

ANÁLISE NUMÉRICA DO FORJAMENTO DE PRECISÃO DE UM COMPONENTE AUTOMOTIVO*

Wesley Witer¹André Rosiak²Thomas Gomes do Santos³Lirio Schaeffer⁴

Resumo

O forjamento de precisão é uma tecnologia altamente atrativa economicamente por possibilitar a redução da cadeia de processos e a ampliação da eficiência de consumo de matéria-prima. Contudo, os requisitos relativos à precisão dimensional exigem altos padrões de projeto que só podem ser alcançados através de análise numérica. Neste estudo, é realizada a simulação numérica do processo de forjamento a quente de precisão de um componente automotivo no aço DIN 16MnCr5. As particularidades da utilização do método dos elementos finitos no desenvolvimento do projeto de um forjamento de precisão a quente são expostas e discutidas.

Palavras-chave: Forjamento de precisão; Elemento finitos; Simulação numérica.

PRECISION FORGING NUMERICAL ANALYSIS OF AN AUTOMOTIVE COMPONENT

Abstract

Precision forging is a highly economically attractive technology as it enables the reduction of the process chain and the expansion of raw material consumption efficiency. However, dimensional accuracy requirements demand high design standards that can only be achieved through numerical analysis. In this study, a numerical simulation of the precision hot forging process of an automotive component in DIN 16MnCr5 steel is performed. The particularities of using the finite element method in the development of a precision hot forging project are exposed and discussed.

Keywords: Precision forging; Numerical simulation; Finite element.

¹ Graduando em Engenharia Metalúrgica, bolsista de iniciação científica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

² Mestre em Engenharia Metalúrgica, doutorando do programa de pós graduação em minas, metalurgia e materiais – PPG3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

³ Mestre em Engenharia Metalúrgica, doutorando do programa de pós graduação em minas, metalurgia e materiais – PPG3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico, doutor em engenharia, professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O forjamento de precisão requer esforço considerável no desenvolvimento do projeto do processo. O dimensionamento preciso do billet, o projeto da sequência de etapas de conformação e o cálculo das forças máximas representam grandes desafios para as empresas de forjamento [1].

Atualmente, a produção de peças forjadas de precisão é impensável sem o projeto de processo auxiliado por computador [2,3]. Neste contexto, o método dos elementos finitos (*Finite Element Method - FEM*) estabeleceu-se como uma ferramenta para a otimização do processo [4]. A simulação FEM não só permite prever o fluxo de material, mas uma análise realista da ferramenta durante a fase de concepção do ferramental. Devido às solicitações térmicas e mecânicas particularmente altas e a precisão do volume da peça requerida para processos de forjamento de precisão, o uso do FEM é particularmente importante [5]. No contexto de tempos de desenvolvimento de produtos cada vez mais curtos, o projeto de processos de conformação assistidos por FEM pode dar uma importante contribuição para o desenvolvimento e otimização de processos eficientes e econômicos [6].

Destarte, este estudo se propõe a expor as particularidades da utilização do método dos elementos finitos no desenvolvimento do projeto de um forjamento de precisão a quente. O processo de conformação de um rotor de polos tipo garra forjado a partir do aço DIN 16MnCr5 é investigado. A análise numérica é precedida por uma breve revisão da literatura disponível composta pelos fundamentos teóricos do processo de forjamento de precisão a quente.

2. Forjamento de Precisão a Quente

O termo forjamento de precisão não especifica um processo de forjamento distinto, mas descreve uma abordagem filosófica ao forjamento. O objetivo desta abordagem é produzir a peça na sua forma final (*net shape*) ou pelo menos próximo à forma final (*near-net-shape*) [7]. O forjamento de precisão é, portanto, um processo de fabricação inovador de componentes altamente solicitados. Em casos excepcionais, tolerâncias de fabricação de até IT 7 podem ser alcançadas. Além disso, as precisões alcançadas são comparáveis às das operações de usinagem [5].

A principal diferença entre o forjamento convencional e o forjamento de precisão é a tecnologia da ferramenta a ser usada. O processo é executado em matriz completamente fechada (sem zona de rebarba). Consequentemente, a rebarba, que pode atingir até 30% do volume de material no forjamento convencional, é eliminada [5].

Em particular, os componentes automotivos de alta resistência oferecem um amplo campo de aplicação para a tecnologia de forjamento de precisão. A Figura 1 apresenta exemplos de componentes obtidos através desta tecnologia



Figura 1 - Peças forjadas de precisão [8].

Além da redução de consumo de matéria-prima devido a eliminação da rebarba, o peso do componente final também pode ser reduzido em comparação com a variante simplesmente usinada. Isso se deve ao aprimoramento das propriedades mecânicas induzido pela deformação plástica. Dessa forma, as dimensões dos componentes podem ser reduzidas, apoiando a tendência atual de redução de peso e construção leve.

A alta eficiência de consumo de material do forjamento de precisão é acompanhada da redução cadeia de processo. A não formação de rebarba, elimina a necessidade de etapas de conformação para a remoção do excesso de material e diminui o número de etapas de usinagem. A usinagem limita-se às faces funcionais da peça, com baixíssimo volume de cavaco.

A obtenção da precisão objetivada no processo estabelece desafios consideráveis que aumentam as demandas sobre a ferramenta e o projeto. No processo, para aumentar a deformabilidade, as peças de aço são forjadas em temperaturas de até 1250°C. Devido às elevadas pressões de contato e à relação volume-superfície não uniforme das peças, a perda de calor nos detalhes é intensa. Isso acarreta um resfriamento local intenso e não homogêneo na peça. A transferência de calor da peça (em alta temperatura) para a matriz (em temperaturas relativamente baixas) resulta na expansão térmica da matriz. Além disso, o resfriamento não homogêneo também influencia a contração posterior das peças. A variação das dimensões da peça devido a expansão da matriz e a contração da peça após o forjamento deve ser compensada por uma correção geométrica da matriz. Esta correção também precisa compensar as deformações elásticas da matriz e da peça.

