

Aspectos de Influência na Simulação Computacional da Conformação Mecânica baseada no Método dos Elementos Finitos

Alisson Duarte da Silva ⁽¹⁾
Maria Teresa Paulino Aguiar ⁽¹⁾
Haroldo Béria Campos ⁽²⁾
Antônio Eustáquio de Mello Pertence ⁽²⁾
Paulo Roberto Cetlin ⁽²⁾

RESUMO

O estudo da conformação mecânica pode ser mais bem assistido utilizando-se simulações computacionais com base no Método dos Elementos Finitos (MEF). Esse método consiste na discretização de geometrias de interesse, visando simplificar análises físicas em formas complexas. Entretanto, além de estabelecidas correlações nodais, precisões de cálculo e condições de contorno, busca-se reduzir o tempo de cálculo via elaboração de modelos simplificados. Discute-se aqui a influência de parâmetros relacionados aos modelos computacionais sobre a precisão dos resultados obtidos e o tempo de simulação necessário. Foram testadas as consequências dos aspectos de configuração da simulação sobre a precisão dos resultados previstos com foco no número de elementos e de nós empregados nas geometrias, na suposição de comportamento do material (plástico ou elasto-plástico) e no limite de penetração de uma malha sobre a outra (remalha). Assim, foi mostrada a importância das configurações de simulação, sendo essas tão importantes quanto as considerações dos próprios aspectos físicos do processo para a obtenção de cálculos satisfatórios.

Palavras chave — Método dos Elementos Finitos, Malha, Remalha, Simulação, Precisão.

ABSTRACT

Analysis and research on metal forming is improved by the use of Finite Element Method (MEF), which considers the partitioning of a geometry in several smaller geometries. It is necessary to set nodal correlations, calculate the precision and set boundary conditions. However, FE models are commonly set in order to have short computing times. The influence of simulation aspects on results and simulation time are studied in this work. Mesh density, material behavior and remeshing have been taken in account during simulations. The discussion was focused on the fundamental significance of the setting aspects on simulation outputs.

Key words — Finite Element Method, Mesh, Remeshing, Simulation, Precision.

1. INTRODUÇÃO

A análise de sistemas físicos nas diversas áreas da Engenharia pode ser realizada através de modelos que correspondem a uma simplificação do problema sendo abordado, visando a obtenção de dados representativos da realidade em resposta a estímulos aplicados. Na conformação mecânica, modelos

⁽¹⁾ Prof. Dr., Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, alissonds@ufmg.br

⁽²⁾ Prof. Dr., Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.

computacionais com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) são bem aceitos e fornecem resultados muito próximos da realidade.

Todo modelo possui formulações matemáticas, além de considerações de simplificação física e definições de condições de contorno que conduzem a incertezas nos resultados obtidos. Além disso, o próprio método de base para os modelos, quando empregado, também pode causar erros e incertezas capazes de resultar em dados distintos da realidade. Este artigo tem o foco nas características de utilização do MEF, abordando parte das inúmeras características de configuração do modelo que podem influenciar nos resultados simulados. Abordam-se aqui os seguintes aspectos do problema: o *comportamento do material*, as *densidades das malhas* das geometrias e os critérios de *remalha*. Esses aspectos são, normalmente, de responsabilidade do usuário quando da utilização de softwares de simulação com base no MEF.

Outro aspecto de relevância é o *intervalo de tempo* no cálculo incremental (“time step”), sendo fundamental na redução de erros durante a condução dos cálculos. Ao longo de um processo de forjamento, por exemplo, cálculos de variáveis como forma final da peça ou carga de processo são realizados de forma incremental, para pequenos intervalos de tempo. Assim, quanto menores esses intervalos, maior é a precisão no cálculo da variação dimensional da peça, sendo a forma final na peça uma soma total dos cálculos para cada intervalo de tempo (ou de deslocamento da matriz). O intervalo de tempo (“time step”) não é abordado neste estudo, sendo a sua discussão prevista para o trabalho subsequente ao presente.

2. COMPORTAMENTO DO MATERIAL

O *Comportamento do material* pode ser determinado de maneira a reduzir a complexidade e a quantidade de cálculos necessários para se prever um determinado resultado. Em geral, o comportamento de um material pode ser simplificado como um dos seguintes tipos: rígido, elástico, plástico ou elasto-plástico. O regime rígido considera que a geometria pertencente ao sistema em análise não permite a ocorrência de nenhum tipo de deformação, desprezando qualquer possível variação dimensional. Salvo aplicações específicas, é muito comum considerar que as matrizes envolvidas no processo de conformação mecânica sejam rígidas, não computando a influência da sua deformação elástica sobre a forma final da peça conformada. Por outro lado, modelos elásticos são apropriados para situações em que se deseja avaliar o estado de tensões sobre as ferramentas e pequenas variações dimensionais em qualquer geometria, sejam elas resultantes de esforços externos ou variações térmicas. Já os materiais considerados somente plásticos se mantêm rígidos enquanto os esforços externos sobre eles não resultam em tensões internas que excedam o Limite de Escoamento de seu material, sendo por isso também conhecidas como rígido-plásticas. Caso os esforços externos causem tensões além do Limite de Escoamento do material, a geometria passa a se modificar, deformando-se de forma permanente de acordo com o comportamento determinado pela sua curva verdadeira de “Tensão vs. Deformação” no regime plástico (Curva de Escoamento). Finalmente, o comportamento elasto-plástico calcula as variações dimensionais de uma geometria considerando suas deformações elásticas e plásticas simultâneas, assim como as distorções elásticas da peça de interesse, após seu descarregamento (o assim chamado retorno elástico).

Para que melhor se compreenda os *regimes de comportamento* até aqui discutidos, pode-se utilizar o gráfico de “Tensão vs. Deformação” mostrado na Figura 1. A curva convencional ou de Engenharia é tipicamente obtida a partir de um ensaio de tração, sendo traçada de maneira simplificada, ou convencional, a partir de equações que consideram a tensão e a deformação somente com base nas dimensões iniciais do corpo de prova. Assim, essa curva, apesar de ser apropriada para a obtenção de propriedades mecânicas, não representa a realidade de comportamento do material quando submetido a grandes deformações. Logo, torna-se necessária a obtenção da curva verdadeira do material. A curva verdadeira pode ser estratificada em dois regimes: elástico e plástico. A Figura 2 representa o comportamento elástico do material, sendo normalmente determinado apenas pelo Módulo de Young do material. Já a Figura 3 representa a Curva de Escoamento, a qual determina o comportamento plástico do material, se mantendo rígida (deformação nula) para tensões abaixo do Limite de Escoamento. Um comportamento elasto-plástico seria representado pela soma de ambos os regimes, elástico e plástico.

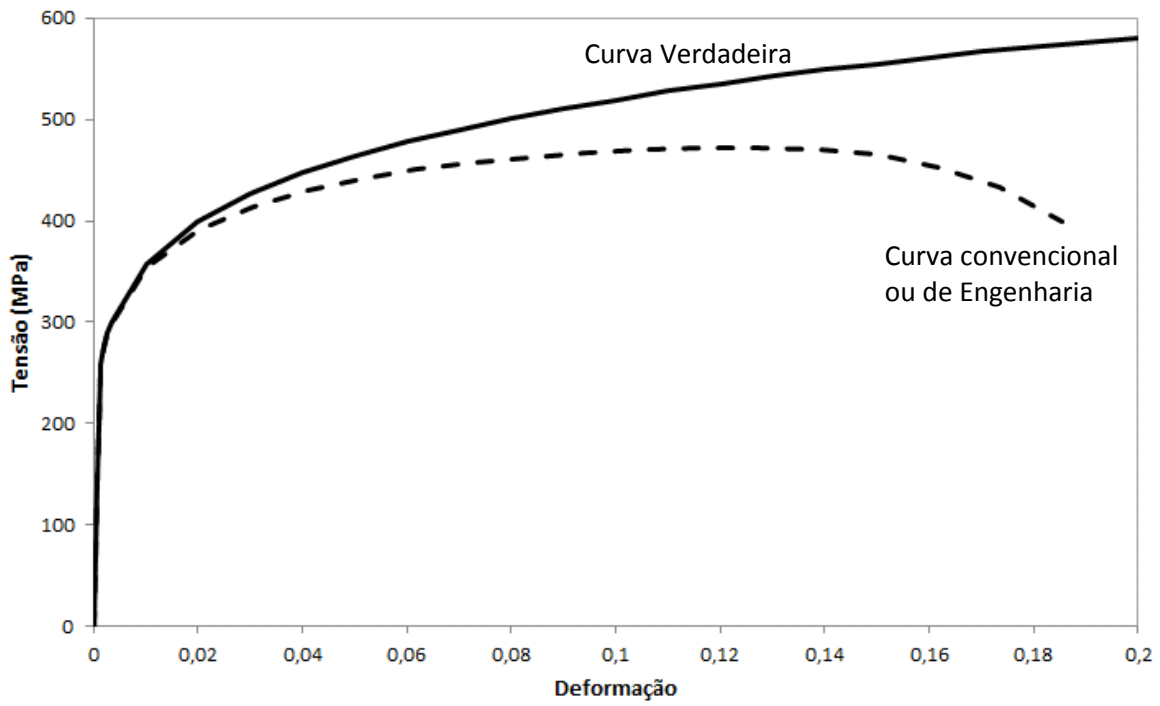


Figure 1: Comparação entre as curvas de “tensão vs. Deformação” verdadeira e convencional de um aço SAE 3310 [adaptado de JMatPro v9.0, Sente Software Ltd, UK].

