



# 38<sup>th</sup> SENAFOR

22<sup>nd</sup> International Forging Conference - Brazil

8<sup>th</sup> International Sheet Metal Forming Conference/5<sup>th</sup> BrDDRG Congress

7<sup>th</sup> International Powder Metallurgy Conference Brazil

8<sup>th</sup> International Conference on Materials and Processes for Renewable Energy

## Influência das Variáveis de Processo no Desgaste de Matrizes de Forjamento à Quente utilizando-se do Método dos Elementos Finitos

Pedro Malaquias Araujo Stemler <sup>(1)</sup>  
Paula Cibely Alves Flausino <sup>(2)</sup>  
Alisson Duarte da Silva <sup>(3)</sup>  
Maria Teresa Paulino Aguilár <sup>(4)</sup>  
Haroldo Béria Campos <sup>(5)</sup>  
Antônio Eustáquio de Melo Pertence <sup>(6)</sup>  
Paulo Roberto Cetlin <sup>(7)</sup>

### RESUMO

Dentre os diferentes tipos de processos utilizados na conformação mecânica dos metais, destaca-se o forjamento a quente para a produção de produtos semi-acabados e acabados. Nesse processo, o desgaste das matrizes é a causa principal de falhas. Para melhor entendimento desse fenômeno no âmbito prático, foram utilizadas simulações computacionais baseadas no método dos elementos finitos. Neste artigo, foram avaliadas a influência da temperatura, da velocidade do processo, da lubrificação e da descrição do comportamento do material escolhido para a simulação no desgaste previsto.

**Palavras Chave — Forjamento à Quente, Desgaste, Simulação Computacional, Variáveis de Processo, DEFORM**

### ABSTRACT

Hot forging stands out among metal forming process when it comes to the production of semi-finished and finished products. In this process, die wear is the main cause of failure. Computational simulations, using the finite element method, were used in order to better understand this phenomenon. The present paper evaluates the influence of temperature, punch speed, lubrication and type of material behavior in the simulation on the predicted die wear.

**Keywords — Hot Forging, Die wear, Computational Simulations, Process Variables, DEFORM**

<sup>(1)</sup> Mestrando em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, pedrostemler@ufmg.br

<sup>(2)</sup> Doutoranda em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, paulacibely@yahoo.com.br

<sup>(3)</sup> Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, alissonds@ufmg.br

<sup>(4)</sup> Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, teresa@ufmg.br

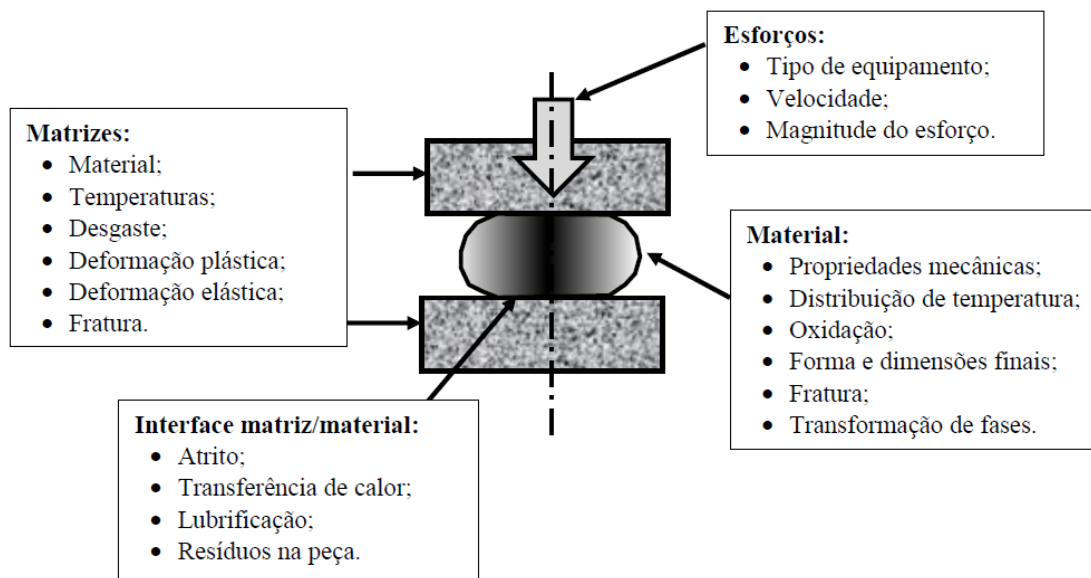
<sup>(5)</sup> Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, beriacampos@ufmg.br

<sup>(6)</sup> Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, pertence@demec.ufmg.br

<sup>(7)</sup> Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, pcetlin@ufmg.br

