

# OTIMIZAÇÃO DA CONFORMAÇÃO A QUENTE SUSTENTADA POR CAE<sup>1</sup>

Márcio Henrique Pereira<sup>2</sup>  
Hamilton Corrêa<sup>3</sup>  
Paulo César Sigoli<sup>4</sup>  
Mauro Moraes de Souza<sup>5</sup>

## Resumo

A crescente exigência por redução de custos, redução na utilização de matéria-prima e no aumento da produtividade, como ferramentas de desenvolvimento sustentável, força os fabricantes de produtos forjados para a indústria automobilística a adotarem rígidos programas de melhoria contínua em seus processos. No entanto, o desafio de unir alta produtividade com redução de utilização de matéria-prima e de custos torna, muitas vezes, um projeto inviável, frustrando o desenvolvimento de melhorias nos processos de forjamento. Tal desafio pode ser atingido com o auxílio de ferramentas CAE aliadas às teorias clássicas da conformação dos metais, sendo possível alcançarem-se desenvolvimentos bem sucedidos de processos de conformação otimizados. O sucesso no desenvolvimento do processo de conformação depende da acurácia dos resultados do CAE, bem como a intervenção de especialistas em conformação, os quais são imprescindíveis em situações de quebra de ferramentas. Desta forma, este trabalho apresenta procedimentos para a utilização consequente de ferramentas CAE no desenvolvimento de projetos de conformação a quente visando antecipar possíveis quebras de ferramentas antes da fase de *try-out*, ou seja, na fase de desenvolvimento puramente virtual das ferramentas.

**Palavras-chave:** Conformação; Ferramental; CAE; Otimização.

## HOT FORMING OPTIMIZATION SUPPORTED BY CAE

### Abstract

The forging demand for cost reduction, raw material reduction and for productivity increase, as a tool for sustainable development, forces forged parts suppliers of the automotive industry to adopt severe continuous improvement of their processes. Although the challenge to balance high productivity, raw material use and cost reduction sometimes results in unviable projects, frustrating the improvement of forming processes. Such challenges can be reached through CAE tools associated to classics metal forming theory enabling a successful development of metal forming optimized processes. The success of a metal forming process development depends not only on the accuracy from CAE, but also on the metal forming specialist intervention, they are vital at tool failure analyses. This work presents procedures for a consequent CAE tool application in hot forming projects, aiming to predict possible tool failure during virtual development of the tooling before the try-out phase.

**Key-words:** Metal forming; Tooling; CAE; Optimization.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro mecânico. Engenheiro de processos da Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda.*

<sup>3</sup> *Tecnólogo de projetos. Tecnólogo de processos da Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda.*

<sup>4</sup> *Tecnólogo de projetos. Tecnólogo de pesquisa e desenvolvimento da Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda.*

<sup>5</sup> *Engenheiro metalurgista e mestre em ciências dos materiais pelo IME/RJ, doutor em engenharia com ênfase em conformação mecânica de metais pela RWTH Aachen/Alemanha. Diretor de engenharia e desenvolvimento da Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda.*

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de forjados que supre a cadeia produtiva das montadoras de veículos procura a redução de custos e de tempo (*set-up* e produção) visando alcançar suas metas permanecendo competitivas. Amplamente utilizada nas indústrias, a conformação a quente mostra-se um processo de fabricação confiável e com elevada taxa de repetibilidade. Produtos conformados a quente adquirem excelentes propriedades mecânicas, o que colabora com os esforços das montadoras no desenvolvimento de projetos que priorizam a redução da massa do veículo e, por consequência, a redução no consumo de combustível e de emissões de poluentes.

### 1.1 Conformação Plástica

A conformação plástica é um processo de deformação onde a matéria-prima de entrada, o *blank*, é moldada adquirindo as geometrias das ferramentas sem que haja perda ou ganho de massa.<sup>(1)</sup> A sua utilização na indústria de transformação vai desde elementos de fixação, parafusos e porcas, a produtos com geometrias complexas, grandes, volumosas e de grandes massas, como por exemplo, engrenagens de transmissões, virabrequins e rotores de turbinas. Os processos de conformação possuem uma grande relevância econômica, visto que a maioria dos produtos passa por um ou mais processos de fabricação que os envolve, exceto produtos obtidos por fundição.<sup>(1)</sup>

### 1.2 Forjamento a Quente

O processo de fabricação por forjamento é caracterizado pela deformação aplicada ao material através de martelamentos ou prensagens.<sup>(2)</sup>

O processo de forjamento a quente é identificado pela temperatura de trabalho superior à de recristalização do material. Com a temperatura elevada, o forjamento a quente permite a utilização de equipamentos menores, com potência menor e, conseqüentemente, menores esforços no ferramental.<sup>(3)</sup>

No forjamento a quente é necessária a utilização de ferramentais como matrizes e punções para impor deformações controladas ao material para que ele adquira a geometria desejada do produto.<sup>(2)</sup>

As máquinas utilizadas para efetuar o trabalho são divididas em dois grupos: Martelos e Prensas. As prensas por sua vez são, ainda, subdivididas em horizontais e verticais.

