

# SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM PARAFUSO TIREFOND VISANDO A MELHORIA DO SEU DESEMPENHO NAS FERROVIAS\*

Geraldo Lúcio de Faria<sup>1</sup>  
Leonardo Barbosa Godefroid<sup>2</sup>  
Luiz Cláudio Cândido<sup>3</sup>  
Thayene Oliveira Silott<sup>4</sup>

## Resumo

O parafuso Tirefond é um importante componente da via permanente ferroviária. Ele é um componente de fixação responsável por fixar a placa de apoio que, 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 de forma recorrente em serviço. Com o objetivo de entender os efeitos dos filetes do parafuso sobre o comportamento mecânico do componente, este trabalho apresenta um estudo sobre a susceptibilidade do parafuso à concentração de tensões sob carregamento estático. Análises químicas por espectrometria de emissão óptica, análises microestruturais por microscopia óptica, ensaios de tração e dureza foram realizados. Por meio da aplicação de modelos computacionais, foi possível determinar a distribuição de tensões ao longo do parafuso, assim como entender as principais causas destas falhas recorrentes. Fazendo-se uso de modelos matemáticos de mecânica de fratura, associados a simulações computacionais de carregamento estático, foram propostas modificações no projeto original do parafuso que prometem melhorar o seu desempenho em serviço.

**Palavras-chave:** Parafuso *Tirefond*; Distribuição de tensões; Simulação computacional.

## COMPUTATIONAL SIMULATION OF A SCREW SPIKE FOR RAILWAYS PERFORMANCE IMPROVEMENT

### Abstract

The Tirefond screw 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 Tirefond screw, this work present a study about the stress concentration susceptibility of this component. Chemical analysis were done in a optical emission spectrometry equipment; microstructural analysis were performed in optical microscope; tension and hardness tests were realized. Applying computational models, it was possible to determine the tension distribution along the actual geometry of the studied screw 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 Tirefond Screw original project, that promise to improve the screw performance in service.

**Keywords:** Tirefond screws; Tension distribution; Computational simulation.

- <sup>1</sup> Físico, Dr., Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.
- <sup>2</sup> Engenheiro Metalúrgico, Dr., Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.
- <sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico, Dr., Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.
- <sup>4</sup> Engenheira Metalúrgica, Mestranda, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da economia depende fortemente do desenvolvimento dos meios de transporte. Diminuição de custos e aumento de eficiência e confiabilidade nos transportes podem promover a expansão dos objetivos das operações de escoamento de mercadorias e aumentarem o nível de comércio nacional, internacional e conseqüentemente da competitividade [1].

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

Segundo Silva [2], um dos defeitos mais correntes na via permanente é o afrouxamento da fixação ou até a sua ruptura, sendo necessário o reaperto ou substituição de componentes. Muitos acidentes ferroviários relacionados ao descarrilamento podem apresentar como causa, a fixação em mau estado ou fixação insuficiente [2].

Na distribuição das causas dos acidentes no transporte ferroviário, 50% dos acidentes tem como causa a falha de componentes da via permanente, e os componentes de fixação, como os parafusos *Tirefond*, estão inseridos nesse contexto [3].

Com o aumento do fluxo de carga por eixo das composições ferroviárias nos últimos anos, a fratura de parafusos *Tirefond* tem se tornado um problema recorrente nas ferrovias Brasileiras. Alguns destes parafusos foram recolhidos quando fraturados em campo e pôde-se observar que, em geral, a região de ruptura do parafuso está localizada no 2º filete da rosca (Figura 1).



**Figura 1.** Fotografia de parafusos *Tirefond* fraturados em serviço.

Atualmente a produção do parafuso *Tirefond* é realizada a partir do forjamento e laminação a quente de barras de aço carbono SAE1015 atendendo a norma NBR 8497: 08/2008 [4] – Metroferroviário (Tirefão) que estabelece as condições e características para a fabricação, fornecimento e recebimento de matéria prima e aceitação do parafuso *Tirefond* [5]. Entretanto, mesmo obedecendo aos critérios da norma técnicas, as concessionárias de malhas ferroviárias no Brasil têm relatado o crescente aumento no número de ocorrência de falhas neste elemento de fixação.

