



APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM CARREGAMENTO COMBINADO NA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

Marcio Linzmeyer, linzsec01@gmail.com

Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Joinville – SC
Norberto Eduardo Wheirhermann, 230, 89288 – 385, São Bento do Sul – SC

Diego Alves de Miranda, diegoalves_klx@hotmail.com

Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Joinville – SC
Norberto Eduardo Wheirhermann, 230, 89288 – 385, São Bento do Sul – SC

André Lourenço Nogueira, nogueira.a.l@hotmail.com

Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Joinville – SC
Rua Paulo Malschitzki, 10, 89219 – 710, Joinville – SC

Resumo. A aplicação de simulação de engenharia em mecânica dos sólidos é importante para formação e adaptação de projetos de estruturas. O carregamento de forças combinadas proporciona um acúmulo de tensões internas que se não forem avaliadas em escala infinitesimal podem ocasionar graves falhas e fraturas de materiais sólidos. Este trabalho apresenta uma análise numérica por meio da simulação da resistência de um componente de máquina. Este componente possui geometria complexa e apresentou falha quando submetido aos carregamentos combinados da máquina, causando tensões de cisalhamento em partes específicas da geometria. Esta peça foi remodelada em CAD e reforçada geometricamente nos pontos críticos de acúmulo de tensões, na qual houve o rompimento. O objetivo deste trabalho investigar e determinar a real causa do problema, simulando os esforços da máquina sobre a peça por meio do software Inventor e utilizando o “Método dos Elementos Finitos”. As soluções numéricas extraídas destas simulações demonstraram-se eficientes e satisfatórias para otimizar futuras geometrias de produto e de equipamento.

Palavras chave: Acúmulo de tensões. Carregamento combinado. Método dos elementos finitos. Simulação numérica.

1. INTRODUÇÃO

A simulação e análise numérica bem como a utilização do método dos elementos finitos vêm se mostrando cada vez mais viável na solução de problemas. Segundo Miranda e Nogueira (2017), estes problemas não estão somente relacionados a engenharia, mas também em outras áreas como a Medicina. Um exemplo, existem pesquisas que executam a remodelação óssea, que é um processo pelo qual o tecido ósseo é renovado ao longo da vida, por meio da substituição do tecido danificado e velho por um novo e saudável, a simulação deste processo pode ser realizada por meio de métodos numéricos computacionais (DICATI *et al.*, 2017). Outro exemplo bem sucedido foi a utilização de uma malha de elementos finitos para a discretização de um fêmur humano (BAHIA *et al.*, 2017).

Outro estudo recente apresenta a criação de uma malha tridimensional automática para o primeiro molar humano, exposto à força de mastigação, neste estudo considera-se que ele foi restaurado (JUNIOR e MERCURI, 2017). O método dos elementos finitos permite ajustar o refinamento da malha dando ao projeto uma solução mais precisa e segura, pois cada vez mais a previsão adequada da segurança estrutural, vem sendo demandada em projetos (RODRIGUES e NOGUEIRA, 2017). A implantação destes tipos de simulações também são aplicadas no setor de transporte aéreo, principalmente nos pavimentos aeroportuários, no qual existe uma crescente evolução das aeronaves, no que diz respeito ao tamanho e capacidade de carga, o método de elementos finitos contribui para a melhor compreensão e entendimento do comportamento estrutural em pavimentos aeroportuários (REZENDE *et al.*, 2017).

Na maioria das vezes, estas estruturas possuem geometrias complexas e estão sujeitas a vários tipos de cargas simultaneamente, e o resultado é o método da superposição, se aplicável, pode ser usado para determinar a distribuição da tensão resultante provocada pelas cargas (HIBBELER, 2010). A combinação de cargas em que as estruturas estão sujeitas, são diversificadas e a rigidez da estrutura completa depende da rigidez de cada um de seus elementos. Isto implica que o sucesso na solução de cálculos estruturais, está na capacidade do engenheiro mecânico, em entender a natureza física do fenômeno que se propõe a resolver (FILHO, 2000; FILHO, 2007; MIRANDA, 2018b). Segundo os critérios de falha de Rankine ou Coulomb, um material frágil falhará quando uma das tensões principais atuantes no material atingir um valor limite igual a tensão normal última que o material resiste, quando sujeito a uma tração simples (HIBBELER, 2017; FONSECA, 2017).