### 1.3 Ferramental

O ferramental é muito importante no desenvolvimento do processo de forjamento a quente. Tanto pelas características geométricas que deve possuir para garantir o dimensional do produto, quanto para suportar os esforços resultantes da conformação. A figura 1 mostra dois tipos de ferramental que podem ser utilizados no forjamento a quente, as matrizes abertas e matrizes fechadas.<sup>(2)</sup>

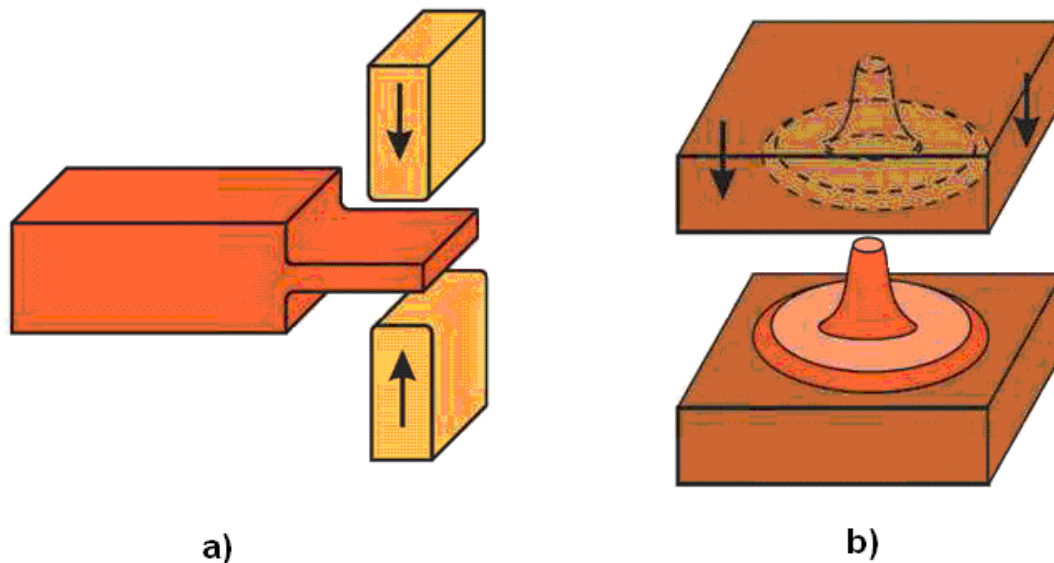


Figura 1: Tipos de matrizes: a) Matriz aberta e b) Matriz fechada.<sup>(4)</sup>

O material utilizado na confecção do ferramental é, geralmente, aço. Suas principais características são a alta resistência ao revenimento, elevada resistência mecânica a quente, boa tenacidade, resistência à fadiga e boa resistência à formação de trincas térmicas. Muitas dessas características são obtidas através de ciclos de tratamentos térmicos.<sup>(5)</sup>

#### 1.4 Mecanismo de Falha no Ferramental

Como característica inerente ao processo, o ferramental está sujeito às altas cargas e elevadas temperaturas. Mesmo com a escolha do aço adequado ao trabalho a quente, o ferramental fica exposto às falhas causadas pelo desgaste por atrito, deformação plástica, trincas, fadiga térmica e mecânica.<sup>(6)</sup>

##### 1.1.1 Deformação plástica

Falhas ou quebras por deformação plástica ocorrem quando o ferramental é submetido ao trabalho onde esforços superiores às tensões de escoamento do aço são gerados causando a deformação plástica do ferramental.<sup>(5)</sup>

##### 1.1.2 Desgaste por atrito

Os repetitivos de golpes necessários ao processo de forjamento do produto geram desgaste por atrito devido ao movimento relativo entre punções, matrizes e *blank*.<sup>(5)</sup>

##### 1.1.3 Fadiga mecânica

Devido ao comportamento cíclico o ferramental fica exposto ora a esforços ora não. Essas variações criam tensões alternadas que se repetem ao longo do tempo levando o material à falha.<sup>(6)</sup>

##### 1.1.4 Fadiga térmica

O aquecimento e o resfriamento do ferramental criam tensões térmicas de tração e tensões térmicas de compressão.<sup>(6)</sup> Essas tensões alternadas variam ao longo do tempo criando trincas que se propagam até o colapso total do material.

## 1.5 Método dos Elementos Finitos

Nos últimos quarenta anos, a conformação plástica dos metais evoluiu muito através da utilização do método dos elementos finitos (MEF), auxiliando os especialistas na definição da melhor estratégia de forjamento.