O material da peça de trabalho também influencia o resfriamento e as características de contração. A influência do material depende essencialmente das propriedades termo físicas da liga do aço utilizado. A expansão térmica específica do material e o comportamento de contração dos aços são fatores determinantes [5].

Outro aspecto crítico do processo está associado a precisão volumétrica do billet. Flutuações superiores a 0,5% no volume do billet já são capazes de colocar em risco a operação ao gerar preenchimento excessivo, formação de rebarbas indesejadas e sobrecargas nas ferramentas. Ademais, o requisito de constância de volume deve ser atendido em todas as etapas da sequência de processamento, tornando a oxidação superficial um problema grave. Para minimizar a oxidação durante o forjamento, o billet deve ser aquecido até a temperatura de forjamento o mais rápido possível e não deve ser mantido por muito tempo nesta temperatura. Atmosferas protetoras e revestimentos também são úteis na prevenção de oxidação. Se não for

possível evitar, a oxidação deve ser removida, pelo menos antes do primeiro estágio de forjamento [7].

Devido à geometria complexa, as ferramentas de forjamento de precisão são mais suscetíveis ao desgaste do que as ferramentas de conformação convencionais. As tolerâncias de fabricação mais baixas dos forjados de precisão também exigem uma tolerância correspondentemente reduzida para os vários sinais de desgaste [5].

3. Materiais e Métodos

A peça em análise consiste em um rotor de polos tipo garra utilizado em alternadores de automóveis. O detalhamento e o modelo 3D da geometria forjada são mostrados na Figura 2.

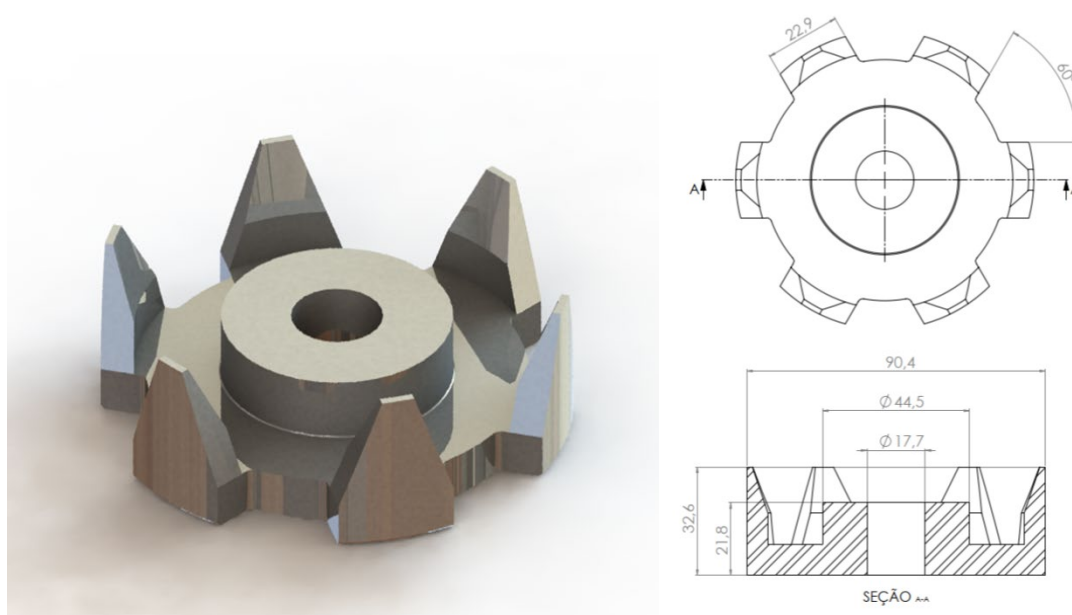


Figura 2 - Peça forjada.

Na presente investigação, o software FORGE 3.0 foi utilizado na análise por elementos finitos do processo de forjamento de precisão. A Figura 3 mostra o modelo tridimensional utilizado na simulação. Considerando a simetria rotacional dos componentes do processo, apenas uma porção do volume das geometrias (90° de ângulo) foi utilizada na modelagem. Esta técnica de simplificação do modelo reduz a quantidade de elementos gerados e o esforço computacional, permitindo melhorar o refino de malha para aprimorar a qualidade de resultados. Para uma representação mais clara, alguns resultados são mostrados com a geometria expandida em 360°.

No forjamento de precisão não há formação de rebarba, portanto, a dimensão do billet e o projeto da matriz são cruciais. No processo analisado, um billet tubular foi utilizado para reduzir o consumo de material e para obter uma produção *near-net shape*. O billet possui 73,15mm de diâmetro externo, furo de 18mm e altura de 19 mm.

O ferramental proposto consiste em quatro componentes: (i) matriz, (ii) contra-punção, (iii) punção e (iv) mandril. A matriz e o contra-punção são estáticos, enquanto o punção e o mandril são componentes móveis. Um comportamento de material elastoplástico é atribuído ao billet e as ferramentas, resultando em um maior

esforço de cálculo. A peça de trabalho é conformada de acordo com o Critério de Escoamento de von Mises.

Os elementos do modelo foram discretizados em elementos triangulares. Devido ao elevado nível de deformação durante o forjamento, a malha é severamente distorcida e o remalhamento é necessário. O remalhamento automático é escolhido durante a simulação, fornecendo a profundidade de interferência relativa 0,5.

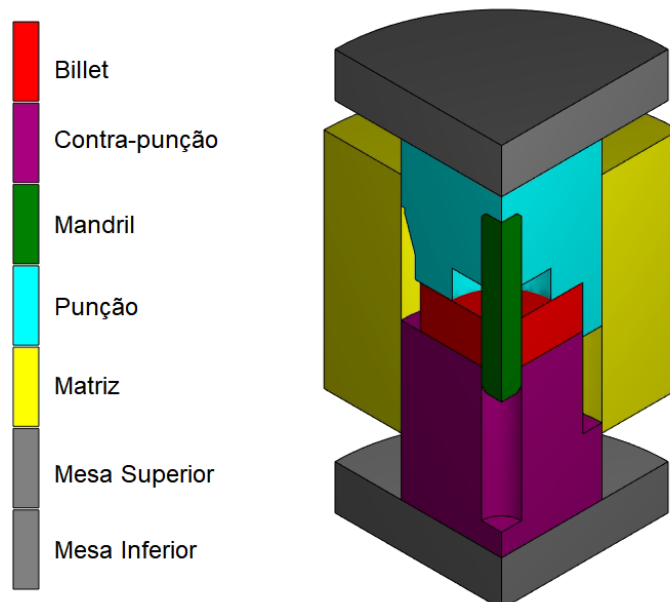


Figura 3 – Modelo tridimensional do processo de forjamento de precisão.

