
ANÁLISE DA EFICÁCIA DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EM EXPERIMENTOS DE FORJAMENTO A FRIO DE CILINDROS DE AÇO

BRACK, Alisson ¹
BOIKO, Thays Alves ²
ABREU, Roger Luiz ³
FREITAS FILHO, Fernando Luiz ⁴

RESUMO

A conformação mecânica está presente em diversos processos de fabricação e é categorizada em várias classes, levando em consideração critérios como o tipo de esforço que causa a deformação do material, a variação na espessura da peça, o regime de operação de conformação, a temperatura de trabalho e o propósito da deformação. Com os avanços tecnológicos, tem havido uma utilização crescente de simulações virtuais para obter resultados mais rápidos e econômicos. Nesse contexto, destaca-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), que considera a região de solução do problema como um conjunto de pequenos elementos conectados entre si. Esses elementos discretos pré-definidos são usados para modelar ou aproximar-se da região em estudo. Porém, por se tratar de uma simulação existe um erro associado a aproximação, sendo o objetivo deste artigo analisar a eficácia do MEF em comparação a experimentos de forjamento a frio em cilindros de aço 10B30, através de um corpo de prova utilizado como base para execução de testes e análise de simulações por um *software* de elementos finitos. Encontrando um valor percentual de 4,34% de erro, logo, foi concluído que a temperatura da simulação deve condizer com a realidade visando manter um percentual de divergência aceitável para o desenvolvimento de novos projetos.

Palavras-chave: Conformação Mecânica, Elementos Finitos, Forjamento a Frio,

¹Graduando do Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário UNISOCIESC, brackalisson@gmail.com;

²Graduanda do Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário UNISOCIESC, ab.thays@gmail.com;

³Graduando do Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário UNISOCIESC, rogerluizdeabreu@hotmail.com;

⁴Professor orientador: Doutor, Centro Universitário UNISOCIESC, fernando.freitas@unisociesc.com.br;

1 INTRODUÇÃO

A conformação ou forjamento a frio possui grande importância na fabricação de fixadores em larga escala, principalmente no ponto de vista econômico. Se trata de um processo de deformação do material por golpes, geralmente em altas velocidades, e forças de compressão. Esses golpes são realizados por prensas mecânicas, utilizando ferramentas, como matrizes e punções que transferem forças ao material a ser conformado, forçando-o a adotar o formato desejado através de deformação plástica.

Os ensaios na conformação mecânica são cruciais no desenvolvimento de um projeto para aumentar a precisão do Método de Elementos Finitos (MEF) em relação ao modelo real. É importante lembrar que o MEF se trata de uma ferramenta de simulação e, como tal, está sujeito a limitações e incertezas, porém a margem de erro pode ser significativamente reduzida com validação experimental. Isso ajuda a ajustar e aprimorar o modelo para obter uma correspondência mais precisa entre os resultados da simulação e os resultados experimentais.

Essa precisão do MEF também pode variar dependendo do tipo de problema. Em alguns casos, como estruturas simples, a precisão pode ser alta, enquanto em problemas altamente não-lineares o erro pode ser maior. Mas, com uma modelagem cuidadosa e a validação experimental adequada é possível obter resultados precisos para processos de conformação a frio.

Propõe-se realizar o estudo desconsiderando o formato das matrizes e punções para tornar a estrutura simples e linear e melhorar a precisão na comparação dos dados obtidos por MEF e os ensaios em laboratório, utilizando um corpo de prova cilíndrico sem norma dimensional, que será usinado e modelado no *software* MEF para ser comprimido em velocidade controlada visando analisar o comportamento do material.

O objetivo é analisar a eficácia do Método de Elementos Finitos (MEF) em experimentos de forjamento a frio de cilindros de aço, obtendo um valor numérico para análise da viabilidade técnica da utilização do *software* no desenvolvimento de novos projetos. Esse resultado poderá servir de base para redução de custos ou erros, como retrabalhos excessivos, no projeto de ferramentas como matrizes e punções de conformação a frio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A análise da eficácia do método de elementos finitos no forjamento a frio de cilindros de aço é uma questão importante na engenharia de materiais e processos de fabricação. Para compreender essa análise, é fundamental inicialmente entender alguns pontos, tais como o método de elementos finitos, forjamento a frio, validação do modelo, limitações e desafios.

2.1 Método de Elementos Finitos (MEF)

A engenharia frequentemente emprega equações diferenciais parciais para descrever fenômenos físicos complexos. No entanto, a resolução analítica dessas equações em geometrias arbitrárias é quase inviável. O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma abordagem numérica que permite uma solução aproximada dessas equações. O MEF é amplamente utilizado para abordar problemas complexos, como análise de tensões, transferência de calor, fluxo de fluidos e fenômenos eletromagnéticos, por meio de simulações computacionais podendo prever o comportamento de estruturas e sistemas em diversas áreas, contribuindo para análises de projeto e desempenho (BELYTCHKO et al., 2009).

