

Vida em fadiga termomecânica de matrizes de forjamento

PARTE 2 - FINAL

POR DIEGO RAFAEL ALBA, THOMAS G. DOS SANTOS, LÍRIO SCHAEFFER

CRITÉRIO DE FALHA EM FADIGA MÉTODO DA VIDA SOB TENSÃO

O método da vida sob tensão já está difundido a mais de um século, e pode ser considerado o método padrão de análise e possui uma maior exatidão na região de fadiga de alto ciclo ($N > 10^3$ ciclos) [4]. O método da vida sob tensão, ou método de Wöhler, pode ser expresso por um diagrama log-log onde o eixo das coordenadas é a tensão aplicada e o eixo das abscissas o número de ciclos até a falha [20]. Estas curvas são conhecidas como curvas S-N do material. Exemplos de uma curva S-N típica para aços encontrados na literatura são mostradas na figura 6.

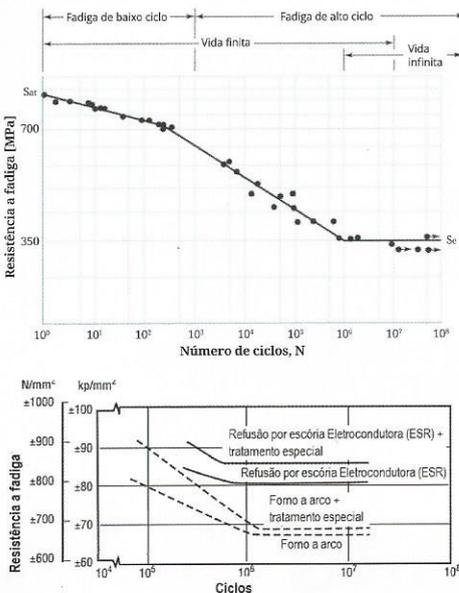


Figura 6 - (a) Curva S-N típica de um aço [12]; (b) Curva S-N para o aço AISI H13 para diferentes processos de fabricação [21].

Infelizmente, este método trata todas as deformações como elásticas e não consegue discernir etapa de nucleação e etapa de propagação da trinca [20, 22]. Esta consideração é extremamente importante na análise de matrizes de forjamento pois devido as grandes tensões, as deformações podem ser plásticas.

Basquin propôs um modelo o qual utiliza uma escala log-log para plotar um relação linear entre número de ciclos e a amplitude de tensões. A equação 1 expressa o número de ciclos até a falha em função da amplitude de tensões (equação 2), e das propriedades do material extraídas da curva S-N [4, 10].

$$N_f = N_D * \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_D} \right)^{\left(\frac{1}{b} \right)} \quad 1$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad 2$$

Na equação proposta por Basquin para definir o número de ciclos até a ruptura, N_p , definimos o coeficiente b como a inclinação da curva S-N, σ_D como o limite de resistência a fadiga e N_D como o número de ciclos até o limite de resistência a fadiga.

Também para este método, pode-se utilizar os diagramas de tensões flutuantes para a análise de fadiga. Os diagramas de Goodman e Gerber são os mais difundidos e apresentam uma relação entre a média e a amplitude das tensões aplicadas [12, 23]. Entretanto, no caso de matrizes de forjamento o

tipo de carregamento torna a utilização destes diagramas inútil. Assim, para a análise da fadiga do material é somente necessário comparar a tensão aplicada com os respectivos dados da curva S-N. No entanto, Kim and Choi [23] aplicaram as equações de Goodman e Gerber e o método da vida sob tensão para estimar a vida em fadiga de matrizes de forjamento a quente.

MÉTODO DA VIDA SOB DEFORMAÇÃO

O método da vida sob deformação é reconhecido como o método mais preciso para prever a fadiga de matrizes segundo a ASTM e a SAE [3, 4]. A abordagem mais difundida para o este cálculo foi proposta por Coffin & Manson na década de 1950. Considerando que uma falha por fadiga sempre começa em uma descontinuidade local, como por exemplo, um entalhe, um defeito, ou qualquer outro concentrador de tensões, quando a tensão nesta descontinuidade excede o limite elástico, ocorre deformação plástica [10]. Assim, se uma fratura está para ocorrer, deformações plásticas cíclicas devem ocorrer.