O material do bilhet é o DIN 16MnCr5 e as ferramentas são de AISI H13. As curvas de escoamento do material de trabalho para várias deformações, velocidades de deformação e temperaturas são encontradas na biblioteca do software. A temperatura de forjamento do bilhet é de 1200°C e uma temperatura de pré-aquecimento de 100°C é considerada para as ferramentas. O coeficiente de atrito nas interfaces de contato é considerado constante e com valor de 0,3. Neste estudo, a máquina de conformação é uma prensa hidráulica. Os dados cinemáticos da máquina foram introduzidos no modelo. A velocidade de avanço do punção é de 5 mm/s e curso máximo foi definido em 10,1 mm. A Tabela 1 lista os parâmetros térmicos, mecânicos e operacionais utilizados na simulação numérica.

Tabela 1 - Parâmetros térmicos, mecânicos e operacionais utilizados na simulação numérica do processo de forjamento de precisão a quente.

Tipo de Malha	Triangular
Tamanho da malha do bilhet	0,5 mm
Tamanho da malha das ferramentas	2 mm
Temperatura inicial do bilhet	1200°C
Temperatura inicial das ferramentas	100°C
Coeficiente de atrito	0,3
Velocidade da ferramenta	5mm/s
Coeficiente de Transferência de Calor (bilhet-ferramentas)	20000 W/m ² .K

4. Resultados

O cálculo do fluxo de material, o preenchimento do molde, a distribuição de temperatura, o grau de deformação na peça e a força de conformação são consideradas análises padrão do projeto de processos de conformação [9]. As elevadas tensões induzidas nas ferramentas durante o forjamento de precisão, bem como a troca térmica intensa entre a peça e o ferramental tornam necessárias a expansão das análises com a modelagem termomecânica das ferramentas. A seguir os resultados numéricos referentes ao processo proposto são apresentados.

4.1 Preenchimento das Ferramentas

A Figura 4 apresenta o resultado referente ao contato entre as ferramentas e o billet no processo investigado. O critério "distância até a ferramenta" foi utilizado para avaliar o preenchimento das ferramentas. Nesta abordagem, a distância entre a superfície da peça e o contorno da matriz é visualizada na superfície do volume conformado. As regiões em vermelho correspondem as superfícies em que ocorreu contato completo entre as ferramentas e a peça de trabalho.

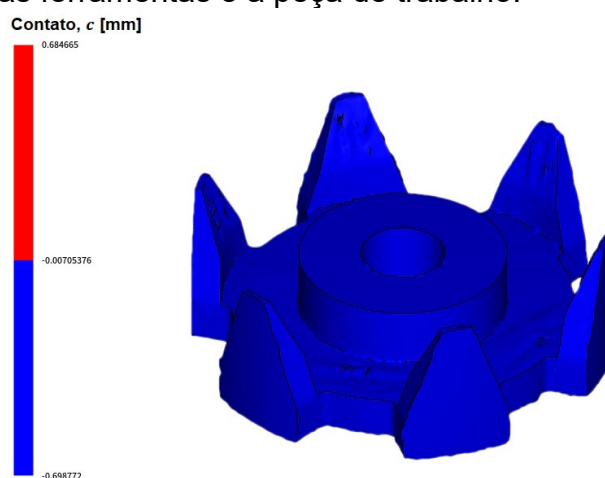


Figura 4 – Resultado numérico referente ao contato entre as ferramentas e a peça.

O preenchimento das ferramentas é especialmente importante na análise dos processos de forjamento de precisão, uma vez que o volume da cavidade e do billet são idênticos. Conforme mostra a Figura 4, o volume do billet é suficiente para garantir o preenchimento completo das cavidades sem que nenhuma rebarba fosse gerada. Isso demonstra que a geometria do billet e o deslocamento das ferramentas foram adequados para a obtenção de uma peça livre de defeitos.

A Figura 5 mostra diversos estágios da peça durante o processo de forjamento, desde a geometria inicial não deformada (estágio 0) até a peça final (estágio 8). Inicialmente (estágios 1 a 6), ocorrem, simultaneamente, a extrusão inversa da região central da peça e o recalque da periferia do billet, acarretando o escoamento radial do material para a formação da base dos dentes. No estágio 7, a cavidade central do punção é completamente preenchida e o material escoia apenas verticalmente, na extrusão inversa para formação dos dentes. Por fim, os dentes são completamente formados e as cavidades completamente preenchidas (estágio 8). O projeto funcional e orientado do processo e a geometria do componente determinam o fluxo e o comportamento de preenchimento das ferramentas e, portanto, o resultado final do forjamento. As ferramentas foram projetadas de forma adequada para garantir o escoamento preciso do material e, ao longo de todo processo,

nenhum defeito associado ao fluxo de material, como dobras, por exemplo, é verificado.