2.2 Forjamento a Frio:

O forjamento a frio é um processo de fabricação em que o metal é deformado a temperaturas abaixo de sua temperatura de recristalização, amplamente utilizado na confecção de fixadores devido ao baixo custo do processo de fabricação e a alta resistência do produto acabado, onde o material é conformado até obter as dimensões especificadas. Para um forjamento eficiente e um bom acabamento no produto final é preciso um bom desenvolvimento de projeto, além de um bom controle de qualidade seguindo as normas dimensionais especificadas para cada categoria de fixador (ANDREW Y. C. N.; TZY-CHENG et al., 2014).

2.3 Validação do Modelo:

É crucial no modelo MEF a validação experimental para saber como os fatores externos afetam o modelo desenvolvido. Isso envolve a comparação dos resultados simulados com dados experimentais, como medidas de tensões, deformações e

propriedades mecânicas, entre outras várias técnicas e métodos de comparação de resultados simulados ou soluções analíticas, essas técnicas ajudam a trabalhar com as incertezas e erros nos modelos MEF, sendo essa validação do modelo a melhor forma de prever como os erros e as incertezas impactam no resultado final (OWEN D. R. J.; EANN A. P. et al., 2014)

2.4 Limitações e Desafios:

É essencial mencionar as limitações do modelo MEF, principalmente a complexidade da modelagem, sendo um dos motivos da escolha de cilindros de aço para os experimentos, também é importante analisar a convergência numérica para garantir uma solução estável e precisa para casos não-lineares, outro ponto seria a qualidade da malha para obter resultados confiáveis e eficientes, e o custo computacional. Como o modelo MEF necessita de dados precisos de material e condições de contorno realistas, é obrigatória a análise detalhada de cada limitação e desafio para se atingir o objetivo final (CHANDRUPATLA T. R.; BELEGUNDU A. D. et al., 1997)

3 METODOLOGIA

A metodologia está dividida em três pontos principais: caracterização da pesquisa, ambiente da pesquisa e etapas da pesquisa.

3.1 Caracterização da pesquisa

A pesquisa foi desenvolvida seguindo o caminho inverso do utilizado no desenvolvimento de um projeto de conformação a frio, ou seja, inicialmente foi selecionado o material para conformar, o que será trabalhado ou usinado visando a redução de divergências entre o teste prático e modelo MEF, com esse teste prático obtemos os valores que serão aplicados na simulação, para a mesma foi feita a escolha de um *software* pouco utilizado na indústria, observado a inexistência de artigos similares a esse disponíveis. Dentro do *software* é de grande importância definir as propriedades do material selecionado como corpo de prova, pois a definição incorreta dessas propriedades gera erros, que não condizem com o objetivo do uso do MEF.

3.2 Ambiente da pesquisa

O ambiente onde a pesquisa será desenvolvida se trata de um laboratório privado, localizado na estrutura da denominada Fab4 da empresa Ciser – Araquari SC (do grupo Grupo H. Carlos Schneider), esse laboratório possui os equipamentos necessários para o desenvolvimento dos experimentos e também das simulações, o teste prático será desenvolvido em uma Máquina de tração Panambra 1000KN J09-6001, capaz de realizar ensaios de tração e compressão em velocidade variável, nesse experimento foi utilizado 50mm/min, enquanto as simulações para a análise dos resultados serão desenvolvidas no *software* Eesy-2-form (Versão em 2D), esse *software* não é muito conhecido como outros do tipo (Ansys, Ls-dyna, Pam-stamp, Deform), sendo esse um dos fatores para a escolha deste *software*, além do fato de não ser muito conhecido por seu lançamento recente e origem alemã, falamos de um programa 2D sem assimétrico, logo, ainda não encontramos artigos similares a este sendo apresentados ao público.

3.3 Etapas da pesquisa

As etapas da pesquisa tem início na definição da matéria-prima do corpo de prova, seguida pelos trabalhos realizados sobre o mesmo visando a redução de divergências entre os testes e o modelo MEF, também é importante analisar as propriedades mecânicas do corpo de prova para uma simulação mais assertiva. Após essas definições iniciamos os testes de conformação na máquina utilizando o corpo de prova definido, e com os resultados obtidos se inicia a simulação para uma posterior análise dos resultados.

3.3.1 Definição da matéria-prima do corpo de prova:

O material utilizado como corpo de prova para os testes será um cilindro (haste) de arame (fio máquina) já decapado e trefilado retirado do processo de fabricação de parafusos por forjamento a frio. As propriedades mecânicas do aço SAE 10B30 decapado e trefilado seguem conforme tabela (Figura 1).