O conceito por trás deste método é simples: para uma mesma amplitude de deformações é analisada a variação de tensões. Os três diferentes tipos de resposta da variação de tensão são mostrados nas figura 7a e figura 7b. Ao lado, na figura 7c, é mostrada a curva de histerese para as diferentes respostas. A curva de histerese demonstra as deformações e tensões aplicadas no campo de tração e compressão [10, 12]. Após

um determinado período, a amplitude de tensões atinge valores constantes e a curva de histerese é dita estável [12]. Após a estabilização, o material tende a trincar e as tensões de carregamento tendem a decrescer até a total ruptura. É possível observar a nucleação da trinca através da amplitude de tensões e sua repentina queda [3, 24].

tensão/deformação aplicado, a deformação plástica é dominante comparada à elástica ou vice-versa. Este ponto de transição divide o campo LCF e HCF. Entretanto, o número exato de ciclos até esta transição não é possível de ser exatamente definido, pois varia de material para material e das condições de contorno de cada caso [10, 12].

A equação da linha de deformação elástica é expressa pela equação 5.

$$\Delta \epsilon_{a_{el}} = \frac{\sigma'_F}{E} (2N)^b \quad 5$$

Logo, podemos reescrever a equação 3 como segue.

$$\Delta \epsilon_{a_{total}} = \epsilon'_F (2N)^c + \frac{\sigma'_F}{E} (2N)^b \quad 3a$$

A equação 3a é a relação de Coffin-Manson entre a vida em fadiga e a deformação total. Esta abordagem não considera o crescimento da trinca. Devido a este fato, o método da vida sob deformação é considerado como uma estimativa para a nucleação de trincas, não considerando o estágio de propagação [2, 4]. Dentre os métodos de análise da vida em fadiga, este é o frequentemente adotado para a predição de ferramentas de forjamento [3, 19, 25].

Como previamente relatado, diversos trabalhos são encontrados na literatura, os quais utilizam o método da vida sob deformação para a predição de vida em fadiga mecânica e termomecânica de matrizes. Rosbrook [26] utilizou análise em elementos finitos, aliado a experimentos de fadiga térmica para definir a vida em fadiga de matrizes de fundição de alumínio. Os resultados obtidos mostraram que o modelo em elementos finitos era capaz de calcular a distribuição de temperaturas na matriz e que este possuía boa concordância com os resultados obtidos experimentalmente. Em outro estudo, Ebara [18], realizou uma análise da nucleação e propagação de trincas devido a fadiga termomecânica em matrizes fabricadas no aço SKD62 (ASTM¹ H12).

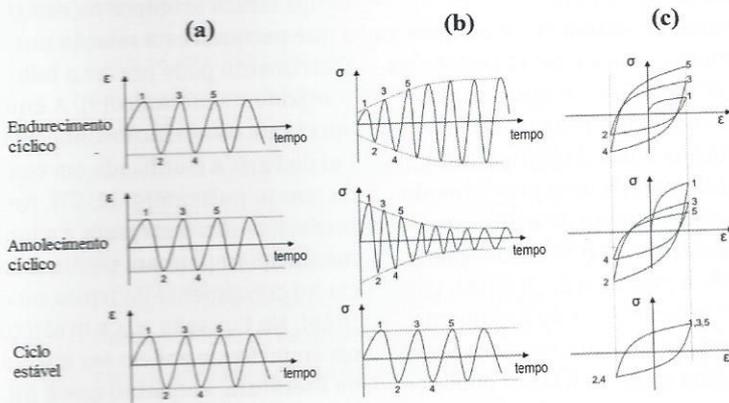


Figura 7 - Comportamento dos materiais sujeitos a deformação cíclica [3]

Em mãos dos dados referentes a curva de histerese de tensão-deformação verdadeira é possível estabelecer a curva de Wöhler sob qualquer circunstância, bem como o comportamento em fadiga de baixo ciclo (LCF) e fadiga em alto ciclo (HCF), através das equações propostas por Basquin e Coffin-Manson [2-4]. A curva de Wöhler é descrita em uma escala log-log, conforme figura 8 para estabelecer uma relação linear e facilitar a interpretação dos dados. Dependendo do nível de

Considera-se que a deformação total é a soma da componente de deformação plástica e deformação elástica, conforme equação 3.

