



PROJETO DE LIGAS PARA FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO A QUENTE¹

Mário Boccalini Junior²
Roberto Martins de Souza³
Izabel Fernanda Machado⁴
Ana Paola Villalva Braga⁵
Rodrigo Lima Stoeterau⁶
Marcelo Ferreira Moreira⁷

Resumo

A vida útil das ferramentas empregadas em processos de conformação a quente é fator de competitividade para seus fabricantes e usuários e ela é fundamentalmente determinada pelo material metálico que compõe a ferramenta. Este trabalho apresenta projeto conduzido por IPT, EPUSP e Gerdau, com financiamento do BNDES-Funtec e da própria Gerdau, no período entre 2012 e 2015. Objetiva-se desenvolver sistema para projetar ligas para ferramentas de conformação a quente, tendo como base a simulação computacional do dano progressivo das ferramentas durante o serviço e da relação desse dano com a microestrutura da liga. As ferramentas de conformação a serem modeladas são cilindro de laminação a quente, matriz fechada de forjamento a quente e molde para fundição sob pressão. O sistema será baseado na simulação do comportamento do material da ferramenta frente às solicitações termomecânicas e tribológicas, em níveis macroscópico e microscópico, impostas a ela pelo processo de conformação. São descritas as premissas e a metodologia do projeto, destacando a aplicação de simulação computacional no nível microestrutural.

Palavras-chave: Modelagem de desgaste; Ferramenta de conformação a quente.

ALLOY DESIGN FOR HOT WORKING TOOLS

Abstract

An on-going four years project funded by BNDES and Gerdau and conducted by IPT, EPUSP and Gerdau is described. The objective of the project is to develop the modeling of hot working tools progressive damage based on physical and mechanical properties of the micro-constituents of the tool material, thus allowing to design materials with “engineered microstructure” for high performance hot working tools. Rolling mill roll, forging die and die-casting die were selected as the hot working tools to be studied. Modeling will mirror the behavior of the tool material when submitted to macroscopic and microscopic thermomechanical and tribological loads resulting from the hot working processes.

Key words: Wear modeling; Hot working tool.

¹ Contribuição técnica ao 10º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 8 a 10 de agosto de 2012, São Paulo, SP.

² Engenheiro metalurgista, Dr. Pesquisador. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-IPT

³ Engenheiro mecânico, Professor Doutor Escola Politécnica da USP

⁴ Engenheira metalurgista. Professora Livre Docente, Escola Politécnica da USP

⁵ Engenheira metalurgista ME, Pesquisadora assistente. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-IPT

⁶ Engenheiro mecânico. Professor Doutor, Escola Politécnica da USP

⁷ Engenheiro metalurgista ME, Pesquisador. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-IPT





1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos processos metalúrgicos de transformação desenvolvem-se sob elevadas temperaturas, seja para conformar os materiais no estado líquido, seja para provocar a diminuição da sua resistência mecânica no estado sólido. Três desses processos são abordados no presente projeto: laminação a quente de aços, forjamento a quente de aços e fundição sob pressão de ligas de alumínio. A vida útil das ferramentas empregadas nestes processos é fator de competitividade para seus fabricantes e usuários.

No caso dos produtos siderúrgicos laminados, o processo de laminação a quente é considerado vital por estar presente no fluxograma de produção de todos os tipos de produtos finais. Nesse processo, qualidade e produtividade estão intimamente ligadas ao desempenho em serviço dos cilindros de laminação, pois:

- a qualidade dos produtos laminados é determinada principalmente pela precisão e repetibilidade de sua forma, que são reflexos diretos da geometria e do estado da superfície dos cilindros; e
- a produtividade do laminador é parcialmente determinada pelo tempo de serviço ininterrupto que o cilindro de laminação pode suportar, mantendo a qualidade do produto laminado acima do nível mínimo estabelecido; a minimização das paradas para troca de cilindros, possibilitada por cilindros mais resistentes à degradação, resulta diretamente em aumento da produtividade da linha de produção.

O mercado de cilindros de laminação, por sua vez, caracteriza-se por ampla globalização e extrema pulverização, criando a necessidade de os fabricantes produzirem produtos diferenciados para garantir a rentabilidade do negócio. Em geral, o fator de diferenciação é a vida útil do cilindro.