Figura 1 – Tabela Propriedades Mecânicas de Fio Máquina

TIPO DE MATERIAL	PROPRIEDADES MECÂNICAS		
	DUREZA máx. (HRB)	TRAÇÃO máx. (Kgf/mm ²)	ESTRICCÃO mín. (%)
SAE 1006	74	49	60
SAE 1006 C/ BORO	75	49	60
SAE 1008	75	49	60
SAE 1010	75	49	60
SAE 1012	79	52	58
SAE 1015	79	52	58
SAE 1015D	80	52	55
SAE 1018	83	56	55
SAE 1020	83	56	55
SAE 1025	87	61	50
SAE 10B22	86	61	55
SAE 10B30	97	75	55
SAE 10B33	97	75	55
SAE 1038	100	80	50
SAE 1045	100	85	40
SAE 4135	107 (32 HRC)	105	45
SAE 4140	(36,6 HRC)	115	40
SAE 5135	103 (27 HRC)	98	50

Fonte: Especificação Interna CISER (2023).

A escolha do material tem ligação direta com o objetivo do artigo pois o material selecionado é atualmente utilizado na conformação a frio, e o percentual ou margem de erro que será encontrado será aplicado nos próximos desenvolvimentos de projetos ou processos de fabricação.

O material selecionado foi a liga de Aço SAE 10B30, esta é uma liga utilizada na fabricação de fixadores com grau de resistência 8 (Sistema em Polegada) ou 10.9 (Sistema Métrico) devido a suas propriedades mecânicas. Os fixadores com esse grau de resistência são amplamente utilizados na linha agrícola, para a montagem de implementos ou máquinas de grande porte, sendo essa linha uma fatia do mercado em que a Ciser tem mantido foco atualmente, o que gera uma grande demanda de projetos para esse tipo de fixadores.

3.3.2 Redução de divergências:

Para diminuir divergências entre os experimentos e o modelo MEF o dimensional do corpo de prova é crucial, por esse fato, após selecionado, o material foi faceado em um torno convencional para gerar um paralelismo entre os planos, assim podemos eliminar divergências dimensionais tendo um corpo de prova com formato simples, cilíndrico de faces planas idêntico ao que foi inserido no modelo MEF.

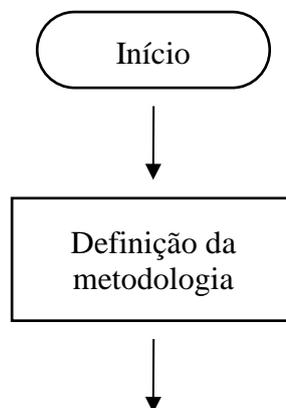
Continuando a analisar as dimensões do corpo de prova, temos um cilindro com 13,15mm de comprimento e 18,88 mm de diâmetro, o mesmo será comprimido a uma carga de 590 KN, carga suficiente para gerar uma deformação considerável no

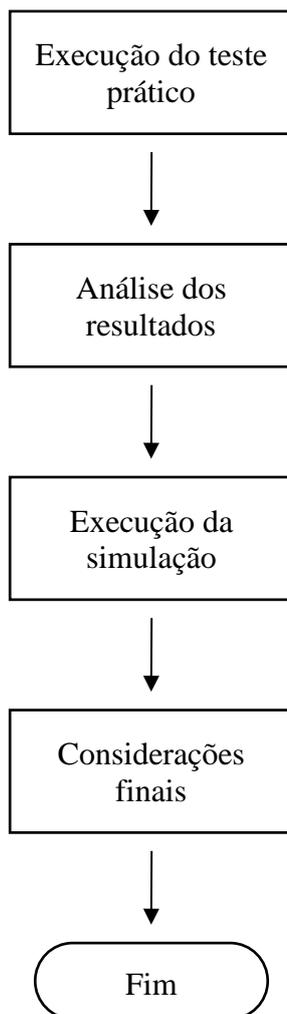
material utilizando os dados de capacidade das prensas de conformação, para então se obter as medidas finais para inserção no *software*, esse é um ponto que vale citar, pois o *software* gera um resultado em unidade de força (KN) baseado em uma variação no formato (deformação), enquanto a máquina de tração gera uma curva de deformação baseada em um força já definida. No caso, a solução foi definir uma força para ser aplicada na máquina de tração e utilizar as medidas resultantes no corpo de prova dentro do modelo MEF para comparar as forças calculadas com as reais aplicadas no ensaio.

