

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Departamento de Metalurgia

OTIMIZAÇÃO DA PRÉ-FORMA DO *BILLET* DO
FORJAMENTO A QUENTE DE UMA BIELA

Hugo Tenório Kemmerich

Trabalho de Diplomação
Orientador: Professor Dr. Lício Schaeffer

Porto Alegre. 2021

CIP - Catalogação na Publicação

Kemmerich, Hugo
OTIMIZAÇÃO DA PRÉ-FORMA DO BILLET DO FORJAMENTO A
QUENTE DE UMA BIELA / Hugo Kemmerich. -- 2021.
36 f.
Orientador: Lirio Schaeffer.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Simulação numérica. 2. Forjamento a quente. 3.
Engenharia. 4. Engenharia Metalúrgica. I. Schaeffer,
Lirio, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e meu irmão, por sempre me apoiarem nas minhas escolhas e por me proporcionarem condições de estudar.

Ao Dr. João pelas inúmeras conversas sobre a faculdade.

A UFRGS por ter me proporcionado inúmeras oportunidades de aprendizado e experiências.

Ao Prof. Dr. Lírio pela orientação neste trabalho e disponibilizar o seu laboratório, LdTM, para realizar o estudo deste trabalho.

Ao Mestre André Rosiak pela ajuda durante todo o trabalho, disponibilizando o seu tempo, ferramentas e realizando o experimento físico para a execução deste trabalho.

Aos amigos, que me ajudaram durante a faculdade para completar essa etapa da vida.

Sumário

AGRADECIMENTOS	2
Lista de Figuras	4
Lista de Tabelas	5
Lista de Símbolos	6
Lista de Abreviações	7
Resumo	8
ABSTRACT	9
1. Introdução	10
2. Revisão bibliográfica	11
2.1. Forjamento	11
2.2. Simulação Numérica	14
3. Materiais e Métodos	22
3.1. Simulação numérica – Método Usado	22
3.2. Parametrização da otimização	23
4. Resultados e Discussão	27
5. Conclusões	34
Bibliografia	35

Lista de Figuras

Figura 1: Conformabilidade x Temperatura de trabalho. Fonte: (Santaella, 2009)	11
Figura 2: (a) Forjamento em matriz aberta, (b) Forjamento em matriz fechada. Fonte: (Schaeffer, 2016)	12
Figura 3: Curva de pressão de forjamento. Fonte: adaptada (MARQUES, 2013)	13
Figura 4: Fluxograma de modelagem do forjamento em matriz fechada. Fonte: adaptada (ALTAN; NGAILE, 2005)	17
Figura 5: Virabrequim forjado. Fonte: (PÉRÉMÉ et al., 2011)	19
Figura 6: Tempo de processamento VS número de núcleos de processamento usado. Fonte: adaptada (PÉRÉMÉ et al., 2011)	19
Figura 7: Billet inicial com dois parâmetros. Fonte: (FOURMENT et al., 2009)	20
Figura 8: Billet inicial com cinco parâmetros. Fonte: (FOURMENT et al., 2009)	20
Figura 9: Virabrequim forjado – a cor azul mostra o forjado com a otimização do billet e a cor vermelha o forjado sem a otimização do billet (PEREME et al., 2010).	21
Figura 10: Visão do algoritmo MAES. Fonte: adaptada (FOURMENT et al., 2009).	22
Figura 11: Distribuição de massa ao longo da biela.	24
Figura 12: Pré-forma do billet.	24
Figura 13: Biela forjada.	25
Figura 14: Forças de forjamento x Pré-formas.	28
Figura 15: Volume das pré-formas x Pré-formas.	28
Figura 16: Relação entre força de forjamento, volume da pré-forma e a função custo dos 10 resultados analisados.	29
Figura 17: Contato entre material e matrizes durante o forjamento em uma etapa. Imagem retirada do software FORGE.	30
Figura 18: Distribuição da deformação equivalente no forjado. Imagem retirada do software FORGE.	31
Figura 19: Distribuição das tensões geradas na matriz durante o forjamento da pré-forma otimizada(a), do billet cilíndrico sem a pré-forma (b) e da pré-forma inicial (c). Imagem retirada do software FORGE.	31
Figura 20: Força de forjamento em função do deslocamento da matriz superior.	32
Figura 21: Peças forjadas - (a) Pré-forma otimizada, (b) billet cilíndrico e (c) Pré-forma inicial.	33

Lista de Tabelas

Tabela 1: Condições de contorno da simulação numérica.....	23
Tabela 2: Valores máximos e mínimos D1 e D2.	26
Tabela 3: 10 melhores modelos de otimização da pré-forma.	27

Lista de Símbolos

d	Deslocamento	[mm]
D1	Diâmetro 1	[mm]
D2	Diâmetro 2	[mm]
F	Força	[N], [ton]
L1	Comprimento 1	[mm]
L2	Comprimento 2	[mm]
L3	Comprimento 3	[mm]
PFf	Ponto de fusão do material	[-]
PFt	Ponto de trabalho do material	[-]
T	Temperatura	[°C], [K]
U	Coefficiente de transferência de Calor	[W(m ² .K)]
σ	Tensão	[Mpa]
φ_{eq}	Deformação equivalente	[-]

Lista de Abreviações

FE	Finite Element
FEM	Finite Element Method
MAES	Metamodel- Assisted Evolution Strategies
ES	Evolution Strategies

Resumo

No forjamento em matriz fechada de vários estágios, um dos fatores que levam a um processo bem-sucedido está relacionado ao design da forma da pré-forma. A pré-forma deve ser projetada com precisão para evitar a sobrecarga das matrizes e para garantir o preenchimento completo das cavidades sem desperdícios de matéria prima em forma de rebarba. A qualidade da forma da pré-forma, que no passado dependia fundamentalmente da experiência do engenheiro, agora pode ser facilmente alcançada por meio da análise com o uso da Teoria de Elementos Finitos (FEM). Neste estudo, uma rotina de otimização baseada em Metamodel Assisted Evolution Strategies (MAES) foi empregada no desenvolvimento do projeto da forma da pré-forma para o processo de forjamento em matriz fechada de uma biela. Os resultados numéricos alcançados permitiram reduzir significativamente a força de forjamento e o volume da pré-forma.

PALAVRAS CHAVES: Simulação Computacional, simulação do processo de forjamento, MAES, otimização de processo

ABSTRACT

In multi-stage closed-die forging, one of the factors that lead to a successful process is related to the shape design of the preform. The preform must be accurately designed to avoid overloading of the dies and to ensure complete filling of the cavities without wasting material in the form of flash. The quality of the preform shape, which in the past depended fundamentally on the experience of the engineer, can now be easily achieved through analysis using Finite Element Model (FEM). In this study, an optimization routine based on Metamodel Assisted Evolution Strategies (MAES) was employed in the development of the preform shape design to the closed-die forging process of a connecting rod. The achieved numerical results allowed to significantly reduce the forging force and the volume of the preform.

KEYWORDS: Computational Simulation, Simulation of the Forging Process, MAES, Process Optimization

1. Introdução

O forjamento em matriz fechada é um processo de manufatura frequentemente usado para fabricar peças de produção em massa de alta qualidade a custos moderados (TAKEMASU *et al.*, 1996). Componentes com geometria complexa, como bielas e virabrequins, são geralmente produzidos em uma cadeia de processos de múltiplos estágios (KNUST *et al.*, 2017) Nestes processos o design das pré-formas é de grande importância, influenciando a quantidade de material perdido para a rebarba, a carga de conformação e o consumo de energia. Para evitar a sobrecarga das matrizes e assegurar o preenchimento completo das cavidades, o design da pré-forma deve garantir o fluxo adequado de material durante o processo.

A análise numérica por elementos finitos (Finite Element Method - FEM) é uma ferramenta poderosa no controle e na previsão de todos estes aspectos. A simulação numérica do processo de forjamento oferece a possibilidade de projetar todo o processo em um computador. Isso permite a redução do custo e do tempo da etapa de projeto da ferramenta, que pode ser alterado antes da fabricação das matrizes. Além disso, as melhores condições de processamento podem ser definidas sem a necessidade de experimentação (TAKEMASU *et al.*, 1996). Dessa forma, atualmente, as pré-formas são projetadas via análise de elementos finitos e, dependendo da complexidade da forma requerida, o desenvolvimento é auxiliado e agilizado pelo emprego de rotinas de otimização.

Os algoritmos de evolução (Evolution Strategies - ES) são ferramentas poderosas para a otimização em ambientes de pesquisa. Contudo, exigem um alto número de avaliações o que pode ser proibitivo para uso industrial. Para reduzir o tempo e os custos consumidos na análise, é utilizada uma ferramenta de avaliação substituta, chamada metamodelo. As Estratégias de Evolução Assistida por Metamodelo (Metamodel–Assisted Evolution Strategies - MAES) podem ser aplicadas em otimizações em conjunto com qualquer método de avaliação demorado (EMMERICH *et al.*, 2002) O papel do metamodelo é apontar os resultados mais promissores que serão reexaminados por meio do software de avaliação. As MAES incorporam uma técnica de estimativa de erro local que permite ao método de otimização estimar a confiabilidade dos valores aproximados da função e explorar ainda mais essas informações (EMMERICH *et al.*, 2002; GIOTIS *et al.*, 2001).