Neste contexto, o presente trabalho, com o auxílio de simulação computacional e da caracterização química, metalúrgica e mecânica do parafuso *Tirefond* propõe melhorias no projeto de fabricação do componente visando o aumento da sua vida útil nas ferrovias, sem alterar a composição química do aço por questões de viabilidade econômica.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos procedimentos experimentais relacionados à caracterização estrutural, química e mecânica dos parafusos *Tirefond* foram recebidos alguns destes parafusos novos (Figura 2) provenientes do mesmo fornecedor que fabricou os componentes que vêm falhando em serviço.



Figura 2. Parafuso *Tirefond*.

A caracterização metalúrgica do estado de entrega foi realizada por meio da utilização de corpos de prova padronizados e produzidos a partir dos parafusos *Tirefond*. As análises realizadas consistiram em análise química por espectrometria óptica, análise microestrutural por microscopia óptica, ensaios de tração a temperatura ambiente e ensaios de encruamento (obtenção da curva de encruamento). Em seguida, visto a necessidade de se conhecer o estado de tensão ao longo do parafuso ao ser mecanicamente solicitado, foi aplicada a técnica de elementos finitos com o auxílio do software ANSYS 14.5. Todos os procedimentos foram executados nas instalações dos Laboratórios de Microscopia Óptica (LTM) e Ensaio Mecânicos do DEMET-EM-UFOP.

Os resultados de caracterização do parafuso *Tirefond* no estado de entrega foram utilizados como dados de entrada para o modelo computacional. Simulou-se então o estado de tensões do parafuso submetido a um carregamento estático normal de 15kN (carga máxima de operação) em três condições distintas de geometria: na atual (para entendimento das falhas recorrentes) e em duas novas propostas.

A metodologia aplicada na proposição das duas novas geometrias se baseou nos modelos de cálculo de fator de concentração de tensão propostos por Neubert [5, 6], que permite, a partir de dados de concentração de tensão calculados sob carregamento estático, determinar fatores de concentração de tensão sob fadiga, levando-se em consideração a sensibilidade do material à presença de concentradores de tensão. A determinação do fator de concentração de tensão ao se aplicar uma tensão normal, considerando uma geometria com apenas um único filete de rosca, é possível por meio da aplicação da Equação 1, onde  $t$  = altura do filete e  $r$  = raio de concordância do filete [5].

$$K_t = 1 + 2\sqrt{\frac{t}{r}} \quad (1)$$

No caso dos parafusos *Tirefond* tem-se uma sequência de filetes iguais e de mesmo espaçamento e neste caso, segundo modelos de mecânica de fratura, há um alívio de tensões. Aplicando-se o modelo de Neuber pôde-se determinar o fator de alívio de carga pela presença de múltiplos filetes ( $\gamma$ ) aplicando-se a Equação 2 para o estado de entrega e demais geometrias. Este fator é apresentado nos modelos como um fator de correção para cálculo da concentração de tensão geométrica ( $K_t$ )

em parafusos compostos por sequência de filetes, onde  $t$  = profundidade do filete;  $P$  = distância entre dois filetes [5-10].

$$\gamma = \left(\frac{P}{\pi t}\right) Tgh\left(\frac{\pi t}{P}\right) \quad (2)$$

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 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 [7-14].

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\frac{a}{r}}} \quad (3)$$

Além disso, o fator de concentração de tensão sob carregamento cíclico em parafusos que apresenta diferença no diâmetro ao longo da rosca é proposto por Neuber ( $K_f^*$ ). Por meio da Equação 4 este valor também foi determinado [7-14].

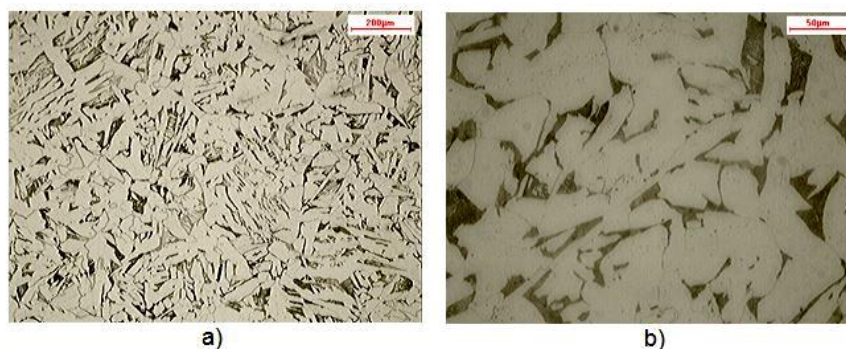
$$K_f^* = \left(\frac{D}{d}\right)^2 K_f \quad (4)$$

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta a composição química do aço utilizado na fabricação do parafuso. Pode-se observar que se trata de um aço carbono comum e que atende às especificações de um aço do tipo SAE1015. A análise microestrutural aponta que a amostra é constituída por ferrita e perlita. Os grãos de ferrita se apresentam de forma muito irregular, típico de um resfriamento relativamente rápido. A Figura 3 apresenta as micrografias do parafuso *Tirefond*.