3.3.3 Propriedades mecânicas do corpo de prova:

Dentre a composição química, essa liga geralmente é composta de 10% de níquel e 0,30% de carbono, além de outros elementos de liga como cromo, molibdênio e vanádio, dependendo da formulação específica. A liga 10B30 é conhecida por ter uma alta resistência a tração, geralmente na faixa de 1034 a 1241 MPa, sendo uma liga popular em aplicações que exigem elevada dureza, resistência ao desgaste e à abrasão, já em fixadores é geralmente utilizada com um tratamento térmico, principalmente nas classes 8 e 10.9, é importante lembrar que as características específicas da liga podem variar dependendo da formulação exata do material e das especificações do fabricante.

3.3.4 Fluxograma:





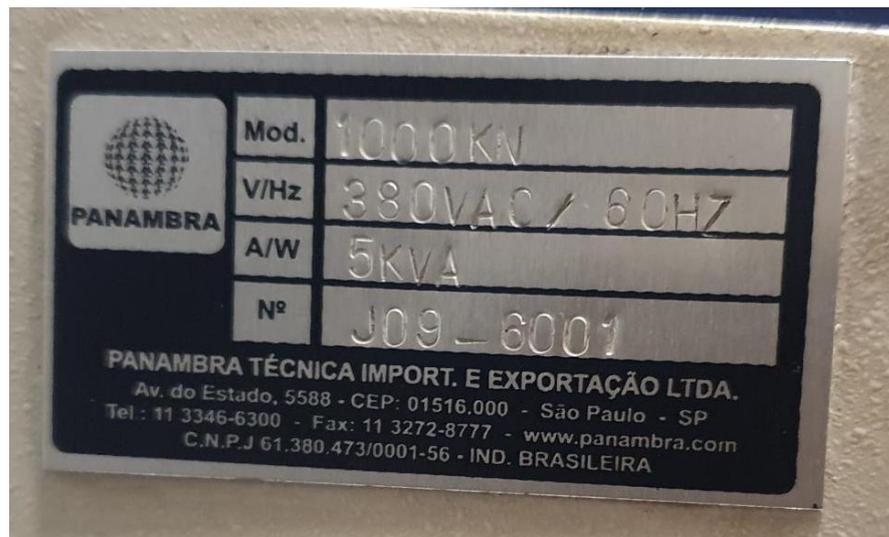
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo todos os pontos definidos e um fluxograma bem elaborado se iniciam os testes, iniciando pelo teste prático, que foi desenvolvido em uma máquina de tração utilizando o corpo de prova selecionado.

4.1 Teste prático:

Conforme já definido, a máquina utilizada para os ensaios de compressão se trata de uma Panambra 1000KN J09-6001 (Figura 2), esta máquina é capaz de realizar testes de tração, compressão, torção e flexão, sendo uma ferramenta versátil para analisar as propriedades mecânicas de diferentes materiais.

Figura 2 – Dados do equipamento utilizado



Fonte: O Autor (2023).

O corpo de prova de aço SAE 10B30 (Figura 3) sofreu a compressão na máquina de tração, durante o processo de compressão a máquina de tração coletou diversos dados os quais serão utilizados para gerar um gráfico de Carga (KN) e Deslocamento(mm).

Figura 3 – Execução do teste prático na Máquina de Tração



Fonte: O Autor (2023).

O corpo de prova após sofrer o processo de conformação, passa pela etapa de medição (Figura 4), onde as medidas obtidas pela máquina de tração serão inseridas no *software* Eesy-2-form para a execução das simulações e comparação dos resultados.

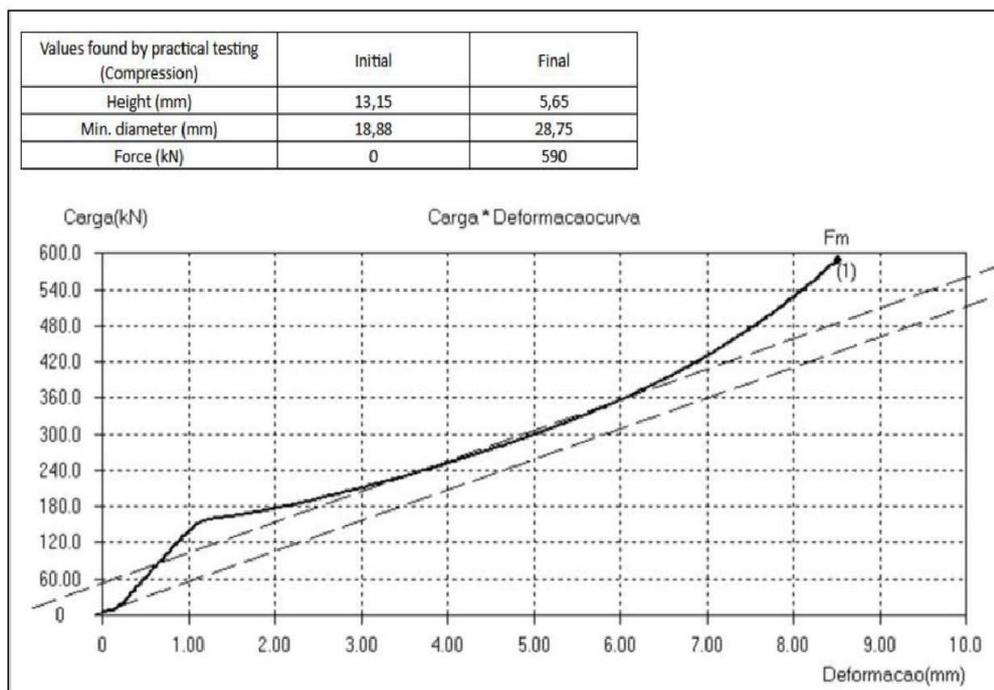
Figura 4 – Corpo de prova após teste prático