No caso dos produtos siderúrgicos forjados, o desempenho da matriz de forjamento pode ser responsável por até 30% do custo de produção do produto forjado⁽¹⁾ e, portanto, a vida útil da matriz afeta diretamente a competitividade do produto produzido e/ou a rentabilidade do negócio. Adicionalmente, a indústria de forjamento está caminhando fortemente na direção de aumentar a precisão dimensional dos forjados e de diminuir o sobremetal descartado no processo de forjamento.⁽²⁾ Isto implica diretamente a necessidade de diminuição da velocidade do dano progressivo das matrizes, uma vez que o nível máximo de dano tolerado passa a ser menor.

No caso do processo de fundição sob pressão de ligas de alumínio, a vida útil do molde de injeção exerce influência decisiva sobre o custo e sobre a qualidade do produto fundido. De um lado, deve-se considerar o próprio custo do molde, que, estima-se, é responsável por 20% do custo do produto final; de outro, o papel do molde como “cavidade conformadora” da peça fundida. O processo de fundição sob pressão notabiliza-se por permitir a obtenção de peças com elevados níveis de precisão dimensional e qualidade superficial (*near net shape*). Isso é consequência da principal característica do processo: a aplicação de pressão superior à atmosférica durante o enchimento do molde pelo metal líquido e durante a solidificação deste último no interior do molde, o que faz com que a peça fundida reproduza fielmente as dimensões e o acabamento superficial do molde, virtualmente rígido nas condições de processo. Desta forma, qualquer tipo de dano presente na cavidade do molde será reproduzido na peça fundida como sobremetal, prejudicando a qualidade superficial e/ou a precisão dimensional e gerando, conseqüentemente, a necessidade de retrabalho da peça (com impacto adicional sobre o seu custo).



A vida útil dessas ferramentas de conformação é determinada fundamentalmente pela velocidade de progressão dos inevitáveis danos a elas impostos pelo uso. Esta velocidade, por sua vez, é determinada pelas características metalúrgicas do material que constitui a ferramenta (isto é, morfologia e propriedades dos seus microconstituintes).

Como tentativas de aumentar a resistência a estes danos, identificam-se três vertentes clássicas no desenvolvimento de materiais para estes três tipos de ferramentas de conformação:

- seleção e adaptação de ligas empregadas em processos de transformação a frio intensivos em desgaste;⁽³⁾
- melhorias incrementais de ligas amplamente utilizadas há mais de 50 anos, como os aços da série H;⁽⁴⁾
- aplicação de processos de condicionamento da superfície das ferramentas ("engenharia de superfície").⁽⁵⁾

Em todas estas vertentes o desenvolvimento tem sido conduzido por meio de métodos empíricos (assistidos ou não por modelos estatísticos e ensaios laboratoriais simplificados), do que decorrem soluções conservadoras com tempo e custo que estão se tornando proibitivos.

Este trabalho apresenta projeto a ser conduzido por IPT, EPUSP e Gerdau, com financiamento do BNDES-Funtec e da própria Gerdau, no período entre 2012 e 2015. Objetiva-se desenvolver sistema para projetar ligas para ferramentas de conformação a quente. O sistema a ser desenvolvido será baseado na simulação do comportamento do material da ferramenta frente às solicitações termomecânicas e tribológicas impostas a ela pelo processo de conformação, tendo como dados de entrada as características dos microconstituintes do material (propriedades físicas e mecânicas fundamentais, morfologia, distribuição).

Esse sistema deverá ser empregado no sentido inverso da relação entre microestrutura e comportamento da ferramenta; isto é, dadas as solicitações termomecânicas e tribológicas sobre a ferramenta, simula-se o comportamento de materiais com diferentes combinações de características dos seus microconstituintes, selecionando as melhores combinações para uma etapa final de validação experimental (*alloy design*). Desta forma, trabalha-se com largo espectro de alternativas de materiais, contemplando soluções inovadoras a um custo competitivo.