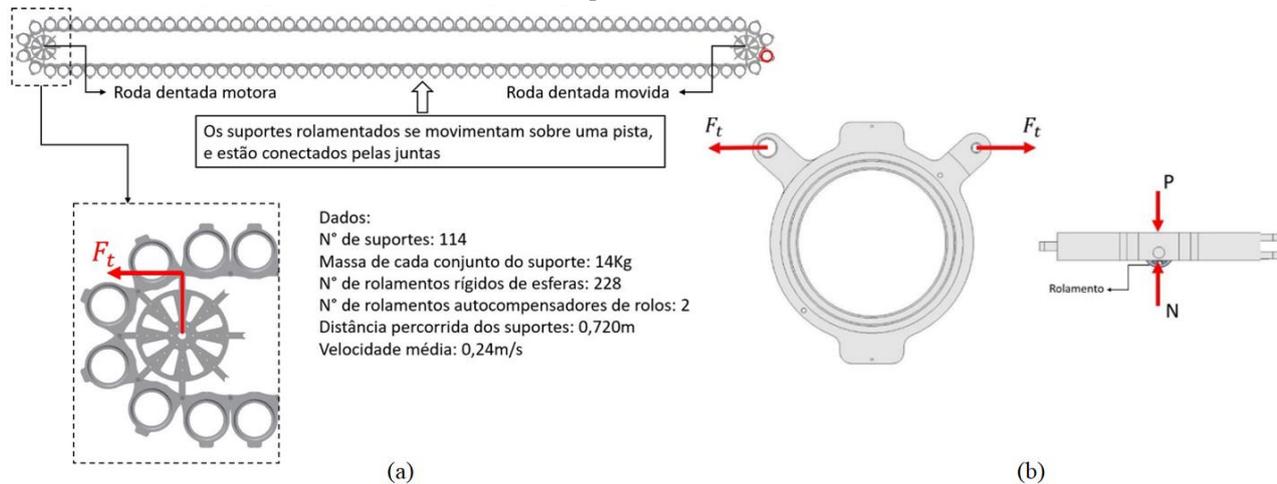
Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise numérica por meio da simulação da resistência de materiais, discretizando uma peça sólida com carregamento combinado, fazendo uso do método de elementos finitos (MEF). Um procedimento padrão será adotado, para a idealização do sistema como um todo, de maneira a proporcionar

a melhor forma possível de retratar os fenômenos que ocorrem. Com base nos dados obtidos da simulação espera-se determinar as regiões de maiores tensões proporcionando a correção geométrica do modelo estudado.

2. METODOLOGIA

Seguindo o esquema da sequência de aplicação do MEF, as etapas que se seguem, servirão de referência para a execução do MEF. O diagrama de corpo livre (DCL) é uma prática fundamental para o Engenheiro entender os fenômenos mecânicos que ocorrem em um sistema, ilustrando o mesmo como um desenho (TAVARES e PADILHA, 1998). Na Fig. 1, pode-se observar em detalhes a representação do sistema de movimentação de suportes.

Figura 1. Representação do sistema de movimentação de suportes. a) Detalhe do engrenamento das peças. b) Diagrama de corpo livre. (Primária, 2019).



A Fig. 1.a. mostra com detalhes o conjunto mecânico o qual compõe o sistema e os dados de operação do mesmo. O movimento deste se assemelha ao movimento de uma corrente de transmissão de potência, onde, neste caso, os suportes são rolamentados e possuem uma forma diferenciada, conforme mostra o (DCL) da Fig. 1.b. O DCL apresenta uma condição de carga combinada contendo deste modo duas componentes de forças de tração (F_t) agindo em direções opostas, e também a força peso (P) em equilíbrio com a força normal (N).