$$\Delta \epsilon_{a_{total}} = \Delta \epsilon_{a_{pl}} + \epsilon_{a_{el}} \quad 3$$

A equação da linha de deformação plástica na figura 8 é expressa pela equação 4.

$$\Delta \epsilon_{a_{pl}} = \epsilon'_F (2N)^c \quad 4$$

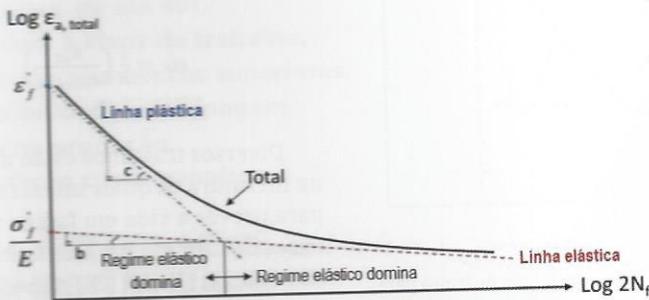


Figura 8 - Características da Curva de Wöhler [3]

¹ASTM: American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Ensaios e Materiais) foi fundada em 1898 nos Estados Unidos da América, por um grupo de cientistas e engenheiros, para analisar as frequentes quebras dos trilhos de trem. Como resultado, o grupo desenvolveu uma norma para o aço utilizado nas ferrovias. É responsável pela produção de normas para diversas áreas da indústria, sendo muito usadas na padronização de materiais, como ligas de aço, alumínio, polímeros e combustíveis.

Foram obtidas curvas de fadiga de baixo ciclo e fadiga de alto ciclo, bem como a sua relação com diferentes tipos de tratamentos superficiais, concentradores de tensão e temperaturas. Em dois trabalhos distintos, Persson [17] e Persson, Hogmark [14] realizou testes de fadiga termomecânica em aços de trabalho a quente e propôs um modelo de predição de vida em fadiga baseado no método da vida sob deformação. O autor concluiu que um aumento de 150°C na temperatura máxima do processo, decaem uma casa de magnitude o número de ciclos para nucleação e propagação de trincas de fadiga. Também foi mostrado que embora o processo cause amolecimento na superfície da matriz, a dureza inicial do material desempenha papel importante na resistência a fadiga térmica. Em Behrens, Schäfer [19], o autor propôs um modelo em elementos finitos para o processo de fadiga termomecânica. Neste modelo, variações na dureza do material devido aos ciclos térmicos são considerados e em mãos de extensivos dados de experimentos e processos industriais um modelo foi proposto e busca avaliar trincas devido a deformação plástica. Já em Behrens and Schäfer [25], o autor procurou prever a iniciação de trincas em materiais de trabalho a quente. Primeiramente, experimentos e fadiga termomecânica foram realizadas para determinar a resistência do aço de trabalho a quente DIN 1.2367 (ASTM H13). A partir de tais resultados, um curva S-N para fadiga de baixo ciclo e alto ciclo foi proposta, a qual apresentou resultados similares aos experimentais para a nucleação de trincas. No trabalho de Santaella [3], o autor propõe um modelo em elementos finitos capaz de prever a vida de matrizes de forjamento a quente. Através de experimentos de fadiga termomecânica, foi possível obter as curvas de histerese do aço DIN 1.2367 (ASTM H13). O autor buscou definir a curva de Wöhler para o material e através do método da vida

sob deformação, alimentar o software de simulação para estimar a vida em fadiga de matrizes de geometrias distintas. Os resultados obtidos adequaram-se bem aos processos industriais e auxiliaram na otimização das geometrias de matrizes de forjamento a quente.

MÉTODO DA MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA (LEFM)

Com o intuito de avaliar mais estágios relacionados a fadiga e obter resultados mais precisos, muitos pesquisadores focam em modelar a propagação de trincas via Mecânica da fratura linear elástica (LEFM) [2]. Como previamente descrito, a propagação de trincas é dividida em três estágios: nucleação, propagação e propagação instável. Considerando que matrizes de forjamento são isotrópicas, uma abordagem simplificada da mecânica da fratura pode ser considerada [4].

