



TECNOLOGIA  04/03/19

# Forjamento a quente com máscaras metálicas como revestimento superficial

O uso de máscaras metálicas para proteção contra falhas tem se mostrado eficiente em matrizes para o forjamento a quente.

A avaliação em simulador computacional permitiu uma redução de 20% na temperatura superficial da matriz, aumentando a vida útil do ferramental significativamente

Nas indústrias de forjamento vêm sendo testadas diversas técnicas metalúrgicas para a melhoria de superfícies objetivando tanto o aumento da longevidade das matrizes quanto o aumento da produtividade das prensas.

Isto porque, durante o processo de forjamento a quente, as matrizes estão sujeitas a tensões mecânicas, a tensões de origem térmica (induzidas pelo ciclo térmico e pelas operações sucessivas de forjamento), que danificam suas superfícies e camadas imediatamente abaixo destas.

Essas tensões estão presentes tanto no processo de preenchimento da matriz, deformação e fluxo de material no interior da cavidade, quanto na extração do componente forjado, quando a matriz é refrigerada pelo spray lubrificante.

Segundo Paschke et al, os problemas relacionados ao desgaste e fadiga térmica das ferramentas são responsáveis por 70% das paradas de produção na indústria. Para Shirgaokar, os custos das matrizes podem constituir até 30% do custo de produção de uma peça, através, respectivamente, do custo de produção da matriz e das atividades de reparo, tempo de parada da produção, retrabalho e descarte (sucata).

Neste contexto, o desenvolvimento das técnicas baseadas em simulação numérica computacional, como o método de elementos finitos (FEM), aliado as novas tecnologias de produção de aços mais resistentes, tem proporcionado uma ligação vital entre avanços em design de ferramentas e equipamentos, por um lado, e uma melhor compreensão do comportamento dos materiais, por outro.

Os dados de entradas e as condições de contorno do modelo de elementos finitos incluem as características do material da peça (tensão de escoamento e propriedades térmicas) e da interface ferramenta/peça (propriedades de atrito e de transferência de calor), bem como geometrias de peças e ferramental. Já as saídas incluem uma previsão do carregamento do processo, deformação, velocidade de deformação e gráficos da distribuição de temperatura, além de deformações na ferramenta.

Tais resultados são importantes informações que auxiliam na escolha da capacidade do equipamento, determinação do sucesso ou falha no que diz respeito ao material, sua capacidade de conformação (ou conformabilidade), e estimativa de fontes prováveis de falha do ferramental.

Portanto, este trabalho visa a análise do comportamento térmico do ferramental no processo de forjamento a quente através do método de elementos finitos. Para que seja possível validar o modelo numérico, analisou-se experimentalmente um forjamento nas mesmas condições, utilizando-se uma prensa hidráulica com e sem a utilização de máscaras metálicas. Os dados adquiridos experimentalmente são base para a análise comparativa dos resultados simulados.

Tal análise é uma das etapas do projeto de pesquisa Bragecrim “Evaluation of sheet metal covers to improve tool life in forging” na parceria entre LdTM (UFRGS) e IBF (RWTH Aachen University) na Alemanha. Através deste projeto, busca-se desenvolver um método mais prático e menos oneroso que os tratamentos superficiais atualmente empregados na tentativa de melhorar a vida útil de ferramentas de forjamento a quente. Com este intuito propõe-se a aplicação de chapas de alta resistência como insertos metálicos ou

“máscaras metálicas” como revestimento em matrizes de forjamento a quente.

## Materiais e métodos

A fim de verificar os parâmetros do processo e analisar o comportamento térmico durante o forjamento a quente, foram realizados experimentos com matriz aberta (plana), conforme fluxograma apresentado na figura 1.

Os forjamentos experimentais foram realizados em uma prensa hidráulica EKA® com capacidade de 40 toneladas, utilizando matrizes de forjamento com geometria plana fabricadas de aço AISI H13. A matriz inferior foi instrumentada com termopares tipo K para registro dos dados de temperatura. O posicionamento dos termopares é apresentado na figura 2(a).

Os billets foram aquecidos em um forno elétrico Sanchis® a temperatura de 1.100°C. A matriz inferior foi aquecida por contato até 300°C com utilização de resistência elétrica (figura 2b) com temperatura controlada através de dispositivo controlador Novus®.

