

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA MONTAGEM DE TALA AO TRILHO FERROVIÁRIO*

Sandro Griza¹
Abraão Santos Silva²
Thiago Figueiredo Azevedo³
Raphael Calazans Cardoso⁴
Rebeca Conceição da Silva Reis⁵

Resumo

Este estudo trata da simulação numérica por elementos finitos de um conjunto de trilhos, talas e parafusos de fixação, com o objetivo de verificar as tensões que ocorrem no conjunto, devido às cargas solicitadas e aplicadas nas condições de apoios estabelecidas pela norma NBR MB 3076/1989, além de duas condições de aperto dos parafusos: pré-carga de 50% da tensão de escoamento e 90% da tensão de escoamento do parafuso. Os resultados mostraram que o efeito de aperto do parafuso é mais significativo na distribuição de tensões do conjunto do que o efeito da carga externa. O aperto do parafuso a 50 e 90% do escoamento provocou maiores valores de tensões de Von Mises distribuídas tanto no parafuso quanto na tala, ultrapassando o escoamento dos materiais. É recomendável considerar que os menores valores de torque podem facilitar o desaperto da porca na prática, devido às passagens da roda sobre o conjunto.

Palavras-chave: Simulação numérica; Trilho ferroviário; Von Mises.

NUMERICAL SIMULATION OF RAIL SPLICE AND RAILWAY ASSEMBLY

Abstract

This study deals with the numerical simulation of the rails, rail splice and bolts assembly, in order to check the stresses that occur in the assembly due to the loads and boundary conditions established by the MB NBR 3076/1989 standard. Two bolt tightening conditions were studied: pre-load of 50% and 90% of the yield strength. The results showed that the bolt tightening effect is more significant in the stress distribution than the external load. The tightening in both 50 and 90% of the yield strength caused higher Von Mises stress in both the bolt and rail splice. The stresses were above the yield strength of the materials. It is recommended to consider that the lower torque values can facilitate the loosening of the nut in practice, due to the wheel passages.

Keywords: Numerical simulation; Railways; Von Mises.

¹ *Graduação em Engenharia Mecânica, Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais e) Doutorado, Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Professor adjunto, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.*

² *Graduação, Engenharia de Materiais, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.*

³ *Mestrando, Engenharia de Materiais, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.*

⁴ *Graduando, Engenharia Mecânica, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.*

⁵ *Graduanda, Engenharia de Materiais, Bolsista de Iniciação Científica, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A junção de trilhos ferroviários é um assunto de grande importância para garantir a integridade estrutural da via e evitar acidentes [1]. A junção pode ser de natureza metalúrgica, ou seja, através de soldagem, ou pode ser de natureza mecânica, através do uso de talas aparafusadas nas duas extremidades dos segmentos de trilhos. Um evento de destaque infeliz sobre esse assunto ocorreu em julho de 2013 na linha Brétigny-sur-Orge, França [2]. De acordo com evidências vistas no local do acidente, uma das prováveis causas do acidente foi a desmontagem de um dos parafusos de fixação da tala de junção dos trilhos.

A forma mais adequada de analisar a integridade estrutural de tais junções é através de testes de fadiga. Porém, a simulação numérica é uma técnica que permite verificar os resultados previstos dos testes físicos com adequada aproximação, com a vantagem de ser mais rápido e de menor custo de ensaio.

Este estudo trata da simulação numérica de um conjunto composto de trilhos, talas e parafusos de fixação, com o objetivo de verificar as tensões que ocorrem no conjunto devido à carga de 20 tons e de 30 tons aplicadas nas condições de apoios estabelecidas pela norma NBR MB 3076/1989 [3]. Foram simuladas também duas condições de aperto dos parafusos: pré-carga de 50% da tensão de escoamento e 90% da tensão de escoamento do parafuso. A partir destes valores de pré-carga, foram calculados os torques de aperto correspondentes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Construção do Modelo

Todos os sólidos foram construídos de acordo com os desenhos de projeto das peças. Os sólidos foram então importados para o programa de simulação Abaqus CAE 6.13, onde o conjunto foi montado (Figura 1).

