

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GABRIELE FACCIN DAPIEVE

**A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DO
ALUMÍNIO EXTRUDADO**

Alegrete

2024

GABRIELE FACCIN DAPIEVE

**A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DO
ALUMÍNIO EXTRUDADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cristian Pohl
Meinhardt

Alegrete

2024

GABRIELE FACCIN DAPIEVE

**A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DO
ALUMÍNIO EXTRUDADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 13, dezembro de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Cristian Pohl Meinhardt

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Leandro Ferreira Friedrich

UNIPAMPA

Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **TONILSON DE SOUZA ROSENDO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/12/2024, às 11:36, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA FRIEDRICH, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/12/2024, às 11:37, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN POHL MEINHARDT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/12/2024, às 11:38, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1624281** e o código CRC **C2EFBE48**.

Dedico este trabalho àqueles que são resilientes as adversidades da vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, pela resiliência e paciência adquiridas ao longo dessa jornada. Foi Ele quem me deu forças para enfrentar os desafios e superar os momentos de dificuldade, sempre me orientando e proporcionando as condições necessárias para concluir essa etapa tão importante da minha vida.

Aos meus pais, Volnei e Rosimeri, meu sincero agradecimento por todo o apoio e amor incondicional ao longo dos anos. Vocês me deram a oportunidade de realizar esse sonho, sempre acreditando em mim e me incentivando a seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis. Agradeço também ao meu irmão, Wagner, pela compreensão e apoio constante, que foram fundamentais para que eu conseguisse dedicar-me integralmente à minha graduação.

Agradeço imensamente ao meu orientador, professor Dr. Cristian, por toda a orientação, paciência e dedicação ao longo deste trabalho. Suas orientações, suas reuniões esclarecedoras e seu apoio constante foram essenciais para o desenvolvimento desse trabalho e para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Sua experiência e sabedoria fizeram toda a diferença nesta trajetória.

Não poderia deixar de agradecer também aos meus amigos, que estiveram ao meu lado durante todo o processo, oferecendo palavras de incentivo e apoio. Cada um de vocês foi fundamental para que eu não desistisse, sempre me lembrando da importância de seguir em frente, acreditando em mim mesmo.

Agradeço imensamente à empresa SixPro Virtual & Practical Process pela generosidade em disponibilizar a licença acadêmica do *software* QForm UK, essencial para o desenvolvimento do trabalho. Esse apoio foi fundamental para aprimorar nossas análises e garantir resultados de alta qualidade, contribuindo significativamente para o avanço da pesquisa. A parceria com empresas comprometidas com a educação e a inovação, como a SixPro, é de grande valor para a formação acadêmica. Nosso reconhecimento e gratidão por acreditarem em nosso potencial e investirem no futuro.

A todos, meu muito obrigado!

“O gênio é aquele que tem uma grande paciência”.

Thomas Edison

RESUMO

É conhecido que a magnitude da tensão exercida sobre um determinado componente metálico está diretamente correlacionada com temperatura durante o processo de compressão. Este trabalho investigou o comportamento plástico do alumínio extrudado, ao realizar ensaios de recalque em diferentes temperaturas. Através das curvas de tensão vs. deformação verdadeiras, foi possível caracterizar o comportamento de deformação do material em diferentes condições, e estimar as forças necessárias para realizar a deformação. Os ensaios mostraram relação direta da temperatura com a resistência à deformação do corpo de prova. Foram realizados quatro ensaios de compressão, abrangendo distintas faixas de temperatura, sendo elas: a frio (temperatura ambiente $\sim 25^{\circ}\text{C}$), de $110\text{-}150^{\circ}\text{C}$, de $200\text{-}240^{\circ}\text{C}$ e aproximadamente 400°C . Com esse trabalho foi caracterizado o comportamento plástico da liga de alumínio extrudado série 6000, e determinado as equações que descrevem o comportamento plástico para diferentes condições de ensaio. De maneira complementar foi realizada a simulação computacional do ensaio de recalque através do *software* QFORM UK, com o objetivo de comparar com dados experimentais. As simulações dos ensaios a frio, demonstram boa correlação com a curva real, indicando que o *software* reproduz as condições experimentais de maneira semelhante.

Palavras-Chave: alumínio extrudado, liga de alumínio série 6000, ensaio de recalque, conformação mecânica, simulação QForm UK.

ABSTRACT

It is well known that the magnitude of stress exerted on a given metallic component is directly correlated with temperature during the compression process. This study investigated the plastic behavior of extruded aluminum by conducting upsetting tests at different temperatures. Through true stress vs. strain curves, it was possible to characterize the material's deformation behavior under varying conditions and estimate the forces required for deformation. The tests demonstrated a direct relationship between temperature and the resistance to deformation of the specimen. Four compression tests were performed, covering distinct temperature ranges: cold (ambient temperature $\sim 25^{\circ}\text{C}$), $110\text{-}150^{\circ}\text{C}$, $200\text{-}240^{\circ}\text{C}$, and approximately 400°C . This work characterized the plastic behavior of the extruded aluminum alloy from the 6000 series and determined the equations that describe the plastic behavior under different test conditions. Additionally, computational simulation of the upsetting test was carried out using QFORM UK software to compare with experimental data. The simulations of cold tests showed good correlation with the actual curve, indicating that the software reproduces experimental conditions similarly.

Keywords: extruded aluminum, aluminum alloy 6000 series, upsetting test, mechanical forming, QForm UK simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Influência do aumento da temperatura no limite de escoamento e ductilidade da liga metálica.....	20
Figura 2 – Esquema ilustrativo do ensaio de compressão.....	22
Figura 3 – Falha de material dúctil e frágil sob compressão.....	23
Figura 4 – Curvas de tensão-deformação de engenharia e verdadeira para materiais dúcteis e não dúcteis sujeitos a compressão.....	23
Figura 5 – Esquema ilustrativo de: (a) flambagem para corpo de prova com relação comprimento/diâmetro maior que 8; (b) embarrilamento de um corpo de prova de material dúctil e (c) fratura de um material frágil.....	24
Figura 6 – Efeito da temperatura nas propriedades mecânicas.....	25
Figura 7 – Fluxograma das atividades.....	29
Figura 8 – Desenho ilustrativo dos corpos de prova e medidas feitas.....	31
Figura 9 – Representação dos locais de medição após ensaio.....	32
Figura 10 – Máquinas universais de ensaios mecânicos. (a) EMIC e (b) INSTRON	34
Figura 11 - Posicionamento do corpo de prova no <i>software</i>	35
Figura 12 – Seleção do material do corpo de prova no <i>software</i>	35
Figura 13 – Ajustes dos parâmetros das ferramentas no <i>software</i>	36
Figura 14 – Corpo de prova deformado após simulação.....	36
Figura 15 – Resultados gerados pelo <i>software</i> após simulação.....	37
Figura 16 – Imagem dos corpos de provas após deformação.....	38
Figura 17 – Curva tensão vs. deformação verdadeiras dos corpos de prova 04, 05 e 06.....	39
Figura 18 – Curvas tensão vs. deformação verdadeiras dos ensaios à quente.....	40

Figura 19 – Gráfico comparativo dos ensaios a quente e a frio com aproximadamente 40% de deformação.....	42
Figura 20 – Curvas da tensão de escoamento das simulações a frio em comparação com a experimental.....	42
Figura 21 – Comparativo das curvas de tensão de escoamento dos corpos de provas 04, 05 e 06 no ensaio experimental e simulado.....	43
Figura 22 – Gráficos da tensão de escoamento dos corpos de prova à quente com 40% de deformação.....	43
Figura 23 – Curvas de escoamento comparativas dos 06 corpos de prova (CP).....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da barra de alumínio (% at.).....	29
Tabela 2 – Descrição dos corpos de prova e ensaios realizados.....	30
Tabela 3 – Médias das alturas e do diâmetro inicial dos corpos de prova.....	31
Tabela 4 – Médias aritmética das dimensões dos corpos de prova antes e após ensaio do recalque.....	35
Tabela 5 – Equações do comportamento a plástico do material ensaiados a frio.....	37
Tabela 6 – Equações do comportamento a plástico do material ensaiados a quente.....	38
Tabela 7 – Tabela comparativa dos corpos de prova após ensaio e simulação.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS

cap. – capítulo

col. – colaborador

coord. – coordenador

cp. – corpo de prova

et al. – *et alii* (e outros)

f. – folha

fig. – figura

n. – número

org. – organizador

p. – página

tab. – tabela

v. – volume

vs. – *versus*

LISTA DE SIGLAS

ASTM – *American Society for Testing Materials*

FRX – Fluorescência por Difração de Raio X

HTML - *Hypertext Markup Language*

HTTP - *HyperText Transfer Protocol*

XML - *eXtensible Markup Language*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Contextualização do tema e problema de pesquisa.....	16
1.2 Objetivos geral e específico.....	17
1.3 Justificativa.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Propriedades mecânicas da liga de alumínio extrudado.....	19
2.2 Conformação de ligas metálicas e comportamento plástico.....	20
2.3 Ensaio de compressão.....	21
2.4 Conformação a frio vs. a quente.....	24
2.5 Curva tensão vs. deformação verdadeira.....	25
2.6 Simulação computacional.....	27
3 METODOLOGIA	29
3.1 Material de pesquisa.....	29
3.1.1 Equipamentos utilizados.....	30
3.2 Nomenclatura dos corpos de prova e parâmetros do ensaio.....	30
3.2.1 Dimensões dos corpos de prova antes dos ensaios.....	31
3.3 Monitoramento do ensaio.....	32
3.4 Ensaio de compressão.....	32
3.6 Simulação em software.....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 Dimensional dos corpos de prova após ensaios.....	35
4.2 Curvas tensão verdadeira vs. deformação verdadeira.....	36
4.3 Simulações dos ensaios a frio.....	39
4.4 Simulações dos ensaios a quente.....	40
4.5 Comparativo das deformações dos corpos de prova.....	41
5 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS	48
APÊNDICES	50
Apêndice 1 - Quadro com todas as medições dos corpos de prova antes do ensaio	51
Apêndice 2 – Imagens das medidas dos corpos de provas do <i>software</i> após simulação	52

1 INTRODUÇÃO

O alumínio e suas ligas são metais caracterizados por apresentarem excelente conformabilidade. Sua versatilidade e extensa gama de propriedades, o destaca dentre as ligas não ferrosas. As ligas de alumínio são utilizadas para a fabricação de componentes nos mais diversos processos de conformação, desde os mais tradicionais, como: dobramento, extrusão, estampagem e forjamento até processos de maior complexidade, como: estampagem profunda, conformação por estiramento, hidro conformação, entre outros (ASM Handbook, Vol. 14, 1996).