**Tabela 1.** Composição química do parafuso *Tirefond* (%massa).

C	Mn	P	S	Si
0,141	0,503	0,016	0,024	0,117



**Figura 3.** Micrografias da seção longitudinal do parafuso *Tirefond* - Nital 2% a) 100x; b) 400x.

Por meio dos ensaios de tração realizados em corpos de prova usinados a partir do parafuso *Tirefond*, foram determinados o limite de escoamento, o limite de

resistência, a deformação total de engenharia e a redução de áreas que foram, respectivamente, 262MPa, 449MPa, 38% e 65%. Os dados de tensão e deformação de engenharia foram matematicamente tratados e calculou-se, ponto a ponto, a relação tensão real e deformação real. Estes foram os dados usados como referência no modelo matemático computacional.

A Figura 4 apresenta a curva de encruamento para o aço SAE1015 utilizado na fabricação do parafuso *Tirefond*. Pode-se observar que é possível aumentar os limites de escoamento e de resistência do aço por meio da deformação plástica do mesmo. Uma vez que este aço demonstra ter boa capacidade de encruamento, uma mudança no processo de fabricação pode ser viável. Uma substituição da laminação a quente dos filetes do parafuso por uma laminação a frio pode aumentar significativamente o limite de escoamento do aço na superfície do parafuso.