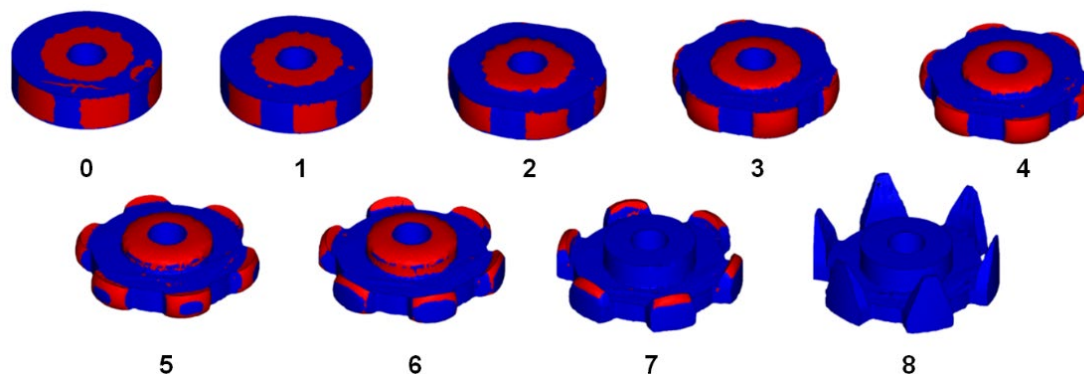


Figura 5 – Fluxo de material durante o fechamento das ferramentas.

4.2 Distribuição de Temperatura na Peça

O cálculo da distribuição de temperatura na peça é usado para o planejamento ideal do processo. Como resultado, a temperatura mínima necessária do bilhet pode ser determinada na fase de projeto em função do transporte e dos tempos ociosos, bem como da força de conformação máxima disponível [5]. A Figura 6 apresenta a distribuição da temperatura na peça após a conformação.

A distribuição de temperatura na peça é bastante heterogênea. O núcleo da peça, onde se concentra a maior parte do volume da geometria, mantém o calor durante o processo e a temperatura máxima é identificada nesta região (1136°C). Em toda superfície a perda térmica é acentuada e as regiões que se mantiveram por mais tempo em contato com as ferramentas são aquelas mais frias, com temperaturas próximas a 400°C. Durante o processo de extrusão inversa para formação dos dentes das garras, a superfície superior do material entra em contato direto com as ferramentas. Este é o motivo das extremidades dos dentes apresentarem temperaturas superiores em relação ao restante da superfície da peça. A razão para a forte redução de temperatura na geometria é a intensa transferência de calor da peça para as ferramentas durante a conformação.

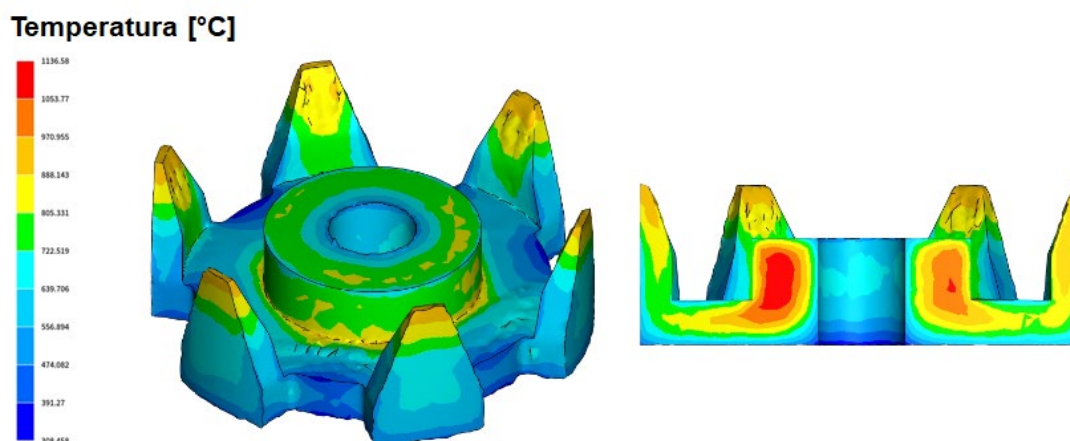


Figura 6 – Resultado numérico referente a distribuição de temperatura na peça após o forjamento.

A escolha da máquina de conformação tem uma grande influência na transferência de calor para as ferramentas através do tempo de contato e, portanto, na distribuição de temperatura no forjamento [6,10]. Como neste estudo é utilizada uma

prensa hidráulica de baixa velocidade, o tempo de contato entre as ferramentas e a peça de trabalho é elevado, gerando uma intensa troca térmica.

O cálculo do histórico térmico da peça de trabalho é a base para o projeto de um tratamento térmico a partir da temperatura de forjamento. Devido a perda térmica brusca da peça, o emprego de um tratamento térmico (têmpera) integrado ao processo de conformação não seria viável. Para que a têmpera possa ser realizada diretamente da temperatura de forjamento seria necessário a utilização de uma prensa de maior velocidade ou um martelo.

4.3 Distribuição de Deformação na Peça

A Figura 7 mostra a distribuição da deformação equivalente na peça forjada. O grau de deformação do processo indica o quão fortemente as áreas individuais da peça forjada são deformadas. Um maior grau de deformação leva ao refinamento do grão e, portanto, a um aumento na resistência [11-13]. Isso deve ser levado em consideração ao definir as áreas de componentes de alta resistência. O conhecimento do grau máximo de deformação no forjamento também é importante para a seleção do material. A liga selecionada deve possuir deformabilidade adequada para suportar a deformação máxima sem sofrer ruptura. Além disso, em processos de vários estágios, a força de conformação máxima necessária pode ser reduzida distribuindo uniformemente o grau de conformação em todos os estágios de conformação [5].

O grau de deformação é menor no centro da peça ($\phi < 0,9$), pois foi utilizado um cilindro oco como geometria do billet. O grau de deformação aumenta do centro até a extremidade das garras, onde atinge valores próximos a $\phi = 3,5$. Uma vez que o grau de deformação é acompanhado por um endurecimento do material, uma resistência aprimorada nos dentes e uma característica mais dúctil no centro do rotor são esperados devido ao escoamento do material. As deformações mais severas são observadas no raio do relevo central da geometria. Neste ponto, deformações de até $\phi = 6,8$ são observadas. Devido a precisão requerida após a operação de forjamento, os raios da peça não são suavizados. Consequentemente, a deformação localizada mostrada na Figura 7 torna-se inevitável.