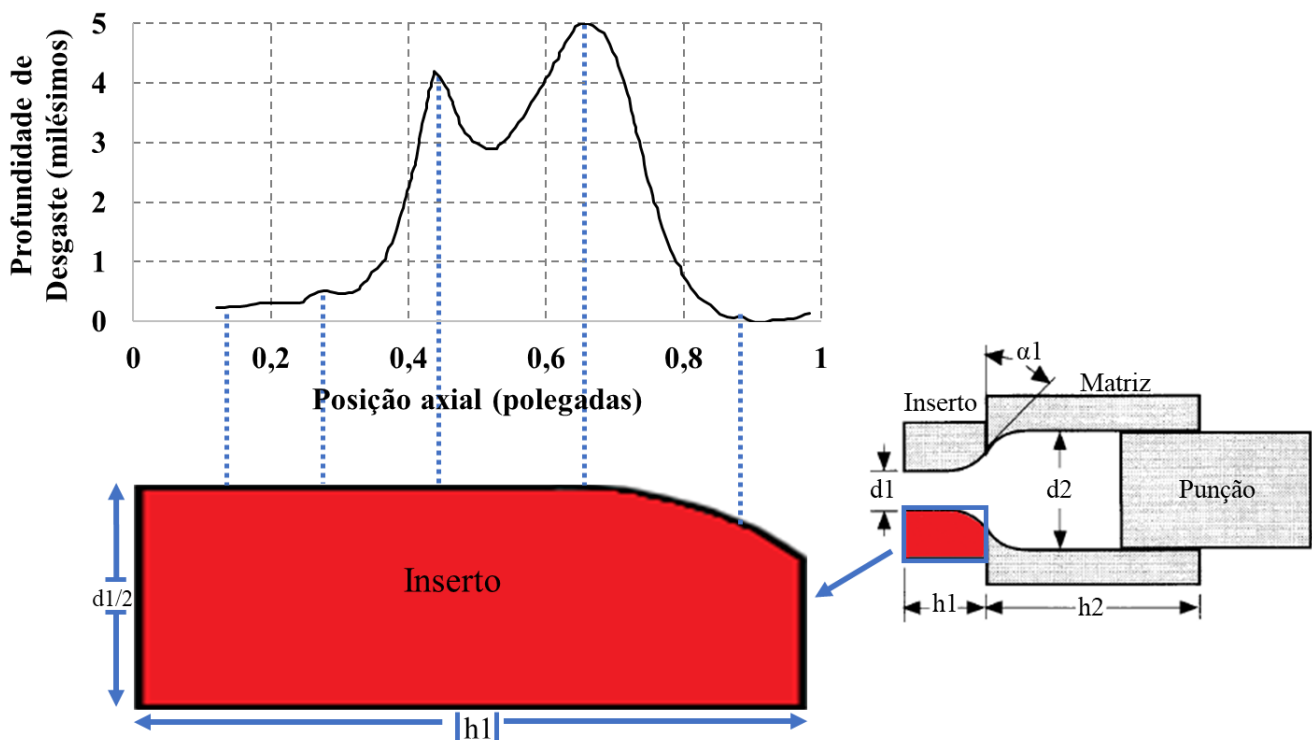
## 1. INTRODUÇÃO

Os processos de conformação mecânica consistem na alteração da forma do material por deformação plástica obtida pela aplicação de esforços. Esses processos têm sido utilizados durante séculos para a produção de produtos metálicos acabados e semiacabados. Dentre esses processos destaca-se o forjamento, podendo esse ser realizado a quente ou a frio. Para o desenvolvimento de estudo completo da conformação mecânica devem ser considerados inúmeros aspectos. A Figura 1 mostra o conjunto de variáveis envolvidas no processo, sem abordar aspectos econômicos. Dentre os aspectos mostrados na figura, o foco do presente artigo é o desgaste das matrizes.



**Figura 1:** Conjunto de aspectos de interesse em uma operação de conformação mecânica [1]

Segundo [2] a eficiência dos processos de forjamento está relacionada com a vida útil das matrizes, que é principalmente limitada pelo desgaste. A Figura 2 mostra exemplos do desgaste medido no inserto em um processo de extrusão a quente, processo esquematizado à direita na figura. As linhas tracejadas em vermelho conectam a posição no inserto, perfil em preto na parte de baixo da figura, à profundidade de desgaste dada pelo gráfico.



**Figura 2:** Perfil do desgaste medido e calculado por simulação no inserto de uma matriz na extrusão à quente [3]

As variáveis que têm efeito sobre o desgaste das matrizes durante os processos de conformação são:

- A pressão na interface entre o material e as matrizes ( $p$ )
- A velocidade relativa de deslizamento entre o material e as matrizes ( $v$ )
- A dureza das matrizes ( $H$ )
- A temperatura da interface entre o material e as matrizes ( $T$ )

As variáveis descritas acima podem ser utilizadas para o cálculo do desgaste em cada ponto da superfície das matrizes durante o processo de forjamento. Destaca-se que nos softwares utilizados para as simulações calcula-se a profundidade de desgaste na superfície da matriz e que o desgaste calculado não leva a uma modificação na geometria das matrizes ao longo da evolução deste desgaste, fato diferente do encontrado nos processos reais.

