

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEM
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

LEONARDO DA SILVA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE EXTRUSÃO EM CANAL
ANGULAR (ECAP) COM ÂNGULO DE INTERSEÇÃO DE 120°**

JOINVILLE

2022

LEONARDO DA SILVA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE EXTRUSÃO EM CANAL
ANGULAR (ECAP) COM ÂNGULO DE INTERSEÇÃO DE 120°**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica pelo Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Medeiros

JOINVILLE

2022

LEONARDO DA SILVA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE EXTRUSÃO EM CANAL
ANGULAR (ECAP) COM ÂNGULO DE INTERSEÇÃO DE 120°**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica pelo Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Medeiros

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo de Medeiros
UDESC/CCT

Membros:

Prof. Dr. Athos Henrique Plaine
UDESC/CCT

Ms. Jailson da Silva
UDESC/CCT

Joinville, 29 de julho de 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde e por guiar meus passos até hoje.

Aos meus pais, Anezio e Silvana, por todo amparo, esforço e suporte em toda a minha criação e que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória. Além dos meus pais, sou grato à minha família, em especial aos meus avós, Gervásio e Madalena, pelo apoio que sempre me deram durante toda a minha vida.

À minha namorada, Gabrielle, que sempre esteve ao meu lado dando suporte, oferecendo ajuda e me fornecendo um pouco de paz em qualquer caos que eu passasse, principalmente na reta final para a realização deste trabalho.

Agradeço meu amigo Vitor Ferreira por todo companheirismo, desde o início do curso, e ao meu amigo Guilherme que mesmo de longe deu suporte emocional nas nossas ligações em que jogávamos conversa fora. Também, ao Jeremias, Matheus e Carlos (primo), que dividiram apartamento e diversas experiências comigo, além das jogatinas e conversas, e a todos os meus amigos e colegas, feitos tanto durante a graduação quanto da vida.

Gostaria de agradecer a UDESC e aos professores por me fornecerem um ensino público e de muita qualidade. Em especial, sou muito grato ao professor Ricardo de Medeiros, por aceitar ser meu orientador e proporcionar a oportunidade de trabalhar com um grande profissional, pelo incentivo, conselhos, paciência e pela dedicação do seu tempo ao meu trabalho, assim como por me deixar utilizar os computadores do Laboratório de Vibrações e Estruturas Leves (LaVEL) e ao suporte financeiro da Fundação de Amparo a Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC (2017TR1747, 2019TR779 e 2021TR843) para a realização das simulações. Também, ao professor Athos H. Plaine por ter me sugerido o tema desenvolvido e disponibilizado materiais relacionados, além de sempre oferecer suporte com quaisquer questões referentes ao processo estudado neste trabalho.

Por fim, sou grato a todos que se fizeram presentes ao longo da minha trajetória durante a graduação.

RESUMO

Atualmente em alta, com diversos artigos sendo publicados, processos de deformação plástica severa (DPS) estão sendo realizados para aumentar a resistência mecânica de materiais. Dentre as técnicas de DPS, destaca-se a extrusão em canal angular – ECAP. É muito importante a nível de projeto que se conheça os esforços empregados e as influências do processo. Com isso, este trabalho tem por objetivo obter a força aplicada ao punção durante o processo ECAP de seção circular com interseção de 120°, por meio do método dos elementos finitos, utilizando o software Abaqus™. A partir dos resultados obtidos, buscou-se validar a simulação por meio de uma comparação com os resultados experimentais obtidos por Silva et al. (2021). Observou-se que os resultados obtidos por meio da simulação foram satisfatórios em relação ao ponto de deslocamento onde ocorre a força máxima do processo, gerando em erro médio de 9,34% e, também, o comportamento das curvas de força por deslocamento foram conforme esperados. Porém, ao comparar as forças máximas aplicadas ao punção, os resultados não foram satisfatórios, isto devido à simplificações nas etapas de pré-processamento da simulação.

Palavras-chave: Deformação plástica severa; Extrusão em canal angular; Elementos finitos; Abaqus™;

ABSTRACT

Currently on the rise, with several articles being published, severe plastic deformation (DPS) processes are being carried out to increase the mechanical strength of materials. Among the DPS techniques, equal channel angular pressing – ECAP stands out. It is very important at the project level to know the efforts employed and the influences of the process. Thus, this work aims to obtain the force applied to the punch during the ECAP process of circular section with 120° intersection, through the finite element method, using the AbaqusTM software. From the results obtained, it was sought to validate the simulation through a comparison with the experimental results obtained by Silva et al. (2021). It was observed that the results obtained through the simulation were satisfactory in relation to the displacement point where the maximum force of the process occurs, generating an average error of 9.34% and, also, the behaviour of the displacement force curves were as expected. However, when comparing the maximum forces applied to the punch, the results were not satisfactory, this due to simplifications in the pre-processing steps of the simulation.

Keywords: Severe plastic deformation; Equal channel angular pressing; Finite elements; AbaqusTM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz bipartida utilizada no processo ECAP estudado, com ângulos de canal $\Phi=120^\circ$ e $\psi=30^\circ$	12
Figura 2 - Corpo seccionado: (a) corpo livre com algumas forças internas, (b) vista ampliada com componentes de ΔP	14
Figura 3 - Deformação normal.....	16
Figura 4 - Deformação por cisalhamento	16
Figura 5 - Diagrama de tensão-deformação convencional e real para um material dúctil	18
Figura 6 - Diagrama esquemático tensão-deformação mostrando a deformação elástica linear para ciclos de carga e descarga	19
Figura 7 - $\sigma_y \times d - 1/2$ para Al, Al-Mg e Al-Zr após DPS e tratamento térmico.....	23
Figura 8 - Ilustração esquemática de alguns processos de DPS: a) extrusão de canal angular (ECAP); b) torção sob alta pressão (HPT); c) laminação acumulada (ARB); d) forjamento multi-axial (MAF); e) extrusão torção (TE).....	25
Figura 9 - Ilustração do processo ECAP e seus componentes	26
Figura 10 - Unidades consistentes	33
Figura 11 - Fluxograma da metodologia empregada no trabalho.....	34
Figura 12 - Fluxograma do procedimento para simulação utilizando o software ABAQUS™	35
Figura 13 - Modelamento da matriz do processo ECAP, no software ABAQUS™....	36
Figura 14 - Modelamento do corpo de prova de 10mm, 20 e 30 mm, no software ABAQUS™	37
Figura 15 - Modelamento do punção, no software ABAQUS™	37
Figura 16 - Curva tensão-deformação verdadeiras e equação de Hollomon da liga de alumínio AA6061-T6	38
Figura 17 - Curva tensão-deformação obtida no software ABAQUS™	39
Figura 18 - Montagem do setup com a amostra de 10 mm para o processo ECAP, no software ABAQUS™.....	40
Figura 19 - Condições de contorno e deslocamento prescrito para o processo.....	42
Figura 20 - Modelo de malha utilizado para o punção.....	44

Figura 21 - Modelo de malha utilizado para a amostra de 10 mm.....	45
Figura 22 - Modelo de malha utilizado para a amostra de 20 mm.....	45
Figura 23 - Modelo de malha utilizado para a amostra de 30 mm.....	46
Figura 24 - Modelo de malha utilizado para a matriz.....	46
Figura 25 - Resultados obtidos experimentalmente e analiticamente para a força do processo versus o deslocamento do punção.....	48
Figura 26 - Resultados obtidos a para a força versus deslocamento do punção para a simulação numérica do processo ECAP com amostra de 10 mm.	49
Figura 27 - Resultados obtidos a para a força versus deslocamento do punção para a simulação numérica do processo ECAP com amostra de 20 mm.	50
Figura 28 - Resultados obtidos a para a força versus deslocamento do punção para a simulação numérica do processo ECAP com amostra de 30 mm.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de k_y , da equação de Hall-Petch, para diversos materiais	23
Tabela 2 - Designações das ligas de alumínio trabalhadas	28
Tabela 3 - Designação das ligas de alumínio fundidas	29
Tabela 4 - Denominação da especificação do tipo de tratamento o qual a liga foi submetida	29
Tabela 5 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AA6061-T6.....	38
Tabela 6 - Densidade e propriedades elásticas para a liga AA6061-T6.....	39
Tabela 7 – Comparação dos resultados obtidos por simulação numérica com os resultados do trabalho de Silva et al. (2021).....	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	TENSÃO – DEFORMAÇÃO	14
2.1.1	Tensão	14
2.1.2	Deformação	15
2.1.3	Curva tensão – deformação	16
2.1.3.1	<i>Comportamento elástico</i>	19
2.1.3.2	<i>Comportamento plástico</i>	20
2.2	ENDURECIMENTO POR DEFORMAÇÃO	21
2.3	TAMANHO DE GRÃO E RESISTÊNCIA MECÂNICA	22
2.4	DEFORMAÇÃO PLÁSTICA SEVERA	24
2.5	EXTRUSÃO EM CANAL ANGULAR (ECAP)	26
2.6	ALUMÍNIO	27
2.6.1	Alumínio AA6061-T6	30
2.7	METODO DOS ELEMENTOS FINITOS	31
3	METODOLOGIA	34
3.1	GEOMETRIA BASE	36
3.2	PROPRIEDADES DO MATERIAL E DAS SEÇÕES	37
3.3	MONTAGEM (ASSEMBLY)	40
3.4	TIPO DE ANÁLISE (STEP)	41
3.5	CONDIÇÕES DE CONTORNO E INTERAÇÕES	41
3.6	MALHA DE ELEMENTOS FINITOS	43
3.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS DA METODOLOGIA	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	FORÇA OBTIDA EXPERIMENTALMENTE POR SILVA ET AL. (2021) ..	48
4.2	FORÇA OBTIDA NUMERICAMENTE	49
4.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	51
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

O principal efeito da aplicação de técnicas de deformação plástica severa (DPS) é o aumento da resistência mecânica, obtida por meio da redução do tamanho de grão (FILHO, 2015). Dentre os diversos métodos de DPS, destaca-se a técnica da extrusão em canal angular (do inglês, *Equal Channel Angular Pressing* – ECAP). A partir desta técnica, é possível um significativo aumento da resistência mecânica, por meio da obtenção de uma microestrutura muito refinada, obtendo-se até mesmo tamanhos de grãos nanométricos, isto sem causar qualquer redução na seção transversal da peça. Além disso, o processo ECAP destaca-se pela possibilidade de obter amostras suficientemente grandes para aplicações práticas (VALIEV; LANGDON, 2006).

O processo ECAP normalmente é composto pelos seguintes componentes: a amostra, ou corpo de prova, a ser processado, um punção e uma matriz com dois canais de mesma seção transversal, os quais interceptam-se com um ângulo pré-definido. Então, aplica-se uma pressão sobre o punção, que irá imprimir um deslocamento da amostra pelo canal da matriz que, ao passar pelo ângulo entre os canais, é deformada severamente por cisalhamento (FILHO, 2015).

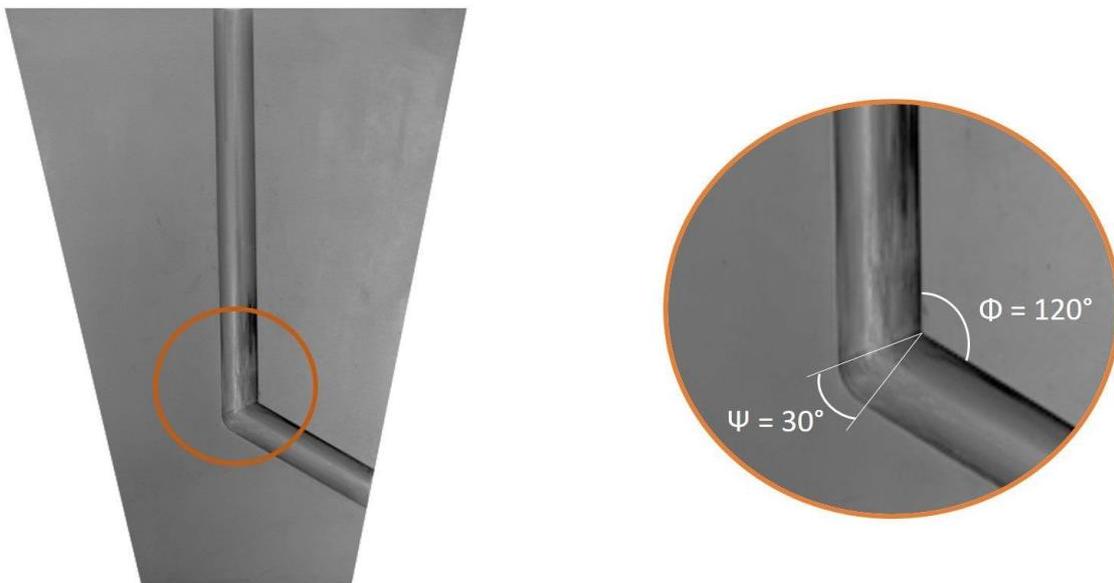
Segundo Silva *et al.* (2021), a implementação bem-sucedida do ECAP depende do projeto, controle e otimização do processo, portanto, o conhecimento destes parâmetros é essencial. Entretanto, segundo Almeida (2020), ainda que o processo ECAP seja extensamente estudado, em muitos dos trabalhos encontrados na literatura, as variáveis de processo ainda são definidas de forma empírica e beneficiam-se de modelos teóricos para a estimativa das forças envolvidas no processo e entendimento do fluxo do material dentro da matriz. Isto devido, principalmente, a complexidade matemática dos cálculos de distribuições exatas com base em equações de controle para um processo de conformação com grandes deformações.

Nesse aspecto, uma das técnicas que tem se destacado para a determinação das variáveis do processo ECAP é o método dos elementos finitos (MEF). Este método permite a modelagem de geometrias bidimensionais e tridimensionais, deformações, processos mecânicos, análises estáticas ou

dinâmicas, entre outras que podem contribuir com diversas análises na engenharia.

Silva *et al.* (2021) realizaram os cálculos analíticos para a força máxima aplicada ao punção num processo ECAP com ângulo de interseção de 120° (Figura 1). Os autores obtiveram os resultados aplicando o método do limite superior, largamente utilizado para processos de conformação, e compararam os resultados obtidos com os dados do processamento experimental, obtendo resultados muito satisfatórios para as forças máximas. Entretanto, este método analítico não permite obter o comportamento da força aplicada ao longo do deslocamento do punção, sendo este comportamento uma importante variável do processo. Ainda, pelo método experimental, para avaliar as influências de lubrificantes (influenciando o fator de atrito) utilizados no processo, são necessários muitos ensaios e recursos.

Figura 1 - Matriz bipartida utilizada no processo ECAP estudado, com ângulos de canal $\Phi=120^\circ$ e $\psi=30^\circ$



Fonte: Silva *et al.* (2021).

Neste cenário, este trabalho tem por objetivo efetuar uma modelagem e consequente simulação numérica do processo ECAP, utilizando o método dos elementos finitos, visando a obtenção dos resultados da força aplicada ao punção. Os resultados obtidos serão confrontados com os resultados experimentais obtidos por Silva *et al.* (2021) para validação da simulação,

visando uma futura utilização das simulações para que seja possível avaliar os parâmetros do processo para uma otimização.