Deformação Equivalente [-]

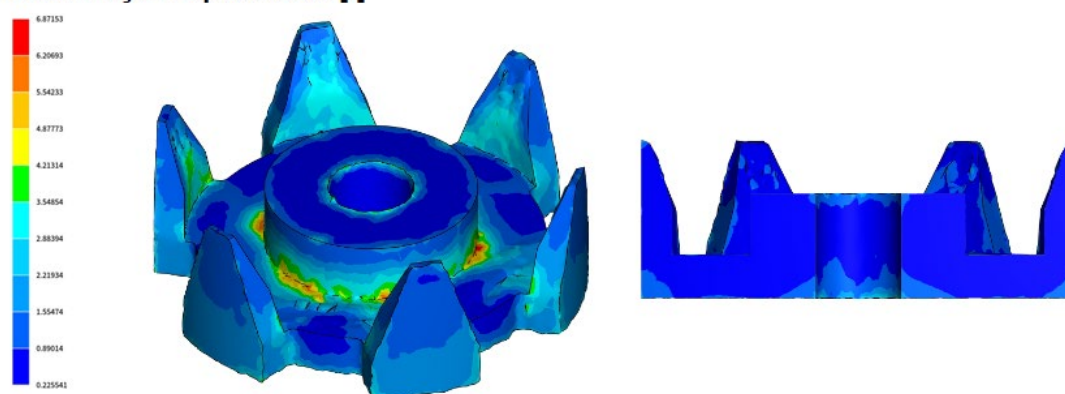


Figura 7 – Resultado numérico referente a distribuição de deformação equivalente na peça após o forjamento.

4.4 Velocidade de Deformação

A Figura 8 mostra o resultado numérico referente a velocidade de deformação na peça ao final do forjamento. A distribuição deste parâmetro ao longo do corpo do rotor

é relativamente homogênea. Contudo, nos dentes da peça, a velocidade de deformação apresenta valores mais elevados, de até $85s^{-1}$. No trabalho a quente, a tensão de escoamento do material é sensível a velocidade de deformação. Portanto, o rigoroso aumento da velocidade de deformação na zona de preenchimento dos dentes acarreta o aumento da tensão de escoamento do material de trabalho, tornando a deformação adicional difícil.

Velocidade Deformação [1/s]

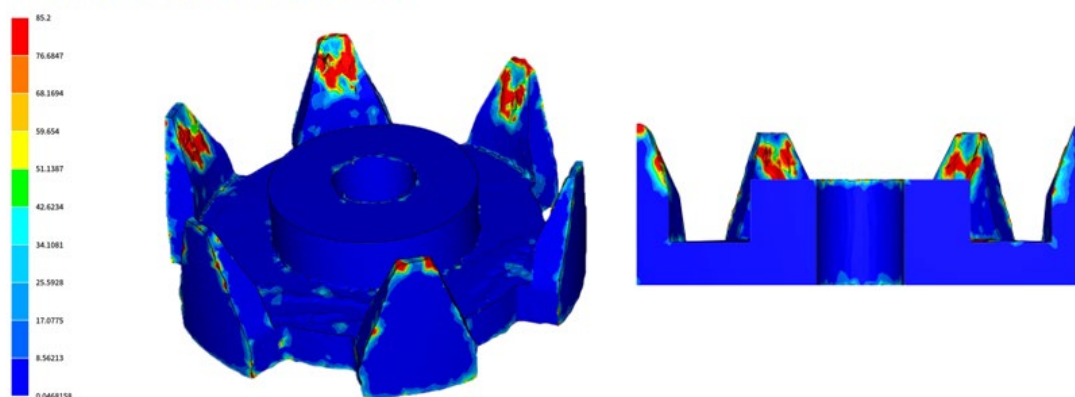


Figura 8 – Resultado numérico referente a distribuição da velocidade de deformação na peça após o forjamento.

4.5 Força de Conformação

Durante o projeto do processo de forjamento, a previsão da força de forjamento é fundamental para a seleção ou ajuste da máquina de conformação. A temperatura do bilhet, o grau de conformação na etapa de conformação considerada, o atrito entre a ferramenta e a peça e a tensão de escoamento do material de trabalho têm influência na força de conformação [5].

A Figura 9 mostra a força de conformação para a produção do rotor tipo garra calculada numericamente em função do deslocamento do punção. Os estágios apresentados na Figura 5 também são plotados no gráfico. Durante a extrusão inversa da região central da peça e o recalque da periferia do bilhet (estágios 1 a 6) a força aumenta gradualmente até aproximadamente 1000kN. Com o preenchimento completo da cavidade central do punção e início da extrusão inversa dos dentes, a força aumenta abruptamente até cerca de 3000kN. Nos últimos estágios de conformação, com a formação do rotor *near-net shape*, o aumento da força com o deslocamento do punção é muito rápido e aumenta drasticamente à medida que os cantos são preenchidos. Neste ponto a curva torna-se praticamente vertical atingindo o valor máximo de força igual a 13842 kN. O enorme aumento da força de conformação ao final do processo de conformação deve-se ao fato da matriz já ter sido preenchida [5].

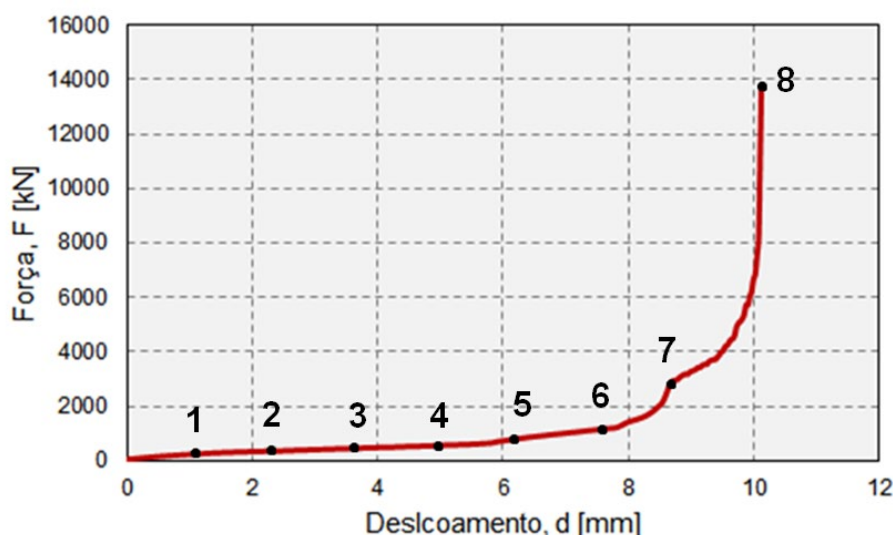


Figura 9 – Evolução da força de conformação em função do deslocamento do punção.