2 MATERIAL E MÉTODO

O método selecionado para a condução do projeto contempla a modelagem numérica baseada em equações constitutivas que correlacionam o comportamento de cada fase presente na microestrutura do material da ferramenta (deformação elasto-plástica e/ou fratura) e as tensões macroscópicas e microscópicas atuantes sobre estas fases em decorrência do processo em que a ferramenta é empregada. Esta correlação determina o mecanismo de dano da ferramenta. Neste caso, utilizam-se, nas equações constitutivas, as propriedades físicas e mecânicas fundamentais de cada fase da microestrutura.

Este método permite elevada precisão na avaliação das solicitações impostas às ferramentas e da evolução do dano daí decorrente, permitindo reproduzir fielmente os fenômenos que ocorrem na prática industrial. Ao mesmo tempo, por ser baseada em simulações numéricas, requer um volume menor de informações e



permite maior abrangência quanto ao número de situações que podem ser analisadas.

As atividades conduzidas no projeto serão condicionadas pelas seguintes premissas:

- as ferramentas de conformação a serem modeladas são cilindro de laminação a quente, matriz de forjamento a quente e molde para fundição sob pressão;
- os danos progressivos destas ferramentas são trincamento por fadiga térmica, desgaste abrasivo e desgaste por deslizamento, como demonstra o estado da arte;
- os modelos serão desenvolvidos e validados em duas escalas diferentes:
 - modelagem e validação aplicadas a ensaios representativos dos fenômenos tribológicos em corpos de prova; e
 - modelagem e validação aplicadas à operação das ferramentas de conformação.

Essas atividades são descritas a seguir.

2.1 Modelagem e Validação Aplicadas a Ensaios em Corpos de Prova

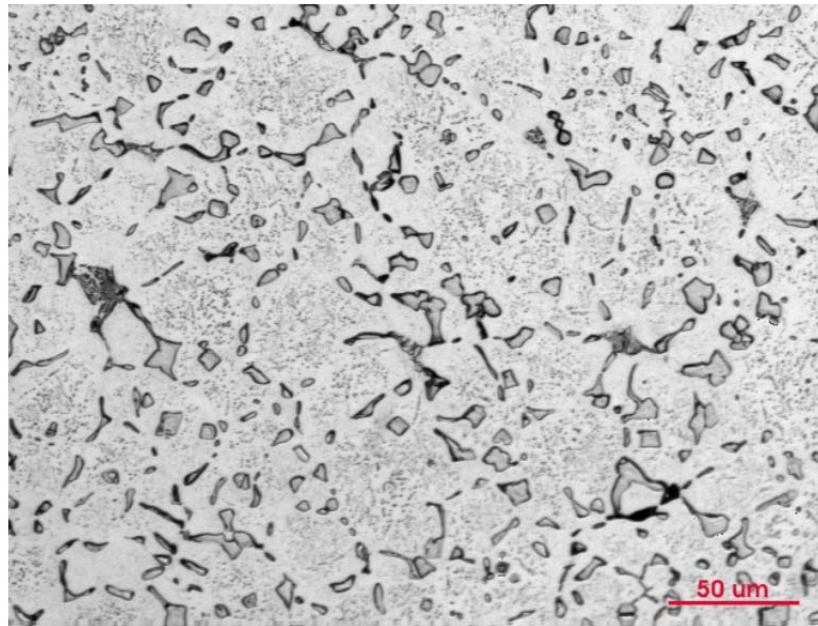
- 1 - Quantificação das solicitações termomecânicas macroscópicas impostas a corpos de prova de ensaios laboratoriais de fadiga térmica, desgaste abrasivo e desgaste por deslizamento, combinando modelagem computacional por métodos numéricos e ensaios instrumentados. As solicitações macroscópicas serão calculadas por meio de simulação por elementos finitos com o software ABAQUS.

Os ensaios instrumentados serão realizados em equipamentos específicos disponíveis no IPT e na EPUSP.