De acordo com a Associação Brasileira do Alumínio – ABAL, o Brasil é o décimo segundo produtor mundial de alumínio primário, quarto produtor de bauxita e terceiro produtor de alumina [www.abal.org.br]. Esses números mostram a importância tecnológica e comercial das ligas de alumínio, que contribuem para a indústria brasileira ao empregar 461.312 pessoas, entre empregos diretos e indiretos. Com uma produção de alumínio primário de 772 mil toneladas anuais, consumo per capita 7,4 kg por ano. De fato, os engenheiros vêm utilizando o alumínio e suas ligas a um bom tempo, principalmente por sua boa capacidade de resistir a oxidação, baixa densidade ($2,7 \text{ g/cm}^3$), aproximadamente três vezes mais leve que o aço e também devido a elevada capacidade de reciclagem. Essas ligas apresentam boas propriedades mecânicas e uma excelente relação entre peso e resistência, favorecendo a redução de peso do componente final (ASM Handbook, Vol. 2, 1990).

O alumínio é capaz de produzir ligas metálicas com diversos elementos químicos, que melhoram as propriedades finais do material. Sua ampla gama de propriedades, resultam em sete séries de ligas metálicas de grande valia, com aplicação nos mais importantes setores da economia. Pode-se citar as indústrias automobilísticas, naval, aeroespacial, alimentícia, farmacêutica, mas também, o alumínio é muito utilizado na construção civil, em linhas de transmissão de energia, em bens de consumo como eletrodomésticos e utensílios em geral (ASM Handbook, Vol. 2, 1990).

Na conformação mecânica, muitos componentes automotivos são forjados a quente em ligas de alumínio, a partir de formas geométricas simples, como barras extrudadas. São exemplos de componentes automotivos fabricados por forjamento a

quente de ligas de alumínio: pistões, bielas, manetes de freio, entre outras peças diversas.

1.1 Contextualização do tema e problema de pesquisa

O extrudado de alumínio é muito utilizado como matéria prima para componentes forjados. Obtido por um processo termomecânico no qual o material é forçado a cruzar um orifício obtendo a forma desejada, neste caso circular maciço. O processo relaciona temperatura, velocidade de deslocamento e tensão de compressão. A liga utilizada nesta pesquisa possui composição química que se enquadra nas ligas de alumínio da série 6000.

A base deste estudo é o ensaio de recalque, também conhecido como ensaio de compressão. Callister e Rethwish (2020) pontuam que esse tipo de ensaio é empregado quando se deseja conhecer o comportamento de um material submetido à deformações plásticas grandes e permanentes. O ensaio é caracterizado por uma força axial aplicada para dentro e uniformemente no corpo de prova, obtendo assim o seu encurtamento. Tem como finalidade determinar o comportamento plástico do material, submetido a esforços de compressão, e a partir deste, obter a curva tensão-deformação verdadeira. Através da curva tensão-deformação é possível determinar os coeficientes que compõe a equação que descreve a curva de escoamento plástico (coeficiente de resistência e coeficiente de encruamento) e também o seu limite de resistência compressiva (BRESCHIANI et. al., 2011).

Uma das características deste tipo de ensaio é o encurvamento das laterais do corpo de prova, uma problemática que pode ser minimizada com a utilização de lubrificantes entre as placas de compressão e objeto ensaiado. Na etapa experimental, é comumente utilizado o grafite como lubrificante, reduzindo assim a possibilidade de tal problema. Outro problema deste ensaio é a flambagem do corpo de prova. A recomendação da normativas ASTM E9-09 (<https://astm.org>), para a fabricação de corpos de prova pequenos é utilizar uma relação entre comprimento (L) e o diâmetro (D) de 0,8 à 2,0.

Empiricamente ao longo da evolução humana, foi descoberto que ao aquecer os metais a ductilidade aumenta juntamente com a elevação da temperatura, o que é o caso do alumínio extrudado. Conhecer a ductilidade dos materiais é importante pois esta propriedade especifica o grau de deformação permitido durante as operações de

fabricação (CALLISTER, 2020). As curvas tensão versus deformação, quando plotadas em um gráfico, permitem observar claramente as diferenças resultantes apenas da variação de um único parâmetro: a temperatura.

De acordo com Schaeffer (2016), a tensão de escoamento (K_f) depende de vários fatores: do material (composição química, microestrutura, etc.), da deformação verdadeira (ϕ), da velocidade de deformação verdadeira ($\dot{\phi}$), e da temperatura (T).

Ao decorrer dos anos e com o avanço da tecnologia, a ampla maioria da indústria metalmeccânica tem utilizado *softwares* de simulação para aprimoramento e redução de custos de produção. Neste trabalho, será utilizado o simulador QForm UK, que é um *software* específico para a simulação computacional de processos de conformação mecânica [qform3D.com]. Sua utilização vem para contribuir para o trabalho desenvolvido, através da simulação do ensaio de recalque nas diferentes condições experimentais; comparação com resultados práticos; além de auxiliar na validação da simulação realizada pelo *software* QForm UK.

1.2 Objetivos gerais e específicos

Este trabalho tem como objetivo geral entender e descrever o comportamento plástico do alumínio extrudado através do ensaio de recalque sob diferentes temperaturas de processamento.

Como objetivos específicos, pode-se citar:

1. Analisar a influência da temperatura no ensaio de compressão;
2. Obter as curvas de tensão vs. deformação verdadeiras em diferentes temperaturas, assim como determinar as equações que descrevem o comportam plástico nessas condições;
3. Simular o ensaio de recalque no *software* QForm UK nas mesmas condições experimentais e correlacionar dados de simulação com resultados de laboratório.

1.3 Justificativa

Tendo em vista a larga utilização do alumínio extrudado na indústria em geral, e principalmente como matéria prima em processos de conformação e forjamento dos metais, o presente trabalho visa entender e determinar o comportamento plástico do alumínio em diferentes temperaturas de operação. O estudo também aborda a simulação computacional do processo de recalque, ferramenta de suma importância na etapa de projeto de um componente forjado. Neste caso, é importante correlacionar a simulação com os dados obtidos nos ensaios experimentais, possibilitando ajustar os parâmetros de simulação. Assim é possível verificar a precisão da simulação em reproduzir os resultados obtidos experimentalmente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Propriedades mecânicas da liga de alumínio extrudado

O alumínio é altamente versátil, com propriedades físicas e mecânicas que variam de acordo com seu nível de pureza e tipos de liga, permitindo aplicações diversas. Suas características mais atraentes incluem leveza, boa aparência, facilidade de fabricação, além de excelente resistência à corrosão. Essas qualidades tornam o alumínio e suas ligas opções econômicas e eficientes para muitos setores (ASM Handbook Vol.2, 1990).

O alumínio puro é um metal que apresenta baixa resistência mecânica, tendo aproximadamente 6,0 MPa, que é um fator que limita a sua aplicação na indústria (COCK, 1999). A principal vantagem do alumínio em relação a outros metais, especialmente ao aço, é seu peso reduzido, devido à baixa densidade de 2,7 kg/m³, aproximadamente um terço da densidade do aço. Elementos de liga são adicionados ao alumínio para melhorar suas propriedades mecânicas, como resistência ao escoamento, tração e dureza.

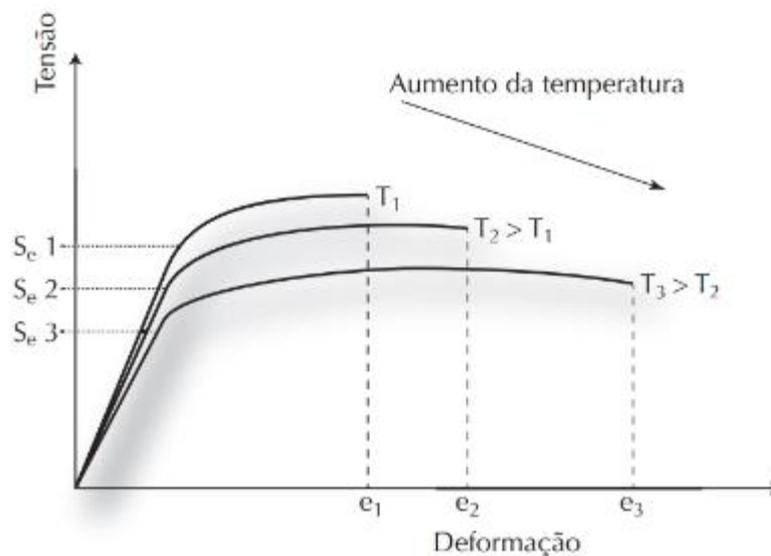
As ligas de alumínio da série 6000, especialmente as 6061 e 6063 são as mais utilizadas na fabricação de componentes mecânicos, pois a combinação de propriedades mecânicas, resistência à corrosão e boa usinabilidade as tornam interessantes para as aplicações industriais. Compostas principalmente por alumínio, magnésio que proporciona maior resistência e silício, que confere dureza e fluidez melhorando a conformabilidade. Ligas dessa série passam por tratamentos térmicos, como a têmpera T6, que eleva a resistência e a ductilidade do material, podendo resultar em resistência a tração entre 200 a 350 MPa.

Setores da indústria que necessitam de materiais leves de alta durabilidade fazem o uso das ligas dessa série. No setor automobilístico Polmear (2006) cita a utilização da liga 6061 também na construção dos chassis e componentes da suspensão, pois contribuem para reduzir o peso do veículo e conseqüentemente reduzir o consumo de combustível. A liga 6082 tem destaque para a aplicabilidade em peças forjadas e usinadas por sua elevada resistência e boa soldabilidade. Usualmente utilizadas em situações de alta pressão e desgaste mecânico.

2.2 Conformação de ligas metálicas e comportamento plástico

A deformação plástica difere da elástica pelo fato de ser irreversível, notoriamente grandes deformações a caracterizam. A tensão aplicada excede o limite de escoamento do material, podendo ser esforços compressivos, trativos, de dobramento e de cisalhamento. Processos de conformação com grande mudança de forma, exigem que o material apresente elevada ductilidade e baixa tensão de escoamento. Segundo Kaminami *et al.* (2013) a ductilidade de um material expressa o grau de deformação permanente possível de ser alcançado no material antes da ruptura; quanto maior for a ductilidade do material maior a deformação permanente que ele pode sofrer antes de se romper.

Figura 1 – Influência do aumento da temperatura no limite de escoamento e ductilidade da liga metálica.



Fonte: KAMINAMI et al (2013).