Neste estudo uma rotina de otimização é empregada no desenvolvimento de uma pré-forma capaz de produzir uma biela da liga de alumínio AA6351 em apenas uma etapa de forjamento a quente e reduzir a força de forjamento e o volume da rebarba. Ainda, aspectos importantes do projeto de componentes forjados em matriz fechadas são apresentados e discutidos.

2. Revisão bibliográfica

Esse capítulo irá descrever os parâmetros necessários para realizar a simulação computacional do processo de forjamento em matriz fechada, que é o tema central deste estudo. Conceitos referentes a simulação computacional também serão apresentados, detalhando como esta ferramenta é empregada no projeto de componentes forjados.

2.1. Forjamento

O interesse global por processo com produto de forma mais precisa e acabadas, tem aumentado consideravelmente, aumentando o interesse em tecnologias de forjamento a quente em matriz fechada (COSTA, 2020). O forjamento em matriz fechada é uma técnica de produção bastante usada na produção de altas quantidade de peças com alta resistência e aparecias idênticas (SCHAEFFER, 2016)

O processo de forjamento pode ser classificado de acordo com a temperatura de trabalho. A conformabilidade dos materiais é amplamente influenciada pela temperatura conforme mostra a Figura 1 (SANTAELLA, 2009).

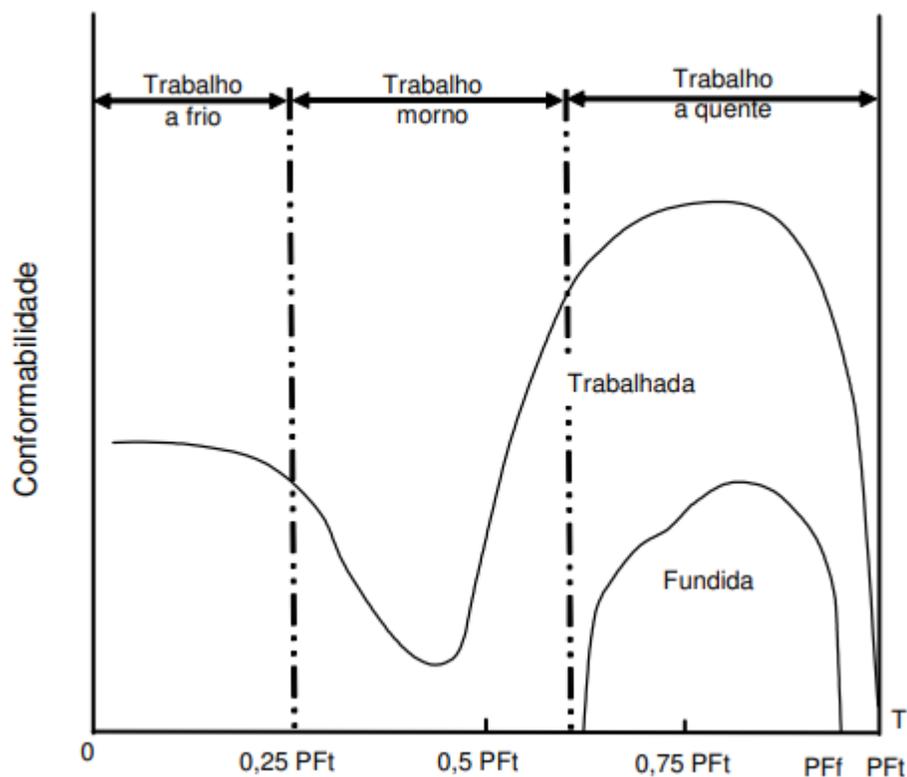


Figura 1: Conformabilidade x Temperatura de trabalho. Fonte: (Santaella, 2009)

No forjamento a frio, a deformação é realizada abaixo da temperatura de recristalização, não ocorrendo, durante a conformação, o amaciamento do material através de

mecanismos de recuperação e recristalização. Assim, o elevado encruamento sofrido pelo material limita estes processos a níveis reduzidos de deformação. O processo a frio é geralmente realizado em peças sem complexidade elevada e para o acabamento, com ótimas qualidades superficiais e dimensionais (DIETER, 1981; SANTAELLA, 2009).

O processo de forjamento a morno é realizado com temperaturas perto da temperatura de cristalização do material. Essa temperatura fornece energia para diminuir a taxa de encruamento, mas não o suficiente para ocorrer o deslizamento do grão. Nesse processo, pode ocorrer a fragilização a morno que é a propagação de trincas devido a energia não ser o suficiente para nucleação de novos grãos (SANTAELLA, 2009).

O forjamento mais difundido na indústria clássica é o forjamento a quente, onde a cada ano, na Europa, são produzidas milhões de toneladas de peças (PANJAN *et al.*, 2002). O processo ocorre com a temperatura de trabalho acima da temperatura de recristalização, reduzindo a energia mecânica requerida para deformar o material. Além disso, devido ao desenvolvimento efetivo dos mecanismos de recuperação no material, o encruamento é aliviado e o surgimento de trincas durante a conformação é menor (SANTAELLA, 2009).

As propriedades mecânicas das peças forjadas são superiores ao demais processos, pelo fato de o encruamento do material ser controlado pela deformação plástica, temperatura e pela velocidade de deformação. O custo elevado das ferramentas de forjamento, condiciona economicamente a viabilidade do processo caso o número de peças fabricadas seja pequeno. Porém com apenas uma ferramenta pode se produzir várias peças idênticas com ótimas propriedades mecânicas no produto final (SANTAELLA, 2009).

O forjamento pode ser dividido em dois grandes grupos, Figura 2: (SCHAEFFER, 2016)

- Forjamento em matriz aberta;
- Forjamento em matriz fechada.

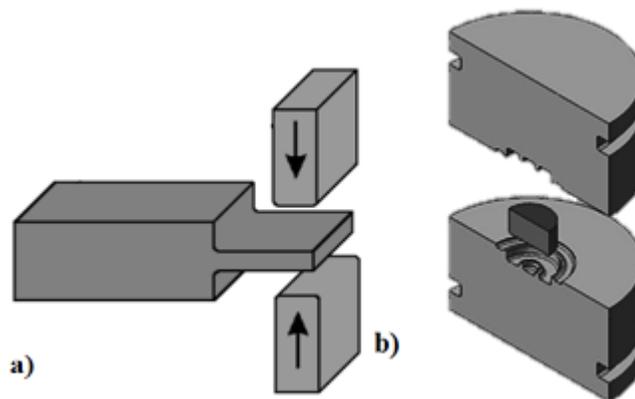


Figura 2: (a) Forjamento em matriz aberta, (b) Forjamento em matriz fechada. Fonte: (Schaeffer, 2016)

O processo de forjamento em matriz aberta é o processo quando usa-se uma prensa ou um martelo para modelar o metal com matrizes de geometrias simples (DIETER, 1981). É normalmente realizado quando a produção é pequena, mas de peças grandes (DIETER, 1981). Por possuírem geometrias grandes, como um eixo de turbinas, normalmente se usa matrizes planas que reduzem uma pequena seção transversal da peça e ao mesmo tempo ocorre o estiramento do lingote (COLOMBO, 2012). Normalmente, o forjamento aberto é usado para preparar o material, uma pré-forma, para forjar em matrizes fechadas ou peças com geometria muito grande.

No processo de forjamento em matriz fechada, uma geratriz de geometria simples e volume superior ao da peça final é comprimida entre matrizes (moldes) até a obtenção da geometria complexa objetivada. Como resultado tem-se, além da peça final, um volume excedente de material chamado de rebarba. Após as etapas de forjamento, a peça final é separada da rebarba por um processo chamado de rebarbação.

A presença da rebarba é fundamental no processo de matriz fechada. Durante o fechamento das matrizes, o volume excedente de material garante que as cavidades dos moldes sejam completamente preenchidas (DIETER, 1981). A força de forjamento é elevada quando ocorre o início da formação da rebarba até o preenchimento da cavidade, conforme a Figura 3 apresenta (MARQUES, 2013).



Figura 3: Curva de pressão de forjamento. Fonte: adaptada (MARQUES, 2013)

O canal e a espessura da rebarba são os parâmetros geométricos mais influentes no desgaste das matrizes no forjamento a quente (SANTAELLA, 2009).

O forjamento pode ser realizado com matrizes planas (abertas) ou com matrizes fechadas, normalmente o forjamento aberto é usado para preparar o material, uma pré-forma, para forjar em matrizes fechadas ou peças com geometria muito grande. Os produtos finais da forja em matriz fechada têm pouco ou nenhuma rebarba, tendo um menor desperdício de material, e uma peça mais bem-acabada e com propriedades mecânicas e metalúrgicas melhores do que peças usinadas e fundidas. Com isso temos um melhor aproveitamento de energia e material, especialmente quando produzimos em média ou larga escala (ALTAN; NGAILE, 2005).

Os fenômenos físicos do forjamento são difíceis de relacionar, temos o escoamento do material, o atrito na interface material/matriz, transferência e geração de calor durante a forja, e também a relação entre microestrutura e propriedades mecânicas (LANGE, 1988).

