

# MÁSCARAS METÁLICAS DE DP600 EM SUPERFÍCIES DE MATRIZES DE FORJAMENTO

A aplicação de insertos produzidos a partir de chapas metálicas (*die mask*) sobre a superfície de matrizes durante o processo de forjamento pode elevar a vida útil das ferramentas, que são submetidas a tensões, deformações e gradientes de temperatura que provocam, em uma fina camada superficial, desgaste térmico e adesivo, bem como fadiga termomecânica, levando a potenciais riscos de danos às matrizes.

Por Luana De Lucca de Costa | Foto Divulgação

Um processo de forjamento a quente envolve um sistema complexo no qual um *billet*<sup>1</sup> metálico, normalmente a 1.200°C, no caso de forjamento de aço, é deformado entre duas matrizes para a obtenção da forma final desejada. Normalmente as matrizes são aquecidas a temperaturas entre 200 e 300°C com o objetivo de evitar um choque térmico entre o metal forjado e a ferramenta.

Assim, durante um processo de forjamento, existe uma intensa troca térmica entre o *billet* e a ferramenta. Devido a aplicação da força necessária para deformar o metal, altas tensões normais se desenvolvem na interface entre o metal sendo deformado e a ferramenta. No momento em que a deformação é iniciada estabelece-se um movimento relativo entre as superfícies da matriz e do *billet*, gerando atrito e calor na interface (mesmo com a utilização de lubrificantes), com o desenvolvimento de tensões tangenciais, no mínimo iguais a metade da tensão de escoamento do material sendo forjado. À medida que a deformação prossegue, aumenta a área de contato entre a superfície do *billet* e a superfície da ferramenta e um maior tensionamento da ferramenta. À medida que os detalhes geométricos da matriz vão sendo preenchidos, altas tensões, que podem ser muito maiores que a tensão de escoamento do material, se desenvolvem nesses pontos. Quando o forjamento está quase completo, inicia-se a formação da rebarba. Neste ponto o tensionamento da ferramenta atinge o valor máximo.

Todo esse carregamento mecânico e variações de temperatura levam a matriz a falhar com o tempo e definem sua vida útil. Os principais fenômenos que contribuem para a falha da ferramenta após um determinado número de ciclos de forjamento são: desgaste abrasivo; fadiga mecânica; fadiga térmica; amolecimento; deformação plástica e fragilização superficial.

Assim, o desenvolvimento proposto neste estudo pode vir a contribuir fortemente para o aumento da vida útil das ferramentas nas forjarias brasileiras, impactando direta-

mente na redução dos custos de produção e aumento da competitividade.

Ao longo dos anos, várias tecnologias visando aumentar a vida útil de matrizes têm sido desenvolvidas e aplicadas. A maioria se baseia na realização de algum tipo de tratamento térmico ou termoquímico na superfície da matriz com o objetivo de aumentar sua dureza superficial. Isto diminui o amolecimento superficial e a atuação dos mecanismos de abrasão e fadiga térmica e mecânica. Os tratamentos mais comuns são a nitretação<sup>2</sup> ou carbonitretação em banho de sal, o PVD (*Physical Vapor Deposition*), o CVD (*Chemical Vapor Deposition*) e o PACVD (*Plasma Aided Chemical Vapor Deposition*).

Todos esses métodos têm demonstrado a sua viabilidade e levado a um aumento significativo na vida útil de matriz (50 a 200%) em muitos anos de pesquisa e/ou aplicação industrial. Entretanto, relevantes desvantagens estão associadas ao custo relativamente alto, ao fato de requerer equipamentos especiais normalmente não disponíveis em forjarias e consumirem muito tempo, dependendo do tamanho da matriz.

**Durante um processo de forjamento, existe uma intensa troca térmica entre o *billet* e a ferramenta**

Além disso, todas as camadas superficiais de ferramentas, modificadas por esses tratamentos, falham após certo tempo de produção. Nesse caso, toda a ferramenta deve ser reparada ou substituída o que implica em parada na produção para troca de *setup*<sup>3</sup>, o que pode ser caro e demorado.

Uma abordagem alternativa para proteger a ferramenta do desgaste bem como da fadiga termomecânica, pode ser associada a aplicação de uma "máscara" metálica, de baixo custo e facilmente substituível, adaptada à gravura da matriz base. A ideia básica é que a "máscara" protetora reduza o

choque e as trocas térmicas, bem como o atrito, entre o material sendo forjado e a matriz.

