

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MOLAS HELICOIDAIS DE COMPRESSÃO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

STUDY OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF HELICAL COMPRESSION SPRINGS BY FINITE ELEMENT METHOD

Carlos Alberto Chaves¹ Fernando de Azevedo Silva²
Rafael Barbosa Silva³ Erick Siqueira Guidi⁴

Data de entrega dos originais à redação em: 02/05/2017
e recebido para diagramação em: 03/07/2018

O objetivo deste trabalho é compreender o comportamento mecânico de molas helicoidais de compressão quando submetidas a carregamentos monotônicos utilizando simulações numéricas através do emprego do método dos elementos finitos. Para atingir tal objetivo, utilizaram-se três molas comerciais com aplicações similares, porém diferentes dimensões. O primeiro passo foi a identificação das necessidades desse projeto. Dessa forma, identificou-se que, além das dimensões das molas de prova, seriam também necessárias propriedades referentes ao material das molas, bem como uma forma de comprovar os resultados obtidos nas simulações. Assim, após as medições, foram realizados os ensaios de compressão de cada uma das molas. A última etapa a ser apresentada tratou de analisar os dados obtidos nas simulações comparando com valores obtidos nos ensaios de compressão e também através de cálculos analíticos.

Palavras-chave: Molas Helicoidais de Compressão. Ensaio de Compressão Virtual. Método dos Elementos Finitos.

The objective of this work is to understand the mechanical behavior of helical compression springs when subjected to monotonic loads using numerical simulations using the finite element method. To achieve this objective, three commercial springs with similar applications, but different dimensions, were used. The first step was to identify the needs of this project. Thus, it was identified that, in addition to the dimensions of the test springs, properties related to the spring material would also be necessary, as well as a way to prove the results obtained in the simulations. Thus, after the measurements, the compression tests of each of the springs were carried out. The last step was to analyze the data obtained in the simulations comparing with values obtained in the compression tests and also through analytical calculations.

Keywords: Helical Compression Springs. Virtual Compression Test. Finite Element Method.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Arcanjo (2008), molas são elementos capazes de sofrer deformação elástica, armazenando energia potencial elástica. São então muito utilizados em elementos de máquinas pela sua capacidade de exercer força e fornecer flexibilidade, e para armazenar ou absorver energia.

Molas são projetadas para prover uma força de tração, compressão ou um torque ou principalmente armazenar energia potencial (SHIGLEY e MISCHKE, 1989).

É geralmente mais econômico para o projetista utilizar uma mola comercial de catálogo, se possível. Algumas vezes, contudo, a tarefa requer uma mola projetada segundo a necessidade do cliente. Essas molas podem desenvolver funções secundárias, tais como localização ou montagem de componentes. Em todo caso, o projetista deve entender, e utilizar apropriadamente, a teoria de molas a fim de que possa especificar ou projetar a peça (NORTON, 2004).

Para cada tipo de mola o carregamento é diferenciado, assim, as propriedades mecânicas exigidas nos materiais são diferentes, sendo necessárias

ligas metálicas específicas para cada aplicação. As propriedades mecânicas dos aços mola dependem de sua composição química e dos tratamentos térmicos subsequentes (ONO, KOYAMA, TANGE, 1982).

No atual mercado competitivo, as companhias precisam desenvolver produtos de alta qualidade, inclusive com elevada complexidade, desempenho e durabilidade em um curto espaço de tempo. Para atender a essa demanda de mercado, as companhias passaram a utilizar as ferramentas de análise computacional de engenharia, a fim de aperfeiçoar o projeto e ganhar competitividade (MARIM, 2009).

O ANSYS é um software comercial de elementos finitos que vem sendo utilizado nas mais diversas áreas de problemas de engenharia (WARHADPANDE, JALALAHMADI, SLACK e SADEGHI, 2010).

O estudo de novos materiais no desenvolvimento de molas, ainda é pouco difundido e explorado tanto no meio acadêmico como no meio industrial. Muitas descobertas e conclusões ainda podem ser obtidas com o estudo aprofundado de técnicas de obtenção de valores de propriedades mecânicas, numericamente e também experimentalmente.

