



Universidade Federal do Rio Grande
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Simulação Numérica por Elementos Finitos do Processo de Calandragem de Perfis de Alumínio 6061 T6 Usados em Aplicações Navais

Dissertação de: Mestrado
Mauricio Da Silva Moreira

Orientador:
Liércio André Isoldi

Coorientadores:
Carlos Eduardo Marcos Guilherme
João Henrique Corrêa de Souza

março de 2024

Dissertação - PPGeo –FURG

Maurício da Silva Moreira
Mestre em Engenharia Oceânica

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGeo) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Prof. Dr. Jeferson Avila Souza
Coordenador do PPGeo

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **LIÉRCIO ANDRÉ ISOLDI**
Data: 06/04/2024 10:26:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Orientador — PPGeo/FURG

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS EDUARDO MARCOS GUILHERME**
Data: 02/04/2024 18:07:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Eduardo Marcos Guilherme
Coorientador — PPGeo/FURG

Documento assinado digitalmente
 **JOÃO HENRIQUE CORREIA DE SOUZA**
Data: 06/04/2024 09:01:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João Henrique Corrêa de Souza
Coorientador — TechnNova

Documento assinado digitalmente
 **PAULO ROBERTO DE FREITAS TEIXEIRA**
Data: 01/04/2024 15:56:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira
Membro Interno — PPGeo/FURG

Documento assinado digitalmente
 **FELIPE TEMPEL STUMPF**
Data: 01/04/2024 15:16:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Felipe Tempel Stumpf
Membro Externo — DEMEC/UFRGS

Rio Grande, 18 de março de 2024

Ficha Catalográfica

M838s Moreira, Mauricio da Silva.

Simulação numérica por elementos finitos do processo de calandragem de perfis de alumínio 6061 T6 usados em aplicações navais / Mauricio da Silva Moreira. – 2024.
76 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio Grande/RS, 2024.

Orientador: Dr. Liércio André Isoldi.

Coorientador: Dr. Carlos Eduardo Marcos Guilherme.

Coorientador: Dr. João Henrique Corrêa de Souza.

1. Calandragem 2. Alumínio 6061 t6 3. Conformação plástica
4. Elementos finitos I. Isoldi, Liércio André II. Guilherme, Carlos
Eduardo Marcos III. Souza, João Henrique Corrêa de IV. Título.

CDU 551.46

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

*Não se deve ir atrás de objetivos fáceis, é preciso buscar o que só
pode ser alcançado por meio dos maiores esforços.*

ALBERT EINSTEIN

Agradecimentos

Agradece à TechnNova pelo apoio financeiro e por fornecer todas as informações técnicas necessárias para a execução deste trabalho.

Ao meu pai que sempre esteve me apoiando e incentivando nesta difícil jornada, e acima de tudo acreditou no meu potencial.

Aos professores Liércio André Isoldi, Carlos Eduardo Marcos Guilherme e João Henrique Corrêa de Souza pela valiosa e indispensável orientação, que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

E, finalmente, a Deus que me deu forças e coragem para a realização desta dissertação.

Resumo

Mauricio da Silva Moreira

Esta dissertação tem como foco principal a validação de um modelo computacional utilizado para simular o processo de calandragem de perfis metálicos utilizando diferentes elementos finitos. Adicionalmente, o estudo abrange a previsão de defeitos durante o processo de calandragem. Para tanto, foram realizados testes de validação do modelo em um perfil I de aço S235, com os resultados comparados aos dados experimentais disponíveis na literatura. Posteriormente, o modelo validado foi empregado em um estudo de casos envolvendo quatro perfis de alumínio 6061-T6, os quais possuem diferentes seções transversais. O alumínio 6061-T6 é uma liga amplamente empregada em aplicações marítimas devido às suas propriedades, como resistência à corrosão, elevada resistência mecânica, leveza, boa soldabilidade e resistência à fadiga. Nesse estudo, os perfis foram submetidos a simulações numéricas, considerando esforços verticais aplicados por meio dos rolos de calandragem. Para avaliar a robustez do modelo, foram testados quatro tipos distintos de elementos finitos: o elemento finito hexaédrico de ordem linear com 8 nós (SOLID185), o elemento finito hexaédrico de ordem quadrática com 20 nós (SOLID186), o elemento finito tetraédrico de ordem quadrática com 10 nós (SOLID187) e o elemento finito tetraédrico de ordem linear com 4 nós (SOLID285). Os resultados desses testes foram comparados entre si e com os dados experimentais disponíveis. Os testes de convergência de malha revelaram a estabilidade dos resultados, com uma variação de -0,61% ao utilizar o elemento finito SOLID186 e uma estabilidade de 6,59% com o elemento finito SOLID187. Os elementos finitos SOLID185 e 285 demonstraram uma menor estabilidade, com variações superiores a 15%. Os resultados obtidos destacaram a consistência entre os diferentes elementos finitos testados, apesar de algumas diferenças na precisão. Além disso, ao comparar os resultados da simulação com o perfil I de aço S235 com os dados experimentais, observou-se uma discrepância de -1,61% para o modelo que utilizou o elemento finito SOLID186 e -10,48% para o modelo que empregou o elemento finito SOLID187. Com base nesses resultados, foi possível validar o modelo computacional e determinar que os elementos finitos SOLID186 e SOLID187 são os mais adequados para representar com precisão o processo de calandragem de perfis metálicos. Já no estudo de casos, os resultados obtidos demonstram padrões consistentes em relação às tensões e deslocamentos em diferentes raios de curvatura. À medida que o raio de curvatura diminui, a tensão de von Mises tende a aumentar, aproximando-se do limite de resistência do material. Esse fenômeno é crítico para identificar os pontos de tensão máxima e garantir margens de segurança adequadas para evitar falhas estruturais. Os deslocamentos ao longo dos perfis também são monitorados e fornecem informações importantes sobre a evolução do deslocamento em diferentes raios de curvatura. A pes-

