

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

AIRTON JOÃO GOMES DELGADO

SIMULAÇÃO NÃO LINEAR POR ELEMENTOS FINITOS NO ANSYS COM
VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL APLICADO A INSERTOS DO PROCESSO DE
FORJAMENTO.

Joinville

2025

AIRTON JOÃO GOMES DELGADO

SIMULAÇÃO NÃO LINEAR POR ELEMENTOS FINITOS NO ANSYS COM
VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL APLICADO A INSERTOS DO PROCESSO DE
FORJAMENTO.

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Naval, do Centro Tecnológico
de Joinville, da Universidade Federal de
Santa Catarina.

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2025

AIRTON JOÃO GOMES DELGADO

SIMULAÇÃO NÃO LINEAR POR ELEMENTOS FINITOS NO ANSYS COM
VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL APLICADO A INSERTOS DO PROCESSO DE
FORJAMENTO.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 30 de junho de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi
Orientador/Presidente

Prof. Dr. Carlos Maurício Sacchelli
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Vitor Takashi Endo
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Delgado, Airton João Gomes

Simulação não linear por elementos finitos no ansys com validação experimental aplicado a insertos do processo de forjamento / Airton João Gomes Delgado ; orientador, Thiago Pontin Tancredi, 2025.

48 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Simulação por elementos finitos, Ls-Dyna/Ansys, Insertos, Validação experimental. I. Tancredi, Thiago Pontin. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Naval. III. Título.

Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte de toda a minha força. Foi pela Sua graça que fui capacitado não apenas a realizar grandes conquistas, mas a superar cada desafio que surgiu no caminho.

Para meus pais, Maria e João, os pilares da minha vida e meus maiores exemplos de força e amor. Vocês nunca mediram esforços para me ver feliz e realizado, seja com palavras sábias, um apoio que nunca vacila, ou a paciência infinita para minhas convicções. Agradeço por terem me mostrado, com suas próprias vidas, que o trabalho árduo e a dedicação são o caminho para colher os melhores frutos.

Aos meus irmãos, Cleivan e Eduardo, meus companheiros de todas as horas. Vocês estiveram ao meu lado não apenas com apoio, mas com uma parceria verdadeira, tornando os dias mais leves com nosso riso compartilhado e minha jornada mais segura com sua presença constante.

Aos amigos que a graduação me deu Gabriel, Kemelly, Pedro e Elton, meus companheiros de jornada desde o início. Com vocês, a Universidade ganhou um novo significado, tornando-se o palco de memórias inesquecíveis que levo para a vida. Foi na cumplicidade das ajudas mútuas, nas conversas profundas, nas noites descontraídas e no som constante das risadas que construímos uma história singular. Meu obrigado por transformarem esses anos em uma experiência tão genuinamente especial.

Para meus amigos do 'mundo real', aqueles que eu encontrava depois das aulas, em especial Elizane, Ândrea, Miguel, Victor, Wallace e Joice. Vocês foram essenciais nessa jornada, mesmo sem abrir um livro comigo. Obrigado por toda a paciência, por ouvir meus desabafos, por distrair minha mente e, principalmente, por me lembrarem quem eu era além de 'estudante'. Esta vitória também é nossa!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi, a quem devo meu profundo agradecimento por ter me concedido a valiosa oportunidade de apresentar meu trabalho no LaSiN/NSO. Sua sábia orientação e seus ensinamentos inspiradores foram fundamentais para a minha trajetória acadêmica, consolidando-se como uma influência decisiva em minha formação.

Meu sincero agradecimento a cada professor que marcou minha trajetória universitária. Suas influências ultrapassaram as barreiras das salas de aula e dos conteúdos programáticos, contribuindo de forma decisiva para a minha formação

integral. Seja pelo exemplo de dedicação, pela paciência em sanar dúvidas ou pelos debates que ampliaram meus horizontes, vocês me ensinaram lições que levo para a vida toda.

Meu agradecimento especial a todo o pessoal do LaSiN/NSO. Mais do que um laboratório, vocês transformaram esse espaço em um ambiente acolhedor e propício para o desenvolvimento científico. Obrigado pela paciência, pela disponibilidade em ajudar e por cada suporte, grande ou pequeno, que fez toda a diferença na minha jornada.

À equipe Holandês Voador, que vai muito além de um grupo de competição - é uma família. Agradeço por cada noite em claro, por cada ideia debatida com fervor, por cada obstáculo que transformamos em degrau. O sucesso que alcançamos não é de um, mas de todos que acreditaram no projeto. Foi um privilégio ser parte desta equipe.

E por fim agradeço à Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (Fundep) pela bola de pesquisa, por meio do Programa Mover, Linha IV (27194*37), referente ao projeto "Matrizes de Forjamento de Alto Desempenho".

RESUMO

O forjamento é amplamente utilizado em setores como indústria automotiva, aeroespacial e de bens de consumo, sendo essencial para a produção de peças com alta resistência mecânica e durabilidade. No entanto, o processo impõe cargas elevadas no inserto, gerando tensões que podem comprometer sua integridade ao longo do tempo. Como resultado, muitas empresas enfrentam altos custos associados à falha do inserto e ao desgaste prematuro, além de uma incerteza significativa em relação à sua vida útil por fadiga. Com o avanço e o desenvolvimento de novas ferramentas computacionais, como o Método dos Elementos Finitos, tornou-se possível simular e analisar esses processos em detalhes. Nesse contexto, o principal objetivo deste trabalho é analisar a distribuição de tensões no inserto utilizado no processo de forjamento, por meio de uma simulação não linear utilizando o método dos elementos finitos no software ANSYS Workbench, utilizando o ambiente LS-DYNA, e posteriormente realizar a validação experimental. Os resultados obtidos fornecem dados importantes para possíveis ajustes tanto no processo quanto no projeto de novos insertos, com o objetivo de melhorar a eficiência do processo de forjamento e aumentar a vida útil do inserto. Para validar os resultados numéricos, foram realizados experimentos práticos em uma prensa, comparando os dados obtidos com os da simulação. A validação numérico-experimental apresentou excelente concordância, com erros inferiores a 4%, atestando a robustez do modelo e a adequação dos parâmetros adotados.

Palavras-chave: forjamento; não linear; elementos finitos; simulação; inserto.

ABSTRACT

Forging is widely used in sectors such as the automotive, aerospace, and consumer goods industries, being essential for producing parts with high mechanical strength and durability. However, the process imposes high loads on the insert, generating stresses that can compromise its integrity over time. As a result, many companies face high costs associated with insert failure and premature wear, along with significant uncertainty regarding its fatigue life. With the advancement and development of new computational tools, such as the Finite Element Method, it has become possible to simulate and analyze these processes in detail. In this context, the main objective of this work is to analyze the stress distribution in the insert used in the forging process, through a non-linear simulation using the finite element method in ANSYS Workbench software, utilizing the LS-DYNA environment, and subsequently perform experimental validation. The results provide important data for potential adjustments in both the process and the design of new inserts, with the goal of improving the efficiency of the forging process and increasing the insert's service life. To validate the numerical results, practical experiments were conducted on a press, comparing the obtained data with the simulation results. The numerical-experimental validation showed excellent agreement, with errors below 4%, attesting to the robustness of the model and the suitability of the adopted parameters.

Keywords: forging; non-linear; finite elements; simulation; insert.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos dos insertos com diferentes diâmetros.	15
Figura 2 – Conceito básico do Método de Elementos Finitos (MEF).....	20
Figura 3 – Geometria identificando cada componente.	27
Figura 4 – Malha gerada no inserto.....	29
Figura 5 – Contacto "Bonded" aplicado na interface dos suportes superior e inferior.	30
Figura 6 – Posição inicial da simulação.	31
Figura 7 – Sequência de deslocamentos prescritos ao longo do tempo (24 mm).	32
Figura 8 – Sequência de deslocamentos prescritos ao longo do tempo (32 mm).	32
Figura 9 – Prensa hidráulica modelo PHH-40T do tipo H.....	33
Figura 10 – Sistema de Aquisição de Dados LYNX ADS 2002.	34
Figura 11 – Extensômetros posicionado no inserto.....	35
Figura 12 – Inserto posicionado na prensa.	36
Figura 13 – Resultados das tensões na simulação de impacto do inserto de 24 mm.	38
Figura 14 – Resultados das tensões na simulação de impacto do inserto de 32 mm.	39
Figura 15 – Tensões Principais experimental (24 mm).	40
Figura 16 – Tensões Principais experimental (32 mm).	41
Figura 17 – Tensão equivalente de von Mises (24 mm).....	42
Figura 18 – Tensão equivalente de von Mises (32 mm).....	43
Figura 19 – Tensão Equivalente na região de instrumentação (24 mm).	44
Figura 20 – Tensão Equivalente na região de instrumentação (32 mm).	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do aço H13 em temperatura ambiente.....	28
Tabela 2 – Resultados do estudo de convergência de malha.....	29
Tabela 3 – Comparação entre os valores de tensão equivalentes de von Mises.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFL – Courant-Friedrichs-Lewy

DIC – Correlação de Imagem Digital

LSTC – Lawrence Livermore National Laboratory

MEF – Método dos Elementos Finitos

LISTA DE SÍMBOLOS

A_i	Área da seção transversal de cada seção
δ	Deformação axial
E	Módulo de elasticidade
F	Força axial
L_i	Comprimento de cada seção específica do componente
σ_{\max}	Tensão principal máxima
σ_{\min}	Tensão principal mínima
ε_a	Deformação no extensômetro à 0°
ε_b	Deformação no extensômetro à 45°
ε_c	Deformação no extensômetro à 90°
σ_{vM}	Tensão equivalente de von Mises
ν_p	Coeficiente de Poisson

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. FUNDAMENTOS DE FORJAMENTO E A APLICAÇÃO DE INSERTOS	18
2.2. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	19
2.1.1. ANSYS Mechanical e LS-DYNA	21
2.1.2. Geometria e Geração de Malha	22
2.1.3. Definição do Material	23
2.1.4. Carregamento e Condições de Contorno	24
2.1.5. Análise dos Resultados	24
3. METODOLOGIA	26
3.1. METODOLOGIA NUMÉRICA	26
3.1.1. Modelagem geométrica	27
3.1.2. Propriedades do Aço Ferramental H13	27
3.1.3. Definição da Malha e Estudo de Convergência	28
3.1.4. Condições de Contorno	29
3.2. METODOLOGIA NUMÉRICA	33
3.2.1. Prensa Hidráulica	33
3.2.2. Aquisição dos Dados	34
4. RESULTADOS E DISCUÇÕES	38
4.1. RESULTADOS NUMÉRICOS	38
4.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	40
5. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	42
6. CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

O forjamento é uma das técnicas de fabricação mais antigas da humanidade, remontando a civilizações que utilizavam martelos para moldar metais em ferramentas, armas e objetos decorativos. Com o avanço da metalurgia e da tecnologia, o forjamento evoluiu significativamente, especialmente durante a Revolução Industrial, quando processos mais precisos e mecanizados foram desenvolvidos. Hoje, o forjamento é amplamente utilizado em setores como a indústria automotiva, aeroespacial e de bens de consumo, sendo essencial para a produção de peças com alta resistência mecânica e durabilidade.

O forjamento, conforme Altan e Lilly (1983), é um processo fundamental na manufatura, destacando-se por produzir peças com excelentes propriedades mecânicas, com alta resistência à fadiga, impacto e fratura, devido ao alinhamento do grão na direção do fluxo de deformação. Sua importância é inegável na fabricação de componentes críticos para os setores automotivo, aeroespacial e de energia, onde alto desempenho e confiabilidade são cruciais. Além disso, o forjamento possibilita a produção de peças complexas com alta precisão, menor desperdício de material e maior eficiência de produção, consolidando-o como um processo estratégico para a competitividade industrial e a durabilidade do produto.