1 - Universidade Estadual Paulista-FEG-UNESP. < cachaves@feg.unesp.br >.

2 - Universidade Estadual Paulista-FEG-UNESP. < fazevedo@feg.unesp.br >.

3 - Universidade Estadual Paulista-FEG-UNESP. < rafaelsilva@uol.com.br >.

4 - Universidade Estadual Paulista-FEG-UNESP. < eguidi@uol.com.br >.

Paula (2015) estudou o efeito do jateamento e a diferença de três modos distintos de jateamento no comportamento em fadiga de molas de material aço SAE 9254. Os resultados mostram que o jateamento pode aumentar de 3560 % a 15216% a vida em fadiga das molas, dependendo do método de jateamento empregado, essa diferença no resultado do teste de fadiga é resultado do estado de tensões residuais compressivas na superfície das molas. A análise também mostrou que o método de jateamento também influenciou no modo de falha das molas.

Calado (2011) estudou um tipo especial de mola de reação constante, designada Mola Y, de aço carbono AISI 1095, utilizada como uma alternativa viável aos atuais mecanismos de reação constante empregue na suspensão de tubagens aéreas. O método dos elementos finitos foi usado para modelar o comportamento à fadiga da mola em concordância com o ensaio experimental. Como resultado desta análise, sugeriu-se a aplicabilidade da Mola Y face aos atuais mecanismos de reação constante.

Silva (2016) estudou as condições de contorno e métodos para a previsão do comportamento de molas helicoidais de compressão visando estabelecer formas confiáveis de reproduzir, em ambiente computacional, molas de compressão de modo funcional, visando o estudo de suas diversas propriedades. Concluiu que o estudo comparativo, experimental e numérico, apresentou resultados próximos entre os tipos de análise, com fontes de desvio bem identificadas.

1.1 Objetivos

Assim, em função do que foi exposto, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento mecânico de molas helicoidais de compressão, por meio de comparações entre resultados, teóricos, experimentais e de simulação numéricas computacionais.

Para tal, o trabalho deverá determinar de forma confiável, através dos métodos disponíveis, os materiais utilizados na fabricação dos corpos de prova, e obter resultados confiáveis entre si, para que ao replicar as condições de contorno em ambiente computacional, ou em análise teórica, a variação das propriedades gere situações confiáveis para análise.

2 MÉTODO

A análise estrutural das molas helicoidais de compressão foi realizada com o auxílio do software comercial ANSYS, baseado no método dos elementos finitos. O foco das simulações das molas (corpos de prova) foi estabelecer uma análise realista do ensaio mecânico de compressão monotônica em ambiente virtual. Para tal, inicialmente foram modeladas as molas no software comercial SolidWorks e em seguida foi adaptado o ensaio real para a simulação utilizando o software ANSYS.

A metodologia seguida é a apresentada na sequência. Esse software é utilizado nas fases de construção do modelo e, posteriormente, como ferramenta para realização dos cálculos em função do modelo utilizado e dos dados a ele fornecidos.

2.1 Molas de prova

Para a realização dos estudos, foram utilizadas três molas de prova diferentes entre si, com o intuito de prover base de comparação. Trata-se de molas utilizadas em suspensão de bicicleta adquiridas sem maiores informações técnicas a respeito de sua fabricação ou especificações. Os corpos de prova são mostrados na Figura 1. As molas apresentam cores diferentes, sendo elas; cinza, amarela e vermelha. Para o estudo, serão nomeadas conforme as cores: mola cinza, mola amarela e mola vermelha.

Figura 1 - Molas de prova



Fonte: Autor

A Tabela 1 apresenta as características geométricas e os dados experimentais relacionados com a rigidez estrutural (k). Os dados apresentados são provenientes de ensaios mecânicos de compressão realizados nas molas estudadas utilizando uma máquina de ensaios universal Shimatzu no Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG - Unesp).