2.2 Malha e Propriedades dos Materiais

As propriedades intrínsecas dos materiais, bem como o tipo de malha aplicada, número de elementos, quantidade de nós de cada malha estão apresentados na Tabela 1. O comportamento plástico foi atribuído ao parafuso e à tala ao se atingir a tensão de escoamento dos materiais (parafuso classe 8.8: tensão de escoamento de 800 MPa; tala: tensão de escoamento de 850 MPa). Foi considerado o comportamento plástico após escoamento através de um modelo de curva de escoamento linear de inclinação 0,15 (coeficiente de encruamento igual a 0,15), atingindo valor máximo de deformação de 8%. Para todas as superfícies em contato foi considerado coeficiente de atrito 0,15.

2.3 Condições de Contorno e de Carregamento

Devido à simetria, o modelo foi simulado a partir da interface de contato entre os dois segmentos de trilhos. Foram restringidas as faces das talas e dos trilhos nesta interface, de modo que elas tenham apenas um grau de liberdade de translação na direção axial (a mesma da aplicação da carga). Todos os demais graus de liberdade foram restringidos nesta interface. O conjunto foi biapoiado a uma distância entre apoios de 1200 mm. Além disso, foi simulada a condição de carregamento de quatro

pontos, sendo a distância entre os pontos de aplicação de 150 mm, e os cilindros de aplicação de carga de diâmetro de 20 mm. Estes parâmetros de carga e apoio foram conforme a norma NBR MB 3076/1989, reproduzidos na Figura 2.

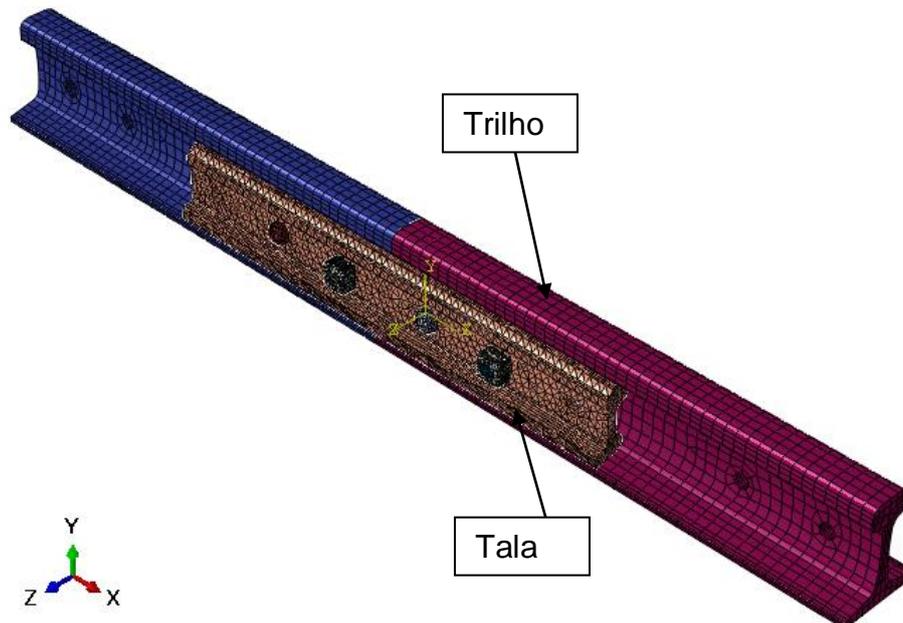


Figura 1. Conjunto trilhos/talas/parafusos de fixação montados para a simulação. A figura mostra a distribuição da malha nos elementos. No conjunto há duas talas, uma de cada lado da alma dos trilhos. Quatro parafusos são utilizados na montagem.

Tabela 1. Tipo de Malha e propriedades dos componentes

Componente	Tipo de Malha	Tipo de Elemento	Nº de nós	NºElementos	E (GPa)	Coefficiente de Poisson	σ_{esc} (MPa)
Parafuso	Tetragonal quadrático	C3D10	24658	11363	200	0,3	800
Tala	Tetragonal quadrático	C3D10	11870	6960	200	0,3	850
Trilho	Tetragonal quadrático	C3D10	19034	10825	200	0,3	-
Porca	Hexagonal quadrática	C3DR20	21737	4537	200	0,3	-

Nº= Número; E= Módulo de Elasticidade ; σ_{esc} = Tensão de Escoamento.