O MEF que, originalmente, foi desenvolvido para o estudo de análises estruturais onde é feita a discretização em um número finito de elementos e nós, passou a ser também utilizado em uma grande quantidade de estudos de engenharia e fenômenos físicos. A utilização do MEF para simulações de conformação plástica surgiu como uma extensão das técnicas utilizadas para as análises estruturais estendendo-se para o comportamento plástico <sup>(7)</sup>. Essa extensão chegou como suporte aos processos de conformação plástica, tanto para estudos de pequenas como para grandes deformações. Ainda que extremamente úteis na análise dos processos de conformação, as ferramentas que dispõem para análise de potencial quebra ou falha do ferramental são insatisfatórias e merecem desenvolvimento.

Para contribuir com os estudos sobre ferramental utilizado na conformação a quente, este trabalho apresenta simulações virtuais utilizando-se os programas comerciais DEFORM<sup>®</sup>, MEDINA<sup>®</sup>, PERMAS<sup>®</sup> e FEMFAT<sup>®</sup> para avaliar e validar o comportamento de um caso real de um ferramental bi-partido utilizado em uma máquina de alto desempenho Hatebur AMP70<sup>®</sup> na fabricação de um componente automotivo, que apresentou quebra prematura durante *try-out*, enquanto eram esperados aproximadamente 50.000 ciclos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para reproduzir o comportamento em ambiente virtual, foram levantadas as propriedades do aço H13 temperado e revenido que é utilizado na fabricação do ferramental. O aço H13, cujas propriedades encontram-se na Tabela 1, é característico para a construção de ferramental para o trabalho a quente.

**Tabela1:** Propriedades do aço H13 temperado e revenido.

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Módulo de Elasticidade (E)               | 210 GPa                 |
| Coefficiente de poisson (ν)              | 0,3                     |
| Densidade do aço (ρ <sub>aço</sub> )     | 7,85 Kg/dm <sup>3</sup> |
| Limite de escoamento (σ <sub>esc</sub> ) | 1730 MPa                |

No programa comercial DEFORM<sup>®</sup> foi feita a simulação do forjamento a quente. A temperatura de forjamento foi fixada em 1200<sup>o</sup> C e a do ferramental foi estabelecida em 300<sup>o</sup> C. A geometria do ferramental utilizado nas simulações foi obtida através do programa de desenho 3D NX4<sup>®</sup>. Na simulação do forjamento, criou-se uma malha para discretizar o *blank*.

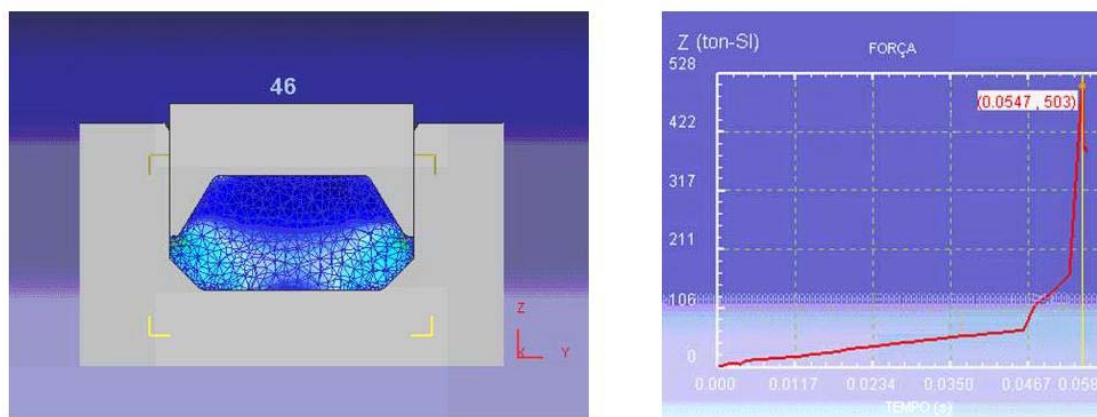
Com os resultados obtidos na simulação do forjamento, utilizaram-se os programas MEDINA<sup>®</sup> e PERMAS<sup>®</sup> para a análise estrutural do punção. A malha gerada teve por base uma discretização do punção em 830.000 elementos tetraédricos.

Com os valores de tensões obtidas e com as características de fabricação do punção, aço H13 temperado e revenido, rugosidade de 60 μm, temperatura do ferramental de 300<sup>o</sup> C, estudou-se o comportamento à fadiga do punção através do programa FEMFAT<sup>®</sup>. A análise de fadiga mostra a razão entre o número de ciclos desejados e o número de ciclos com que o elemento falha.

Como modelo de simplificação os comportamentos de desgaste por atrito e fadiga térmica foram desconsiderados.