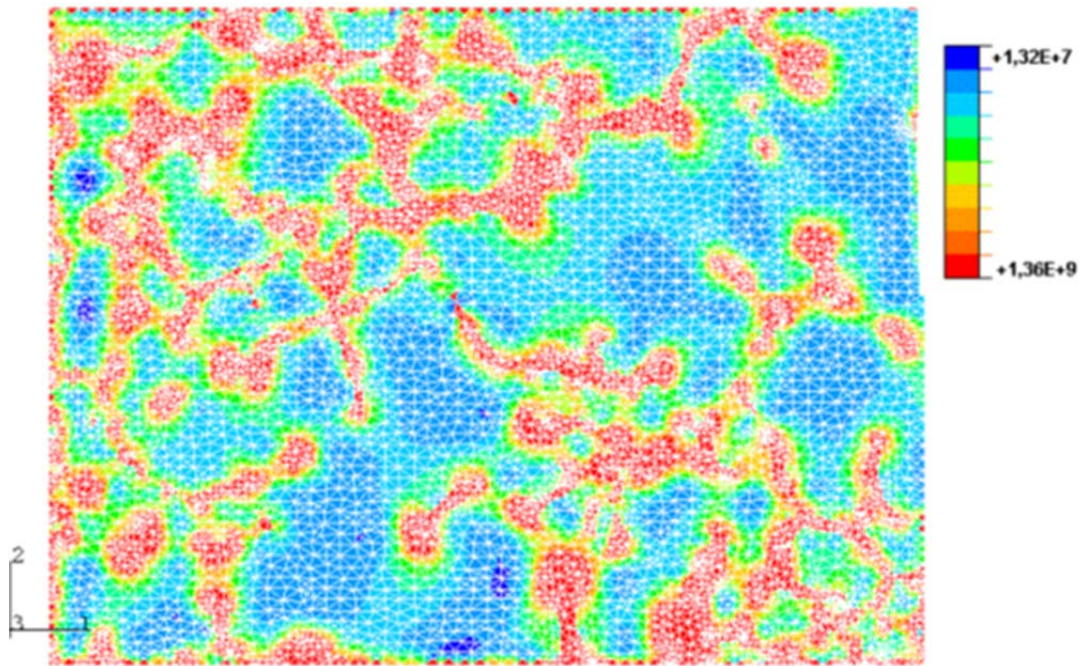
- 2 - Modelagem computacional da distribuição de microtensões na microestrutura do material dos corpos de prova, combinando os resultados obtidos em (1) com as características microestruturais deste material. Serão utilizados materiais classicamente empregados nas ferramentas de conformação a quente, representados por três tipos de microestruturas: martensita revenida, martensita revenida com carbonetos eutéticos e martensita revenida com tratamento superficial.

A distribuição de microtensões será determinada por meio do seguinte procedimento: i) digitalização de micrografia e obtenção de malha de elementos finitos na qual estarão diferenciados os microconstituintes do material estudado; ii) a malha resultante de (i) será utilizada como entrada do software ABAQUS, em que serão atribuídas propriedades mecânicas e térmicas diferenciadas para os elementos da malha (os valores destas propriedades serão obtidos na literatura ou por meio de ensaios específicos); iii) realização dos cálculos de tensões termomecânicas em escala microscópica, utilizando os resultados obtidos em (i) e (ii) juntamente com as solicitações macroscópicas determinadas na primeira etapa (1).

As Figuras 1 e 2 mostram exemplos de modelagem computacional da distribuição de microtensões na microestrutura de ligas metálicas multifásicas. A Figura 1 refere-se a aço rápido para cilindro de laminação submetido a ciclagem térmica e a Figura 2 refere-se a deslizamento de cilindro rígido sobre ferro fundido vermicular.

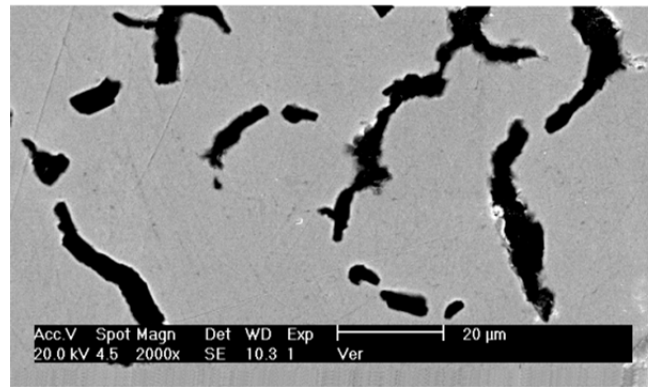


(a)