2.1. Cálculo da força

Para determinar a força que atua sobre o modelo estudado, utilizou-se as seguintes equações (HALLIDAY, 2018). Equação básica do movimento com aceleração constante.

$$x - x_0 = V_0 t + \frac{at^2}{2} \quad (1)$$

Momento de atrito para rolamento rígido de esferas e para o rolamento auto compensador de rolos (SKF, 2019):

$$M = 0,5 \cdot \mu \cdot P \cdot d \quad (2)$$

Força de tração no Suporte é dada pela segunda lei de Newton (HALLIDAY, 2018) considerando a força de atrito nos rolamentos.

$$F - F_a = m \cdot a \quad (3)$$

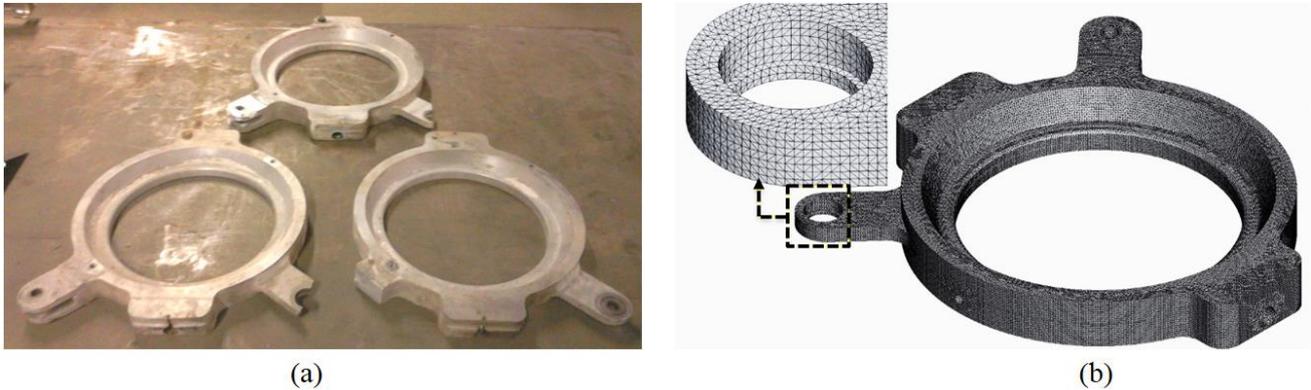
2.2. Condições de contorno

Nesta etapa da simulação foi atribuído o tipo de elemento finito e o material. Para o presente estudo, utilizou-se elementos tetraédricos de quatro nós para discretização do modelo, devido a limitação do software em permitir apenas trabalhar com este tipo de elemento. Contudo, Miranda (2018a) demonstrou que os elementos tetraédricos são bem eficientes nas simulações quando bem refinados. Ainda nesta fase foi necessário atribuir aos parâmetros de simulação, o tipo de material que foi empregado para concepção da peça, e suas respectivas características físicas e mecânicas. As informações do material SAE 329 utilizadas para alimentar o software foram a densidade de $2,75 \text{ g/cm}^3$, resistência a tração de 17 kgf/mm^2 e módulo de elasticidade de 69 GPa .

A malha é uma das principais características do MEF, pois a partir dela pode-se definir o nível de precisão que se deseja obter os resultados, de modo que aplicando o refinamento, a taxa de convergência dos resultados venha se tornando cada vez menor (MATOS e MIRANDA, 2019; RODRIGUES e MIRANDA, 2019). A malha de elementos finitos foi

gerada e refinada com base na análise de convergência. Comprovando que novas mudanças no refinamento não influenciem mais os resultados. A Fig. 3 demonstra o modelo original deste estudo e a malha aplicada ao modelo estudado.

Figura 2. Modelo do estudo (suporte). a) Peça de alumínio. b) Criação da malha. (Primária, 2019).



Na Fig. 2.a. é possível observar o elo no qual ocorrem as falhas (fratura frágil) pela aplicação das forças tracionadas. A Fig. 2.b mostra em um detalhe ampliado no aspecto da malha gerada por computador. Pode-se observar que a malha foi criada de maneira bem distribuída sem que haja grandes diferenças entre os elementos tetraédricos, isto torna a malha bem definida em seus contornos. Outra particularidade, é que o detalhe mostrado se encontra justamente na parte crítica da peça, a maior incidência de falhas registrada ocorrera nesta parte da peça, como mostra o detalhe pontilhado. É bom destacar que na peça deste estudo foram geradas 1.756.201 elementos e 1.229.901 nós.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa do método efetuou-se a interpretação dos resultados numéricos e também avaliou-se sua coerência com o problema físico estudado, onde observou-se as principais tensões e deslocamentos do material.