Na seção 2 serão vistos os fundamentos teóricos importantes que embasam o processo, desde os conceitos de tensão e deformação, passando pelos conceitos de deformação plástica em materiais metálicos, os conceitos do fenômeno do endurecimento por deformação, processos de deformação plástica severa e o processo ECAP para obtenção de grãos ultrafinos, até os conceitos do método dos elementos finitos. Além disso, são revisados os conceitos de ensaio de tração para materiais metálicos e, também, são apresentados alguns conceitos das ligas de alumínio e, mais especificamente, da liga AA6061-T6, que se trata da liga utilizada para o processo neste presente trabalho.

Na seção 3 serão apresentados a metodologia, contendo os procedimentos utilizados para a elaboração deste trabalho. Já na seção 4 são mostrados os resultados e realizada uma análise dos resultados, assim como comparações com os resultados obtidos do estudo de Silva *et al.* (2021). Por fim, a seção 5 contém as conclusões do presente trabalho.

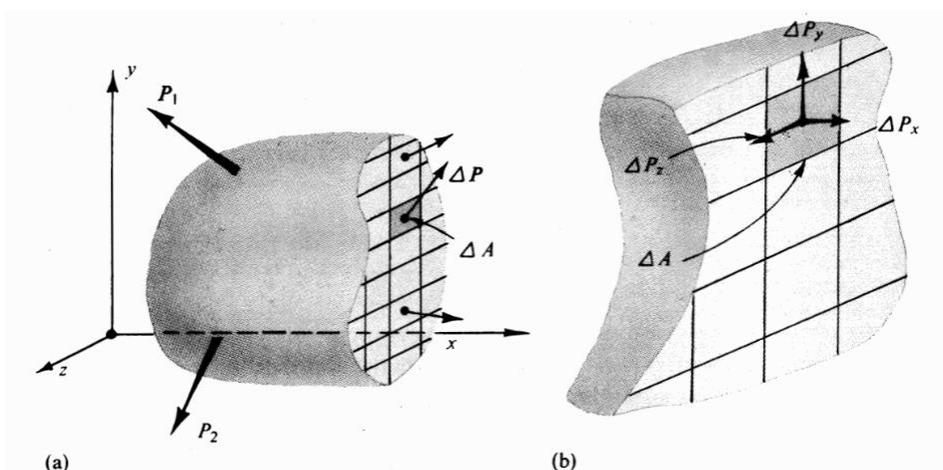
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TENSÃO – DEFORMAÇÃO

2.1.1 Tensão

Considerando um corpo com forças externas aplicadas sobre ele, de acordo com Popov (1978), as forças internas, que atuam em áreas infinitesimais de um corte, são de natureza vetorial com magnitudes e direções variadas (figura 2(a)), as quais mantêm equilíbrio com as cargas externas aplicadas. Para um maior aprofundamento no comportamento do material, é particularmente significativo definir a intensidade destas forças nas diversas partes do corte e, por normalmente variarem de ponto a ponto e serem inclinadas em relação ao plano de corte, decompõe-se estas forças em componentes paralelas e perpendiculares à seção em questão, conforme mostra a figura 2(b).

Figura 2 - Corpo seccionado: (a) corpo livre com algumas forças internas, (b) vista ampliada com componentes de ΔP



Fonte: Popov (1978).

Devido as componentes da intensidade da força por unidade de área se manterem verdadeiras apenas em um ponto, a definição matemática da tensão é:

$$\tau_{xx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P_x}{\Delta A} \quad , \quad \tau_{xy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P_y}{\Delta A} \quad , \quad \tau_{xz} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P_z}{\Delta A} \quad , \quad (1)$$

onde $\tau_{i,j}$ é a tensão, sendo o primeiro subíndice (i) referente à direção do plano de corte e o segundo subíndice (j) referente à direção que ocorre a tensão; ΔP é a componente da força interna atuante no corpo; e ΔA a área da seção transversal do corpo em que atua a força.

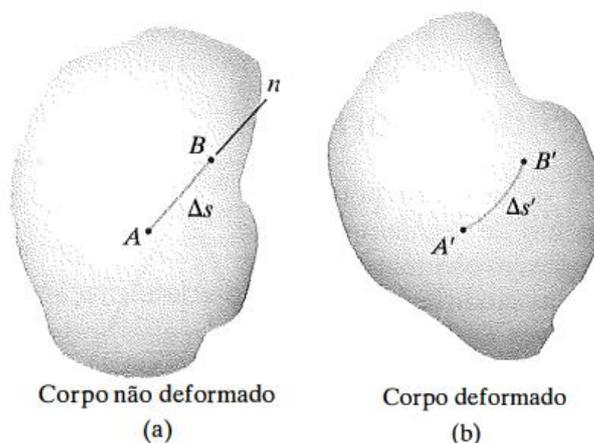
“A intensidade da força perpendicular ou normal à seção é chamada de tensão normal em um ponto. É costume referir-se a tensões normais que causam tração na superfície do corte por tensões de tração. Por outro lado, aquelas que comprimem o corte, são tensões de compressão” (POPOV, 1978). Normalmente, as tensões normais são denotadas por σ , ao invés de τ_{xx} . Já as outras componentes da intensidade da força que agem paralelamente ao plano da área em questão são chamadas de tensões de cisalhamento (τ).

2.1.2 Deformação

Segundo Hibbeler (2010), deformação é a mudança de forma e de tamanho em um corpo quando aplicada uma condição física sobre ele, podendo estas mudanças serem altamente visíveis ou praticamente imperceptíveis sem a utilização de equipamentos de medição precisos. Como exemplo de condições físicas que tendem a provocar deformações tem-se a aplicação de uma força a um corpo e a mudança de temperatura.

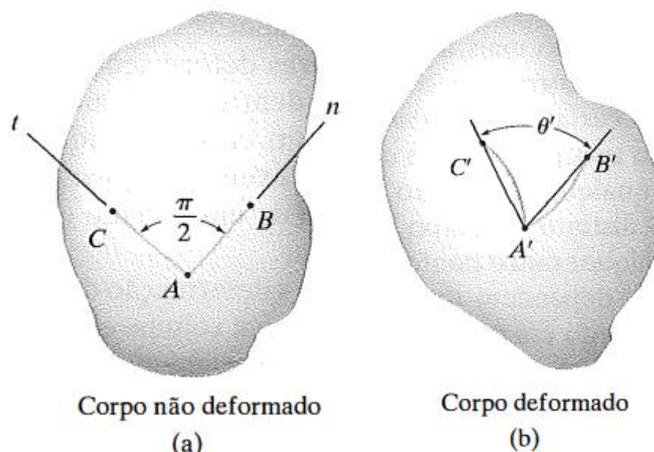
Hibbeler (2010) desenvolveu o conceito de deformação por meio de mudanças no comprimento de segmentos de reta e nos ângulos entre eles, conforme as figuras 3 e 4. Denomina-se deformação normal quando ocorre o alongamento ou contração de um segmento de área por unidade de comprimento (figura 3) e, de outra forma, quando ocorre uma mudança no ângulo entre os dois segmentos de reta denomina-se deformação por cisalhamento (figura 4).

Figura 3 - Deformação normal



Fonte: Hibbeler (2010).

Figura 4 - Deformação por cisalhamento



Fonte: Hibbeler (2010).

2.1.3 Curva tensão – deformação

Aplicando-se uma carga uniforme, de forma estática ou muito lentamente ao longo do tempo, sobre uma seção transversal de um corpo, pode-se verificar o comportamento mecânico do material por meio do ensaio de tensão-deformação. Normalmente as cargas aplicadas nestes ensaios são por meio de tração, compressão ou cisalhamento.

“Os resultados dos testes geralmente dependem do tamanho do corpo de prova sendo testado” (GERE, 2003). Para que os resultados possam ser expressos de forma genérica a membros de qualquer tamanho, faz-se a

conversão dos resultados dos testes em tensões e deformações. Para isso, tem-se que a tensão nominal (ou de engenharia), σ , é obtida pela razão entre a carga axial, P , e a área inicial da seção transversal, A_0 , conforme

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2)$$

“Um valor mais exato da tensão axial, chamada de tensão verdadeira, pode ser calculado usando a área real da barra na seção transversal onde a falha ocorre. Uma vez que a área real em um teste de tração é sempre menor que a área inicial, a tensão verdadeira é maior do que a tensão nominal” (GERE, 2003).

A deformação nominal (ou de engenharia), ε , é obtida por meio da razão entre a variação, δ , no comprimento de referência do corpo de prova e do comprimento inicial, L_0 , do corpo de prova, conforme

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (3)$$

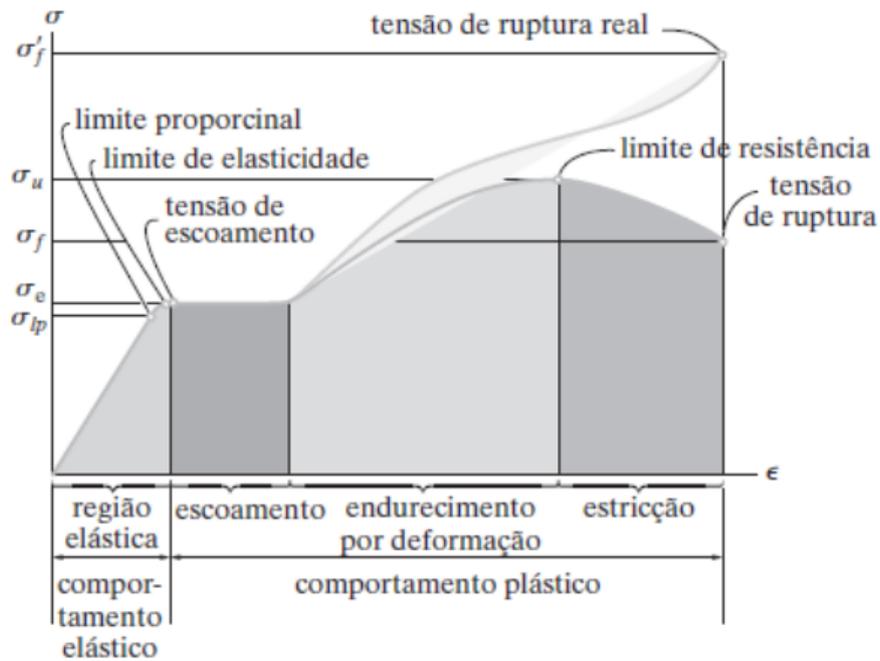
E da mesma forma como para a tensão verdadeira, “[...] como a distância entre as marcas de medida pelo comprimento padrão aumentam enquanto a carga de tração é aplicada, pode-se calcular a deformação verdadeira em qualquer valor da carga usando a distância real entre as marcas de medida.” (GERE, 2003).

Ao se executar um ensaio de tração, e determinar a tensão e a deformação para os valores da carga aplicada, plotando-se os resultados graficamente, de forma que a ordenada seja a tensão e a abscissa seja a deformação, obtém-se o que é conhecido por curva tensão-deformação. “O diagrama de tensão-deformação é uma característica do material em particular sendo testado e contém informações importantes sobre as propriedades mecânicas e o tipo de comportamento” (GERE, 2003).

Para um metal dúctil (material que sofre grandes deformações antes de sofrer ruptura), a curva tensão deformação tem o formato mostrado na figura 5. A partir desta curva, percebe-se duas regiões, região elástica e região plástica,

e quatro diferentes modos de comportamento do material, que depende da deformação induzida neste material.

Figura 5 - Diagrama de tensão-deformação convencional e real para um material dúctil



Fonte: Hibbeler (2010).

De outra forma, pode-se obter uma curva que exprime o comportamento real do material, sendo esta chamada de curva tensão-deformação verdadeira (também mostrada na figura 5), em que é plotada com os valores de tensão e deformação verdadeiros. Frequentemente, como mencionaram Helman e Cetlin (2015), esta curva pode ser descrita por expressões empíricas como, por exemplo, a equação de Hollomon, definida como

$$\sigma_V = K \cdot (\epsilon_V)^n, \quad (4)$$

em que K é o coeficiente de resistência e n o expoente de encruamento. Os valores de K e n podem ser obtidos a partir da plotagem dos resultados de ensaio de tração em coordenadas $\log \sigma_V \times \log \epsilon_V$. Em relação as propriedades mecânicas, quanto maior o valor de K , maior a resistência a deformação plástica; e o n quantifica o aumento da resistência ao escoamento devido ao

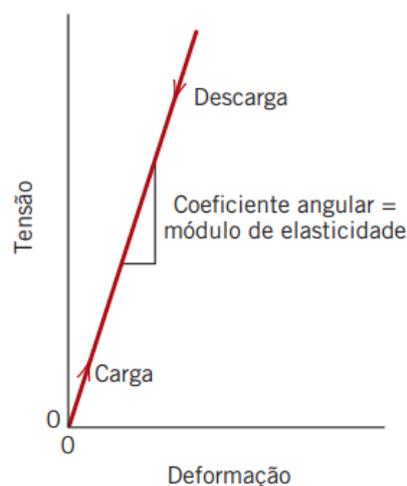
encruamento, sendo que quanto mais próximo de zero, menor é o endurecimento por deformação.

2.1.3.1 Comportamento elástico

Refere-se a primeira região de comportamento da figura 5. Segundo Hibbeler (2010), este comportamento é caracterizado quando a tensão é proporcional à deformação (Lei de Hooke), sendo a curva um segmento linear. O limite superior da tensão para esse comportamento elástico é chamado de limite de proporcionalidade, σ_{lp} .

De acordo com Calister (2016), a inclinação do segmento linear é denominado módulo de elasticidade, E , sendo a rigidez ou a resistência do material à deformação elástica (figura 6). Quanto maior o valor do módulo, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma dada tensão, ou seja, mais rígido será o material. “Em uma escala atômica, a deformação elástica macroscópica é manifestada como pequenas alterações no espaçamento interatômico e no estiramento das ligações interatômicas. Como consequência, a magnitude do módulo de elasticidade é uma medida da resistência à separação de átomos adjacentes, isto é, das forças de ligação interatômicas” (CALISTER, 2016).

Figura 6 - Diagrama esquemático tensão-deformação mostrando a deformação elástica linear para ciclos de carga e descarga



Fonte: Calister (2016).

Uma outra propriedade muito importante do comportamento elástico do material é o coeficiente de Poisson que, segundo Calister (2016) é definido pelo seguinte: Ao aplicar-se uma tensão de tração sobre uma amostra de metal, provoca-se um alongamento elástico e sua deformação correspondente na mesma direção da tensão aplicada e, como resultado desse alongamento, haverá contrações nas direções laterais perpendiculares à tensão aplicada. A razão entre as deformações lateral e axial é o que se denomina coeficiente de Poisson. Matematicamente, é dada por

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{longitudinal}} \quad (5)$$

onde ν é o coeficiente de Poisson e ε , a deformação.