Uma forma de conhecer ou determinar de forma quantitativas variáveis do processo de forjamento é através de modelos sofisticados de cálculo ou simulação. Esta importante ferramenta será apresentada na próxima seção (SCHAEFFER, 2016)

2.2. Simulação Numérica

A simulação numérica vem se tornando uma das principais ferramentas para o desenvolvimento de novos processo e otimização de processos já conhecidos. Essa ferramenta permite o controle dos parâmetros a um baixo custo operacional(ALTAN; NGAILE, 2005). Na simulação numérica a peça, que irá ser forjada, é dividida em diversos elementos formando uma malha (MARQUES, 2013). Normalmente a malha é constituída de elementos tridimensionais como tetraedros ou hexaedros, para simulações 3D e elementos bidimensionais como triângulos ou quadriláteros, para simulações 2D (MARQUES, 2013).

O comportamento do material, condições de contato das matrizes, a união termomecânica, leva a solucionar equações altamente não lineares para cada elemento da malha. A cada etapa de tempo, ocorre a linearização dos sistemas não lineares com o uso do clássico método Newton-Raphson, resultando em boas condições de sistemas lineares que são solucionados com métodos iterativos minimizando o residual das pré-condições (PÉRÉMÉ *et al.*, 2011).

A simulação de processo de elementos finitos (FE – Finite Elements) começou na década de 1970, nessa época não existia o remalhamento (remeshing) automático, portanto, necessita-se de um considerável tempo para completar uma simulação de FE simples. Com o passar dos anos foram desenvolvidos os métodos de remalhamento e os avanços da tecnologia computacional tornaram mais pratica a simulação de FE. Com o surgimento de softwares comerciais de simulação numérica, a indústria vem aderindo cada vez mais a simulação no processo de *design* e desenvolvimento dos processos (ALTAN; NGAILE, 2005).

O principal objetivo da simulação de forjamento são:

- Preencher a matriz por completo

- Prever os defeitos causados pelo fluxo do material;
- Prever os limites do processo;
- Prevenção da temperatura;
- Condições de atrito e
- Controle do desgaste da matriz.

Por meio disso, a análise numérica permite a melhoria da qualidade e da complexidade das peças enquanto reduz os custos de fabricação e melhora os rendimentos do material (ALTAN; NGAILE, 2005).

O modelo elementos finitos (FEM – Finite Elements Model, em inglês) do processo de forjamento com matrizes fechadas é aplicado a décadas na área de forjamento aeroespacial e o uso tem o objetivo de um rápido desenvolvimento assertivo na primeira tentativa, assim como entender melhor e ter o controle do processo (ALTAN; NGAILE, 2005).

Com a simulação de forjamento pronta, pode-se ter a deformação equivalente, velocidade de deformação efetiva e a temperatura de qualquer instante de tempo do forjamento. Esses resultados dão uma visão de como o forjamento será realizado que antigamente não era possível (ALTAN; NGAILE, 2005).

A simulação de forjamento possui algumas aplicações práticas, tais como: (ALTAN; NGAILE, 2005)

- Projeto de sequência de forjamentos à frio, morno e à quente, e também prever as forças de forjamento, tensões nas matrizes e pré-formas;
- Prever e otimizar da dimensão da rebarba do forjamento a quente com tarugos;
- Prever as tensões, fraturas e desgastes das matrizes, melhorar as variáveis do processo e reduzir as falhas das matrizes;
- Prever e eliminar as falhas, dobramentos da superfície e fraturas como fraturas internas;
- Investigar o efeito do atrito no fluxo de material;
- Prever a microestrutura e as propriedades, retorno elástico e tensão residual.

Um dos pontos mais importantes na simulação numérica de processos é preparar corretamente as entradas do modelo. Existe uma frase muito famosa: “*garbage in, garbage out*”, ou seja, se os parâmetros de entrada forem ruins, os resultados também serão ruins. As entradas da modelagem do processo são os parâmetros da geometria, parâmetros do processo e parâmetros do material (ALTAN; NGAILE, 2005).

A geometria do *billet* e da matriz podem variar dependendo da complexidade do modelo do processo de forjamento. A simulação pode ser realizada em geometrias de duas dimensões, axissimétricas para geometrias simples ou tridimensional para geometrias mais complexas. Normalmente a geometria do *billet* é cilíndrica e suas dimensões são definidas a

partir do volume da peça que irá ser forjada, mas é necessário definir se o processo irá possuir rebarbas (ALTAN; NGAILE, 2005).

Os parâmetros do processo, Figura 4, são os parâmetros que definem as condições de contorno para realizar a simulação numérica, consideramos os seguintes parâmetros:

- Temperatura do ambiente
- Temperatura do *billet*
- Temperatura das matrizes
- Coeficiente de transferência de calor entre as matrizes e o *billet* e entre o *billet* e a atmosfera
- O tempo de transferência do *billet*, do forno até as matrizes
- O tempo necessário do *billet* repousar na matriz inferior
- Coeficiente de transferência de calor entre a interface das matrizes e o *billet* durante o livre repouso
- Coeficiente de transferência de calor entre a interface das matrizes e o *billet* durante o processo de deformação
- Atrito entre a interface das matrizes e o *billet*
- Entre outros parâmetros

Um dos parâmetros mais importantes do processo é a velocidade da matriz superior. Este valor depende do equipamento utilizado, por exemplo, se for utilizado em uma prensa mecânica a velocidade será definida pela rotação do volante, enquanto em um martelo a velocidade será definida pela energia associada ao golpe (ALTAN; NGAILE, 2005).

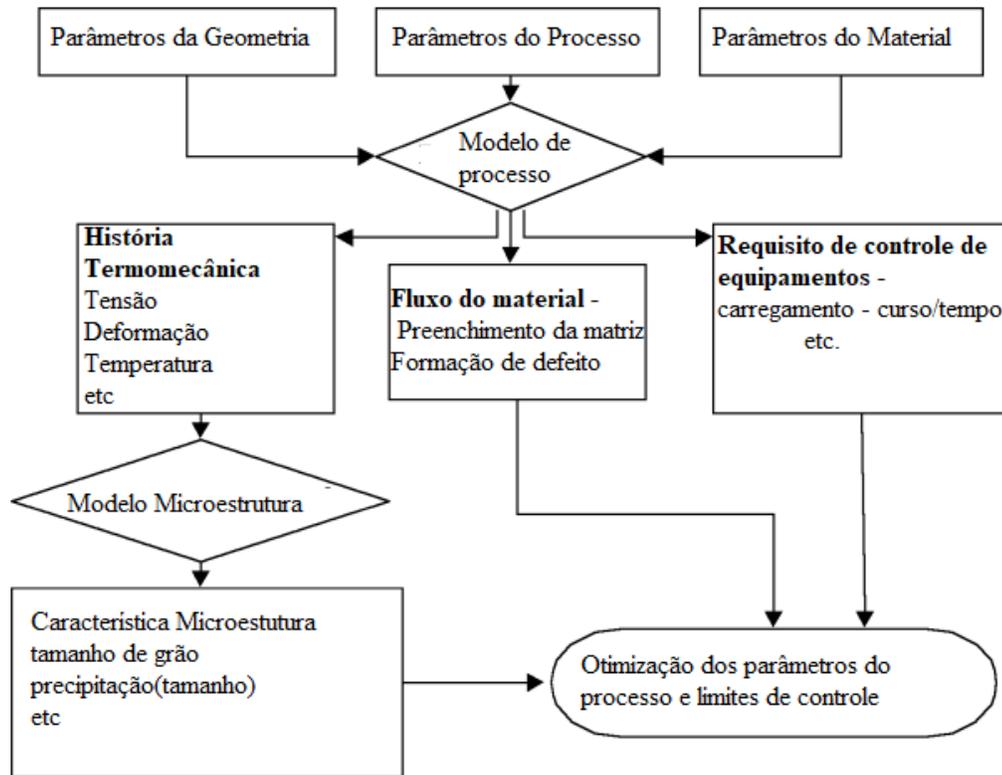


Figura 4: Fluxograma de modelagem do forjamento em matriz fechada. Fonte: adaptada (ALTAN; NGAILE, 2005)

Para a realização da simulação do processo, as propriedades dos materiais devem ser inseridas no modelo. O comportamento mecânico de cada material envolvido na operação de conformação é definido pela sua curva de escoamento, obtida experimentalmente (ALTAN; NGAILE, 2005).

Os parâmetros do material estão relacionados com a transferência de calor e com a deformação. Para definir o modelo do parâmetro da transferência de calor é comumente usada a condutividade térmica, capacidade de aquecimento e a emissividade do *billet* e das matrizes, e esses parâmetros são em função da temperatura. Para prever o comportamento do fluxo do material é importante saber o fluxo da tensão do material do *billet*, esse parâmetro normalmente é definido em função da deformação, taxa de deformação, temperatura. Para analisar as tensões das matrizes usa-se os parâmetros do módulo de Young e coeficiente de Poisson que são em função da temperatura e da expansão da térmica (ALTAN; NGAILE, 2005).

Na maioria das simulações usa-se matrizes rígidas, portanto não é considerada a deformação e a tensão das matrizes, mas isso afetará a precisão da operação de forjamento, pois influenciam na distribuição do contato da tensão da interface matriz/*billet* e também as pequenas deformações elásticas da matriz influenciam nas condições de carregamento térmico e mecânico.

Desse modo a análise da tensão tem uma importância muito grande no processo de simulação para comprovar o *design* das matrizes e os parâmetros de forjamento (ALTAN; NGAILE, 2005).