3.1. Cálculo da força

Para descobrir qual a força de tração que exerce sobre os engates do suporte utilizou-se a segunda Lei de Newton considerando as forças de atritos decorrentes dos rolamentos, utilizando a Equação 1 pode-se calcular o valor da aceleração uma vez iniciado o movimento do Suporte.

$$x - x_0 = V_0 t + \frac{at^2}{2} \Rightarrow 0,720 - 0 = 0,3 + \frac{a3^2}{2} \Rightarrow a = 0,16m/s^2$$

Os momentos de atrito dos rolamentos foram determinados pela Equação 2.

$$M = 0,5 . \mu . P . d \Rightarrow M = 0,5 . 0,0015 . \left[\left(\frac{14}{2} \right) . 9,81 \right] . 0,020 \Rightarrow M = 0,001030 N.m$$

Como são dois rolamentos presentes no Suporte, tem-se:

$$M = 0,001030 . 2 = 0,002060 N.m$$

Considerou-se ainda o cálculo do momento de atrito no rolamento auto compensador de rolos, devido a sua carga axial elevada, pois é este rolamento que suporta o peso da roda dentada movida.

$$M = 0,5 . \mu . P . d \Rightarrow M = 0,5 . 0,0018 . (84,9,81) . 0,060 \Rightarrow M = 0,04449 N.m$$

Portanto a força de tração (Ft) necessária para tracionar um suporte, considerando o momento de atrito calculado na Equação 3 é:

$$F - F_a = m . a \Rightarrow F - (0,002060) = 14 . 0,16 \Rightarrow F = 2,24206 N$$

No entanto existem 114 suportes conectados entre si no sistema, e considerando o momento de atrito do rolamento auto compensador existente na roda dentada movida, a força necessária para tracionar todos eles, se dá pela seguinte equação:

$$F = (2,24206 . 114) + 0,04449 \Rightarrow F = 255,63 N$$

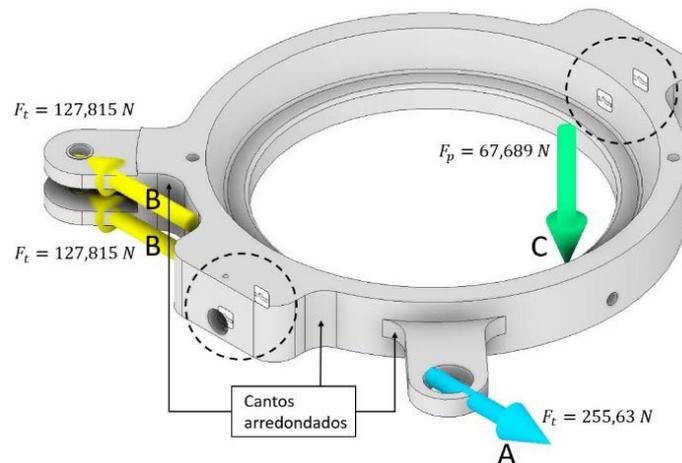
3.2 Condições de contorno

O modelo do suporte foi projetado com cantos arredondados, no intuito de reforçar estas regiões da peça, esta medida favoreceu sua estrutura a suportar as solicitações nestas regiões, a Fig. 3 comprova a veracidade destas medidas pois dos três suportes nenhum sofreu falha nos cantos conforme indicado na Fig. 2.a. As restrições são parâmetros fundamentais para que a simulação tenha êxito, pois restringem o movimento da malha nas áreas da peça que forem selecionadas (Fases engastadas), os dois círculos tracejados indicam a localização dos furos em que são montados os eixos com os rolamentos,

a área cilíndrica destes furos foi selecionada como sendo áreas de engaste, isto quer dizer que toda a área restante do modelo está submetido aos deslocamentos.

O vetor (A) indica uma componente de força de tração de 255,63 N neste engaste, por outro lado os vetores (B) representam componentes de força oposta de 127,815 N cada uma, em que a soma delas resulta em 255,63 N, ou seja, a mesma força da componente (A), implicando um equilíbrio entre as forças de tração no suporte.