Foram consideradas duas pré-cargas de aperto dos parafusos: 50% (400 MPa) e 90% (720 MPa) da tensão de escoamento de parafuso classe 8.8. Para ambos os casos, a primeira etapa de carregamento foi a aplicação da carga de tração nos parafusos, correspondente a respectiva tensão de pré-carga. Em seguida, foi aplicada a mesma carga de compressão nas talas devido à reação de aperto das porcas. Esta carga de aperto foi aplicada sobre a superfície correspondente ao contato entre a base da porca e a tala.

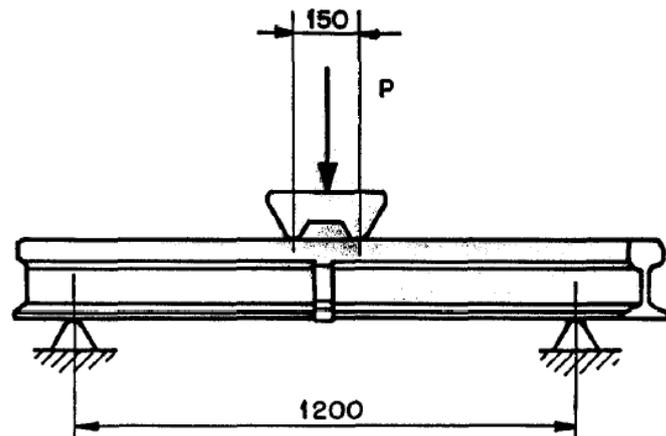


Figura 2. Reprodução das condições de apoio e carga, conforme a norma NBR MB 3076/1989.

A segunda etapa de carregamento foi a aplicação da carga axial em duas condições: 20 e 30 tons. A carga foi aplicada assim como apresentado na Figura 2. A carga foi aplicada sobre uma superfície de deformação elástica no boleto do trilho. A superfície de contato foi dimensionada através da teoria das tensões de Hertz [4], considerando as propriedades constitutivas do trilho e cilindro de aplicação de carga ($\nu = 0.3$; $E = 200$ GPa). Além disso, foi considerado o diâmetro do cilindro (d) de 20 mm e comprimento de contato (l) de 31 mm. Sendo assim, é possível obter a largura do contato (b), através da Equação 1.

$$b = \sqrt{\frac{4F}{\pi l} \frac{1-\nu}{E} \frac{1}{d}} \quad (1)$$

Através da Equação 1 foram obtidos os valores de (b), respectivamente, de 1,227 mm e 1,500 mm, para as cargas de 20 e 30 tons. A área de contato elástico é facilmente obtida pela multiplicação de (b) por (l), o comprimento de contato.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados das maiores tensões de Von Mises encontradas na simulação para as duas condições de pré-carga nos parafusos e para as duas cargas de flexão a 4 pontos nos trilhos. Os maiores valores de tensão nos parafusos ocorreram no primeiro filete (Figura 3). Os maiores valores de tensão nas talas ocorreram junto ao chanfro de 1 mm do furo mais próximo do plano de simetria da montagem. Foi simulado também o deslocamento axial da interface do trilho, que representa o deslocamento da linha elástica do trilho devido às cargas de flexão a 4 pontos.

Tabela 2. Resultados da simulação.

Carga (toneladas)	Pré-carga do parafuso (%)	Tensão de Von Mises na tala (MPa)	Tensão de Von Mises no parafuso (MPa)	Deslocamento (mm)
20	50	931	1022	0.75
20	90	1136	1052	0.75
30	50	977	1022	1.2
30	90	1129	1052	1.2

O torque teórico de aperto do parafuso (Equação 2) é calculado em função da pré-carga (F), do passo dos filetes (p), do coeficiente de atrito (γ), do diâmetro médio da rosca (d_u) e do diâmetro (d_2), que é obtido de acordo com a Equação 3, na qual (d) é o diâmetro nominal do parafuso [4].