Segundo Doege e Behrens (2010), a durabilidade e a confiabilidade das ferramentas utilizadas no processo de forjamento estão diretamente relacionadas com a competitividade das empresas do setor, uma vez que falhas não planejadas resultam em paradas imprevistas de produção, perdas de produtividade, incremento nos custos com retrabalho e possível descarte de peças semi fabricadas. Em um cenário globalizado, com margens de lucro cada vez mais reduzidas, tal imprevisibilidade operacional pode definir a sustentabilidade de uma empresa.

Adicionalmente, a tendência atual de forjamento de materiais estruturalmente mais exigentes como ligas de titânio e aços avançados e de geometrias mais complexas, impulsionada pela busca de redução de peso nos setores automotivo e aeroespacial, amplifica consideravelmente esses desafios, exigindo ferramentas ainda mais resistentes e processos ainda mais controlados.

O estudo dos insertos no forjamento é crucial, pois essas peças são submetidas às mais elevadas tensões mecânicas, térmicas e de desgaste durante o processo. Na Figura 1 está representado o exemplo de alguns modelos de insertos aplicado nesse trabalho. Um inserto bem projetado é essencial para prolongar a vida útil da ferramenta, reduzir custos de manutenção, prevenir falhas (como trincas e desgaste) e garantir a qualidade dimensional e estrutural da peça forjada, conforme Altan *et al.* (2005). Por isso, a utilização de simulações por elementos finitos torna-se indispensável para identificar regiões críticas e analisar o desempenho do inserto no processo.

Figura 1 – Exemplos dos insertos com diferentes diâmetros.



Fonte: Autor (2025).

De acordo com Altan e Lilly (1983), a simulação numérica é uma ferramenta essencial em processos de conformação, como o forjamento, pois permite a previsão de tensões, deformações, fluxo de material e falhas potenciais, resultando na redução de custos e tempo gastos em testes físicos. No entanto, os autores enfatizam que a precisão dos modelos depende diretamente da qualidade dos dados de entrada, como propriedades do material, condições de contorno e parâmetros de contato. Assim sendo, a validação experimental é indispensável para garantir que o modelo represente com precisão o comportamento real do processo, tornando a combinação de simulação e experimentação fundamental para assegurar processos mais eficientes e seguros.

Apesar da existência de ferramentas avançadas para simulação de forjamento, seus elevados custos e a complexidade operacional representam um obstáculo significativo para empresas de menor porte. Esse cenário exige não só um

investimento considerável, mas também expertise técnica avançada, o que restringe a capacidade dessas empresas de conduzir análises mais aprofundadas.

Neste cenário o principal objetivo deste trabalho é analisar o comportamento mecânico de uma ferramenta de forjamento por meio de simulação numérica, utilizando o software LS-DYNA via ANSYS. O estudo visa a avaliar os estados de tensão, deformações e potenciais falhas durante o processo de conformação. Além disso, a pesquisa busca comparar os resultados da simulação com dados experimentais para validar o modelo numérico empregado. Com base nessa comparação, a intenção é verificar a precisão da modelagem, identificar possíveis discrepâncias e propor melhorias nos parâmetros de simulação.

1.1. OBJETIVOS

Para resolver a problemática da complexidade na previsão do comportamento mecânico e da durabilidade de insertos de forjamento, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar o comportamento mecânico de insertos utilizados no processo de forjamento por meio da simulação não linear por elementos finitos no ANSYS, validando os resultados obtidos com dados experimentais.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Modelar geometricamente os insertos utilizando o software ANSYS;
- Gerar e refinar a malha de elementos finitos para o modelo do inserto;
- Definir e aplicar as propriedades mecânicas do material do inserto e as condições de contorno adequadas para a simulação não linear por elementos finitos;
- Realizar a simulação numérica do processo de forjamento no LS-DYNA via ANSYS, focando na análise dos estados de tensão e deformação;
- Executar ensaios experimentais relevantes para obter dados que permitam a validação do modelo numérico, como medições de deformação;
- Comparar os resultados obtidos na simulação com os dados experimentais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentados os principais fundamentos teóricos que embasam o desenvolvimento deste trabalho. Ao longo do texto, serão descritas as hipóteses e os conceitos aplicados à simulação não linear por elementos finitos, com foco na análise do comportamento de insertos utilizados no processo de forjamento, e o software ANSYS/LS-DYNA. Por fim, serão discutidos os fundamentos da validação experimental, essencial para a precisão e o aprimoramento dos resultados.

2.1. FUNDAMENTOS DE FORJAMENTO E A APLICAÇÃO DE INSERTOS

O forjamento constitui um processo de conformação mecânica que utiliza forças de compressão aplicadas através de ferramentas especiais para conformar plasticamente metais e ligas metálicas em formatos específicos.

Segundo Altan *et al.* (2005), este processo pode ser classificado em duas categorias principais: forjamento a quente, realizado acima da temperatura de recristalização do material, e forjamento a frio, executado em condições ambiente, cada um conferindo características distintas às peças produzidas. O forjamento em matriz fechada destaca-se por permitir a produção de componentes complexos com alto rendimento dimensional, sendo amplamente utilizado nas indústrias automotiva, aeroespacial e de equipamentos pesados, onde se exigem elevadas propriedades mecânicas e integridade estrutural.

A aplicação de insertos no forjamento representa uma solução tecnológica avançada para melhorar o sistema de ferramentas. De acordo com Lange (1985), os insertos consistem em elementos modulares fabricados com materiais especiais que são acoplados à matriz principal, permitindo o uso estratégico de aços de alta liga apenas nas regiões críticas sujeitas a maior desgaste. Esta abordagem proporciona significativa economia de custos, pois evita a fabricação da matriz inteiramente em materiais de alto valor, além de facilitar operações de manutenção e reposição quando ocorre desgaste ou falha em seções específicas da cavidade de forjamento.

Conforme estabelecido por Ngaile e Shan (2009), os aços para trabalho a quente, como as séries H11, H13 e H21, são preferencialmente utilizados devido à sua combinação de resistência ao desgaste, tenacidade à fratura e estabilidade

térmica sob ciclos repetitivos de aquecimento e resfriamento. O tratamento térmico apropriado desses materiais é crucial para atingir propriedades mecânicas que suportem as severas condições de operação, incluindo cargas de impacto, abrasão e gradientes térmicos que podem variar entre 200°C e 600°C na superfície do inserto durante o processo.

Segundo Behrens *et al.* (2014), a concepção adequada deve garantir precisão dimensional, resistência estrutural sob cargas operacionais e eficiência na transferência de calor. A interface entre o inserto e a matriz principal merece atenção especial, pois folgas excessivas podem comprometer a precisão dimensional da peça forjada e induzir concentrações de tensão que levam à falha prematura por fadiga térmica ou mecânica.

As vantagens da utilização de insertos estendem-se significativamente aos aspectos operacionais e econômicos do processo de forjamento. Conforme demonstrado por Hu *et al.* (2016), a modularidade proporcionada pelos insertos reduz substancialmente os tempos de parada para manutenção, uma vez que permite a substituição ou recondicionamento seletivo de seções específicas da ferramenta sem necessidade de substituir todo o conjunto. Esta característica é particularmente vantajosa em produções em série, onde a eficiência operacional e a disponibilidade do equipamento são fatores críticos para a competitividade do processo produtivo.

2.2. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) constitui uma ferramenta fundamental para a análise de processos de conformação, pois permite simular o comportamento termomecânico de materiais submetidos a grandes deformações. Por meio desta metodologia, é possível prever campos de tensão e deformação, o fluxo do material e possíveis falhas, considerando as não linearidades geométricas, do material e de contato inerentes a esses processos (ALTAN *et al.*, 2005).

A aplicação do MEF em operações como forjamento, estampagem e extrusão contribui significativamente para a redução de custos com protótipos físicos, a otimização de parâmetros do processo e o aumento da confiabilidade no desenvolvimento de ferramentas e produtos (ALTAN *et al.*, 2005).

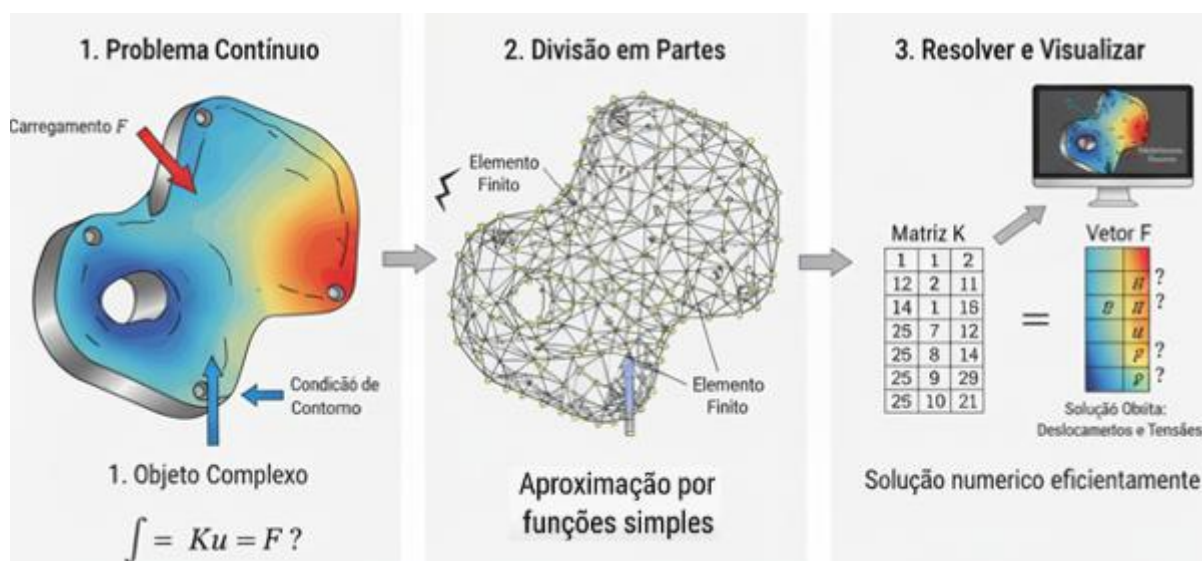
De acordo com Reddy (2006), MEF facilita profundamente a análise de estruturas mecânicas ao fornecer uma metodologia sistemática e

computacionalmente eficiente para a resolução aproximada de equações diferenciais governantes complexas, as quais frequentemente não admitem soluções analíticas fechadas. O autor enfatiza que a essência do método reside na discretização do domínio estrutural contínuo em um conjunto de subdomínios interconectados, os elementos finitos, permitindo que formas aproximadas do campo de deslocamentos (ou outras variáveis de interesse), sejam construídas por partes.

Essa abordagem permite lidar com geometrias complexas, condições de contorno diversas e materiais com comportamentos não lineares, transformando um problema físico contínuo de complexidade intratável em um sistema discreto de equações algébricas, solucionável computacionalmente (Reddy, 2006).

A Figura 2 ilustra o conceito fundamental de MEF, destacando seus três pilares principais segundo Reddy (2006). O processo inicia com o **Problema Contínuo** (1), que representa uma estrutura de geometria complexa submetida a carregamentos e condições de contorno, cuja física é governada por equações diferenciais. Em seguida, ocorre a **Discretização** (2), onde o objeto é dividido em uma malha de subdomínios (elementos finitos), permitindo que o comportamento físico seja aproximado por funções mais simples em cada elemento. Por fim, essa abordagem resulta na **Solução Numérica** (3), transformando o problema contínuo em um sistema de equações algébricas (na forma matricial $K * u = F$), que é resolvido computacionalmente para obter os resultados de interesse, como deslocamentos e tensões, passíveis de visualização e análise.