Fonte: O Autor (2023).

Inicialmente no teste prático de prensa obtivemos esta curva entre Carga (KN) e Deslocamento (mm), a carga máxima aplicada (Force) foi de 590 KN e a gráfico gerado apresenta linhas de tendência conforme Figura 5.

Figura 5 – Gráfico gerado pelo equipamento durante o teste prático



Fonte: Máquina de tração Panambra 1000KN J09-6001 (2023).

4.2 Análise dos resultados:

Podemos notar uma carga maior no início da deslocamento, o que está ligado às propriedades mecânicas complexas do aço, como:

Comportamento elástico e plástico: Em baixos níveis de tensão, o aço exibe um comportamento elástico (Lei de Hooke), isso significa que ele retorna à sua forma original quando a carga é removida. No entanto, à medida que a carga aumenta o aço começa a se deformar plasticamente, resultando em deformações permanentes, o que não é mais linear. Podemos ver esse fator agindo logo no início da deslocamento do material, até 2 milímetros de deslocamento.

Encruamento: Conforme a tensão aumenta, o aço pode endurecer, tornando-se mais resistente à deslocamento, o que leva a uma relação não linear entre carga e deslocamento. Podemos ver esse fator agindo após 3 milímetros de deslocamento quando a carga começa a aumentar na forma de curva no gráfico. Essa curva também tem relação com o aumento do diâmetro do corpo de prova, pois isso aumenta a área a ser comprimida ($\text{Tensão (N/m}^2\text{)} = \text{Força (N)}/\text{Área(m}^2\text{)}$).

Valores obtidos na deslocamento do corpo de prova:

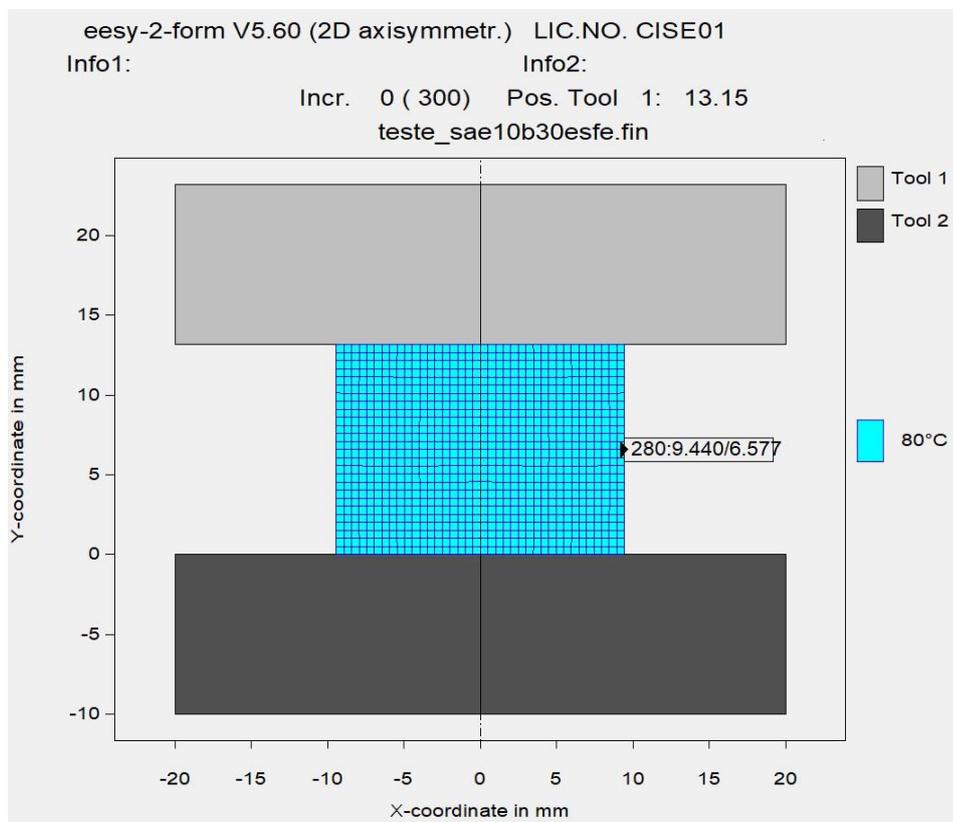
Medida Inicial: 13,15 mm de comprimento e 18,88 mm de diâmetro

