

# ANÁLISE DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS QUE LIMITAM A VIDA DE FERRAMENTA NO PROCESSO DE FORJAMENTO DE EIXOS DIANTEIROS, EM MARTELOS DE CONTRAGOLPE <sup>(1)</sup>

Mauro A. F. de Oliveira <sup>(2)</sup>  
Sandro Bueno Quirino <sup>(3)</sup>

**Resumo:** Neste trabalho, foram examinados os aspectos relativos ao comportamento de duas variáveis, temperatura e tensão, dentre as que mais atuam como limitantes na vida de matrizes de forjamento a quente de eixos dianteiros para caminhões. Também foi considerada a influência da geometria sobre o nível de tensões observado na matriz durante o preenchimento da sua cavidade. Para validação do modelo estudado, dados operacionais de temperatura, número de golpes por peça e taxa de produção horária foram obtidos de várias seqüências do processo de forjamento e considerados em uma simulação numérica em ambiente 2D. Os resultados obtidos mostraram que as variáveis temperatura e tensão na matriz de forjamento podem, de fato, ser consideradas como as que mais interferem no desempenho da mesma para o forjamento de eixos dianteiros em martelos de contragolpe. Concluiu-se que o controle da variável temperatura da matriz na forjaria se apresenta como um importante fator para o desempenho da vida útil do ferramental, além do fato de que a interação entre a variável mencionada e a tensão de escoamento a quente do aço-ferramenta também deve ser considerada.

**Palavras-chave:** vida de ferramenta, simulação de forjamento via CAE, martelo de contragolpe

(1) Contribuição Técnica a ser apresentada no 1º Encontro de Integrantes da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes - ABM

(2) Engenheiro Metalurgista, Mestre e Doutor em Ciências e Engenharia de Materiais, Pesquisa e Desenvolvimento/CAE da Engenharia de Manufatura, SIFCO S.A.-  
[moliveira@sifco.com.br](mailto:moliveira@sifco.com.br)

(3) Engenheiro Mecânico, CAE da Engenharia de Manufatura, SIFCO S.A. -  
[squirino@sifco.com.br](mailto:squirino@sifco.com.br)

## 1. Introdução

A simulação numérica computacional, via CAE (Computer Aided Engineering), tem atuado na última década como uma ferramenta elucidativa dos processos de conformação plástica de metais. Dentro deste contexto, os processos de forjamento têm se utilizado dos softwares de simulação, quer sejam 2 D ou 3 D, na busca de resultados que permitam uma evolução tecnológica tanto no projeto/processo de forjamento como nos materiais empregados em matrizes <sup>(1, 2, 3)</sup>.

Os tipos de equipamentos mais utilizados em forjaria são prensas mecânicas/hidráulicas e martelos. As características distintas destes equipamentos conferem diferentes graus de dificuldade à montagem de modelos que reproduzam a realidade do processo de forjamento com precisão, principalmente em martelo, pelo fato de uma operação ser composta de vários golpes. Estes golpes promovem o enchimento gradativo da cavidade da matriz e, portanto, provocam variações da taxa de deformação, do grau de deformação, do tempo e da geometria do forjado a cada golpe, além da temperatura da mesma. As imprecisões nas condições de contorno dos modelos do processo de forjamento via CAE, conduzem a variações significativas nos resultados <sup>(4,5)</sup>, quando comparado aos observados na área de produção. Somam-se a estes fatores as curvas de escoamento plástico dos aços a serem forjados e de propriedades dos aços das matrizes, que não atendem a toda a gama de situações que ocorrem no processo de forjamento.

A complexidade destes fatores tem dificultado a identificação e consequentemente a correção das causas de falhas prematuras em matrizes de forjamento.