A Fig. 1 mostra a relação da temperatura com a curva tensão vs. deformação. Quanto maior a temperatura de conformação, maior será a deformação o que caracteriza maior a ductilidade do material. Também pode-se observar que quanto maior a temperatura, menor será a tensão necessária para deformar plasticamente o material. Kaminami *et al.* (2013) descrevem esse fenômeno da seguinte forma, a alta temperatura aumenta a difusão atômica e por consequência a mobilidade das discordâncias, que são falhas estruturais a nível atômico. O movimento das

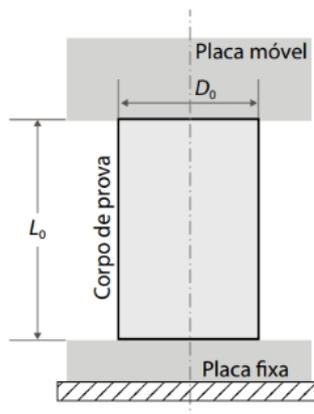
discordâncias define o mecanismo de deformação plástica dos metais. Devido a maior mobilidade de discordâncias, as altas temperaturas provocam um fenômeno denominado de recuperação dinâmica, onde ocorre um rearranjo de discordâncias, capaz de reduzir a densidade das mesmas, resultando em uma menor tensão necessária para a deformação plástica dos metais.

2.3 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão é amplamente utilizado para caracterizar o comportamento plástico dos metais em processo de conformação em que os esforços são predominantemente compressivos. Por exemplo, pode-se citar os componentes utilizados na indústria automotiva. Os processos de fabricação de inúmeros componentes são, em grande parte, através do forjamento de formas geométricas simples, como cilindros, e da estampagem de chapas de metálicas, as quais unidas compõem a estrutura do carro, assim como as colunas e barras de segurança do veículo (SCHAEFFER, 2016).

Este ensaio é caracterizado por ser estático e destrutivo já que a fase plástica do material é atingida. Segundo Mendes e Silveira (2018), o ensaio de compressão consiste no deslocamento da placa móvel a fim de pressionar o corpo de prova. Ao encostar a placa móvel no corpo de prova, uma resistência ao deslocamento é exibida pelo material, gerando assim uma força uniaxial e distribuída no corpo de prova. A partir disso, o corpo de prova sofre deformação por uma força compressiva, a qual resulta no encurtamento do comprimento inicial (L_0) e pela Lei da constância do volume, ao reduzir sua altura inicial, o diâmetro final do corpo de prova será maior. Esse comportamento de deformação é característico de materiais dúcteis (CALLISTER, 2020).

Figura 2 – Esquema ilustrativo do ensaio de compressão.



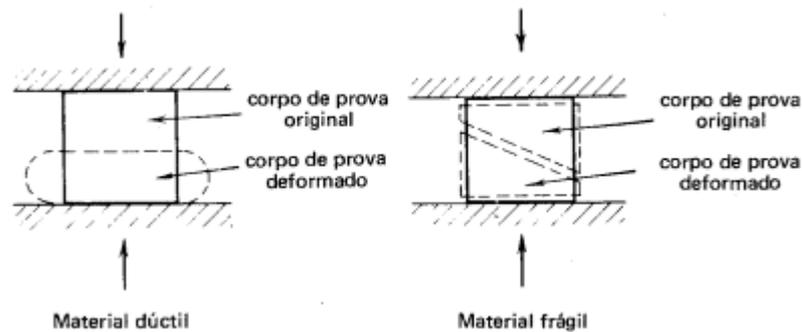
Fonte: MENDES e SILVEIRA (2018).

O ensaio deve seguir as orientações da normativa ASTM E9-09 em relação ao procedimento de ensaio, formato, tamanho e relação entre comprimento (L_0) e diâmetro (D_0) de corpo de prova, além de orientações para a realização de cálculos e medições pós ensaio e análise dos resultados. Para a realização do ensaio deve-se posicionar o corpo de prova no centro da máquina, sob a parte fixa do equipamento, e a parte móvel deve estar localizada bem próxima ao corpo de prova antes do começo do ensaio. Segundo Mendes e Silveira (2018), o mal posicionamento da amostra pode ocasionar alguma fratura, assim invalidando o procedimento. Outras fontes de erros são: não respeitar a relação L_0/D_0 e não garantir o paralelismo entre as faces do corpo de prova, esses fatores podem ocasionar cisalhamento do corpo de prova, invalidando o ensaio.

Alguns parâmetros do ensaio são controlados, como a velocidade e o deslocamento da placa móvel. Esses parâmetros também devem seguir as recomendações da norma ASTM E9-09 e variam para cada formato de corpo de prova. Através da célula de carga do equipamento obtém-se a força aplicada no corpo de prova que é lida e registrada pelo *software* do mesmo.

De acordo com Chiaverini (1986) pode-se observar na Fig.3 que materiais dúcteis tendem a apresentar grande deformação sem rompimento, reduzindo significativamente seu comprimento e aumentando o diâmetro, enquanto que em materiais frágeis, espera-se que ocorra ruptura normalmente por cisalhamento e deslizamento ao longo de um plano inclinado, não havendo grandes deformações nas laterais como observado nos materiais dúcteis.

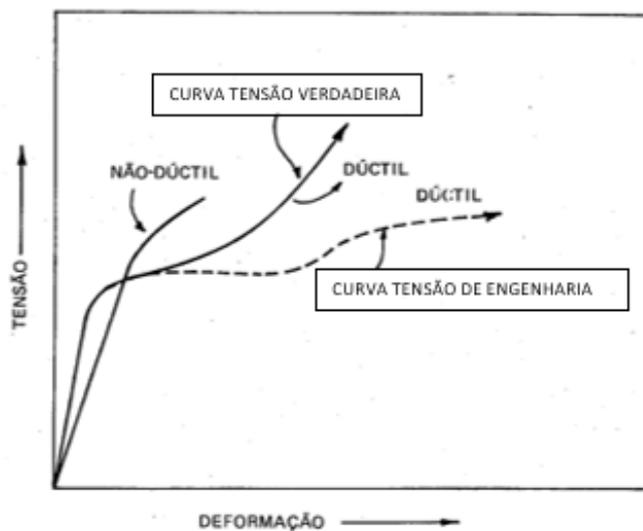
Figura 3 – Falha de material dúctil e frágil sob compressão.



Fonte: CHIAVERINI (1986).

A maioria das ligas metálicas são caracterizadas como materiais dúcteis. A distinção entre as curvas de tensão de engenharia e verdadeira, como mostrado na Fig. 4 é fundamental, pois a de engenharia não considera as variações de área da seção transversal do material durante a deformação, enquanto a verdadeira reflete essas mudanças, proporcionando uma visão mais precisa do comportamento do material sob compressão.

Figura 4 – Curvas de tensão-deformação de engenharia e verdadeira para materiais dúcteis e não dúcteis sujeitos a compressão.



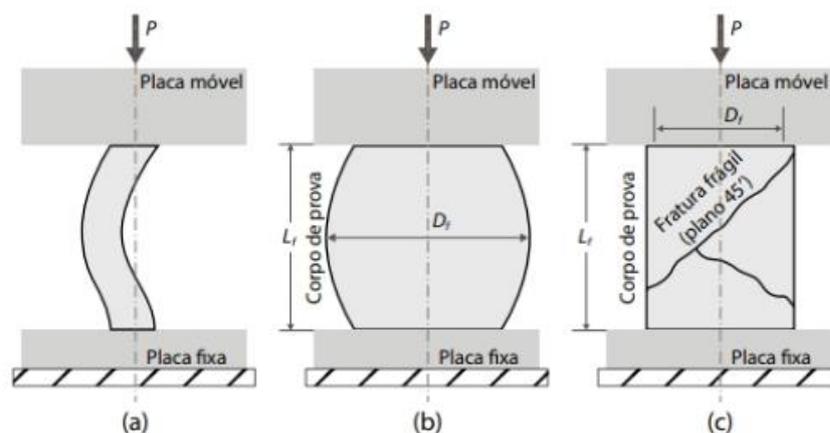
Fonte: adaptado CHIAVERINI (1986).

Essas curvas são essenciais para entender o comportamento mecânico dos materiais sob condições de carga, mostrando como a tensão se relaciona com a deformação em diferentes estágios do processo de compressão. Segundo Mendes e

Silveira (2018) a flambagem do corpo de prova acontece quando a relação comprimento/diâmetro não é respeitada, devendo ser de 3 para 8 em materiais dúcteis e 2 para 3 em materiais frágeis.

O embarrilamento é a curvatura das laterais do corpo de prova após a realização do ensaio. Para Mendes e Silveira (2018) uma forma de amenizar esse efeito é a utilização de um lubrificante entre as faces do corpo de prova e placa móvel. A Fig. 5 abaixo mostra três distintas formas que um corpo de prova pode vir a deformar e suas falhas dependendo da sua geometria ou material.

Figura 5 – Esquema ilustrativo de: (a) flambagem para corpo de prova com relação comprimento/diâmetro maior que 8; (b) embarrilamento de um corpo de prova de material dúctil e (c) fratura de um material frágil.



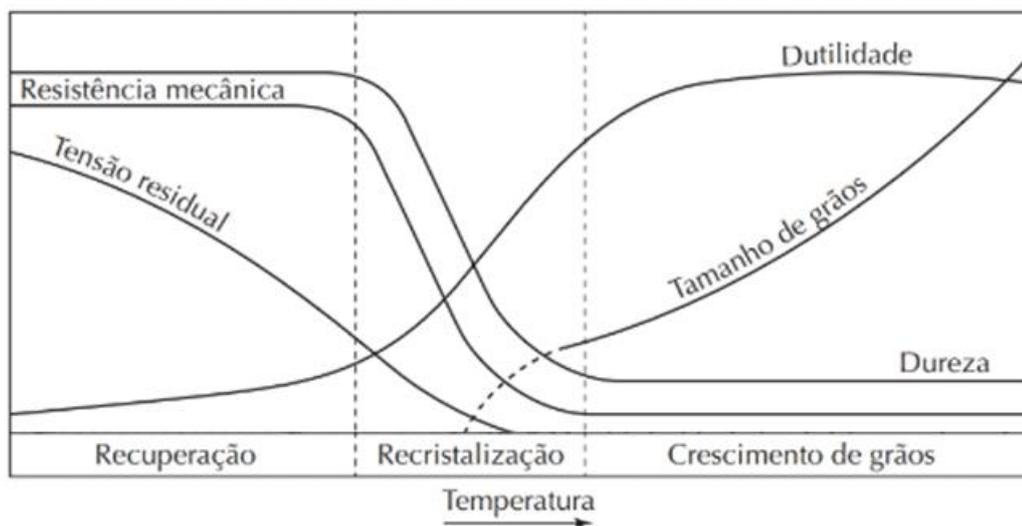
Fonte: MENDES e SILVEIRA (2018).

2.4 Conformação a frio vs. a quente

Inúmeros processos de conformação mecânica necessitam de grande quantidade de deformação plástica. Ao elevar a temperatura de processamento pode-se adequar as propriedades mecânicas do metal para determinadas operações de fabricação, e reduzindo a força necessária para a deformação. Ao elevar a temperatura de processamento, a tensão de escoamento do material é reduzida, o material permanece com baixa dureza e elevada ductilidade durante a deformação. Além do que, em elevadas temperaturas o endurecimento por encruamento é significativamente menor, dessa forma, são possíveis elevadas deformações (CALLISTER, 2020).