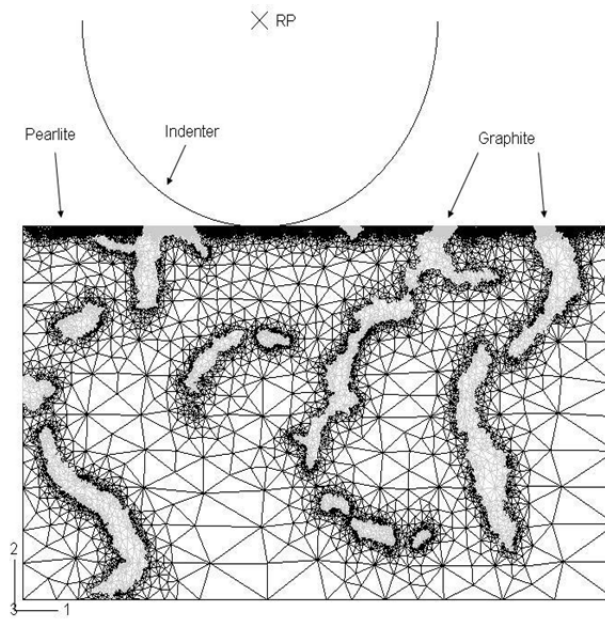


(b)

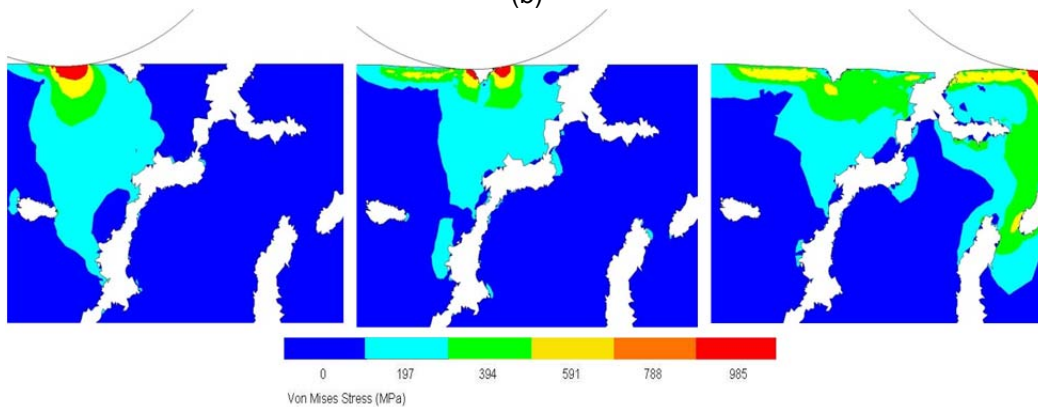
Figura 1- Modelagem computacional da distribuição de micro-tensões na microestrutura de aço rápido para cilindros submetido a ciclagem térmica. (a) Microestrutura: carbonetos MC em matriz de martensita revenida. (b) Distribuição de micro-tensões calculadas pelo critério de Von Mises.⁽⁶⁾



(a)



(b)



(c)

Figura 2- Modelagem computacional da distribuição de micro-tensões na microestrutura de ferro fundido vermicular submetido a deslizamento. (a) Microestrutura: grafita vermicular em matriz perlítica. (b) (c) Distribuição de micro-tensões calculadas pelo critério de Von Mises.⁽⁷⁾

- 3 - Modelagem computacional do dano de corpos de prova de ensaios laboratoriais de fadiga térmica, desgaste abrasivo e desgaste por deslizamento, combinando a distribuição de micro-tensões estabelecida em (2) e modelos analíticos e/ou computacionais que descrevem estes tipos de dano.



O dano progressivo é controlado pelo resultado do acoplamento das tensões (e consequentes deformações) em escalas macroscópica e microscópica. Os esforços daí resultantes estão associados aos fenômenos tribológicos prevalentes nas ferramentas (fadiga térmica, desgaste abrasivo e desgaste por deslizamento), permitindo estabelecer as relações de causa e efeito determinadas pelas características microestruturais do material considerado.