Aumentando-se a tensão a partir do limite de proporcionalidade, “[...] o material ainda se comporta de maneira elástica; todavia, a reta tende a encurvar-se e achatarse. Isso continua até atingir o limite de elasticidade. Ao atingir esse ponto, se a carga for removida, o corpo de prova ainda voltará à sua forma original” (HIBBELER, 2010).

2.1.3.2 Comportamento plástico

Ao elevar a tensão aplicada no corpo acima do limite de proporcionalidade, o comportamento do material muda com a deformação deixando de ser proporcional à tensão aplicada, ocorrendo então uma deformação não mais retornável ao estado inicial, e sim permanente, não mais recuperável. A esta deformação dá-se o nome de deformação plástica.

“De uma perspectiva atômica, a deformação plástica corresponde à quebra de ligações entre os átomos vizinhos originais, seguida pela formação de novas ligações com novos átomos vizinhos, à medida que um grande número de átomos ou moléculas se movem uns em relação aos outros; com a remoção da tensão, eles não retornam às suas posições originais. [...]. Nos sólidos cristalinos, a deformação é obtida por meio de um processo chamado deslizamento, que envolve o movimento de discordâncias” (CALISTER, 2016).

O comportamento plástico pode ser subdividido ainda em três modos de comportamento do material, conforme a figura 5, sendo o escoamento, o modo de endurecimento por deformação, e a estricção. Segundo Hibbeler (2010), o escoamento inicia-se a partir de um pequeno aumento na tensão acima do limite de elasticidade, sendo esta tensão denominada tensão de escoamento.

Após o escoamento completo do material, “pode-se aplicar uma carga adicional ao corpo de prova, o que resulta em uma curva que cresce continuamente, mas torna-se mais achatada até atingir uma tensão máxima denominada limite de resistência, σ_r . O crescimento da curva dessa maneira é denominado endurecimento por deformação” (HIBBELER, 2010). Geometricamente, este processo é caracterizado pelo alongamento do corpo simultâneo a redução da sua seção transversal, de maneira razoavelmente uniforme.

O último modo de comportamento do material refere-se à estricção, a qual inicia-se no limite de resistência, em que se caracteriza por a não mais uniformidade no alongamento do corpo e redução da sua área transversal. Então, ocorre uma redução da área da seção transversal em uma região localizada do corpo de prova. “Esse fenômeno é causado por planos deslizantes formados no interior do material, e as deformações reais produzidas são causadas por tensão de cisalhamento. Como resultado, tende a formar uma constricção, ou estricção, gradativa nessa região, à medida que o corpo de prova se alonga cada vez mais, [...], até o corpo de prova fraturar, quando atinge a tensão de ruptura, σ_{rup} ” (HIBBELER, 2010).

2.2 ENDURECIMENTO POR DEFORMAÇÃO

Segundo Filho (2015), como a deformação plástica está associada à movimentação de discordâncias, quanto maior a densidade destes defeitos, maior é a tensão necessária para causar os deslizamentos, ou deformação. Este processo denomina-se endurecimento por deformação, ou trabalho a frio.

Fisicamente, durante um processo de deformação plástica de um cristal ocorrem mudanças na forma e orientação dos grãos e, além disso, aumentam a

área total de contornos de grãos e a quantidade de defeitos puntiformes e de discordâncias por unidade de volume.

Ainda segundo Filho (2015), sendo que a fase de endurecimento por deformação relaciona-se com o aumento da dificuldade de movimento das discordâncias no cristal, ao aumentar a intensidade dessa fase, aumenta-se as propriedades mecânicas de resistência a tração e dureza, enquanto diminui-se a ductilidade do material.

Conforme a evolução da densidade de discordâncias no cristal, ρ , ocorre um aumento da tensão com a deformação que, pelo modelo de Kocks-Mecking, relaciona-se por

$$\sigma = \alpha \cdot M \cdot G \cdot b \cdot \rho^{1/2} \quad (6)$$

sendo α uma constante numérica, M o fator de Taylor, G o módulo de cisalhamento e b o módulo do vetor de Burgers.

2.3 TAMANHO DE GRÃO E RESISTÊNCIA MECÂNICA

Considerando que o contorno de grão atue como uma barreira para o movimento das discordâncias, a influência do tamanho de grão, d , na tensão de escoamento, σ_y , pode ser dada pela equação de Hall-Petch, definida por

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y \cdot d^{-1/2} \quad (7)$$

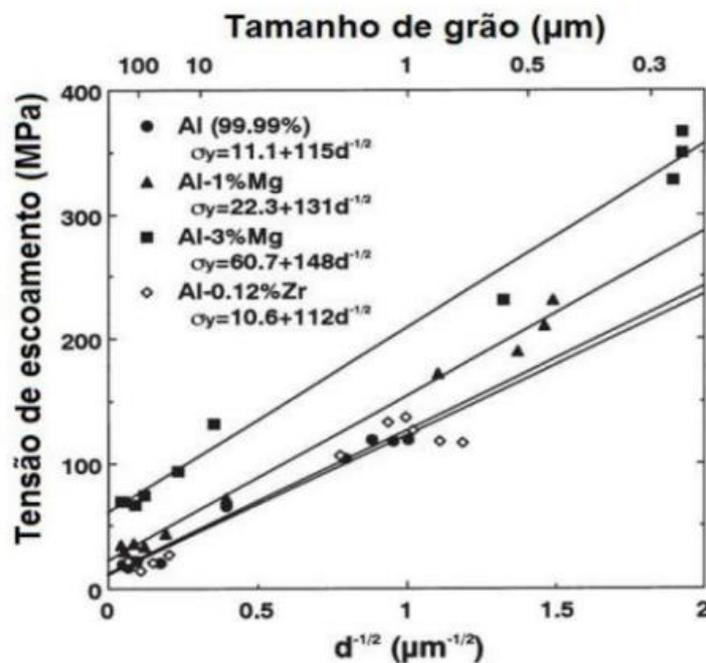
onde σ_0 é a tensão requerida para uma banda de escorregamento se propagar pelo grão e k_y é uma constante que indica a resistência que o contorno exerce contra a propagação de bandas de escorregamento, a qual depende na natureza e da angulação do contorno, de uma forma mais clara, " k_y expressa a 'eficiência' da redução do tamanho de grão em termos do aumento da tensão de escoamento" (FILHO, 2015). A tabela 1 mostra valores de k_y para alguns materiais.

Tabela 1 - Valores de k_y , da equação de Hall-Petch, para diversos materiais

Material	$k_y(MN/m^{3/2})$
Aço baixo carbono	0,307
Molibdênio	0,583
Zinco	1,768
Magnésio	0,403
Cobre	0,403
Alumínio	0,068
Titânio	0,403

Fonte: Filho (2015)

A figura 7 apresenta os resultados de tensão de escoamento em função do inverso da raiz quadrada do tamanho de grão para os materiais Al, Al-Mg e Al-Zr submetidos à deformação plástica severa (DPS) e a posterior tratamento térmico.

Figura 7 - $\sigma_y \times d^{-1/2}$ para Al, Al-Mg e Al-Zr após DPS e tratamento térmico

Fonte: Filho (2015)

“Estudos recentes em materiais com granulação ultrafina obtida por DPS têm mostrado que estes apresentam valores de k_y e σ_0 diferentes daqueles

medidos em materiais com tamanho de grão convencional. De modo geral observa-se que os valores de k_y e σ_0 são maiores para os materiais severamente deformados e esse aumento é ainda maior no caso de materiais que contém átomos em solução sólida” (FILHO, 2015).

2.4 DEFORMAÇÃO PLÁSTICA SEVERA

Filho (2015) expressou a definição de deformação plástica severa (DPS) como sendo processos capazes de produzir “hiperdeformação plástica” em metais e ligas, conseqüentemente, fazendo com que se obtenha materiais com tamanhos de grão entre dezenas a centenas de nanômetros, conhecidos como materiais nanoestruturados.

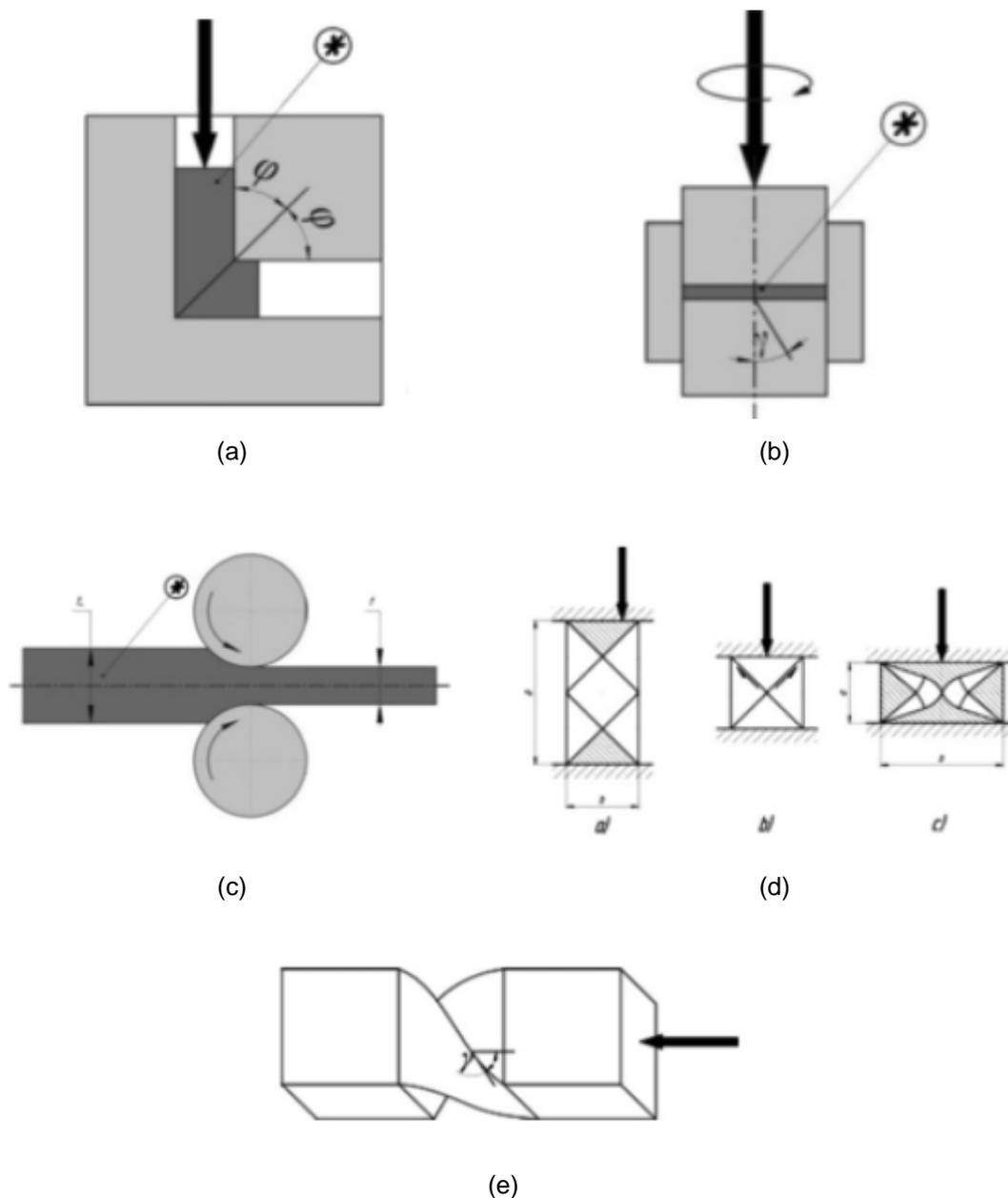
Além disso, segundo Valiev *et al.* (2006), as dimensões da amostra processada não devem ser modificadas significativamente, o que é conseguido por meio de dispositivos que mantenham constante a seção transversal da amostra. Portanto, por meio de DPS é introduzida uma alta densidade de defeitos na rede cristalina, dificultando a movimentação das discordâncias e, conseqüentemente, um elevado refinamento de grão. Valiev *et al.* (2006) também definiram materiais com grãos ultrafinos como sendo materiais homogêneos com uma microestrutura equiaxial com contornos de alto ângulo (em sua maioria) e com tamanho médio de cristais menor que 1 μ m.

Um material que contém uma granulação refinada é mecanicamente mais resistente e duro que um material de granulação grosseira. E também, com o processo há uma queda relativamente baixa na ductilidade (CALISTER, 2016).

É interessante ressaltar que processos de DPS têm ganhado muito espaço no cenário mundial. Valiev e Langdon (2014) realizaram um estudo que mostra que o tema está entre os dez mais citados de todos os tempos em diversos periódicos do campo da Ciência dos Materiais. Além disso, o processo já está presente em diversas aplicações, sendo encontrados materiais nanoestruturados fabricados por meio destes processos, como peças de Ti para aplicação biomédica, ligas de Al e Cu para condutores elétricos, ligas de Mg para armazenagem de hidrogênio e materiais magnéticos utilizados em máquinas

elétricas de velocidade elevada. Na figura 8 são ilustrados alguns dos processos de DPS.

Figura 8 - Ilustração esquemática de alguns processos de DPS: a) extrusão de canal angular (ECAP); b) torção sob alta pressão (HPT); c) laminação acumulada (ARB); d) forjamento multi-axial (MAF); e) extrusão torção (TE)



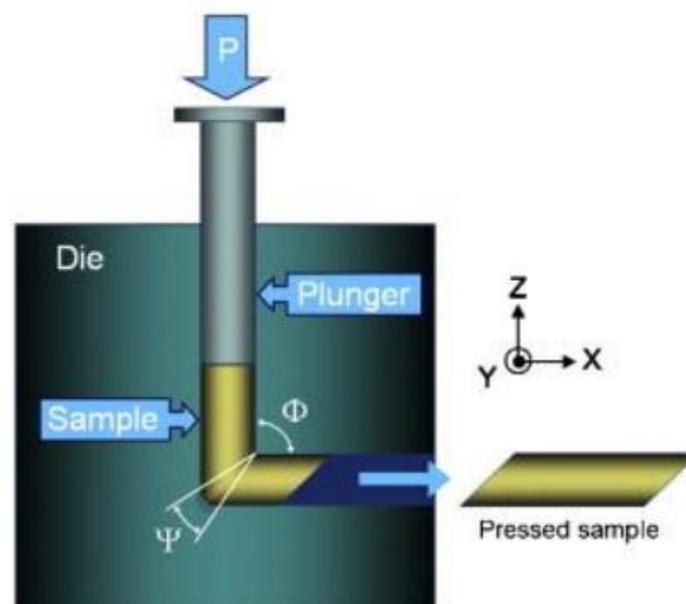
Fontes: **a)** Filho (2015) apud Segal (1995); **b)** Filho (2015) apud Bridgman (1946); **c)** Filho (2015) apud Saito et al. (1998); **d)** Filho (2015) apud Zherebtsov et al. (2004); **e)** Filho (2015) apud Mousavi et al. (2008).

