity, 2005.