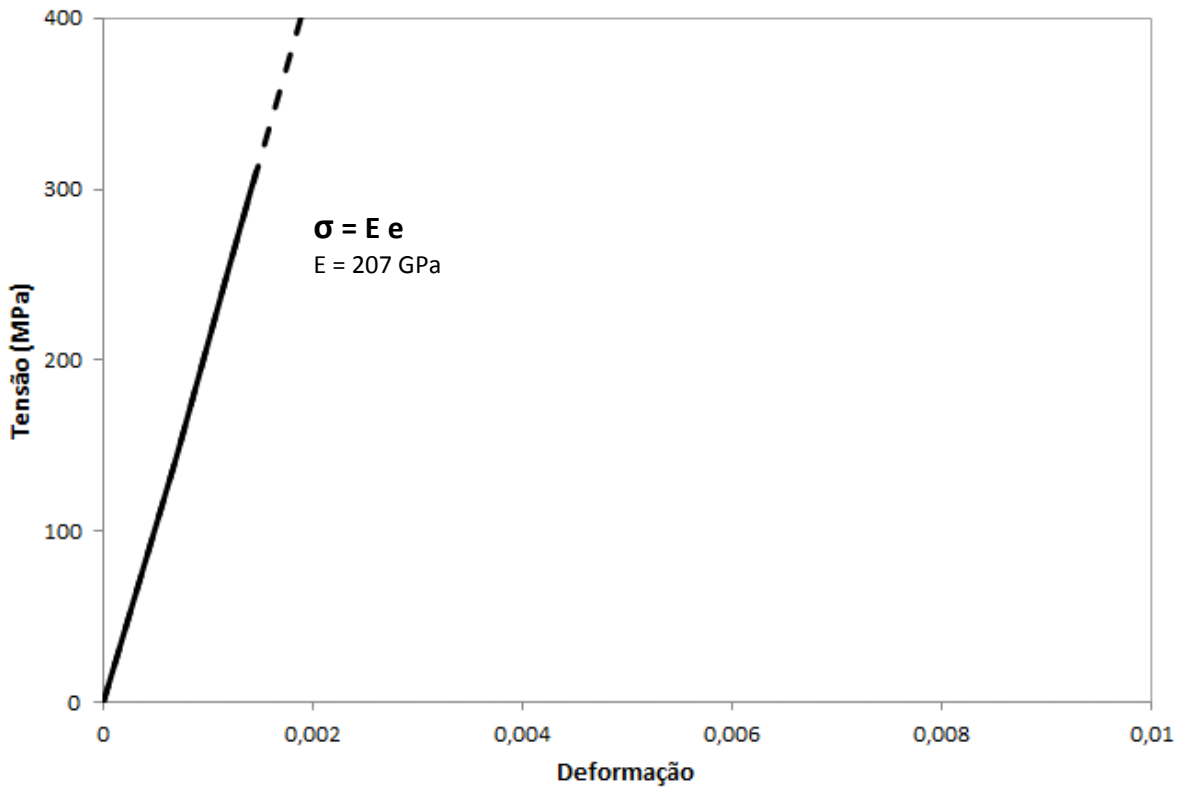


Figure 2: Comportamento elástico (Regime Elástico) de um aço SAE 3310 [adaptado de JMatPro v9.0, Sente Software Ltd, UK].

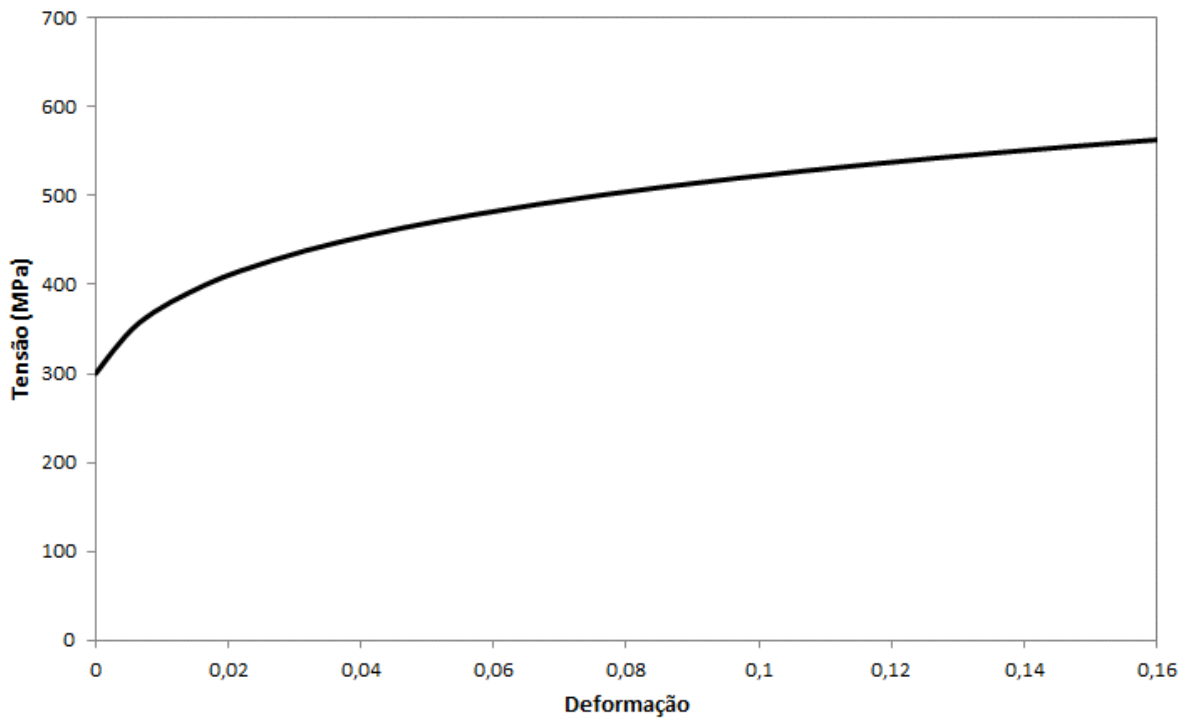


Figure 3: Comportamento plástico (Curva de Escoamento), ou rigidoplástico, de um aço SAE 3310 [adaptado de JMatPro v9.0, Sente Software Ltd, UK].

3. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos propõe a discretização da geometria em um determinado número de elementos de formas simples, resultando em uma malha com uma quantidade, ou densidade, de elementos por unidade de área. Esses elementos são unidos aos seus circunvizinhos compartilhando os seus nós. Na realidade, esses elementos são definidos a partir de uma discretização da geometria em pontos, ou nós, a partir dos quais são gerados os elementos. A Figura 4 exemplifica a discretização com base em uma geometria qualquer. O nós mostrados podem, então, ser "ligados" aos seus adjacentes, podendo formar polígonos simples de 3 ou 4 lados, chamados de elementos. Assim, os fenômenos físicos que ocorrem ao longo do tempo de processo, como a deformação e a transferência de calor, são calculados para cada nó, considerando a mútua influência entre esses em uma disposição matricial

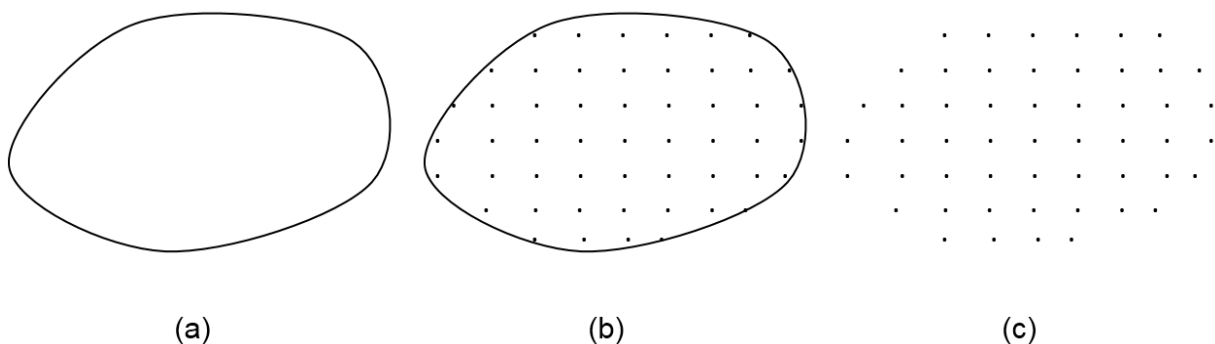


Figure 4: (a) Geometria (b) discretizada e (c) representada por pontos ou nós.

Entretanto, a malha de elementos pode representar uma geometria com maior ou menor precisão. Observa-se que a malha de nós obtida na Figura 4 (c) não representa exatamente a geometria proposta na Figura 4 (a). Um aumento do número de nós (e assim de elementos) resultaria em uma representação mais precisa da forma ou curvatura da geometria e, portanto, em cálculos mais próximos da realidade. A Figura 5 mostra um refinamento localizado da malha de elementos finitos com o intuito de melhor representar a geometria proposta. Da mesma maneira, a Figura 6 mostra uma geometria discretizada por elementos e com refinamentos

localizados para melhor descrever a forma da peça a ser calculada. Vale dizer que esse aumento no número de elementos também proporciona um aumento na quantidade de equações a serem conduzidas computacionalmente, aumentando assim o tempo de simulação. Toda a discussão até o momento está baseada em exemplificações bidimensionais e que considerações tridimensionais aumentariam muito o tempo de cálculo. Uma representação em três dimensões significa uma maior complexidade das equações (cálculos em três direções) e também um grande acréscimo no número de elementos para a representação do volume.

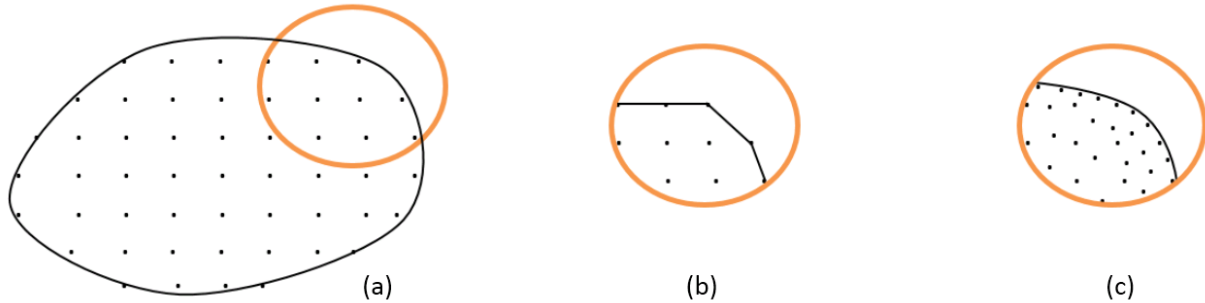


Figure 5: Influência da quantidade de elementos na representação da geometria: (a) malha proposta completa e (b) em detalhe; (c) refinamento da malha.