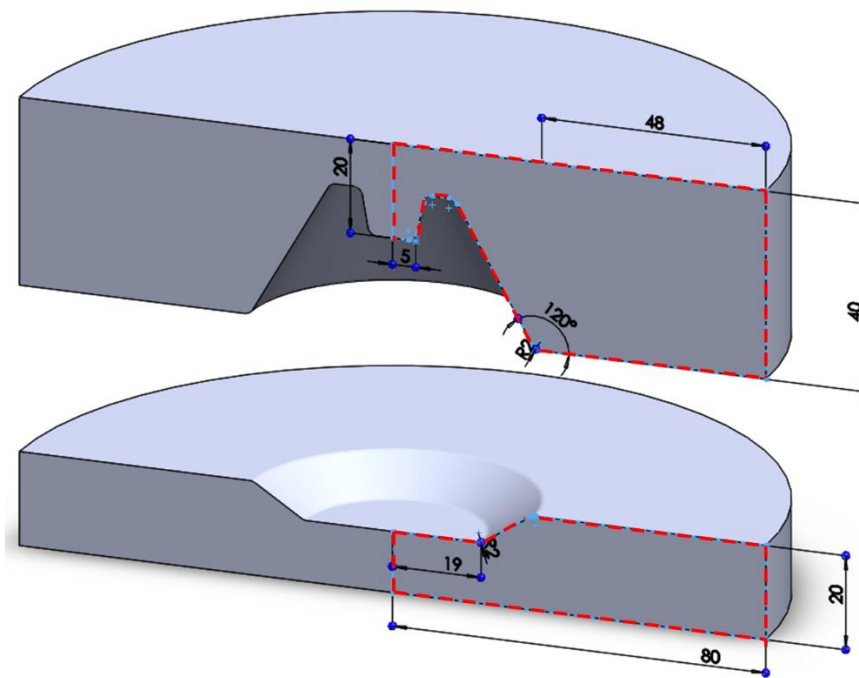
Existem diferentes modelos que podem ser utilizados para o cálculo do desgaste. Foi utilizado, no presente artigo, o modelo de Archard disponibilizado no DEFORM 2D/3D:

$$\text{Modelo de Archard: } W = \int K \frac{p^a v^b}{H^c} dt$$

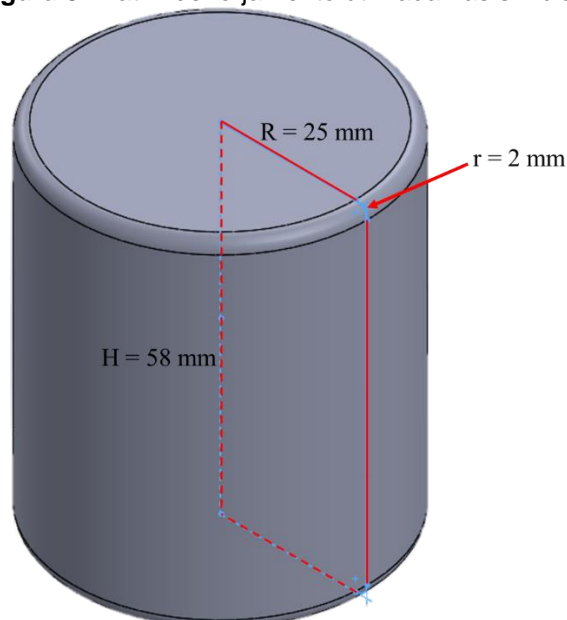
onde  $p$ ,  $v$ ,  $H$  e  $T$  têm o significado descrito anteriormente e  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $K$  (constante de Archard) são constantes que devem ser determinadas experimentalmente.

## 2.METODOLOGIA

Para avaliação do desgaste foi criada uma matriz de forjamento e um tarugo cujas geometrias e dimensões podem ser observadas, respectivamente, nas Figura 3 e 4.



**Figura 3:** Matriz de forjamento utilizada nas simulações



**Figura 4:** Geometria do tarugo

Devido a simetria axial natural do processo foi considerada a representação axissimétrica para a realização das simulações, representação essa que simplifica de maneira considerável os cálculos a serem realizados pelo software. Foi considerado que as matrizes de forjamento se comportariam como objetos rígidos, ou seja, não se deformariam plástica ou elasticamente. Não foi considerada a transferência de calor entre a o tarugo e as ferramentas e entre o tarugo e o ambiente.

Foi necessário malhar as matrizes para os cálculos de desgaste, sendo utilizada uma maior densidade de elementos nas regiões de contato com o tarugo. As malhas utilizadas no tarugo e nas matrizes podem ser observadas na Figura 5.