O estudo de Kiminami *et al.* (2013), aponta as classificações quanto as faixas de temperaturas para cada tipo de trabalho, designadas em três grupos, sendo eles a frio, a morno e a quente. As faixas de temperatura estão relacionadas com a temperatura de fusão em escala absoluta (T_m), dada em Kelvin. Portanto para o trabalho a frio, a temperatura de conformação tem que ser menor do que $0,3T_m$, para o trabalho a morno, a temperatura varia na faixa de $0,3 - 0,6T_m$ e para a conformação a quente, a temperatura de processo deverá ser superior à $0,6T_m$.

Figura 6 – Efeito da temperatura nas propriedades mecânicas.



Fonte: Adaptado de KIMINAMI *et.al.* (2013).

2.5 Curva tensão vs. deformação verdadeira

A ductilidade é a medida do grau de deformação plástica que o material suporta até a ruptura, fazendo com que a curva se estenda sobre a abcissa do gráfico. Para representar o comportamento plástico do material, geralmente é construída a curva de tensão (σ) vs. deformação (ϵ). No caso de ensaios para caracterizar a conformabilidade de um dado metal sob esforços de compressão, é comum traçar a curva σ vs. deformação verdadeira (φ), pois representa o comportamento real do material, levando em consideração a área instantânea (A_i) do corpo de prova. Em conformação mecânica, a tensão verdadeira acima do limite de escoamento é também denominada de resistência ao escoamento (k_f) sendo definida pela Eq. 1:

$$k_f = \frac{F}{A_i} \quad \text{Eq. (1)}$$

A resistência ao escoamento (k_f) depende de vários fatores: do material (composição química, microestrutura, etc.), da deformação (φ), da velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$), e da temperatura (T).

O comportamento plástico da curva de escoamento pode ser representado, no todo ou em parte, por uma expressão relativamente simples, em geral exponencial. Na literatura (Schaeffer, 2016; Callister, 2019) essa equação é conhecida como equação de Ludwik-Hollomon e está definida na Eq. 2.

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad \text{Eq. (2)}$$

onde C é chamado de coeficiente de resistência e n é o expoente ou coeficiente de encruamento. A literatura (Schaeffer, 2016; ASM, 1996) afirma que tanto o coeficiente de resistência (C) quanto o coeficiente de encruamento (n) diminuem com o aumento da temperatura.

No ensaio de compressão, o equipamento registra Força (N) e deslocamento (mm). Para poder construir a curva σ vs. φ , é necessário determinar a área instantânea (A_i), e para isso é utilizado a Lei da Constância de Volume, que de acordo com Schaeffer (2010), em sua obra *Conformação Mecânica*, considera que o volume (do corpo de prova) final (V_f) é igual ao volume inicial (V_i) em qualquer momento do ensaio, de acordo com a Eq. 3.

$$V_f = V_i \quad \text{Eq. (3)}$$

substituindo volume pelo produto da área pela altura do corpo de prova, obtém-se a Eq. 4

$$A_0 \cdot h_0 = A_i \cdot h_i \quad \text{Eq. (4)}$$

assim, pode-se determinar a área instantânea (A_i), em qualquer momento do ensaio de compressão, ao isolar a variável A_i , obtendo a Eq. 5

$$A_i = \frac{A_0 \cdot h_0}{h_i} \quad \text{Eq. (5)}$$

com esses dados, é possível calcular a tensão verdadeira (Eq. 2) e a deformação verdadeira (Eq. 6) do material, e a partir desta curva determinar a equação que rege o comportamento plástico do material (Eq. 2).

$$\varphi = \ln\left(\frac{h_i}{h_o}\right) \quad \text{Eq. (6)}$$

2.7 Simulação computacional

A utilização de *softwares* de simulação computacional progressivamente vem sendo implementada, tanto em ambientes acadêmicos quanto na indústria. A simulação da deformação de materiais submetidos a esforços mecânicos pode auxiliar na visualização da conformação do componente, permitindo otimização de projeto, reduzindo custos, e possibilitando análises detalhadas de preenchimento, formação de defeitos, tensões e deformações. Bathe (1996) defende que a simulação computacional serve como uma conexão entre o *design* teórico e a manufatura prática, possibilitando previsões mais precisas e economias significativas em tempo e recursos.

No contexto acadêmico a prática da simulação em computador, possibilita que estudantes e pesquisadores compreendam com mais profundidade as reações dos materiais a diferentes parâmetros, como forças aplicadas, temperaturas e velocidades de compressão. Tornando a prática mais dinâmica e segura de ser executada, não precisando de equipamentos físicos de alta complexidade. Feynman (1982) afirma que a simulação digital proporciona um "laboratório virtual" onde cada detalhe pode ser ajustado e testado, alterando completamente a abordagem para o desenvolvimento de novos produtos. O propósito dos *softwares* é justamente ajudar a prever problemas e otimizar parâmetros, reduzindo erros e proporcionando um detalhamento de todo o resultado executado nele.

A indústria, se beneficia diretamente do uso dos simuladores. Através desse método é possível a otimização de processos, antes mesmo da produção começar. No *software* pode-se identificar falhas e ajustar variáveis para que o produto final saia com a qualidade necessária, reduzindo assim o retrabalho. "A manufatura moderna depende cada vez mais da simulação computacional para entender o comportamento

de materiais e processos em nível micro e macro, tornando-se uma ferramenta essencial para decisões de engenharia” (HOSFORD, 2011). Anderson (2004) enfatiza que a simulação permite a exploração do comportamento dos materiais e a otimização de processos industriais, algo que, no passado, não era viável sem custos elevados e a ocorrência de erros.

3 METODOLOGIA

3.1 Material de pesquisa

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada uma barra maciça de alumínio extrudado com 19 mm (3/4 pol.) de diâmetro. A análise química indica que a liga correspondente a série 6xxx. A Tabela 3 apresenta a composição química do material comercial analisado. Foram identificados elementos Si, Fe, Mn e Cu. A análise por FRX indicou que a liga extrudada pertence à série 6000 das ligas de alumínio, orientando a seleção do material no *software* de simulação.

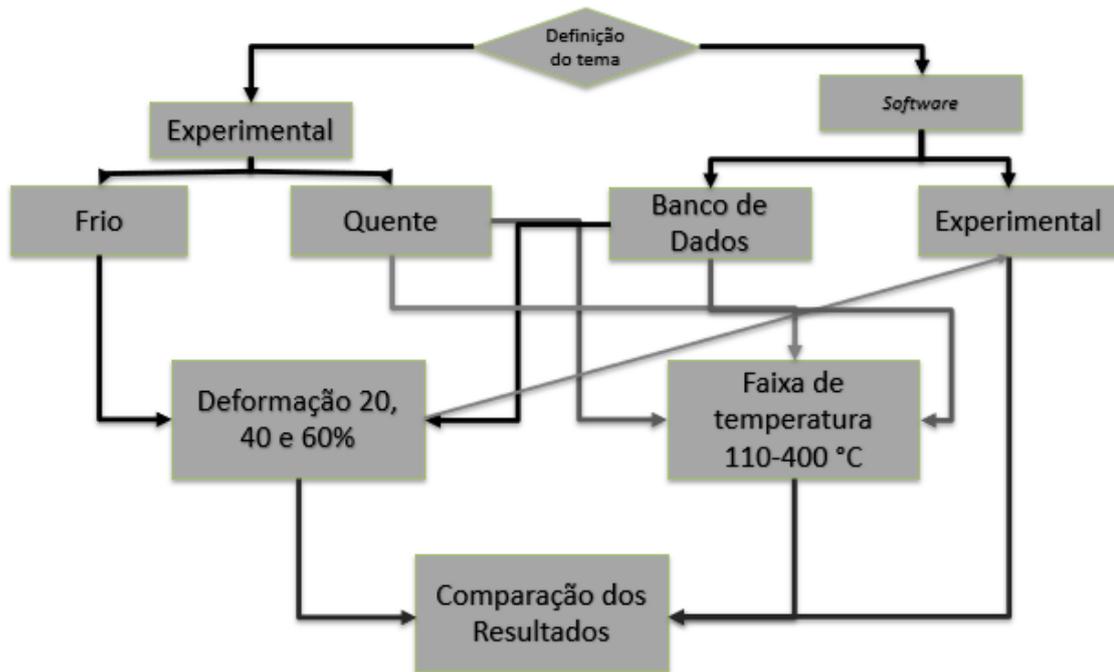
Tabela 1 – Composição química da barra de alumínio (% at.).

Elemento	Al	Si	Fe	Mn	Cu	Outros
Qntd. (%)	97,72	0,70	0,55	0,30	0,10	0,63

Fonte: Análise química em FRX, Unipampa.

Foram produzidos sete corpos de prova (CPs) cilíndricos maciços, com as seguintes dimensões 25xØ19 mm. Após o corte da barra, as extremidades dos corpos de provas foram faceadas para garantir planicidade e paralelismo no ensaio. Foi utilizada a relação L_0/D_0 de 1,3, garantindo boa estabilidade do corpo de prova e evitando flambagem. Nos ensaios de compressão, foram variados os parâmetros de: (a) T - temperatura de ensaio (°C) e (b) φ - deformação plástica. Na Fig. 7 pode ser observado o fluxograma das etapas que compõe o trabalho desenvolvido.

Figura 7 – Fluxograma das atividades.



Fonte: a autora.

3.1.1 Equipamentos utilizados

Para realização do estudo foram utilizados equipamentos específicos para cada tipo de ensaio, todos disponibilizados pelos laboratórios da universidade. Abaixo segue lista dos equipamentos utilizados.

1. Cortadeira Metalográfica;
2. Torno Mecânico Paralelo Universal;
3. Espectrômetro por Fluorescência de Raio X (FRX) (*Epsilon 1 Malvern Panalytical*);
4. Máquina Universal de Ensaio (EMIC 200kN);
5. Máquina Universal de Ensaio Industrial (UTM-HYD 1,5MN);
6. Paquímetro Digital (DIGIMESS 200mm);
7. Termômetro Infra Vermelho de Alta Temperatura (FLUKE 574);
8. Forno Mufla (ML 1300);
9. Software QFORM UK e SolidWorks;

3.2 Nomenclatura dos corpos de prova e parâmetros do ensaio

Abaixo segue tabela com as denominações dos corpos de prova e os parâmetros utilizados.

Tabela 2 – Descrição dos corpos de prova e ensaios realizados.