As condições de atrito e da transferência de calor são as condições de interface, pois a interface entre a matriz e o *billet* tem um efeito significativo no fluxo do metal e nos carregamentos necessários para realizar o forjamento. O atrito de cisalhamento tem melhores resultados que o coeficiente de atrito coulomb nas simulações com alta tensão de contato na interface matriz/*billet*. Para definir o atrito de cisalhamento realiza-se o teste de compressão do anel, com isso pode-se estimar o coeficiente de transferência de calor, fluxo da tensão, o atrito em função da temperatura, taxa de deformação, deformação e a pressão de conformação (DIETER, 1981).

Geralmente, no processo de forjamento, a peça sofre grandes deformações plásticas. Portanto, a simulação do processo começará com uma malha bem definida e pode ter a distribuição da densidade da malha que se deseja. Durante o processo a malha sofre uma significativa distorção, com isso é necessário que ocorra uma nova geração da malha e ocorre a interpolação dos dados da antiga malha para obter a nova malha, assim tendo resultados mais precisos. A densidade da malha deverá ser conforme a geometria da peça em cada etapa da conformação. Essa geração de malha automaticamente, sem ser necessário o usuário interferir, é o que possibilita a simulação rodar até o final (ALTAN; NGAILE, 2005).

Existem diversos códigos de simulação de FE comercialmente para a simulação numérica do processo de forjamento. Independente da escolha do software, ele deve possuir o solver de FE confiável, o uso preciso e eficiente nas simulações do fluxo do metal:

- Interatividade do pré-processamento ao usuário, o controle inicial da geometria, geração da malha e dados de entrada, assim como o remalhamento automático para permitir que a simulação continue quando a malha antiga distorcer. O pós-processamento de mais dados para análise, assim como linhas de fluxo;
- Dados de entradas apropriados descrevendo as propriedades térmicas e físicas do material da matriz e coeficiente de transferência de calor do *billet* e coeficiente de atrito da interface matriz/*billet* e também o comportamento do fluxo do material durante a deformação;
- Recursos de análise capazes de realizar a simulação com matrizes rígidas para reduzir o tempo da simulação, e usar estimativas de tensões de contato e distribuição de temperatura em simulações usando matrizes rígidas para analisar a performance da tensão elástica-plástica (ALTAN; NGAILE, 2005).

O tempo de duração de uma simulação, irá depender do computador usado, assim como a memória RAM, capacidade de processamento do computador e o tamanho da malha usada no processo de simulação, Figura 4. Normalmente, simulações 2-D são realizadas em horas e 3-D podem levar dias ou semanas. Hoje em dia o poder de processamento está extremamente avançado, pois já podemos rodar simulações usando somente o poder de processamento da placa de vídeo e

podemos realizar as simulações em *clusters*, que seriam usando a tecnologia da nuvem (cloud) (PÉRÉMÉ *et al.*, 2011).

A estratégia totalmente paralela no código de FE do FORGE mostra que podemos reduzir drasticamente o tempo de processamento dos cálculos que compõem a simulação numérica. A Figura 5, mostra a peça final de uma simulação de forjamento a quente de um virabrequim de um motor 6 cilindros, essa simulação tinha uma malha inicial com 107107 elementos e na malha final ficou com 246641 elementos (PÉRÉMÉ *et al.*, 2011).

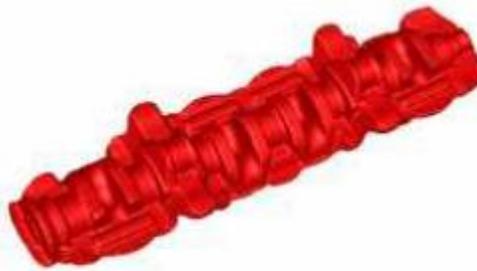


Figura 5: Virabrequim forjado. Fonte: (PÉRÉMÉ *et al.*, 2011)

Para mostrar a diferença de tempo de processamento que o código totalmente paralelo faz, a simulação foi realizada com 4, 8 e 16 core, Figura 6.

Virabrequim			
Núcleos	4	8	16
Tempo	10h 05m	5h 42m	3h 54m
Velocidade	1	1.77	2.58

Figura 6: Tempo de processamento VS número de núcleos de processamento usado. Fonte: adaptada (PÉRÉMÉ *et al.*, 2011)

No forjamento de um virabrequim, usa-se um *billet* com um volume superior ao que a peça final irá ficar, por dois motivos:

- Primeiro é para garantir o completo preenchimento das matrizes;
- Segundo por causa da rebarba.

Com isso, pode-se aplicar a otimização da forma do *billet* desse forjamento em matriz fechada. Dois tipos de *billet*, um com dois parâmetros que é um cilindro reto definido pela altura e diâmetro, Figura 7. Já o outro possui uma sucessão de cilindros retos, o tornando mais complexo e requer 5 parâmetros, Figura 8. (FOURMENT *et al.*, 2009)

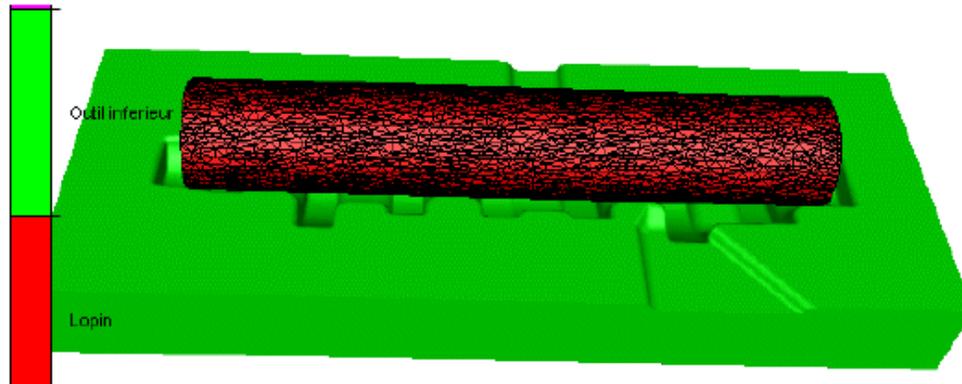


Figura 7: *Billet* inicial com dois parâmetros. Fonte: (FOURMENT *et al.*, 2009)

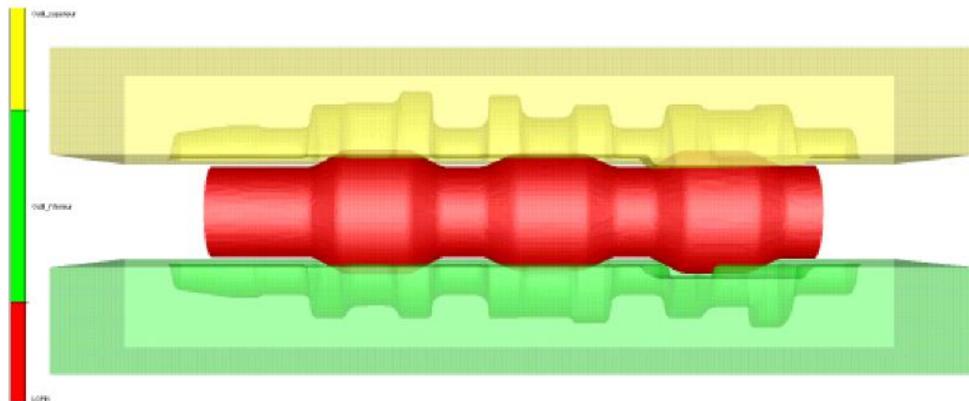


Figura 8: *Billet* inicial com cinco parâmetros. Fonte: (FOURMENT *et al.*, 2009)

O caso da Figura 9, foi realizado com o intuito de reduzir a perda do material para a rebarba e diminuir a força necessária para realizar o forjamento. A otimização da pré-forma do *billet* tornou possível a redução do material de 160kg (sem pré-forma, *billet* cilíndrico) para 141kg, tendo uma redução de aproximadamente 12%. Nos valores de hoje com o aço 1020 a R\$20,00/kg, daria uma economia de R\$380,00/peça produzida (PEREME *et al.*, 2010).

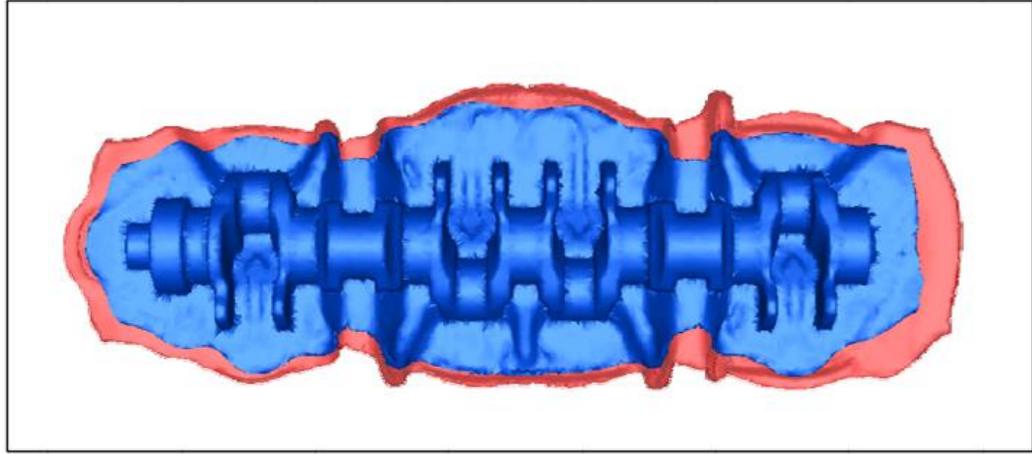


Figura 9: Virabrequim forjado – a cor azul mostra o forjado com a otimização do billet e a cor vermelha o forjado sem a otimização do billet (PEREME et al., 2010).