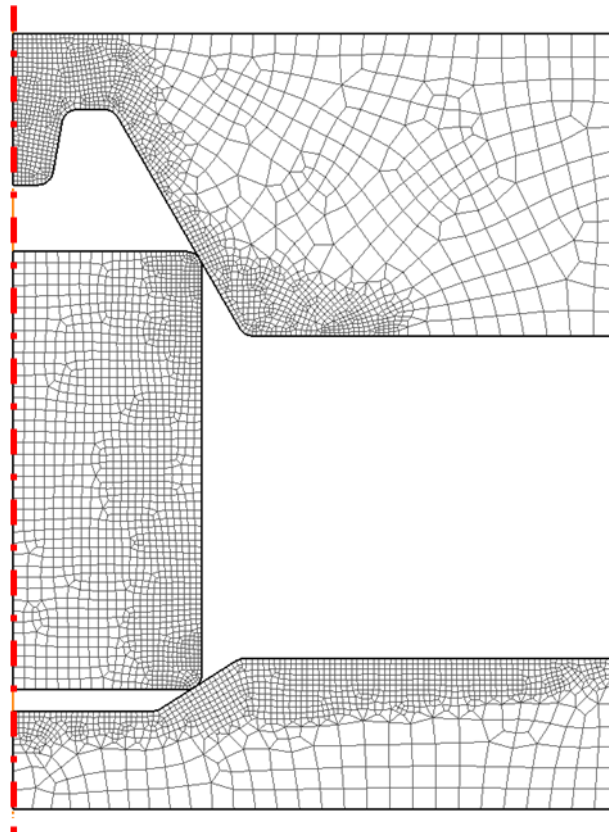


Figura 5: Malha utilizada nas simulações

Durante as simulações foi considerado que o tarugo era constituído de um aço AISI 1045 cujo comportamento mecânico a 1100 e a 950°C e duas velocidades de deformação (0,1 e 100/s) pode ser observado no gráfico da Figura 6. O próprio software realiza as interpolações eventualmente necessárias para temperaturas e velocidades de deformação entre os valores constantes no gráfico.

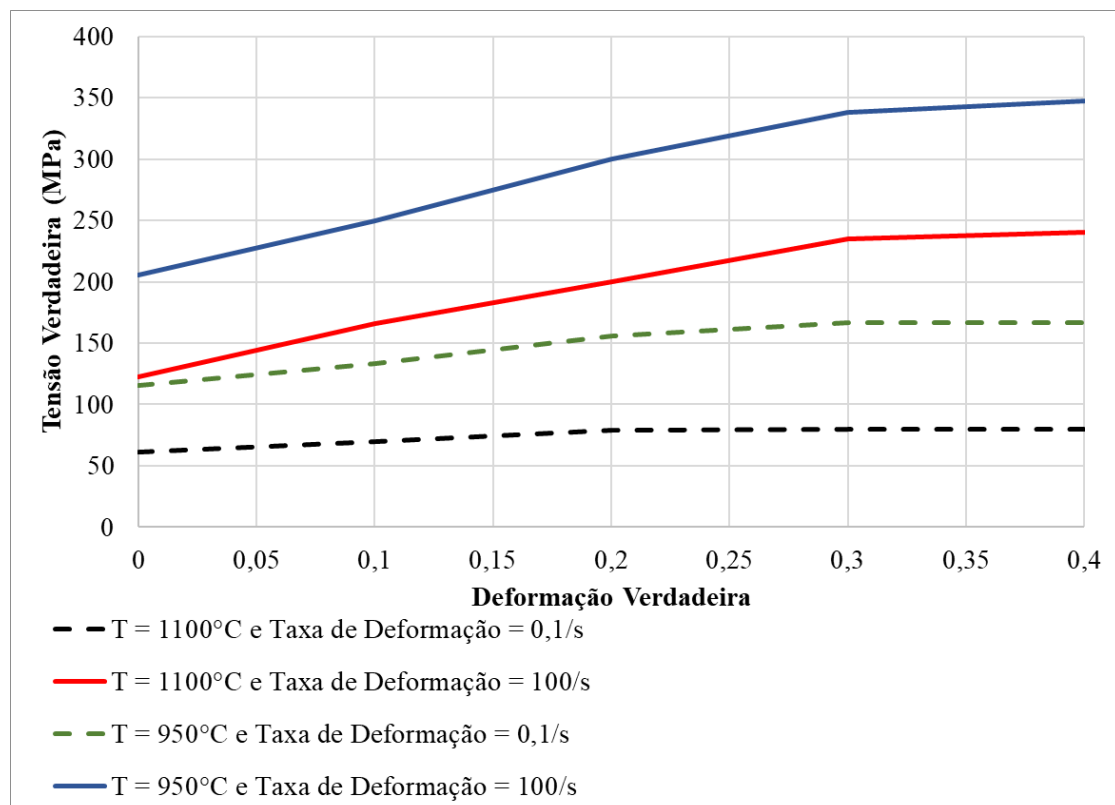


Figura 6: Curva de escoamento do aço AISI 1045

Foram avaliados nas simulações os efeitos de 3 variáveis de processo e uma variável de simulação na profundidade do desgaste da matriz após o forjamento de uma peça. Considerou-se que o fim do processo de forjamento se dava após o preenchimento completo das matrizes, o que ocorreu para um deslocamento das matrizes igual a aproximadamente 34,5mm.