Figura 3. Representação das regiões solicitadas e com restrições. (Primária, 2019).

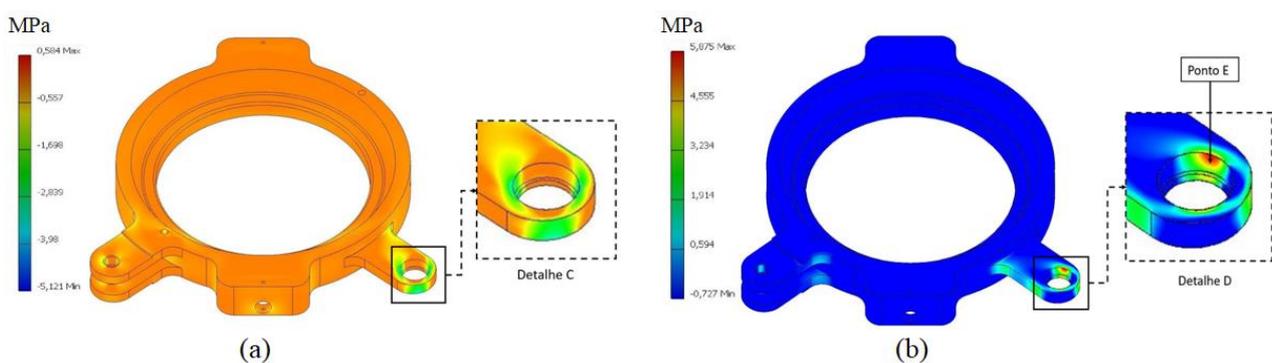


O vetor (C) indica que um carregamento está sendo imposto sobre a peça que neste caso, representa o peso de uma forma de gesso com 67,689 N e também está em equilíbrio com força normal oposta.

3.3 Análise numérica

Segundo Hibbeler (2010) uma estrutura ou corpo sólido sujeito a vários tipos de carregamentos, forças axiais, cisalhamento, torções e carregamento de flexão, logo, produzem esforços que ao se combinarem resultam em uma única força resultante. Este fenômeno pode ser observado na Fig. 4.a.

Figura 4. Resultados das simulações no suporte. a) Suporte sob tensões de Compressão. b) Suporte sob tensões de Tração. (Primária, 2019).



Observando a Fig. 4.a. o detalhe C indica resultantes das tensões de compressão máximas entre -1,698 MPa e -2,839 MPa, e estão situadas no engaste simples do Suporte, considerado o ponto crítico da peça, e nas demais áreas da peça não se observa grandes transformações nas tensões. A Fig. 4.b. por outro lado mostra a solução para as tensões de tração na peça, novamente podemos observar claramente que a região de maior solicitação se encontra no engaste simples da peça. Porém nesta análise, verificou-se na região do furo no engaste simples o ponto E do detalhe D na Fig. 4.b. um estado de máxima tensão naquele ponto o equivalente à 5,875 MPa segundo a escala ao lado da Figura. Comparou-se novamente com a Fig. 2.a. e constatou-se coerência com a falha ocorrida na peça física. Pois pode-se visualizar na Fig. 2.a que o material se rompeu exatamente no ponto E indicado na Fig. 4.b., no entanto, o material utilizado para a produção desta peça têm uma resistência a tração de 147 Mpa, o que diverge da condição de falha de Rankine ou Coulomb.

4. CONCLUSÕES

Com os resultados deste estudo chegou-se a uma conclusão satisfatória de demonstrar que nem sempre as causas de um problema em uma máquina são devido aos materiais que compõe uma peça, pois, a integridade física e mecânica dos mesmos depende também da maneira como são montados e ajustados. Relatou-se aqui também a presença de influências não consideradas nesta análise aplicando o MEF, como as variações de temperatura e impurezas, outra questão importante é a inexistência da condição de equilíbrio entre as forças, que poderia ter causado folgas no sistema e conseqüentemente as quebras dos Suportes.