Tabela 1 - Molas helicoidais de compressão utilizadas

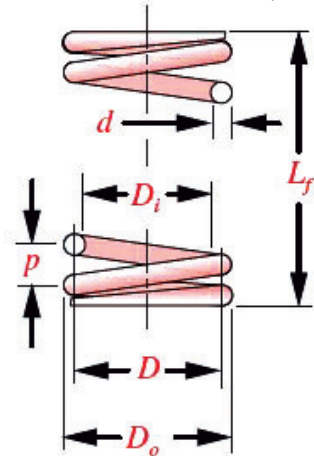
Parâmetros	Mola Cinza	Mola Amarela	Mola Vermelha
Diâmetro externo D_o (mm)	9,92	19,08	18,91
Diâmetro interno D_i (mm)	13,08	11,79	11,16
Comprimento livre L_f (mm)	94,35	93,52	96,31
Comprimento sólido L_s (mm)	61,35	59,08	73,01
Diâmetro do fio d (mm)	3,55	3,46	3,87
Passo p (mm)	6,17	6,67	5,82
Rigidez k (N/mm)	19,233	29,578	39,755

Fonte: Autor.

Na Figura 2 os principais parâmetros relacionados com a modelagem geométrica das molas são mostrados. Sendo:

- D_o : Diâmetro nominal externo das espiras da mola;
- D : Diâmetro nominal médio das espiras da mola;
- D_i : Diâmetro nominal interno das espiras da mola;
- p : Passo da mola;
- d : Diâmetro nominal do fio;
- L_f : Comprimento livre da mola.

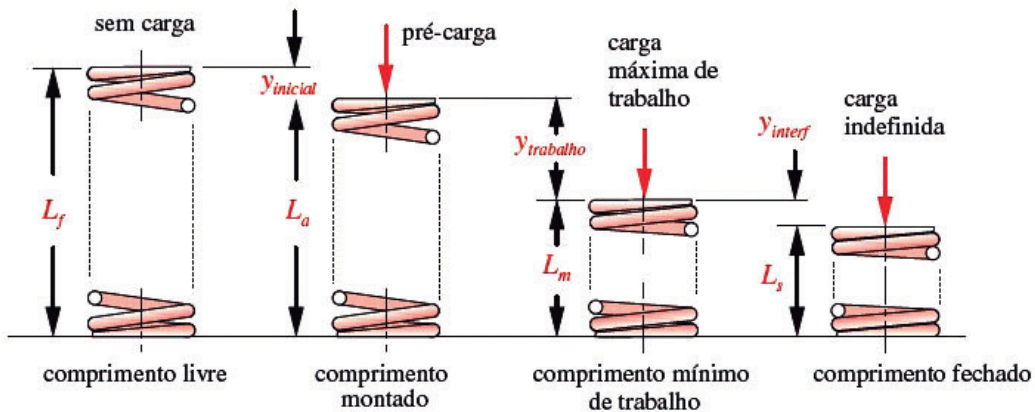
Figura 2 - Parâmetros dimensionais para mola helicoidal de compressão



Fonte: Norton (2004, p.701)

As molas de compressão têm diversos comprimentos e deflexões de interesse, como mostrado na Figura 3. O comprimento livre L_f é o comprimento global da mola na condição descarregada, isto é, como fabricada. O comprimento montado L_o é o comprimento da mola depois de instalada à deflexão inicial $y_{inicial}$. A deflexão inicial juntamente com a constante da mola determina a quantidade de força de pré-carga necessária à montagem da mola. A carga de trabalho é aplicada para comprimir adicionalmente a mola até a sua deflexão de trabalho, $y_{trabalho}$. O comprimento mínimo de trabalho L_m é a menor dimensão à qual se reduz a mola quando em serviço. O comprimento fechado ou altura sólida L_s é o seu comprimento quando comprimida ao ponto de todas as suas espiras se tocarem. O limite de interferência y_{interf} é a diferença entre o comprimento mínimo de trabalho e a altura fechada, expresso como uma porcentagem da deflexão de trabalho.