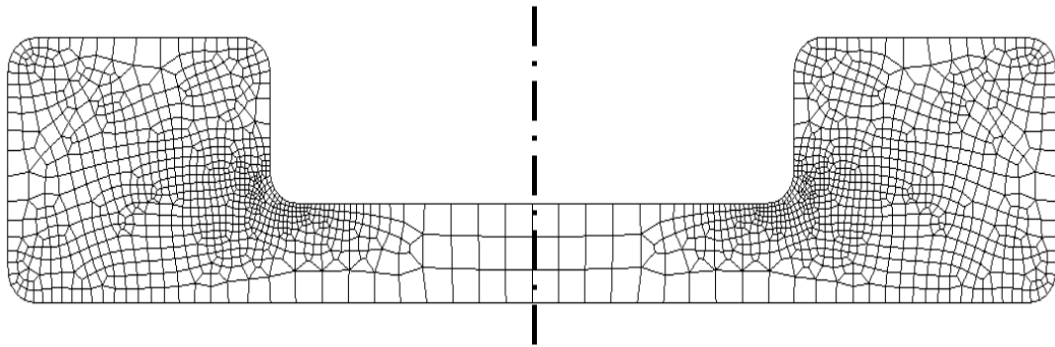


Figure 6: Discretização de uma geometria com densidade de elementos variável para diferentes regiões da peça [da Silva *et al.*, Utilização de dados sobre materiais em simulações computacionais de conformação mecânica, SENAFOR 2015].

Com o objetivo de se demonstrar as discussões realizadas neste trabalho, foi elaborado um modelo com base nas definições da Tabela 1. Como se trata de um processo de forjamento axissimétrico, ou seja, de geometria e condições de contorno simétricas em torno de um eixo, o modelo foi simplificado (Figura 7 (b)) de maneira a reduzir consideravelmente a quantidade de elementos. A Figura 8 mostra a variação na forma final da peça forjada a quente para valores distintos de densidade de elementos, representando $0,01 \text{ elem/mm}^2$ (20 elementos) e $0,16 \text{ elem/mm}^2$ (256 elementos). Observa-se que quanto maior a quantidade de elementos, e por consequência a densidade da malha, mais precisa é a forma final da peça conformada. O ponto "P" indicado foi utilizado para a obtenção de valores de deformação efetiva, conforme mostrado mais adiante no texto.

Tabela 1: Configuração (MEF) padrão para a simulação.

Natureza	Parâmetro	Definição
Processo	Tarugo	Plástico
	Material do tarugo	SAE 4340
	Temperatura do tarugo	1.000 °C
	Altura do tarugo	80 mm
	Diâmetro do tarugo	40 mm
	Matrizes	Rígidas
	Temperatura das matrizes	200 °C
	Velocidade da prensa	50 mm/s
	Fator de atrito	0,3
	Coef. de transferência térmica	11 kW/m ² .°C
Simulação	Geometria	Axissimétrica
	Malha	256 elem ou 0,16 elem/mm ²
	Deslocamento da matriz por passe (step) de simulação	0,5 mm/step ou 0,01 s/step

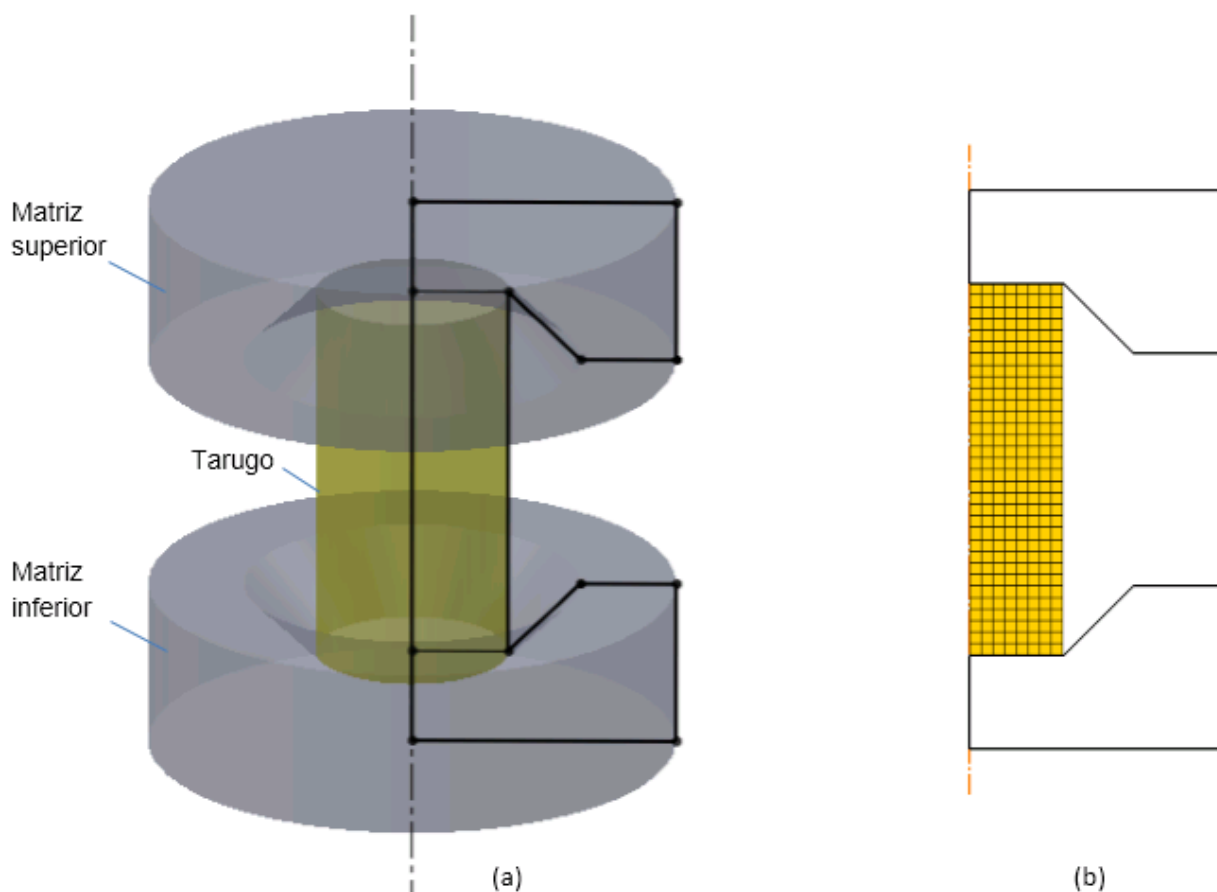


Figure 7: (a) Configuração do sistema de forjamento e (b) o seu modelo (MEF) bidimensional com referência à configuração padrão (Tabela 1).

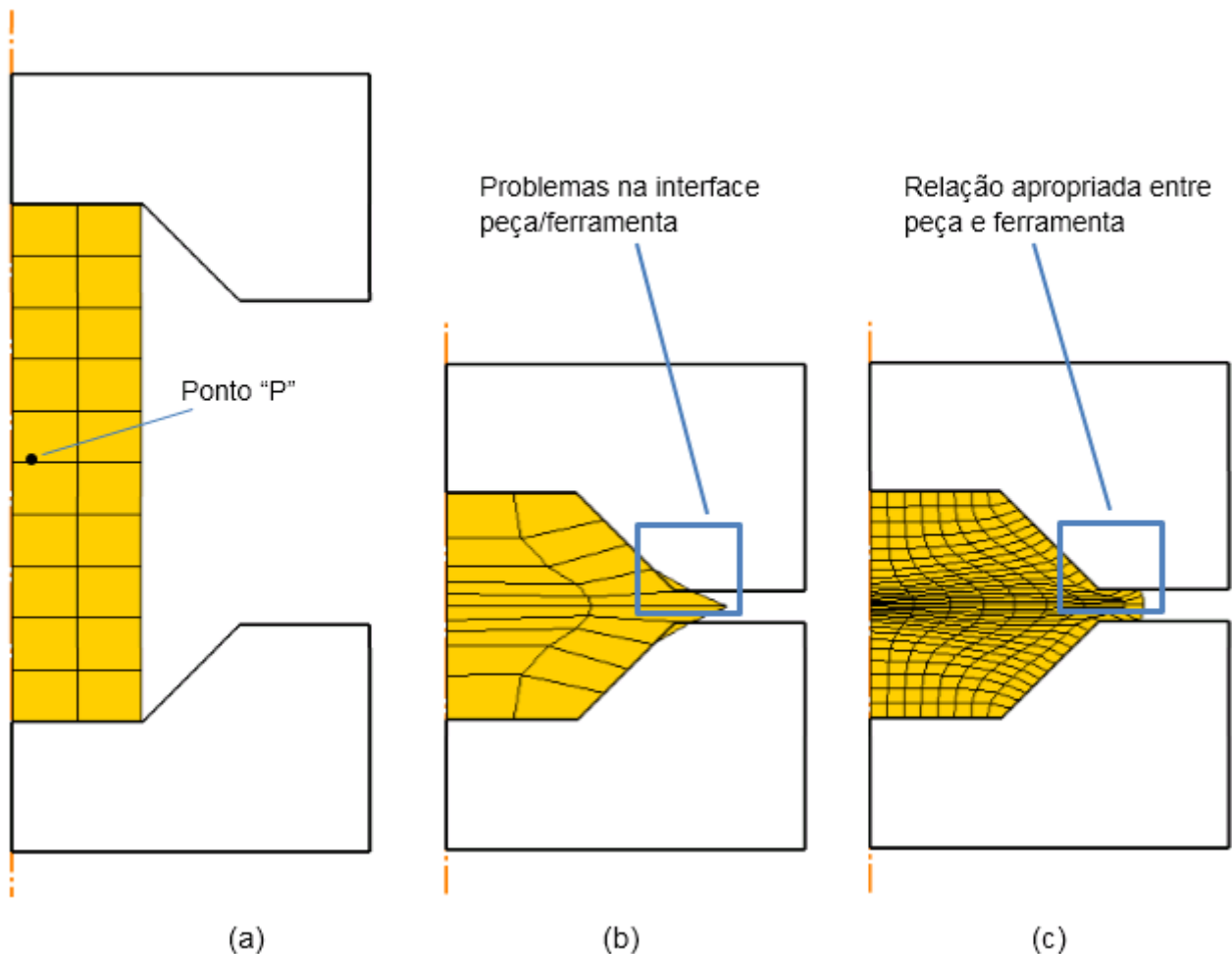


Figure 8: (a) Modelo contendo apenas 20 elementos, indicando o ponto "P" para aquisição de dados, e forma final com (b) 20 elementos e (c) 256 elementos.