3. Materiais e Métodos

3.1. Simulação numérica – Método Usado

O software que foi usado para realizar as simulações foi o *Forge*®, nele foi desenvolvido um método de otimização automática baseado nas estratégias de evolução assistida pela técnica de metamodelos (*Metamodel-Assisted Evolution Strategies – MAES*). Essa estratégia faz parte da evolução dos algoritmos (*Evolution Strategies - ES*) que são uma poderosa ferramenta de otimização de ambiente de pesquisa (DUCLOUX *et al.*, 2010).

Ao invés do usuário definir manualmente os parâmetros para atingir o objetivo, o algoritmo MAES junto com os softwares de FE gera um conjunto de parâmetros para atingir o objetivo sob a determinação das condições de contorno. O usuário deve definir os parâmetros relevantes, que podem ter uma variação dentro de uma faixa específica, e as restrições que os resultados das simulações devem cumprir, na fase de preparação da otimização da pré-forma do *billet* (PEREME *et al.*, 2010).

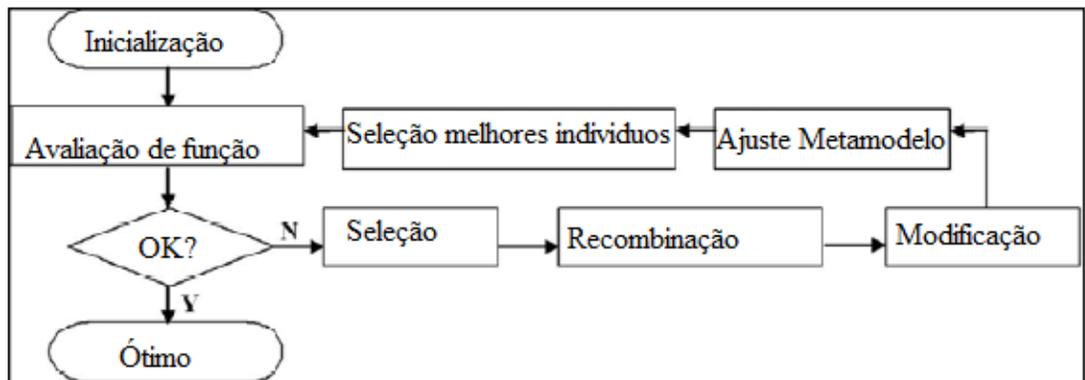


Figura 10: Visão do algoritmo MAES. Fonte: adaptada (FOURMENT *et al.*, 2009).

MAES são algoritmos robustos que permitem resolver os problemas mais complexos de otimização. Os ES consistem em três operadores, os de seleção, de recombinação e de mutação, e isso acaba gerando um alto custo em termos de avaliações de funções. Já o MAES proposto por Emmerich combina um ES com meta-modelos Kriging para reduzir o número de avaliações de funções, Figura 10 (DUCLOUX *et al.*, 2010).

No processo de otimização da pré-forma, as condições de contorno são mantidas as mesmas e a geometria é alterada automaticamente. Os parâmetros, que são as condições de contorno, foram definidos a partir da literatura e são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Condições de contorno da simulação numérica.

Tipo de malha	Triangular
Tamanho de malha	0,5mm
Material do billet	AA 6351
Temperatura do billet	400°C
Temperatura das matrizes	150°C
Coefficiente de atrito	0,3
Coefficiente de Transferência de calor (billet-ferramentas)	30 kW(m ² .K)

3.2. Parametrização da otimização

Devido à complexidade das formas irregulares, a biela forjada em matrizes fechadas, é considerada um produto de difícil fabricação. O seu formato com uma dimensão maior do que as outras e a distribuição em diferentes planos do material, tornam o volume do *billet* bem maior do que o volume da biela (MARTINS; GOUVEIA; RODRIGUES, 2005).

Para definir a geometria da pré-forma é criado um diagrama de distribuição de volume, essa distribuição foi obtida através de diversos cortes das seções transversais. O resultado é mostrado na Figura 11, onde pode-se ver que o volume do anel maior da biela (região em vermelha) é superior ao volume restante da peça (MARTINS; GOUVEIA; RODRIGUES, 2005).

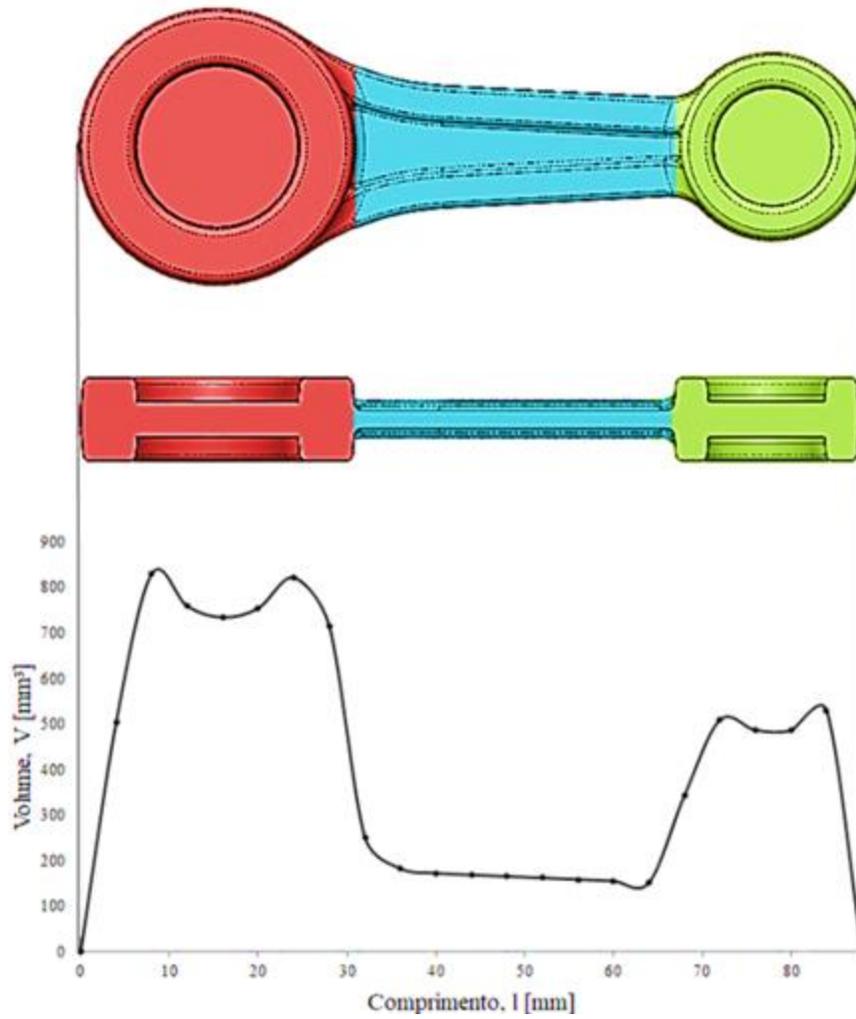


Figura 11: Distribuição de massa ao longo da biela.

Devido ao alto volume no anel maior da biela, a pré-forma foi projetada axissimétrica, como mostra a Figura 12.

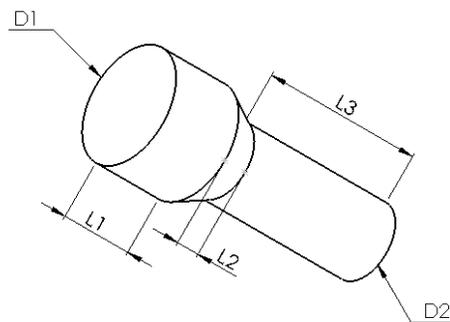


Figura 12: Pré-forma do billet.

Deve-se considerar a viabilidade da fabricação da pré-forma. Sendo assim os custos de produção da pré-forma devem ser considerados e possuem uma grande importância no tempo de produtividade da fabricação da biela. A laminação cruzada é um método de fabricação rápido, pois a pré-forma pode ser obtida em apenas uma operação. O *billet* cilíndrico é inserido transversalmente entre 2 cilindros com cavidades gerando eixos axiais e simétricos, formando a geometria da Figura 12 (TAKEMASU *et al.*, 1996).

Para realizar a otimização, os parâmetros L1, L2 e L3 da pré-forma, foram mantidos com valores fixos de 20, 10 e 45mm. Ao comparar o comprimento total da pré-forma, Figura 12, com o comprimento total da biela, Figura 13, nota-se que a pré-forma é menor. Entretanto, o escoamento longitudinal do material durante o forjamento irá garantir que o material preencha todas as cavidades das matrizes.

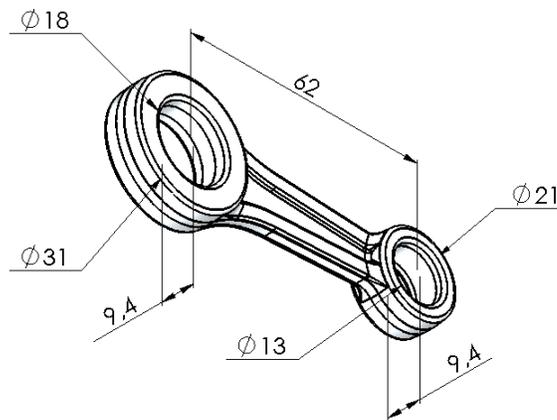


Figura 13: Biela forjada.