De acordo com este conceito, a "máscara" protetora é completamente substituída quando apresentar desgaste após certo número de ciclos de forjamento. A figura 1 mostra esquematicamente o conceito.

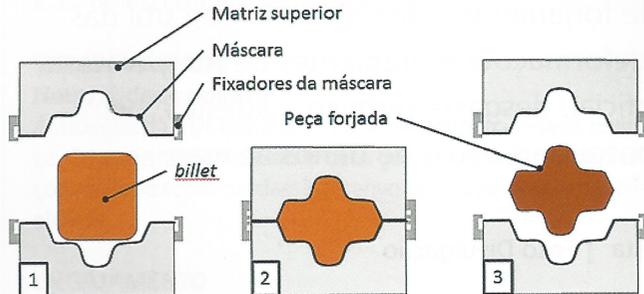


Figura 1 - Conceito básico do forjamento de uma peça com simetria axial utilizando matriz com "máscara"

**ANÁLISE EXPERIMENTAL**

A partir da definição da geometria a ser estudada (figura 2) projetada no software<sup>4</sup> Solidworks, foi selecionado o material e o processo de obtenção das máscaras metálicas através de simulações numéricas. O processo de estampagem convencional das máscaras foi pré-selecionado.

As simulações de estampagem, foram realizadas no software Deform<sup>TM</sup> v. 11.0, na configuração apresentada na figura 3. As simulações do processo de forjamento foram realizadas no software Simufac. Forming 12.0, conforme demonstrado na configuração apresentada na figura 4.

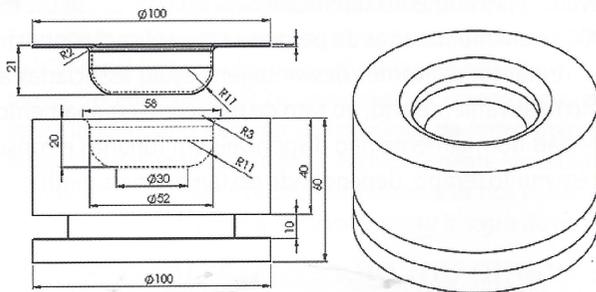


Figura 2 - Projeto da matriz inferior e máscara aplicados ao processo de forjamento

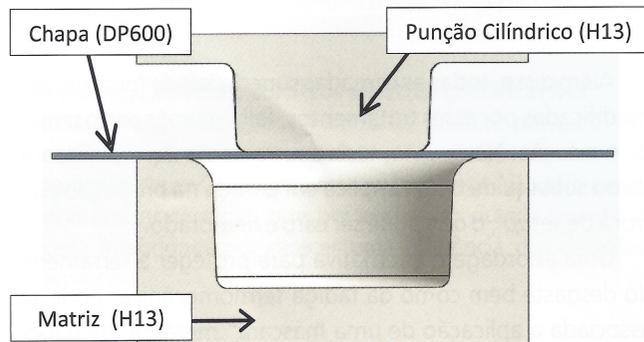


Figura 3 - Demonstração das ferramentas utilizadas na simulação do processo de estampagem

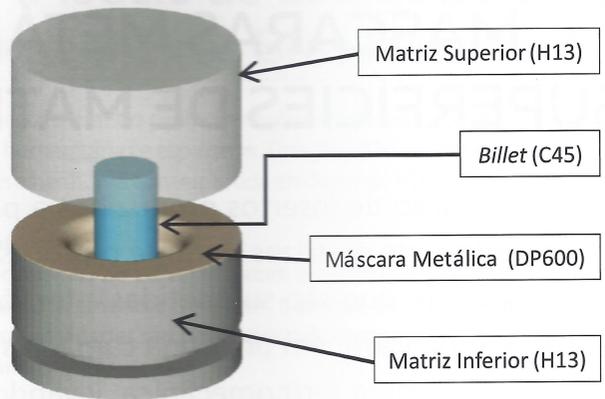


Figura 4 - Representação do conjunto aplicado a simulação numérica do processo de forjamento

Os materiais DIN<sup>5</sup> 1.3343, DC04 e DP600 foram testados em simulações numéricas do processo de estampagem, sendo o DP600 o aço selecionado para as aplicações experimentais devido às características geométricas obtidas após a simulação e a facilidade de adaptação a cavidade da matriz de forjamento.

As máscaras foram estampadas em estágio único em chapas de DP600 com 1 mm de espessura e diâmetro de 100 mm, em uma prensa Danpresse, com capacidade de 200 kN e velocidade de prensagem de 5,0 mm/s, a partir de um punção cilíndrico de 50 mm de diâmetro até a profundidade de 20 mm.