Entre as técnicas de DPS, a mais utilizada é a extrusão em canal angular (ECAP), um método capaz de produzir deformação plástica severa em uma variedade de materiais e, dependendo da geometria da matriz e número de passes, pode-se aumentar a deformação equivalente até o nível desejado (SILVA *et al.*, 2021; FILHO, 2015). Duas outras grandes vantagens do ECAP é que as amostras são grandes o suficiente para serem utilizadas comercialmente e que é possível extrair corpos de prova de tração e fadiga com dimensões apropriadas para resultados de ensaios representativos.

2.5 EXTRUSÃO EM CANAL ANGULAR (ECAP)

O processo de extrusão em canal angular (em inglês, *Equal Channel Angular Pressing* – ECAP) é definido, por Segal (1995), como sendo um processo de extrusão de materiais metálicos, pela interseção de dois canais com ângulo Φ (normalmente de 90° ou 120°) de mesma seção transversal, podendo ser circular ou quadrada, em uma matriz. Uma ilustração do processo com suas partes é mostrada na figura 9.

Figura 9 - Ilustração do processo ECAP e seus componentes



Fonte: Huang, e Langdon (2013).

O processo basicamente se dá pelo posicionamento da amostra no canal da matriz, então é posicionado um êmbolo (ou punção) sobre a amostra e aplicada uma força (P , na figura) no êmbolo que, conseqüentemente, irá imprimir um deslocamento da amostra no canal, sofrendo uma mudança de direção devido ao ângulo da matriz. Segundo Filho (2015), quando material passa pela interseção dos canais, é deformado por cisalhamento, que se transfere de uma extremidade à outra da amostra.

O processo pode ser repetido, já que a seção transversal da amostra se mantém constante, sendo esta repetição de processo feita com a finalidade de se obter graus de deformação ainda maiores em cada passe, o que leva a um refinamento da microestrutura cada vez maior e, conseqüentemente, melhorando as propriedades mecânicas do material a cada passe.

A partir da rota de processamento e do ângulo Φ , pode-se controlar variações do plano e/ou direção de cisalhamento e da magnitude de deformação nesses planos, podendo-se obter estruturas e texturas diferentes para o material processado. Também, diferentes metais e ligas, tanto à quente como à frio podem ser processados com a deformação ECAP (FILHO, 2015).

2.6 ALUMÍNIO

O alumínio foi descoberto em 1809 por Sir Humphrey Davy, e isolado pela primeira vez em 1825 por H. C. Oersted. Entretanto, somente a partir de 1886, graças a Charles Martin e Paul Louis Héroult, que inventaram um procedimento eletrolítico para reduzir a alumina em alumínio, foi possível ter-se um processo industrial econômico de redução, sendo este procedimento utilizado até os dias de hoje para a produção de alumínio primário (ABAL, 2007).

Com o passar dos anos as aplicações de alumínio foram ganhando espaço indo desde a utilização para trabalhos suntuosos como estatuetas e placas comemorativas (alto custo de produção nos meados da descoberta), passando a ser utilizado na decoração Vitoriana e ganhando espaço devido aos custos de produção irem caindo conforme ia-se aumentando a produção e reduzindo preços. E com o elevado aumento no consumo de alumínio,

atualmente este segue o ferro/aço entre os metais de mais consumo anual, sendo o mais utilizado dos metais não ferrosos.

Ainda conforme Abal (2007), a diversa gama de usos do alumínio se deve as suas propriedades físico-químicas, com grande destaque para seu baixo peso específico, quando comparado a outros metais. Além disso, pode-se citar como características importantes do alumínio a sua excelente combinação de propriedades úteis, se adequando para um grande campo de aplicações em engenharia; sua boa resistência à corrosão e alta condutibilidade tanto elétrica/térmica. Em relação à resistência mecânica, o alumínio comercialmente puro possui uma resistência à tração de aproximadamente 90 MPa, porém, com adição de elementos de liga, através de trabalho à frio e/ou por tratamentos térmicos, sua resistência pode ser aumentada consideravelmente, podendo chegar até aproximadamente 700 MPa.

Segundo Souza (2006), as ligas de alumínio, em geral, são classificadas em fundidos ou trabalhados (forjados) e são designadas por um número de quatro dígitos, que indica a composição dos principais elementos de liga presentes (tabelas 2 e 3).

Tabela 2 - Designações das ligas de alumínio trabalhadas

Designação da Série	Elemento de Adição
1XXX	99% de Al (mínimo)
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos

Fonte: Souza (2006) apud Coutinho (1980) e Calister (2000).

Tabela 3 - Designação das ligas de alumínio fundidas

Designação da Série	Elemento de Adição
1XX.X	99% de Al (mínimo)
2XX.X	Cobre
3XX.X	Silício com cobre e/ou magnésio
4XX.X	Silício
5XX.X	Magnésio
6XX.X	Série não usada
7XX.X	Zinco
8XX.X	Estanho
9XX.X	Outros elementos

Fonte: Souza (2006) apud Coutinho (1980) e Calister (2000).

Após a designação relativa à composição, de acordo com a *Aluminum Association*, para ambos os tipos de alumínio, tem-se um hífen e a especificação de um tratamento básico, por meio de uma letra e um número, o qual indica o tratamento mecânico e/ou térmico ao qual a liga foi submetida (CALISTER, 2016).

Tabela 4 - Denominação da especificação do tipo de tratamento o qual a liga foi submetida

LETRA	TRATAMENTO SUBMETIDO
Revenidos Básicos	
F	Conforme fabricado
O	Recozido
H	Encruado
W	Tratado termicamente por solução (para produtos que endurecem por precipitação naturalmente à temperatura ambiente ao longo do tempo)
T	Tratado termicamente por solução (para produtos cuja resistência estabiliza dentro de algumas semanas)
Revenidos de Encruamento	
H1	Apenas encruado

H2	Encruado e parcialmente recozido
H3	Encruado e estabilizado
Revenidos de Tratamento Térmico	
T1	Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente
T2	Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada, trabalhado à frio e envelhecido naturalmente.
T3	Tratado por solubilização, trabalhado a frio e envelhecido naturalmente
T4	Tratado por solubilização e envelhecido naturalmente
T5	Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido artificialmente
T6	Tratado por solubilização e envelhecido artificialmente
T7	Tratado por solubilização e superenvelhecido ou estabilizado
T8	Tratado por solubilização, tratado a frio e envelhecido artificialmente
T9	Tratado por solubilização, envelhecido artificialmente e trabalhado a frio
T10	Resfriado a partir de um processo de conformação em temperatura elevada, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente

Fonte: Adaptado Calister (2016).

2.6.1 Alumínio AA6061-T6

A liga de alumínio AA6061-T6 é uma das ligas mais utilizadas na série 6XXX, apresentando combinações de magnésio e silício na matriz do alumínio. Conforme visto na tabela 4, esta liga é tratada termicamente por solução e envelhecida artificialmente, onde devido a este envelhecimento artificial, forma-se precipitados intermetálicos de silicato de magnésio (Mg_2Si), proporcionando

uma ótima resistência à corrosão, além de uma boa conformabilidade, possuindo facilidade de serem extrudadas (FERNANDES, 2016; SOUZA, 2006).

Como características principais, além do que já foi citado, esta liga é uma liga estrutural padrão de alta resistência, embora na zona de solda, tenha resistência reduzida; e possuem média resistência à fadiga. Além do mais, devido apresentar elevada ductilidade, permite a utilização em operações que geram altos graus de deformação, como a extrusão, sendo aplicadas em produtos extrudados para componentes de transporte para máquinas e equipamentos, aviões, lanchas, rebites, bicicletas, entre outros (FERNANDES, 2016; SOUZA, 2006).

2.7 METODO DOS ELEMENTOS FINITOS

De acordo com Logan (2016), o método dos elementos finitos (MEF) é um método numérico que é utilizado com a finalidade de resolver problemas de engenharia, principalmente, em modelos envolvendo geometrias complexas, cargas e propriedades de materiais, onde por vezes são muito difíceis as equações diferenciais que modelam o problema. Nesse aspecto, Silva *et al.* mencionaram que para uma implementação bem-sucedida do ECAP para processar diferentes materiais e ligas depende do controle e otimização do processo, assim, sendo necessário o conhecimento sobre os padrões de tensões e deformações, porém, matematicamente ainda muito complexos os cálculos das distribuições exatas de tais informações. Então, uma forma de se obter estas informações é por meio do método dos elementos finitos, o qual a sua utilização consiste em resolver o sistema de equações diferenciais satisfazendo as condições de contorno por meio da utilização de algoritmos de cálculo conhecido.

Alves Filho (2000, 2001) ressaltou que o MEF é um método de alto potencial que auxilia as equipes de engenharia na determinação do comportamento de um modelo, projeto ou processo, seja estático ou dinâmico, podendo-se simular situações críticas e determinar as tensões, deformações, forças e outras variáveis atuantes no sistema. Ainda, utilizando o método de maneira adequada, pode-se reduzir ciclos de desenvolvimento de produtos,

reduzindo o número de testes experimentais, realizando previsões de comportamentos e, além disso, evita utilizações de métodos de tentativa e erro.

Segundo Berkenbrock (2022), a aplicação do MEF consiste na divisão do modelo em elementos menores (malha), os quais conectam-se por pontos nodais. Estes elementos são de tipologia simples como triângulos, quadriláteros, tetraedros e hexaedros, e sua geometria é definida por meio das coordenadas de um conjunto de nós (SORIANO, 2003).

Alves Filho (2005) demonstrou que o MEF se baseia na relação entre as forças e os deslocamentos nodais, com a aplicação da teoria da elasticidade. Calcula-se a matriz de rigidez de cada elemento e, então, monta-se uma matriz de rigidez global da estrutura, obtendo-se um sistema de equações simultâneas. Definindo-se as condições de contorno, por meio de restrições, deslocamentos prescritos ou carregamentos, é possível determinar os deslocamentos nodais para a estrutura completa.

O MEF pode ser dividido em três etapas – pré-processamento, solução e pós-processamento. O pré-processamento caracteriza-se pela modelagem do sistema, onde são definidas as condições iniciais e as de contorno e as propriedades do material, inseridos os carregamentos e realizadas as simplificações do modelo, além da escolha do tipo de elemento (HUEBNER, 1994).

Ainda, conforme Logan (2016) e Zhu (2018), nesta primeira etapa é realizada a discretização do problema, a qual consiste em dividir um corpo contínuo (infinitos pontos com infinitos graus de liberdade) em sistemas equivalentes menores e discretos (número finitos de elementos com finitos graus de liberdade), onde o resultado é representado pela malha de elementos finitos.

A etapa de solução consiste na realização da resolução de uma equação diferencial carregando todas as condições impostas no pré-processamento. Nesta etapa ocorre a obtenção da matriz de rigidez, relacionando os deslocamentos nodais com as forças aplicadas em cada nó; em seguida, é realizada a montagem das equações globais (matriz de rigidez global e vetor de força global); então, soluciona-se as equações globais e, por fim, calcula-se as deformações e tensões elementares (SILVA, 2020).

Finalmente, segundo Silva (2020), a terceira e última etapa é o pós-processamento, o qual representa o que se busca com a resolução do problema,

podendo-se obter dados como forças de reação, deformações, frequências e modos de vibração, deslocamentos, energias, entre outros diversos.

Existem diversos softwares para simulações numéricas por elementos finitos, sendo um deles o ABAQUS™. De propriedade da Dassault Systemes Simulia, o ABAQUS™ é um conjunto de programas de simulação de engenharia capaz de solucionar diversos problemas, desde simples até simulações não lineares e complexas. Este software consegue modelar qualquer geometria e estudar problemas de comportamento mecânico, transferência de calor e de massa, dinâmica de fluidos, e outros diversos problemas de engenharia (DASSAULT SYSTEMES, 2014). Importante destacar que este software não possui um sistema de unidades embutido, portanto, deve-se escolher o sistema de unidades e inseri-los de forma consistente, conforme a figura 10 (TITA, 2012).

Figura 10 - Unidades consistentes

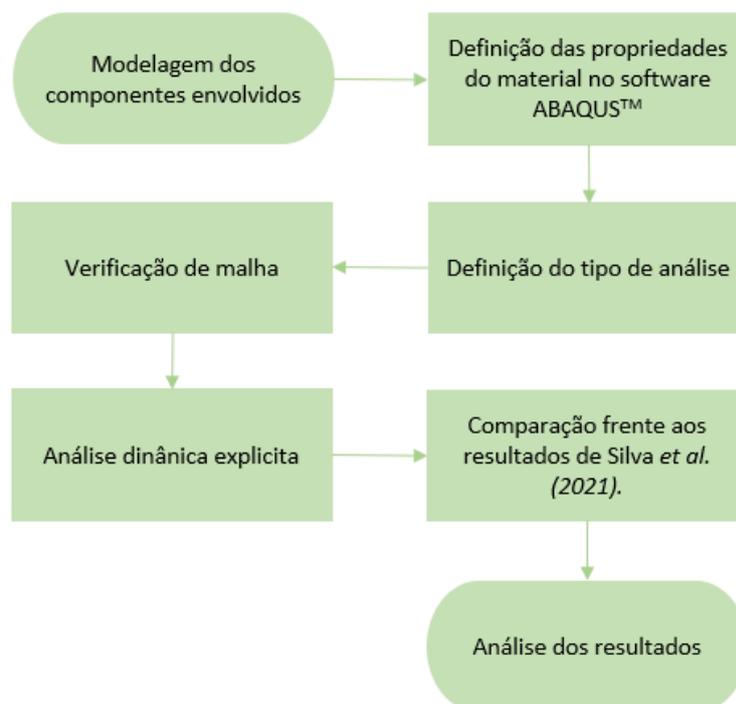
Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10 ³ kg)	slug	lbf s ² /in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Energy	J	mJ (10 ⁻³ J)	ft lbf	in lbf
Density	kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

Fonte: Tita (2012).

3 METODOLOGIA

Este capítulo refere-se à descrição das metodologias que foram desenvolvidas para a obtenção dos resultados para a força máxima aplicada ao punção, para o processamento do ECAP. Como o objetivo deste trabalho é uma validação da simulação frente aos resultados experimentais obtidos por Silva *et al.* (2021) para, futuramente, utilizar deste trabalho para avaliar parâmetros de processos, alguns dados necessários para a simulação, como a geometria da matriz e as propriedades do material, foram utilizados a partir desta literatura. A Figura 11 apresenta um fluxograma do trabalho.