## 2. Tipos de falhas em matrizes de forjamento

A melhora do desempenho de matrizes para forjamento depende diretamente da perfeita identificação e compreensão dos mecanismos atuantes na falha prematura das mesmas. Normalmente, esta tarefa nem sempre é imediata, devido à natureza complicada da interação das variáveis do processo de forjamento, geometria da peça e propriedades do aço da matriz. A Tabela 1 <sup>(6)</sup> apresenta alguns dos mecanismos de falha de matrizes e as propriedades desejadas no aço da matriz para aumentar a vida do ferramental.

Mecanismo de falha	Propriedade desejada
Carga mecânica elevada	Dureza alta Tenacidade a fratura
Carga mecânica elevada em alta temperatura	Dureza alta a quente Elevada estabilidade microestrutural
Carga mecânica repetitiva (fadiga)	Dureza elevada Alta resistência à fadiga Microestrutura fina Baixo teor e tamanho de defeitos internos
Temperatura elevada	Elevada estabilidade térmica da microestrutura Elevada resistência à oxidação
Ciclagem térmica	Elevada estabilidade térmica da microestrutura Dureza elevada em altas temperaturas Elevada resistência à fluência Baixa expansão térmica Elevada resistência à oxidação

Tabela 1 – Correlação entre os mecanismos de falha em matrizes e as propriedades desejadas no aço para matriz para aumentar a vida do ferramental <sup>(6)</sup>.

No forjamento de eixos dianteiros com martelo de contra-golpe, as trincas que limitam a vida da matriz estão localizadas no fundo da região da sapata, como mostra a Figura 1(a). Estas trincas mostram-se visíveis na superfície após um volume aproximado de 300 a 500 peças para os casos mais críticos. Embora estas trincas ocorram tanto na matriz superior como na inferior, é a matriz inferior que determina o final da vida da gravação do conjunto, devido as suas maiores profundidades. Ocorrências similares foram identificadas na literatura <sup>(5,6)</sup> e classificadas como mecanismos de falha por deformação plástica a quente e fadiga mecânica. As trincas se mostram um fator limitante de vida das matrizes em até 40% dos casos para peças de geometria simples, podendo atingir 60 a 70% dos casos quando a geometria se torna mais complexa.

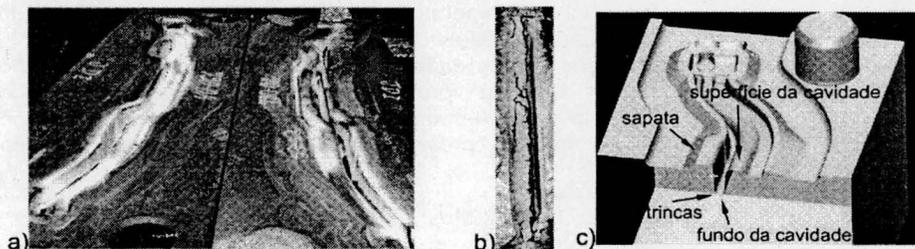


Figura 1 – Caracterização das trincas: vista da matriz superior (esquerda) e inferior (direita); b) vista ampliada das trincas no fundo da sapata e c) definição das regiões da cavidade da sapata..

Miyahara e colaboradores <sup>(7)</sup> propuseram um modelo para determinação do aço adequado à matriz, relacionando a vida total da matriz em dois mecanismos: as vidas de iniciação da trinca e de propagação da trinca. Este modelo correlacionava a vida de fadiga por fluência com a deformação plástica para aços de baixa e alta resistência, como mostra a Figura 2, e foi aplicado experimentalmente no forjamento de virabrequins.

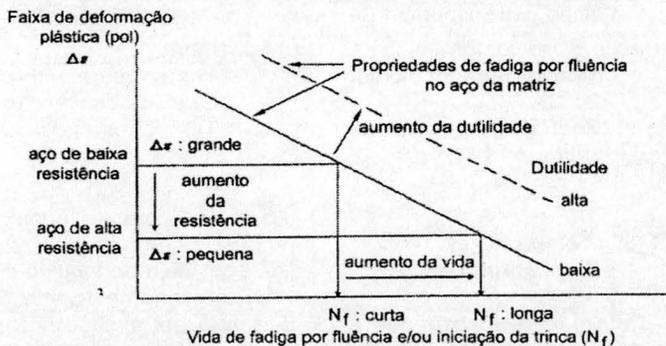


Figura 2 – Deformação plástica de aços de alta e baixa resistência e sua correlação com a vida de iniciação da trinca.