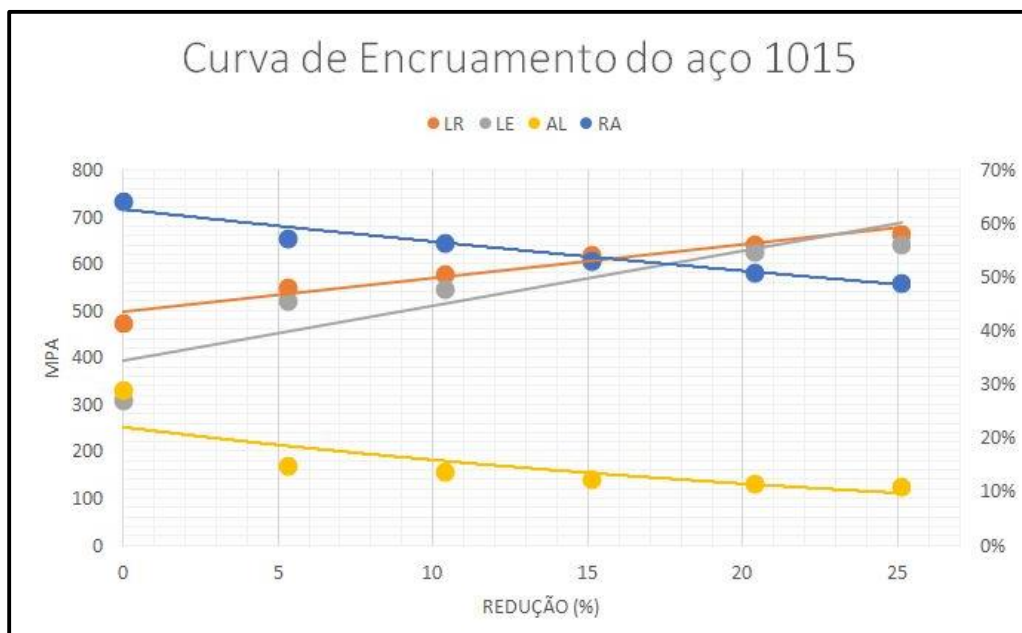


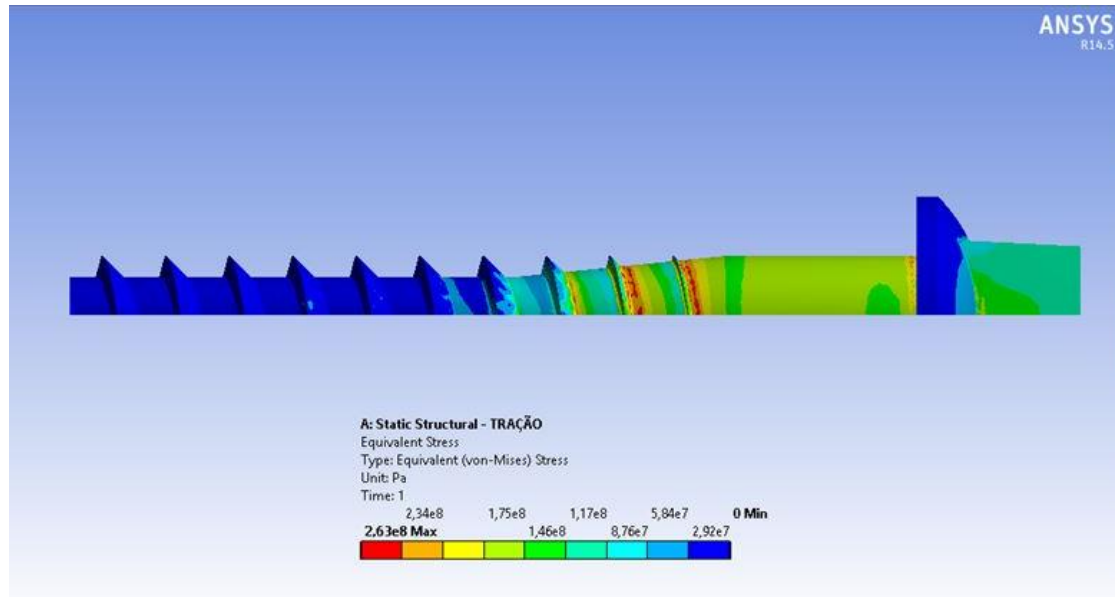
Figura 4. Curva de encruamento do aço SAE1015 utilizado na fabricação do parafuso *Tirefond*.

A partir do software Ansys foi gerada a geometria atual do parafuso *Tirefond* em que foi considerada  $\frac{1}{4}$  da simetria geométrica, seguida pela discretização em elementos hexaédricos. 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. Simulou-se uma força vertical de 15kN trativa aplicada na parte superior do parafuso. A determinação deste valor foi feita uma vez que a ordem de grandeza da tensão na interface placa de apoio e dormente é aproximadamente  $1200\text{N/cm}^2$  e com área de contato de  $500\text{cm}^2$  [8]. Uma vez que esta placa é aparafusada no dormente por quatro parafusos, supõe-se que um bom valor de força trativa que deva ser suportado pelo parafuso seja 15kN.

A Figura 5 apresenta a distribuição de tensões na atual geometria do parafuso calculada computacionalmente. Pode-se observar que para esta geometria os maiores valores de tensão foram determinados acima dos filetes da rosca, principalmente dos filetes próximos a cabeça do parafuso, onde a tensão máxima atinge 268MPa que é, por sua vez, superior ao limite de escoamento do aço utilizado na fabricação do parafuso (262MPa).

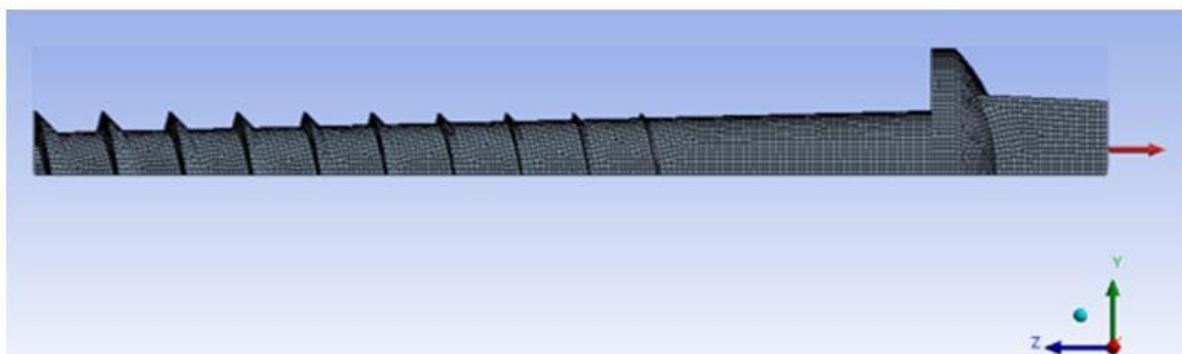
A região em que foi observada tensão de maior magnitude é exatamente a região de fratura recorrente da maioria das ocorrências de falha nos parafusos em campo,