quiza identifica padrões consistentes que ajudam a determinar a influência direta da curvatura nos defeitos resultantes, contribuindo para a compreensão aprofundada do comportamento mecânico desses perfis.

Palavras-chave: Calandragem, alumínio 6061 t6, conformação plástica, elementos finitos.

Abstract

Mauricio da Silva Moreira

The main focus of this dissertation is the validation of a computer model used to simulate the bending process of metal profiles using different finite elements. In addition, the study covers the prediction of defects during the calendering process. To this end, validation tests of the model were carried out on an S235 steel I-profile, with the results compared to experimental data available in the literature. Subsequently, the validated model was used in a case study involving four 6061-T6 aluminum profiles, which have different cross-sections. Aluminum 6061-T6 is an alloy widely used in marine applications due to its properties such as corrosion resistance, high mechanical strength, lightness, good weldability and fatigue resistance. In this study, the profiles were subjected to numerical simulations, considering vertical stresses applied by the calendering rollers. To assess the robustness of the model, four different types of finite element were tested: the linear order hexahedral finite element with 8 nodes (SOLID185), the quadratic order hexahedral finite element with 20 nodes (SOLID186), the quadratic order tetrahedral finite element with 10 nodes (SOLID187) and the linear order tetrahedral finite element with 4 nodes (SOLID285). The results of these tests were compared with each other and with the available experimental data. The mesh convergence tests revealed the stability of the results, with a variation of -0.61% when using the SOLID186 finite element and a stability of 6.59% with the SOLID187 finite element. The SOLID185 and 285 finite elements showed less stability, with variations of more than 15%. The results obtained highlight the consistency between the different finite elements tested, despite some differences in accuracy. Furthermore, when comparing the simulation results with the S235 steel I-profile with the experimental data, a discrepancy of -1.61% was observed for the model using the SOLID186 finite element and -10.48% for the model using the SOLID187 finite element. Based on these results, it was possible to validate the computational model and determine that the SOLID186 and SOLID187 finite elements are the most suitable for accurately representing the metal profile calendering process. In the case study, the results obtained show consistent patterns in relation to stresses and displacements at different bending radii. As the bending radius decreases, the von Mises stress tends to increase, approaching the strength limit of the material. This phenomenon is critical for identifying the points of maximum stress and ensuring adequate safety margins to avoid structural failures. The displacements along the profiles are also monitored and provide important information on the evolution of displacement at different radii of curvature. The research identifies consistent patterns that help determine the direct influence of curvature on the resulting defects, contributing to an in-depth understanding of the mechanical behavior of these profiles.

Keywords: Three-roll bending, 6061 t6 aluminum, plastic forming, finite elements.