O aumento drástico da força de conformação ao final do processo de forjamento de precisão é típico desta tecnologia e já foi relatado anteriormente. Estudos experimentais em componentes cilíndricos demonstraram que o estágio final, correspondente a 1,2% do curso total do punção para preencher o canto, foi acompanhado por um aumento de carga de quase 50% [14,15]. No estudo de YILMAZ N.F. e EYERCIOGLU (2018), a força de forjamento apresentou um aumento 45% no último curso de 0,5 mm da matriz superior durante a conformação de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos.

A força de conformação de 13842 kN está dentro da faixa de prensas convencionais usadas industrialmente. Portanto, pode-se presumir que não são necessários investimentos adicionais em novos equipamentos para poder implementar este processo.

Uma vez que a força máxima de conformação em processos de forjamento de precisão é maior do que em processos de forjamento convencionais devido ao preenchimento da matriz próximo à forma final, é necessário um projeto de ferramenta ideal [17]. A maior força mecânica resulta em maior desgaste e deve ser levada em consideração nas etapas de planejamento e para medidas de redução do desgaste [18].

4.6 Distribuição de Temperatura nas Ferramentas

Durante um ciclo de forjamento, um campo de temperatura variável temporal e espacialmente ocorre dentro da matriz como resultado da energia térmica que é introduzida e dissipada. Em particular, as altas temperaturas da peça e o calor gerado por atrito levam a uma grande entrada de calor nas matrizes de forjamento durante a fase de conformação.

A Figura 10 mostra a distribuição de temperatura nas ferramentas após o forjamento. Evidentemente, no final do processo de conformação, as temperaturas máximas em cada componente do ferramental são observadas nas regiões que mantiveram maior tempo de contato com a peça em temperatura elevada. A matriz entra em contato com a peça apenas nos estágios finais de conformação, durante a formação dos dentes. Consequentemente, este componente apresenta a menor temperatura máxima, com um valor de 285°C. Os demais componentes do ferramental apresentam temperaturas máximas que variam de 476°C para o contra-

punção, até 568°C para o punção. A temperatura máxima observada no mandril é de 519°C.

As temperaturas máximas que ocorrem brevemente na camada superficial da ferramenta no final do processo de conformação podem exceder a temperatura de revenimento dos materiais da matriz utilizados. Isso resulta em processos de recuperação térmica nas áreas próximas à superfície e uma redução na dureza da superfície.

No forjamento de precisão, devido à alta pressão superficial desenvolvida no processo, o coeficiente de transferência de calor por condução entre a peça e as ferramentas é muito alto [19]. Como resultado, tem-se a intensa transferência de calor do bilhet (em alta temperatura) para as ferramentas (mais frias).

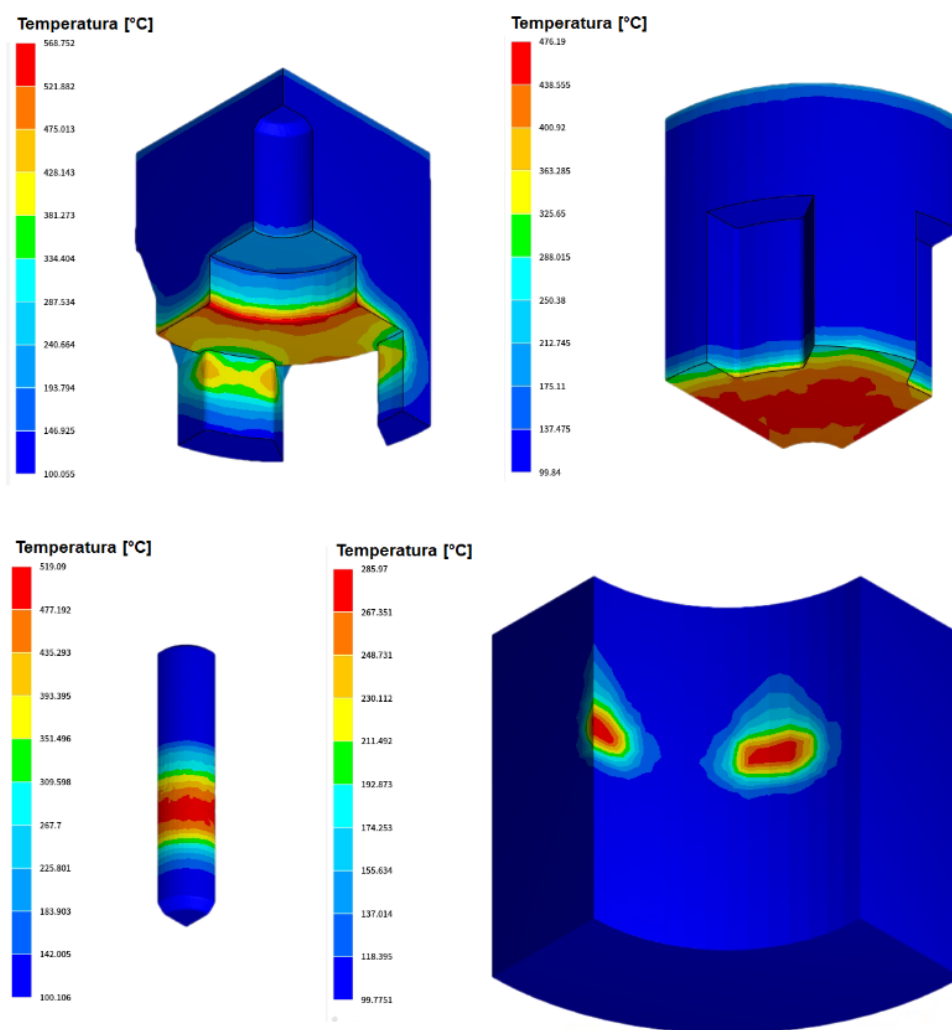


Figura 10 – Resultado numérico referente a distribuição de temperatura nas ferramentas após o forjamento.