As formas obtidas na Figura 8 são o resultado da soma das deformações de cada elemento. Entretanto, a deformação de cada elemento depende da movimentação dos nós, ou seja, da deformação calculada para cada nó. Logo, sabendo-se que as deformações são calculadas para todos os nós, o perfil de deformações dentro de cada elemento e, portanto, ao longo de toda a peça sendo conformada, é determinado a partir de uma interpolação das deformações nos nós. A Figura 9 mostra a interpolação de resultados em um determinado elemento para um certo momento durante o processo de conformação. O elemento selecionado faz fronteira com a linha de axissimetria. Portanto, a deformação calculada no ponto "α" é uma média entre os nós "a" e "b". Já o ponto "β" no centro do elemento possui uma deformação média entre os nós "a", "b", "c" e "d". Por fim, o ponto "γ" possui uma média ponderada entre todos os nós do elemento. O mesmo é válido para a previsão de outros possíveis resultados, como a distribuição de temperaturas, velocidades, microestruturas, etc..

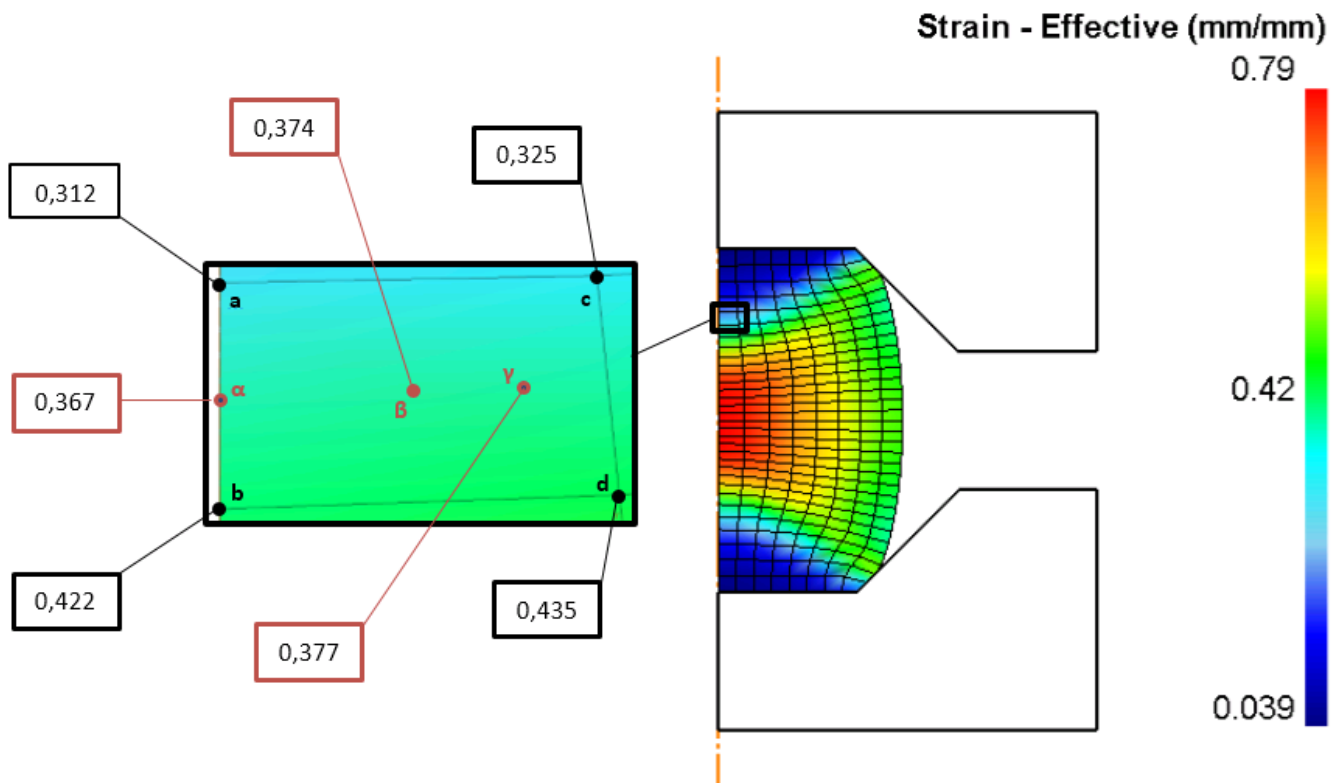


Figure 9: Distribuição de deformação em um elemento.

4. DENSIDADE DA MALHA

Como discutido e exemplificado até o momento, fica claro que maiores densidades de elementos resultam em representações mais precisas de geometria. Análises de preenchimento das matrizes, ocorrências de dobras ou mesmo dimensões finais, por exemplo, dependem bastante da densidade de elementos. No entanto, o tempo computacional varia com a quantidade de elementos utilizada. Para o exemplo proposto, o tempo de simulação depende linearmente do aumento da densidade da malha, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 10. Em razão do grande número de simulações necessárias para as análises deste trabalho, tomou-se o cuidado de se estabelecer um modelo com curto período de tempo computacional, quantificado no eixo da ordenada. Um segundo eixo da ordenada representa o tempo relativo ao modelo padrão estabelecido na Tabela 1 (0,16 elem/mm² ou 256 elementos). Já os eixos da abscissa mostram a quantidade de elementos e a sua respectiva densidade.

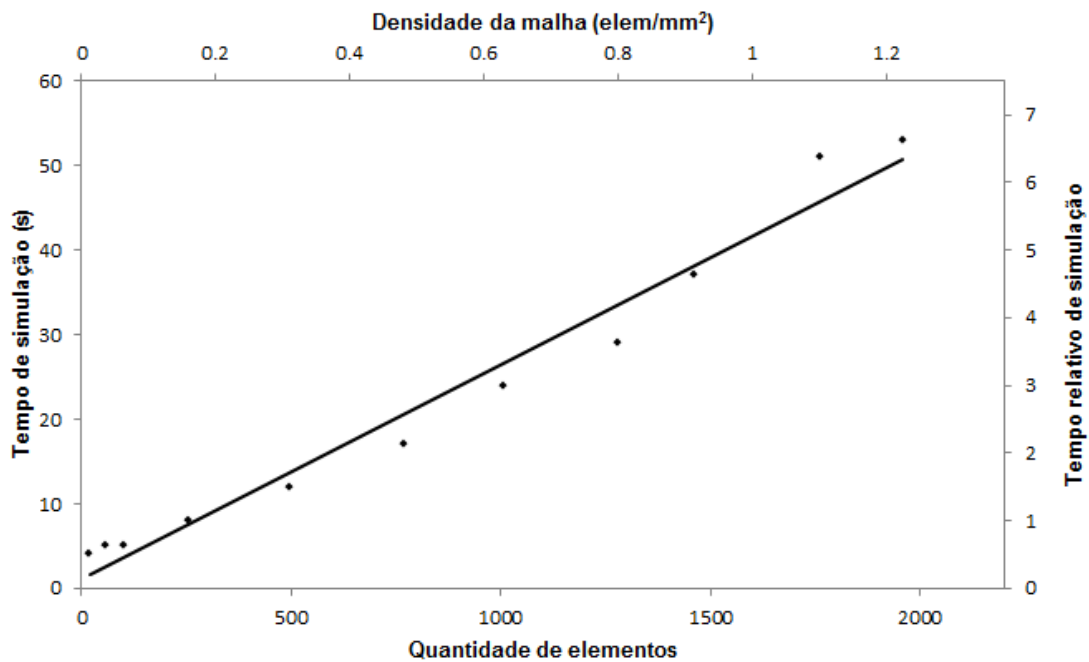


Figure 10: Distribuição de deformação em um elemento.

O cálculo da deformação efetiva no material também varia com a densidade da malha. A Figura 11 demonstra o quão diferente se mostra o perfil de deformações ao longo da seção do tarugo conformado a quente quando comparados dois modelos distintos de simulação. Para uma densidade de 0,16 elem/mm² são obtidas deformações efetivas de até 200%, enquanto que para uma densidade de 0,01 elem/mm² as deformações efetivas não atingem 170%. Analisando a evolução da deformação efetiva em apenas um ponto do tarugo (ponto "P" mostrado na Figura 7), observa-se o distanciamento dos valores calculados para cada modelo à medida que o processo é realizado. As imprecisões são somadas durante a simulação, resultando em deformações finais distintas para ambos os modelos. A Figura 12 apresenta a evolução da deformação efetiva durante a operação de forjamento.