As matrizes foram fabricadas por usinagem em aço ferramenta H13 e posteriormente temperado<sup>6</sup> e revenido<sup>7</sup>, sendo que a figura 2 ilustra a matriz inferior. Já a matriz superior é plana com o mesmo diâmetro e especificações da inferior, conforme esquematizado na figura 3. Como bilhet, no processo de forjamento, foi utilizado o aço C45 com 25,4 mm de diâmetro e 35 mm de altura. O conjunto matriz/máscara/billet utilizado no processo de forjamento é apresentado esquematicamente na figura 4 e na imagem apresentada na figura 5.



Figura 5 - Forjamento Experimental. (a) Posicionamento no billet (b) Forjamento

O forjamento foi realizado em prensa hidráulica, marca FKL, com capacidade de 700 t e velocidade de atuação de 5 mm/s. A temperatura inicial do billet foi de 1.200°C, aquecido em forno elétrico, marca Sanchis, e transferido de forma manual com utilização de tenaz para a matriz, conforme figu-

ra 5a, em tempo inferior a 4 s. A matriz inferior foi aquecida, por resistência elétrica, até 300°C e a matriz superior foi mantida a temperatura ambiente estimada em 20°C. O tempo de contato entre o *billet* e a máscara é estimado em 10 s. Foram realizados 4 forjamentos sequenciais. O processo de forjamento esta apresentado na figura 5b.

Após o forjamento experimental, análises de micro dureza foram realizadas na máscara utilizada, a partir de microdureômetro, marca INSIZE, modelo ISH-TDV1 000, nas rotas demonstradas na figura 6. Foram obtidos 5 valores de micro dureza na condição inicial da chapa, antes da estampagem, e 11 valores após sua utilização como máscara no processo de forjamento.

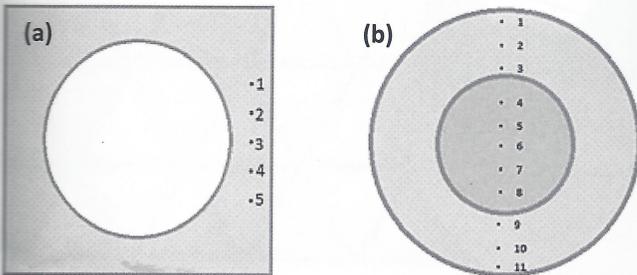


Figura 6 - Rotas de micro dureza. a) Condição inicial da chapa. b) Condição da chapa utilizada como máscara após o forjamento

**RESULTADOS**

Os resultados de tensão e deformação obtidos por simulação numérica, sem o uso de prensa chapas, do processo de estampagem são apresentados na figura 7, onde pode ser observada a formação de rugas no corpo do flange no decorrer da simulação do processo, bem como, a redução da espessura da chapa na base da matriz. A força de estampagem resultante da simulação atingiu o valor máximo de 90 kN.

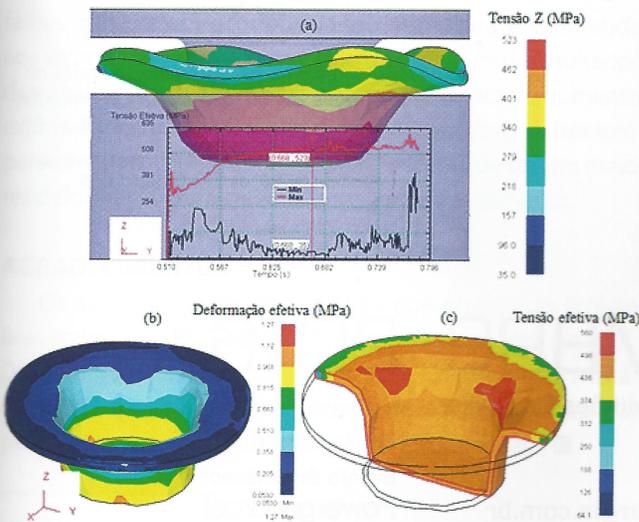


Figura 7 - Resultados da simulação de estampagem: (a) Tensão na direção Z; (b) Deformação e tensão efetiva no final do processo

Quando comparados com os resultados apresentados nas imagens da figura 8, percebe-se a relação entre a região

inicial de contato e as maiores deformações. Pode, ainda, ser verificado que o aumento da deformação na região superior modifica a espessura da máscara.