A Figura 3 mostra exemplos de equipamentos laboratoriais empregados nos ensaios de abrasão, deslizamento e fadiga térmica.

- 4 - Validação experimental: cotejamento dos resultados de (3) com os resultados de ensaios laboratoriais de fadiga térmica, desgaste abrasivo e desgaste por deslizamento. O dano dos corpos de prova será analisado por meio das seguintes técnicas: medição de perfil (medição por coordenadas), quantificação da malha de trincas na superfície por meio de análise de imagem, quantificação da profundidade de trincas na seção transversal, caracterização microestrutural da superfície e da seção transversal (microscopias óptica e eletrônica de varredura). No caso de os resultados não serem aderentes, o modelo será revisado e novo cotejamento entre modelo e experimento laboratorial será efetuado (retroalimentação).

2.2 Modelagem e Validação Aplicadas à Operação das Ferramentas de Conformação

O sistema resultante da condução das etapas (1) a (4) representa um estágio intermediário do sistema objetivado no projeto, pois reproduz o comportamento de corpos de prova com geometria mais simples do que a das ferramentas de conformação, bem como sujeitos a solicitações isoladas e não-combinadas. Desta forma, as etapas do conjunto (B) serão idênticas às etapas do conjunto (A), exceto pelo fato de se aplicarem às ferramentas de conformação em lugar de a corpos de prova. Naturalmente isso implica, de um lado, maior grau de complexidade na sua condução e, de outro, maior representatividade dos seus resultados.

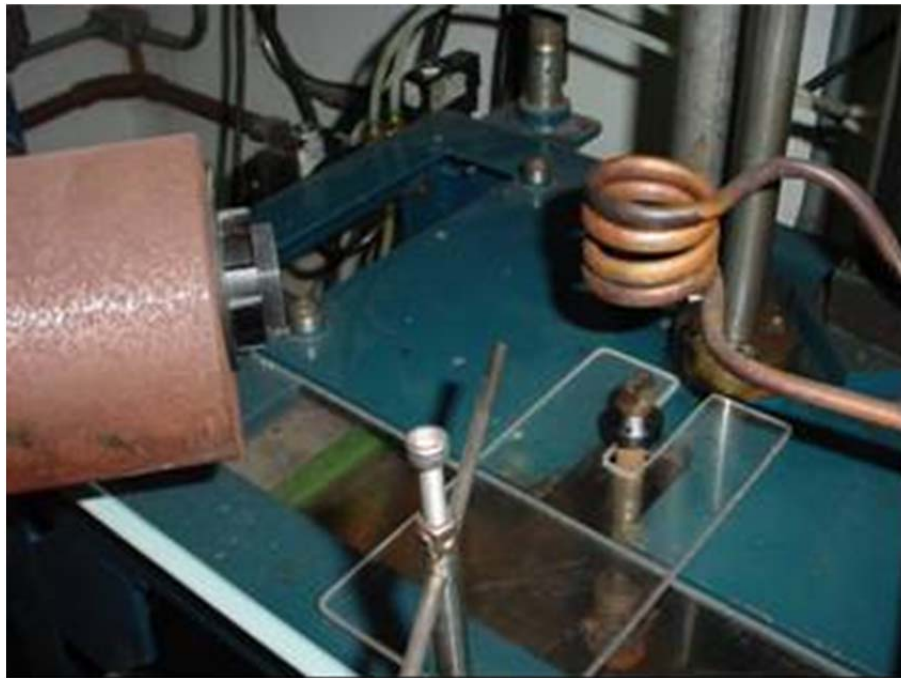
Neste caso, a validação experimental do sistema será efetuada por meio de operações em equipamentos-piloto, a saber: laminação de tiras de aço ao carbono no laminador-piloto do IPT, forjamento de peças de aço ao carbono na prensa-piloto do IPT e fundição de liga de alumínio em injetora-piloto a ser adquirida com recursos do projeto. Todas as variáveis de processo serão monitoradas por sistemas de aquisição de dados específicos (temperatura de processamento, forças aplicadas, temperatura das ferramentas).