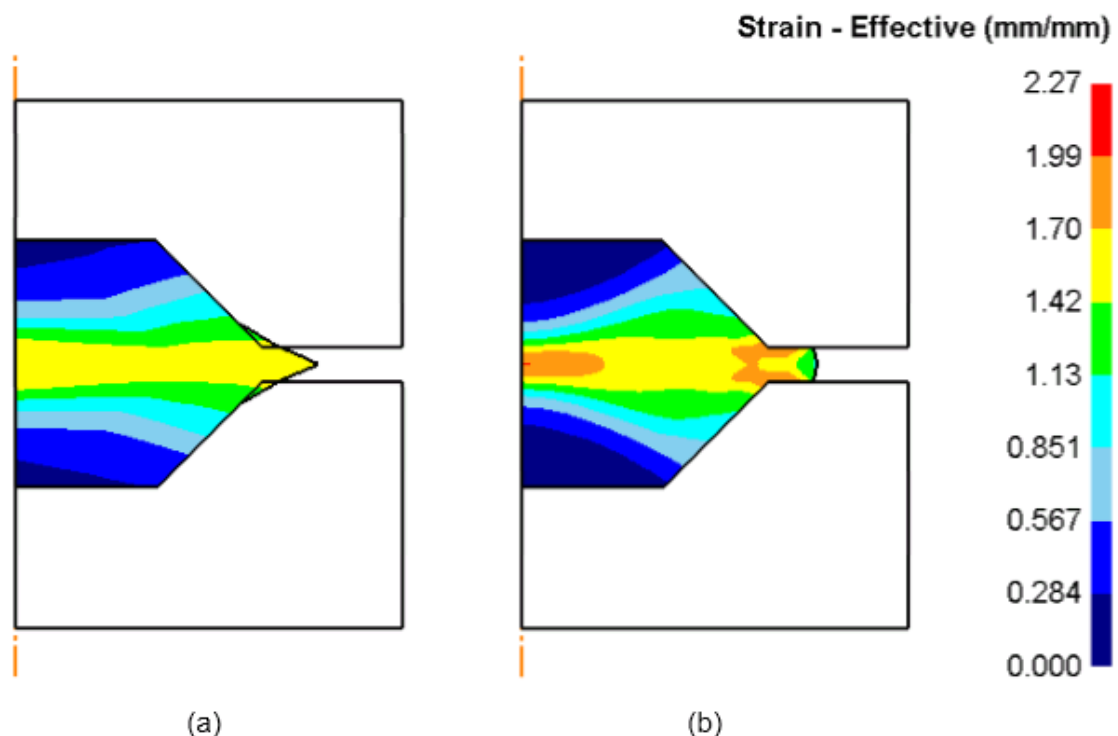


Figure 11: Cálculo da deformação efetiva para uma densidade de (a) 0,01 elem/mm² e (b) 0,16 elem/mm².

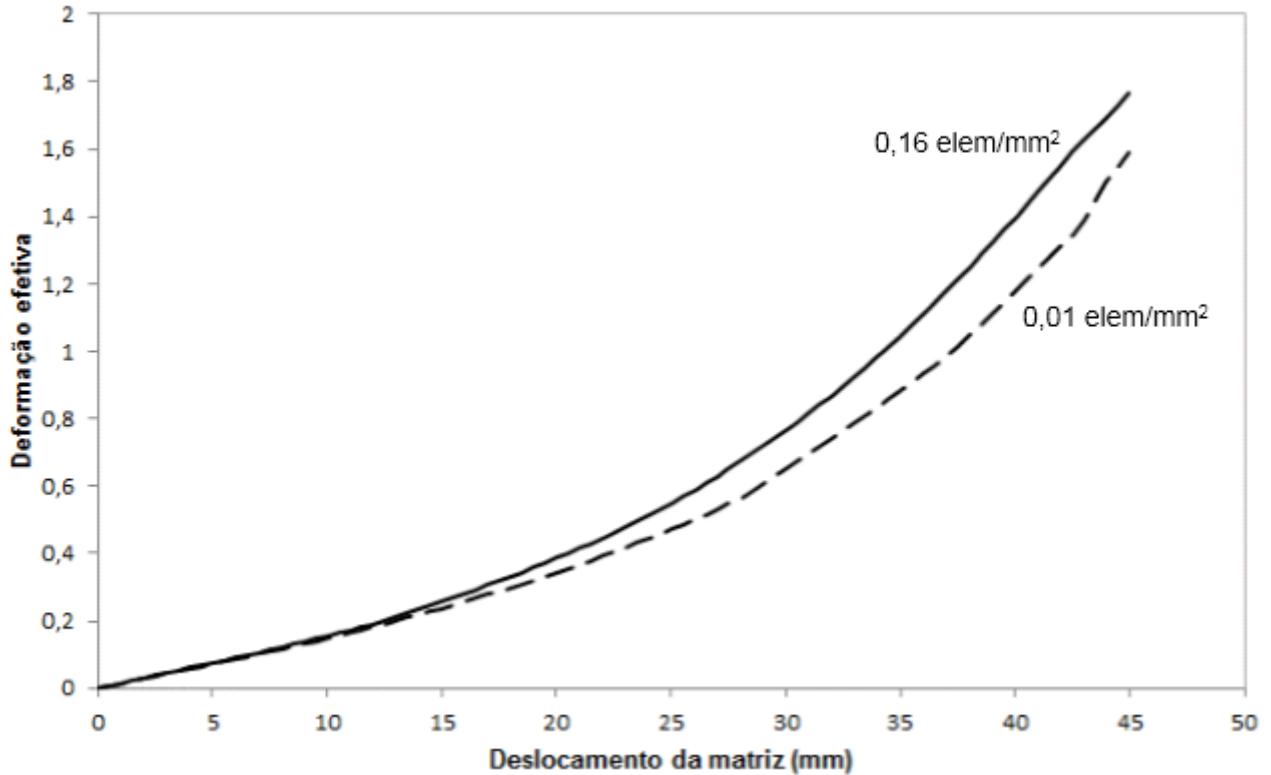


Figure 12: Evolução da deformação efetiva no ponto “P” ao longo da simulação.

A deformação resultante, ou seja, ao final da simulação, no ponto “P” foi obtida para vários modelos com densidades de malha distintas. Com isso, foi possível estabelecer um teste de convergência, indicando uma estabilização do valor de deformação efetiva final calculada em função do aumento do número de elementos da malha. A Figura 13 mostra que os cálculos convergiram a partir de uma densidade de malha de aproximadamente 0,31 elem/mm² (500 elementos). Assim, o modelo padrão (Tabela 1) inicialmente definido não é apropriado para o cálculo de deformações efetivas no material forjado. Os resultados indicam que uma malha com ao menos 500 elementos deve ser utilizada. Entretanto, um aumento na quantidade de elementos acima de 500 resultaria em um modelo pouco eficiente, tendo em vista que o tempo de simulação aumentaria sem haver variação significativa da deformação efetiva calculada.

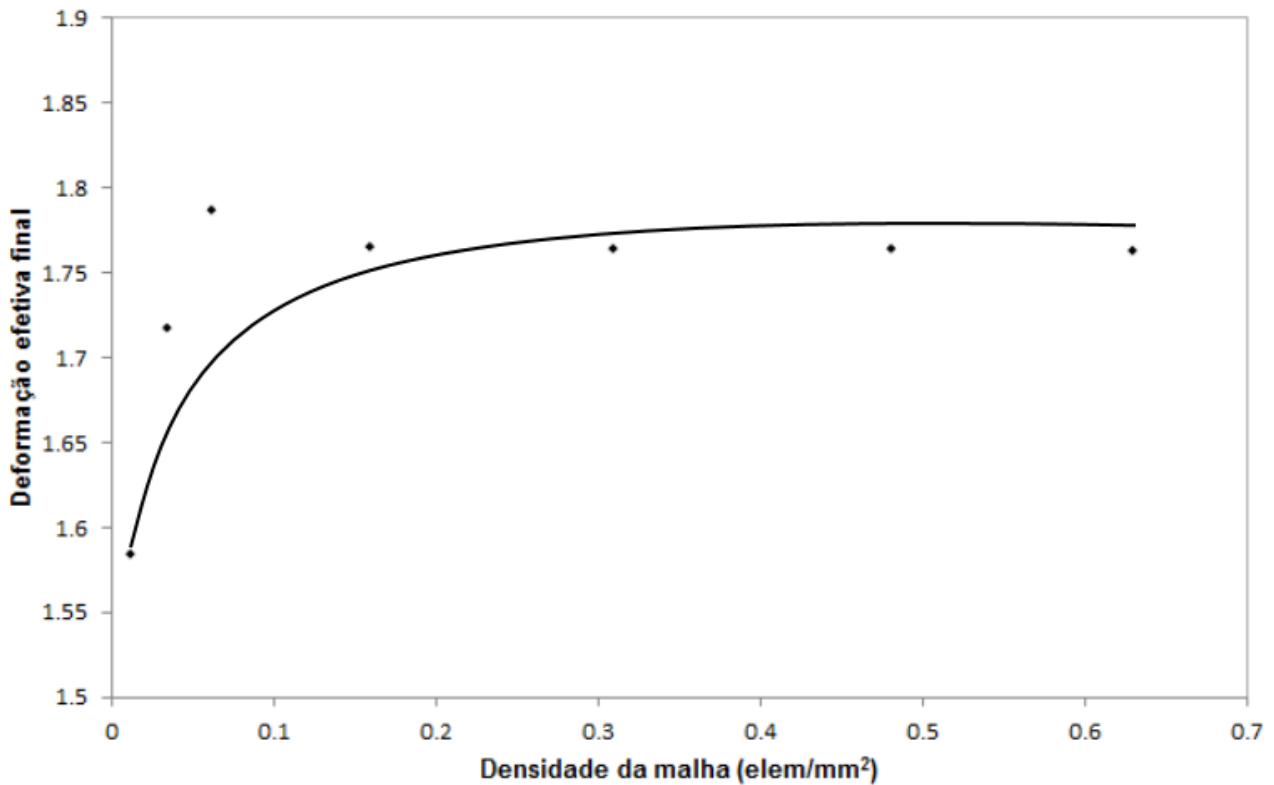


Figure 13: Convergência do cálculo para a deformação efetiva ao final do processo em função da densidade da malha (ponto "P").