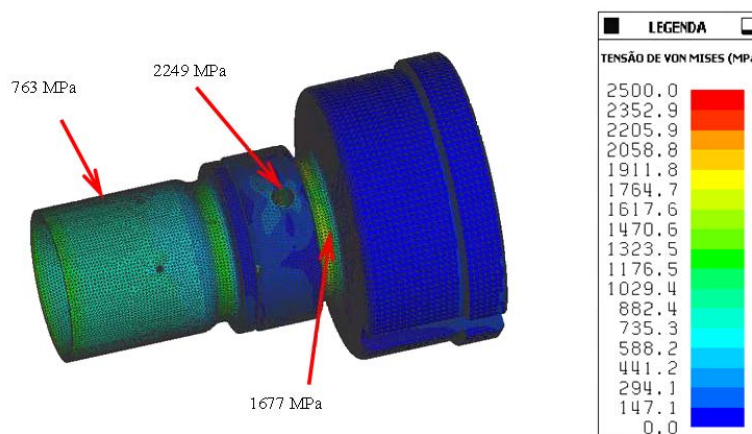
### 3 RESULTADOS

O resultado da simulação do forjamento mostrou uma força necessária para conformação de aproximadamente, 500 t, como mostra a Figura 2.



**Figura 2:** Simulação do processo de conformação utilizando o programa DEFORM®.

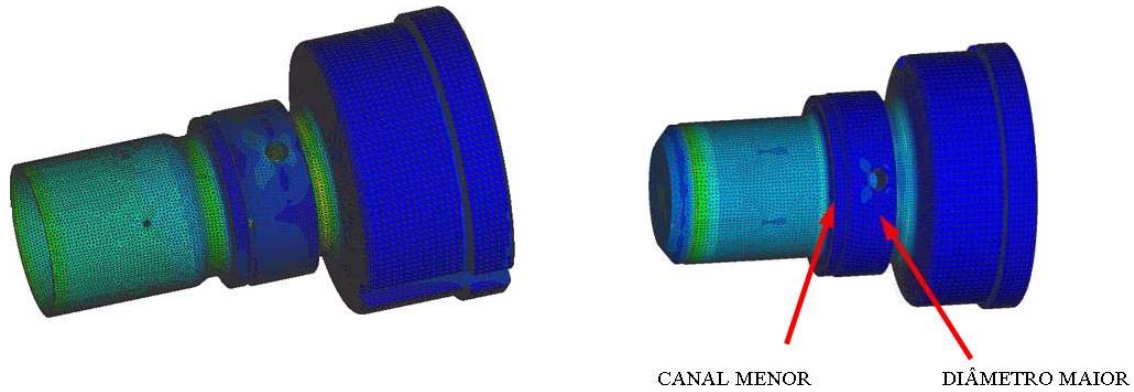
Com o valor obtido foi realizada a análise estrutural do punção através dos programas MEDINA® e PERMAS®. Através da simulação, identificaram-se regiões onde as tensões atuantes excediam ou estavam próximas ao limite de escoamento do aço H13 temperado e revenido. A Figura 3 mostra os valores obtidos na simulação seguindo o modelo de von Mises.



**Figura 3:** Simulação utilizando os programas MEDINA® e PERMAS®.

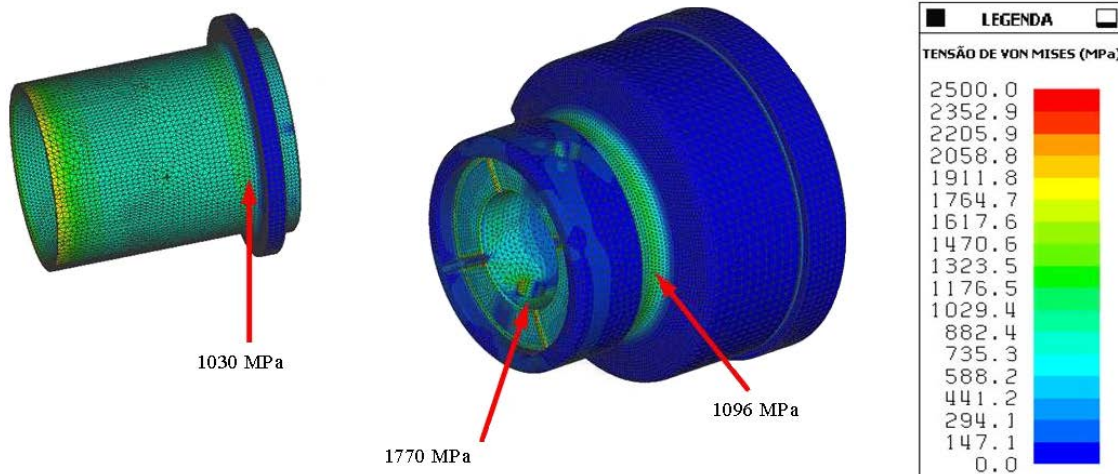
Os resultados obtidos confirmaram o comportamento real do ferramental mostrando que no furo roscado e nos canais de fixação as tensões excediam ou ficavam próximas ao limite de escoamento.