Babu e colaboradores <sup>(5)</sup> também consideraram a fadiga mecânica em matrizes como um processo de iniciação e crescimento de trincas sob tensões e temperaturas elevadas, especialmente quando ela ocorre com menos de 1000 ciclos. Foram sugeridas as propriedades de tensão de escoamento a quente e tenacidade como controladoras do mecanismo de falha.

### 3. Metodologia

O comportamento da região crítica da matriz foi analisado por simulação numérica durante o preenchimento da cavidade, através de uma geometria plana em um software de elementos finitos 2D (DEFORM PRO-PC). Esta prática tem sido utilizada com sucesso em peças forjadas, para análise de problemas específicos.<sup>(3,6)</sup> A seção transversal escolhida localiza-se no centro da sapata, permitindo eliminar a influência das extremidades da sapata e do corpo da peça.

Para validação do modelo estudado, dados operacionais de temperatura, número de golpes por peça e tempo entre passes, em função da taxa de produção horária, foram obtidos de várias seqüências de forjamento na linha de produção. A partir destes dados foram definidas as condições de contorno e foi obtido um modelo baseado no referencial da temperatura na região superior da cavidade da sapata, o que permitiu a aferição do modelo de simulação.

A partir da comparação destes dados com os provenientes da simulação numérica, os coeficientes de convecção e pressão de contato em função da pressão de forjamento para a interface peça-matriz foram ajustados, conferindo uma precisão maior ao modelo. A Figura 3 apresenta o roteiro de montagem do modelo da simulação numérica.

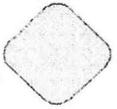
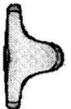
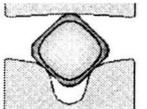
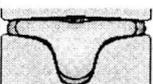
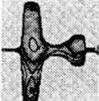
<p>a) Aquecimento do tarugo</p>  <p>Temperatura ambiente = 20 °C Temperatura do forno = 1200 °C Aço 41CrS4</p>	<p>d) Transporte do Dobrador ao Martelo</p>  <p>Temperatura ambiente = 20 °C Coef. de convecção = ar soprado</p>
<p>b) Transporte do Forno ao Dobrador</p>  <p>Temperatura ambiente = 20 °C Coef. de convecção = ar caímo Tempo p/ transporte = 30 s</p>	 <p>Tempo para transporte = 20 s</p>
<p>c) Dobramento e pré-conformação</p>  <p>Temperatura ambiente = 20 °C Coef. de convecção = ar soprado</p>  <p>Tempo p/ Dobramento = 2,5 s</p>	<p>e) Forjamento</p>  <p>Temperatura ambiente = 20 °C Coef. de convecção = ar soprado Tempo para posicionar = 5 s</p>  <p>Tempo p/ forjamento = 27,6 s Temp de extração = 5 s Tempo total do ciclo de forjamento = 37,6 s</p>

Figura 3 - Roteiro de montagem do modelo de simulação: a) aquecimento do tarugo, b) transporte do forno ao dobrador, c) dobramento do tarugo e pré-conformação da sapata, d) transporte do dobrador ao martelo e e) forjamento no martelo.

Após a etapa de transporte do dobrador ao martelo, Figura 3(d), várias possibilidades foram avaliadas na simulação do forjamento, através de mudanças nas variáveis principais de forjamento como: taxa de produção horária, temperatura inicial da matriz e meios de resfriamento entre passes. Os resultados dos perfis de temperatura na matriz em função da mudança das variáveis foram obtidos e analisados em conjunto

com o perfil de tensões na região, como mostra a Figura 4. Também foram analisadas a geometria da extremidade da sapata e a sua influência nos níveis de tensão, através de modificações nos raios de concordância na sua extremidade, Figura 5. As combinações geométricas entre os raios de concordância da extremidade variaram com raios de 4, 6, 8 mm até atingir o raio único de 12,8 mm. Raios inferiores a 4 mm não foram considerados devido ao aparecimento de falhas de preenchimento.