Um outro parâmetro analisado foi a carga de forjamento prevista pela simulação. A princípio observaram-se perfis diferentes da evolução da carga do longo do processo para modelos com densidades distintas. A Figura 14 mostra que o modelo com 0,01 elem/mm² apresenta uma variação (repentina redução e posterior crescimento) próximo ao final do processo. Já a simulação com 0,16 elem/mm² não apresenta a mesma variação, tendo a sua carga de forjamento se comportado de maneira sempre crescente, como já esperado em razão do aumento contínuo da deformação do material e do preenchimento progressivo das matrizes. De qualquer maneira, na tentativa de se prever a carga máxima de forjamento necessária para o processo, realizou-se o teste de convergência conforme mostrado na Figura 15. O teste indicou que uma malha com ao menos 700 elementos já seria o suficiente para a previsão da carga de forjamento do processo. (Na figura, só tem a densidade de elementos, e não o número de elementos. Sugiro colocar este número...)

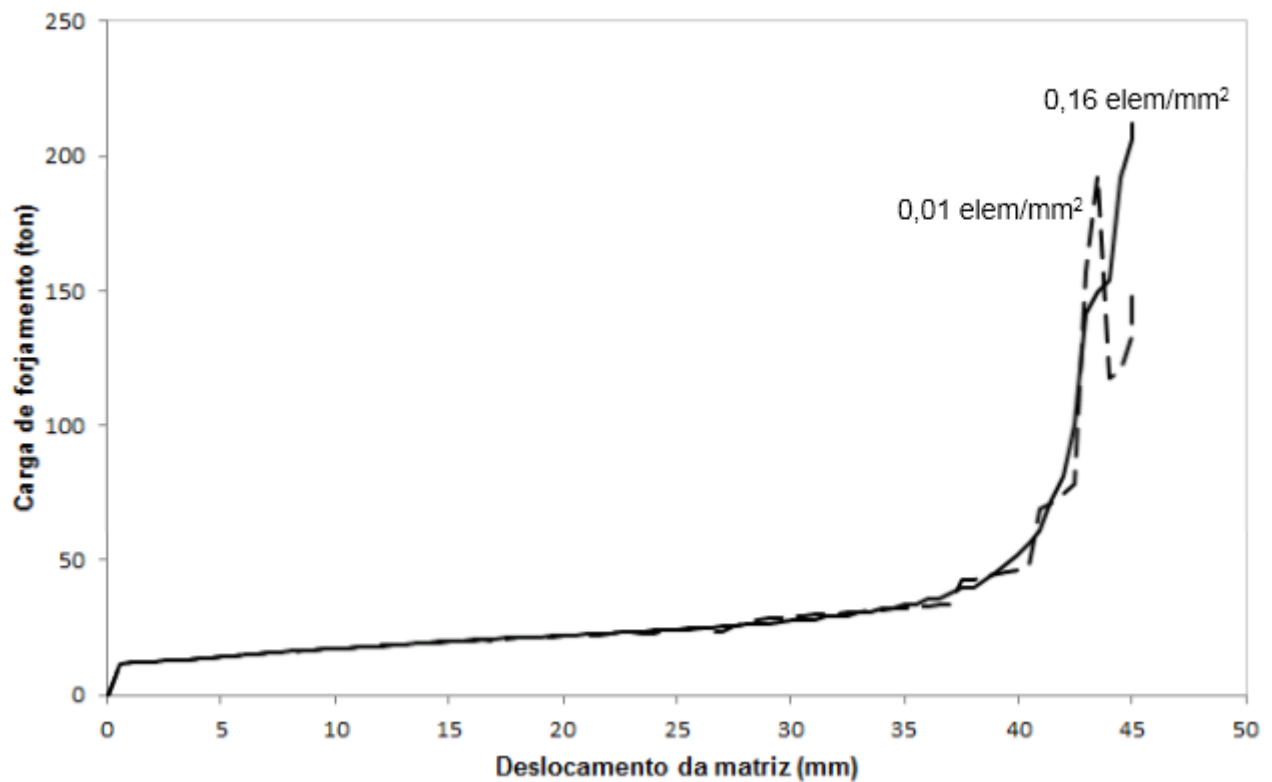


Figure 14: Carga de forjamento ao longo do processo para densidades de malha distintas.

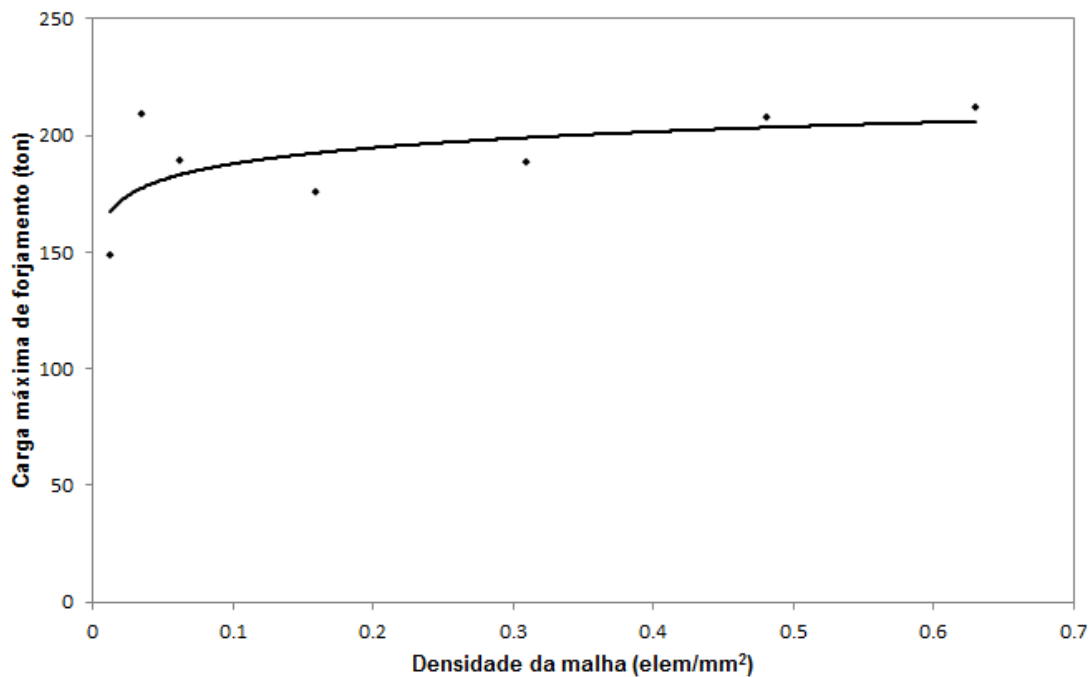


Figure 15: Carga máxima de forjamento calculada para densidades de malha distintas.

Buscando compreender a distinção entre os perfis de carga de forjamento obtidos na Figura 14, analisou-se passo a passo a evolução de todo o processo para o modelo com 0,01 elem/mm². A Figura 16 mostra essa análise em dois momentos: imediatamente antes da redução da carga e ao final da operação. Observa-se que imediatamente antes da queda na carga, um dos elementos em contato com a matriz está prestes a passar por uma das arestas da matriz e fazer parte da região da rebarba. No entanto, quando o elemento em contato com a matriz vence a aresta dessa ocorre uma penetração da malha na matriz. Em razão da penetração da malha na matriz, o cálculo baseia-se de forma equivocada da peça, ocasionando uma redução incorreta da carga. Contudo, a operação prossegue e a carga volta a crescer novamente.

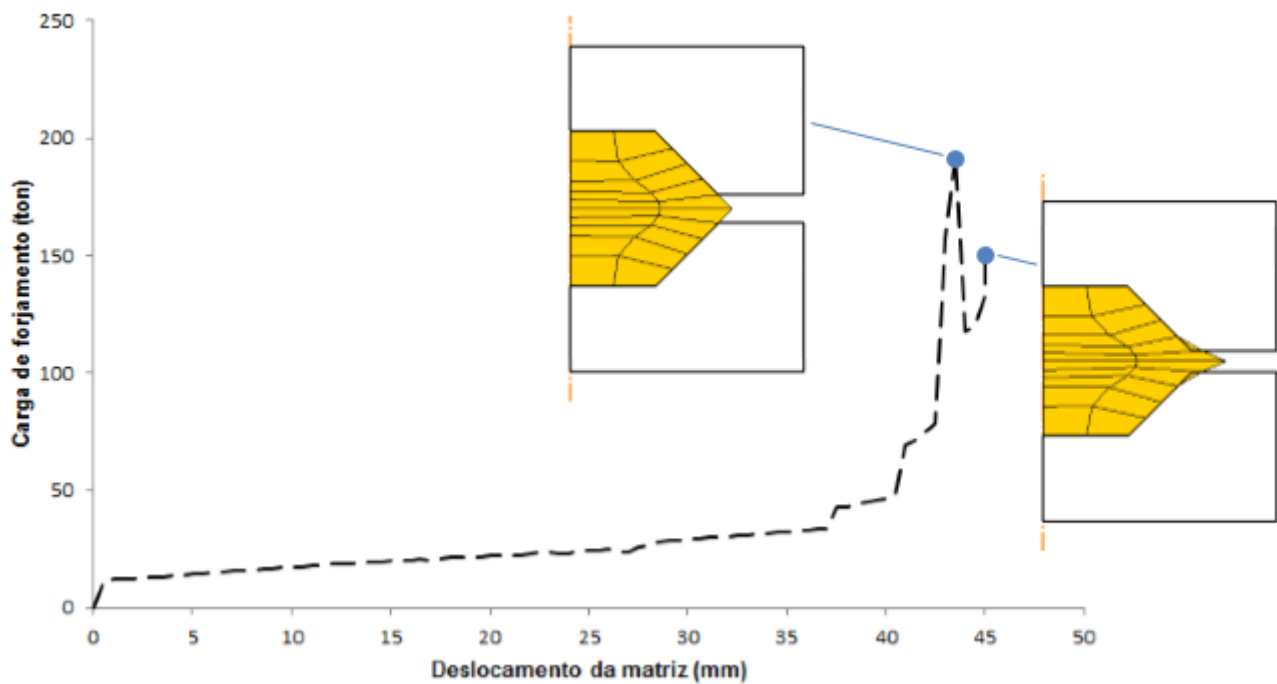


Figure 16: Comportamento da malha (0,01 elem/mm²) na etapa final do processo.