como já apresentado na Figura 1. Pode-se afirmar que esta fratura esteja ocorrendo nesta região por sobrecarga ou por fadiga. Uma vez que um esforço trativo da ordem de 15kN, ou maior, é aplicado em um parafuso, localmente ele entra em regime de deformação plástica, pois o limite de escoamento do material na região do segundo filete é superado. Se os esforços forem dinâmicos, como acontece neste tipo de componente, esta região é propícia para a nucleação de trincas que vão crescer e levar o componente à fratura.



**Figura 5.** Estado de tensão na atual geometria do parafuso *Tirefond* quando solicitado por uma força de tração de 15kN na região da cabeça.

Após análise do estado de tensão da atual geometria do parafuso *Tirefond*, foi proposta uma primeira mudança de geometria. A primeira opção consistiu em eliminar a redução abrupta de diâmetro existente entre a região lisa e a dos filetes, tornando-a gradual. A Figura 6 Apresenta a primeira proposta e ilustra (seta vermelha) a simulação de aplicação de uma força trativa uniaxial de 15kN na cabeça do parafuso. A Figura 7 apresenta o resultado da simulação computacional, onde é possível observar que a maior tensão é de 263MPae também foi calculada para pontos situados acima dos filetes da rosca, próximos a cabeça do parafuso, não havendo mudança significativa no estado de tensão.



**Figura 6.** Discretização da primeira geometria proposta por elementos hexaédricos.

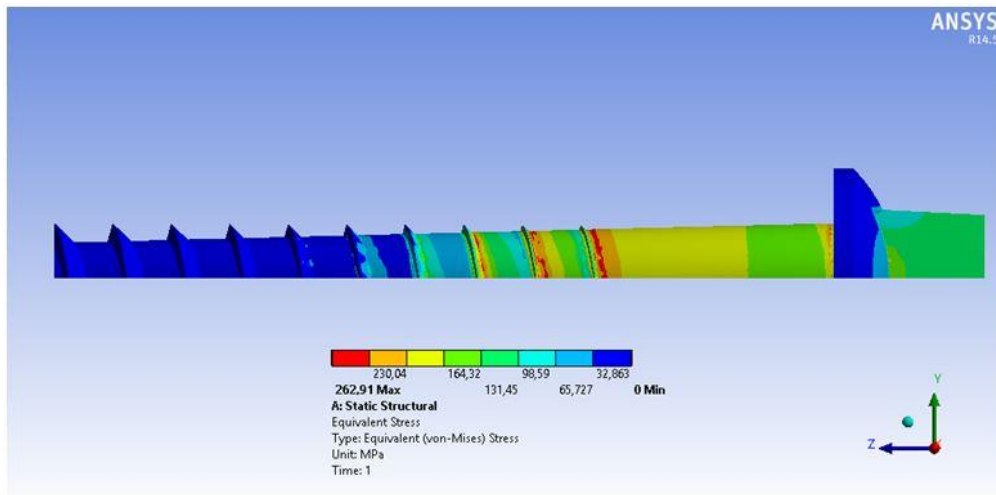
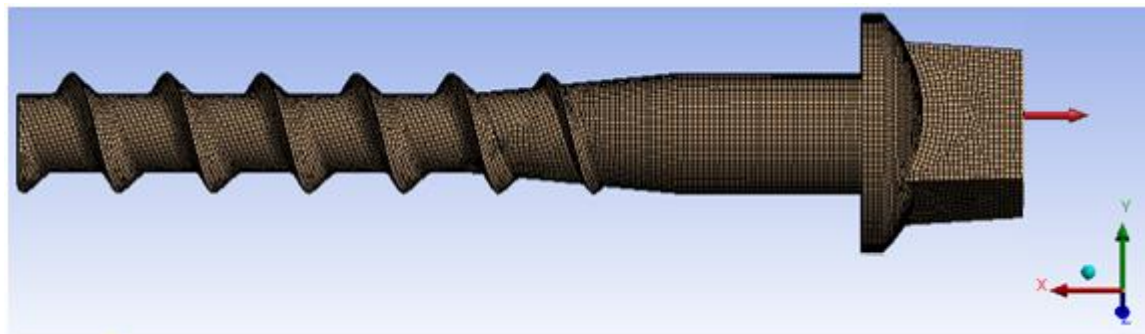


Figura 7. Estado de tensão da nova geometria proposta.