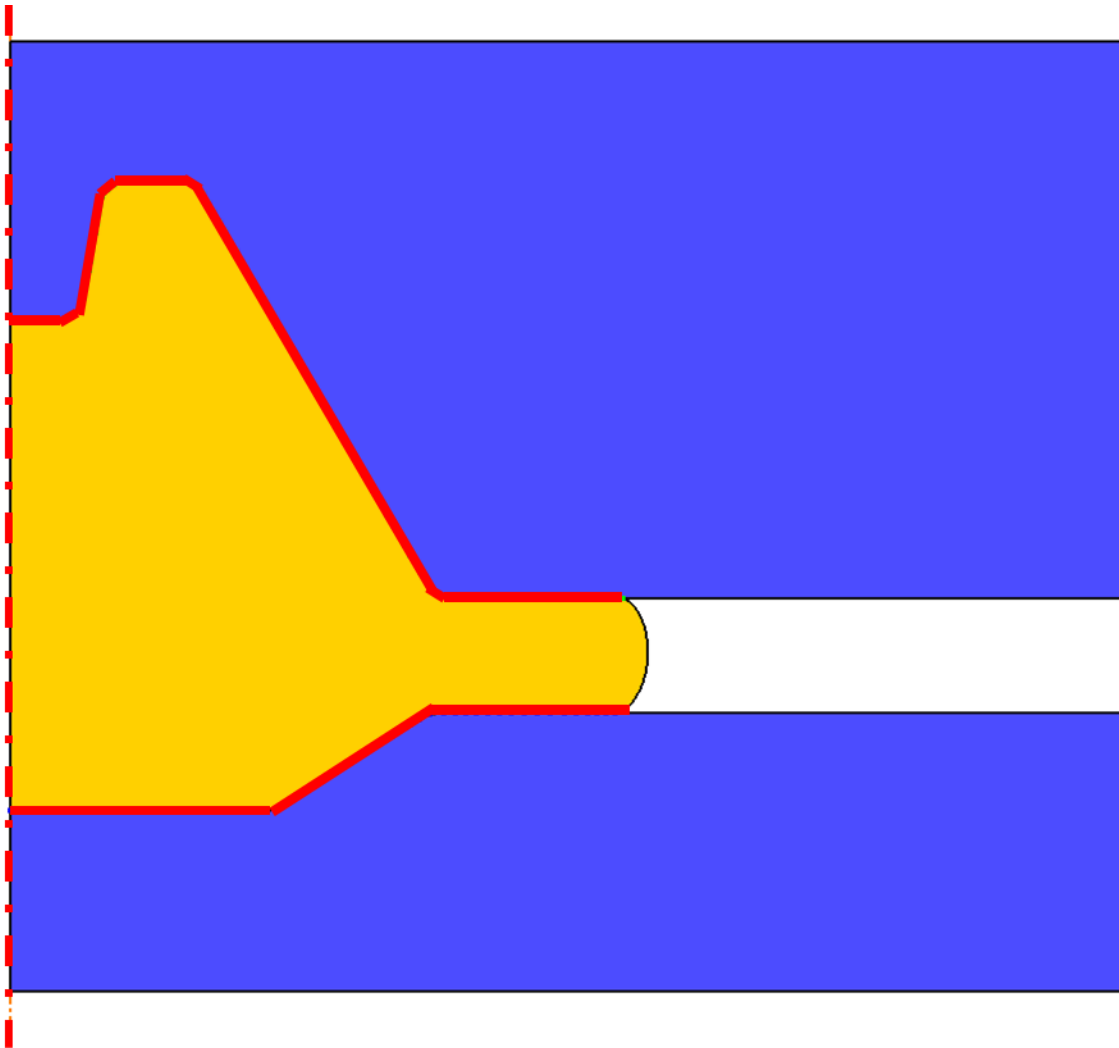
Determinou-se primeiramente uma simulação base a partir da qual se variou algum parâmetro para avaliação da profundidade do desgaste. A temperatura inicial do tarugo foi igual a 1100°C, o coeficiente de atrito (tipo shear) igual a 0,3, a velocidade da matriz superior igual a 10mm/s; e foi considerado que o tarugo se comportaria como um objeto rígido-plástico, ou seja, só foram calculadas as deformações plásticas.

As variáveis de processo alteradas nas simulações foram: a diminuição da temperatura inicial do tarugo de 1100 para 950°C; o aumento do coeficiente de atrito para 0,7 com o objetivo de emular o processo sem lubrificação (destaca-se que os valores de atrito foram sugeridos pelo próprio software para conformação a quente com e sem lubrificação); e o aumento da velocidade da matriz para 250mm/s. Como variável de simulação alterou-se o comportamento do material do para elasto-plástico, ou seja, seriam também consideradas as deformações elásticas do tarugo (o valor do módulo de Young e do coeficiente de Poisson obtidos na biblioteca do software para a temperatura de 1100°C, por exemplo, são iguais a 86 GPa e 0,3).

Para o cálculo do desgaste foi considerada a equação de Archard. A dureza das matrizes  $H$  e a constante de Archard  $K$  foram consideradas iguais a, respectivamente, 52HRC (dureza de um aço ferramenta H13) e  $1,5E-5$ . As constantes  $a$ ,  $b$  e  $c$  foram consideradas iguais a, respectivamente, 1, 1 e 2. Esses valores foram indicados pelo software como valores comuns para o desgaste de aços ferramenta.