Há ainda outros fatores presentes no ambiente de operação do sistema de movimentação de Suportes, como por exemplo variações na temperatura, impurezas entre os engates do Suporte que podem sim influenciar o desempenho e a resistência do material nestas condições adversas. Como as tensões geradas no material não chegam nem perto da tensão de ruptura do mesmo, não há a possibilidade de o material se romper operando em condições ideais no sistema. Entretanto a Fig. 2.a. revelara o quanto as falhas que divergem das causas que poderiam ocorrer segundo os critérios de falha no material antes mencionados.

5. REFERÊNCIAS

- Bahia, M.T., Hecke, M.B., Mercuri, E.G.F. 2017. Remodelamento Ósseo Baseado na Dinâmica de Populações Celulares com Ação de Agente Antireabsortivo. *II Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia*. Curitiba, Brasil.
- Dicati, G.W.O., Pereira, G.J.T., Soffiatti, B.B., Pereira, J.T. 2017. Avaliação da Remodelação Óssea Utilizando Elemento Finito Tetraédrico Linear ou Quadrilátero para Discretização do Modelo Sólido. *II Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia*. Curitiba, Brasil.
- Filho, A.A. 2000. *Elementos Finitos a Base da Tecnologia CAE*. Èrica. São Paulo, 4ª Edição.
- Filho, L.F.L.M. 2007. *Análise Estrutural e Verificação da Vida à Fadiga de uma Roda Automotiva Utilizando o Método dos Elementos Finitos*. Trabalho de Conclusão de Curso. EPUSP, São Paulo.
- Fonseca, W.D.P., Filho, L.M.S., Martins, G.V. 2017. Análise Numérica do Escoamento e dos Coeficientes Aerodinâmicos em Aerofólios sem e com a Utilização de Flaps Plain. *Acta Tecnológica*. v12, n1, p45-62.
- Halliday, D. *Fundamentos de Física*. 2008. LTC. Rio de Janeiro, 8ª edição.
- Hibbeler, R.C. *Resistência dos Materiais*. 2010. Pearson Prentice Hall. São Paulo, 7ª edição.
- Junior, C.A., Mercuri, E.G.F. Estudo de Convergência de Malha para Modelo Representativo de Molar Submetido a Cargas de Mastigação. 2017. *II Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia*. Curitiba, Brasil.
- Matos, G.F., Miranda, D.A. 2019. Numerical Analysis of the Physical Properties of the Flow of Molten Polymers in Grooved Profiles. *Open Access Library Journal*. v6, n1, p5178.
- Miranda, D.A., Nogueira, A.L. 2017. Influência dos Parâmetros de Processo e da Presença de Saídas de Gases na Eficiência de Moldes de Injeção de Peças em Poliestireno Cristal. 14º Congresso Brasileiro de polímeros – CBPOL. Águas de Lindoia, Brasil.
- Miranda, D.A. 2018a. Influence of Mesh Geometry and Mesh Refinement on Mathematical Models of Thermoplastic Injection Simulation Tools. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. v15, n3, p38-44.
- Miranda, D.A. 2018b. Análise Isotérmica de Fluidos Newtonianos em Dutos Retangulares com Escoamento Plenamente Desenvolvido. *III Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia*. Curitiba, Brasil
- Rezende, C.W.A., Vicentini, D.F., Arndt, M. 2017. Estudo Comparativo de Placa e Viga Apoiadas sobre Base Elástica Utilizando Elementos Finitos. *II Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia*. Curitiba, Brasil.
- Rodrigues, B.D.L., Nogueira, C.G. 2017. Aplicação de Um Modelo de Confiabilidade na Determinação da Probabilidade de Colapso de Uma Viga Hiperestática em Concreto Armado: Abordagem Conjunta via MEF Não Linear e FORM. *II Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia*. Curitiba, Brasil.
- Rodrigues, S., Miranda, D.A. 2019. Analysis of Thermal Conduction in the Machine Border Collapse: Numerical and Experimental Comparison. *Open Access Library Journal*. v6, n1, p5179.
- Tavares, J.M.R.S., Padilha, A.J. 1998. *Introdução ao Método dos Elementos Finitos*. INEB. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1ª Edição.
- SKF. 2019. Catálogo de Rolamentos de Esferas.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.