Na rotina de otimização os diâmetros D1 e D2, Figura 12, foram definidos para serem as variáveis a serem otimizadas. Durante o ciclo de otimização essas variáveis serão avaliadas e alteradas automaticamente até que atinja os objetivos da otimização. Os critérios definidos pela ferramenta de otimização para terem uma melhor solução são os objetivos e foram definidos como:

- Menores valores de D1 e D2, garantido o preenchimento completo das cavidades das matrizes;
- Menor força de forjamento para preencher as matrizes.

Para o correto funcionamento da otimização, necessita-se definir previamente as condições de restrição da otimização. Elas foram definidas como:

- Preenchimento total das cavidades das matrizes;
- A biela não pode possuir dobras de forjamento.

O algoritmo de otimização calcula uma função, chamada função de custo, levando em consideração os objetivos e as restrições, para definir os melhores D1 e D2. A otimização gera alterações automáticas dos valores de D1 e D2, porém os valores máximos e mínimo devem-se definidos pelo usuário. A velocidade que a otimização chega a um resultado é definida pelo range dos valores definidos. Quanto menor o range, mais rápido a solução será obtida. Os valores mínimos foram estabelecidos pelo volume da biela e um adicional de 20%. Esse adicional foi estabelecido pela complexidade da biela e por causa da rebarba do processo. Já os valores máximos foram definidos com base no modelo numérico inicial. Na tabela 2, mostra os valores mínimos e máximos.

Tabela 2: Valores máximos e mínimos D1 e D2.

Valores (mm)	Máximo	Mínimo
D1	30	18
D2	25	12

4. Resultados e Discussão

Os melhores resultados da otimização da pré-forma do *billet* do forjamento da biela, serão mostrados nesse capítulo. Os melhores modelos numéricos serão apresentados considerando os critérios estabelecidos anteriormente. A melhor pré-forma de todas as simulações terá uma análise mais aprofundada.

A lista da Tabela 3 mostra os 10 modelos que obtiveram os melhores resultados de otimização após 200 ciclos de simulação a partir do modelo 0 (inicial). Comparando os resultados do modelo inicial e do modelo com o menor volume, notou-se que a redução foi de 50%. O algoritmo de otimização usa a otimização automática, isso significa que a redução do volume é alcançada rapidamente. Ocorre o refino dos resultados dos 10 melhores modelos e mostram uma pequena variação do volume.

Tabela 3: 10 melhores modelos de otimização da pré-forma.

Pré-forma	D1 [mm]	D2 [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]	L3 [mm]
0	30	25	20	10	45
1	21,0	18,0	20	10	45
2	22,0	18,2	20	10	45
3	21,6	18,5	20	10	45
4	22,0	18,1	20	10	45
5	22,8	18,1	20	10	45
6	22,5	18,3	20	10	45
7	23,4	17,8	20	10	45
8	23,35	18	20	10	45
9	23,3	18,6	20	10	45
10	23	18,8	20	10	45

Pode-se notar que ocorreu uma redução, aproximadamente de 700 kN, na força do processo de forjamento, Figura 14. Outro ponto que os resultados mostram, foi a redução do volume da pré-forma quando comparado ao modelo inicial da pré-forma, Figura 15.

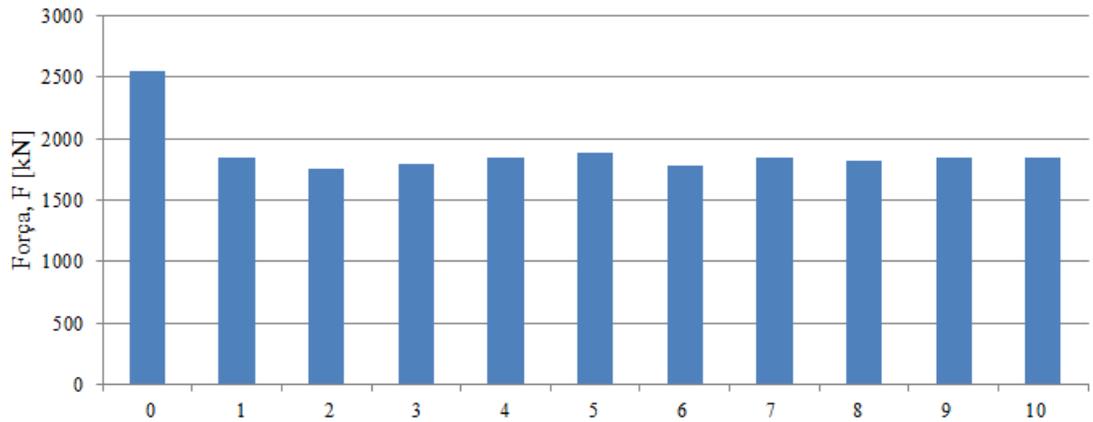


Figura 14: Forças de forjamento x Pré-formas.

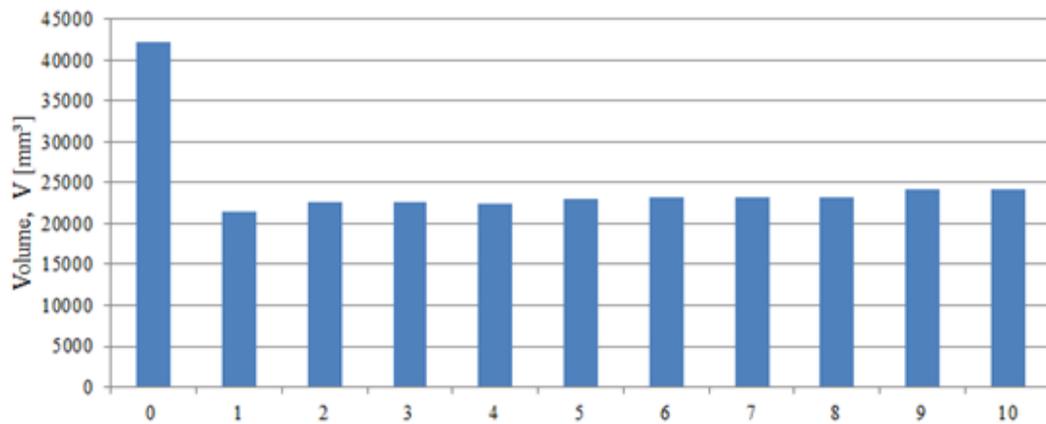


Figura 15: Volume das pré-formas x Pré-formas.

A relação do volume das pré-formas, força de forjamento e a função custo dos 10 melhores modelos é mostrada na Figura 16. A representação gráfica dessa relação permite avaliar qual modelo obteve o melhor resultado.

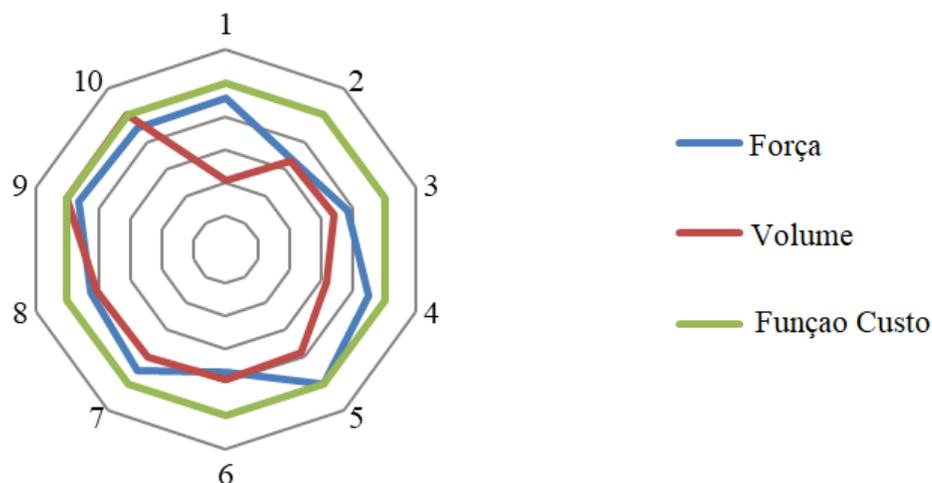


Figura 16: Relação entre força de forjamento, volume da pré-forma e a função custo dos 10 resultados analisados.

Nessa representação gráfica, ficou evidenciado que a função custo não teve uma variação. Pode-se notar que o menor volume foi na primeira pré-forma, porém a menor força de forjamento foi na pré-forma 2. Essa diferença ocorre devido a características específicas do escoamento da pré-forma. A escolha da melhor pré-forma foi devido a questões econômicas, pois os resultados de menor força e menor volume não convergiram. O modelo 1 e 2 da pré-forma obtiveram os melhores resultados, pois tem-se a menor força, menor volume de pré-forma e menor função custo, Figura 16. Levando em consideração os aspectos econômicos do processo, associados ao custo do aço e do ferramental, optou-se pelo modelo 1 da pré-forma que apresentou o menor volume.