### 3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

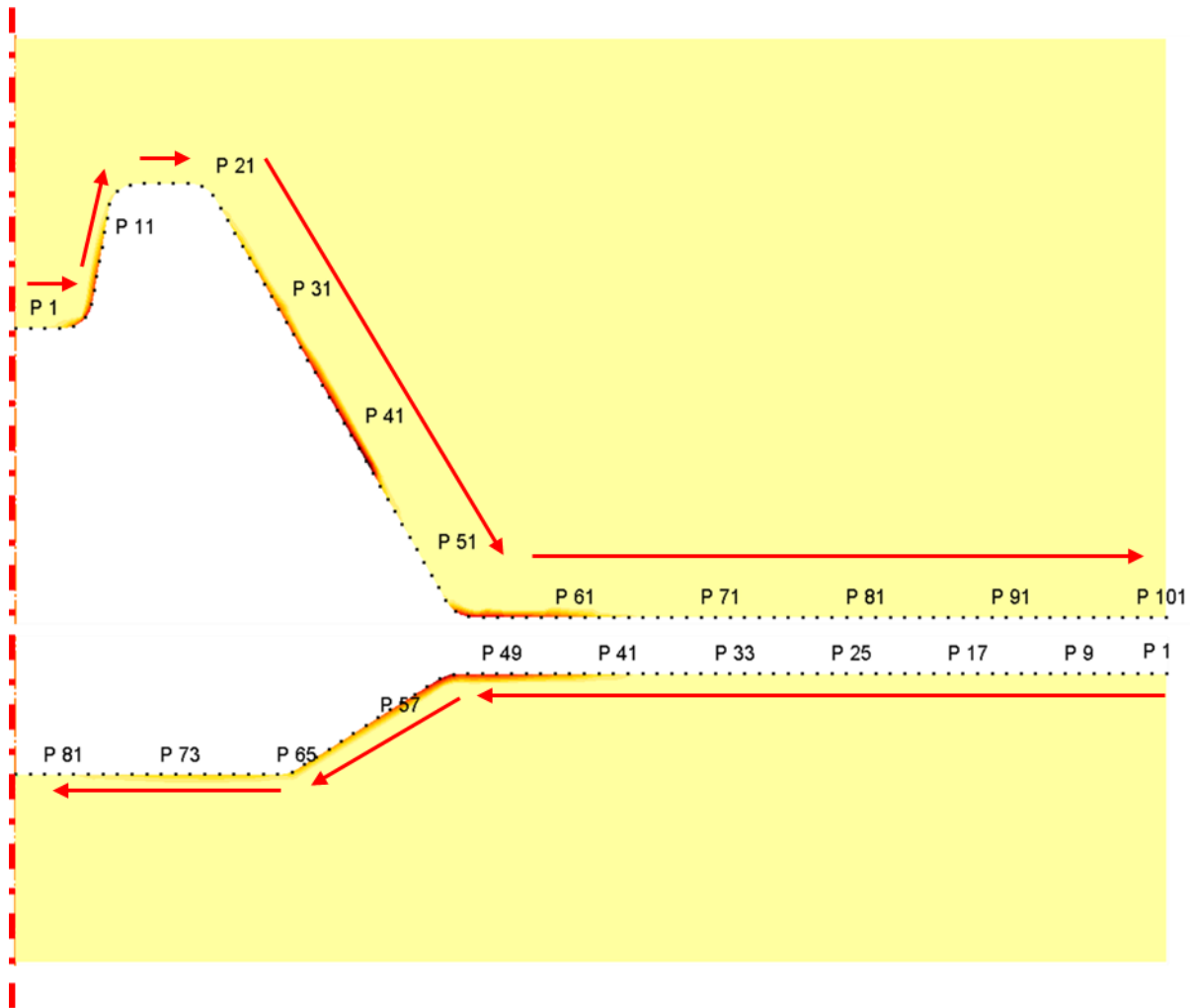
A peça ao final do forjamento pode ser observada na Figura 7. A faixa em vermelho representa o contato da peça com as matrizes.



**Figura 7:** Peça ao final de uma operação de forjamento

A Figura 8 representa a distribuição de desgaste na matriz inferior e superior, que foi muito semelhante para todas as simulações realizadas. Nesta figura, são mostrados alguns pontos de contato entre o material e a matriz, designados pela letra P e um número. Este número fornece a distância, em mm, ao longo da superfície de contato entre o material e a matriz.