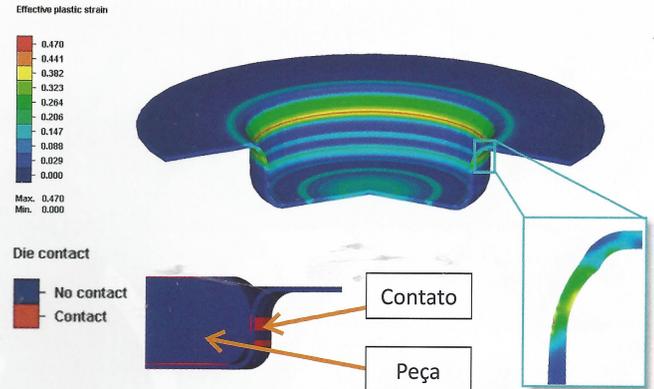


Figura 8 - Resultados da simulação numérica. (a) Contato entre a máscara e a peça forjada. (b) Deformação efetiva da máscara pós forjamento

Quando a distribuição da temperatura na máscara, percebe-se a variação da temperatura durante o processo de forjamento, onde a máscara atingiu um valor máximo de 700°C na região inferior. Na figura 9, quando comparada à figura 8, verifica-se que é a região que permanece em contato com a peça desde o posicionamento do *billet* até o final do forjamento.

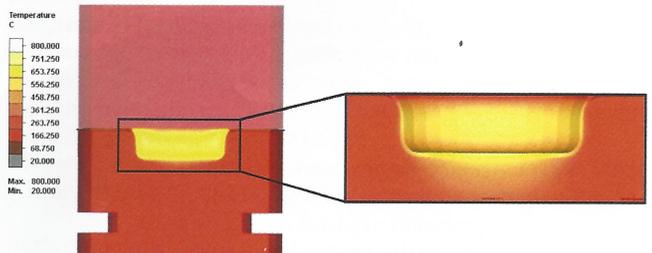


Figura 9 - Resultados da simulação numérica para temperatura da máscara ao final do processo de forjamento

Concluída a análise das simulações numéricas, parte-se para análise e comparação dos resultados experimentais.

Após quatro forjamentos sequenciais, houve fratura na região da flange, conforme apresentado na figura 10.

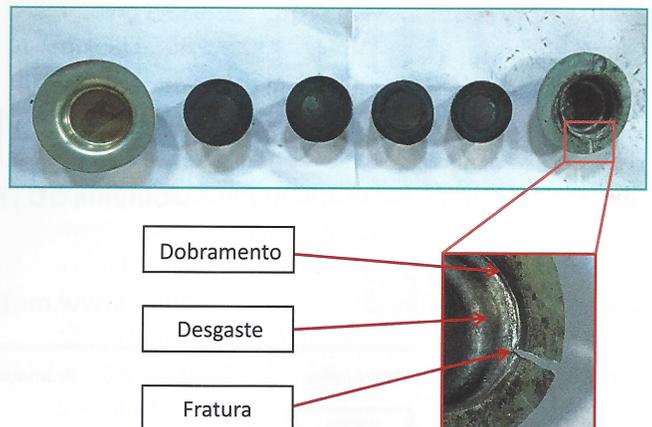


Figura 10 - Máscara fraturada após 4 forjamentos sequenciais

Observa-se ainda que a parte interna, que permaneceu em contato com a peça até o final do processo de forjamento, não apresenta fraturas. Observa-se desgaste superficial em toda a parte interna da máscara. Entretanto, esse desgaste é acentuado na região do raio interno e na região onde o *billet* foi posicionado que é a de maior contato com a máscara, onde foi atingida a máxima temperatura.

Ainda, pode ser observado que na região de transição entre a parede e a flange ocorreu o dobramento da chapa, como mostrado na figura 10.

Pode-se atribuir como um dos fatores que causaram a fratura na região do flange a contínua deformação ocorrida na máscara durante o processo de forjamento. Como a geometria da peça forjada foi apenas conformada dentro da cavidade da matriz/máscara e o deslocamento da prensa até o fechamento da matriz não foi controlado, pode ter ocorrido a aplicação de força excessiva sobre a flange provocando o escoamento da máscara sobre a peça forjada. A redução acentuada na espessura da região do flange também é associada a este fator.