Figura 3 - Vários comprimentos de uma mola helicoidal de compressão em uso



Fonte: Norton (2004, p. 701)

Para os dados do material utilizado na fabricação das molas, serão utilizados os dados para aços carbono 1045, mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados gerais para aços carbono 1045

Característica	Valor
Módulo de elasticidade E (GPa)	206,8
Módulo de cisalhamento G (GPa)	80,8
Constante de Poisson ν	0,28
Densidade ρ (kg/m ³)	7800

Fonte: Matweb (2016)

Na Tabela 3 são apresentadas características geométricas e dinâmicas das molas de prova helicoidal de compressão inserido no programa de elementos finitos.

Tabela 3 - Molas de prova utilizadas

Característica	Mola Cinza	Mola Amarela	Mola Vermelha
D (mm)	16,500	15,435	15,035
y_{livre} (mm)	94,35	93,52	96,31
d (mm)	3,55	3,46	3,87
Força máxima (N)	622	948	974

Fonte: Autor

Na Tabela 4 são apresentadas características adicionais das molas de prova helicoidal de compressão, teóricas, inseridas no programa de elementos finitos.

Tabela 4 - Molas helicoidais de compressão utilizadas

Característica	Mola Cinza	Mola Amarela	Mola Vermelha
C	4,648	4,461	3,885
Ks	1,108	1,112	1,129
τ , MPa	646	1000,4	726,8
Ns	1,4	0,9	1,2
k (N/mm)	23,81	30,28	44,44
y (mm)	26,1	31,3	21,9

Fonte: Autor

Onde:

- C = índice de mola (adimensional);
- Ks = fator de cisalhamento direto (adimensional);
- τ = tensão de cisalhamento (MPa);
- Ns = fator de segurança (adimensional);
- K = constante de mola (N/mm);
- Y = deslocamento (mm);

2.2 Construção da malha

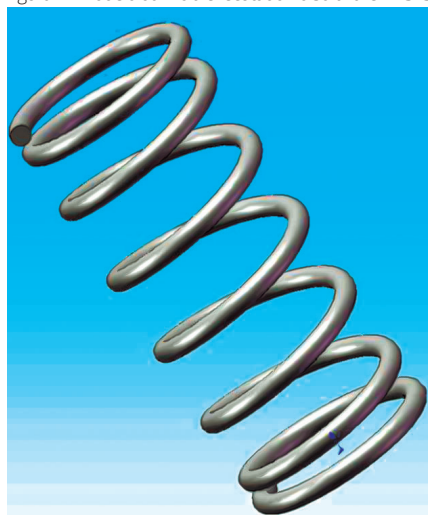
A malha utilizada será a automática gerada pelo ANSYS. O modelo utilizado apresenta 13.406 elementos e 29.624 nós. O motivo para tal foi que ao esboçar-se um teste de convergência, obteve-se uma variação mínima de resultados com grandes

variações na quantidade de elementos gerados, dessa forma, chega-se à conclusão de que as malhas geradas automaticamente para as três molas estão próximas de suas configurações ótimas, levando a um menor esforço computacional.

2.3 Construção do modelo

O estudo tem como foco principal a mola helicoidal de compressão modelada no software *SolidWorks* como se pode ver na Figura 4.

Figura 4 - Modelo da mola executado no software ANSYS

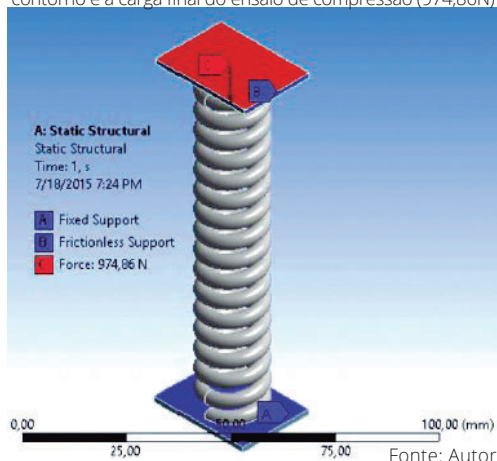


Fonte: Autor

O primeiro problema a ser discutido é a maneira como serão aplicadas as cargas na simulação. Nesse quesito, adotaram-se duas placas, uma em cada extremidade das molas, onde uma é fixada e a força de compressão é aplicada na extremidade oposta (Figura 5). Com isso, na extremidade arbitrariamente escolhida inferior, serão aplicadas as condições de contorno de um suporte fixo. Em contrapartida, na extremidade oposta, será aplicada a carga no sentido da base oposta, e as condições de contorno serão de suportes simples (roletes) nas quatro extremidades paralelas ao eixo da mola, de modo a garantir que a carga aplicada seja axial.