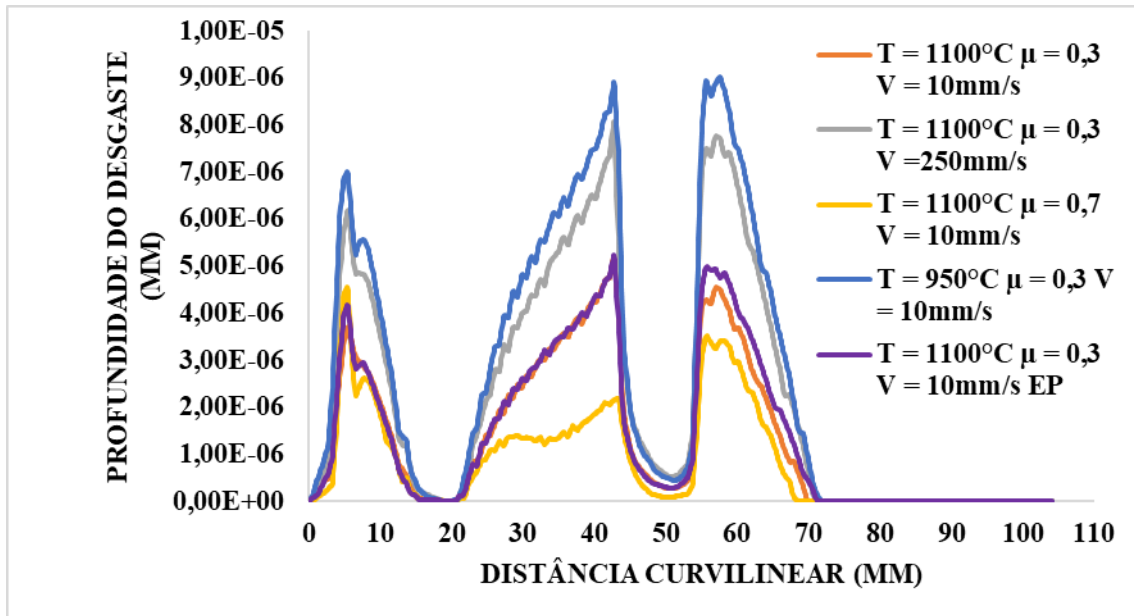
Percebe-se que para a matriz superior existem três regiões de maior desgaste, sendo essas entre os pontos P1 e P11, P31 e P45 e P51 e P61, aproximadamente. No caso da matriz inferior existe somente uma região com maior valor de desgaste, sendo essa entre os pontos P41 e P65, aproximadamente.



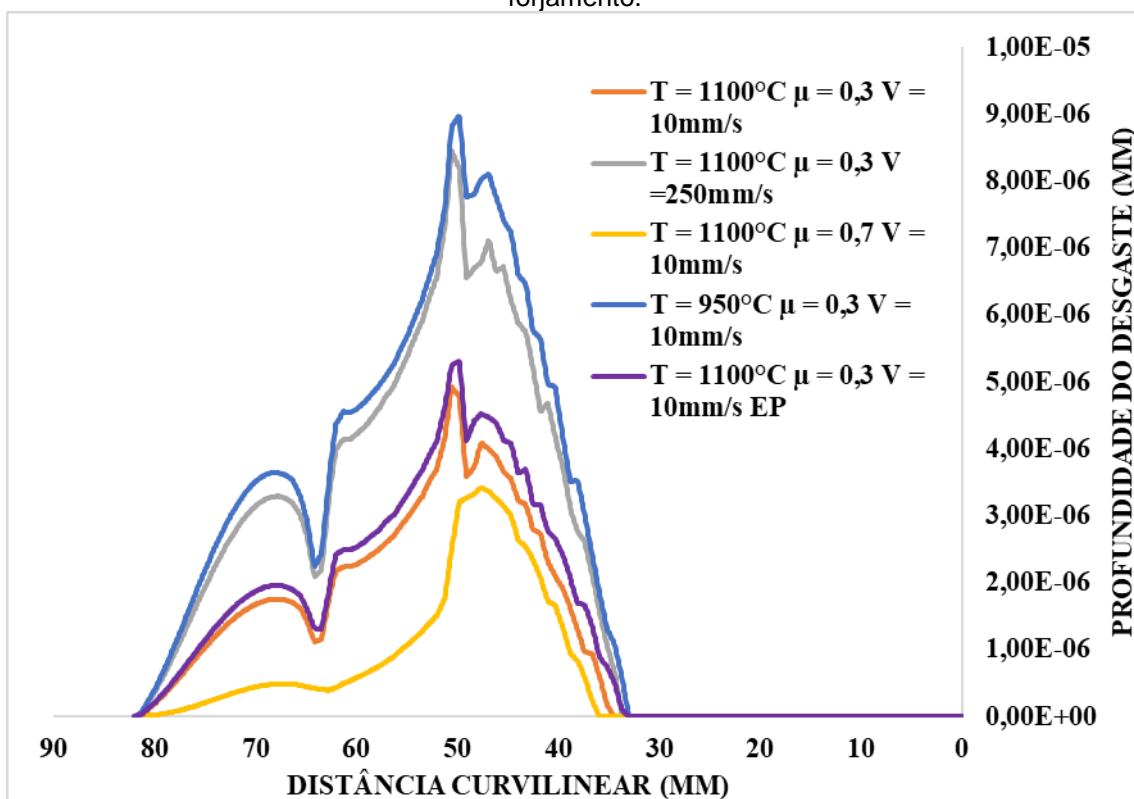
**Figura 8:** Distribuição da profundidade de desgaste ao final de uma operação de forjamento

Utilizando-se da ferramenta do software DEFORM “state variable between two points” foi possível a avaliação da distribuição dos valores de profundidade de desgaste após 1 ciclo de forjamento ao longo da superfície da matriz superior e inferior que podem ser observadas na Figura 9 e na Figura 10, respectivamente. Como já mencionado, os números ao lado da letra “P” na Figura 8 correspondem às distâncias curvilineares ao longo das matrizes e foram utilizados nos gráficos da Figura 9 e da Figura 10, ou seja, o ponto P49 da matriz inferior tem sua profundidade de desgaste mostrada na distância curvilínea igual a 49 mm no gráfico da Figura 10.