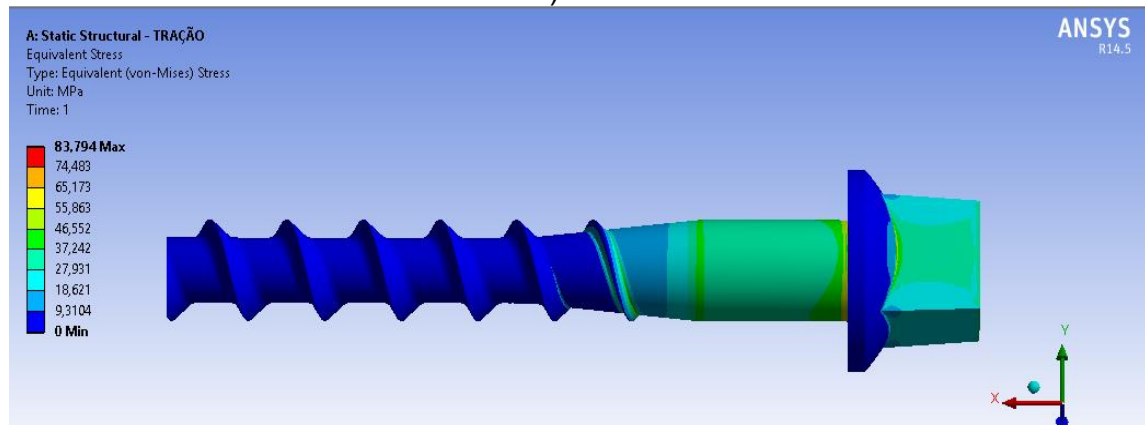
Usando como referência o modelo de Neuber, uma segunda mudança geométrica no parafuso *Tirefond* foi proposta com o objetivo de aumentar o raio de concordância superior dos filetes de rosca de 3mm para 8mm, pois, de acordo a Equação 3 quanto maior o raio menor será o fator de concentração de tensão. 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  $K_f^*=4,77$  [6].

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

Com relação à adequação das propriedades mecânicas do parafuso *Tirefond*, há a possibilidade de se aplicar um aço carbono com maior teor de carbono como, por exemplo, os aços SAE1030 – 1045 de maneira a manter um aço com alto limite de resistência e boa ductilidade para suportarem os severos concentradores de tensão existentes no projeto geométrico do parafuso. Há também a possibilidade de se aplicar um aço microligado, visando ganho tanto em resistência mecânica, como em ductilidade, porém o seu custo inviabilizaria a utilização na produção de parafusos *Tirefond*.



a)



b)

**Figura 8.** a) Discretização da segunda geometria proposta por elementos hexaédricos. b) Estado de tensão da segunda geometria proposta.

Além disso, como já discutido anteriormente, a fabricação do parafuso *Tirefond* pode ser modificada para processos de forjamento/laminação a frio que acarretará em aumento na resistência mecânica devido ao encruamento. Essa conformação a frio aumenta a vida em fadiga do componente uma vez que determina um estado de tensão de compressão na superfície do mesmo além de aumentar o limite de escoamento na superfície do parafuso, mantendo o núcleo relativamente dúctil.

Neste contexto, a Tabela 2 mostra a variação dos fatores de concentração de tensão, calculados pelo 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 4). A geometria A foi a primeira proposta com o objetivo de eliminação da redução de diâmetro abrupta ao longo do corpo do parafuso. 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.

Pode-se observar que para a Geometria B, mantendo-se o atual processo de produção do parafuso *Tirefond* a redução dos fatores de concentração é drástica comparada com a condição atual desse componente. E com a aplicação de até 25% de deformação a frio no aço SAE1015 para produção do parafuso *Tirefond* com a geometria B, é possível obter elevada resistência mecânica e baixo fator de concentração de tensão em relação às outras condições.