Figura 2 – Conceito básico do Método de Elementos Finitos (MEF).



Fonte: adaptado dos conceitos apresentados por Reddy (2006).

2.1.1. ANSYS Mechanical e LS-DYNA

Partindo do princípio de que a simulação computacional se tornou um pilar da engenharia moderna, a ANSYS se consolida como um ecossistema integrado de softwares baseado no MEF. Conforme ANSYS (2024), sua solução central, o ANSYS Mechanical, é projetada para transcender a simples análise estrutural, funcionando como um ambiente de prototipagem virtual avançado.

Esta ferramenta permite aos engenheiros não apenas verificar, mas prever com alto grau de confiança o comportamento mecânico, térmico e dinâmico de produtos sob condições operacionais reais. Dessa forma, a plataforma materializa a aplicação industrial do MEF, convertendo problemas de contorno complexos, de geometrias intrincadas e materiais não lineares, em insights quantitativos para a tomada de decisão, reduzindo drasticamente a dependência de ciclos de prototipagem física.

O LS-DYNA, integrado ao ambiente ANSYS, trata-se de um solver altamente versátil, baseado no MEF, capaz de simular o comportamento de materiais e estruturas sob condições de carregamento severas, incluindo impacto, grandes deformações, altas taxas de deformação e fenômenos de contato altamente não lineares (ANSYS Inc., 2024).

Desenvolvido originalmente pelo Lawrence Livermore National Laboratory e posteriormente comercializado pela Livermore Software Technology Corporation (LSTC), agora integrado ao ecossistema ANSYS, ele se baseia no método de integração temporal explícita (HALLQUIST, 2006). Este método é particularmente eficaz para a análise de problemas altamente não lineares, envolvendo grandes deformações, contactos complexos e mudanças rápidas de estado, que seriam computacionalmente proibitivos ou instáveis para métodos implícitos tradicionais.

Conforme explica Benson (1992), a natureza condicionalmente estável do método explícito requer que o passo de tempo seja inferior ao tempo que uma onda de tensão leva para atravessar o menor elemento da malha, conhecido como critério de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). Essa característica torna-o ideal para aplicações como análise de impacto, colisão veicular e processos de fabricação, onde a resposta transitória do sistema é de primordial interesse.

A operação do LS-DYNA envolve a discretização da geometria em elementos finitos, a definição das propriedades dos materiais, condições de contato e restrições

de fronteira, seguida pela solução das equações de movimento em cada incremento de tempo. Adicionalmente, o software possibilita análises termomecânicas acopladas e fornece resultados detalhados para tensões, deformações e modos de falha (ANSYS Inc., 2024).

2.1.2. Geometria e Geração de Malha

A etapa inicial de qualquer análise por MEF consiste na representação geométrica do componente ou sistema a ser investigado, que deve constituir uma abstração fidedigna do problema físico em estudo.

De forma geral, modelos tridimensionais (sólidos) possuem capacidade superior de representação fenomenológica quando comparados a modelos bidimensionais (cascas) ou unidimensionais (vigas), permitindo a captura de efeitos complexos como concentrações de tensão tridimensionais e acoplamentos termomecânicos multidirecionais.

Entretanto, essa maior fidelidade fenomenológica implica em custo computacional significativamente elevado, uma vez que a complexidade numérica cresce exponencialmente com o aumento do nível topológico do modelo, conforme demonstrado por Zienkiewicz e Taylor (2000). Esta relação inversa entre fidelidade do modelo e viabilidade computacional estabelece um compromisso fundamental no desenvolvimento de simulações por elementos finitos, demandando criteriosa seleção da abordagem de modelagem mais adequada aos objetivos específicos da análise e aos recursos computacionais disponíveis.

A malha de elementos finitos representa o meio pelo qual o domínio geométrico contínuo é discretizado em elementos de dimensões finitas, permitindo a solução numérica das equações diferenciais que governam o comportamento do material durante o forjamento. De acordo com Zienkiewicz e Taylor (2000), a seleção adequada do tipo de elemento, densidade de malha e estratégia de refinamento é crucial para equilibrar precisão e eficiência computacional. Elementos tetraédricos são frequentemente utilizados para geometrias complexas devido à sua versatilidade, enquanto elementos hexaédricos proporcionam maior precisão com menor número de elementos para geometrias mais regulares.

A qualidade da malha influencia diretamente a precisão dos resultados obtidos na simulação de forjamento, incluindo a previsão de forças necessárias, padrões de

preenchimento da matriz, desenvolvimento de defeitos e distribuição de tensões residuais.

Segundo Scharning (2008), é recomendável utilizar diferentes densidades de malha em regiões distintas do modelo, com refinamento concentrado nas áreas de interesse como bordas de corte, raios de concordância e interfaces entre insertos e matriz principal.

De acordo com Wagoner e Chenot (2001), malhas muito grosseiras podem subestimar significativamente as forças de conformação e mascarar concentrações de tensão, enquanto malhas excessivamente refinadas aumentam exponencialmente o tempo computacional sem melhorias proporcionais na precisão.

A convergência dos resultados em função do refinamento da malha deve ser sempre verificada através de estudos paramétricos, onde quantidades de interesse como força máxima ou distribuição de deformação são monitoradas à medida que a densidade da malha é sistematicamente aumentada.

Considera-se que a convergência da malha é alcançada quando refinamentos adicionais não produzem variações significativas nos resultados, especialmente nas regiões de concentração de tensões. Na prática, é comum adotar uma variação inferior a 5% entre os resultados de simulações sucessivas como critério de convergência, acompanhando-se continuamente a evolução do campo de tensões (MADIER, 2020; KIM; SANKAR, 2009).

2.1.3. Definição do Material

A definição das propriedades dos materiais constitui etapa fundamental no desenvolvimento de modelos confiáveis para análise por elementos finitos, servindo como base para a previsão do comportamento mecânico dos componentes sob condições de carregamento específicas.

Segundo Smith (2018), a caracterização material deve abranger não apenas propriedades elásticas lineares, como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, mas também relações constitutivas que descrevam adequadamente o comportamento plástico, critérios de escoamento e leis de encruamento.

Conforme estabelecido por Davis (2005), o modelo constitutivo para o aço H13 deve considerar a sensibilidade à taxa de deformação e à temperatura, uma vez

que estas variáveis influenciam significativamente a resposta mecânica do material durante o processo de forjamento.

2.1.4. Carregamento e Condições de Contorno

O carregamento em análises por elementos finitos compreende a representação numérica das solicitações externas atuantes sobre uma estrutura, as quais podem ser aplicadas sob diversas formas de acordo com a natureza do problema em estudo. Conforme estabelecido por Bathe (2014), os carregamentos podem ser classificados em categorias distintas, incluindo forças concentradas, pressões distribuídas, campos térmicos, acelerações gravitacionais e deslocamentos prescritos, cada qual demandando considerações específicas quanto à sua implementação computacional.

Segundo Cook *et al.* (2002), as condições de contorno devem restringir adequadamente os movimentos de corpo rígido do modelo, garantindo que a estrutura esteja em equilíbrio estável sem introduzir restrições excessivas que possam alterar artificialmente a distribuição de tensões. A definição dessas condições é essencial para que os resultados da simulação representem fielmente o comportamento real do sistema físico em estudo.

A implementação computacional das condições de contorno requer atenção especial à representação das interações entre os diversos componentes do sistema. Segundo Bathe (2014), algoritmos de contato avançados, como o método de penalidade ou multiplicadores de Lagrange, são empregados para garantir a não-penetração entre as superfícies em contato, assegurando a validade física da solução obtida.

2.1.5. Análise dos Resultados

A análise estrutural dos resultados constitui etapa fundamental na interpretação dos dados obtidos através de simulações por elementos finitos, permitindo a avaliação quantitativa do comportamento mecânico dos componentes sob estudo. Esta análise deve contemplar a verificação de parâmetros críticos como tensões equivalentes, deformações plásticas, deslocamentos e fatores de segurança,

estabelecendo correlações entre os resultados numéricos e o desempenho estrutural real (COOK *et al.*, 2002).

Tensões residuais de compressão na superfície são geralmente benéficas, aumentando a resistência à iniciação de trincas, enquanto tensões de tração podem acelerar processos de falha (ALTAN *et al.*, 2005). A distribuição espacial dessas tensões, obtida através de simulações termomecânicas acopladas, permite identificar padrões de carregamento críticos e orientar modificações no projeto das ferramentas para prolongar sua vida útil.

A validação experimental dos resultados computacionais completa o processo de análise estrutural, fornecendo verificação independente das previsões numéricas. Técnicas como extensometria, termografia infravermelha e análise de correlação de imagem digital (DIC) permitem a comparação direta entre tensões, deformações e temperaturas previstas e medidas experimentalmente (SMITH, 2018).

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada de modo a integrar análises numéricas e experimentais, permitindo compreender com precisão o comportamento mecânico do inserto utilizado no processo de forjamento. Para isso, o estudo foi dividido em duas etapas principais: simulação via MEF utilizando o software ANSYS/LS-DYNA e validação experimental por meio de ensaios em prensa hidráulica instrumentada.

A etapa numérica teve como objetivo reproduzir, de forma controlada e fiel, as condições de carregamento às quais o inserto é submetido durante o processo real de conformação. Foram modeladas as geometrias, as condições de contorno, atribuição das propriedades do material e os contatos entre os componentes, buscando representar adequadamente as não linearidades geométricas e físicas do processo. A simulação permitiu obter campos de tensão e identificar regiões críticas suscetíveis a falhas.

A etapa experimental, por sua vez, teve como finalidade validar os resultados obtidos numericamente, garantindo que o modelo computacional representa com confiabilidade o comportamento real do sistema. Para isso, foram realizados ensaios em uma prensa hidráulica de 40 toneladas, com instrumentação do inserto por meio de extensômetros uniaxiais e triaxiais (rosetas). Os dados de deformação obtidos foram convertidos em tensões principais e, posteriormente, em tensão equivalente de von Mises, possibilitando a comparação direta com as simulações.

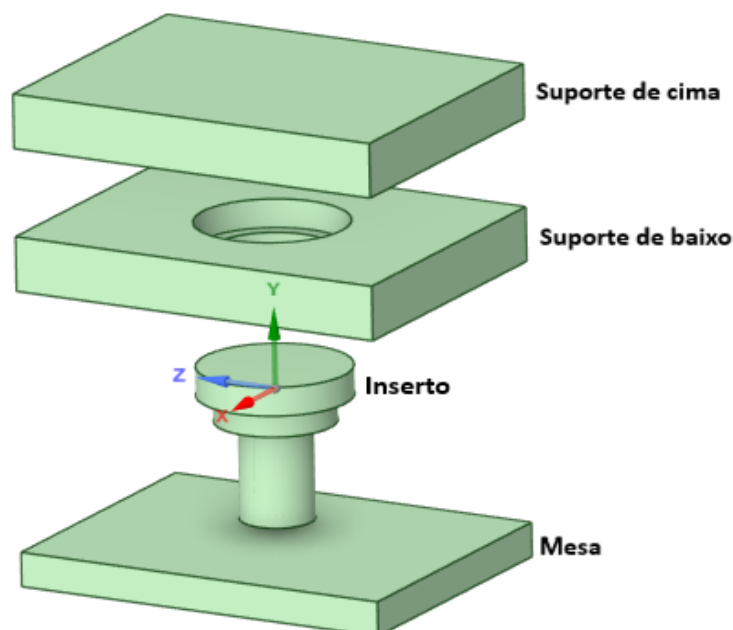
3.1. METODOLOGIA NUMÉRICA

A etapa numérica foi conduzida utilizando o software ANSYS Workbench 2024 R1, empregando o solver explícito LS-DYNA, amplamente utilizado para análises com grandes deformações, contato não linear e elevadas taxas de carregamento. O objetivo desta fase foi reproduzir o comportamento mecânico do inserto durante o ciclo de forjamento, permitindo a obtenção de campos de tensão e deformação para posterior comparação com os ensaios experimentais.