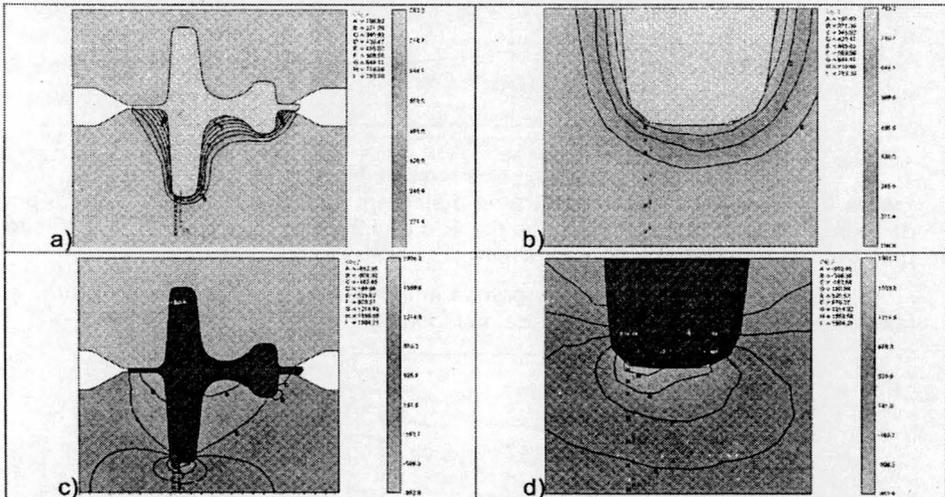
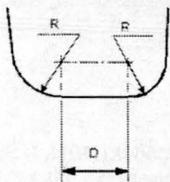


Figura 4 – Resultados da simulação do forjamento na região da sapata: a) temperatura na matriz, b) ampliação de a), c) tensão na matriz e d) ampliação de c).



Raio R (mm)	4	6	8	10	12,7
Distância entre centros D (mm)	16,2	10,8	8,8	5,1	0

Figura 5 – Mudanças estudadas na geometria da sapata para os raios de concordância (R) e a distância entre centros (D) durante a simulação do forjamento.

#### 4. Resultados e Discussão

A Figura 6 apresenta a evolução da temperatura da matriz a diversas profundidades a partir da extremidade da sapata, ao longo de um ciclo típico de forjamento de eixo dianteiro no martelo de contra-golpe. Este ciclo é composto de 4 estações (resfriamento da peça anterior/posicionamento/forjamento/extração), com os respectivos tempos determinados por cronoanálise, entre o final do forjamento de uma peça e o início da próxima. Observa-se que, a partir da temperatura inicial de 200 °C da matriz, as elevações significativas de temperatura para profundidades menores que 10 mm ocorrem apenas no último golpe para um total de 10 golpes, quando a cavidade da matriz (sapata) é totalmente preenchida. O pico de temperatura no golpe 10 foi observado num período inferior a 1 s, dentro da faixa total de elevação da temperatura, que tem a duração de 3 s.

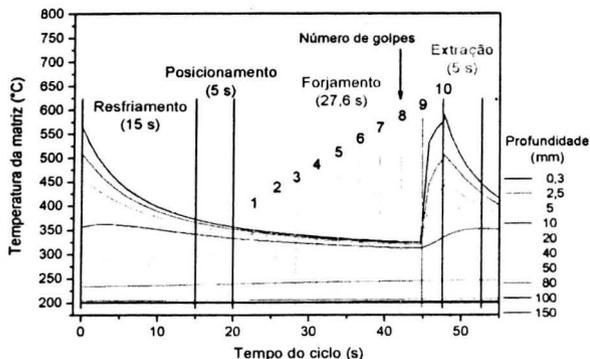


Figura 6 – Variação da temperatura da matriz em diferentes profundidades a partir da extremidade da sapata, ao longo do ciclo de forjamento para um eixo dianteiro a uma taxa de produção de 65 peças/hora.