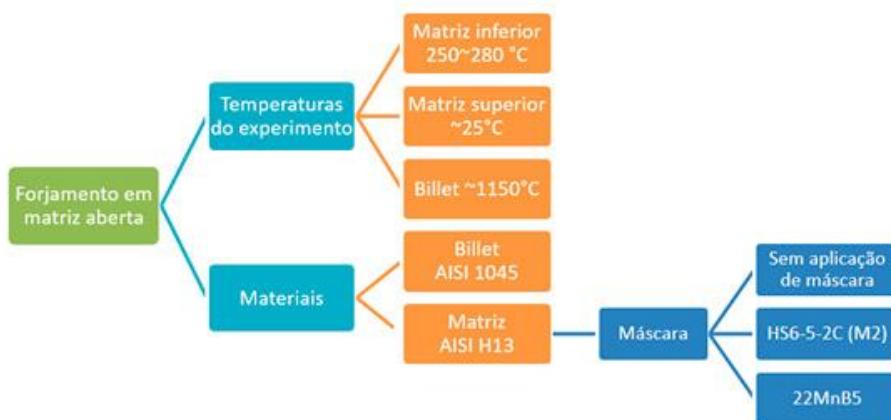


Figura 1 – Fluxograma dos parâmetros utilizados nos experimentos com matriz aberta

Foram avaliadas as temperaturas da matriz inferior utilizando os materiais 22MnB5 e HS6-5-2C (M2) como máscaras metálicas, além da aplicação de diferentes forças de forjamento.

As máscaras com 1,5 mm de espessura foram mantidas por cerca de 15 minutos sobre a matriz inferior aquecida a 300°C antes do início do experimento para homogeneização da temperatura, sendo que foram registrados dados de temperatura, força e tempo durante o processo de forjamento. Os mesmos registros foram feitos sem a utilização de máscara.

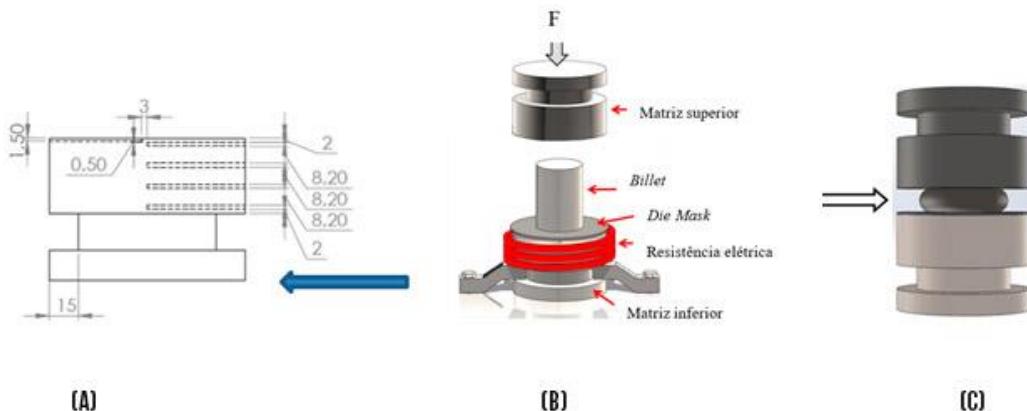


Figura 2 – Desenho esquemático (a) da matriz inferior com posicionamento dos termopares, (b) da montagem experimental para o processo de forjamento com aquecimento da matriz inferior e (c) do final do forjamento

O processo de forjamento a quente envolve intensa troca térmica entre o billet forjado e as matrizes em contato. Como a pressão de contato é um dos parâmetros que afetam a resistência térmica de contato, foram avaliadas três forças de processo. Foi utilizado o sistema de aquisição de dados marca HBM, modelo Spider 8, ligado a um computador com o software de aquisição de dados Catman 4.0.

Para verificar a perda de temperatura do aço para o ambiente quando retirado do forno foi utilizado um termógrafo da marca Fluke, modelo Ti 400, com a utilização do software Fluke Smartview 2.0.

Os termopares tipo K foram conectados a um sistema de aquisição de dados marca National Instruments, ligado a um computador com o software de aquisição de dados da mesma empresa. Conforme apresentado na figura 2(a), optou-se por avaliar a temperatura na superfície de contato com o billet e sua distribuição até o centro da matriz inferior, em torno de 25 mm abaixo da superfície.