3.1.1. Modelagem geométrica

Para o processo de simulação numérica, a geometria foi primeira criada no SpaceClaim, consistindo em quatro componentes principais: o inserto de forjamento, a mesa fixa, o suporte inferior e o suporte superior, conforme mostrado na Fig. 3.

Figura 3 – Geometria identificando cada componente.



Fonte: Autor (2025).

Foram analisados insertos com dois diâmetros distintos (24 mm e 32 mm), o inserto mostrado na Figura anterior é o de 24 mm, com uma altura total de 53 mm. Ele possui dois degraus para montagem no suporte: o primeiro com 50 mm de diâmetro e 10 mm de altura, e o segundo com 39,20 mm de diâmetro e 9 mm de altura. Apenas o inserto foi considerado como corpo deformável, enquanto os demais componentes foram modelados como rígidos, reduzindo o custo computacional sem comprometer a precisão.

3.1.2. Propriedades do Aço Ferramental H13

O aço ferramenta H13, utilizado nas simulações numéricas deste estudo, apresenta propriedades físicas, mecânicas e térmicas que o tornam ideal para processos de conformação metálica como o forjamento. Em temperatura ambiente,

este material destaca-se pela sua elevada resistência mecânica, boa dureza e excelente estabilidade térmica - características que explicam seu amplo uso na fabricação de insertos, matrizes e moldes. As propriedades-chave do aço H13 estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades do aço H13 em temperatura ambiente.

Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³)	7800
Módulo de Young (GPa)	210
Coefficiente de Poisson	0,30
Limite de Escoamento (MPa)	1600
Resistência à Tração (MPa)	2000
Dureza (HRC)	50
Condutividade Térmica (W/m·K)	26
Calor Específico (J/kg·K)	480
Coefficiente de Expansão Térmica (1/°C)	$12,2 \times 10^{-6}$
Temperatura de Fusão (°C)	1460
Módulo Plástico Tangente (GPa)	5,0

Fonte: adaptado de Altan *et al.* (2005).

3.1.3. Definição da Malha e Estudo de Convergência

A distribuição da malha manteve-se relativamente uniforme, cobrindo adequadamente toda a geometria do inserto. A malha foi aplicada apenas no inserto, uma vez que este é o único componente flexível na simulação, enquanto todos os outros elementos foram tratados como corpos rígidos.

O estudo de convergência de malha é essencial em análises estruturais, pois garante que a discretização numérica represente adequadamente as regiões críticas do modelo. Uma vez que a solução exata de muitos problemas de engenharia não é conhecida, este procedimento é fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados numéricos.

Pode-se observar na Tabela 2 que, a partir da Malha 2, os valores de tensão máxima apresentam variações inferiores a 0,5% entre refinamentos sucessivos (de 1220,7 MPa para 1224,7 MPa). Isso indica que a solução numérica atingiu a convergência de malha. Portanto, utilizar malhas mais refinadas não melhora significativamente a precisão, mas apenas aumenta o custo computacional. Assim, a Malha 2 representa o melhor equilíbrio entre precisão e eficiência neste estudo.

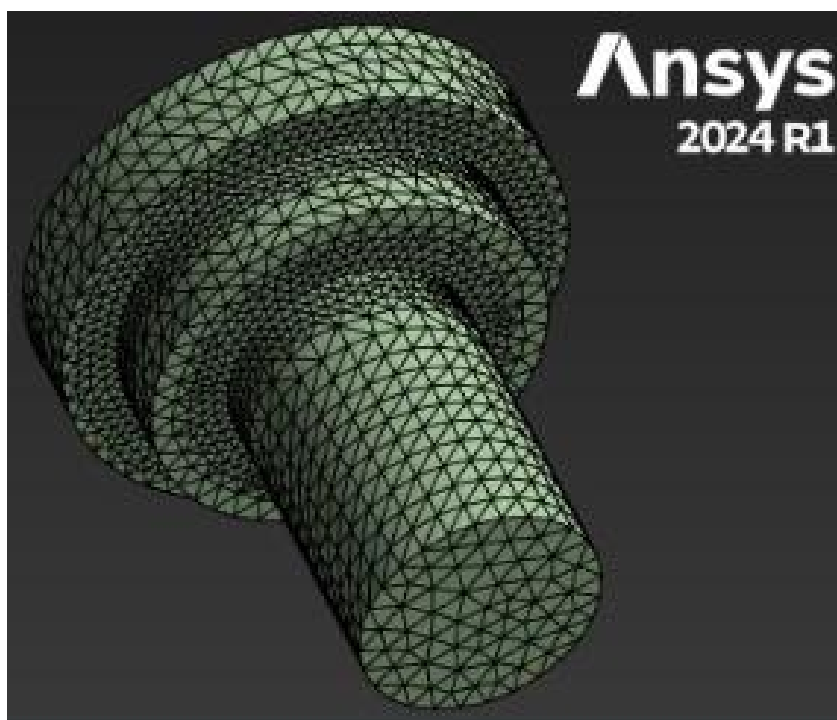
Tabela 2 – Resultados do estudo de convergência de malha.

Modelo	Tamanho da malha [mm]	Número de elementos	Tensão máx. [MPa]
Malha 1	3,25	31150	950,24
Malha 2	2,75	41804	1220,7
Malha 3	2,25	62764	1223,1
Malha 4	1,75	118795	1224,7

Fonte: Autor (2025).

O inserto foi discretizado com elementos tetraédricos de ordem linear, apresentando tamanho médio de aproximadamente 2,75 mm, adequado para a complexidade geométrica do modelo conforme ilustrado na Figura 4. Este tipo de elemento é comumente utilizado em simulações tridimensionais, particularmente em análises explícitas como as realizadas no LS-DYNA, devido ao seu menor custo computacional e boa estabilidade numérica.

Figura 4 – Malha gerada no inserto.



Fonte: Autor (2025).

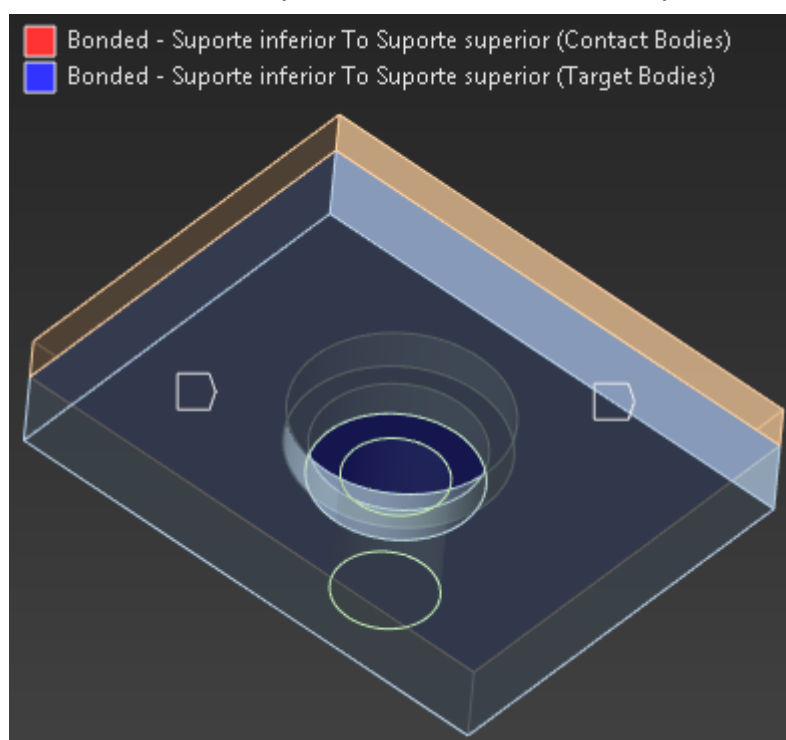
3.1.4. Condições de Contorno

Seguindo o processo de modelagem e definição do material, os parâmetros de simulação foram configurados no LS-DYNA. As condições de contorno foram

estabelecidas com apoios fixos e deslocamentos prescritos para simular o carregamento típico de um ciclo de forjamento. Interações de contato físico também foram definidas entre todos os componentes para representar de forma realista os efeitos de atrito e pressão entre as superfícies durante o processo.

No entanto, um tipo de contacto "Bonded", ilustrado na Figura 5, foi aplicado na interface dos suportes superior e inferior, restringindo todo o movimento relativo (efetivamente fixando o inserto no lugar), enquanto a mesa foi totalmente restringida a qualquer movimento.

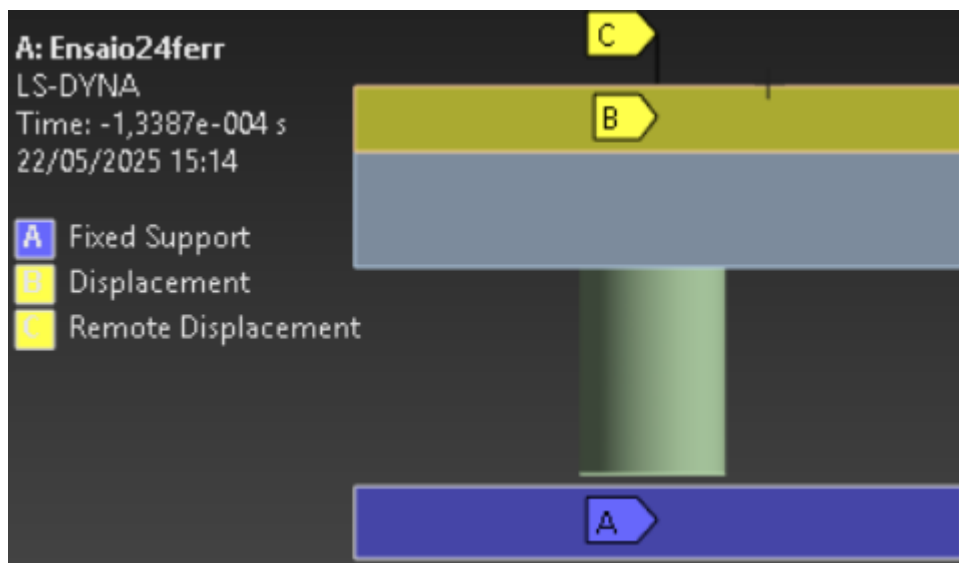
Figura 5 – Contacto "Bonded" aplicado na interface dos suportes superior e inferior.



Fonte: Autor (2025).

A configuração inicial do modelo computacional, ilustrada na Figura 6, estabeleceu o inserto posicionado a 2 mm acima da superfície da mesa, representando a posição inicial antes do início do ciclo de forjamento. Para simular os movimentos cíclicos característicos do equipamento de forjamento, foi implementado um carregamento por deslocamento vertical prescrito, que reproduz cinematicamente a sequência operacional completa de avanço e retorno da ferramenta.

Figura 6 – Posição inicial da simulação.



Fonte: Autor (2025).

O deslocamento prescrito foi considerado aplicado na direção vertical (eixo y) no suporte superior, enquanto simultaneamente restringiu-se os deslocamentos e rotações nos outros eixos coordenados. O valor deste deslocamento foi determinado a partir da Lei de Hooke para deformação axial, expressa pela Equação 1.

$$\delta = \sum_{i=1}^3 \frac{F \times L_i}{A_i \times E} \quad (1)$$

A Lei de Hooke para deformação axial estabelece a relação fundamental entre a tensão normal e a deformação específica em materiais elásticos lineares submetidos a carregamento uniaxial (Beer *et al.*, 2013).