Figura 11 - Fluxograma da metodologia empregada no trabalho

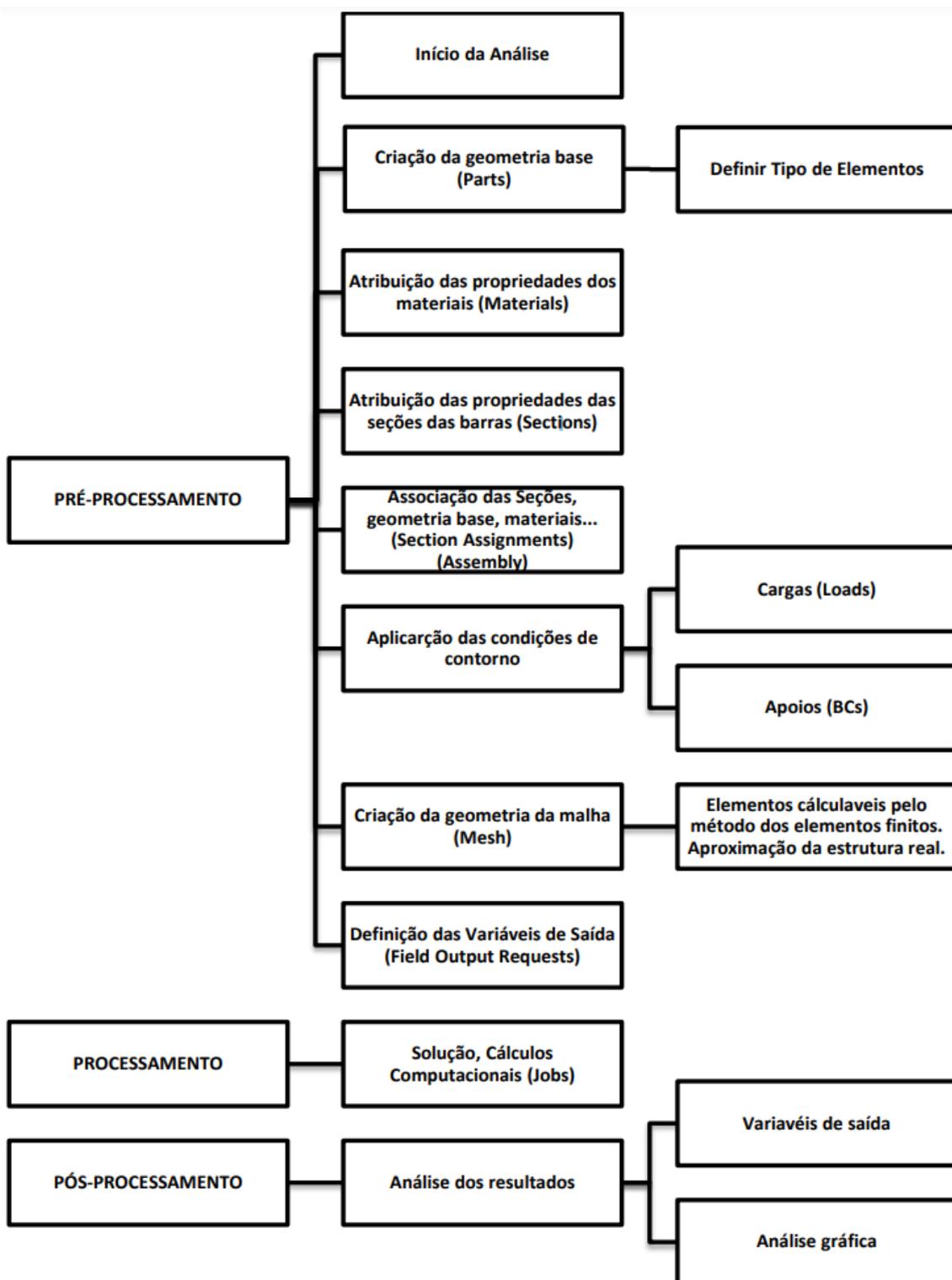


Fonte: Elaborado pelo autor. (2022).

Na figura 12 é ilustrado o fluxograma do procedimento para o processo de simulação, utilizado no software ABAQUS™. As simulações foram realizadas utilizando computadores do Laboratório de Vibrações e Estruturas Leves (LaVEL), Departamento de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC).

Algumas das etapas sintetizadas no fluxograma, são detalhadas nos itens apresentados a seguir.

Figura 12 - Fluxograma do procedimento para simulação utilizando o software ABAQUS™



Fonte: Material disponibilizado pelo Grupo de Estruturas da UFPR (2017).

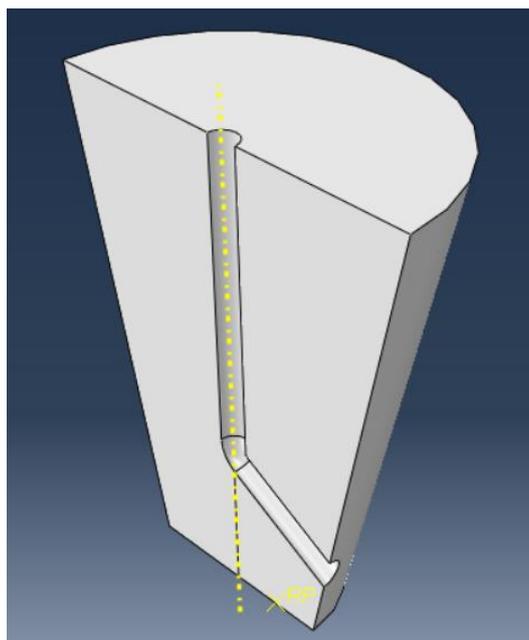
3.1 GEOMETRIA BASE

Os componentes para o processo estudado por Silva *et al.* (2021) foram os seguintes:

- Matriz de base cônica com canais de seção transversal circular de 8 mm de diâmetro, com ângulo de interseção de 120° (Figura 13).
- Corpos de prova em forma de haste de 8 mm de diâmetro em três comprimentos diferentes: 10, 20 e 30 mm (Figura 14).

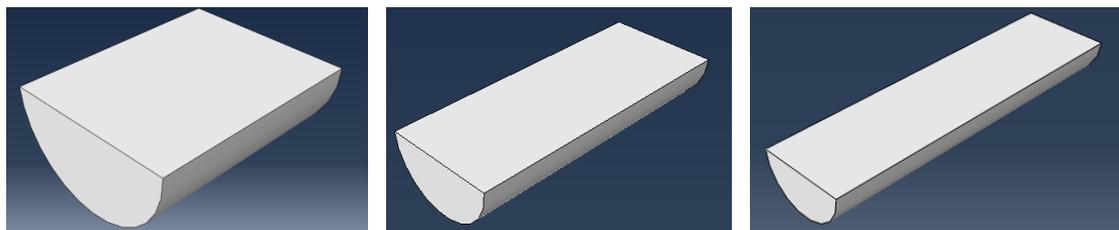
Estes componentes foram modelados em três dimensões no ABAQUS™, o qual possui ferramentas de modelagem. Por todos os componentes serem simétricos, foram modelados metade de cada componente e definidas as condições de simetria posteriormente, assim, reduzindo o tempo de simulação. Além disso, também foi modelado um corpo em forma de haste, de 8 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento (Figura 15), com a finalidade de simular o comportamento do punção utilizado no processo. O corpo de prova e o punção foram definidos como corpos deformáveis, enquanto a matriz foi definida como corpo rígido discreto, devido não se querer, neste momento, resultados neste corpo e visando reduzir também o tempo de processamento da solução.

Figura 13 - Modelamento da matriz do processo ECAP, no software ABAQUS™



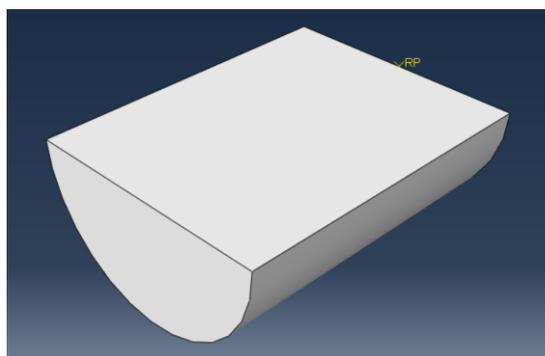
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 14 - Modelamento do corpo de prova de 10mm, 20 e 30 mm, no software ABAQUS™



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 15 - Modelamento do punção, no software ABAQUS™



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.2 PROPRIEDADES DO MATERIAL E DAS SEÇÕES

Antes de definir as propriedades do material, devido o software não apresentar um sistema de unidades, deve-se definir as unidades utilizadas para que se tenha coerência nos resultados. Como nos modelamentos das partes, foi utilizado metro como unidade. Com base na figura 10, foram escolhidas as unidades no sistema internacional (SI).

Para a análise requerida, deve-se fornecer a densidade do material, as propriedades elásticas (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) e as propriedades plásticas do material, por meio de pontos de tensão real (partindo da tensão de escoamento) e deformação real correspondente, então, o software elabora a curva tensão-deformação.

Silva *et al.* (2021) forneceram a tabela 5 com as propriedades mecânicas da liga AA6061-T6. Além disso, por meio de ensaio de tração, os autores obtiveram a curva de tensão-deformação verdadeiras do material, conforme

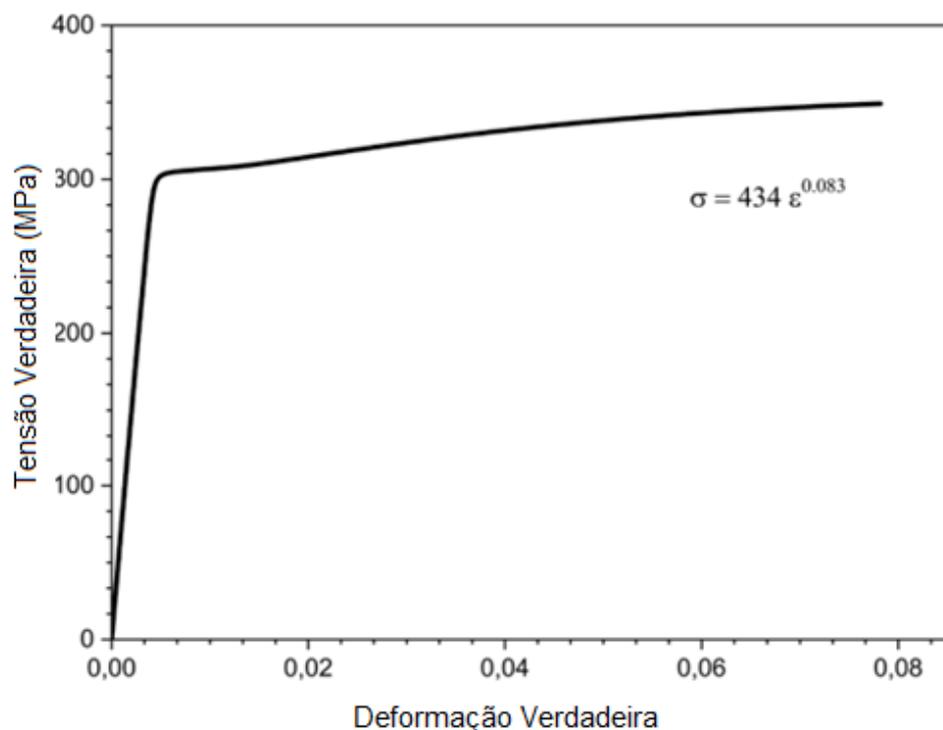
mostrado na figura 16 e, a partir desta curva, calcularam a equação de comportamento plástico do material (equação de Hollomon).

Tabela 5 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AA6061-T6

Material	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão de resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
AA6061-T6	300	330	15	95

Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2021).

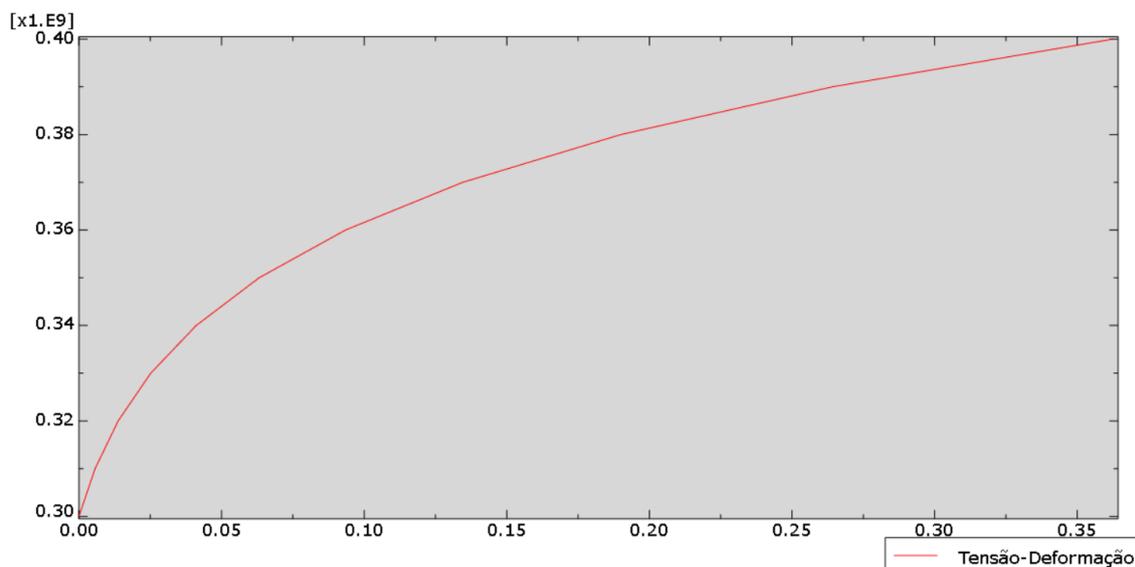
Figura 16 - Curva tensão-deformação verdadeiras e equação de Hollomon da liga de alumínio AA6061-T6



Fonte: Silva *et al.* (2021).

Por meio da utilização do software Excel, a partir da equação do comportamento plástico, calculou-se diversos pontos de tensão em função da deformação. Assim, foram inseridos os valores de tensão, correspondente à cada deformação, no software ABAQUS™, obtendo-se a curva para o comportamento plástico da liga (figura 17).

Figura 17 - Curva tensão-deformação obtida no software ABAQUS™



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Por fim, como no trabalho de Silva *et al.* (2021) não havia informações do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson para definir a propriedade elástica do material, foi feita uma pesquisa destas propriedades para a liga AA6061-T6 onde, segundo Hibbeler (2010), o módulo de elasticidade, a densidade e o coeficiente de Poisson são os mostrados na tabela 6.

Tabela 6 - Densidade e propriedades elásticas para a liga AA6061-T6.

Densidade (kg/m^3)	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
2700	68,9	0,33

Fonte: Elabora pelo autor (2022).