Medida final: 5,65 mm de comprimento e 28,75 mm de diâmetro

Força: até 590 KN

4.3 Execução da simulação:

Aqui inicialmente foram desenvolvidas duas simulações, considerando que o corpo de prova atingirá uma temperatura de aproximadamente 80°C durante o processo de conformação a frio em máquina devido ao atrito e deformação, pois a velocidade de conformação da prensa da linha de produção é maior que o ensaio na máquina de tração, ambas simulações foram desenvolvidas para comparar o comportamento do aço e a habilidade do *software* em trabalhar com uma variação de temperatura que o corre no processo de fabricação de fixadores utilizando o aço 10B30. O processo de simulação se inicia inserindo os dados obtidos do corpo de prova no *software* (Figura 6), o *software* utiliza as dimensões e propriedades do corpo de prova para gerar os resultados, incluindo a temperatura em que o corpo de prova se encontra.

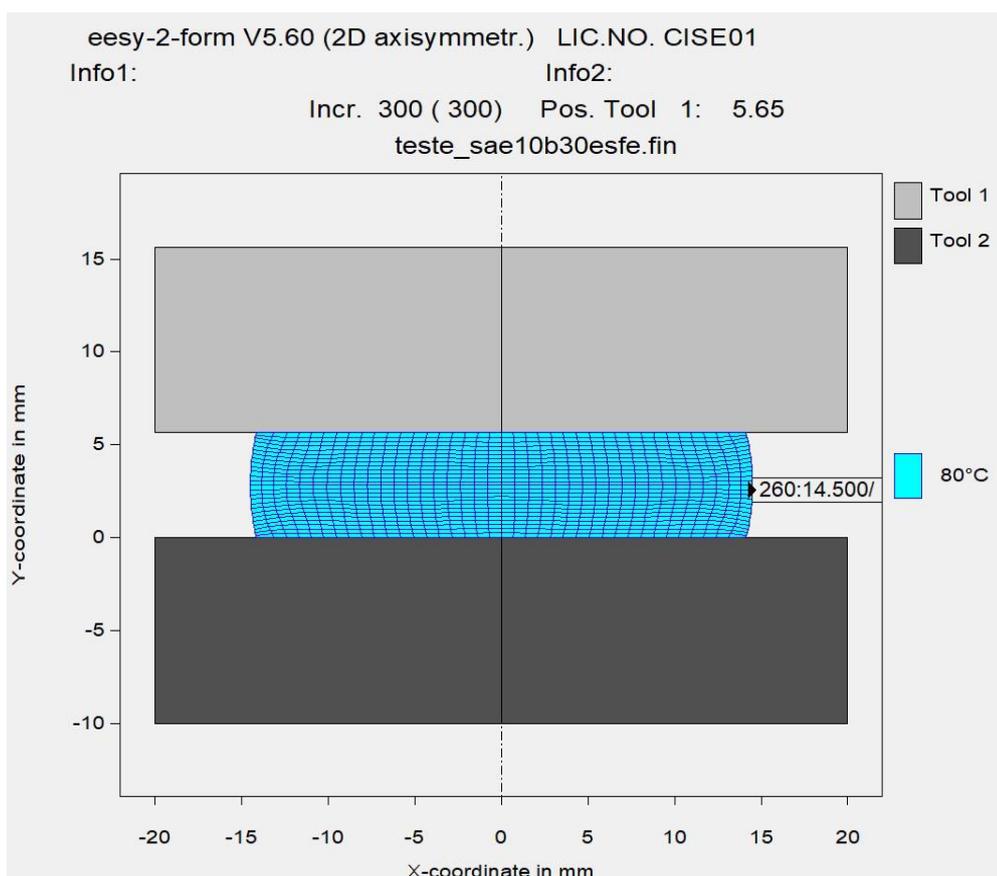
Figura 6 – Simulação do corpo de prova antes da execução

Fonte: Eesy-2-form (2023)

Podemos ver também a deslocamento da malha utilizada no *software* após a execução (Figura 7), sendo esta fase onde o *software*