A validade desta lei está condicionada ao limite de proporcionalidade do material, abaixo do qual se observa comportamento elástico linear e recuperação total das deformações após o descarregamento (CRAIG, 2011). No contexto de ferramentas de forjamento em aço H13, embora as tensões operacionais frequentemente excedam este limite, a Lei de Hooke mantém relevância para análise de regiões específicas que permanecem no regime elástico durante o processo de conformação.

A Figura 7 apresenta os carregamentos aplicados na simulação transiente no LS-DYNA, dentro do ambiente do ANSYS. Mostra a sequência de deslocamentos

prescritos ao longo do tempo para o inserto de 24 mm, com variação apenas na direção Y, alternando entre 0 mm e -2,16 mm a cada 0,0005 segundos, enquanto os deslocamentos nas direções X e Z permanecem nulos. Esse padrão periódico simula condições de impacto repetitivo.

Figura 7 – Sequência de deslocamentos prescritos ao longo do tempo (24 mm).

Steps	Time [s]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	0,	0,	0,	0,
2	5,e-004	0,	-2,16	0,
3	1,e-003	0,	0,	0,
4	1,5e-003	0,	-2,16	0,
5	2,e-003	0,	0,	0,
6	2,5e-003	0,	-2,16	0,
7	3,e-003	0,	0,	0,
8	3,5e-003	0,	-2,16	0,
9	4,e-003	0,	0,	0,
10	4,5e-003	0,	-2,16	0,
11	5,e-003	0,	0,	0,
12	5,5e-003	0,	-2,16	0,
13	6,e-003	0,	0,	0,
14	6,5e-003	0,	-2,16	0,
15	7,e-003	0,	0,	0,
16	7,5e-003	0,	-2,16	0,
17	8,e-003	0,	0,	0,
18	8,5e-003	0,	-2,16	0,
19	9,e-003	0,	0,	0,
20	9,5e-003	0,	-2,16	0,
21	1,e-002	0,	0,	0,

Fonte: Autor (2025).

De realçar que para o inserto de 32 mm seguiu o mesmo processo, mas a variação na direção Y foi entre 0 mm e -2,097 mm como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Sequência de deslocamentos prescritos ao longo do tempo (32 mm).

Steps	Time [s]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	0,	0,	0,	0,
2	5,e-004	0,	-2,097	0,
3	1,e-003	0,	0,	0,
4	1,5e-003	0,	-2,097	0,
5	2,e-003	0,	0,	0,
6	2,5e-003	0,	-2,097	0,
7	3,e-003	0,	0,	0,
8	3,5e-003	0,	-2,097	0,
9	4,e-003	0,	0,	0,
10	4,5e-003	0,	-2,097	0,
11	5,e-003	0,	0,	0,
12	5,5e-003	0,	-2,097	0,
13	6,e-003	0,	0,	0,
14	6,5e-003	0,	-2,097	0,
15	7,e-003	0,	0,	0,
16	7,5e-003	0,	-2,097	0,
17	8,e-003	0,	0,	0,
18	8,5e-003	0,	-2,097	0,
19	9,e-003	0,	0,	0,
20	9,5e-003	0,	-2,097	0,
21	1,e-002	0,	0,	0,

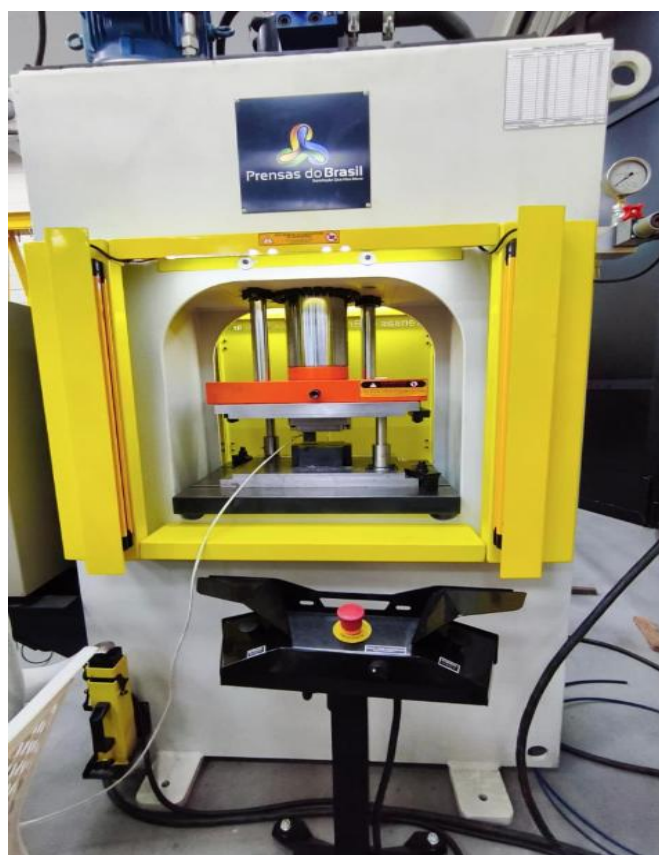
Fonte: Autor (2025).

3.2. METODOLOGIA NUMÉRICA

3.2.1. Prensa Hidráulica

O ensaio experimental foi conduzido utilizando uma prensa hidráulica modelo PHH-40T do tipo H, fabricada pela Prensas do Brasil, conforme ilustrado na Figura 9. Este equipamento possui uma capacidade nominal de 40,7 toneladas-força (equivalentes a aproximadamente 400 KN), especificamente desenvolvida para operações de conformação plástica de metais. O sistema hidráulico da prensa atua através de um cilindro principal que transmite movimento vertical ao inserto de trabalho, permitindo a aplicação controlada de carga sobre o material a ser conformado contra a matriz inferior.

Figura 9 – Prensa hidráulica modelo PHH-40T do tipo H.



Fonte: Autor (2025).

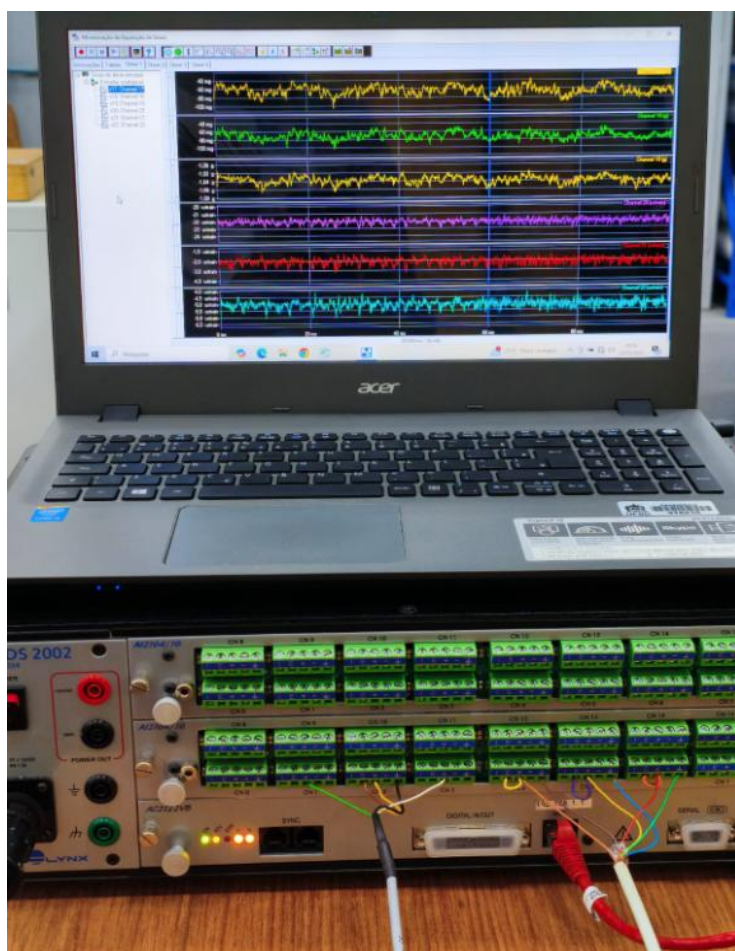
O equipamento é adequado tanto para ensaios experimentais quanto para processos industriais, permitindo a simulação e o desenvolvimento de operações

como estampagem, forjamento e prensagem com alta precisão e segurança operacional.

3.2.2. Aquisição dos Dados

Para a aquisição de dados, foi utilizado o Sistema de Aquisição de Dados LYNX com 16 canais, apresentado na Figura 10, permitindo assim a obtenção direta das deformações a partir do inserto. O modelo ADS 2002 da LYNX é um sistema completo e versátil de aquisição de dados, ideal para aplicações que exigem precisão, flexibilidade e integração com diversos tipos de sensores. Ele permite a coleta de sinais analógicos e digitais com alta confiabilidade e é compatível com o software de análise da própria LYNX.

Figura 10 – Sistema de Aquisição de Dados LYNX ADS 2002.



Fonte: Autor (2025).

A configuração do sistema permitiu a conexão direta com extensômetros (*strain gauges*) instalados no inserto, possibilitando o monitoramento em tempo real

das deformações durante os ciclos de forjamento. O condicionamento de sinal integrado, com amplificadores programáveis, assegurou a adequada leitura dos sinais provenientes dos transdutores, enquanto a interface Ethernet proporcionou comunicação estável com o computador de controle (SILVA *et al.*, 2021).

A aquisição foi realizada mediante o software AqDados, que permitiu a configuração dos parâmetros de aquisição, visualização dos sinais em tempo real e armazenamento dos dados para posterior análise. A sincronização temporal entre os canais foi fundamental para correlacionar adequadamente as deformações medidas com as fases do ciclo de carregamento aplicado pela prensa hidráulica.

Os extensômetros da Figura 11 utilizados nos testes, da Kyowa Electronic Instruments Ltd, são de dois tipos: um extensômetro uniaxial de 10 mm e um extensômetro triaxial, ambos projetados para uso em material de aço. Eles foram devidamente calibrados antes da aquisição de dados. Seguindo os procedimentos recomendados pelo fabricante, cada canal foi configurado corretamente e os parâmetros de calibração foram salvos no software AqDados, que controla o sistema de aquisição de dados.

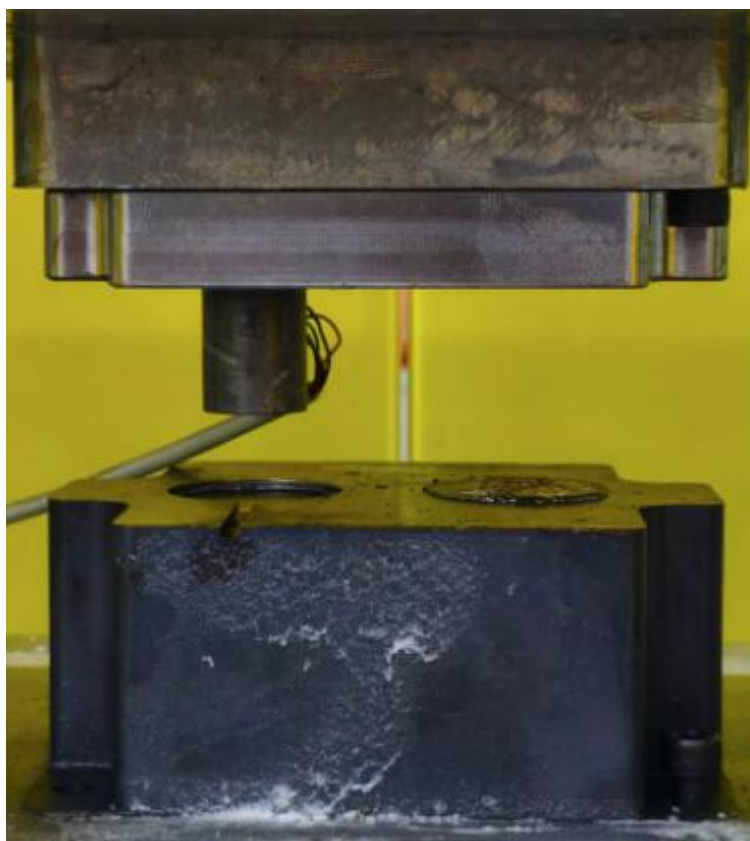
Figura 11 – Extensômetros posicionado no inserto.