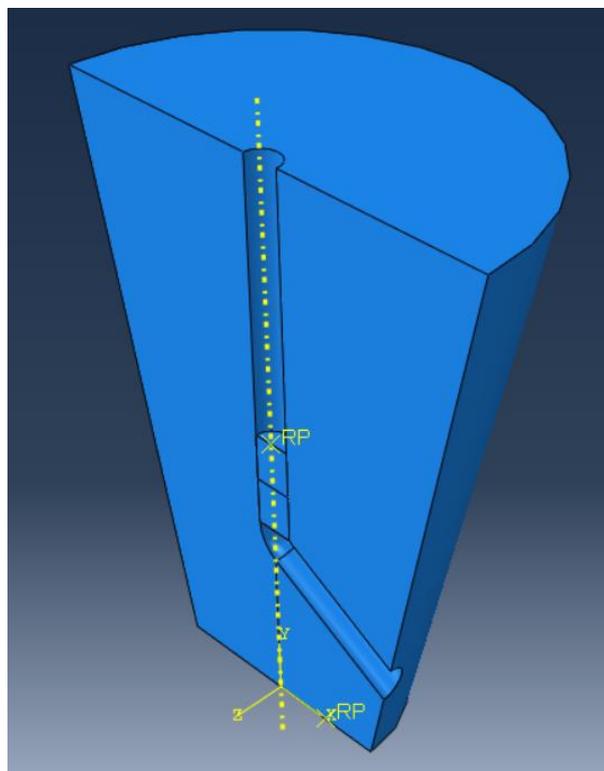
Para o punção, como sua finalidade neste momento é somente na questão de visualização de processo, foi definida uma densidade parecida com a do aço, sendo de $7850 kg/m^3$, e inseriu-se somente propriedades elásticas, coeficiente de Poisson de 0.3 e um módulo de elasticidade fictício de 1000 GPa. A motivação do módulo de elasticidade tão alto foi puramente por aproximar o máximo o punção de um corpo rígido, garantindo-o não deformar plasticamente, porém, sendo ainda deformável para que se obtenha resultados consistentes na simulação.

Com os materiais definidos, foram criadas suas seções sólidas e associadas cada uma a um dos materiais e, então, a seção do material AA6061-T6 foi assimilada à amostra, enquanto à outra seção foi assimilada ao punção.

3.3 MONTAGEM (ASSEMBLY)

Ainda na parte de pré-processamento, após cada peça associada à sua seção e seu material, foi realizada a montagem do setup para o processo ECAP, contendo a matriz, a amostra e o punção. Conforme visto as peças experimentais in loco, foi realizada a montagem com a amostra posicionada na parte inferior do canal vertical da matriz e, então, a face inferior do punção foi posicionada em contato com a face superior da amostra. Esta montagem pode ser vista na figura 18, considerando o corpo de prova de 10mm, utilizando a mesma metodologia para os corpos de prova de 20 e 30 mm.

Figura 18 - Montagem do setup com a amostra de 10 mm para o processo ECAP, no software ABAQUS™



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.4 TIPO DE ANÁLISE (STEP)

O tipo de análise escolhido foi uma análise dinâmica explícita, devido ser um processo de conformação, onde há deformações elevadas, não linearidades na solução, muitas restrições de contato e atrito envolvido. O próprio manual de usuário do ABAQUS™ recomenda uma análise dinâmica explícita para processos de conformação complicados, por este tipo de análise ser mais eficiente computacionalmente e consistente para grandes deformações, podendo-se utilizar malhas adaptativas, conforme será visto adiante. Além disso, constatou-se através da literatura que simulações para ECAP, em sua grande maioria se tratava de simulações dinâmicas explícitas.

Para implementação da análise dinâmica explícita, procedimento de análise, segundo o manual de usuário do ABAQUS™, é baseado na implementação de uma regra de integração explícita juntamente com o uso de matrizes de massa de elementos diagonais (“agrupados”). Deve-se fornecer um fator (ou escala) de massa para o processo, o qual interfere na precisão dos resultados e no tempo de simulação da análise. Com base na literatura em que foram realizadas simulações do processo ECAP, deve-se utilizar um fator de massa sendo de 100 para o step nas análises, pois este valor se mostra obter uma boa precisão nos resultados, ainda que demande maior tempo de simulação.

Neste trabalho, foi primeiramente realizada a simulação do processo ECAP para a amostra de 30 mm, utilizando o fator de massa com valor de 100, conforme recomendado. Devido ao tempo de processamento ser elevado, em torno de 100 horas, utilizou-se um fator de massa de 10000 para as simulações restantes do processo (amostras de 10 e 20 mm), visando reduzir o tempo de processamento, ainda que reduzisse a precisão dos resultados.

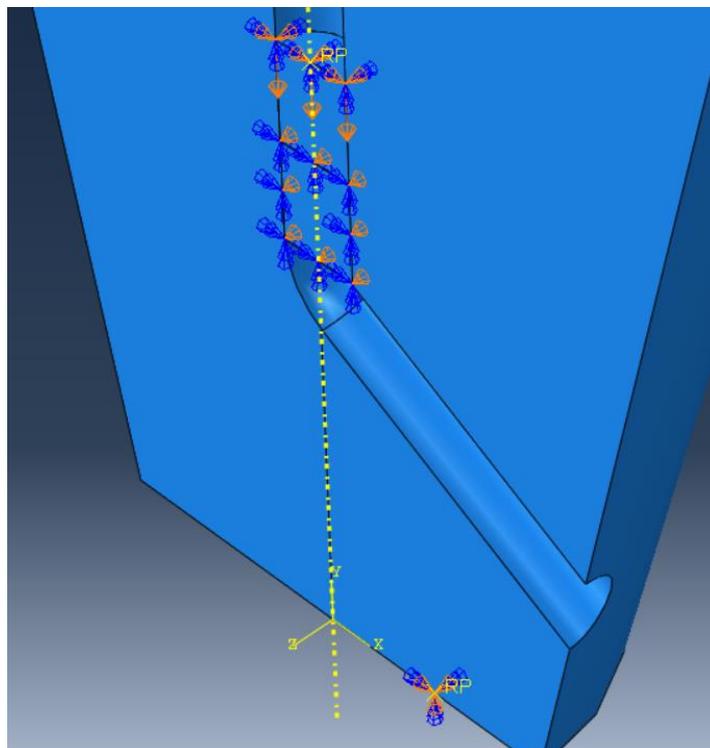
3.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO E INTERAÇÕES

Sendo um passo primordial na solução do método dos elementos finitos, foram impostas condições de contorno para o processo. A primeira delas foi a fixação da matriz do processo, em que foi adicionado ao ponto de referência (RP

– *Reference Point*) uma condição de encastre, ou seja, proibindo deslocamentos e rotações da matriz em quaisquer direções.

Como foi escolhido modelar uma das partes de simetria do processo, foi imposta uma condição de simetria para o corpo de prova, sendo utilizada a condição simetria em Z (conforme sistema de coordenadas da figura 19). Esta condição impõe que o deslocamento na direção Z é nulo ($U_3=0$), assim como a rotação em X ($UR_1=0$) e em Y ($UR_2=0$), portanto, só permitindo deslocamentos nas direções X e Y, e rotação em Z.

Figura 19 - Condições de contorno e deslocamento prescrito para o processo



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Finalmente, no punção foram impostas condições nulas de deslocamentos e rotações em todas as direções, com exceção do deslocamento na direção Y, onde foi definido um deslocamento prescrito vertical no sentido Y negativo até o início da angulação do canal, simulando o processo, sendo seu valor diferente para cada um dos setups, a depender do comprimento de cada amostra a ser processada. Para a simulação da amostra de 10 mm, foi definido um deslocamento no punção sendo de 10 mm no sentido vertical; na simulação para a amostra de 20 mm, um deslocamento de 20 mm; e para a simulação da

amostra de 30 mm, o deslocamento foi de 30 mm. Na figura 18 são ilustradas todas as condições de contorno impostas no processo para o corpo de prova de 10mm, sendo da mesma forma para os demais corpos de prova.

Também, para as simulações definiu-se a interação entre as peças sendo de penalidade por atrito, em que foi imprimido um fator de 0,14. Este valor foi obtido a partir do estudo de Silva *et al.* (2021), onde os autores realizaram um teste de compressão do barril à temperatura ambiente, utilizando o mesmo lubrificante utilizado para a realização do processo ECAP.

3.6 MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Em seguida, foram realizadas a discretização dos componentes, sendo feitos de diferentes formas. Para os elementos definidos como deformáveis (amostra e punção), foram utilizados elementos hexaédricos lineares, compostos por 8 nós, explícitos (devido ser um step explícito), denominados C3D8R. Sendo assim, definiu-se para a peça simulando o punção, um tamanho de elemento sendo de 0.0005 m, gerando 2460 elementos discretizados. Já para a discretização das amostras, definiu-se um tamanho de elementos de malha sendo de 0.0002 m, o que gerou para as amostras de 10, 20 e 30 mm de comprimento, 37250, 73100 e 109650 elementos, respectivamente.

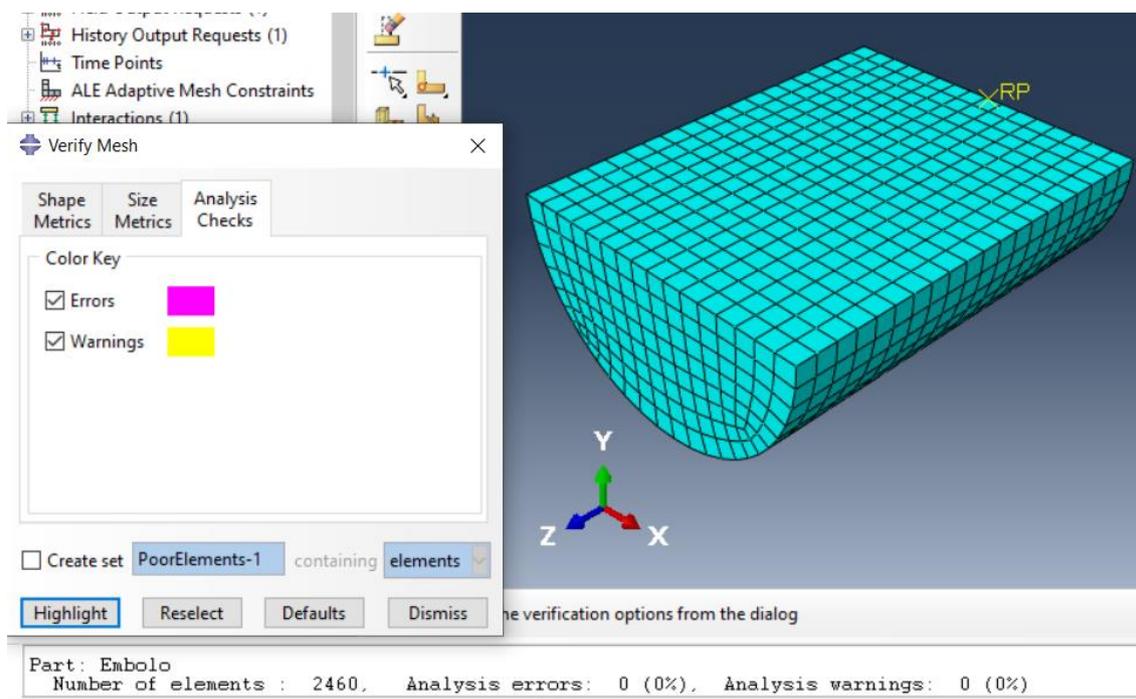
Para a matriz, se tratando de um elemento definido como discreto rígido, determinou-se o tipo de elemento sendo quadrilátero linear, composto por 4 nós, também explícito, denominado R3D4. Por meio de uma análise do processo, observa-se que a maior solicitação de tensões e deformações será nos canais da matriz, mais precisamente na curvatura de intersecção, portanto, foi definida uma malha grosseira para a matriz em geral e refinando-a nos canais conforme aproximação da intersecção. Com isso, foi utilizado um tamanho de elemento global sendo de 0.005 m, enquanto na curvatura definiu-se por meio do número de elementos, sendo de 60 elementos. Portanto, a discretização final obtida para a matriz foi de 22992 elementos.

A discretização é um fator primordial na análise de elementos finitos sendo que, se for gerada uma malha de má qualidade, poderá ocorrer desde não simular o processo, gerando erros e abortando a simulação, até a solução errada

do processo, obtendo-se resultados não consistentes e irreais. Portanto, com a finalidade de contornar estes erros e obter resultados satisfatórios, foi realizada uma verificação das malhas de todas as peças utilizadas para a simulação. Esta verificação foi feita por um comando do próprio ABAQUS™, chamado de “*Verify Mesh*”, em que avalia a malha e mostra (por meio de cores) os elementos que gerariam erros e/ou avisos na solução da simulação. Então, realizando esta verificação de malha para cada um dos elementos, não foi identificado nenhum ponto que geraria avisos e erros na solução.

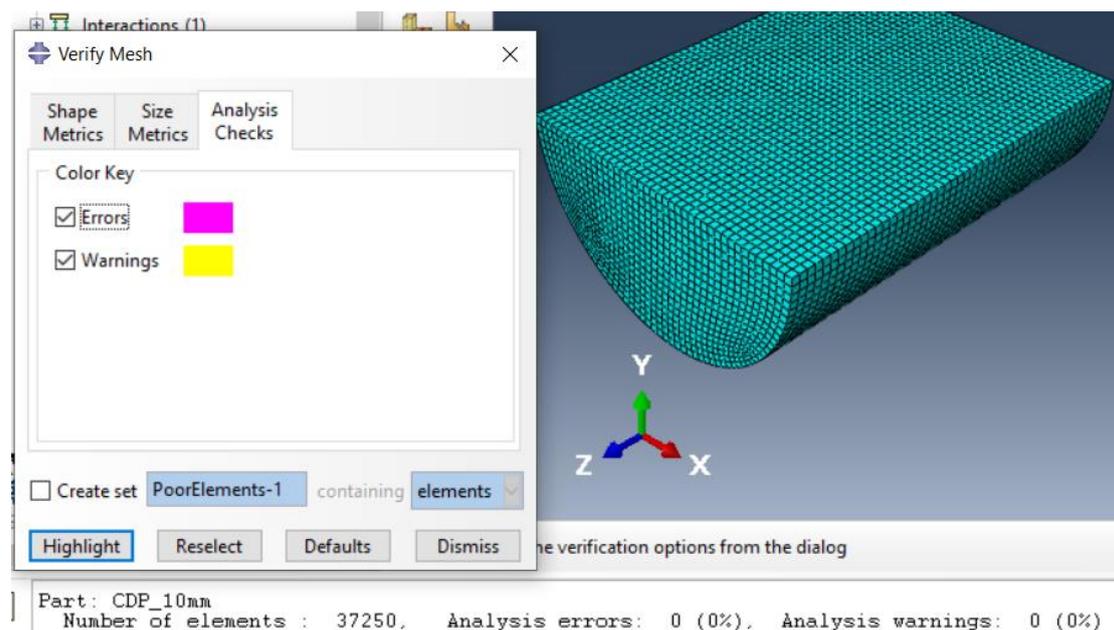
Nas figuras 20-24 são ilustradas as discretizações de cada componente utilizado na simulação, assim como, evidenciado a verificação das malhas, onde verifica-se a não existência de nenhum ponto crítico.