Após o forjamento foram realizadas medições de dureza nas chapas utilizadas como máscaras a fim de avaliar possíveis mudanças na microestrutura do material das chapas. Os perfis de dureza foram adquiridos utilizando um microduruômetro Vickers Insize modelo ISH-TDV1000 e carga de HV1, com uma média de 10 indentações por análise em três direções.

Através dos resultados experimentais obtidos, um modelo numérico foi construído, sendo que o conjunto matriz/máscara/billet foi modelado no software SolidWorks®, e exportado para o software de simulação numérica computacional DeformTM. As propriedades do material foram inicialmente retiradas do banco de dados do software e, em seguida, foram inseridos dados fornecidos pelo fabricante.

Sabe-se que a fadiga térmica é um dos fatores críticos do processo, a qual contribui para o desgaste da ferramenta, e que pode ser analisada em função da troca térmica entre billet/matriz e entre billet/máscara/matriz. Por isso, a análise numérica inicial foi realizada utilizando os mesmos parâmetros do ensaio realizado em matriz aberta (tabela 1).

Parâmetro	Descrição
Força	60 kN
Deformação	2 mm
Tempo de contato	40 s
Espessura da máscara	1,5 mm
Materiais	Banco de dados do software
Temperaturas	Conforme figura 1

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na simulação numérica do processo de forjamento em matriz aberta

## Resultados e discussão

A distribuição de temperatura, tempo e força durante os experimentos de forjamento a quente são apresentados na figura 3. Pode-se observar que a força máxima foi atingida após 12 segundos, sendo que o tempo de transporte do corpo de prova até a prensa foi de 7 s e o contato inicial 5 s. Após este tempo percebe-se uma redução em torno de 100°C na temperatura do billet, já no final do processo de forjamento é observada uma redução de aproximadamente 360°C.

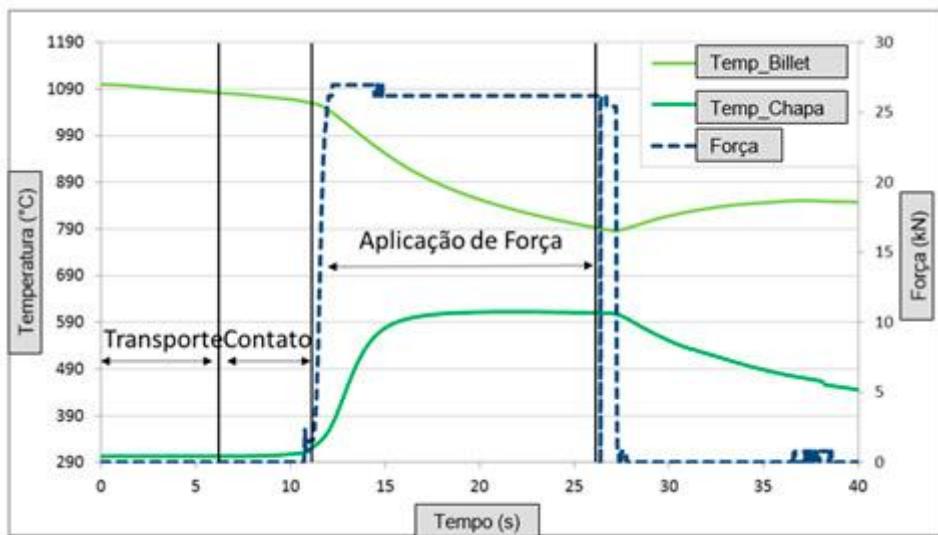


Figura 3 – Perfil de força, temperatura e tempo durante o ensaio de forjamento

Utilizando as máscaras metálicas sobre a matriz inferior, alterando o parâmetro força em três valores progressivos, e mantendo os mesmos parâmetros de tempo e temperatura, obteve-se os dados de temperatura referentes à superfície da chapa em contato com a matriz que podem ser observados na figura 4.

Para o forjamento com máscara de aço DIN 22MnB5 os valores de temperatura foram similares para as três forças ensaiadas, variando de 510°C a 525°C. No experimento com máscara de aço DIN HS6-5-2C foi verificada uma variação entre 450°C para a força de 25 kN e 520°C quando utilizada uma força de 59 kN.