5.REMALHA

A prática da *remalha* é uma alternativa considerada nos modelos com grandes deformações, como é o caso da conformação mecânica. Dependendo da complexidade da forma final da peça, os elementos podem se distorcer de maneira exagerada ao longo do processo, implicando em grandes erros de cálculo. Para evitar esses fenômenos, os programas de simulação por elementos finitos, com foco em cálculos de deformação plástica, estabelecem critérios de identificação de distorções dos elementos e remalham a nova forma da geometria, interpolando os valores como tensão, deformação e temperatura, entre outros, da malha anterior na nova malha.

Compreende-se que a operação de remalha em simulações com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) busca evitar grandes incertezas nos resultados calculados. Um critério de remalha bastante utilizado é a penetração da malha na matriz, assim como ocorrido na Figura 8 (b). Essa penetração da malha pode ser quantificada conforme mostrado na Figura 17. Neste caso, a penetração de uma malha é representada pela distância entre a borda do elemento penetrante e a aresta relativa da matriz. Ocorrências dessa natureza causam imprecisões nos cálculos, situação que pode ser contornada utilizando-se o recurso de remalhar. A remalha consiste em uma tentativa de redefinição dos limites dos elementos que representam a geometria de maneira a tentar mais bem representar a forma e os valores de tensão e deformação envolvidos, além da transferência de calor e outros possíveis cálculos desejados. É possível, assim, estabelecer um critério de remalha com base na distância da penetração da malha. Configurando o sistema de maneira a não haver penetração da malha durante o processo (distância de penetração nula), foi possível verificar a remalha do modelo com 0,01 elem/mm², como mostrado na Figura 18. Observa-se que a região da rebarba ainda não apresenta uma geometria adequada em razão do pobre número de elementos envolvidos, contudo houve redução nas imprecisões dos cálculos.

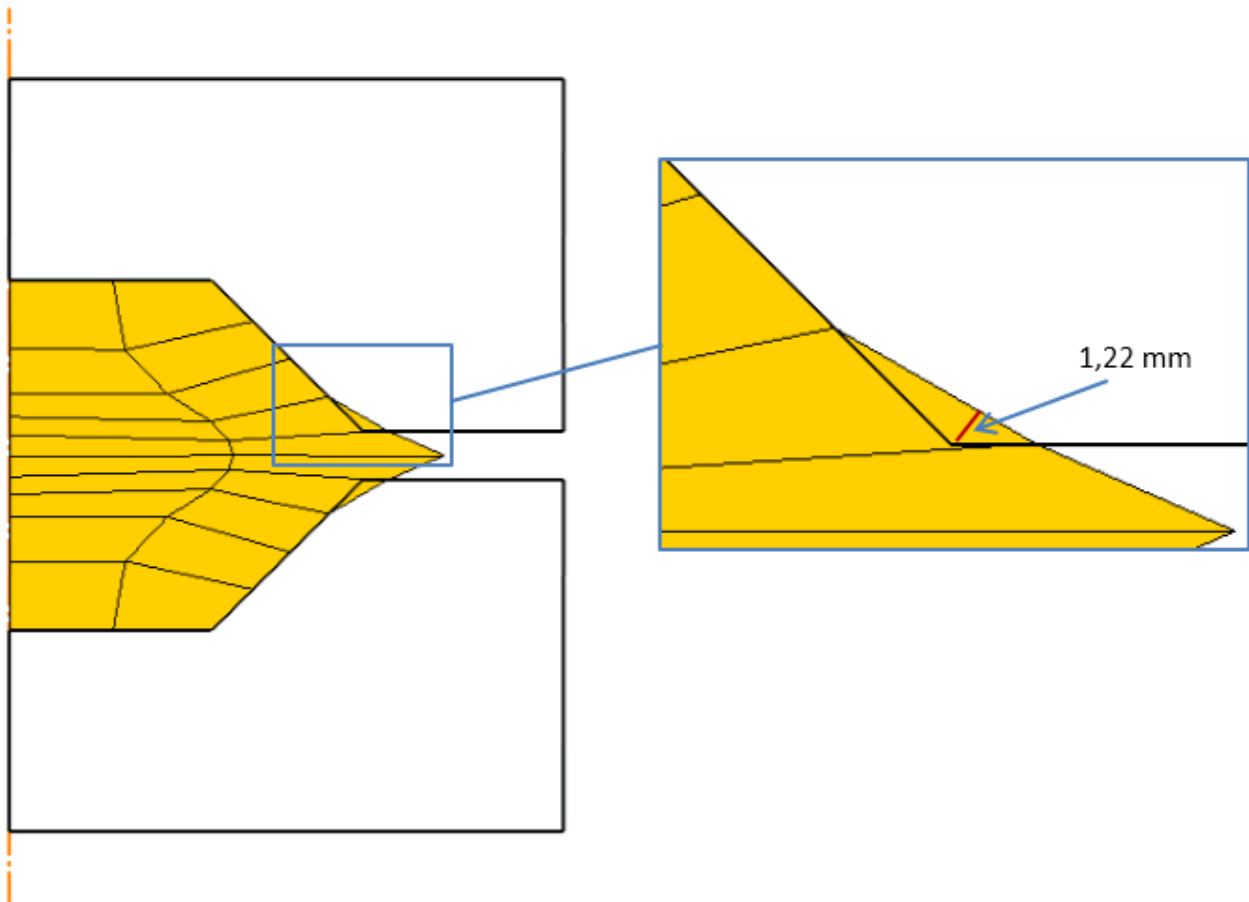


Figure 17: Representação da penetração (1,22 mm) da malha ao final da simulação (0,01 elem/mm²).

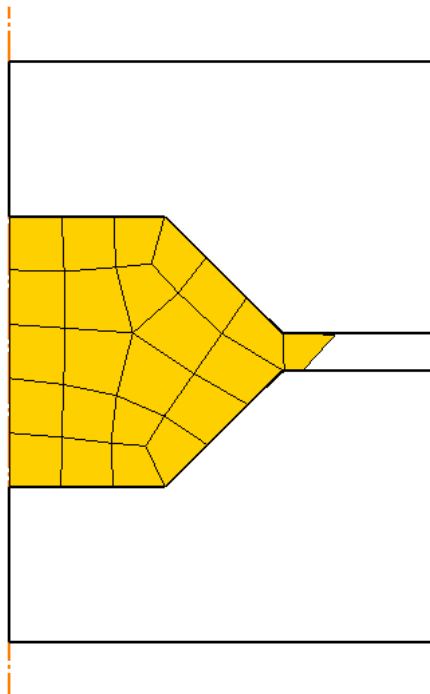


Figure 18: Geometria final remalhada (0,01 elem/mm²).

Analisando um sistema de forjamento ainda mais complexo, modelado e definido conforme a Tabela 2, obtém-se a peça apresentada na Figura 19. Contudo, não é possível realizar a simulação desta operação sem a utilização do recurso de remalhar. Observa-se na Figura 20 que os elementos em contato com uma das arestas da matriz sofrem distorções excessivas. É possível notar que o elemento em contato com a superfície da matriz

se alonga demasiadamente. Além disso, alguns nós estão bastante próximos uns dos outros. Todos esses fatores implicam em grandes incertezas nos cálculos da simulação.

Tabela 2: Configuração (MEF) para análise da distorção de elementos.

Natureza	Parâmetro	Definição
Processo	Tarugo	Plástico
	Material do tarugo	SAE 4340
	Temperatura do tarugo	1.000 °C
	Altura do tarugo	38 mm
	Diâmetro do tarugo	84 mm
	Matrizes	Rígidas
	Temperatura das matrizes	200 °C
	Velocidade da prensa	50 mm/s
	Fator de atrito	0,3
	Coef. de transferência térmica	11 kW/m ² .°C
Simulação	Geometria	Axissimétrica
	Malha	1056 elem ou 0,66 elem/mm ²
	Deslocamento da matriz por cálculo (step) de simulação	0,05 mm/step ou 0,001 s/step