Utilizando o conhecimento dos especialistas foram propostas alterações na geometria do ferramental onde o canal do punção foi reduzido e o diâmetro da base de apoio do punção foi aumentado. A Figura 4 mostra as alterações propostas para atingirem-se tensões menores.



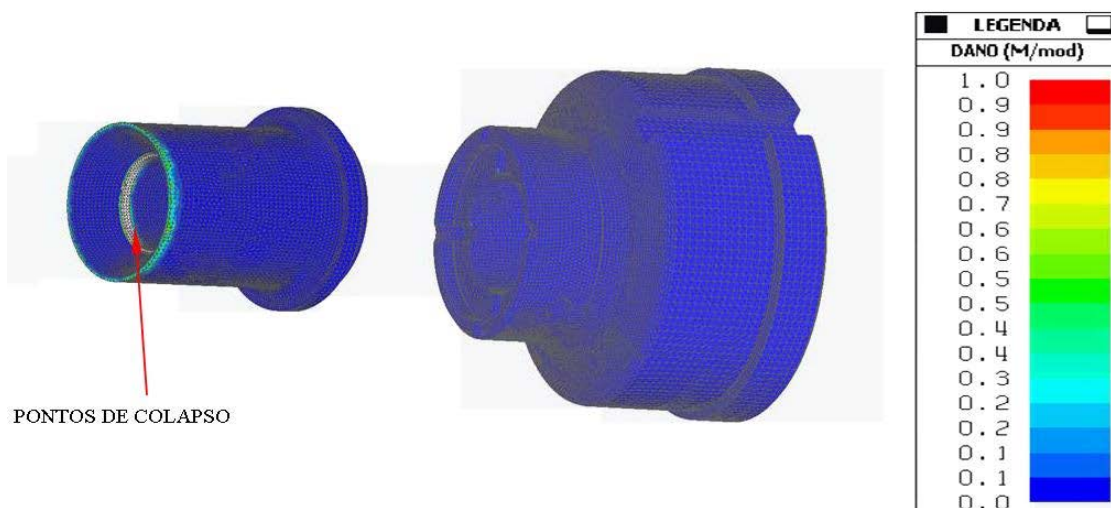
**Figura 4:** Alterações sugeridas pelos especialistas.

Com estas alterações fez-se uma nova simulação para avaliar o seu novo comportamento. Nesta nova análise, foi possível atingir uma redução de até 32% nos valores das tensões. A Figura 5 mostra os valores obtidos para as regiões dos canais e do furo roscado.



**Figura 5:** Simulação utilizando os programas MEDINA® e PERMAS® com as alterações propostas.

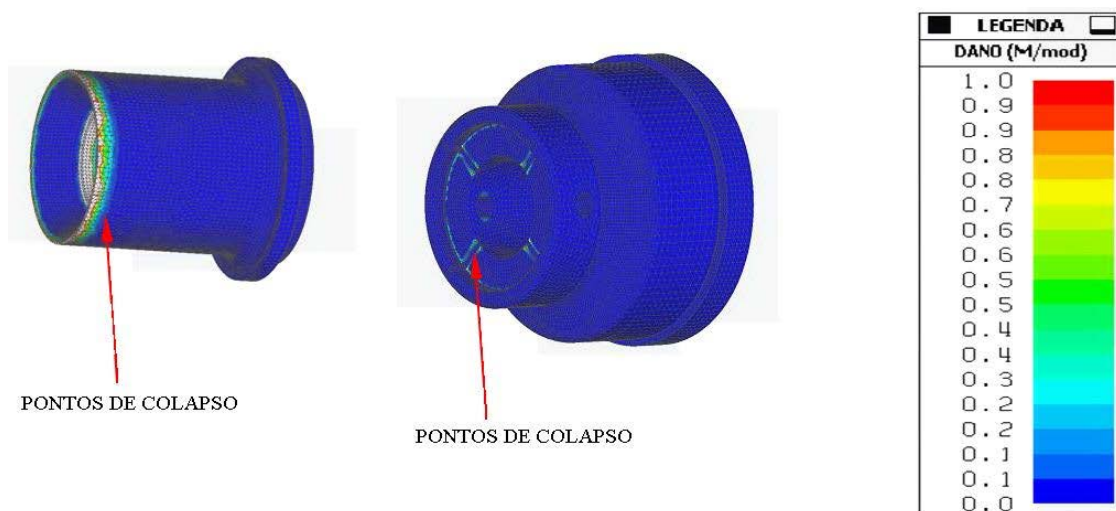
Com as tensões obtidas, verificou-se no programa FEMFAT® a vida do ferramental até que ele apresentasse falha. Nesta análise foi verificado o comportamento do ferramental para compará-lo aos históricos de falhas da forjaria. Para este conceito, o qual apresentou falha em *try-out*, a vida esperada era de cerca de 1.000 ciclos. A Figura 6 mostra o resultado da simulação.