Vale ressaltar que os suportes foram adicionados com a função "add frozen", que faz com que o arranjo funcione como uma montagem.

Figura 5 - Mola Vermelha já submetida às condições de contorno e à carga final do ensaio de compressão (974,86N)



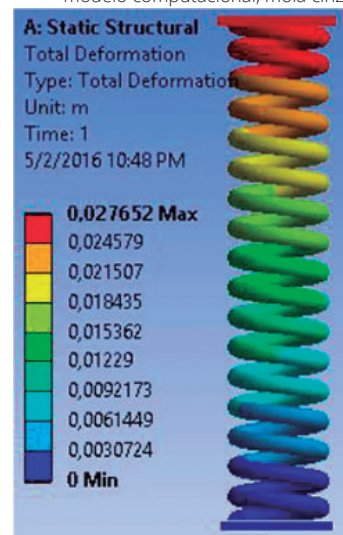
Fonte: Autor

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como as molas apresentam comportamento linear, optou-se por mostrar aqui os pontos de deflexão máxima obtidos no ensaio de compressão. O objetivo aqui é obter as deformações das molas para as respectivas cargas máximas, e comparar os valores com os resultados teórico e experimental.

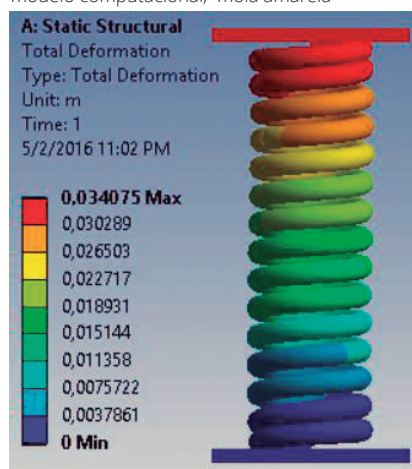
Assim, para as cargas máximas aplicadas têm-se os seguintes resultados: Deformação em modelo computacional, mola cinza (Figura 6). Deformação em modelo computacional, mola amarela (Figura 7). Deformação em modelo computacional, mola vermelha (Figura 8).

Figura 6 - Deformação em modelo computacional, mola cinza



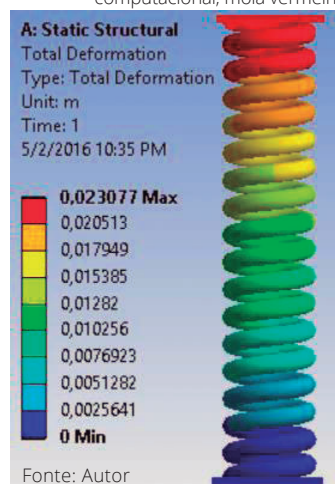
Fonte: Autor

Figura 7 - Deformação em modelo computacional, mola amarela



Fonte: Autor

Figura 8 - Deformação em modelo computacional, mola vermelha



Fonte: Autor

Dessa forma, os resultados obtidos através da análise computacional são mostrados na Tabela 5. Esses valores serão utilizados para base de comparação, sendo importante citar que o comprimento de mola livre resultante da geometria no software consta na Tabela 5 para mostrar uma das

possíveis fontes de desvio entre o resultado experimental e o da análise computacional.

Com os ensaios e resultados teóricos e computacionais, já obtidos, esta seção trata de compará-los, com a finalidade de entender quais os efeitos que algumas propriedades chave têm no comportamento mecânico dos corpos de prova.

Como mostrado nas seções anteriores, foram obtidos os valores para a constante de mola de cada um dos corpos de prova, de três formas diferentes. Comparando os valores, têm-se os resultados mostrados na Tabela 6.