Este método oferece uma melhor compreensão relacionada ao estágio de propagação para uma trinca já existente no componente. Em contrapartida, este método possui limitações em avaliar o estágio de nucleação [4, 9, 10]. Considera-se que o estágio de propagação da trinca acontece de forma ordenada, conforme figura 9, e pode ser

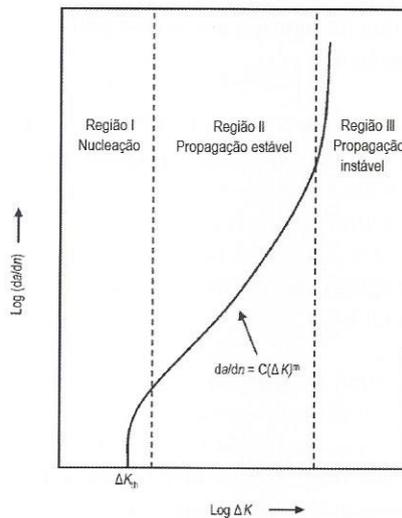


Figura 9 - Curva de propagação de trinca para carregamentos em fadiga [10]

descrito através da Equação 10 o qual é dependente do tamanho da trinca e da intensidade do carregamento externo [10, 12].

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^m \tag{10}$$

Desta forma, pode-se dizer que fadiga cíclica acontece no estágio II, e que portanto esta relação linear de crescimento pode prever a falha de um componente mecânico[9]. A Equação 10 apresenta esta relação conhecida como Lei de Paris e é utilizada em condições de tensão pulsante[4, 12, 27]. Neste modelo, a microestrutura e a tensão média desempenham pequena influência no crescimento da trinca no estágio II[28]. Na Equação 10, C e m são constantes empíricas e podem ser encontradas na literatura, enquanto que ΔK_I é fornecido pela Equação 11.

$$\Delta K_I = \beta(\sigma_{max} - \sigma_{min})\sqrt{\pi a} = \beta\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \tag{11}$$

Através deste método, é possível mensurar o número de ciclos até a falha, bem como, o tamanho crítico de trinca o qual leva a propagação instável e súbita ruptura do componente[4, 9]. Para isto, substitui-se a Equação 11 na Equação 10 e integra-se. Esta integração resulta na Equação 12 para o número de ciclos até falha, e Equação 12 para o tamanho crítico da trinca antes do estágio III.

$$N_f = \left(\frac{a_f^{(-\frac{m}{2})+1} - a_i^{(-\frac{m}{2})+1}}{(-\frac{m}{2}+1) \cdot A \cdot \beta \cdot \Delta\sigma \cdot \pi^{\frac{m}{2}}} \right) \tag{11}$$

$$a_f = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{max} \cdot \beta} \right) \tag{12}$$

Diversos trabalhos estão disponíveis na literatura os quais utilizaram LEFM para prever a vida em fadiga de matrizes de forjamento. Exemplos deles são Qamar, Sheikh [28] que estudou a propagação de trincas em matrizes de

extrusão através da Lei de Paris para trincas com tamanho inicial de 0,05 a 0,1 mm. Skov-Hansen, Bay [29] também realizou estudos para definir o número de ciclos até trincas atingirem seu valor crítico. Horita, Ishihara [27] comparou resultados experimentais com uma

análise em elementos finitos para definir os valores de K_{eq} e da curva da/dN de um punção no processo de forjamento a frio. Os resultados foram satisfatórios e podem ser utilizados para auxiliar na predição da vida de ferramentas de forjamento a frio.

CONCLUSÕES

As vantagens e desvantagens destes três métodos teóricos/mecânicos para a avaliação da vida em fadiga são resumidas na tabela 1.

	Vantagens	Desvantagens
Método da vida sob-tensão	Simplicidade em definir as constantes do material;	Completamente empírico;
	Indicado para projeto de vida infinita, com históricos de carregamento de amplitude constante;	Ignora a relação tensão/deformação;
	Grande quantidade de informações disponíveis.	Não distingue as etapas de nucleação e propagação de trinca;
Método da vida sob-deformação	Modela precisamente deformação plástica;	Mais complexo do que o método de vida sob tensão;
	Habilidade de modelar tensões residuais devido ao histórico de carregamento;	Somente considera aspectos iniciais da vida sob fadiga;
	Facilmente extrapolado para geometrias mais complexas;	Ainda empírico para muitas aplicações;
	Útil para aplicações de altas temperaturas;	Necessita de experimentos posteriores para possíveis correções do modelo.
	Possível incorporar comportamento transiente de materiais.	
Mecânica da fratura linear elástica (LEFM)	Trata diretamente do estágio de propagação de trincas;	Dificuldade em lidar com a etapa de nucleação;
	Possível de incorporar dados de ensaios não-destrutivos;	Dificuldade de determinar o fator de intensidade de tensões para geometrias complexas;
	Oferece melhores compreensões sobre os mecanismos de fadiga.	