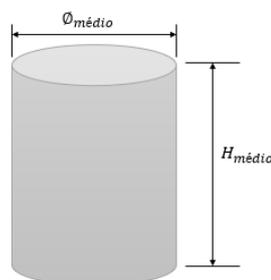
Amostra (CP)	Ensaio	Faixa de Temperatura (°C)	Porcentagem de deformação (%)	Velocidade de deformação (mm/min)	Diâmetro comercial (pol.)
01		110 – 150	40	3	
02	A quente	220 – 240	40	3	
03		400 – 420	40	3	
04		-	20	1	3/4
05	A frio	-	40	1	
06		-	60	1	

Fonte: a autora.

3.2.1 Dimensões dos corpos de provas antes dos ensaios

A Fig. 8 representa o formato do corpo de prova e as principais dimensões medidas.

Figura 8 – Desenho ilustrativo dos corpos de prova e medidas feitas.



Fonte: a autora.

A Tab. 2 apresenta os valores médios de cinco medições realizadas em todos os corpos de prova, antes dos ensaios. As medições foram realizadas com o mesmo

paquímetro digital da DIGIMESS 200 mm (todas as medições estão dispostas no apêndice 1).

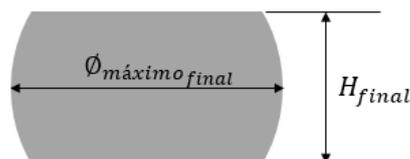
Tabela 3 – Médias das alturas e do diâmetro inicial dos corpos de prova.

Amostra (CP)	Altura média (mm) $H_{\text{médio}}$	Diâmetro médio (mm) $\Phi_{\text{médio}}$
01	25,09	18,65
02	25,04	18,66
03	25,07	18,65
04	24,68	18,64
05	24,77	18,61
06	24,76	18,65
07	24,83	18,66

Fonte: a autora.

Após os ensaios, notou-se a necessidade de efetuar quatro medições, pois a geometria final da peça foi modificada integralmente. Na Fig. 9 pode ser observado os lugares das medições, e a Tab. 3 apresenta as médias aritmética de cinco medições dos dados coletados. No apêndice 2 consta tabela com todas as informações.

Figura 9 – Representação dos locais de medição após ensaio.



Fonte: a autora.

3.3 Monitoramento do ensaio

O monitoramento do ensaio de compressão se dá pelo próprio equipamento utilizado, pois é composto por uma célula de carga que conectado a um computador registra em tempo real, a força [N] que está sendo aplicada no corpo de prova e também a deformação, que é dada em milímetros.

As amostras ensaiadas a quente foi da utilizado um termômetro infra vermelho, além do termostato digital do forno como referência. Como o objetivo do trabalho é verificar a influência da temperatura no comportamento plástico, as amostras foram aquecidas em diferentes temperaturas. Foi utilizado o forno do tipo mufla e ajustado nas seguintes temperaturas: (a) 600°C; (b) 450°C e (c) 300°C. Ao atingir a temperatura desejada o corpo de prova foi inserido no forno e mantido no mesmo por três horas para adequado encharque.

No ensaio a quente, os corpos de prova foram dispostos dentro de um cadinho com areia, com objetivo de manter a inércia térmica durante o transporte dos corpos de prova, até a máquina de ensaio. Para medir a temperatura do corpo de prova, utilizou-se o termopar de contato, que é disponibilizado pelo termômetro infravermelho, modelo 574, e então mediu-se a temperatura da superfície do corpo de prova no momento de colocar no equipamento para o ensaio.

3.4 Ensaio de compressão

No ensaio de compressão foram variados dois parâmetros: temperatura e velocidade de deformação. Para os ensaios a quente, a velocidade de deformação foi maior (3 mm/min), isto para reduzir o tempo de ensaio e por consequência minimizar a perda de temperatura do corpo de prova. Enquanto que nos ensaios a frio, a velocidade de deformação foi de 1 mm/min, recomendado pela norma ASTM E9-09. Vale ressaltar que ambas as velocidades de deformação, são velocidades lentas, para que não influenciem nos resultados dos ensaios.

Para os ensaios de deformação a frio foi utilizada a máquina INSTRON (Fig.10b), que possui maior capacidade de carga (1500kN). Já para os ensaios a quente foram realizados na EMIC (Fig.10a), com 200kN de capacidade.

Figura 10 – Máquinas universais de ensaios mecânicos. (a) EMIC e (b) INSTRON.



Fonte: a autora.

3.5 Simulação em software

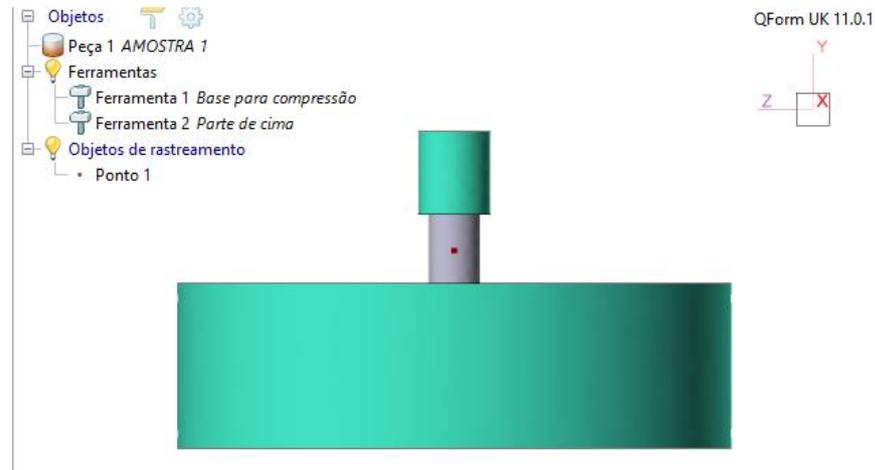
Para a simulação computacional do ensaio de recalque foi utilizado o *software* QForm UK. Para modelar a geometria tridimensional das matrizes e dos corpos de prova foi utilizado o *software* de modelagem SolidWorks.

Para a simulação foram aplicados todos os parâmetros experimentais, como a geométrica inicial do corpo de prova, condições de contorno do ensaio (temperatura do ambiente, condição de lubrificação) e principalmente velocidade de compressão e temperatura do corpo de prova. Na biblioteca do *software* foi selecionado a liga de alumínio 6061, material que mais se assemelhou com o material da barra de alumínio extrudado.

As etapas para a realização da simulação seguem o seguinte fluxo:

1. Configuração da geometria do material: cada modelagem foi realizada igualmente ao do corpo de prova físico ensaiado.

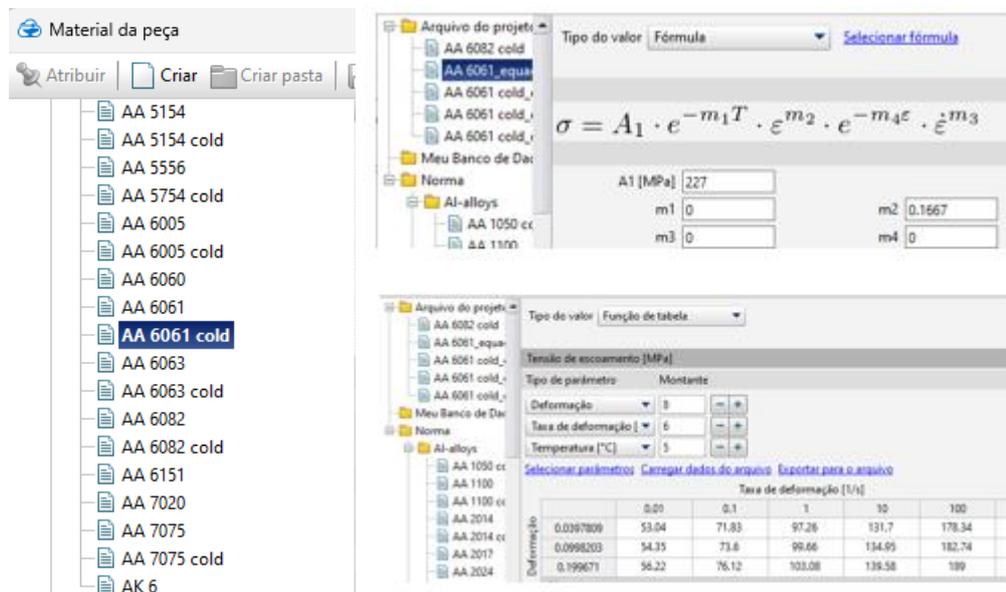
Figura 11 - Posicionamento do corpo de prova no *software*.



Fonte: a autora.

- Definição de propriedades do material: foi utilizado os dados da biblioteca do *software* para a liga 6061 na função tabela, e para as simulações com as constantes retiradas a partir da equação de Ludwik-Hollomon a função fórmula.

Figura 12 – Seleção do material do corpo de prova no *software*.



Fonte: a autora.

- Aplicação de condições de contorno e parâmetros de compressão: configurado de acordo com as condições feitas em laboratório, tipo de fixação, velocidade de ensaio, lubrificação e temperatura.

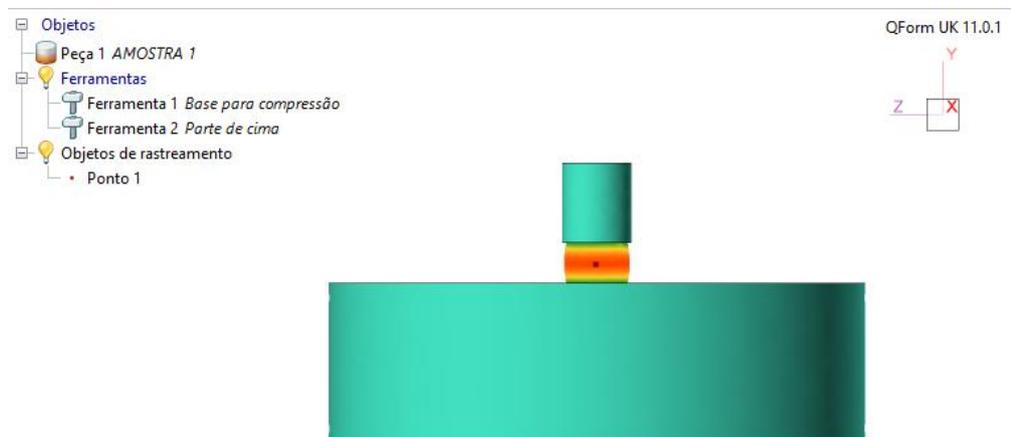
Figura 13 – Ajustes dos parâmetros das ferramentas no *software*.