**Figura 6:** Simulação de fadiga no programa FEMFAT® para 1.000 ciclos do ferramental com as alterações propostas.

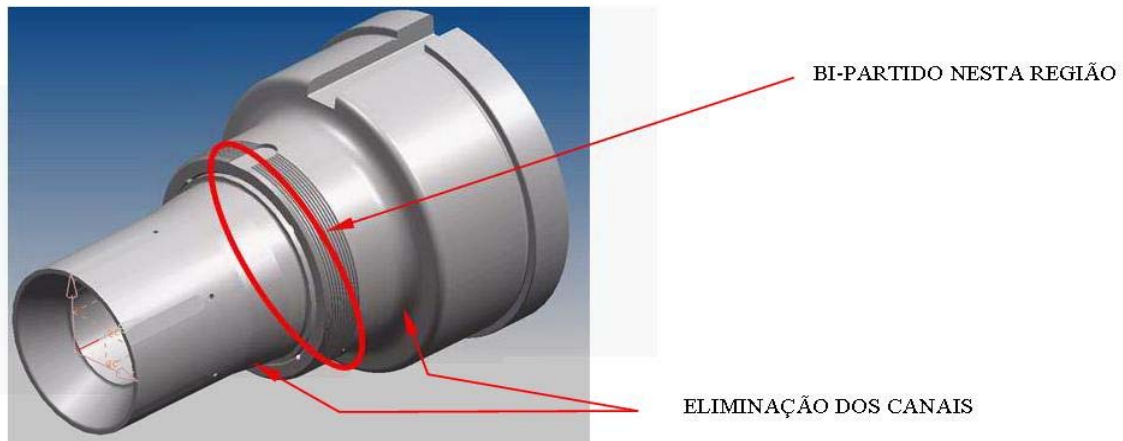
A simulação mostrou que para 1.000 ciclos a geometria do ferramental seria capaz de suportar os carregamentos, exceto na ponta do punção onde surgem pontos de colapso devido ao canto vivo e ao contato com *blank*.

Para estudar o comportamento do ferramental em condições extremas foi feita uma proposta de simulação de fadiga para 200.000 ciclos de trabalho. Essa condição possibilitaria avaliar o comportamento do punção e da base levando em conta o retrabalho da ponta do punção para a reutilização em mais três lotes de forjamento de 50.000 peças. A Figura 7 mostra o resultado da simulação da fadiga.



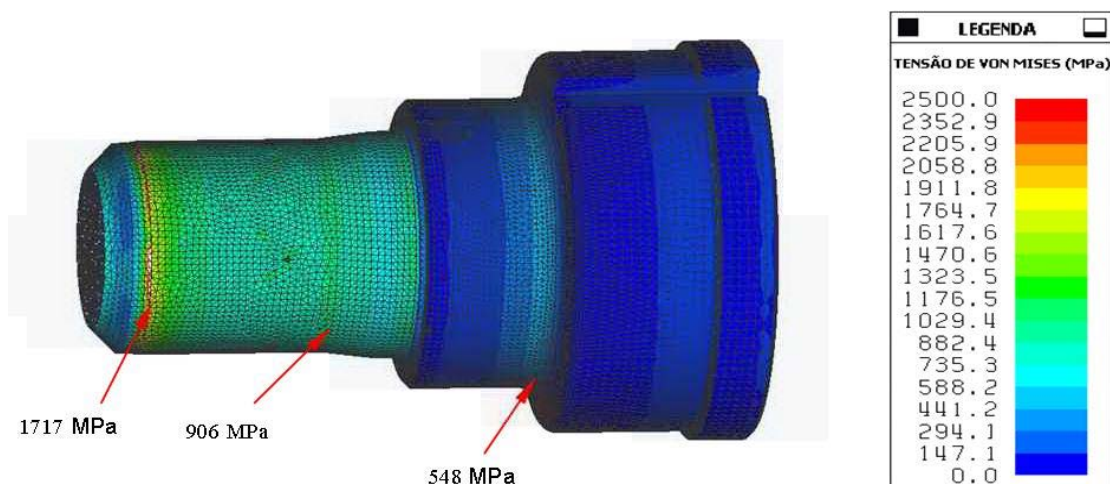
**Figura 7:** Simulação de fadiga no programa FEMFAT® para 200.000 ciclos do ferramental com as alterações propostas

Pela análise da figura anterior os especialistas propuseram novas alterações na geometria e na fixação do punção à base. Nesta terceira geometria o canal do punção foi eliminado e a fixação passou a ser feita por um sistema roscado, como mostra a Figura 8.