Outra variável que exerce grande influência no perfil das temperaturas é a taxa de produção, como apresentada na Figura 7.

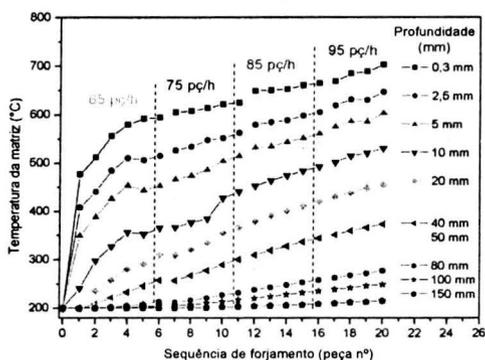


Figura 7 – Variação da temperatura máxima da matriz no último golpe do martelo (10) em função da taxa de produção horária, para várias profundidades a partir da extremidade da sapata.

A variação da taxa de produção afeta diretamente o nível máximo da temperatura da matriz, especialmente nas camadas mais próximas da superfície, enquanto que as camadas mais profundas apresentam uma elevação constante, porém com uma velocidade inferior. Observa-se uma evolução da temperatura com aumentos cada vez menores e uma tendência à estabilidade ao longo da sequência de forjamento. Esta estabilidade pode ser associada ao equilíbrio térmico do sistema, que é resultado do balanço entre o calor introduzido pelo forjamento e o perdido para o ambiente devido ao resfriamento, para cada peça. A cada incremento da taxa de produção esta condição se altera, até que um novo patamar de temperatura seja alcançado.

Os valores máximos de tensão a uma profundidade de 0,3 mm e na superfície da matriz estão apresentados na Figura 8 para cada golpe do martelo, tanto na superfície como no fundo da cavidade (Figura 1b). As tensões aplicadas ao ferramental estão associadas, principalmente, às seguintes variáveis: geometria do produto, geometria de cada passe intermediário, geometria do tarugo inicial e velocidade do equipamento utilizado.

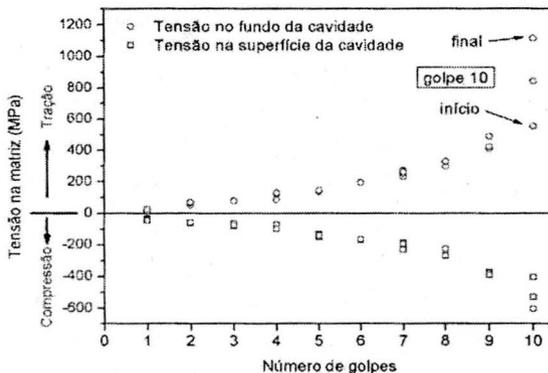


Figura 8 – Variação da tensão aplicada na matriz na superfície e fundo da cavidade em cada golpe do martelo durante o forjamento de um eixo dianteiro.

Durante o forjamento de um eixo em martelo, as tensões de tração e compressão coexistem na mesma matriz e o nível máximo destas tensões varia a cada golpe, aumentando com o preenchimento da cavidade. Observa-se da Figura 8, que em cada golpe a tensão varia entre o início do contato e o final do preenchimento da matriz, o que é ilustrado adequadamente pelo golpe de número 10. Isto faz com que a taxa de carregamento instantânea seja muito elevada e as solicitações mecânicas impostas à matriz sejam superiores às utilizadas normalmente em ensaios mecânicos.

Segundo os resultados da simulação numérica, no fundo da cavidade da matriz, a tensão e a temperatura são máximas para um mesmo intervalo de tempo e têm a duração inferior a 1 s. A partir destes resultados, os valores de temperatura e tensão foram expandidos para uma seqüência de forjamento de 6 peças, e estão dispostos conjuntamente como mostra a Figura 9.