Sumário

	Página
Lista de Figuras	XII
Lista de Tabelas	XV
Lista de Símbolos	XVI
Lista de Siglas	XVII
1 Introdução	1
1.1 Motivação e justificativa	4
1.2 Objetivos	5
1.3 Objetivos específicos	5
2 Fundamentação Teórica	6
2.1 Estado da Arte	6
2.2 Processos de conformação: uma abordagem classificatória	9
2.2.1 Tipo de solicitação	11
2.2.2 Temperatura	11
2.2.3 Aplicação da força	12
2.3 Tensão e deformação verdadeira e de engenharia	13
2.3.1 Tensão e Deformação Verdadeira	13
2.3.2 Tensão e Deformação de Engenharia	13
2.3.3 Correlação da tensão e deformação verdadeira com os Processos de Conformação	13
2.4 História e Aplicações do Alumínio e sua Liga 6061-T6	14
2.4.1 História do Alumínio	15
2.4.2 Alumínio na Atualidade	15
2.4.3 Alumínio 6061 T6	15
2.4.4 Propriedades Mecânicas da Liga de Alumínio 6061-T6	16
2.5 Anisotropia	17
2.6 Encruamento em Materiais Metálicos	18
2.7 Processo de calandragem	18
2.8 Dobramento e curvamento	20
2.8.1 Raio mínimo de curvatura	20
2.8.2 Defeitos potenciais originados na fabricação de perfis curvos	21
2.9 Modelagem numérica dos processos de conformação	22
2.10 Tensões residuais	22
3 Metodologia	24
3.1 Descrição do modelo computacional	24

	XI
3.1.1 Descrição geral _____	24
3.1.2 Fundamentos matemáticos e numéricos do ANSYS Workbench: uma abordagem específica ao modelo proposto _____	27
3.1.3 Simplificações adotadas no modelo computacional _____	27
3.1.4 Etapas de pré-processamento _____	28
3.1.4.1 Preparação da geometria	28
3.1.4.2 Materiais dos componentes	29
3.1.4.3 Condições de contorno	30
3.1.4.4 Contatos	30
3.1.4.5 Geração de malha e elementos utilizados	31
4 Resultados	34
4.1 Validação do modelo computacional: perfil I _____	34
4.1.1 Teste de convergência de malha _____	34
4.2 Estudo de caso _____	44
4.2.1 Perfil 1	45
4.2.1.1 Teste de convergência de malha para o perfil 1 _____	46
4.2.1.2 Resultados do perfil 1 _____	47
4.2.2 Perfil 2	52
4.2.2.1 Teste de convergência de malha para o perfil 2 _____	53
4.2.2.2 Resultados do perfil 2 _____	53
4.2.3 Perfil 3	57
4.2.3.1 Teste de convergência de malha perfil 3 _____	58
4.2.3.2 Resultados do perfil 3 _____	59
4.2.4 Perfil 4	63
4.2.4.1 Teste de convergência de malha para o perfil 4 _____	63
4.2.4.2 Resultados do perfil 4 _____	64
4.3 Compilação de resultados _____	67
5 Conclusões	69
Referências	72

Lista de Figuras

Página

Figura 1-1 Perfis de alumínio curvos na indústria naval	2
Figura 2-1 – Classificação dos processos de conformação.	9
Figura 2-2 – Sub-grupos de produtos semi-acabados.	10
Figura 2-3 – Classificação por tipos de solicitação.	11
Figura 2-4 – Classificação por temperatura.	12
Figura 2-5 – Classificação por aplicação da força.	12
Figura 2-6 – Comparação das curvas tensão x deformação verdadeira e de engenharia	14
Figura 2-7 Curva tensão x deformação verdadeira para o alumínio 6061-T6.	17
Figura 2-8 - Posicionamento dos rolos de uma calandra.	19
Figura 2-9 - Calandra de tubos e perfis.	19
Figura 2-10 – Defeitos mecânicos para formar perfis curvos.	21
Figura 2-11- Modificações feitas para reduzir a deformação e torção da seção transversal de acordo com um projeto de produção correto.	22
Figura 3-1 Organograma do modelo computacional	26
Figura 3-2 – Dimensões, em mm, viga I usada na validação do modelo computacional (Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp, 2010).	28
Figura 3-3 – Dimensões, em mm, do conjunto de calandra e perfil (Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp, 2010).	29
Figura 3-4 Curva tensão x deformação verdadeira para o aço s235	30
Figura 3-5 - Pares de contato.	31
Figura 3-6 – Elementos finitos utilizados na simulação numérica.	33
Figura 4-1 Gráfico de independência de malha SOLID 185	35
Figura 4-2 Gráfico de independência de malha SOLID 186	36
Figura 4-3 Gráfico de independência de malha SOLID 187	36
Figura 4-4 Gráfico de independência de malha SOLID 285	36
Figura 4-5 Discretização do refino de malha.	37
Figura 4-6 Malha obtida com o elemento SOLID186.	38
Figura 4-7 Tensões de von Mises.	39