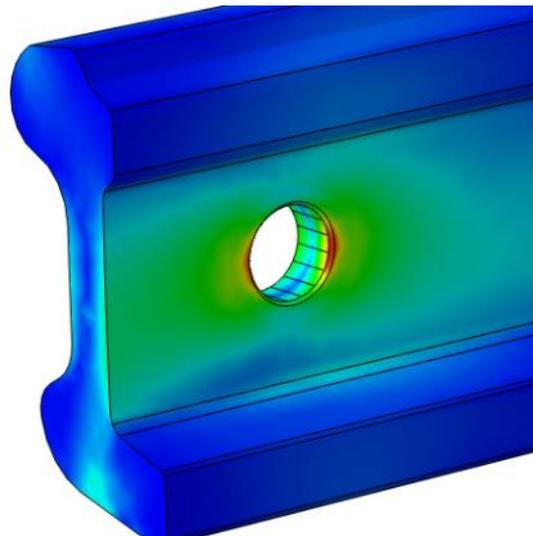
$$T = F [0,16p + 0,58\gamma d_2 + 0,5\gamma \cdot d_u] \quad (2)$$

$$d_2 = d - 0,645p \quad (3)$$

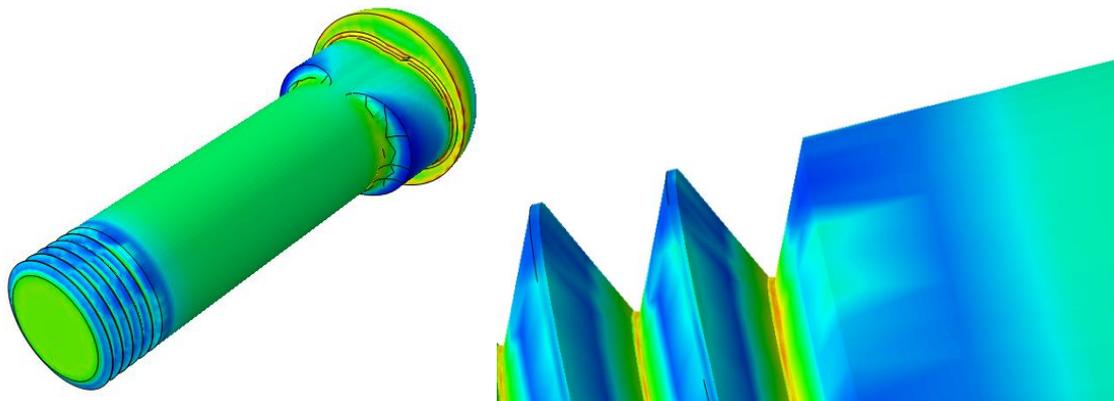
Os valores de torque encontrados foram, respectivamente, de 900 N.m (7.965 lbf.in) e 1620 N.m (14.338 lbf.in), para as pré-cargas de 50% e 90% da tensão de escoamento do parafuso.

Algumas das limitações mais importantes da simulação numérica devem ser destacadas. A simulação não considerou eventuais defeitos geométricos e de superfície das peças, que podem modificar as condições de contato e provocar modificações nas tensões resultantes. A simulação foi feita levando-se em conta modelos de curvas de escoamento. Para uma real correlação entre tensões e deformações no regime plástico, é preciso conhecer as curvas de escoamento dos materiais da tala e do parafuso. Entretanto, espera-se que os materiais de fabricação tanto da tala quanto do parafuso apresentem coeficiente de encruamento próximo de 0,15, assim como foi simulado. A simulação não considerou torção no parafuso, mas apenas a tensão de tração (pré-carga) devido ao aperto. A limitação aqui está relacionada ao desprezo da componente de tensão de torção no parafuso que produziria tensões de Von Mises superiores. Entretanto, para o cálculo do torque de aperto, basta conhecer a componente de tração no parafuso. A simulação também não considerou relaxações de tensão que podem ocorrer devido a deformações plásticas localizadas, como as que ocorrem nos filetes de parafusos sujeitos a elevadas pré-cargas e nas regiões de contato entre o parafuso/porca e a tala.

De acordo com os resultados do presente estudo, as tensões estáticas de Von Mises atingiram valores de escoamento dos materiais. A simulação de tensões no regime estático é uma técnica usual para prever as tensões que poderiam produzir a nucleação de falha por fadiga [5-8]. Os elevados valores de tensão causariam fadiga de baixo ciclo dos conjuntos e podem estar associados às limitações das condições de contorno utilizadas. Contudo, como as condições de contorno foram iguais para todas as simulações feitas, acredita-se que as comparações realizadas em relação às pré-cargas e cargas externas podem ser feitas.