O dano das ferramentas será analisado por meio de técnicas similares às aplicadas no conjunto (A): medição de perfil (medição por coordenadas), quantificação da malha de trincas na superfície da ferramenta por meio de análise de imagem, quantificação da profundidade de trincas na seção transversal, caracterização microestrutural da superfície e da seção transversal (microscopias óptica e eletrônica de varredura).

A Figura 4 mostra os equipamentos-piloto a serem empregados no projeto.



(a)



(b)

Figura 3- Equipamentos para ensaios laboratoriais. (a) Tribômetro para ensaios de abrasão e de deslizamento. (b) Máquina para ensaio de fadiga térmica.



(a)



(b)

Figura 4- (a) Laminador piloto com 50 tf de capacidade. (b) Prensa de forjamento com 1500 tf de capacidade.

3 RESULTADOS ESPERADOS

O objetivo último do desenvolvimento do sistema proposto neste projeto é utilizá-lo como instrumento confiável para projetar ligas metálicas de alto



desempenho destinadas a ferramentas de conformação a quente, substituindo o tradicional procedimento de tentativa-e-erro, com ganhos de custo, desempenho e reprodutibilidade para fabricantes e usuários destas ferramentas na indústria metalúrgica de transformação.

Levando em conta que a vida útil dessas ferramentas é fator de competitividade tanto para estes produtores como para seus clientes (usuários de ferramentas de conformação), e que ambos estão invariavelmente expostos à competição global, é certo que o emprego deste sistema possibilitará tanto o estabelecimento de uma barreira tecnológica na competição pelo mercado interno (onde os produtores nacionais vêm enfrentando substantiva redução de participação), como a transposição de barreiras para o acesso a mercados globais.

Como externalidades a serem utilizadas em outros setores, destacam-se as seguintes:

- a) O sistema desenvolvido para as ferramentas utilizadas especificamente na execução do projeto poderá ser replicado para ferramentas empregadas em outros processos de conformação a quente, mesmo fora do setor metalúrgico (matriz de extrusão de materiais metálicos, molde de prensagem de vidro, molde de prensagem de pós cerâmicos).
- b) O desenvolvimento do sistema estabelecerá as bases para níveis superiores de complexidade, abrangendo outros componentes sujeitos a solicitações tribológicas similares (sistemas de frenagem, sistema roda/trilho).
- c) O sistema para projetar ligas é o primeiro passo para a construção de um sistema de previsão do ciclo de vida de ferramentas de conformação.

REFERÊNCIAS

- 1 RAHN, R., SCHRUFF, I. Improved tool performance and cost control in the forging industry- a challenge for innovative tool steels. In: 8TH INTERNATIONAL TOOLING CONFERENCE, 2009, Aachen-Germany. Aachen: RWTH Aachen University, 2009. p. 213-224.
- 2 BEHRENS, B.A., DOEGE, E., REINSCH, S., TELKAMP, K., DAEHNDEL, H., SPECKER, A. Precision forging processes for high-duty automotive components. Journal of Materials Processing and Technology, 185, p. 139-146, 2007.
- 3 BOCCALINI, M. JR., SINATORA, A. Microstructure and wear resistance of high speed steels for rolling mill rolls. In: 6TH INTERNATIONAL TOOLING CONFERENCE, 2002, Karlstad-Sweden. Karlstad: Karlstad University, 2002. p. 425-438.
- 4 KLOBCAR, D., TUSEK, J., TALJAT, B. Thermal Fatigue of materials for die-casting tooling. Materials Science and Engineering A, 472, p. 198-207, 2008.
- 5 PERSSON, A., HOGMARK, S., BERGSTRÖM, J. Thermal cracking of surface engineered hot work tool steels. Surface & Coatings Technology, 191, p. 216-227, 2005.
- 6 SERANTONI, C.R. Fadiga Térmica de Ferros Fundidos Brancos Multicomponentes, Dissertação Mestrado, EPUSP 2003, 131p.
- 7 FUKUMASU, N.K., PELEGRINO, P.L., CUEVA, G., SOUZA, R.M., SINATORA, A. Numerical analysis of the stresses developed during the sliding of a cylinder over compact graphite iron, Wear, 259, p.1400-1407, 2005.