4.7 Solicitações Mecânicas nas Ferramentas

As ferramentas de forjamento a quente estão sujeitas a altas cargas térmicas, mecânicas, químicas e tribológicas em cada ciclo de forjamento. Como resultado do carregamento cíclico, ocorre a fadiga do material da ferramenta, podendo levar à falha prematura, principalmente na forma de desgaste e trincas. Para otimizar a vida útil do ferramental, uma análise das solicitações nas ferramentas deve ser realizada durante o projeto do processo.

A comparação entre a tensão equivalente de von Mises e a tensão principal é necessária para avaliar a integridade das ferramentas. A tensão equivalente de von Mises é não direcional e indica quando o material escoou plasticamente. Se a tensão principal calculada na ferramenta atingir a resistência à tração, pode-se esperar a falha da ferramenta [5]. A Figura 11 apresenta a distribuição da tensão equivalente nos componentes do ferramental.

Como mostra a Figura 11, o punção (1536 MPa), o contra-punção (1573 MPa) e o mandril (1507 MPa) apresentaram valores máximos da tensão equivalente de von Mises superiores a 1500 MPa. A tensão equivalente máxima na matriz é significativamente menor, 1227 MPa. Se a tensão equivalente é superior a tensão de escoamento da ferramenta o material escoa plasticamente, o que não é aceitável. Enquanto a deformação elástica acarreta a expansão reversível, a deformação plástica resulta em um endurecimento da ferramenta e a perda de precisão do componente forjado. Dessa forma, este aspecto deve ser levado em consideração ao especificar a tolerância, bem como para o projeto de um reforço das ferramentas [20-23].

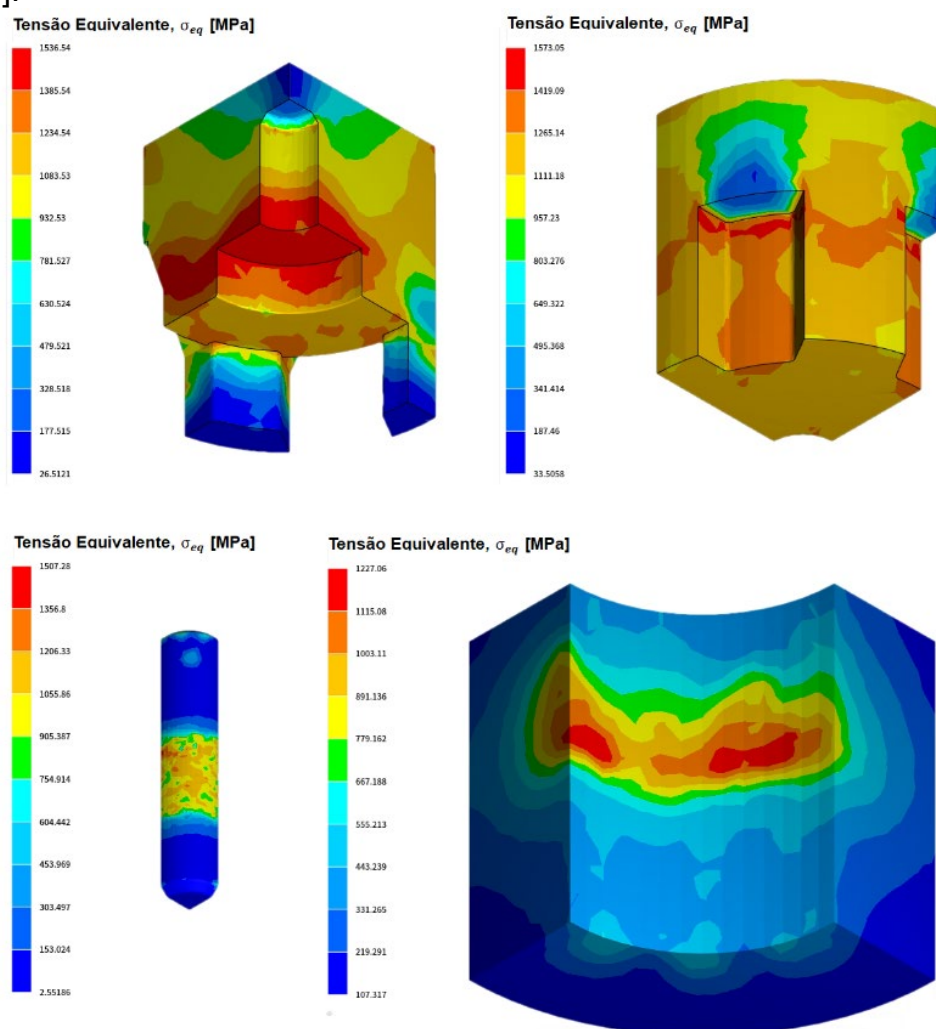


Figura 11 - Resultado numérico referente a distribuição da tensão equivalente nas ferramentas.

Neste estudo, o aço para trabalho a quente AISI H13 foi selecionado para as ferramentas. Dependendo do tratamento térmico empregado, este material pode apresentar uma ampla gama de propriedades mecânicas. Segundo WANG et al.

(2020), o aço AISI H13 temperado a 1040°C e revenido a 570°C apresenta limite de escoamento superior a 1650 MPa e boa tenacidade. Este valor seria suficientemente alto para impedir a deformação permanente das ferramentas. Contudo, qualquer oscilação no processo, como redução da temperatura, erro de posicionamento do billet ou problemas na cinemática da prensa, poderiam sobrecarregar as ferramentas gerando danos irreversíveis. Considerando as instabilidades do processo de fabricação, a utilização de materiais de maior resistência ou o emprego de tratamentos termomecânicos, como nitretação, seriam aconselháveis no projeto das ferramentas.