(a)



(b)

Figura 3. Distribuição de tensões na tala em (a) e no parafuso em (b). Os tons avermelhados no fundo dos filetes e no chanfro da tala indicam maiores tensões.

4 CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que o efeito de aperto do parafuso é mais significativo na distribuição de tensões do conjunto do que o efeito da carga externa.

O aperto do parafuso a 90% do escoamento provocou maiores valores de tensões de Von Mises distribuídas tanto no parafuso quanto na tala. Estas tensões ultrapassam o escoamento dos materiais (vide Tabela 2). O aperto do parafuso a 50% do escoamento provocou menores tensões na tala e no parafuso.

Entretanto, as tensões encontradas para 50% do escoamento também foram elevadas, superando a tensão de escoamento dos materiais. Verificou-se, também, que o efeito da variação da carga de flexão foi pequeno na distribuição de tensões na tala, e não influenciou a distribuição de tensões no parafuso.

Menores valores de torque produziram menores tensões no conjunto sujeito à carga de flexão. No entanto, é recomendável considerar que os menores valores de torque podem facilitar o desaperto da porca na prática, devido às repetidas passagens da roda sobre o conjunto, sendo recomendável estudar a possibilidade de uso de

sistemas de travamento (porcas auto travantes ou porcas castelo), no caso da utilização de baixos torques.

Finalmente, para uma melhor avaliação da relação entre o torque de aperto e a pré-carga de tração imposta ao parafuso, sugere-se ensaios utilizando-se chave de torque apropriada e instrumentação dos parafusos (uso de strain gauges, por exemplo) para realizar montagens do conjunto real de trilhos, talas e parafusos, aplicando torques e controlando as pré-cargas correspondentes no parafuso. Além disso, recomendam-se ensaios de fadiga nos conjuntos utilizando-se diferentes torques de aperto dos parafusos.

Agradecimentos

Os autores agradecem as agências Capes, Cnpq e Finep.

REFERÊNCIAS

- 1 Li YD, Liu CB, Xu N, Wu XF, Guo WM, Shi JB. A failure study of the railway rail serviced for heavy cargo trains. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2013; 1(4):243–248.
- 2 British Broadcasting Corporation news(BBC). Deadly French train crash at Bretigny-sur-Orge [2013]. Disponível em: <<http://www.bbc.com/news/world-europe-23294630>>; acesso em 25/03/2015.
- 3 Shigley JE; Mischke CR, Budynas RG. Projeto de engenharia mecânica. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- 4 Griza S, da Silva MEG, dos Santos SV, Pizzio E, Strohaecker TR, The effect of bolt length in the fatigue strength of M24_3 bolt studs. *Engineering Failure Analysis* .2013; 34: 397–406.
- 5 Sandro Griza, Thiago Figueiredo Azevedo, Silvando V. dos Santos, Eduardo K. Tentardini, Telmo R. Strohaecker, Metallurgical failure analysis of acetabular metal-backed screws, *Engineering Failure Analysis* 32 (2013) 178–187.
- 6 Thiago Figueiredo Azevedo, Cristiane Ramos dos Santos, Ricardo Estefany Aquino de Souza, Eduardo Kirinus Tentardini, Sandro Griza, Failure analysis of the repair procedure of an ore compactor roll, *Engineering Failure Analysis* 31 (2013) 195–202.
- 7 Sandro Griza, Antônio Pereira Santos, Thiago Figueiredo Azevedo, Carlos Eduardo Fortis Kwietniewski, Afonso Reguly, Telmo R. Strohaecker, Failure analysis of a petrochemical plant reducing gear, *Engineering Failure Analysis* 29 (2013) 56–61.
- 8 Sandro Griza, Silvando Vieira dos Santos, Marcelo Massayoshi Ueki, Fabiano Bertoni, Telmo Roberto Strohaecker, Case study and analysis of a fatigue failure in a THA stem, *Engineering Failure Analysis* 28 (2013) 166–175.