**Tabela 2.** Relação dos fatores de concentração de tensão de acordo a geometria e as propriedades mecânicas.

	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
$K_t$	3	2,83	2,83	2,83	2,22	2,22	2,22
$K_f$	2,88	2,73	2,75	2,77	2,18	2,19	2,20
$K_f^*$	6,3	5,97	6,03	6,06	4,77	4,80	4,81

#### 4 CONCLUSÕES

O parafuso Tirefond utilizado nas ferrovias e caracterizado neste trabalho é fabricado a partir da conformação mecânica a quente de um aço SAE1015. Sua microestrutura é heterogênea e constituída por ferrita e perlita.

A aplicação dos modelos computacionais se mostrou eficiente para a compreensão da causa das falhas recorrentes dos parafusos Tirefond. Pôde-se concluir que a geometria atual do componente associada ao seu nível de carregamento em serviço promove elevados valores de tensão nas bases dos filetes de rosca, principalmente na região do segundo filete, onde em um caso extremo, ultrapassa o limite de escoamento do aço SAE1015, levando-a a uma deformação plástica localizada que pode levá-lo a ruptura por sobrecarga ou fadiga.

A partir da aplicação do modelo de Neuber foi possível determinar os fatores de concentração de tensão nas bases dos filetes de rosca para diferentes geometrias de parafusos propostas. Foi possível propor uma geometria que reduz significativamente a tensão na base dos filetes por meio do aumento dos seus raios de concordância. Esta nova geometria poderá melhorar o desempenho do componente e evitar as falhas recorrentes sem a necessidade de substituição do aço SAE1015.

Em relação ao processo de fabricação, por meio das curvas de encruamento e dos cálculos dos fatores de concentração de tensão, pode-se afirmar que a laminação a frio do aço SAE1015 na confecção dos filetes de rosca do parafuso Tirefond implicaria no aumento dos limites de escoamento e resistência da superfície do componente por encruamento, melhorando ainda mais o seu desempenho. Destaca-se ainda que este processo seria economicamente vantajoso, uma vez que além de implicar em menor custo ele proporciona menor perda de matéria prima durante a fabricação.

## Agradecimentos

Agradecemos a CAPES pela bolsa de estudos para TOS em 2013, e a empresa VLI pelo apoio técnico e materiais, viabilizando assim a realização dessa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- 1 Fici RP. As Ferrovias Brasileiras e a Expansão Recente para o Centro-Oeste. [tese de doutorado]. São Paulo: Universidade Federal de São Paulo; 2007.
- 2 Silva LFM. Fundamentos teórico-experimentais da mecânica dos pavimentos ferroviários e esboço de um sistema de gerência aplicado à manutenção da via permanente [tese de doutorado]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2002.
- 3 Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT [página da internet]. Evolução do transporte ferroviário. [acesso em 01 fev. 2014]. Disponível em: <http://www.antt.gov.br>.
- 4 NBR 8497: Metroferroviário – Trefão. 2008.
- 5 Pilkey WD, Pilkey DF. Stress Concentration Factors. New Jersey: John Wiley & Sons; 2008.
- 6 Castagnetti D, Dragoni E. Stress concentrations in periodic notches: a critical investigation of Neuber's method. 2013; 5: 364-371.
- 7 Norton RL. Machine Design. An Integrated approach, New Jersey: Prentice Hall; 2006.
- 8 Esveld C. Modern railway track. MRT Productions, 2001; 654.
- 9 Majzoobi GH, Farrahi GH, Habibi N. Experimental Evaluation of the Effect of Thread Pitch on Fatigue Life of Bolts. International Journal of Fatigue. 2005; 27: 189-196.
- 10 Guo W, Shen H, Li H. Stress Intensity Factors for Elliptical Surface Cracks in Round Bars With Different Stress Coefficient. International Journal of Fatigue. 2003; 25: 733-741.
- 11 Neuber H. Theory of notch stress: Principles for Exact Calculation of Strength with Reference to Structure Form and Materials. WashigtonDC, USA: Office of technical Services, Department of commerce; 1964.
- 12 Meggioraro MA, Miranda ACQ, Castro JTP. Short Crack Threshold Estimates to Predict Notch Sensitivity Factors in Fatigue. International Journal of Fatigue. 2007; 29: 2022-2031.
- 13 Dragoni E. Effect of Thread Pitch on the Fatigue Strength of Steel Bolts. Proceedings Institution of Mechanical Engineers. 1997; 211: 591-600.
- 14 Dragoni E, Castagnetti D. Stress Concentrations in Periodic Notches: A Critical Investigation of Neuber's Method. Materials Science & Technology. 2013; 44: 364-371.