5. Conclusões

Neste estudo, o método dos elementos finitos foi utilizado para ampliar a compressão sobre as especificidades do processo de forjamento de precisão a quente. A análise numérica da conformação de um rotor tipo garra possibilitou concluir que:

- O preenchimento dos detalhes dos dentes do rotor requer a quantidade máxima de força de forjamento de 13842 kN. Quando o metal atinge a ponta do dente na cavidade da matriz, o aumento da força com o deslocamento do punção é muito rápido e aumenta drasticamente à medida que os cantos são preenchidos. Durante o último curso de 1% do punção a força de conformação aumenta em 51%.
- A velocidade de deformação também aumenta drasticamente na zona de preenchimento dos detalhes dos dentes. Consequentemente, a tensão de escoamento do material de trabalho aumenta e a deformação adicional torna-se difícil. Isso contribui para o aumento da força no estágio final de conformação.
- A execução do forjamento de precisão proposto em prensa hidráulica de baixa velocidade impede a realização de um tratamento térmico de endurecimento integrado a etapa de conformação. O elevado tempo de contato entre o billet e o ferramental geram uma troca de calor intensa. Como resultado, ao final do processo a superfície da peça atinge temperaturas próximas a 400°C.
- Ao final do processo, as tensões nas ferramentas atingem valores superiores a 1500 MPa. Este nível de solicitação mecânica torna necessária uma análise aprofundada para a seleção do material e do tratamento térmico ou termoquímico para fabricação do ferramental.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IBF–RWTH Aachen University (Alemanha) pela parceria técnica no projeto BRAGECRIM; CNPq, CAPES e FAPERGS pelo apoio financeiro (FAPERGS/CAPES 06/2018, processo: 19/2551-0000710-8);(CNPq/ MCTI/FNDCT nº 18/2021, processo: 404196/2021- 7);(Pesquisa CNPq produtividade – PQ1-4/2021; PDJ – 25/2021 150252/2022-6; GD – 2019);(CAPES (PROEX-IES-2020); e ao Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) pelo suporte técnico.

REFERÊNCIAS

- [1] WIENSTRÖER M., Prozesssimulation der Stadienfolge beim Schmieden mittels Rückwärtssimulation, Dissertação, Universidade de Hannover, 2004.
- [2] KLEIN, B., FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2012.
- [3] DOEGE E., BEHRENS B.A., Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen, 2. bearbeitet Aufl. Springer, 2010.
- [4] BATHE K.J., Finite Elemente-Methoden, 2. Aufl. Springer, 2002.
- [5] BACH F., KERBER K., Prozesskette Präzisionsschmieden, Springer Vieweg, 2014.
- [6] ALTAN T., NGAILE G., SHEN G., Cold and hot forging: fundamentals and applications. ASM International, 2005.
- [7] DAVIS J.R., Gear Materials, Properties, and Manufacture, ASM International, 2005.
- [8] BEHRENS B.A., ODENING D., Process and Tool Design for Precision Forging of Geared Components, International Journal of Material Forming, 2009.
- [9] DOEGE E., BEHRENS, B-A (2010) Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien; Maschinen. 2. bearbeitet Auflage, Springer Verlag Berlin, 2010
- [10] JAIN V.K., Determination of heat transfer coefficient for forging applications. J Mater Shap Technol 8:193–202, 1990.
- [11] TSUJI N., SAITO Y., UTSUNOMIYA H., TANIGAWA S., Ultra-Fine grained bulk steel produces by accumulative roll-bonding (arb) process. ScriptaMateriali 40(7):795 800, 1999.
- [12] BAUDELET B., LANGUILLAUME J., KAPELSKI G., Microstructure and mechanical properties of ultrafine-grained materials. Key Eng Mater 97–98:125–140, 1994.
- [13] LASALMONIE A., STRUDEL J.L., Influence of grain size on the mechanical behaviour of some high strength materials. J Mater Sci 21:1837–1852, 1986.
- [14] OHGA K, KONDO K (1982) Research on precision die forging utilizing divided flow first report, theoretical analysis of processes utilizing flow relief-axis and relief-hole. Bull JSME 25(209):1828–1835
- [15] CAI J, DEAN TA, HU ZM (2004) Alternative die designs in net-shape forging of gears. J Mater Process Technol 150(1–2):48–55
- [16] YILMAZ N.F. e EYERCIOLU O., Near net shape spur gear forging using concave preform Mechanika 24(2) 268-277, 2018.
- [17] CAI J., DEAN T.A., HU Z.M., Alternative die designs in net-shape forging of gears. J Mater Process Technol 150:48–55, 2004.
- [18] JUNG S.Y., KANG M.C., KIM C., KIM C.H., CHANG Y.J., HAN S.M., A study on the extrusion by a two-step process for manufacturing helical gear. Int J Advant Manuf Technol 41:684–693, 2009.
- [19] LUIG H (1993) Einfluss von Verschleißschuttschichten und Rohteilverzunderung auf den Verschleiß beim Schmieden. In: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 5, Grund- und Werkstoffe, Nr. 315. Universität Hannover
- [20] Berns H, Melander A, Weichert D et al (1998) A new material for cold forging tool. Comp Mater Sci 11:166–180
- [21] Alve ML, Rodrigues JMC, Martins PAF (2003) Simulation of threedimensional bulk forming processes by finite element flow formulation. Model Simul Mater Sci Engr 11:803–821
- [22] Hartley P, Pillinger I (2006) Numerical simulation of the forging process. Comp Meth Appl Mech Eng 195(48/49):6676–6690
- [23] Groseclose AR (2010) Estimation of forging die wear and cost. Ohio State University, Ohio
- [24] JIAN WANG , ZINUO XU, XIAOFENG LU, Effect of the Quenching and Tempering Temperatures on the Microstructure and Mechanical Properties of H13 Steel, Journal of Materials Engineering and Performance, 2020. |