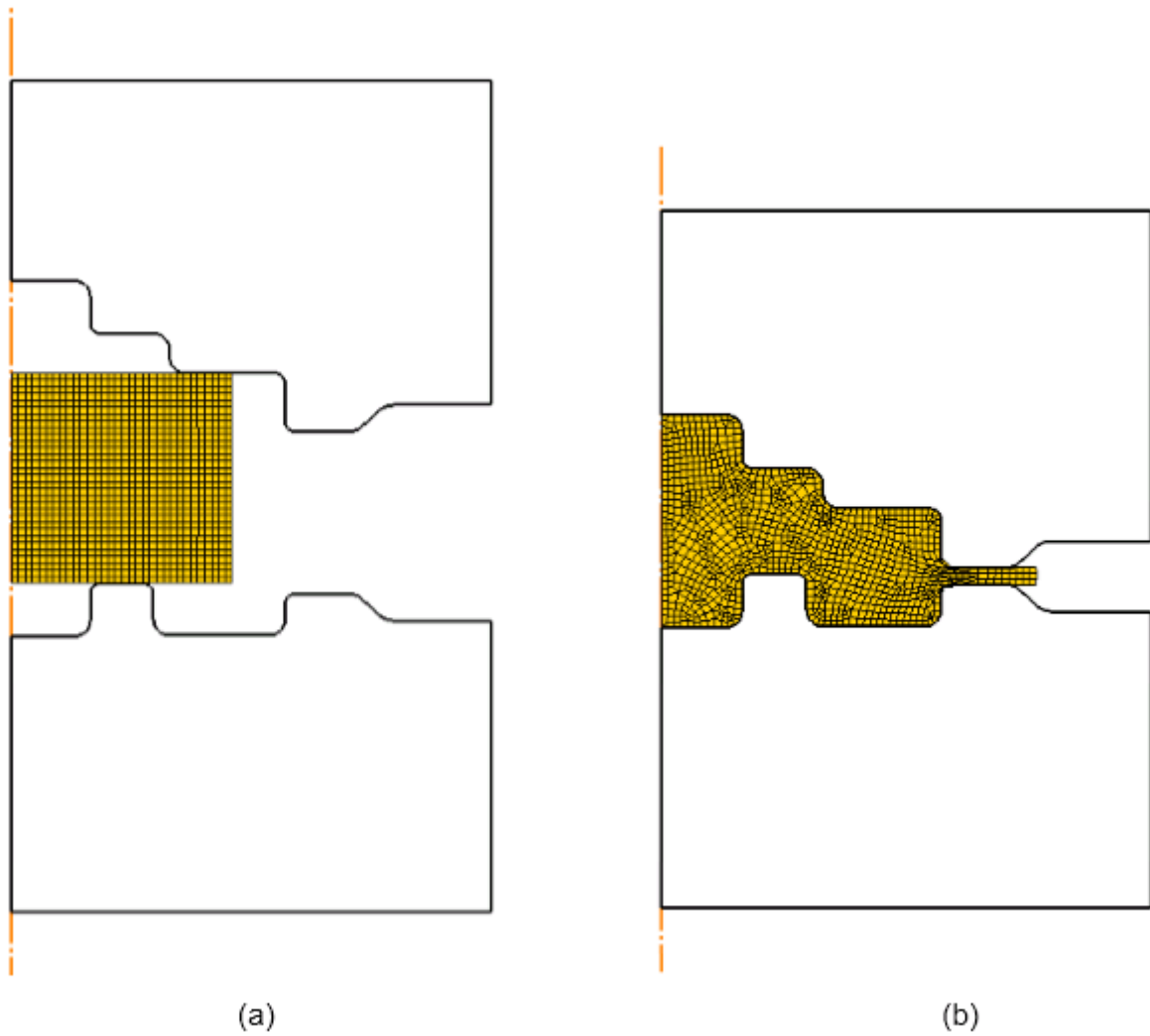


Figure 19: Simulação de um processo de forjamento (Tabela 2).

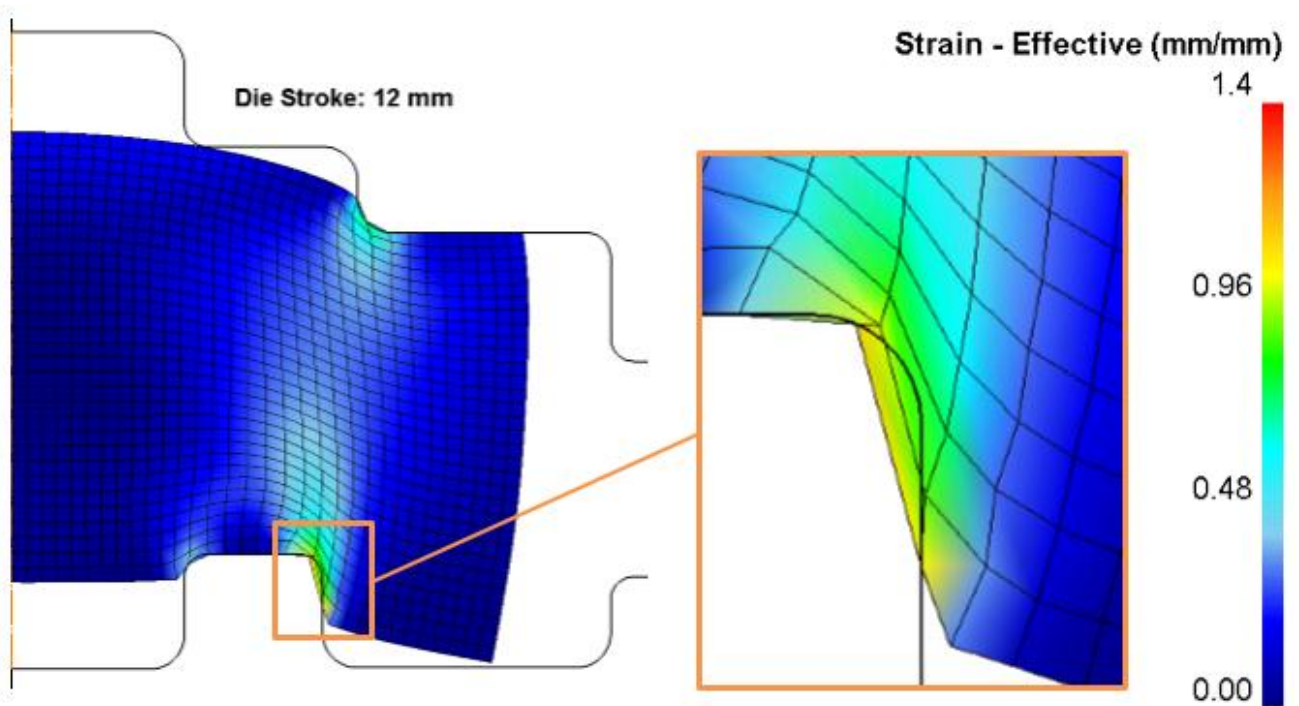


Figure 20: Malha apresentando distorção excessiva dos elementos.

Buscando minimizar incertezas nos cálculos e melhor representar a deformação e a forma final da peça de trabalho, houve remalha conforme mostrado na Figura 21. A remalha é concentrada nas regiões de maiores distorções da malha, corrigindo os valores extremados de deformação. Embora a remalha aumente a precisão nos cálculos, essa operação aumenta também o tempo de simulação. Entretanto, como demonstrado, a remalha é uma operação imprescindível para a maioria das operações de forjamento, nas quais geometrias simples são transformadas em formas complexas

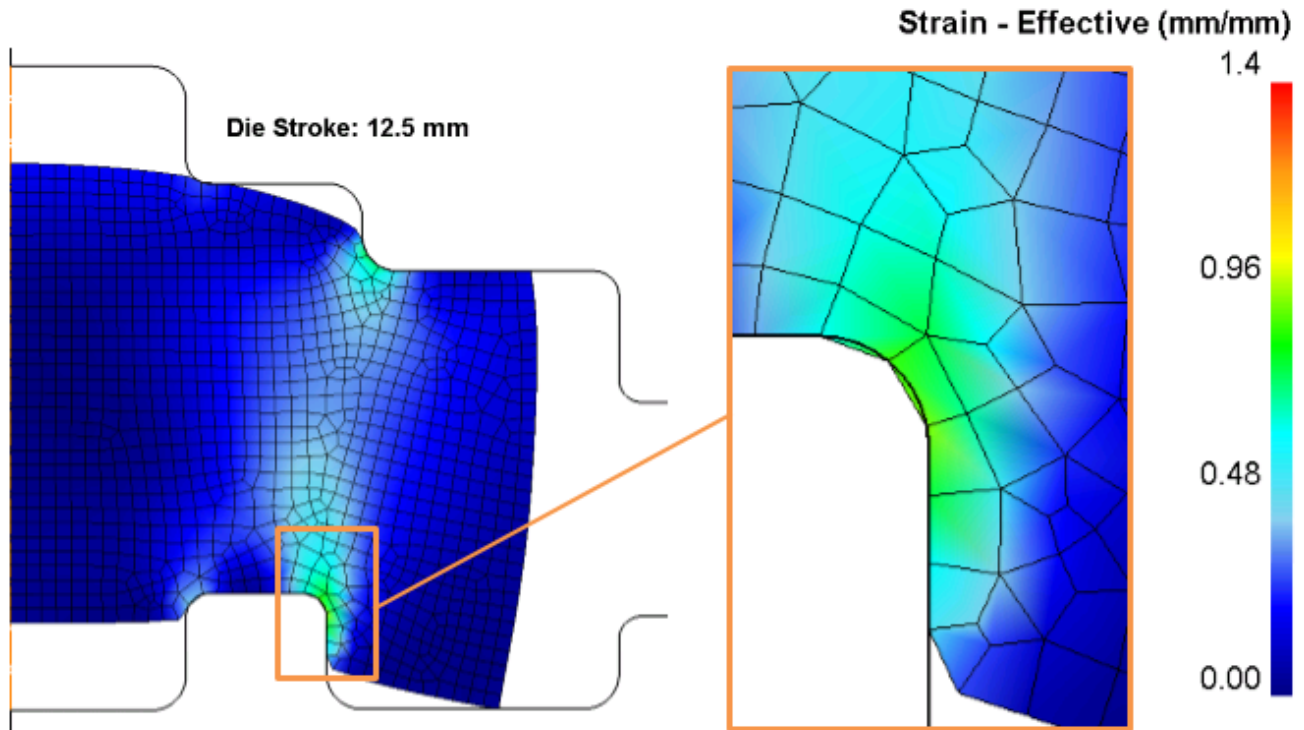


Figure 21: Remalha após a distorção excessiva dos elementos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram definidos alguns fatores computacionais de influência nos resultados previstos por modelos com base no Método dos Elementos Finitos aplicados a processos de conformação mecânica. Além disso, foram demonstradas e discutidas as influências de fatores como a densidade da malha e a remalha. Também foram quantificados o tempo computacional, com o intuito de testar a eficiência da simulação, e conduzidos testes de convergência de resultados considerando várias densidades de malha.

Trabalhos futuros podem incluir na discussão fatores como diferentes seleções de regime de comportamento do material e a variação do intervalo de tempo ("time step"). Além disso, as variações nos parâmetros de simulação podem ser estudadas de maneira combinadas com variações nos parâmetros de processo, considerando mudanças em: atrito, velocidade de processo (taxa de deformação), temperatura do tarugo, taxa de transferência térmica e forma da matriz, entre outros.

As análises conduzidas neste artigo foram todas baseadas em sistemas bidimensionais com elementos quadriláteros. Entretanto, os modelos por elementos finitos podem ser tão complexos quanto se faça necessário, podendo conduzir a tempos muito elevados para as simulações.

AGRADECIMENTOS

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