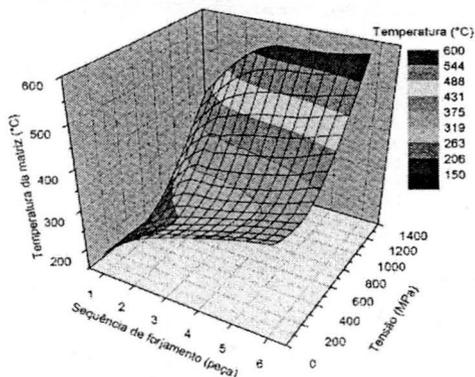


Figura 9 – Variação da temperatura máxima da matriz com a tensão máxima para cada golpe, em função da seqüência de forjamento (fundo da cavidade da matriz).

A Figura 10 apresenta esta mesma análise com abordagem diferente, através da inclusão da tensão de escoamento em função da temperatura e da dureza do aço ferramenta na temperatura ambiente. O aço ferramenta utilizado atualmente é do tipo ASM 6-F3 com dureza na faixa 38 – 42 HRC.

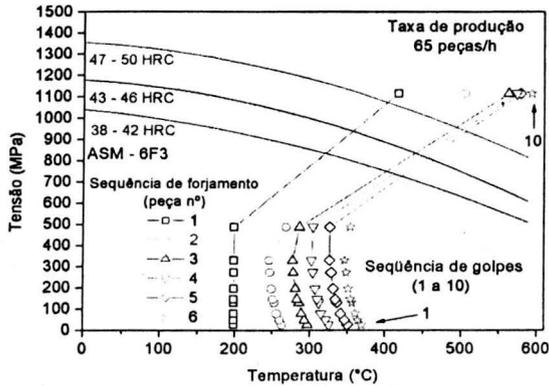


Figura 10 – Variação da temperatura máxima da matriz com a tensão máxima para cada golpe, em função da seqüência de forjamento e a tensão de escoamento a quente em função da dureza na temperatura ambiente para o aço ferramenta utilizado.

A influência da temperatura se apresenta crescente com a seqüência do forjamento. Verifica-se um deslocamento progressivo da curva de tensão-temperatura da matriz, para a região da curva de escoamento do aço ferramenta, onde o decréscimo da resistência a quente é acentuado. Este comportamento explica o aparecimento rápido de trincas no fundo da cavidade da matriz e a baixa vida encontrada atualmente. Aços-ferramenta com dureza elevada tem apresentado maior desempenho de vida em fadiga, tanto no início da nucleação de trincas como na propagação das mesmas <sup>(7,8)</sup>. Este fato associado à redução do nível de temperatura da matriz indica uma possível solução, para se aumentar a vida em fadiga das matrizes.

A alternativa mais usual para reduzir o nível de tensões em projetos de ferramentas, que é o aumento do valor do raio de concordância, se mostrou ineficiente para esta aplicação, Figura 11. Um aumento nos raios das extremidades das cavidades reduz a distância entre centros destes raios, conduzindo a um efeito inverso do esperado, isto é, a um aumento significativo dos valores de tensão até que a condição de um raio único seja atingida.

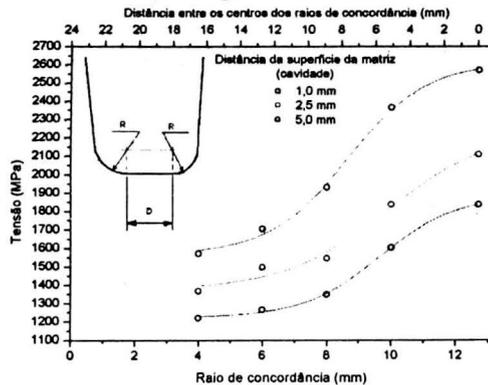


Figura 11 – Variação da tensão máxima a várias profundidades em função dos raios de concordância da extremidade da sapata (fundo da cavidade) no último golpe.