Acionamento		
Ferramenta 1: Base para compressão		+QY
Ferramenta 2: Parte de cima		TESTEQUENTE 13.10
Lubrificante		Cold forging\Steels\Graphite + water
Ferramenta 1: Base para compressão		Cold forging\Steels\Graphite + water
Ferramenta 2: Parte de cima		Cold forging\Steels\Graphite + water
Material		4140
Ferramenta 1: Base para compressão		4140
Ferramenta 2: Parte de cima		4140
Temperatura [°C]		20
Ferramenta 1: Base para compressão		20
Ferramenta 2: Parte de cima		20
Colocar em contato		▼ mover para trás primeiro
Ferramenta 1: Base para compressão		▼ mover para trás primeiro
Ferramenta 2: Parte de cima		▼ mover para trás primeiro
Atrito entre ferramentas		Aço-aço sem lubrificação
Simulação de ferramentas acopladas	<input type="checkbox"/>	
Modelo de deformação de ferramenta		▼ Separado
Ferramenta 1: Base para compressão	<input type="checkbox"/>	
Ferramenta 2: Parte de cima	<input type="checkbox"/>	
Transferência de calor para a peça		▼ Simples
Ferramenta 1: Base para compressão		▼ Simples
Ferramenta 2: Parte de cima		▼ Simples

Fonte: a autora.

4. Simulação do ensaio: após os parâmetros estabelecidos a simulação foi iniciada, a força compressiva foi aplicada de forma gradual que faz o *software* calcular a deformação a partir de elementos finitos, prevendo a sua geometria final.

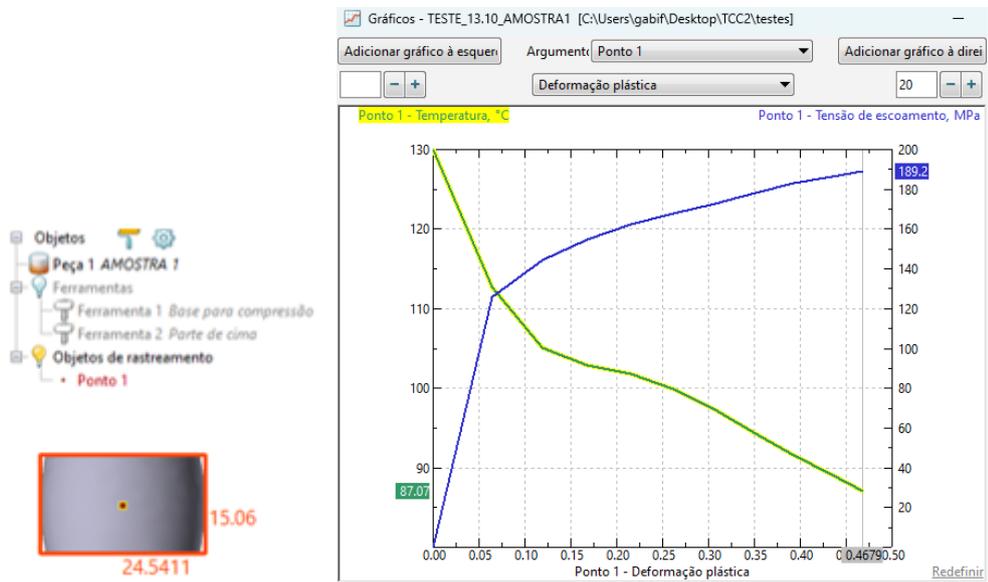
Figura 14 – Corpo de prova deformado após simulação.



Fonte: a autora.

5. Análise dos resultados: após a simulação, é possível obter dados para análise, incluindo dimensões do corpo de prova após deformação, tensão-deformação verdadeiras, deformação plástica, valores de tensões e também comportamento térmico do material.

Figura 15 – Resultados gerados pelo *software* após simulação.



Fonte: a autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dimensões dos corpos de prova após ensaios

Após a realização dos ensaios foi feita a medição dos corpos de prova deformados. As medidas podem ser visualizadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Média aritmética das dimensões dos corpos de prova antes e após ensaio de recalque.

CP	Deformação estimada	Deformação (mm)	Diâmetro inicial (mm)	Diâmetro máximo final (mm)	Altura inicial (mm)	Altura final (mm)	Deformação Relativa (Δh)
01		10,96	18,65	25,85	25,09	14,13	44%
02	40%	10,69	18,66	25,68	25,04	14,35	42,7%
03		7,85	18,65	24,29	25,07	17,22	31,3%
04	20%	6,44	18,64	22,35	24,68	18,24	26,1%
05	40%	9,88	18,61	25,69	24,77	14,89	39,9%
06	60%	15,12	18,65	30,85	24,76	9,65	61,2%

Fonte: a autora.

Na Fig. 16 podem ser visualizados os corpos de prova após ensaio. O corpo de prova 07 não foi deformado, esse foi adicionado para comparação.

Figura 16 – Imagem dos corpos de provas após deformação.

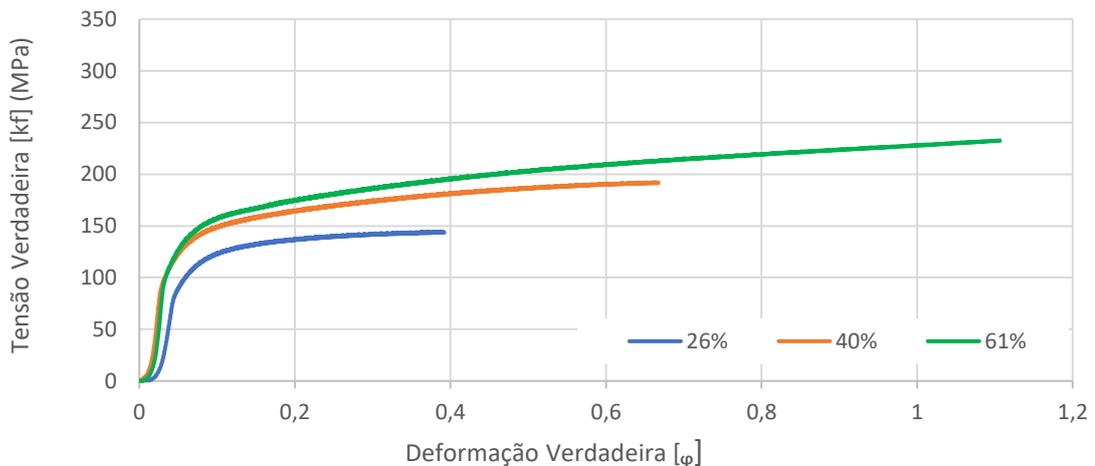


Fonte: a autora.

4.2 Curvas tensão vs. deformação verdadeiras

Na Fig. 17 podem ser observadas as curvas tensão vs. deformação verdadeiras para ensaios de recalque realizados a frio. Os ensaios foram realizados com uma variação gradual na deformação, sendo: 26%, 40% e 61%, respectivamente.

Figura 17 – Curvas tensão vs. deformação verdadeiras dos corpos de provas 04, 05 e 06.



Fonte: a autora.

Observa-se um aumento da resistência mecânica ao elevar o percentual de deformação. Comportamento condizente com a literatura, Callister (2019). Pode-se inferir que o aumento de resistência apresentado, é devido ao encruamento do material.

Na Tab. 5 pode-se observar os coeficientes e as equações que descrevem o comportamento plástico do material a frio, obtidas a partir da região de encruamento uniforme das curvas tensão vs. deformação verdadeiras. Para ambos coeficientes, observou-se um aumento em seu valor, ao elevar o percentual de deformação. Os coeficientes estão condizentes com os valores verificados por Schaeffer (2010) para as ligas de alumínio.

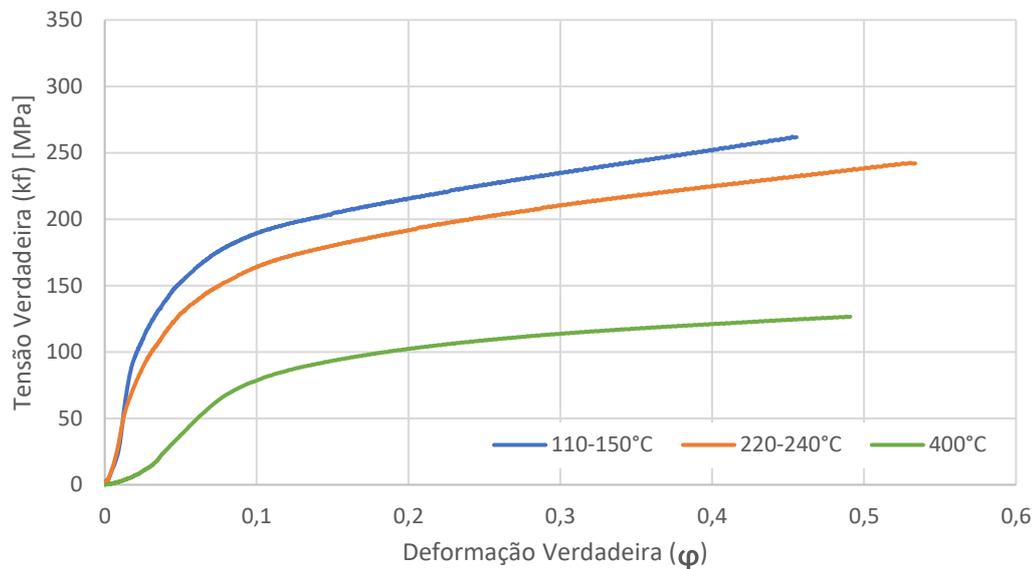
Tabela 5 – Equações do comportamento plástico do material ensaiado a frio.

Corpo de Prova (CP)	ΔH real	Equação de Hollomon	C	n
04	26,1%	$kf = 151,740 * d^{0,1165}$	151,740	0,1165
05	39,9%	$kf = 201,790 * d^{0,1549}$	201,790	0,1549
06	61,2%	$kf = 227,772 * d^{0,1667}$	227,772	0,1667

Fonte: a autora.

Na Fig. 18 pode ser observada as curvas tensão vs. deformação verdadeiras para os ensaios de recalque realizados em elevadas temperaturas.

Figura 18 – Curvas tensão vs. deformação verdadeiras dos ensaios a quente, corpos de provas 04,05 e 0,6.



Fonte: a autora.

Observa-se o efeito da temperatura na queda da resistência a deformação do material. Os dois ensaios com faixas de temperaturas entre 110-150°C e 220-240°C, mostra o material com resistência ligeiramente superior ao ensaiado a frio, com tensão de escoamento em torno de 150 MPa. Enquanto que em elevada temperatura, na faixa de 400°C, o valor da tensão de escoamento cai significativamente para a faixa dos 80 MPa.

Ao obter as equações que descrevem o comportamento plástico a quente do material (Tab. 6), observa-se uma queda nos valores de ambos os coeficientes, na medida que aumenta a temperatura de ensaio, comportamento em acordo com

Kiminami (2013). Ao comparar o corpo de prova 05, ensaiado a frio, com o corpo de prova 03, ensaiado a quente, a redução no coeficiente de resistência foi significativa, 26% enquanto que o coeficiente de encruamento aumentou 48,61%.