**Figura 9:** Distribuição da profundidade de desgaste ao longo da superfície da matriz superior após um golpe de forjamento.



**Figura 10:** Distribuição da profundidade de desgaste ao longo da superfície da matriz inferior após um golpe de forjamento

Os gráficos da Figura 9 e da Figura 10 confirmam a presença de, respectivamente, 3 e 1 regiões de maior desgaste mostradas na Figura 8.

Para o caso da diminuição de temperatura de 1100 (curva laranja) para 950°C (curva azul) ocorre um grande aumento na profundidade de desgaste para a matriz superior e inferior sem grandes alterações no formato da curva. Esse fato pode ser explicado pelo aumento na tensão de fluxo plástico do material que aumenta as pressões na interface o que leva a um aumento do desgaste.

Na simulação na qual se pretendia avaliar a influência da lubrificação no desgaste foi observado que o aumento do coeficiente de atrito de 0,3 (curva laranja) para 0,7 (curva amarela) provocou um aumento no desgaste da matriz superior em uma das regiões de maior desgaste, entre 0 e 15mm,

enquanto que para as outras duas regiões o desgaste teve seu valor diminuído, sem grandes alterações no formato da curva. Para a matriz inferior foi observado diminuição do desgaste, com uma pequena alteração no formato da curva, com o aumento do coeficiente de atrito. Esse fenômeno provavelmente decorre das menores velocidades, fato observado nas simulações, entre a interface matriz tarugo durante o processo de forjamento, e que leva a um menor desgaste, como mostrado pela equação de Archard.

O aumento na velocidade do processo passando-se de 10 (curva laranja) para 250mm/s (cinza) levou a um aumento nos valores de desgaste, sem alteração da forma da curva, devido ao aumento da velocidade entre as interfaces durante o processamento e ao aumento na taxa de deformação que aumenta as tensões de fluxo do material e assim a pressão na interface entre o material e a matriz.

Como já dito anteriormente, o tarugo foi considerado como um objeto rígido-plástico na simulação base (laranja); assim sendo, foi avaliado o efeito de se considerar o tarugo como um objeto elasto-plástico (curva roxa) no desgaste das matrizes. Foi observado que essa alteração apresentou pequena influência na distribuição de desgaste superficial para ambas as matrizes.

Apesar de simulações não terem sido realizadas variando-se a constante de Archard,  $K$ , e da dureza das ferramentas,  $H$ , fica claro, pela análise da equação, que um possível aumento no valor de  $K$  leva a um aumento nos valores de desgaste calculados e que um aumento no valor de  $H$  leva a uma diminuição do desgaste. Essas mudanças não alterariam os formatos das curvas.

#### 4. CONCLUSÕES

Foi observado que o software DEFORM 2D/3D foi capaz de prever a influência dos parâmetros de processo na distribuição do desgaste durante as simulações do processo de forjamento.

Os resultados obtidos nas simulações foram:

- A diminuição da temperatura e o aumento da velocidade da matriz levaram a um aumento no desgaste devido ao aumento das pressões na interface.
- Um aumento no coeficiente de atrito levou a uma diminuição do desgaste devido à diminuição da velocidade de deslizamento entre as superfícies.
- A utilização do comportamento elasto-plástico para a descrição do comportamento mecânico do tarugo não alterou de forma significativa o desgaste.

Ainda, pela análise da equação do modelo de Archard compreende-se que um aumento no valor de  $K$  e uma diminuição na dureza  $H$  levariam um aumento no desgaste.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio continuado, ao longo das últimas décadas, da CAPES, CNPq, FAPEMIG, PPGEM/PROEX - UFMG (Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG) e PPGMEC/PROF-UFMG (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFMG), às atividades desenvolvidas na área de fabricação por conformação mecânica.

#### REFERÊNCIAS

- [1] DA SILVA, ALISSON D. ; AGUILAR, Maria Teresa Paulino ; PEREIRA, PEDRO HENRIQUE RODRIGUES ; Cetlin, Paulo Roberto . Utilização de dados sobre materiais em simulações computacionais de conformação mecânica. In: 35<sup>o</sup> SENAFOR - 19<sup>a</sup> Conferência Internacional de Forjamento, 2015, Porto Alegre. Anais da 19<sup>a</sup> Conferência Internacional de Forjamento. Porto Alegre: Laboratório de Transformação Mecânica-UFRGS, 2015. p. 1-15.
- [2] BEHRENS, B.-A. Finite element analysis of die wear in hot forging processes. CIRP Annals-Manufacturing Technology, v. 57, n. 1, p. 305-308, 2008.
- [3] PAINTER, B.; SHIVPURI, R.; ALTAN, T. Prediction of die wear during hot-extrusion of engine valves. Journal of Materials Processing Technology, v. 59, n. 1-2, p. 132-143, 1996.