Tabela 5 - Molas de prova computacional utilizadas

Característica	Mola Cinza	Mola Amarela	Mola Vermelha
y_{livre} (mm)	105,55	96,35	97,42
Carga aplicada F, (N)	622	948	974,86
y (mm)	27,652	34,075	23,077
Constante da mola (N/mm)	22,49	27,82	42,24

Fonte: Autor

Tabela 6 - Tabela de comparação da constante das molas em N/mm e desvio em relação ao experimental

Característica	Mola cinza	Mola amarela	Mola vermelha
Constante da mola experimental (N/mm)	19,23	29,58	39,76
Constante da mola da simulação (N/mm)	22,49	27,82	42,24
Constante da mola analítica (N/mm)	23,81	30,28	44,44

Fonte: Autor

Nota-se uma mesma tendência entre as três análises, onde a mola mais rígida é a mola vermelha, seguida pelas molas amarela e cinza. Resultado já esperado pelo simples manuseio dos corpos de prova antes das análises.

Observou-se também pouco desvio entre os valores de constante de mola k em todas as situações quando feita comparação com o valor obtido no ensaio experimental. É importante ressaltar que duas fontes de erro podem influenciar nesses poucos pontos porcentuais de desvio.

A aproximação do material da mola, que atua nas condições de contorno das análises teórica e computacional.

Dessa forma, pode-se justificar um maior desvio entre os resultados na mola cinza e um menor desvio na mola amarela pois foi a mola com a qual a geometria resultante em ambiente computacional mais se assemelhou.

A comparação entre valores de constante de mola k faz com que não seja necessária a comparação entre as deformações, já que o valor da constante de mola deriva diretamente da deformação e as forças aplicadas são as mesmas em todas as situações.

3 CONCLUSÃO

Neste estudo do comportamento mecânico de molas helicoidais de compressão, podem ser apresentadas as seguintes conclusões: O material dos corpos de prova é o fator que mais gerou desvios segundo a análise, tendo em vista o número de aproximações que precisaram ser feitas para a definição de um material de estudo.

O fato do ensaio de compressão ter sido realizado antes das medições foi fonte de desvios, principalmente

nos resultados da análise computacional, já que as medições influenciaram diretamente no modelo computacional realizado.

Dessa forma, conclui-se que o estudo cumpriu o que foi proposto e trouxe métodos de comparação e análise que poderão ser utilizados em trabalhos futuros, além de resultados próximos entre os tipos de análise com fontes de desvio bem identificadas, que poderão ser minimizadas com o devido rigor.

REFERÊNCIAS

- ARCANJO, E. P. **Caracterização do comportamento à fadiga de molas**. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.
- CALADO, R. M. T. **Estudo e Concepção de Molas em Y**. 2011. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.
- MARIM, M. **Utilização do método dos elementos finitos para cálculo de durabilidade de componentes mecânicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo São Paulo, 2009.
- MATWEB. AISI 1045 **Steel, cold drawn, high temperature stress relieved**, 50-75 mm (2-3 in) round. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=193434cf42e343fab880e1dabdb143ba>. Acesso em: 12 Jun 2016.
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. 931 p.
- ONO, A.; KOYAMA, H.; TANGE, A. Springs. 3 ed. Japan: Maruzen, 1982. 324 p.
- PAULA, R. F. V. **Fadiga de molas helicoidais de suspensão de automóveis**. 2013. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013. Disponível em: <http://repositorio.unesp.br/handle/11449/94379/paula_rfv_me_guara.pdf>. Acesso em: 7 nov. 2016.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHEKE, C. H. **Mechanical Engineering Design**. 5.ed., McGraw-Hill, New York, p. 354, 1989.
- SILVA, R. B. **Estabelecimento das Condições de Contorno e Métodos para a Previsão do Comportamento de Molas Helicoidais de Compressão**. 2016. 57 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.
- WARHADPANDE, A.; JALALAHMADI, B.; SLACK, T.; SADEGHI, F. A new finite element fatigue modeling approach for life scatter tensile steel specimens. **International Journal of Fatigue**, v. 32, p. 685-697, 2010.