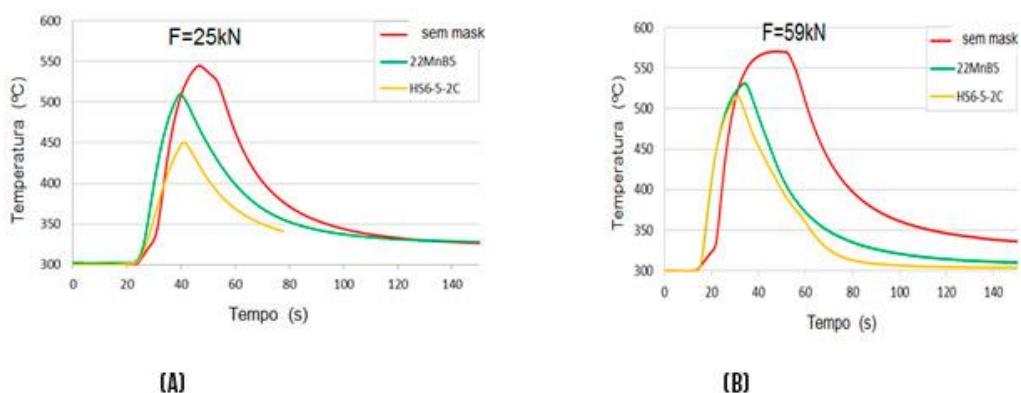


Figura 4 – Comportamento da temperatura com aplicação de diferentes forças (a) 25 kN e (b) 59 kN

A modelagem numérica, baseada no ensaio realizado experimentalmente, manteve os mesmos parâmetros de processo e propriedades dos materiais utilizados, exceto para o material das chapas. Inicialmente foram utilizados nas primeiras simulações o banco de dados do software e posteriormente foram inseridas as propriedades das chapas fornecidas pelo fabricante.

O primeiro modelo construído foi composto de corpo de prova (C45 a 1.100°C), matriz superior (H13 a 150°C) e inferior (H13 a 150°C). A figura 5(a) apresenta os valores simulados de temperatura da matriz inferior de forjamento sem a utilização de máscara metálica.

O perfil foi retirado nas mesmas posições do experimento realizado, conforme pode ser observado na figura 5(b), ou seja, na superfície em contato com o billet até o centro da matriz inferior. Observou-se um aumento da temperatura nos primeiros segundos da simulação, o que é coerente com os resultados experimentais onde a matriz chegou a temperatura aproximada de 575°C.

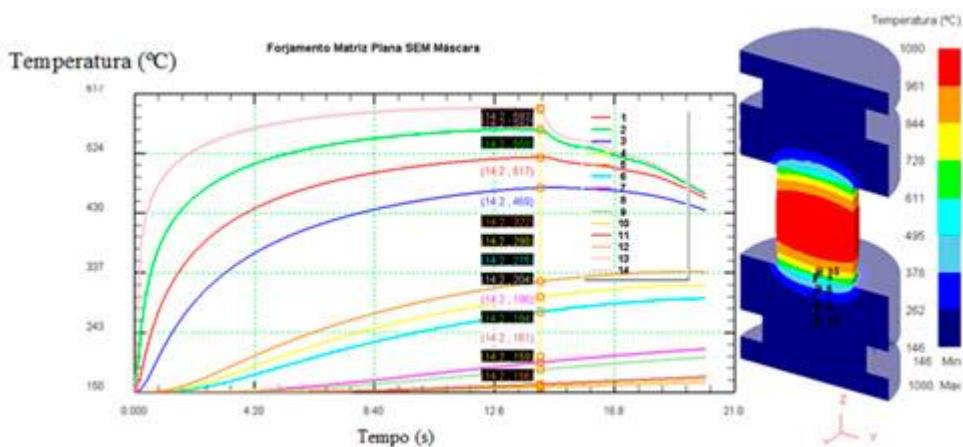


Figura 5 – Variação da temperatura na matriz durante o forjamento sem máscara (a) gráfico dos pontos medidos na matriz inferior e (b) desenho esquemático do modelo

O mesmo modelo inicial serviu como base para a análise do forjamento utilizando uma máscara metálica entre o corpo de prova a ser forjado e a matriz inferior (figura 6a), sendo que o material utilizado foi uma chapa de 1,5 mm de espessura do aço DIN 9Cr1Mo do banco de dados do

software.