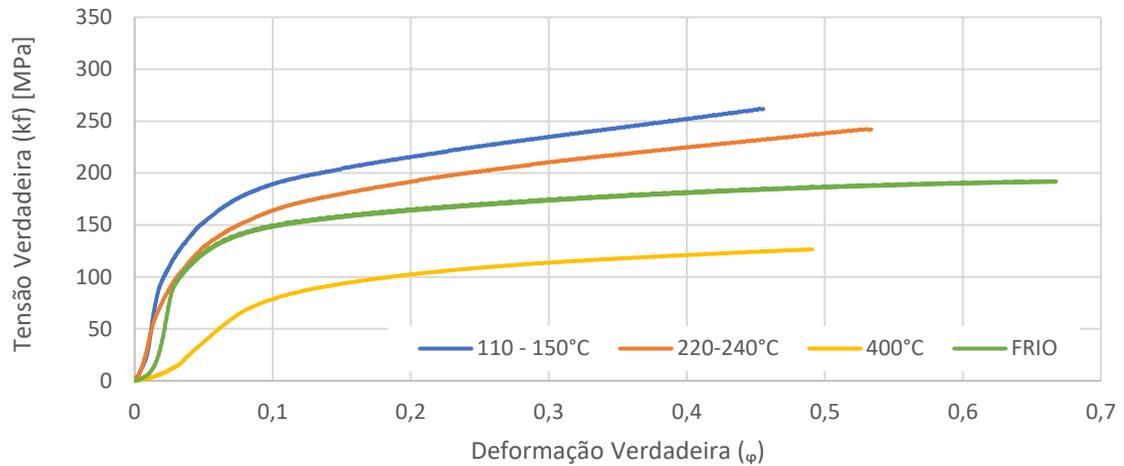
Tabela 6 - Equações do comportamento plástico do material ensaiado a quente.

Corpo de Prova (CP)	ΔH real	Equação de Hollomon	C	n
01	44%	$kf = 303,9688 * d^{0,2111}$	303,9688	0,2111
02	42,7%	$kf = 277,7154 * d^{0,2291}$	277,7154	0,2291
03	31,3%	$kf = 149,5202 * d^{0,2302}$	149,5202	0,2302

Fonte: a autora.

Ao comparar os ensaios a frio e a quente (Fig. 18), pode-se observar que as curvas obtidas em ensaios com temperatura entre 110-240 °C, curiosamente apresentam resistência ligeiramente superior, ao do corpo de prova ensaiado a frio. Esse aumento de resistência pode estar atrelado ao fenômeno de envelhecimento da liga, que ocorre em ligas de alumínio tratáveis termicamente, como é o caso da série 6000 utilizada. Este tratamento ocasiona na microestrutura a formação de finos precipitados que aumentam a resistência mecânica do material. A literatura (Callister, 2019) relata que o tempo de encharque e a temperatura obtida pode ter resultado no tratamento térmico de envelhecimento, conhecido comercialmente como T6. No terceiro ensaio a quente, o qual atingiu a temperatura de 400°C, fica evidente a redução na resistência do material. Na Fig.19 é possível observar as curvas de deformação e suas diferenças, na condição a frio, a tensão de escoamento é aproximadamente 140 MPa, enquanto que na condição a quente (400°C), a tensão de escoamento reduz para aproximadamente 80 MPa.

Figura 19 – Gráfico comparativo dos ensaios a quente e a frio com aproximadamente 40% de deformação.

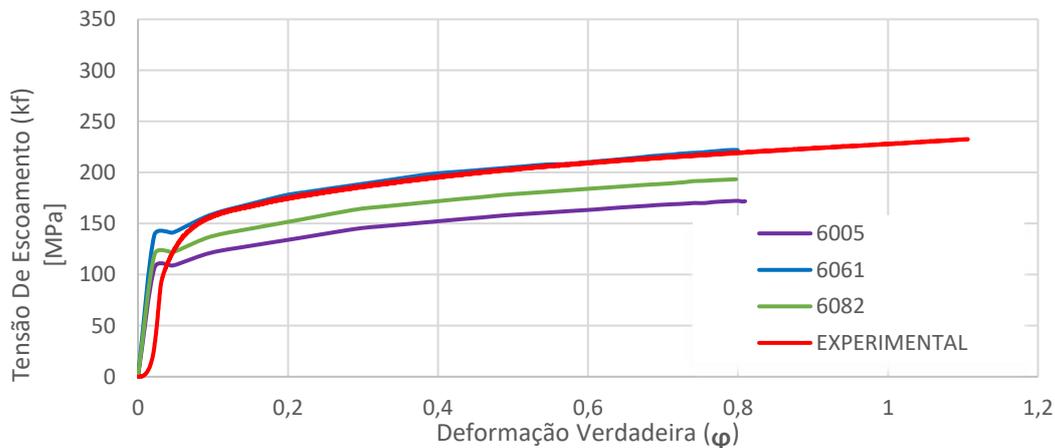


Fonte: a autora.

4.4 Simulação dos ensaios a frio

Inicialmente foi realizada uma comparação (Fig. 20) entre a curva σ vs. φ do ensaio a frio (CP 06) com as curvas obtidas nas simulações com diferentes materiais da classe 6000, selecionados através do banco de dados do *software*. Percebe-se que a simulação com a liga 6061 foi a que mais se assemelhou ao resultado experimental, justificando a sua escolha para a realização das demais simulações do trabalho.

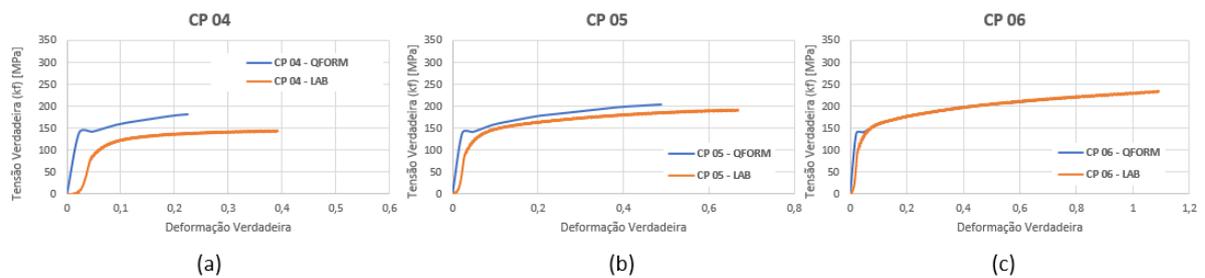
Figura 20 – Curvas da tensão de escoamento das simulações a frio em comparação com a experimental.



Fonte: a autora.

A plotagem das curvas de escoamento dos ensaios a frio permitiu verificar o comportamento do material em relação a simulação sem a interferência da temperatura. A melhor correlação foi verificada ao simular o ensaio com 60% de deformação (CP 06), como pode ser visto na Fig. 21.

Figura 21 – Comparativo das curvas de tensão de escoamento dos corpos de provas 04, 05 e 06 no ensaio experimental e simulado.

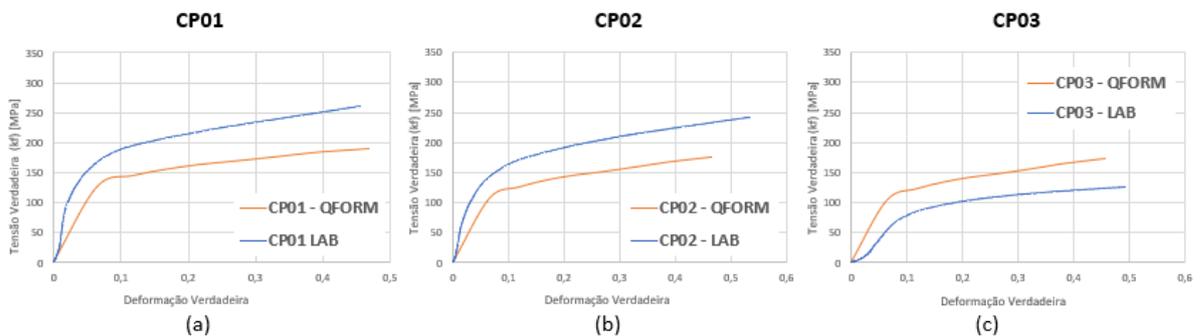


Fonte: a autora.

4.5 Simulação dos ensaios a quente

Os gráficos da Fig. 22 permitem comparar as curvas de tensão *versus* deformação verdadeiras obtidas por simulação dos ensaios a quente, com as curvas experimentais.

Figura 22 – Gráficos da tensão de escoamento dos corpos de prova à quente com 40% de deformação.



Fonte: a autora.

Observa-se que a simulação a quente não reproduziu adequadamente os resultados obtidos no ensaio experimental. A figura 17 ilustra a discrepância entre os

dados gerados pelo *software* e os obtidos experimentalmente, evidenciando as diferenças nas curvas de deformação do material em condições de alta temperatura.

4.6 Comparativo das deformações dos corpos de prova

A Tab. 7 mostra os dados dimensionais dos corpos de prova obtidos após os ensaios e simulações. Nota-se que a variação no diâmetro se manteve similar, enquanto a variação da altura foi mais discrepante. Observa-se boa correlação ao comparar o diâmetro máximo do corpo de prova simulado e deformado, experimentalmente. Verificou-se em média 4,11% de variação do diâmetro máximo, e um máximo de 5,59% de variação. Já a variação na altura do corpo de prova após a deformação, foi maior, apresentando uma diferença média de 6,65% e um máximo de 12,66%.

Tabela 7 – Tabela comparativa dos corpos de prova após ensaio e simulação.