Quanto aos resultados de microdureza, na condição inicial apresentaram dureza média de 48 HRC<sup>8</sup>. Após forjamento, na região da flange a dureza média foi de 50 HRC e na região correspondente aos pontos 4 a 8, apresentados na figura 6, a dureza média foi de 64 HRC. A partir do diagrama TTT<sup>9</sup> do aço DP600, atribui-se o aumento de dureza a transformação martensítica<sup>10</sup> ocorrida na região central da máscara.

## CONCLUSÕES

Neste estudo analisamos a aplicabilidade de máscara metálica em aço DP600 para aumento da vida útil das matrizes de forjamento. Foi possível compreender a complexidade que envolve a adaptação do conjunto máscara matriz e as falhas que podem ocorrer quando a máscara é submetida aos esforços atuantes no processo de forjamento. Resultados das análises de micro dureza mostram que ocorre aumento expressivo de dureza na região da máscara exposta a altas temperaturas, bem como as regiões da máscara que sofrem maiores deformação durante a estampagem e o forjamento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES que através do Projeto Bragecrim (AUXPE 2203/2015) apoia este projeto. Ao Prof. Dr. Gerhard Hirt, Diretor do Instituto de Conformação Mecânica (IBF) da Universidade Técnica de Aachen (Alemanha) pela cooperação neste intercâmbio de informações. ■

<sup>1</sup>*Billet*: do inglês, significa lingote.

<sup>2</sup>*Nitretação*: Tratamento termoquímico em que se promove o enriquecimento superficial com nitrogênio (N), objetivando melhorar as propriedades superficiais do molde.

<sup>3</sup>*Setup*: tempo de preparação. São as tarefas necessárias e relativas às

atividades de preparação de um equipamento, desde o momento em que se tenha completado a última peça boa do lote anterior até o momento em que se tenha feito a primeira peça boa do lote posterior.

<sup>4</sup>*Software*: ou programa de computador, é uma sequência de instruções a serem seguidas e/ou executadas, na manipulação, redirecionamento ou modificação de um dado/informação.

<sup>5</sup>*DIN*: do alemão Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normatização) é a organização nacional na Alemanha para padronização, representante da International Standardization Organization (Organização Internacional para a Padronização – ISO) no país.

<sup>6</sup>*Têmpera*: Tratamento térmico de endurecimento caracterizado pelo resfriamento em velocidade superior a velocidade crítica de têmpera de uma liga ferro-carbono, a partir de uma temperatura acima da zona crítica para os aços hipoeutetóides e geralmente dentro da zona crítica para os aços hipereutetóides, resultando em transformação da austenita em martensita.

<sup>7</sup>*Revenimento*: É um processo feito após o endurecimento por têmpera. Peças que sofreram têmpera tendem a ser muito quebradiças. A fragilidade é causada pela presença da martensita. A fragilidade pode ser removida pelo revenimento. O resultado do revenimento é uma combinação desejável de dureza, ductilidade, tenacidade, resistência e estabilidade estrutural. As propriedades resultantes do revenimento dependem do aço e da temperatura do revenimento [www.cimm.com.br].

<sup>8</sup>*Dureza Rockwell*: é um método de medição direta de dureza desenvolvido por Stanley Pickett Rockwell em 1922, nos Estados Unidos. É um dos mais utilizados em indústrias e um dos mais simples e que não requer habilidades especiais do operador. Além disso, várias escalas diferentes podem ser utilizadas através de possíveis combinações de diferentes penetradores e cargas, o que permite o uso deste ensaio em praticamente todas as ligas metálicas, assim como em muitos polímeros. Sua unidade é HRC.

<sup>9</sup>*Diagrama TTT*: também conhecido como diagrama de transformação isotérmico ou curva TTT, é um gráfico que representa a temperatura, transformação e tempo de um processo. A evolução da transformação pode ser representada por uma família de curvas que indicam o percentual de transformação ao longo do tempo.

<sup>10</sup>*Martensita*: fase metaestável que corresponde a uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro. É uma fase extremamente dura.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. F. Archard; *Contact and Rubbing of flat surfaces*. Journal of applied physics, pp. 981-988
- [2] J. A. Behrens; F. Schäfer; *Prediction of wear in hot forging tools by means of finite-element-analysis*. J. Mater Process Tech 167 (2005), pp. 309-315
- [3] B. A. Behrens; *Finite element analysis of die wear in hot forging processes*. Cirp Ann-Manuf Techn 57/1 (2008), pp. 305-308
- [4] R. L. Norton; *Projeto de máquinas, uma abordagem integrada*. Bookman Publisher,
- [5] Projekt; *FEM-Simulation des Werkzeugsversagens bei Warmmassivumformprozessen infolge thermisch-mechanischer Materialermüdung*. IBF (Institut für Bildsame Formgebung, RWTH-Aachen) und IFUM (Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover), 2010
- [6] E. G. Dieter; *Mechanical Metallurgy*. Guanabara Koogan S.A., Brazil, 1981
- [7] B. A. Behrens; A. Bouguecha; T. Hadifi et al.; *FEM-*