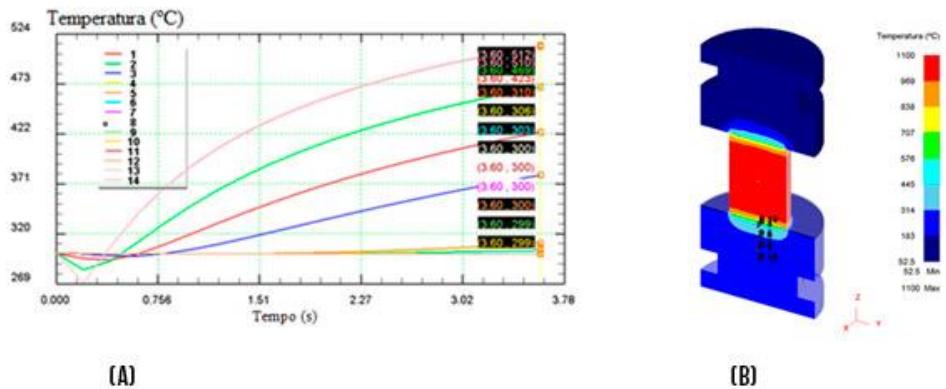


Figura 6 – (a) variação da temperatura na matriz durante o forjamento utilizando máscaras e (b) modelo numérico analisado

Conforme mostra a figura 6, ao inserir a chapa metálica no conjunto de forjamento simulado, a temperatura máxima apresenta uma redução de até 106°C. Quanto à matriz inferior, pode ser identificada uma temperatura de 510°C em 3,6 segundos do forjamento. Para que um perfil mais próximo da realidade seja obtido, a modelagem numérica deve ser realizada novamente, melhorando os parâmetros referentes a malha e as condições de contorno.

A análise quanto a distribuição da temperatura na chapa durante o processo está apresentada na figura 7, podendo ser observada na espessura da chapa e na superfície de contato com a matriz inferior e com o billet.

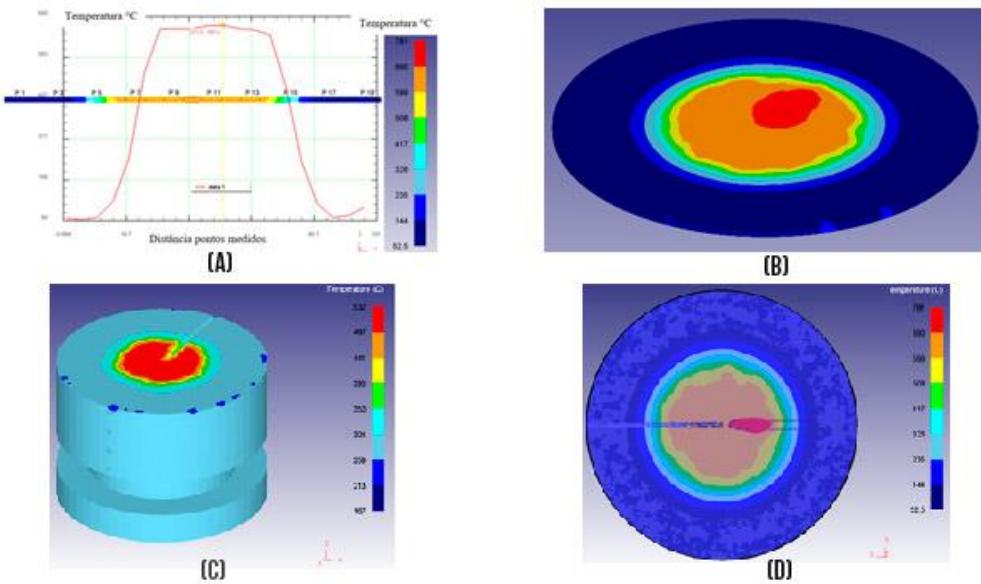


Figura 7 – Distribuição de temperatura durante a simulação de forjamento (a) ao longo da espessura da máscara, (b) na superfície da máscara em contato com o billet forjado, (c) na matriz inferior e (d) na superfície da chapa em contato com a matriz inferior

A matriz superior apresentou uma distribuição de temperatura diferenciada por sua temperatura inicial ter sido a temperatura ambiente ( $24,8^{\circ}\text{C}$ ), como pode ser visto na figura 8, variando entre  $370$  e  $585^{\circ}\text{C}$ .