Fonte: Autor (2025)

Com os insertos instrumentados, foram realizados testes na prensa. O experimento, focado na ferramenta, consistiu em uma série de operações de prensagem em uma matriz rígida (Figura 12), atingindo a pressão máxima da máquina de 210 kgf/cm² (40,7 toneladas métricas). Todos os canais foram adquiridos simultaneamente e registrados no mesmo sistema de aquisição de dados.

Figura 12 – Inseto posicionado na prensa.



Fonte: Autor (2025).

As leituras de deformação foram exportadas para uma planilha contendo três colunas correspondentes a cada canal de medição (μ strain). Com base nesses dados, as tensões principais foram determinadas utilizando as seguintes equações.

A tensão principal máxima é calculada como:

$$\sigma_{\max} = \frac{E_m}{2} \left[\frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{1 - \nu_p} + \frac{1}{1 + \nu_p} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + (2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c))^2} \right] \quad (2)$$

Enquanto a tensão principal mínima é dada por:

$$\sigma_{\min} = \frac{E_m}{2} \left[\frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{1 - \nu_p} - \frac{1}{1 + \nu_p} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + (2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c))^2} \right] \quad (3)$$

As equações de tensão máxima e mínima apresentadas são derivadas da teoria da elasticidade aplicada a materiais submetidos a múltiplas deformações. Elas permitem calcular os limites superiores e inferiores de tensão normal em uma região específica de um corpo, considerando os efeitos combinados das deformações principais e transversais, conforme discutido por Mascia (2021) na abordagem clássica da teoria das tensões e deformações.

Os termos ε_a , ε_b e ε_c representam as deformações medidas pelos três canais da roseta de extensômetros, geralmente posicionados a 0° , 45° e 90° . Assim, com base nas medições experimentais de deformação e nas propriedades elásticas do material, é possível determinar as tensões principais, que são grandezas fundamentais para avaliar a integridade estrutural e para comparação com os resultados numéricos obtidos na simulação.

A tensão principal máxima (σ_{\max}) representa a maior tensão normal experimentada pelo material em um determinado ponto, sendo especialmente relevante na avaliação de falhas frágeis, como a iniciação de trincas e fraturas. Por outro lado, a tensão principal mínima (σ_{\min}) corresponde à menor tensão normal naquele ponto, que pode assumir valores compressivos dependendo do estado de carregamento, sendo particularmente importante na avaliação de flambagem, esmagamento ou falhas relacionadas à compressão.

Após o cálculo das tensões principais máxima e mínima no ponto a partir das equações apresentadas anteriormente, aplicou-se a relação para o estado plano de tensões ($\sigma_3 = 0$) a fim de determinar a tensão equivalente de von Mises. Este procedimento permitiu a determinação de uma grandeza diretamente comparável aos resultados numéricos fornecidos pela simulação. A expressão utilizada é dada por:

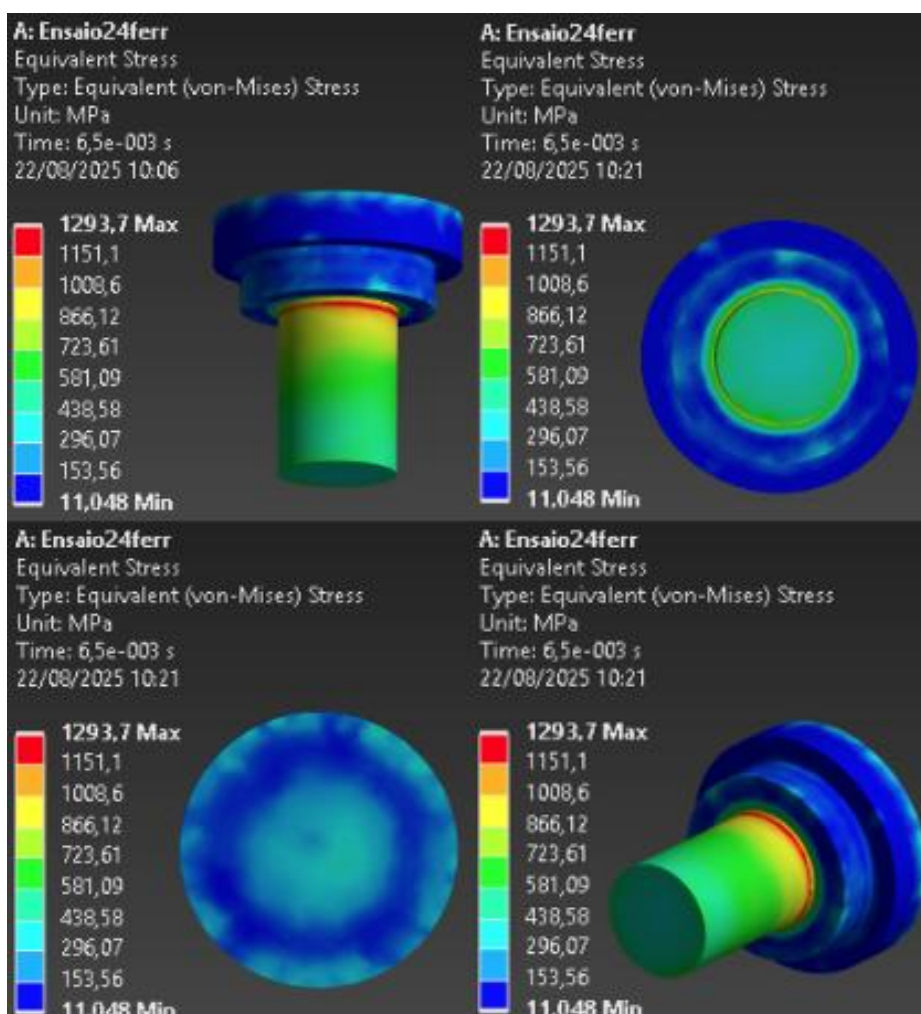
$$\sigma_{vM} = \sqrt{\sigma_{\max}^2 - \sigma_{\max}\sigma_{\min} + \sigma_{\min}^2} \quad (4)$$

4. RESULTADOS E DISCUÇÕES

4.1. RESULTDO NUMÉRICO

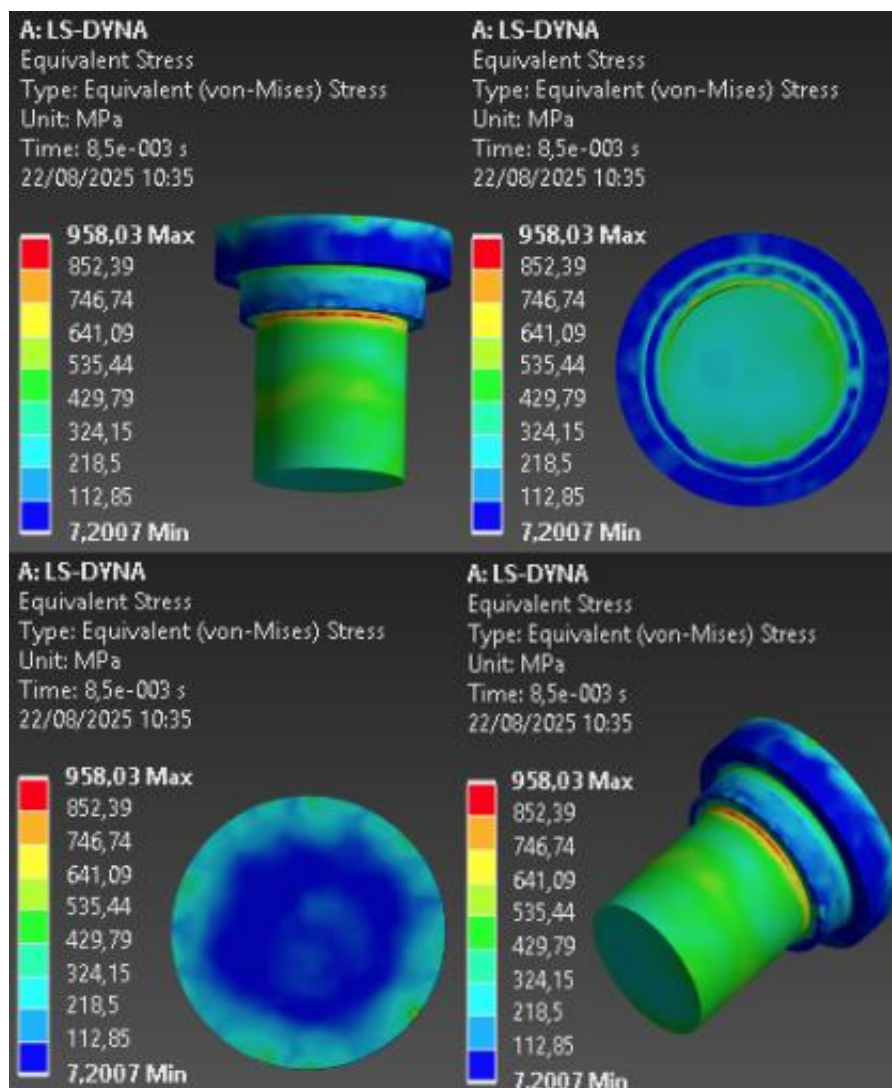
A partir da simulação numérica realizada no LS-DYNA, foram analisados os comportamentos mecânicos dos dois insertos com diâmetros de 24 mm e 32 mm utilizados no processo. As análises permitiram a avaliação de parâmetros fundamentais, como a distribuição de tensões (Von Mises). As Figuras 13 e 14 mostram os resultados das simulações de impacto nos insertos de 24 mm e 32 mm ao longo de um intervalo de tempo de 0,01 segundos. Os quatro painéis de visualização ilustram a distribuição da tensão equivalente de von Mises a partir de diferentes vistas. Estes resultados proporcionam uma compreensão 3D abrangente do comportamento das tensões sob carga dinâmica.

Figura 13 – Resultados das tensões na simulação de impacto do inserto de 24 mm.



Fonte: Autor (2025).

Figura 14 – Resultados das tensões na simulação de impacto do inserto de 32 mm.



Fonte: Autor (2025).

Para o inserto menor, a tensão equivalente de von Mises máxima atingiu aproximadamente 1293,7 MPa, enquanto para o inserto maior esse valor diminuiu para cerca de 958,0 MPa, representando uma redução de quase 26% nas tensões de pico.