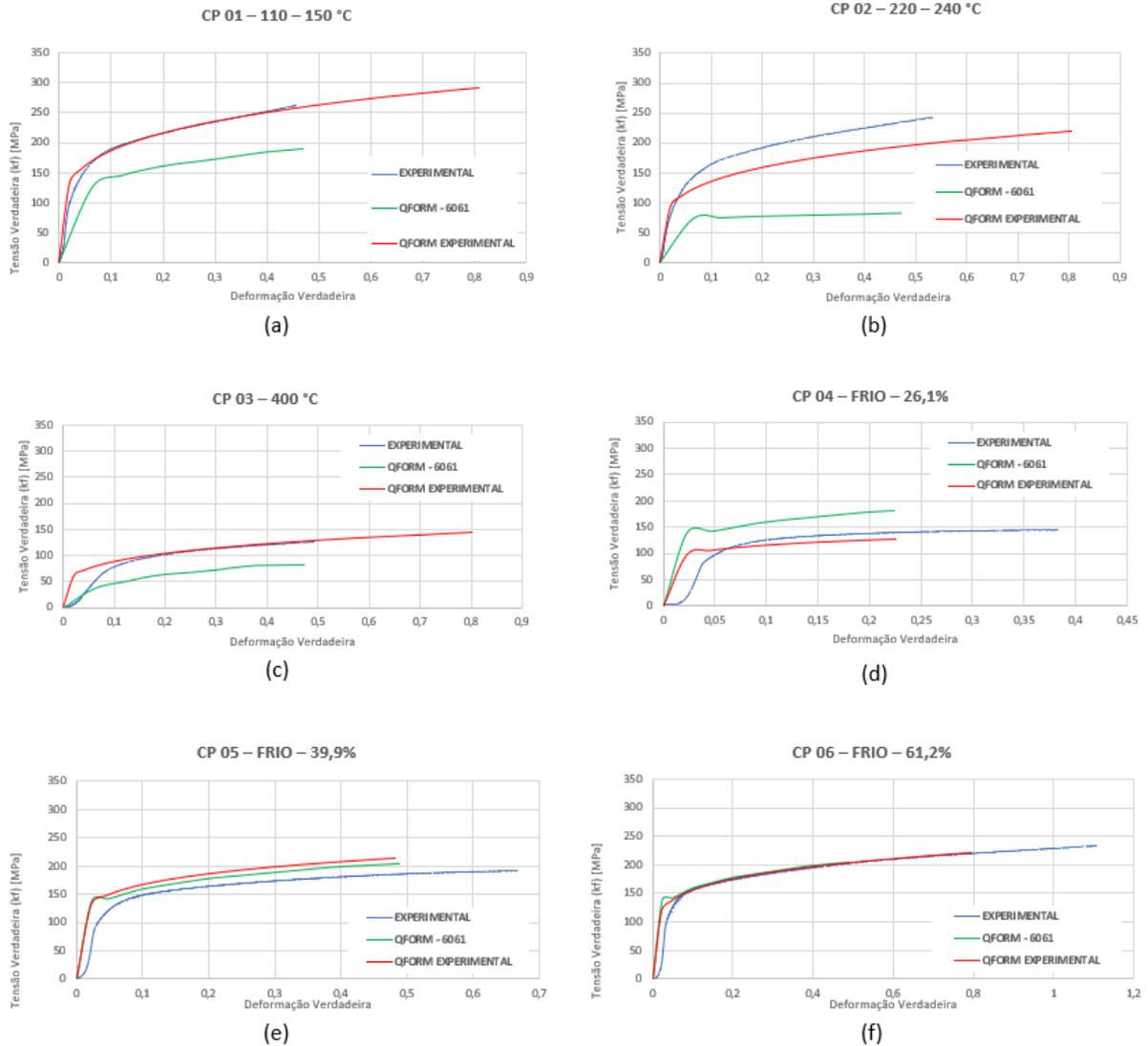
Corpo de prova (CP)	Experimental		Simulado		Variação	
	Ø máximo final (mm)	Altura final (mm)	Ø máximo final (mm)	Altura final (mm)	$\Delta\varnothing$	Δh
01	25,85	14,13	24,54	15,06	5,07%	-6,58%
02	25,68	14,35	24,57	15,03	4,32%	-4,74%
03	24,29	17,22	24,58	15,04	-1,19%	12,66%
04	22,35	18,24	21,10	19,74	5,59%	-8,22%
05	25,89	14,89	24,46	14,87	5,52%	0,13%
06	30,85	9,65	29,92	10,38	3,01%	-7,56%

Fonte: a autora.

A Fig. 21 mostra a comparação entre a curva do ensaio a frio com as curvas das simulações feitas no *software*. Percebe-se que a escolha do material da biblioteca do QForm UK foi correta. Também é possível ver que o ensaio experimental obteve o mesmo comportamento da curva quando anexada ao programa a partir da equação da tensão de escoamento, kf , validando a pesquisa, como pode-se ver na Fig. 13 e na Fig. 16 (f).

A Fig.23 contém todas as curvas analisadas, o comparativo entre os três métodos de obtenção da curva de escoamento do material: experimental, simulação com dados do *software* e obtenção da equação “ kf ” a partir dos dados experimentais.

Figura 23 – Curvas de escoamento comparativas dos 6 corpos de prova (CP).



Fonte: a autora.

Nota-se o comportamento semelhante entre as curvas, o achatamento da curva quando a temperatura é elevada e a discrepância entre elas quando o fenômeno de envelhecimento da liga ocorreu experimentalmente pelas condições de contorno impostas pelo meio.

5 CONCLUSÃO

O estudo analisou os efeitos da temperatura no comportamento mecânico do alumínio extrudado durante o processo de deformação plástica. Foram utilizadas três metodologias: ensaios de recalque realizados em laboratório, simulações computacionais com o uso de bancos de dados disponíveis em *software* – QForm UK, e simulações baseadas nos dados obtidos experimentalmente. Nessas simulações, as curvas obtidas em laboratório foram reproduzidas a partir das equações derivadas dos dados experimentais, com os coeficientes resultantes aplicados no *software*, utilizando a função fórmula para gerar novas curvas.

As equações que descrevem o comportamento plástico obtidas nos ensaios a frio, foram condizentes com a literatura, apresentando aumento dos coeficientes à medida que aumenta o percentual de deformação.

Já nos ensaios de recalque a quente, nas temperaturas entre 110-240 °C, houve um pequeno aumento de resistência mecânica, o que sugere ter ocorrido tratamento térmico de envelhecimento do material. Já no ensaio com temperatura de 400 °C houve queda de resistência mecânica e queda no coeficiente de resistência, condizente com a literatura.

Os resultados indicaram que a seleção do material no *software* foi adequada, visto que as curvas de escoamento simuladas a frio apresentaram boa concordância com os dados experimentais. Verificou-se que a temperatura exerce influência direta na deformação do alumínio, sendo essencial o controle da temperatura e do tempo de encharque. Quando inadequado, pode ocorrer um tratamento térmico que aumenta a resistência do material, sem promover amolecimento do material.

Nos ensaios realizados a quente, as curvas obtidas através da simulação utilizando o banco de dados, não apresentaram uma correlação tão próxima com as curvas experimentais. Esses resultados podem ser atribuídos à dificuldade em medir com exatidão a temperatura do corpo de prova no momento do ensaio, e a não previsão do *software* do aumento de resistência devido a um possível envelhecimento, nas temperaturas entre 110-240 °C.

Conclui-se que o controle rigoroso da temperatura e do tempo de encharque é determinante para o sucesso do ensaio de recalque do alumínio extrudado, tendo em vista grandes deformações do material. Além disso, ressalta-se que a integração entre experimentos laboratoriais e simulações computacionais possibilitou a validação dos resultados. A simulação também demonstrou ser uma abordagem importante para a análise do comportamento plástico dos materiais, permitindo extrapolar para geometrias mais complexas, e obter previsões de tensões e deformações dos processos de conformação, como em peças forjadas em ligas de alumínio.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, David M. *Design for Manufacturability*. Productivity Press, 2004.

ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International, 1990.

BALDAM, Roquemar de Lima; VIEIRA, Estéfano Aparecido. *Fundição: processos e tecnologias correlatas*. 2. ed. São Paulo: LTC, 2014.

BATHE, Klaus-Jürgen. *Finite Element Procedures*. Prentice Hall, 1996.

CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 10. ed. LTC, 2020.

CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. *Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada*. 5. ed. LTC, 2019.

CALLISTER, William D. Jr. *Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada*. LTC. ISBN 9788521636991.

CHIAVERINI, Vicente. *Tecnologia mecânica: estruturas e propriedades das ligas metálicas*. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

DDS. *QForm UK 2016: Application and Industrial Case Studies*. Disponível em: <https://www.qform3d.com>. Acesso em: 31 out. 2024.

FEYNMAN, Richard P. *Simulating Physics with Computers*. International Journal of Theoretical Physics, 1982.

HUAWEI ALUMINUM. *Properties and widely applications of 6000 series aluminum alloy*. Disponível em: <https://aludepot.com>. Acesso em: 31 out. 2024.

KAMINAMI, Claudio Shyinti; CASTRO, Walman Benício de; OLIVEIRA, Marcelo Falcão. *Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos*. 2. ed. São Paulo: LTC, 2013.

LUDWIK, R.; HOLLOMON, J. H. *The plasticity of metals*. Proceedings of the American Society for Testing and Materials, Philadelphia, v. 35, p. 1305-1328, 1935.

MATWEB. *Overview of materials for 6000 Series Aluminum Alloy*. Disponível em: <https://www.matweb.com>. Acesso em: 31 out. 2024.

MENDES, Cláudia Luisa; SILVEIRA, Aline Morais da. *Ensaaios mecânicos*. LTC, 2018.

ONLINE METALS. *Aluminum 6061-T6 vs Aluminum 6063-T5*. Disponível em: <https://www.onlinemetals.com>. Acesso em: 31 out. 2024.

PAVAN, J. S.; RODRIGUES, R. C. *Mecânica dos materiais*. São Paulo: Editora Blucher, 2015.

POLMEAR, I. J. *Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals*. Elsevier, 2006.

SCHAEFFER, Lírio. *Conformação mecânica*. 3. ed. São Paulo: Érica, 2010.

SCHAEFFER, Lírio; NUNES, Rafael Menezes; BRITO, Alberto Moreira Guerreiro. *Tecnologia de estampagem de chapas metálicas*. Porto Alegre: Rígel, 2017.

SILVA, Lucas Filipe Martins da. *Comportamento mecânico dos materiais*. Quântica Editora, 2017.

STEIN, Ronei Tiago; MENDES, Cláudia Luisa; SILVEIRA, Aline Morais da; et al. *Mecânica aplicada*. LTC, 2018.

APÊNDICES

Apêndice 1 - Quadro com todas as medições dos corpos de provas antes do ensaio

Amostra (CP)	Altura	1	2	3	4	5	Média
	Diâmetro						
01	Altura	25,09	25,10	25,06	25,08	25,12	25,09
	Diâmetro	18,65	18,65	18,67	18,66	18,63	18,65
02	Altura	25,05	25,05	25,04	25,03	25,02	25,04
	Diâmetro	18,72	18,64	18,68	18,62	18,65	18,66
03	Altura	25,11	25,03	25,08	25,08	25,07	25,07
	Diâmetro	18,66	18,67	18,65	18,65	18,64	18,65
04	Altura	24,69	24,70	24,67	24,68	24,67	24,68
	Diâmetro	18,62	18,63	18,65	18,64	18,66	18,64
05	Altura	24,80	24,78	24,77	24,77	24,75	24,77
	Diâmetro	18,63	18,62	18,60	18,61	18,60	18,61
06	Altura	24,77	24,75	24,77	24,76	24,77	24,76
	Diâmetro	18,66	18,65	18,63	18,64	18,65	18,65
07	Altura	24,83	24,82	24,84	24,83	24,85	24,83
	Diâmetro	18,66	18,67	18,64	18,65	18,67	18,66

Apêndice 2 – Imagens das medidas dos corpos de provas do *software* após simulação.