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens dos métodos de avaliação da vida em fadiga [2]

**ESTRUTURA PARA ATENDER
PROJETOS DE GRANDE PORTE.**

Com a moderna Trimill VU 3021, a Moldtool está capacitada para oferecer a você tecnologia de ponta com alta produtividade e precisão na elaboração do molde ideal para o seu projeto.

- Peças grandes, de até 40T.
- Máquina com 5 Eixos de trabalho.
- Qualidade e acabamentos superiores.
- Maior flexibilidade na usinagem.
- Agilidade na produção.
- Melhor relação custo-benefício.

COM A MOLDTOOL VOCÊ GANHA
MAIS COMPETITIVIDADE.



Cursos: 3000 x 2100 x 1200

Deve-se salientar que a matriz de forjamento possui grande representatividade nos aspectos relacionados à custo e dimensional das peças forjadas. Dependendo do tamanho e complexidade o custo de uma matriz pode ser elevado e espera-se que sua vida útil seja suficiente a fim de equilibrar custos de fabricação com número de peças produzidas. Os defeitos mais usuais ocorridos em matrizes de forjamento estão relacionados a iniciação e propagação de trincas devido a fadiga térmica e mecânica e ao desgaste de sua superfície, acarretando em peças de dimensões aquém das esperadas, que geram retrabalho ou até mesmo descarte da matriz.

Portanto, a busca por métodos que possam prever ou incrementar a vida útil de matrizes se faz necessária e neste aspecto os métodos de avaliação de vida em fadiga aliado a análise em elementos finitos podem se tornar uma ferramenta útil para a solução de tais desafios.