Durante o fechamento das matrizes, o fluxo do material deve evitar o surgimento de defeitos como dobras e falta de preenchimentos das cavidades da biela. O escoamento do material durante o processo é mostrado na Figura 17. Os defeitos de dobra e falta de preenchimento eram restrições da rotina de otimização definida anteriormente e esses defeitos são associados ao fluxo do material. Ainda analisando a Figura 17, pode-se afirmar que esses defeitos não ocorreram durante o fluxo do material no forjamento.

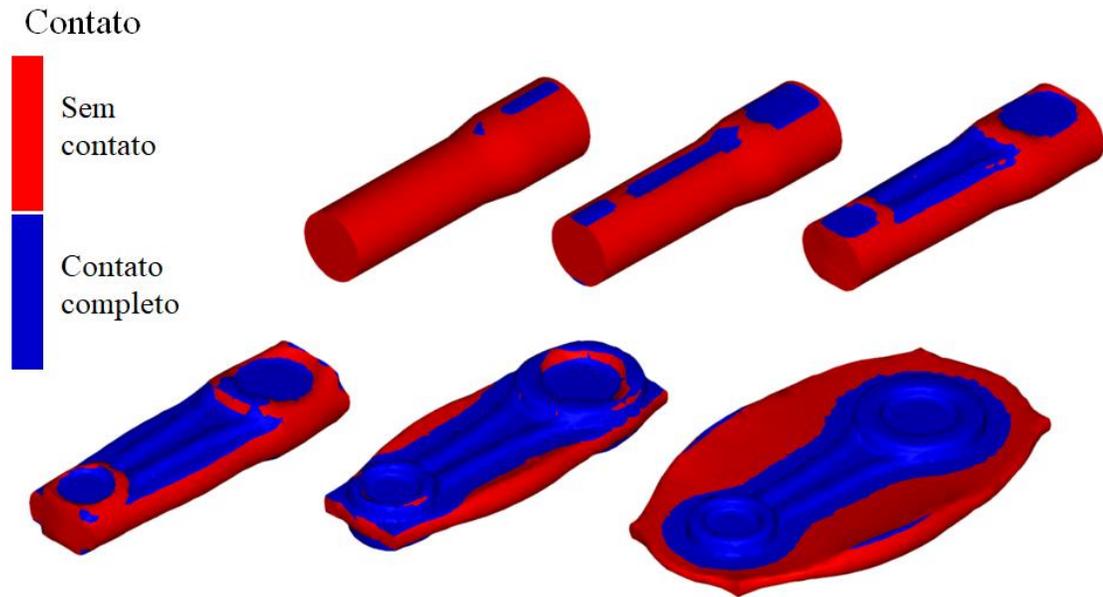


Figura 17: Contato entre material e matrizes durante o forjamento em uma etapa. Imagem retirada do software FORGE.

A região sem contato, é a região da rebarba, devido ao tipo de canal de rebarba realizado na matriz. Ainda pode-se analisar na Figura 17 que os anéis da biela foram completamente preenchidos, quanto o corpo da biela foi completamente preenchido no estágio inicial. Fica evidente que os últimos estágios do forjamento são para completar os anéis antes das matrizes completarem o fechamento. Outro ponto importante que pode-se retirar da análise do contato é o dimensionamento da pré-forma, se ela for super dimensionada o preenchimento das cavidades acontecem rapidamente. Caso isso ocorra, a partir desse instante o material irá escoar para a rebarba, aumentando a força de forjamento. Com o aumento da força, também aumenta as pressões que a matriz recebe, isso pode ocasionar uma menor vida útil da ferramenta.

A distribuição da deformação equivalente varia entre 0,15 e 2,92 ao longo da seção transversal da biela forjada, Figura 18. Pode-se notar que a deformação está distribuída de forma homogênea ao longo da peça, sem nenhuma deformação acentuada.

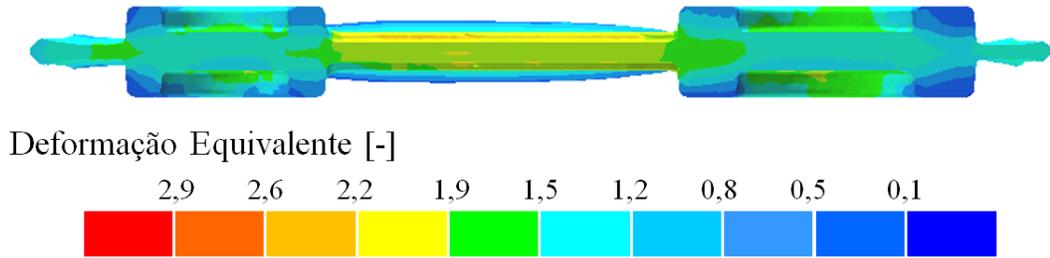


Figura 18: Distribuição da deformação equivalente no forjado. Imagem retirada do software FORGE.

A redução do volume de material da otimização, não afeta só o material perdido para a rebara, afeta também as tensões que a ferramenta recebe durante o forjamento. A distribuição das tensões nas matrizes de forjamento pode ser vista na Figura 19, a distribuição de tensões nas matrizes para a pré-forma otimizada (Figura 19a), para um *billet* cilíndrico (Figura 19b) e para a pré-forma inicial (Figura 19c).

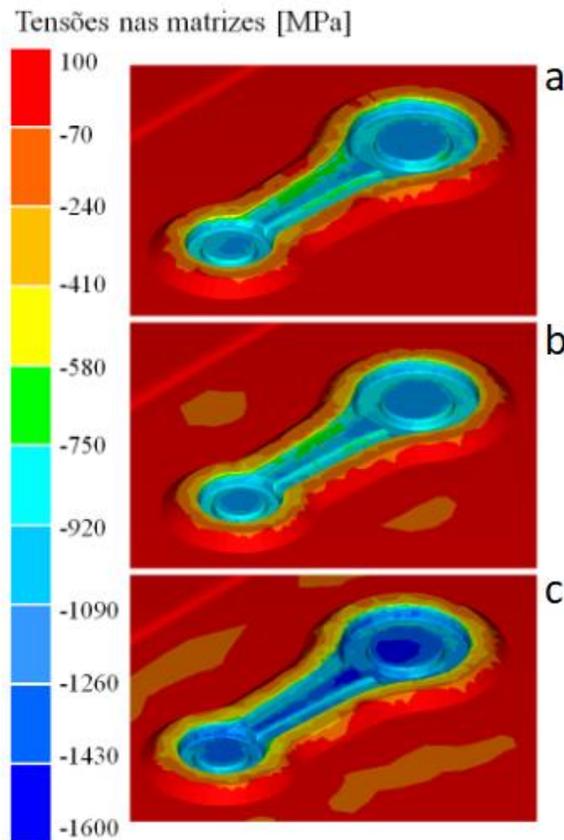


Figura 19: Distribuição das tensões geradas na matriz durante o forjamento da pré-forma otimizada(a), do *billet* cilíndrico sem a pré-forma (b) e da pré-forma inicial (c). Imagem retirada do software FORGE.

Na Figura 19, pode-se notar que a otimização da pré-forma não reduziu somente a magnitude das tensões na matriz, mas também reduziu a área das tensões elevadas. O *billet* cilíndrico e a pré-forma inicial, apresentam um tensionamento maior na área da rebarba devido ao maior volume de material perdido para o canal de rebarba. Devido a redução dos valores das tensões e área tensionada, a matriz terá uma vida útil maior, poderá ter mais ciclos de forjamento. Quanto maior o número de ciclo de forjamento de uma matriz, maior será a sua produção, acarretando numa redução dos custos de produção.

Para obter uma validação dos resultados obtidos na simulação numérica, foi realizado um experimento com a pré-forma definida. No processo, os *billets* usados foram da liga de alumínio AA6351, aquecidos em um forno resistivo a 400°C por 30 minutos para homogeneizar a temperatura. O processo foi realizado numa prensa hidráulica de capacidade de 6000 kN com uma velocidade de 5mm/s. As matrizes de forjamento foram pré-aquecidas a 150°C, usou-se também um lubrificante a base de grafite nas superfícies da mesma.

Com esse experimento foi possível comparar, a simulação com o real, as forças necessárias para realizar o forjamento. Pode-se notar que a pré-forma tem grande influência nessa força de forjamento, a Figura 20 apresenta a evolução da força de forjamento das amostras.