## 5. Conclusões

- O modelo adotado para a simulação via MEF mostrou-se congruente com os resultados operacionais verificados na forjaria.
- A análise dos resultados da simulação numérica evidenciou a necessidade da modificação na interação das variáveis de temperatura da matriz e tensão de escoamento a quente do aço-ferramenta para aumento da vida em fadiga da matriz.
- O controle da variável temperatura da matriz se apresenta como um importante fator para o controle da vida útil do ferramental na forjaria.
- Mudanças de geometria, através do aumento dos raios de concordância no fundo da cavidade da matriz, não mostraram redução do nível de tensões na região crítica.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao corpo diretivo da SIFCO S.A., nas pessoas dos Srs. Santo Domingos Pinto Ribeiro e José Duílio Carnio por tornar possível esta publicação.

## 6. Referências Bibliográficas

- (1) FORCELLESE, A.; GABRIELLI, F.; RUFFINI, R. Application of a Decision Making Method in the Forging Condition Optimization for Manufacturing Automotive Components. **Journal of Materials Processing Technology**, 60 (1-4), p. 125-132, 1996.
- (2) MATSUNO, K. Recent Research and Development in Metal Forming in Japan. **Journal of Materials Processing Technology**, 66 (1-3), p. 1-3, 1997.
- (3) FUJIKAWA, S. Application of CAE for Hot-Forging of Automotive Components. **Journal of Materials Processing Technology**, 98 (2), p. 176-181, 2000.
- (4) SNAPE, R. G.; CLIFT, S. E.; BRAMLEY, A. N.; MCGILVRAY, A. N. Forging Modeling – Sensitivity to Input Parameters Using FEA. Report FMP - 19 Bath. School of Mechanical Engineering, University of Bath, Bath, UK 1986. 6p.
- (5) BABU, S.; SRIVASTAVA, A.; JOSHI, V.; SHIVPURI, R. Characterization and Measurement of Failure of Next Generation Material Forging Dies. In: FORGING INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE, 24<sup>th</sup>, 2002, Cleveland. **Research & Applied Technology in the Forging Industry...** Cleveland-Ohio: FIERF p. 1-17. CD
- (6) EBNER, R.; LEITNER, H.; JEGLITSCH, F.; CALISKANOGLU, D. Methods of Property Oriented Tool Steel Design. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON TOOLING, 5<sup>th</sup>, 1999, Leoben. **Tool Steels in the Next Century...** Leoben-Austria: Institut für Metallkunde und Werkstoffprüfung, 1999. p.3-24.
- (7) MIYAHARA, M.; NOMOTO, K.; UMINO M.; SERA, T.; KUOKAWA, Y.; OKADA, Y. Development of Life Prediction Model and Improvement of a Die Steel for Hot Forging Die. **Sumitomo Metals**, 48, p. 76, 1996.
- (8) DELAGNES, D.; REZAI-ARIA, F.; LEVAILLANT, C. GRELLIER, A. Influence of Temperature and Initial Hardness on Fatigue Behavior and Life of a 5% Cr Hot Work Tool Steel. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON TOOLING, 5<sup>th</sup>, 1999, Leoben. **Tool Steels in the Next Century...** Leoben-Austria: Institut für Metallkunde und Werkstoffprüfung, 1999. p.195-204.

**ABSTRACT:** Two variables were studied in this work, die temperature and stress that act to limit die life in the forging of truck frontal axle. The influence of geometry in the stress level was studied through changes in the die cavity radius. To validate the model, information as die temperature, number of blows and production rate were got from forging shop and compared with those from FEM in 2D environment. The results showed that die temperature and stress can be considered as the major variables to die life in this event. The die temperature control in the forging shop can be considered as an important characteristic to improve die life , thus the interaction between die temperature plus hot yield stress of tool steel.