REFERÊNCIAS

- Berti, G. A. and M. Monti; Thermo-mechanical fatigue life assessment of hot forging die steel. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2005. 28(11): p. 1025-1034.
- Chen, C., et al.; A review on remanufacture of dies and moulds. *Journal of Cleaner Production*, 2014. 64: p. 13-23.
- Santaella, M. L.; Thermo-mechanical fatigue of hot forging tools - prediction, analysis and optimization methods through six-sigma, in Faculty of Georesources and Materials Engineering. 2012, RWTH Aachen University: Alemanha. p. 200.
- Grobaski, T. C.; Preliminary research for the development of a hot forging die life prediction, in *Mechanical Engineering*, 2004, Ohio University: EUA. p. 119.
- Chander, S. and V. Chawla; Failure of Hot Forging Dies—An Updated Perspective. *Materials Today: Proceedings*, 2017. 4(2): p. 1147-1157.
- Lavtar, L., et al.; Analysis of the main types of damage on a pair of industrial dies for hot forging car steering mechanisms. *Engineering Failure Analysis*, 2011. 18(4): p. 1143-1152.
- Velay, V., et al.; Thermal fatigue of a tool steel: Experiment And Numerical Simulation. in 6th International Tooling Conference. Karlstad University, Sweden. 2002.
- Gronostajski, Z., et al.; The failure mechanisms of hot forging dies. *Materials Science and Engineering: A*, 2016. 657: p. 147-160.
- Branco, C. M., A. A. Fernandes, and P. M. S. T. Castro; Fadiga de estruturas soldadas. 1986: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Campbell, F. C.; *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics*. 2012: ASM International.
- Lampman, S. R. et al.; *ASM Handbook: Fatigue and fracture*. 1996: ASM International.
- Nisbett, K. and R. Budynas; *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 10th ed. ed. 2014, EUA: McGraw-Hill Education. 1105.
- Irisarri, A., A. Pelayo; Failure analysis of an open die forging drop hammer. *Engineering Failure Analysis*, 2009. 16(5): p. 1727-1733.
- Persson, A., S. Hogmark, and J. Bergström; Simulation and evaluation of thermal fatigue cracking of hot work tool steels. *International Journal of Fatigue*, 2004. 26(10): p. 1095-1107.
- Jhavar, S., C. Paul, and N. Jain; Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review. *Engineering Failure Analysis*, 2013. 34: p. 519-535.
- Berti, G. A. and M. Monti; Improvement of life prediction in AISI H11 tool steel by integration of thermo-mechanical fatigue and creep damage models. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2009. 32(3): p. 270-283.
- Persson, A.; Strain-based approach to crack growth and thermal fatigue life of hot work tool steels. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 2004. 33(1): p. 53-64.
- Ebara, R.; Fatigue crack initiation and propagation behavior of forging die steels. *International Journal of Fatigue*, 2010. 32(5): p. 830-840.
- Behrens, A., et al.; Numerical analysis of tool failure in hot forging processes. *Obróbka Plastyczna Metali*, 2008. 19: p. 11-17.
- Bannantine, J. A., J. J. Comer, and J. L. Handrock; *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*. 1990: Prentice Hall.
- Schindler, A., A. Kulmburg, and J. Stuhl; Thermal Fatigue of H-13 in Die Casting Applications. in 9th SDCE Congress, Milwaukee. 1977.
- Farahmand, B. and G. G. J. Bockrath; Fatigue and fracture mechanics of high risk parts : application of LEFM & FMDM theory. 1997: New York : Chapman & Hall.
- Kim, Y. -J. and C. -H. Choi; A study on life estimation of hot forging die. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2009. 10(3): p. 105.
- Fu, M., M. Yong, and T. Muramatsu; Die fatigue life design and assessment via CAE simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008. 35(9): p. 843-851.
- Behrens, B. A. and F. Schäfer; Service life predictions for hot bulk forming tools. *steel research international*, 2009. 80(12): p. 887-891.
- Rosbrook, C.; Analysis of thermal fatigue and heat checking in die-casting dies: a finite element approach, in Department of Mechanical Engineering. 1992, Ohio University: EUA. p. 110.
- Horita, A., et al.; Fatigue Analysis of Forging Die. *Journal of Thermal Stresses*, 2012. 35(1-3): p. 157-168.
- Qamar, S., et al.; Monte Carlo simulation of extrusion die life. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008. 202(1): p. 96-106.
- Skov-Hansen, P., et al.; Fatigue in cold-forging dies: tool life analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999. 95(1): p. 40-48.



Autor principal Diego Rafael Alba - Graduação em Engenharia Mecânica e Mestrado em Engenharia de Materiais, Minas e Metalúrgica pela UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Atualmente aluno de doutorado do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) da UFRGS. Pesquisas relacionadas aos processos de conformação mecânica e análises numérica dos processos através do método dos elementos finitos. Experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Propriedades Mecânicas dos Metais e suas ligas, atuando principalmente nas áreas de conformação dos metais, soldagem em estado sólido, fadiga e análise de falha. Experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em projeto de componentes e equipamentos para indústria rodoviária e de Óleo & Gás. eng.diego.alba@gmail.com

Co-autor Thomas Gomes dos Santos - Possui graduação em Fabricação Mecânica pela Universidade Federal de Santa Maria (2015). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Processos de Fabricação, atuando principalmente nos seguintes temas: usinagem, forjamento, extensômetros e análises numéricas. thomas.santos@ufrgs.br

Co-autor Lirio Schaeffer - Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da UFRGS. Engenheiro Mecânico pela UFRGS, com doutorado na área de Conformação pela Universidade Técnica de Aachen (RWTH-Aachen). Pesquisador na área de Mecânica, Metalurgia e Materiais pelo CNPq, professor das disciplinas relacionadas aos processos de fabricação por conformação mecânica da UFRGS e vinculado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) desta universidade. Autor de diversos livros relacionados ao tema de Conformação Mecânica. schaeffer@ufrgs.br



**BERTUSSI[®]
DESIGN**

DESIGN DE PRODUTO + GESTÃO DA INOVAÇÃO
A 15 anos criando produtos de valor para a indústria

/ Caxias do Sul
/ Florianópolis
/ Porto Alegre
/ São Paulo