**Figura 8:** Nova geometria e novo sistema de fixação por rosca.

Desenvolveu-se a simulação da análise estrutural novamente para verificar as tensões no ferramental com as alterações propostas. A Figura 9 mostra os valores de tensões obtidos. Os resultados encontrados são inferiores aos da geometria anterior.

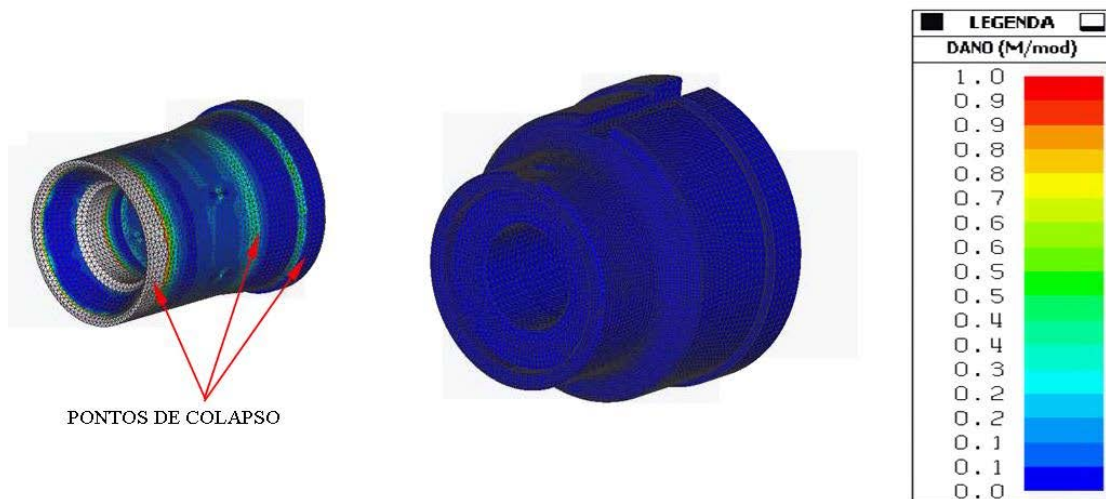


**Figura 9:** Simulação da proposta sem canal e com sistema de fixação por rosca nos programas MEDINA® e PERMAS®.

A região que apresenta tensões de 1717 MPa é a ponta do punção que possui uma característica peculiar de canto vivo devido às características necessárias do produto. Esse detalhe fez a tensão na região ficar muito alta.

Após a avaliação e validação da nova proposta, foram refeitas as simulações para 1.000, 50.000 e 1.000.000 de ciclos para compará-las aos estudos apresentados anteriormente. A Figura 10 mostra o resultado para a simulação de vida infinita do ferramental.





**Figura 10:** Simulação de fadiga no programa FEMFAT® para 1.000.000 ciclos da proposta sem canal e com sistema de fixação por rosca.

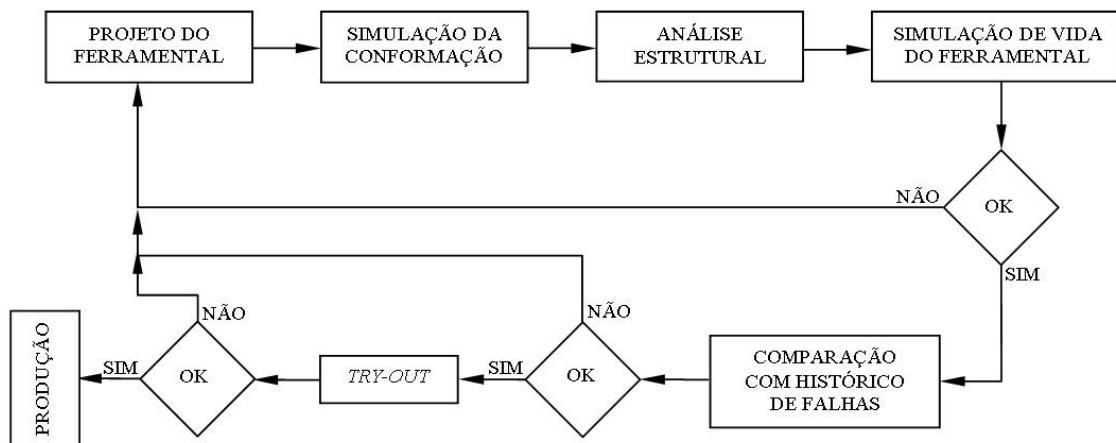
#### 4 DISCUSSÃO

Para otimizar-se a utilização do ferramental e a conformação plástica, desenvolveu-se um punção que fosse bi-partido. Essa idéia surgiu a partir da observação de punções que quebravam durante o forjamento. Decidiu-se, então, criar um punção que já fosse partido na região da fratura. Sendo bi-partido, seria necessária a fixação do punção à base, o que foi feito através de garras e parafusos. A Figura 4 mostrou o primeiro conceito de desenvolvimento do punção bi-partido. Mesmo com a alteração, o ferramental, agora base e punção, continuou a apresentar falha. O canal para fixação das garras à base apresentou quebra muito antes do previsto, em torno de 1.000 ciclos. O histórico aponta que, para cerca de 50.000 ciclos, um ferramental torna-se economicamente viável e é uma referência para vida útil do ferramental. As tensões apresentadas na Figura 3 ficavam próximas ao limite de escoamento do aço ou o superavam levando o material à deformação plástica muito antes da previsão de desgaste.