*Simulaton der Werkzeugversagens bei Warmmassivumformprozessen infolge thermisch-mechanischer Materialermüdung.* Schmiede Journal /09 (2011), pp. 42-46

- [8] B. A. Behrens; F. Schäfer; *Vorhersage des Werkzeugversagens durch Materialermüdung in der Warmmassivumformung.* Springer-Verlag, Düsseldorf, 2008
- [9] M. L. Santaella; M. Muckelbauer; G. Hirt; *Mechanical fatigue prediction – Welded tools.* Forge User Meeting,

Cannes, France (2012)

- [10] M. Knörr; *Auslegung von Massivumformprozessen gegen Versagen durch Ermüdung.* Bericht: Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Springer-Verlag, Heidelberg, 1995
- [11] S. Gao; *Life estimation of forging dies.* VDI-Fortschritt-Berich, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005
- [12] E. Doege, B.-A. Behrens; *Handbuch Umformtechnik.* 2. ed., Springer, Berlin, Heidelberg, 2010



**Luana De Lucca de Costa** - Graduação em Engenharia Mecânica pela Faculdade SATC (2012) e mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2014). Atualmente é professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico no Instituto Federal de Educação do Rio Grande do Sul e doutoranda do programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica

e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2014). Tem experiência na área de Fabricação Mecânica, Ciência dos Materiais e Metalurgia Física.

luana.lucca@ufrgs.br

<http://lattes.cnpq.br/9328075528327119>

**Juliana Zottis** - Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, tendo como foco de pesquisa processos de fabricação. Mestre em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais - Processos de Fabricação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com ênfase em Simulação Numérica Computacional. Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Maria (2010). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Engenharia Mecânica, atuando principalmente nos seguintes temas: simulação numérica computacional, processos de fabricação, trefilação de materiais metálicos, tratamento térmico por indução, máquinas agrícolas, dosadores pneumáticos, danos em sementes.

juliana.zottis@ufrgs.br

<http://lattes.cnpq.br/4986396164438452>

**Rodrigo Prestes Limberger** - Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2013. Mestre em Engenharia. Trabalhou como pesquisador no Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, atuante na área de Forjamento. Foco nas áreas de Simulação Computacional e Forjamento em Matriz Aberta.

rodrigo.limberger@ufrgs.br

<http://lattes.cnpq.br/2937140229454945>

**Alberto Moreira Guerreiro Brito** - Possui graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1983), mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1988) e doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2006). Atualmente é revisor do periódico Powder Technology (0032-5910) e engenheiro da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Conformação Mecânica, atuando principalmente nos seguintes temas: simulação numérica de processos, forjamento, projeto de processos de forjamento, elementos finitos e projeto de matrizes.

brito@ufrgs.br

[Http://lattes.cnpq.br/3650543384264717](http://lattes.cnpq.br/3650543384264717)

**Alexandre da Silva Rocha** - Doutor em Ciência dos Materiais em 2000, pelo programa de pós graduação em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Em 2001 a 2004 foi pesquisador no projeto distortion engineering da universidade de Bremen na Alemanha. Desde 2005 é professor associado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É orientador de mestrado e doutorado pelo PPG3M (Programa de pós-graduação em engenharia de minas, metalúrgica e materiais) da UFRGS. Atua na área de engenharia de materiais e metalurgia, com ênfase em metalurgia de transformação. Suas principais linhas de atuação são tratamentos superficiais, tensões residuais e conformação mecânica.

alexandre.rocha@ufrgs.br

<http://lattes.cnpq.br/8989325256190621>

**Lírio Schaeffer** - Engenheiro Mecânico, Doutorado em Conformação Mecânica - Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule/Aachen/Alemanha (1982). Desde 1976 é Professor Titular na Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS - Departamento de Metalurgia e coordena o Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), atuando principalmente nas seguintes áreas: forjamento, estampagem, metalurgia do pó, materiais biomédicos. Tem experiências na área de Energias Alternativas. Atualmente é consultor ad hoc da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), consultor do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Consultor da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

schaefer@ufrgs.br

<http://lattes.cnpq.br/1093242836059112>