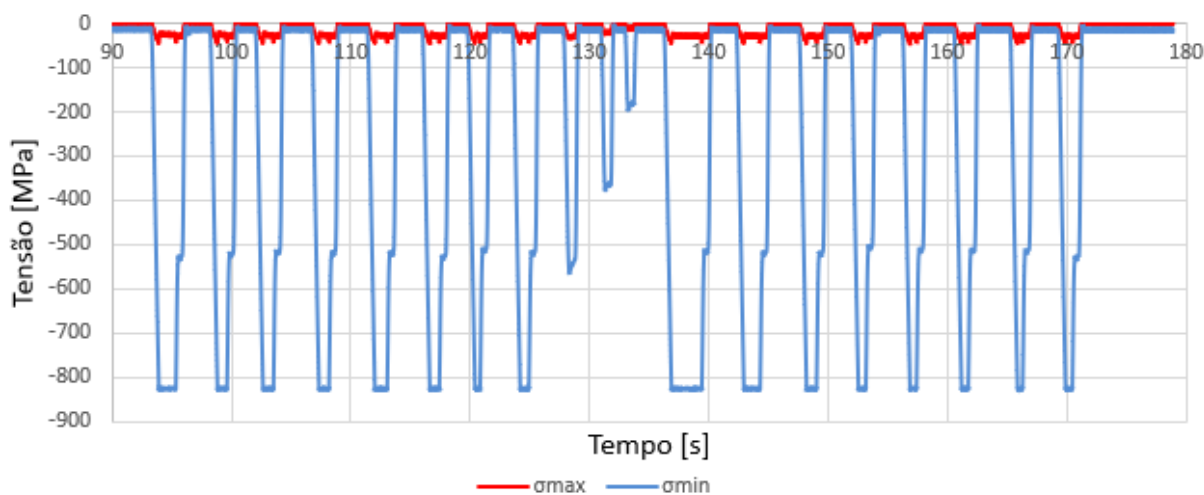
Em ambos os casos, a região crítica está localizada no raio de concordância entre o corpo cilíndrico e o flange, uma área típica de concentração de tensões. Embora os valores obtidos estejam abaixo do limite de escoamento do H13 em temperatura ambiente, é importante considerar que, sob condições de trabalho a quente, a resistência do material diminui, o que pode tornar o inserto menor crítico dependendo da temperatura de operação e do fator de segurança adotado.

Portanto, a geometria maior mostrou-se estruturalmente mais favorável, proporcionando melhor distribuição de tensões e reduzindo a probabilidade de falha. No entanto, se a dimensão reduzida for necessária devido a restrições do processo, recomenda-se adotar melhorias geométricas, como aumentar o raio de concordância ou modificar o suporte, além de análises complementares considerando propriedades dependentes da temperatura e possíveis efeitos de fadiga térmica.

4.2. RESULTADO EXPERIMENTAL

As Figuras 15 e 16 ilustram a evolução da tensão máxima e mínima em determinada região ao longo do tempo para os insertos de 24 mm e 32 mm de diâmetro, respectivamente, calculadas a partir das equações (2) e (3) utilizando os dados de deformação obtidas nos ensaios.

Figura 15 – Tensões Principais experimental (24 mm).

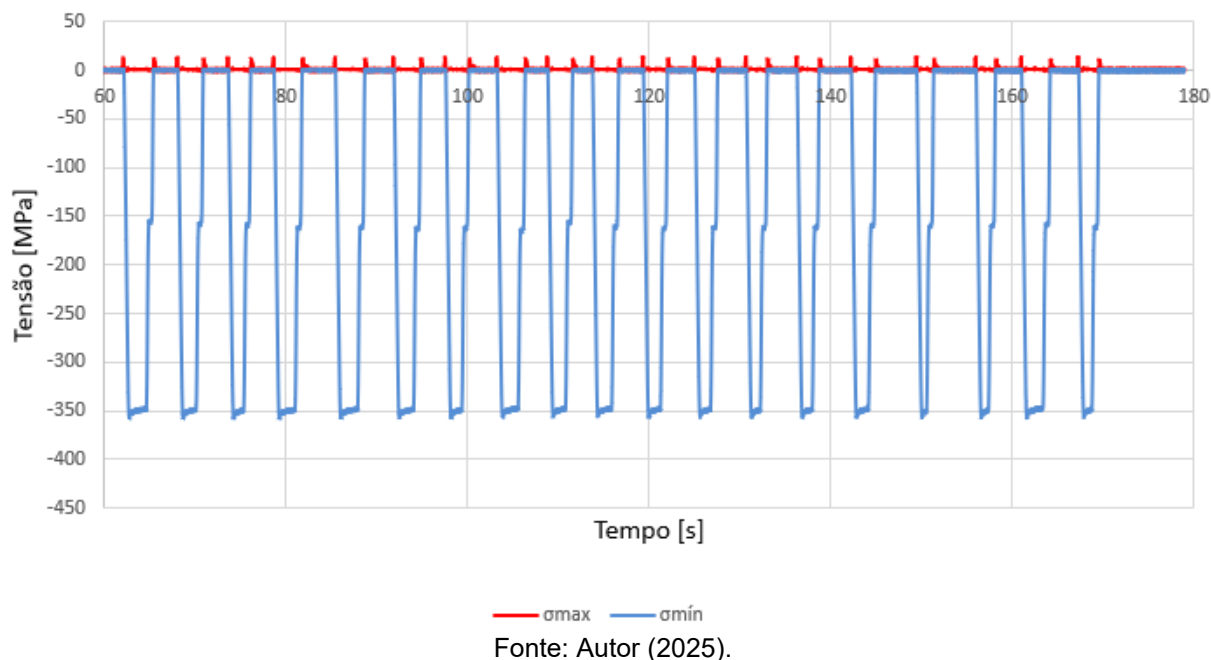


Fonte: Autor (2025).

Esse gráfico revela um comportamento característico de carregamento cíclico, com variações significativas entre os valores máximos e mínimos ao longo do tempo. A tensão principal máxima (σ_{max}) apresenta valores relativamente baixos e estáveis, variando entre -2,21 MPa e -45,9 MPa, o que indica que o material está predominantemente sob compressão leve ou próximo do estado neutro. Por outro lado, a tensão principal mínima (σ_{min}) demonstra picos acentuados de compressão, com valores que oscilam entre -828,7 MPa e 0,87 MPa, evidenciando momentos de alta sollicitação mecânica. Essa amplitude elevada entre os extremos de (σ_{min}) sugere

a presença de ciclos de carga intensos, possivelmente associados a fenômenos de fadiga ou concentração de tensões em regiões críticas do inserto.

Figura 16 – Tensões Principais experimental (32 mm).



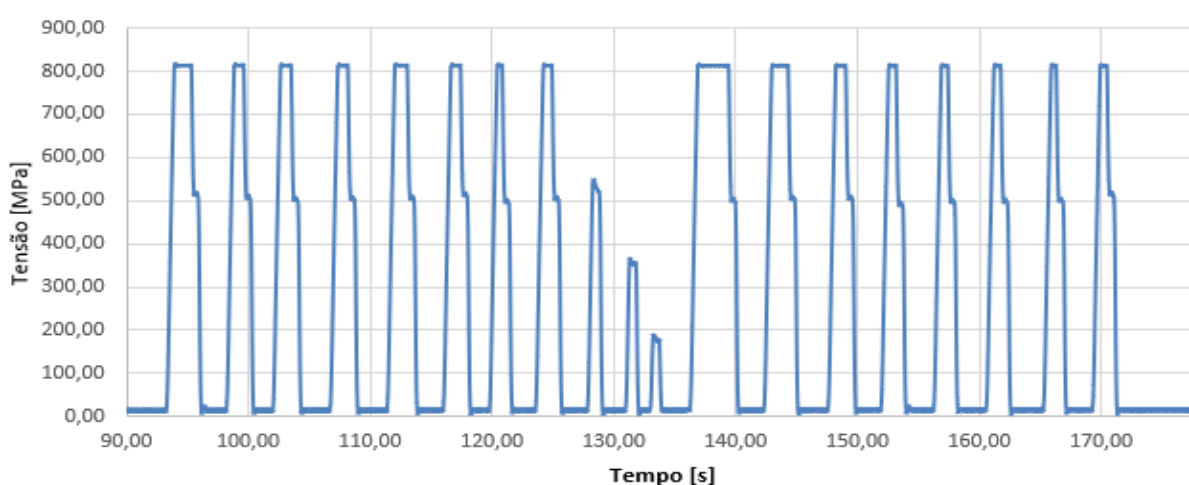
O inserto de 32 mm revela um comportamento assimétrico entre os estados de tensão máxima e mínima ao longo do tempo. A tensão principal máxima (σ_{max}) apresenta valores baixos e positivos, variando entre 0 MPa e 13,66 MPa, o que indica que o componente está submetido a esforços de tração leves ou praticamente nulos durante o experimento. Esse comportamento sugere que o inserto não sofre picos significativos de tração, mantendo-se em uma faixa segura quanto à ruptura por alongamento.

Este regime de carregamento é claramente dominado pela compressão, uma vez que a magnitude da tensão mínima 403,27 Mpa de compressão é muito superior à magnitude da tensão máxima 13,66 Mpa de tração. A natureza pulsante da curva azul (σ_{min}) demonstra que o material é repetidamente submetido a um ciclo que o leva de um estado de compressão alta para uma tensão próxima de zero. A linha vermelha (σ_{max}) confirma que, em certos momentos do ciclo, o material experimenta uma tensão de tração leve, mas esta é insignificante em comparação com o esforço de compressão.

5. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Os dados experimentais de tensão equivalente de von Mises, apresentados nas Figuras 17 e 18 para os insertos de 24 mm e 32 mm respectivamente, fornecem parâmetros fundamentais para a validação dos resultados obtidos numericamente. A metodologia experimental empregada baseou-se em três etapas sequenciais: inicialmente, realizou-se a aquisição contínua de deformações através de extensômetros; posteriormente, estas medições foram convertidas em tensões principais mediante aplicação das relações constitutivas elásticas do material; finalmente, aplicou-se o critério de von Mises por meio da equação (4) para determinação da tensão equivalente. Esta abordagem permitiu caracterizar quantitativamente a resposta estrutural dos componentes quando submetidos a carregamento cíclico.

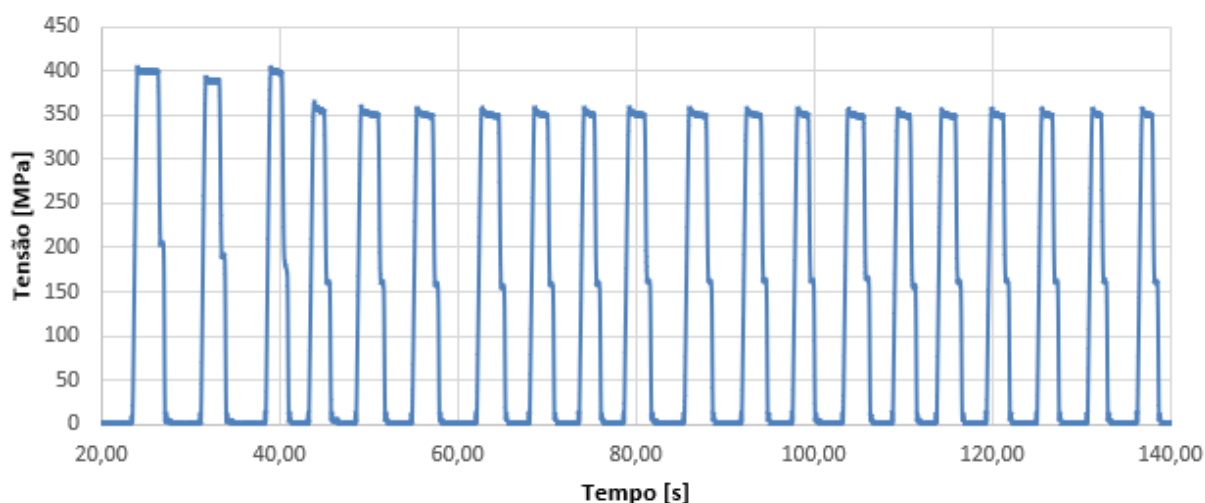
Figura 17 – Tensão equivalente de von Mises (24 mm).



Fonte: Autor (2025).

O valor máximo de 814,15 MPa, registrado durante os picos de carregamento, representa aproximadamente 63% do limite de escoamento do material H13 em temperatura ambiente, indicando uma margem de segurança adequada para operações em condições normais. Simultaneamente, o valor mínimo de 0,39 MPa observado nos vales do ciclo demonstra a completa descarga do componente entre os ciclos de conformação.