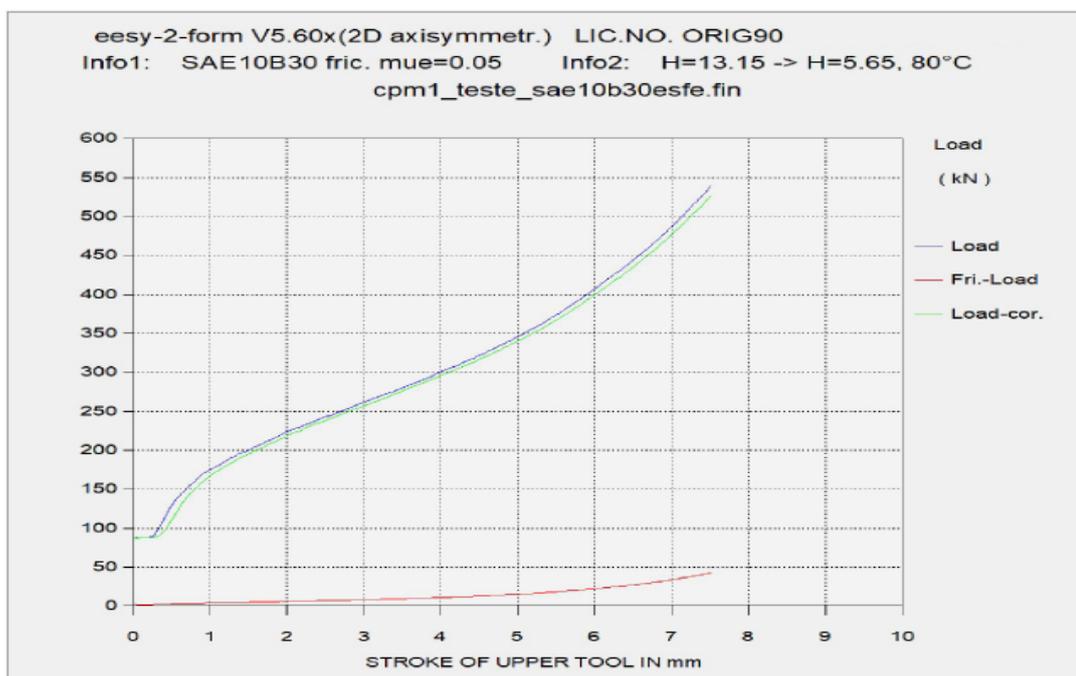
calcula a força necessária para conformar o material até atingir as mesmas dimensões do corpo de prova (Figura 3), e gerar os gráfico de Carga (KN) e Deslocamento (mm) (Figura 5).

Figura 7 – Simulação do corpo de prova após execução



Fonte: Eesy-2-form (2023)

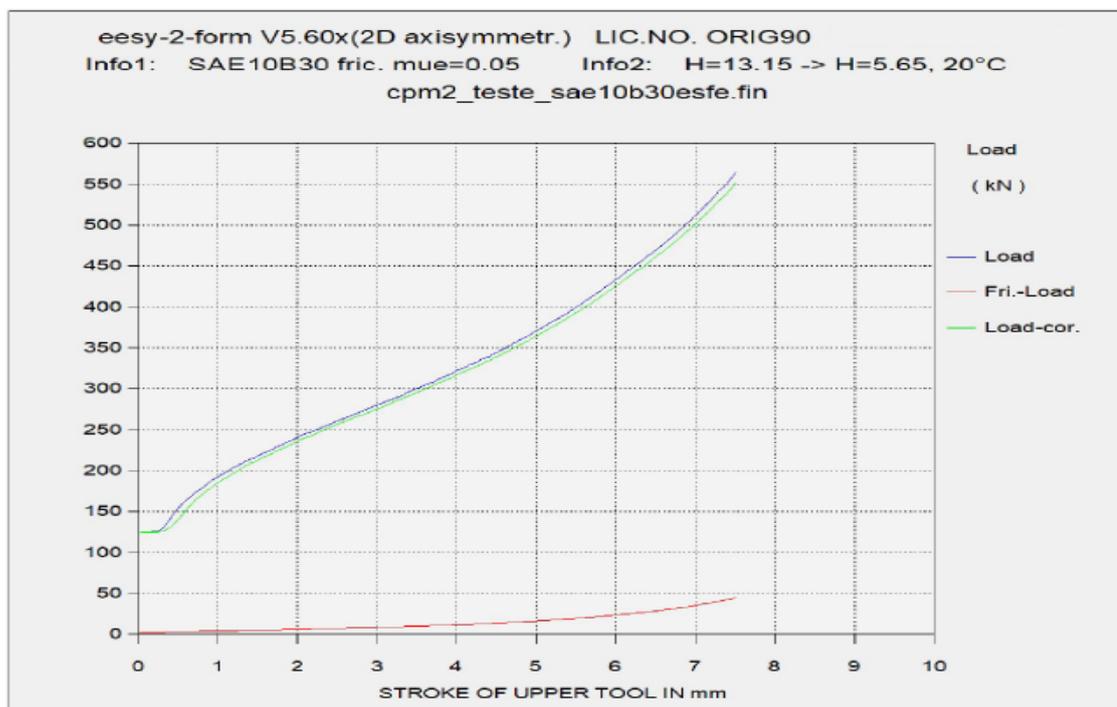
Também temos o gráfico gerado pelo *software* Eesy-2-form (Figura 8), considerando a variação dimensional, as propriedades mecânicas do corpo de prova e a temperatura (80 C°), onde a carga máxima necessária calculada pela simulação para atingir as mesmas dimensões do corpo de prova gerado pelo ensaio (Figura 3) foi de 539,4KN, podemos ver linhas de Carga, Atrito, e Carga Total no gráfico gerado pelo *software* (Figura 8).