A intervenção de especialistas possibilitou o desenvolvimento de novas geometrias eliminando os canais de fixação e flexibilizando um novo conceito para fixar o punção à base, agora por um sistema de fixação através de rosca.

Mesmo com a utilização de software dedicado à conformação plástica, não foi possível estudar o comportamento à fadiga e ao desgaste do ferramental, como é prometido por muitos dos programas, fazendo-se necessária a utilização de outras ferramentas CAE que suportassem as análises virtuais. A falta de literatura específica também dificultou os estudos. Esta deficiência de meios de consulta motivou a utilização de outros programas de simulação virtual para criarem-se rotinas de análise que possibilitassem o estudo do ferramental.

Com a rotina proposta na Figura 11, foi possível desenvolver uma base durável e intercambiável possibilitando-se trocar apenas o punção.



**Figura 11:** Proposta para rotina de desenvolvimento virtual.

Utilizando-se o mesmo conceito de ferramental bi-partido que foi bem sucedido no estudo de um componente automotivo fabricado em uma prensa horizontal a quente Hatebur AMP70<sup>®</sup>, foi desenvolvido um novo projeto para um produto fabricado em uma Hatebur AMP30<sup>®</sup>. O resultado já superou o mínimo de ciclos econômico de trabalho com o ferramental, que é mostrado na Figura 12. Embora este caso seja diferente da AMP 70<sup>®</sup>, a validação real em condições de produção mostra que a solução do ferramental bi-partido é viável e coerência com as grandezas dos valores encontrados nas simulações virtuais.



**Figura 12:** Ferramental bi-partido com sistema de fixação por rosca utilizado em prensa horizontal Hatebur AMP30<sup>®</sup>.

Dessa forma torna-se possível a utilização de ferramentas CAE na busca pela otimização da conformação a quente junto com a experiência dos especialistas no desenvolvimento de ferramental, ou seja, na fase de projeto anterior ao *try-out*, sem que haja necessidade de validações práticas demoradas e custosas.

A não necessidade de validações práticas torna o desenvolvimento e o processo de conformação a quente mais viável e elimina os custos de testes durante a fase de *try-out* reduzindo o tempo de projeto.

## 5 CONCLUSÃO

Os programas de simulação que se propõem a abranger todo o processo de conformação plástica, desde a simulação do forjamento até a previsão de vida útil do ferramental, ainda não se observam bem sucedidos na prática, e a existência de literatura especializada nesta área é limitada.

Este trabalho mostrou que é possível criar e utilizar uma interface entre programas de conformação e de análise estrutural para a determinação da vida útil do ferramental utilizando diferentes programas.

O uso de programas de simulação da conformação plástica, de análise estrutural e de análise de fadiga permitiu chegar a uma melhor solução para construção de uma base intercambiável com vida infinita. Utilizando-se as ferramentas CAE junto com a experiência e *know-how* de especialistas, foi possível criar uma rotina de trabalho possibilitando a previsão de vida útil do ferramental o que contribui para a otimização da conformação a quente. A validação prática deste conceito se mostrou coerente com os valores obtidos no ambiente virtual.

## REFERÊNCIAS

- 1 LANGE, K., Handbook of Metal Forming, 1<sup>st</sup> Edition, United States of America, McGraw-Hill, 2.1-2.3, 1985
- 2 DIETER, G., E., Mechanical Metallurgy, SI metric edition, London, McGraw-Hill, 564, 1988
- 3 HOSFORD, W.; CADELL, R., M., Metal Forming - Mechanics and Metallurgy, 4<sup>th</sup> edition, Cambridge, Cambridge University Press, 69, 2011
- 4 Schuler Metal Forming Handbook, Goepfingen, Springer-Verlag, 6-8, 1998
- 5 VILLARES, Aços para Ferramentas – Aços para trabalho a quente, Aços Villares S.A., São Paulo, 1990.
- 6 ENGLUND, D., FORSSTÖM, D., Investigation Into The Tool Failure of Hot Forming Tools and Their Tribological Behavior, Master Thesis Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Machine Elements, Luleå University of Technology, Luleå, 1-4, 2010.
- 7 KOBAYASHI, S.; ALTAN, T.; OH, S., Metal forming and the Finite-Element Method, Oxford Series on Advanced Manufacturing, New York, Oxford University Press, 1-8, 1989