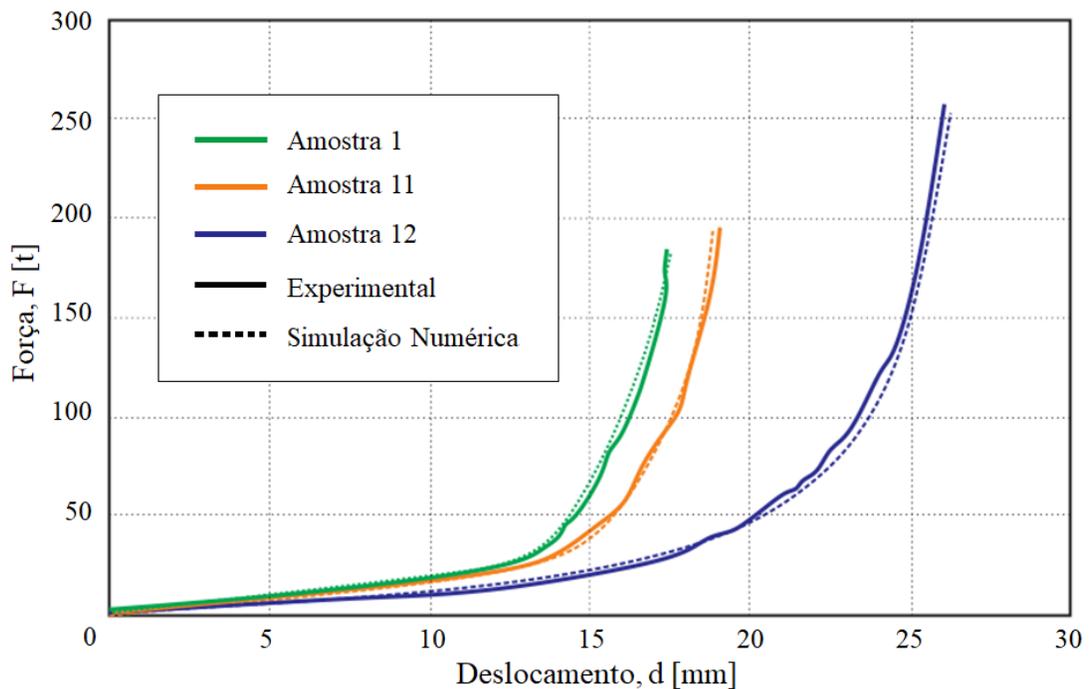


Figure 20: Força de forjamento em função do deslocamento da matriz superior.

Na amostra 12, pré-forma inicial a de maior volume, foi necessária uma força de 255 (ton). O forjamento do *billet* cilíndrico, amostra 11, foi com uma força de 193 (ton). Já a pré-forma otimizada, amostra 1, necessitou de uma força de 184 (ton) para realizar o forjamento. Nota-se uma força de 27% inferior comparada a força da pré-forma inicial e 4% inferior se comparada com a força de forjamento do *billet* cilíndrico.

Nota-se que os resultados experimentais numérico, possuem uma excelente concordância. Essa concordância mostra que as condições de contorno definidas no software, como troca térmica, comportamento mecânico do material e o atrito, foram ótimas e que refletiu nos resultados da simulação. A validação da análise numérica é evidência com a concordância dos resultados experimentais.

Na Figura 21, pode-se observar os resultados dos três processos experimentais. Observando a Fig.21c nota-se uma grande rebarba ficando evidente o superdimensionamento da pré-forma inicial. O *billet* cilíndrico, Fig. 21b, possui uma rebarba um pouco mais que a rebarba da pré-forma otimizada, Fig. 21a. O processo com o *billet* cilíndrico pode parecer atraente à primeira vista, pois não precisa de uma etapa de pré-forma. Entretanto, nesse processo é necessário o correto posicionamento do *billet*. Caso ele esteja descentralizado, poderá ocorrer defeitos associado ao fluxo do material. Esse problema não ocorre com a pré-forma otimizada, pois a distribuição do volume é diferente, não ocorrendo a falta de preenchimento ou/e formação de dobras.

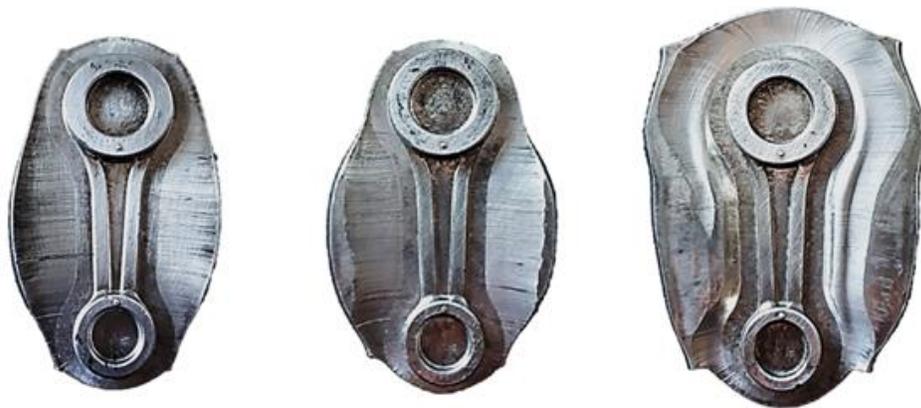


Figure 21: Peças forjadas - (a) Pré-forma otimizada, (b) *billet* cilíndrico e (c) Pré-forma inicial.

5. Conclusões

Um ponto importante nesse trabalho é os custos de simulação numérica comparado aos custos do processo experimental. Levando em consideração o custo da licença do software (proporcional ao tempo usado), energia gasta pelo computador, custo do computador (proporcional ao tempo usado) e custo do operador, tem-se um gasto aproximadamente de R\$ 4000,00. Já os custos experimentais passariam desse valor só com o valor da prensa hidráulica e matrizes.

No forjamento sempre busca-se produtos de excelente qualidade e com custo baixos para realizar o processo. Reduzir o volume de material, tensões na matriz e forças de forjamento tornam a otimização da pré-forma muito atraente e eficaz para diminuir os gastos. Neste trabalho de conclusão de curso, foi apresentada uma otimização capaz de ter uma melhor geometria para forjar uma biela. Portanto, a análise numérica e experimental do processo permite concluir que:

- A otimização da pré-forma permitiu reduzir o volume de material perdido para a rebarba em 64% comparando o processo inicial;
- A força de forjamento reduziu, aproximadamente, em 27%;
- A magnitude das tensões nas ferramentas foi reduzida, assim como a área tensionada;
- O processo experimental validou a análise numérica
- Os custos de estudos com simulação numérica geram gastos menores que estudos experimentais.
- Importante salientar que devido a menor deformação do material, pode-se ter uma perda nas propriedades metalúrgicas que a deformação é responsável.

Bibliografia

ALTAN, T.; NGAILE, G. **Cold and Hot Forging**. [S. l.: s. n.], 2005. Available at: <https://doi.org/10.31399/asm.tb.chffa.9781627083003>

COLOMBO, T. C. A. **Análise Numérica do Forjamento em Matriz Aberta para a Produção de Eixos Vazados**. 32 f. 2012. [s. l.], 2012.

COSTA, L. D. L. De. **ESTUDO DA APLICABILIDADE E DESEMPENHO DE CHAPAS METÁLICAS DE 22MnB5 COMO MÁSCARAS DE PROTEÇÃO EM MATRIZES DE FORJAMENTO A QUENTE**. 2020. [s. l.], 2020.

DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. **Metalurgia Mecânica**, [s. l.], p. 653, 1981.

DUCLOUX, R. *et al.* Automatic optimization techniques applied to a large range of industrial test cases. **International Journal of Material Forming**, [s. l.], v. 3, n. SUPPL. 1, p. 53–56, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12289-010-0705-4>

EMMERICH, M. *et al.* Metamodel – Assisted Evolution Strategies. *In*: , 2002. **Parallel Problem Solving from Nature---PPSN VII**. [S. l.: s. n.], 2002. p. 361–370.

FOURMENT, L. *et al.* Optimization of a range of 2D and 3D bulk forming processes by a meta-model assisted evolution strategy. **International Journal of Material Forming**, [s. l.], v. 2, n. SUPPL. 1, p. 343–346, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0476-y>

GIOTIS, A. *et al.* Low-cost stochastic optimization for engineering applications. **Evolutionary Methods for Design Optimization and Control with Applications to Industrial Problems (EUROGEN-2001)**, [s. l.], p. 361–366, 2001. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Low-cost+stochastic+optimization+for+engineering+applications#0>

KNUST, J. *et al.* Preform optimization for hot forging processes using genetic algorithms. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 89, n. 5–8, p. 1623–1634, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9209-9>

LANGE, K. **Handbook of metal forming**. [S. l.: s. n.], 1988. ISSN 03783804.v. 16 Available at: [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(88\)90068-x](https://doi.org/10.1016/0378-3804(88)90068-x)

MARQUES, A. S. **OBTENÇÃO DA CURVA DE ESCOAMENTO A QUENTE DO AÇO 22MnB5 A PARTIR DO MÉTODO DO EMPILHAMENTO DE CHAPAS FINAS**. 2013. [s. l.], 2013.

MARTINS, P.; GOUVEIA, B.; RODRIGUES, J. **Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica**. [S. l.: s. n.], 2005. v. 2

PANJAN, P. *et al.* Improvement of hot forging tools with duplex treatment. **Surface and Coatings Technology**, [s. l.], v. 151–152, p. 505–509, 2002. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01634-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01634-6)

PEREME, M. *et al.* Automatic optimization of both closed and open die forging processes with the use of numerical simulation. **3rd AsiaForge Meeting, Shanghai**, [s. l.], 2010.

PÉRÉMÉ, M. *et al.* Benefits of High Performance Computing applied to the numerical simulation of forged parts. **20th International Forging Congress, Hyderabad, India**, [s. l.], p. 1–11, 2011.

SANTAELLA, M. L. Fatores de influência no desgaste de matrizes de forjamento a quente de bielas automotivas. [s. l.], 2009.

SCHAEFFER, L. **Forjamento - Introdução ao Processo**. [S. l.: s. n.], 2016. ISSN 11107243.

TAKEMASU, T. *et al.* Investigation of metal flow and preform optimization in flashless forging of a connecting rod. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 59, n. 1-2 SPEC. ISS., p. 95–105, 1996. Available at: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02290-x](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02290-x)