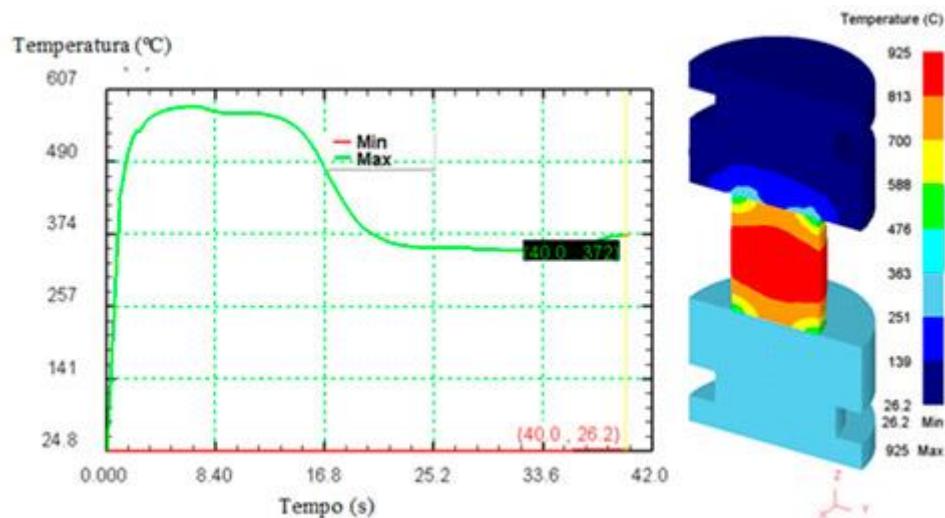


Figura 8 – (a) temperatura em função do tempo de conformação na matriz superior de forjamento e (b) simulação correspondente

Os perfis de dureza das máscaras metálicas foram medidos antes do ensaio de forjamento, sendo realizadas medições em  $0^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  e  $45^{\circ}$  da direção de laminação. O resultado da dureza média para as máscaras de 22MnB5 foi de  $155,9 \pm 6,2$ , variando entre 145 e 168HV. As chapas

de material HS6-5-2C (M2) apresentam a maior diferença na direção de medição a 90º e um elevado desvio padrão entre as medições, o que pode ser atribuído a presença de carbeto primários em bandas na direção de laminação, sendo que a média dos valores obtidos ficou em  $185,9 \pm 30,8$  HV.

Após a utilização das chapas como máscaras metálicas no ensaio de forjamento, os perfis de dureza foram medidos novamente e os resultados estão apresentados na figura 9. O ponto 0 (zero) representado no gráfico diz respeito ao centro da chapa, ou seja, região de contato entre a matriz, a chapa e o billet.

Observa-se que não houve alterações significativas de dureza nas medidas realizadas na chapa de aço 22MnB5, a qual apresentou uma redução de 10HV, o que pode ser atribuído às características microestruturais do aço. Ao contrário, nas chapas de aço HS6-5-2C nota-se o aumento em torno de 45HV quando comparados ao valor médio de dureza inicial.