Figura 20 - Modelo de malha utilizado para o punção



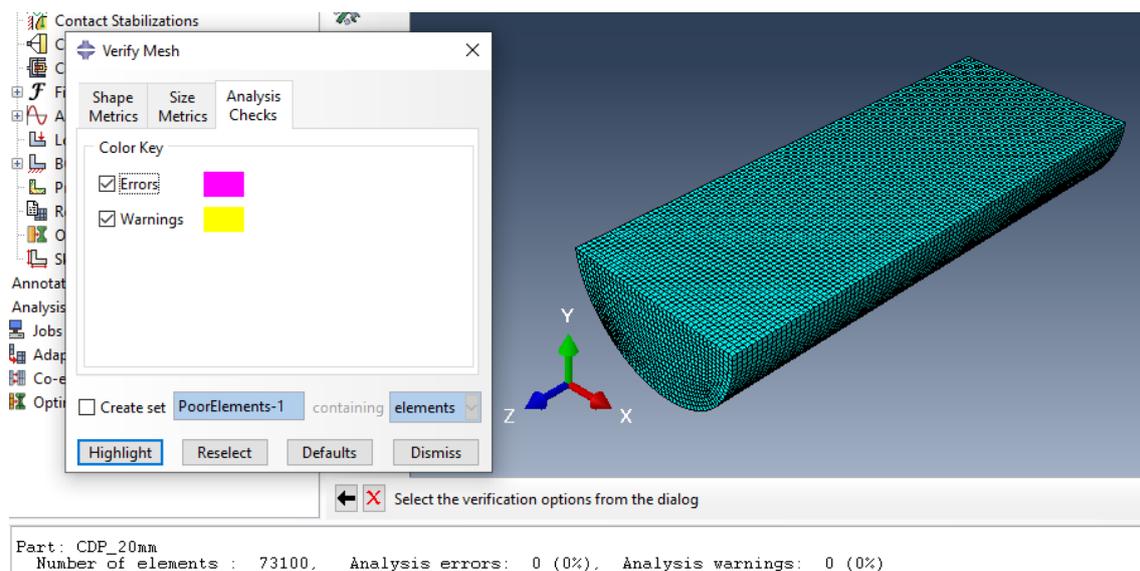
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 21 - Modelo de malha utilizado para a amostra de 10 mm



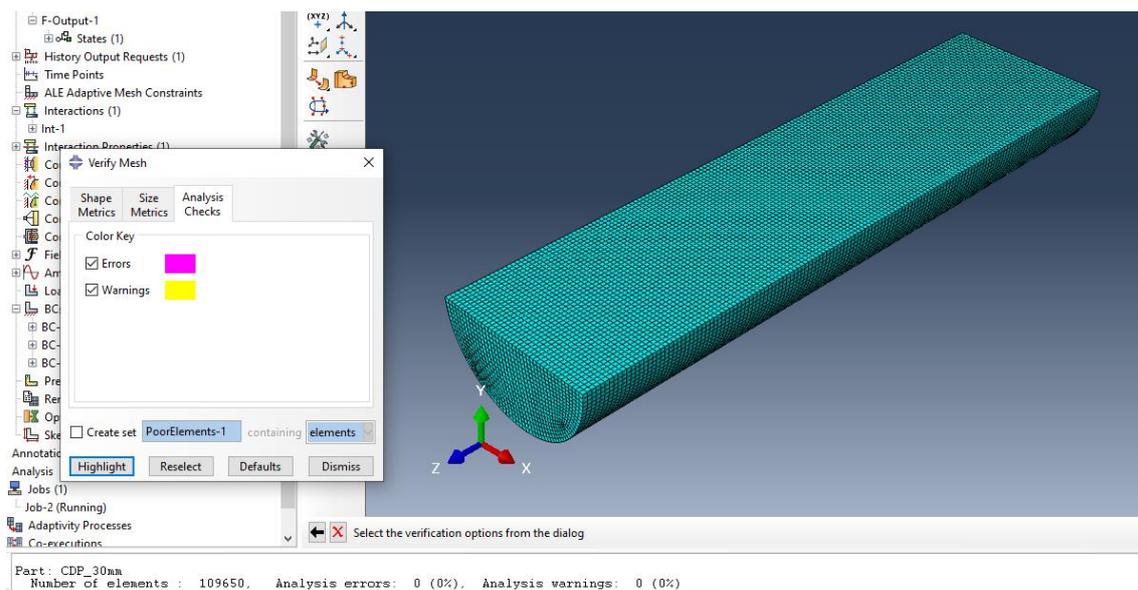
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 22 - Modelo de malha utilizado para a amostra de 20 mm



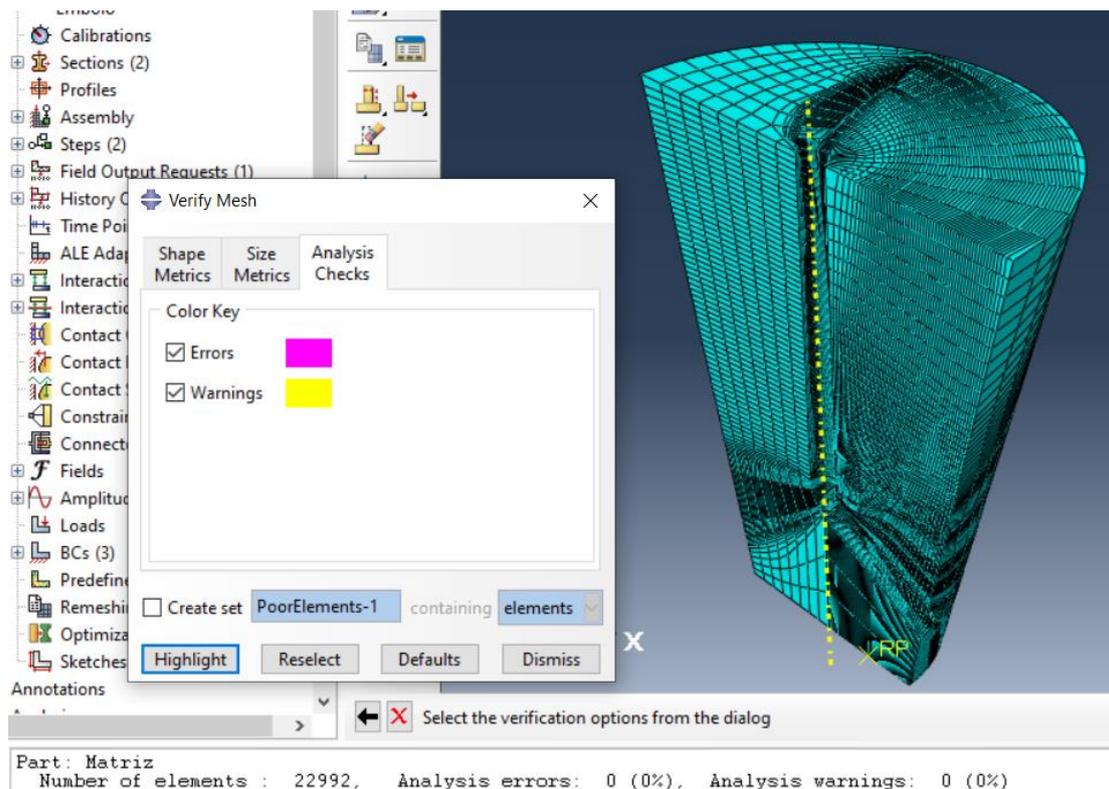
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 23 - Modelo de malha utilizado para a amostra de 30 mm



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 24 - Modelo de malha utilizado para a matriz



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Além disso, conforme o manual do usuário do ABAQUS™, foi utilizado um controle de malha adaptativa. Isto se deve ao fato de o processo ECAP ser um processo em que se tem deformações severas, o que faz com que os elementos

de malha sofram distorções excessivas, muitas vezes até o ponto em que a análise seja abortada por razões numéricas ou que se obtenha valores precisos. Portanto, utilizou-se uma malha adaptativa, do tipo Lagrangeana-Euleriana Arbitrária (ALE) com frequência de 5 e com 3 varreduras da malha por incremento de malha adaptável, no corpo de prova do ECAP.

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA METODOLOGIA

Realizados os passos de pré-processamento, partiu-se para a parte de processamento, em que foi criado um JOB no ABAQUS™, feita uma checagem de dados, por meio do “*Data Check*” e, após concluído sem erros, a análise foi então submetida para solução.

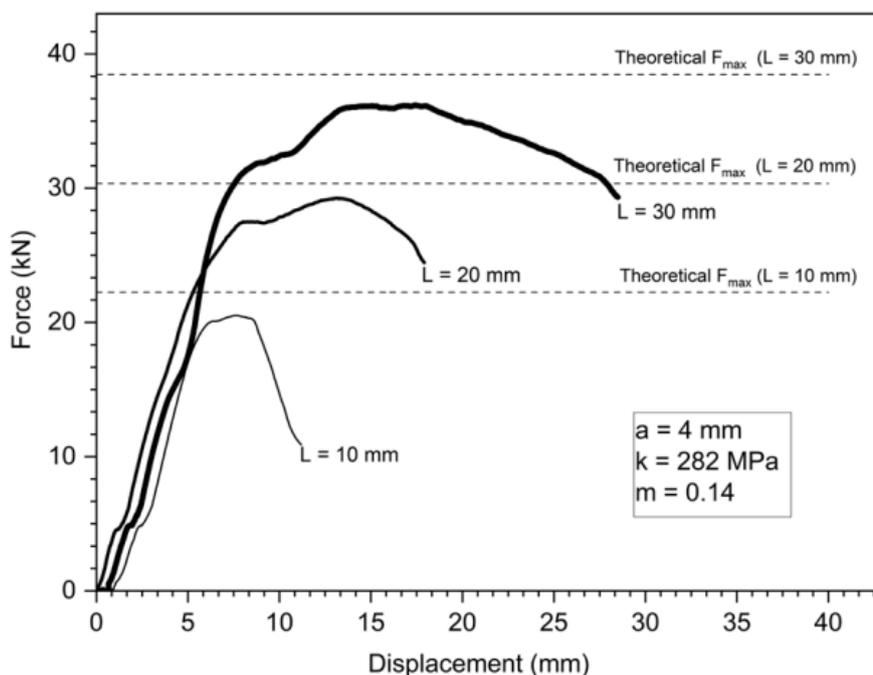
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após finalizada a etapa de processamento para a solução do problema, segue-se para a etapa de pós-processamento, em que é realizada a análise dos resultados. Sendo assim, esta seção apresenta os resultados obtidos, por meio da simulação, para a força aplicada ao punção e, então, compará-la com os dados experimentais, obtidos do estudo de Silva *et al.* (2021).

4.1 FORÇA OBTIDA EXPERIMENTALMENTE POR SILVA ET AL. (2021)

No estudo de Silva *et al.* (2021), realizou-se o processamento, para cada uma das três amostras e obteve-se a variação da força em relação ao deslocamento do punção. Além disso, os autores calcularam a força máxima analiticamente, por meio do método da energia superior e plotaram no mesmo gráfico, para finalidades de comparação. Estes resultados são apresentados na figura 25.

Figura 25 - Resultados obtidos experimentalmente e analiticamente para a força do processo versus o deslocamento do punção.



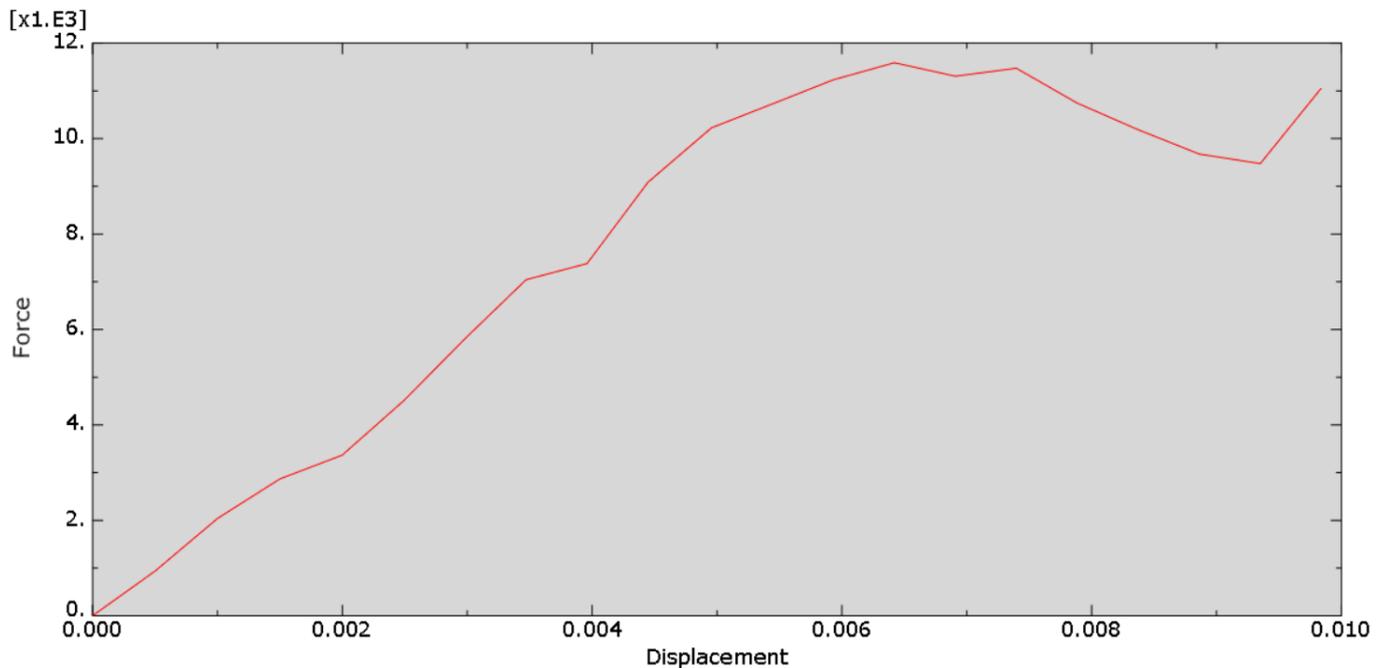
Fonte: Silva *et al.* (2021).

A partir do gráfico obtido percebe-se que experimentalmente chegou-se nas forças máximas do processo para os corpos de prova de 10, 20 e 30 mm sendo, aproximadamente, 20.5 kN (a um deslocamento de 7.5 mm), 29 kN (a um deslocamento de 13.3 mm) e 38 kN (a um deslocamento de 14 mm), respectivamente.