Figura 18 – Tensão equivalente de von Mises (32 mm).



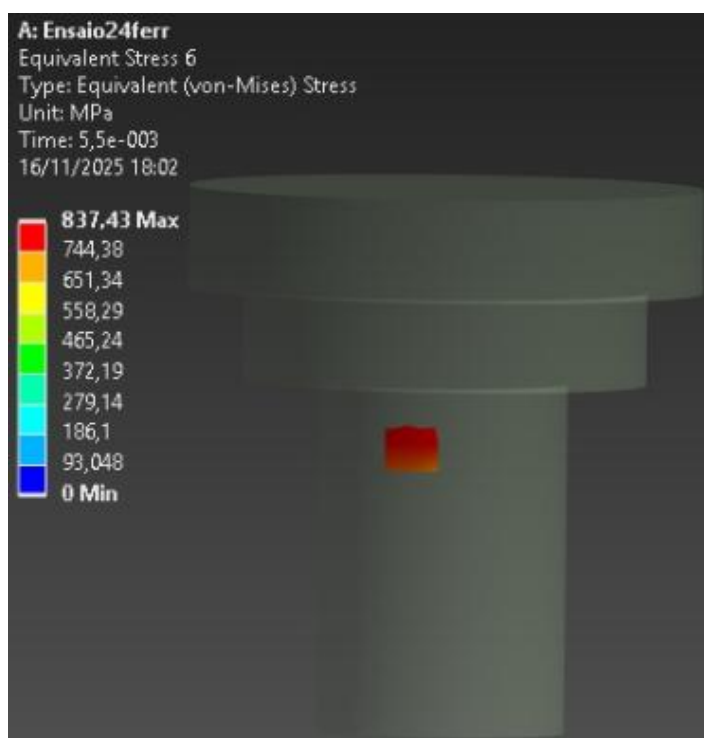
Fonte: Autor (2025).

A Figura 18 apresenta a evolução da tensão equivalente de von Mises para o inserto de 32 mm, registrando um pico máximo de 404,4 MPa e valor mínimo de 0,08 MPa. Estes valores representam uma redução de aproximadamente 50% na tensão máxima quando comparado ao inserto de 24 mm (814,15 MPa), confirmando a significativa vantagem estrutural da geometria de maior diâmetro.

O pico de 404,4 MPa corresponde a cerca de 42% do limite de escoamento do material H13 em temperatura ambiente, indicando uma folga de segurança ainda mais conservadora que a observada no inserto menor. O valor mínimo de 0,08 MPa, praticamente nulo, demonstra o completo alívio tensional entre ciclos sucessivos de carregamento, característica essencial para a integridade estrutural em operações cíclicas.

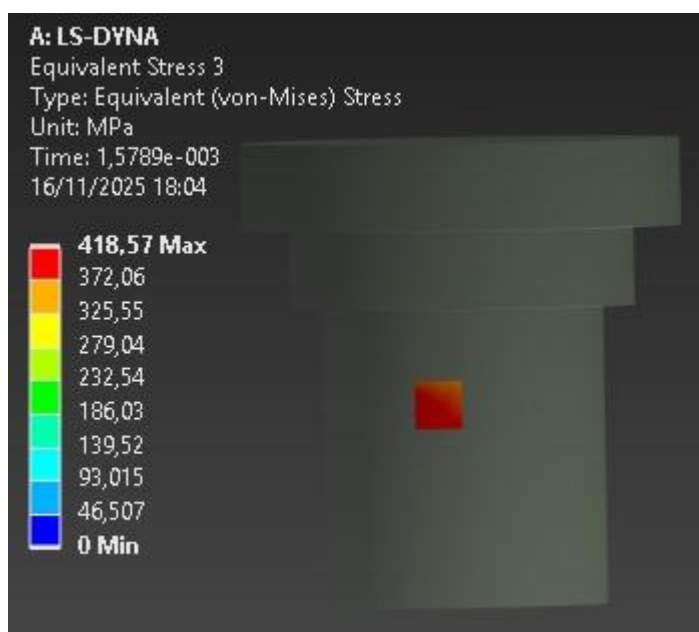
Para fins de comparação entre os resultados experimentais e numéricos, novas simulações foram realizadas no LS-DYNA empregando os mesmos parâmetros de entrada utilizados anteriormente. Nesta etapa, a extração de dados foi limitada a uma região localizada aproximadamente onde foi instalada o extensômetro, para garantir uma correlação de maior fidelidade entre os dados numéricos e experimentais. As Figuras 19 e 20 ilustra a distribuição da Tensão Equivalente de von Mises em uma região localizada próxima ao ponto de instrumentação dos insertos de 24 mm e 32 mm respectivamente.

Figura 19 – Tensão Equivalente na região de instrumentação (24 mm).



Fonte: Autor (2025).

Figura 20 – Tensão Equivalente na região de instrumentação (32 mm).



Fonte: Autor (2025).

Os resultados revelam que o inserto de maior diâmetro (32 mm) apresenta significativa vantagem estrutural em relação ao de 24 mm, com valores de tensão aproximadamente 50% inferiores. Esta redução tensional pode ser atribuída à melhor distribuição de cargas proporcionada pela maior área de seção transversal, que minimiza os efeitos de concentração de tensões nas regiões críticas.

A Tabela 3 apresenta a comparação entre os valores de tensão equivalentes de von Mises obtidos experimentalmente e por simulação numérica para os dois insertos analisados. Observa-se uma notável correlação entre os métodos, com erros relativos inferiores a 4% para ambas as geometrias, o que valida a confiabilidade do modelo computacional desenvolvido.

Tabela 3 – Comparação entre os valores de tensão equivalentes de von Mises.

Diâmetro (mm)	Tensão Experimental (MPa)	Tensão Numérica (MPa)	Diferença (MPa)	Erro Relativo (%)
24	814,15	837,43	23,28	2,78
32	404,40	418,57	14,17	3,50

Fonte: Autor (2025).

Os resultados apresentados na tabela evidenciam uma boa concordância entre as tensões obtidas experimentalmente e aquelas calculadas numericamente para ambos os diâmetros analisados. Para o diâmetro de 24 mm, a tensão experimental foi de 814,15 MPa, enquanto a simulação numérica resultou em 837,43 MPa, gerando uma diferença de 23,28 MPa. Esse valor corresponde a um erro relativo de apenas 2,78%, o que indica excelente precisão do modelo numérico, mostrando que ele descreve adequadamente o comportamento real observado nos ensaios.

No caso do diâmetro de 32 mm, a tensão experimental registrada foi de 404,40 MPa e a tensão numérica obtida foi de 418,57 MPa. A diferença entre esses valores foi de 14,17 MPa, com erro relativo de 3,50%. Embora ligeiramente maior que no caso anterior, esse erro ainda permanece dentro de uma faixa considerada bastante satisfatória para análises numéricas em engenharia, demonstrando consistência na simulação mesmo para dimensões distintas.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento mecânico de dois insertos utilizados no processo de forjamento, com diâmetros de 24 mm e 32 mm, por meio de simulação numérica utilizando o solver LS-DYNA e posterior validação experimental com instrumentação por extensometria. A partir da integração entre modelagem computacional e dados experimentais, foi possível compreender de forma abrangente a distribuição das tensões atuantes nos componentes, identificar regiões críticas e avaliar a influência geométrica na resposta estrutural dos insertos.

O inserto com diâmetro de 32 mm demonstrou, como esperado, um desempenho estrutural significativamente superior ao de 24 mm. A tensão equivalente de von Mises máxima, tanto na simulação numérica quanto nos dados experimentais, foram substancialmente menores no inserto de 32 mm. As simulações permitem concluir que o aço H13 exibe um comportamento adequado para os insertos analisados, embora com diferenças significativas entre as duas dimensões avaliadas.

Em ambos os casos, verificou-se que as maiores tensões se concentram no raio de concordância entre o corpo cilíndrico e o flange, confirmando esta região como o ponto mais crítico da ferramenta, visto que, esta é uma área propensa a concentração de tensões, o que a torna um foco primário para eventuais falhas e, conseqüentemente, para melhorias do projeto.

A validação numérica-experimental demonstrou excelente concordância entre os métodos. Os erros relativos foram de apenas 2,78% para o inserto de 24 mm e 3,50% para o inserto de 32 mm, valores que confirmam a robustez do modelo numérico adotado e a adequação das condições de contorno e propriedades do material utilizadas. As pequenas discrepâncias observadas podem ser atribuídas a simplificações geométricas, variações inerentes ao processo experimental e limitações instrumentais, mas não comprometem a fidelidade global do modelo.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de análises considerando propriedades dependentes da temperatura, avaliação de fadiga térmica, e estudo de outros materiais amplamente utilizados em ferramentas, como W360 e VWM2IM, a fim de ampliar a aplicabilidade do modelo e contribuir para maior eficiência e segurança no processo de conformação.

REFERÊNCIAS

- ALTA, T.; LILLY, B. **Metal forming: fundamentals and applications**. Materials Park, OH: American Society of Metals, 1983.
- ALTA, T.; NGAILE, G.; SHEN, G. **Cold and hot forging: fundamentals and applications**. 1. ed. Materials Park, OH: ASM International, 2005.
- ANSYS Inc. **ANSYS Mechanical User's Guide**. Version 2024 R1. Canonsburg, PA: ANSYS Inc., 2024.
- BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. 2nd ed. Prentice-Hall, 2014.
- BEER, F. P. et al. **Mecânica dos materiais**. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- BEHRENS, B.-A.; DOEGE, E.; REINSCH, S. **Hot Forging**. In: CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Berlin: Springer, 2014. p. 650-655.
- BENSON, D. J. Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 99, n. 2-3, p. 235-394, 1992.
- COOK, R. D. et al. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 4th ed. John Wiley & Sons, 2002.
- CRAIG, R. R. **Mecânica dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- DAVIS, J. R. **Tool Materials**. In: ASM Specialty Handbook: Tool Materials. ASM International, 2005. p. 45-82.
- DOEGE, E.; BEHRENS, B.-A. **Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen**. 2. ed. Berlin: Springer Vieweg, 2010.
- HALLQUIST, J. O. **LS-DYNA Theory Manual**. Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- HU, Z. et al. **Die Design and Optimization for Forging Processes**. Journal of Manufacturing Processes, v. 24, n. 2, p. 264-273, 2016.
- KIM, N. H.; SANKAR, B. V. **Introduction to Finite Element Analysis and Design**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.
- LANGE, K. **Handbook of Metal Forming**. New York: McGraw-Hill, 1985.
- MADIER, P. **Mesh Convergence Criteria for Finite Element Analysis**. Journal of Computational Mechanics, v. 45, n. 3, p. 112-125, 2020.
- MASCIA, N. T. **Teoria das Tensões e das Deformações**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, 2021.

NGAILE, G.; SHAN, T. **Forging Die System Design**. In: Comprehensive Materials Processing. Oxford: Elsevier, 2009. p. 345-380.

REDDY, J. N. **An Introduction to the Finite Element Method**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

SCHARNING, P. J. **Finite Element Procedures in Engineering Analysis**. Prentice-Hall, 2008.

SILVA, R. M. et al. **Aquisição de Dados em Tempo Real para Análise de Deformações em Processos de Conformação Mecânica**. Revista Brasileira de Engenharia Mecânica, v. 15, n. 2, p. 45-52, 2021.

SMITH, M. **ABAQUS/Standard: User's Manual**. Dassault Systèmes, 2018.

WAGONER, R. H.; CHENOT, J. L. **Fundamentals of Metal Forming**. John Wiley & Sons, 2001.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The Finite Element Method: The Basis**. 5th ed. Butterworth-Heinemann, 2000.