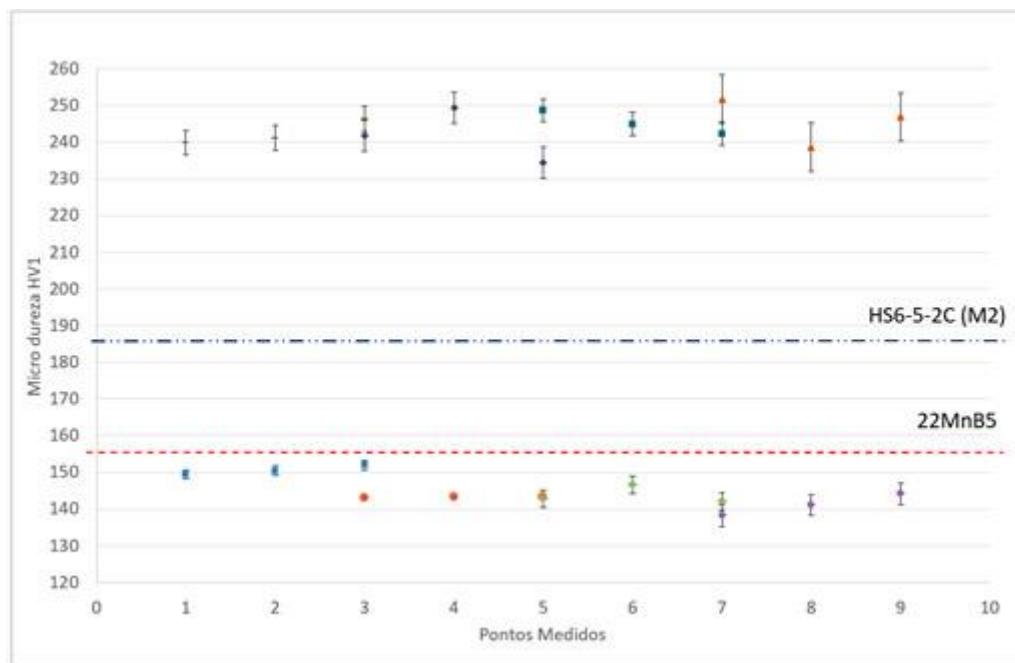


Figura 9 – Perfil de dureza superficial das chapas 22MnB5 e HS6-5-2C (M2) após o forjamento

## Conclusões

Através deste estudo, foi possível analisar o comportamento térmico do ferramental no processo de forjamento a quente, tanto experimentalmente, quanto pelo método de elementos finitos.

Os parâmetros do processo de forjamento em matriz aberta foram utilizados para desenvolver e testar um modelo numérico com e sem a utilização de máscaras metálicas. No entanto ainda são necessárias mais simulações com parâmetros específicos das chapas e uma análise das deformações do billet para validação final do modelo.

Observou-se que o modelo desenvolvido é válido para analisar o processo de forjamento, sendo que, apesar das limitações até o presente momento, os resultados da simulação numérica ficaram coerentes com os resultados experimentais. No ensaio experimental sem a utilização da máscara, a temperatura superficial da matriz atingiu um valor em torno de 575°C, enquanto a simulação numérica indicou um valor na superfície de 590°C.

Os dados obtidos foram comparados em relação à força, temperatura e tempo de processo. Ao aumentar a força aplicada ao processo, com e sem a utilização de máscara metálica, foi possível identificar um aumento na temperatura superficial da matriz inferior em torno de 50°C. Da mesma maneira, ao inserir no modelo a chapa metálica com 1,5 mm de espessura sobre a matriz inferior no forjamento simulado, os valores da temperatura superficial da matriz reduziram em 106°C, representando cerca de 20% da temperatura sem a máscara.

Assim, a inserção de máscaras metálicas como revestimento de ferramentas realizada experimentalmente indica uma redução de aproximadamente 15% na temperatura próximo a superfície da matriz. Apesar de o modelo numérico analisado considerar as propriedades do banco de dados do software, os resultados simulados são coerentes com a realidade, sendo observada uma diferença de apenas 5% entre a temperatura simulada e a medida experimentalmente.

Conforme diversos autores indicam, a temperatura superficial da matriz de forjamento está diretamente ligada ao desgaste e à fadiga térmica, portanto, reduzindo-se a temperatura da superfície da matriz durante os ciclos de trabalho será possível reduzir significativamente o seu desgaste.

Observa-se a necessidade de aprimorar o modelo construído, inserir as propriedades do material, como curva de escoamento, e refinar a malha utilizada. Com isso será possível atingir maior acurácia e, então analisar parâmetros como atrito, diferentes geometrias e condições de processo.

## 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. Ao Dr. Alberto Moreira Guerreiro Brito, pela participação na idealização deste projeto

## Co-autores

Luana de Lucca de Costa – [luana.lucca@ufrgs.br](mailto:luana.lucca@ufrgs.br)

Alexandre da Silva Rocha – [alexandre.rocha@ufrgs.br](mailto:alexandre.rocha@ufrgs.br)

Lírio Schaeffer – [schaefer@ufrgs.br](mailto:schaefer@ufrgs.br)