Figura 8 – Gráfico gerado pelo software durante simulação (80C°)

Fonte: Eesy-2-form (2023)

Quando executamos a simulação alterando apenas a temperatura para 20 C°, e mantendo os demais valores obtemos outra curva de Carga (KN) e Deslocamento (mm) (Figura 9), com uma carga máxima um pouco maior do que a simulação anterior, de 564,4 KN (Figura 8).

Figura 9 – Gráfico gerado pelo *software* durante simulação (20°C)



Fonte: Eesy-2-form (2023)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A primeira interpretação que temos é de curvas muito próximas, tanto para o modelo MEF quanto para os experimentos, porém a carga sofreu alteração devido a mudança de temperatura no modelo MEF, isso pode ser visto comparando atentamente os gráficos gerados pelo Eesy-2-form ou comparando os resultados de carga máxima gerados pelo teste prático e as simulações. Sendo visível nos gráficos gerados na simulação (Figura 8 e 9), que o fator de comportamento elástico e plástico e o fator de endurecimento foi considerado pelo *software*, logo, esse modelo MEF selecionado considera os pontos mais importantes em uma análise de forjamento a frio.

Os resultados de carga máxima obtidos foram:

590 KN no ensaio em temperatura estável à aproximadamente 20 C°

564,4 KN na simulação à 20 C°

539,4 KN na simulação à 80 C°

O que gera uma margem de erro de 4,34% considerando 20 °C como temperatura ambiente.

Formulando: $100 - [(Simulação/Te\text{ste prático)} * 100]$

Isso pode ser considerado uma divergência pequena, válida para o desenvolvimento de ferramentas, desde que se atente a temperatura de trabalho, calculando uma divergência de 8,58% com uma pequena alteração na temperatura do modelo MEF(80C°), uma próxima análise da eficácia do método de elementos finitos pode ser desenvolvida com o corpo de prova a 80°C para analisar se a margem de erro se mantém próxima a 4%, pois considerando que ferramentas de conformação a frio sofrem grandes variações de temperatura durante o processo de fabricação, se as temperaturas de trabalho da ferramenta ou material não forem corretamente dimensionadas nas simulações, as mesmas se tornam ineficazes.

Podemos com isso concluir que o *software* pode ser utilizado com eficácia no desenvolvimento de novos produtos, com uma margem de erro de 4,34%, dentro dos 6% considerado aceitável para um novo projeto, desde que as especificações técnicas do material sejam corretamente inseridas no modelo MEF e que a temperatura de trabalho do projeto seja corretamente dimensionada para evitar a divergência que vimos acima.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Cia H. Carlos Schneider por permitir a utilização do Eesy-2-form de forma gratuita.

Agradecimentos à Cia H. Carlos Schneider por permitir a utilização da máquina de tração Panambra 1000KN J09-6001.

REFERÊNCIAS

ANDREW, Y. C. Nee. Manual de Engenharia e Tecnologia de Manufatura. 1.ed. Londres, UK: Springer London, 2014.

BELYTSCHKO, The Fish, J. (2007), A First Course in Finite Elements. 1.ed. John Wiley e Sons, 2007.

DUARTE, Alisson. Forjamento e Extrusão: Casos Usando Simulação Computacional. 1.ed. Belo Horizonte, MG: Sispro, 2022.

OWEN, David R. J. Validação Computacional De Modelos Mecânicos. 1.ed. Campinas, SP: SAI Global, 2014.

PÁDUA, E. M. M. de. Metodologia científica: abordagem teórico-prática. 1. ed. ver. atual. Campinas, SP: Papyrus, 2004.

CHANDRUPATLA, Tirupathi R. Introduction To Finite Elements In Engineering. 4. ed. Nova Jersey, EUA: Prentice Hall 2011.