4.2 FORÇA OBTIDA NUMERICAMENTE

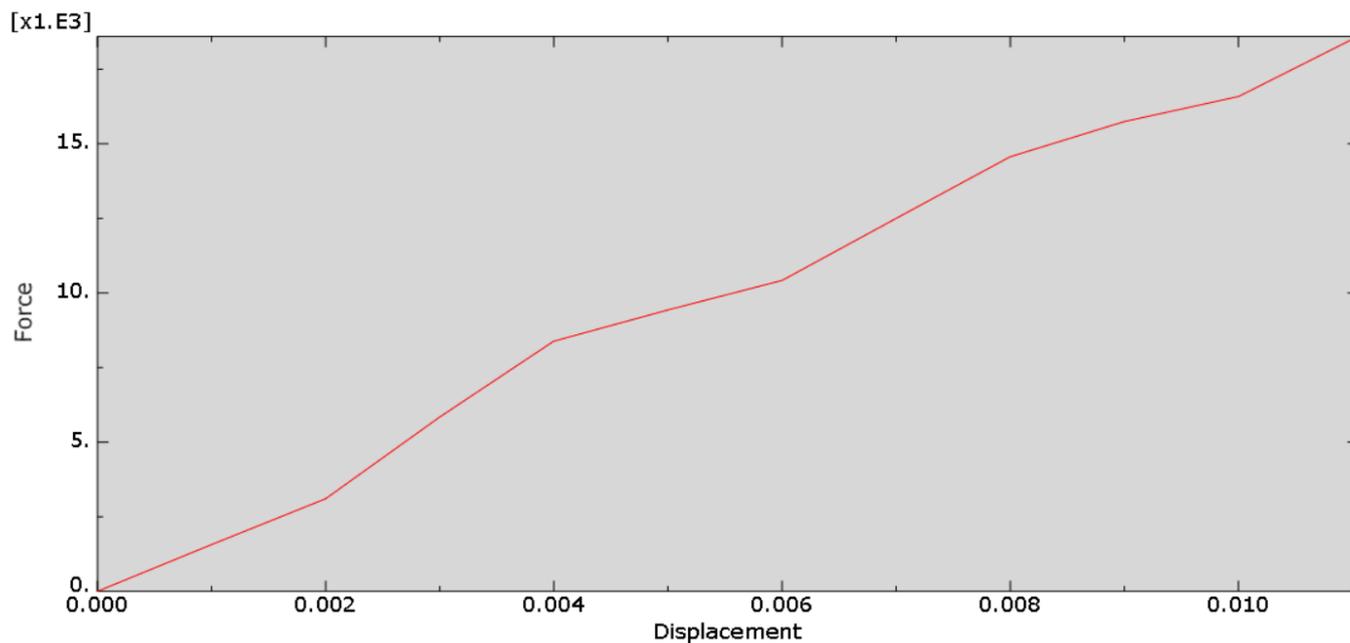
A partir da solução numérica da simulação para o processo ECAP, plotou-se os gráficos de força aplicada ao punção versus o deslocamento. As figuras 26-28 mostram os resultados para o procedimento com as amostras de 10, 20 e 30 mm.

Figura 26 - Resultados obtidos a para a força versus deslocamento do punção para a simulação numérica do processo ECAP com amostra de 10 mm.



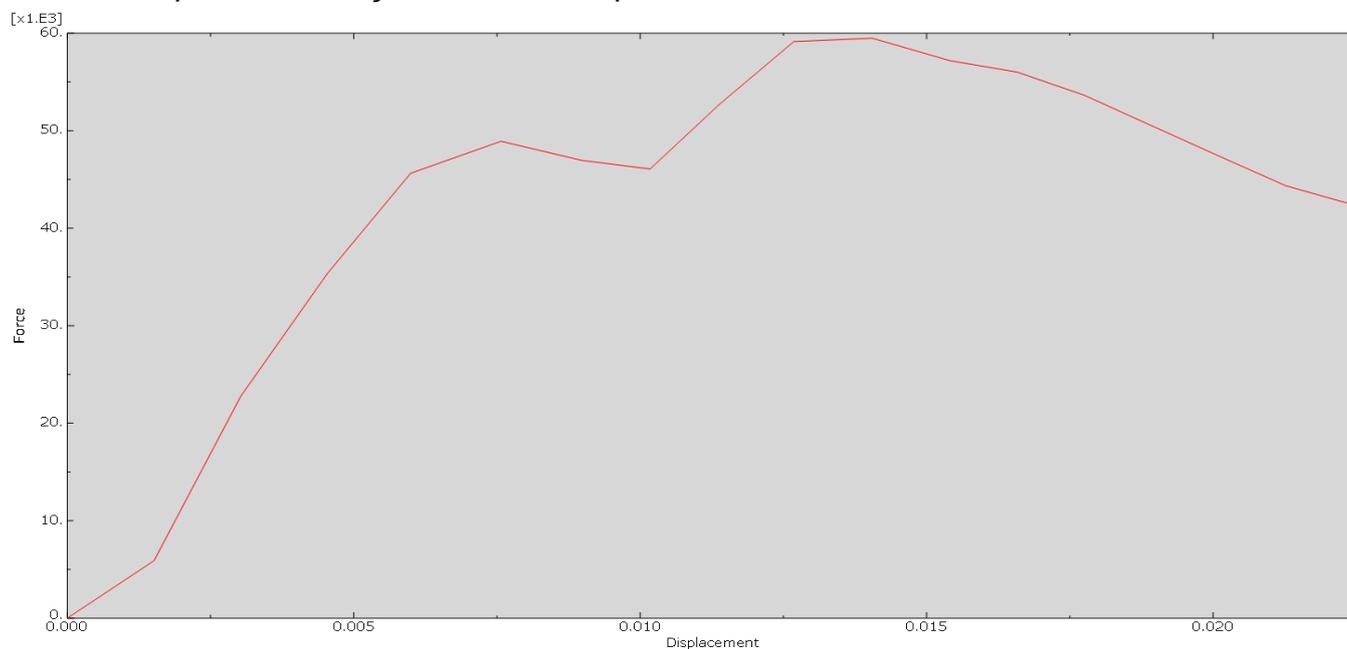
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 27 - Resultados obtidos a para a força versus deslocamento do punção para a simulação numérica do processo ECAP com amostra de 20 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 28 - Resultados obtidos a para a força versus deslocamento do punção para a simulação numérica do processo ECAP com amostra de 30 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Analisando as figuras 26, 27 e 28 é possível notar diferenças de comportamentos nas curvas obtidas para a força versus deslocamento no punção. Isto se deve provavelmente ao fator de massa escolhido no step da simulação, o que implica na precisão das análises para o resultado. Observa-se que o comportamento da curva do processo com a amostra de 30 mm foi o que se mostrou mais próximo do comportamento da curva experimental da figura 25, onde é apresentado uma queda da força no fim do processo. Ainda, chegou-se para os valores da força máxima aplicada ao punção para os corpos de prova de 10 e 30 mm sendo de 11.56 kN (a um deslocamento de 6.42 mm), e 59.3 kN (a um deslocamento de 14.06 mm).

Percebe-se que os resultados mostrados na figura 27, considerando a amostra de 20mm, o deslocamento total do punção foi de apenas 11mm, não realizando o processo completo. Ainda assim, até o ponto de deslocamento em que foi realizada a análise, chegou-se em uma força máxima aplicada ao punção sendo de 18.5 kN à um deslocamento do punção de 11 mm, porém, observa-se que a curva continuaria a subir, atingindo uma força máxima maior que 18.5 kN. Também, até o ponto em que foi simulado, observa-se que o comportamento da curva está dentro do que era esperado.

4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Com a finalidade de se comparar os resultados obtidos neste trabalho com os dados experimentais obtidos por Silva *et al.* (2021), foram calculadas as diferenças relativas dos resultados para a força máxima aplicada ao punção, e para o deslocamento em que ocorre esta força máxima, conforme apresentado na tabela 7. Nesta tabela, foi desconsiderado os resultados para o corpo de prova de 20 mm, já que como mencionado anteriormente, não foi possível concluir a simulação.

A partir da tabela 7, nota-se uma diferença relativa máxima de 14,4% para os resultados do ponto de deslocamento do punção onde ocorre a força máxima, sendo a diferença relativa para a simulação com a amostra de 30 mm menor, quando comparada a amostra de 10 mm, isto devido ao ser utilizado um fator de massa mais preciso para a simulação de 30 mm. Já os resultados para a força

máxima aplicada ao punção apresentaram diferenças relativas em torno de 50%, quando comparados aos valores experimentais do processo.

Tabela 7 – Comparação dos resultados obtidos por simulação numérica com os resultados do trabalho de Silva et al. (2021)

Amostra	Força máxima aplicada no punção [kN]			Deslocamento onde ocorre a força máxima [mm]		
	Experimental	Simulação	Diferença relativa [%]	Experimental	Simulação	Diferença relativa [%]
10 mm	20,5	11,56	43,61	7,5	6,42	14,40
30 mm	38	59,3	56,05	14	14,6	4,29

Fonte: Próprio autor.

Acredita-se que estas diferenças relativas provêm de duas situações principais. A primeira delas, no caso da simulação numérica do processo para o corpo de prova de 30 mm, o resultado da força ser consideravelmente maior do que a experimental é devido ao fato de, ao modelar a matriz como um corpo rígido discreto e não um corpo deformável, como é na realidade, e com base na análise adotada ser dinâmica explícita (considera energias envolvidas), a matriz não absorve as energias do processo. Assim, a energia é dividida entre o punção e o corpo de prova, gerando então resultados acima do esperado.

Enquanto no caso da simulação da amostra de 10 mm (e da amostra de 20 mm, muito provavelmente), por serem simuladas considerando um fator de escala de massa sendo de 10000 ao invés de 100, apresenta menor precisão dos resultados, devido ser consideravelmente menor número de incrementos utilizados para a análise.

Além das fontes de erros citadas, ainda pode-se ter erros providos da definição dos contatos do processo e, também, do refinamento da malha utilizada.

Portanto, com base na análise feita, acredita-se que para obter resultados mais concisos deve-se realizar uma análise com o fator de escala de massa

sendo de 100 e, ainda, modelando a matriz como um corpo deformável. Porém, esta análise demandaria um tempo de processamento significativamente maior.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados, aplicados e discutidos diversos conceitos relacionados à engenharia mecânica e de materiais, como deformações, tensões e suas curvas (nominais e reais), deformações plásticas e processos de deformação plástica severa, como o ECAP, assim como a abordagem pelo método dos elementos finitos. Com estes conceitos, foi elaborada uma modelagem e, conseqüente simulação do processo de extrusão de canal angular (ECAP), por meio do método dos elementos finitos, com a finalidade de se obter a força aplicada ao punção durante o processo e, então, compará-la aos resultados experimentais obtidos por Silva *et al.* (2021).

A partir dos resultados obtidos, foram observados diferença relativas médias de 49.83% para a força máxima aplicada ao punção e de 9.34% para o deslocamento onde ocorre a força máxima no punção, quando comparados aos resultados experimentais obtidos por Silva *et al.* (2021).

Ainda que não tenha sido possível, neste momento, uma validação das simulações com os resultados experimentais obtidos por Silva *et al.* (2021) devido as diferenças relativas para a força, foram notados comportamentos das curvas de força por deslocamento do punção satisfatórios e condizentes aos resultados da literatura. Assim, implementar melhorias na realização do pré-processamento - modelando a matriz como um corpo deformável, refinando a malha, diminuindo a frequência e/ou aumentando o número de varreduras por incremento para a malha adaptativa, e utilizando um fator de escala de massa sendo de 100 para uma simulação dinâmica explícita, é possível obter resultados mais coerentes com a literatura e validá-los, afim de utilizar esta simulação para avaliar diferentes materiais e influências do processo ECAP.

Como sugestão para trabalhos futuros, além do que foi exposto no parágrafo anterior, visando uma melhoria no processo da simulação e, conseqüentemente, resultados que apresentem uma menor diferença relativa, é sugerido analisar as propriedades do material comercial e comparar com as propriedades do material pós processamento ECAP (com um ou n passes) e, avaliar os efeitos das variáveis de processo na questão da homogeneidade da microestrutura.

REFERÊNCIAS

- ABAL, **Fundamentos e aplicações do alumínio**. São Paulo, 35 p., 2007.
- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos, a base da tecnologia CAE – Análise dinâmica**. 1 Ed. São Paulo: Editora Érica, 2005.
- ALVES FILHO, A. **Modelos e a interpretação CAE – Parte 1. Método de elementos finitos**. Série i-[cae] 001 Computer Aided Design. Revista Cadware, 2000.
- ALVES FILHO, A. **Modelos e a interpretação CAE – Parte 2. Método de elementos finitos**. Série i-[cae] 002 Computer Aided Design. Revista Cadware, 2001.
- BERKENBROCK, Caroline Angélica. **Comparativo da resposta estrutural de um pavimento flexível simulado numericamente, com base nos dados obtidos pelos ensaios com o FWD e com a viga BENKELMAN**. 2022. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2022.
- CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 910 p.
- DASSAULT SYSTÈMES. **Abaqus 6.14 Online Documentation**. [s. l.], Dassault Systèmes, 2014. Disponível em: <http://130.149.89.49:2080/v6.14/>
- FERNANDES, Camila Albuquerque. **Estudo do desempenho mecânico e microestrutural de uniões da liga de alumínio, AA6061-T6, por solda a ponto por fricção (FSpW)**. 2016. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2016.
- GERE, James M. **Mecânica dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2003. 654 p.
- Grupo de estruturas. **Tutorial Abaqus**. Grupo de estruturas: Universidade Federal do Paraná, 2017.
- HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2015. 61 p.
- HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 659 p.
- HUANG, Y.; LANGDON, T.G., Advance in ultrafine-grained material. **Materials Today**. v. 16, p. 85 – 93, 2013.
- LOGAN, D. L. **A first course in the finite element method**. 6. ed. Boston: Cengage Learning, 2015, 955p.

- MENDES FILHO, Anibal de Andrade. **Deformação plástica severa em temperaturas ambiente e criogênica, de ti comercialmente puro**. 2015. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.
- POPOV, Egor P. **Introdução à Mecânica dos Sólidos**. São Paulo: Blucher, 1978. 552 p.
- SANTOS, Pablo Almeida. **Uma abordagem do método do limite superior no processo de extrusão em canal angular de 120°**. 2020. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020.
- SEGAL, V. M., Materials processing by simple shear. **Materials Science Engineering A**, v. 197, p. 157 – 164, 1995.
- SILVA, Jailson da et al. Upper-Bound Analysis for Equal Channel Angular Pressing (ECAP) with an Intersecting Channel Angle of 120°. **Materials Research [online]**. 2021, v. 24, n. 6. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0316>
- SILVA, João Paulo Weselovski da. **Análise do comportamento dinâmico linear de membranas hiperelásticas considerando os modelos de neo-Hooke e MooneyRivlin**. 2020. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020.
- SORIANO, Humberto Lima. **Método de elementos finitos em análise de estruturas**. São Paulo: EDUSP, 2003. 506 p.
- SOUZA, Henrique Pedrini de. **Efeito da temperatura de solubilização no envelhecimento da liga de alumínio 6061**. 2006. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.
- TITA, Volnei. **Tutoriais Abaqus**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2012.
- VALIEV, R.Z., Estrin, Y., Horita, Z. et al. **Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation**. JOM 58, 33–39 (2006). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0213-7>
- VALIEV, Ruslan Z.; LANGDON, Terence G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. **Progress in Materials Science**, [S. l.], v. 51, n. 7, p. 881–981, 2006 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003>.
- VALIEV, Ruslan Z.; LANGDON, Terence G., Report of International NanoSPD Steering Committee and statistics on recent NanoSPD activities. **IOP Conference Series in Materials Science Engineering**, v. 63, p. 1 – 2, 2014.

ZHU, B. **The finite element method:** fundamentals and applications in civil, hydraulic, mechanical and aeronautical engineering. Singapura: John Wiley & Sons Singapore Pte, 2018, 843p.