Figura 4-8 Tensões normais ao longo do processo de calandragem.	40
Figura 4-9 Tensões residuais.	41
Figura 4-10 Resultados experimentais	42
Figura 4-11 Comparação dos resultados numéricos e experimentais da aba superior do perfil I.	42
Figura 4-12 Comparação dos resultados numéricos e experimentais da alma do perfil I.	43
Figura 4-13 Comparação dos resultados numéricos e experimentais da aba inferior do perfil I.	43
Figura 4-14 Perfil 1: (a) domínio computacional; (b) dimensões do perfil considerando a simetria; e (c) dimensões do laminador (em mm).	45
Figura 4-15 Gráfico de convergência de malha perfil 1	47
Figura 4-16 Deslocamentos perfil 1, (a) raio 38588,85mm; (b) raio 14275,17mm; (c) raio 10971,68 mm.	49
Figura 4-17 Gráficos de deslocamentos do perfil 1.	49
Figura 4-18 Tensões de von Mises região superior do perfil 1 com raio de curvatura de 10971,68.	51
Figura 4-19 Tensões de von Mises região inferior do perfil 1 com raio de curvatura de 10971,68.	51
Figura 4-20 Perfil 2: (a) domínio computacional; (b) dimensões do perfil considerando a simetria; e (c) dimensões do laminador (em mm).	52
Figura 4-21 Gráfico de convergência de malha perfil 2	53
Figura 4-22 Deslocamentos perfil 2, (a) raio 3873,56 mm; (b) raio 1193,10 mm; (c) raio 447,89 mm; (d) raio 330,69 mm.	54
Figura 4-23 Gráficos de deslocamentos do perfil 2.	55
Figura 4-24 Gráfico detalhado de deslocamentos perfil 2.	55
Figura 4-25 Tensões de von Mises região superior do perfil 2 com raio de curvatura de 330,69 mm.	56
Figura 4-26 Tensões de von Mises região inferior do perfil 2 com raio de curvatura de 330,69 mm.	57
Figura 4-27 Perfil 3: (a) domínio computacional; (b) dimensões do perfil considerando a simetria; e (c) dimensões do laminador (em mm).	58
Figura 4-28 Gráfico de convergência de malha perfil 3	59
Figura 4-29 Deslocamentos perfil 3, (a) raio 3476,70 mm; (b) raio 1026,20 mm; (c) raio 553,80 mm; (d) raio 381,90 mm.	60
Figura 4-30 Gráficos de deslocamentos do perfil 3.	60

Figura 4-31 Gráficos detalhado de deslocamentos perfil 3.	61
Figura 4-32 Tensões de von Mises região superior do perfil 3 com raio de curvatura de 381,90 mm.	62
Figura 4-33 Tensões de von Mises região inferior do perfil 3 com raio de curvatura de 381,90 mm.	62
Figura 4-34 Perfil 4: (a) domínio computacional; (b) dimensões do perfil considerando a simetria; e (c) dimensões do laminador (em mm).	63
Figura 4-35 Gráfico de convergência de malha perfil 4	64
Figura 4-36 Deslocamentos perfil 4, (a) raio 3919,83 mm; (b) raio 1301,19 mm; (c) raio 659,58 mm; (d) raio 413,95 mm.	65
Figura 4-37 Gráficos de deslocamentos do perfil 4.	65
Figura 4-38 Tensões de von Mises região superior do perfil 4 com raio de curvatura de 413,95 mm.	67
Figura 4-39 Tensões de von Mises região inferior do perfil 4 com raio de curvatura de 413,95 mm.	67

Lista de Tabelas

	Página
Tabela 2-1 Propriedades mecânicas do alumínio 6061. _____	16
Tabela 4-1 Teste de convergência de malha perfil I. _____	34
Tabela 4-2 Testes de convergência de malha para o perfil 1. _____	46
Tabela 4-3 Resultados perfil 1. _____	49
Tabela 4-4 Testes de convergência de malha perfil 2. _____	53
Tabela 4-5 Resultados perfil 2. _____	54
Tabela 4-6 Testes de convergência de malha perfil 3. _____	58
Tabela 4-7 Resultados perfil 3. _____	60
Tabela 4-8 Testes de convergência de malha perfil 4. _____	64
Tabela 4-9 Resultados perfil 4. _____	65
Tabela 4-10 Compilação de resultados do estudo de casos _____	68

Lista de Símbolos

Símbolos Romanos

D - Deslocamento [mm]
r - Raio de curvatura [mm]

Símbolos Gregos

μ - Coeficiente de atrito [-]
 σ - Tensão [MPa]
 τ - Tensão de cisalhamento [MPa]

Subscritos e Superscritos

Lista de Siglas

CAD	Projeto Auxiliado por Computador
CAM	Fabricação Assistida por Computados
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CFD	Análise fluidodinâmica computacional
CG	Centro de Gravidade
CHS	Seção Oca Circular
CS	Centro de Cisalhamento
FURG	Universidade Federal do Rio Grande.
MEF	Método dos Elementos Finitos

1 | Introdução

As empresas de terceirização de serviços, as quais não possuem desenvolvimento de produto, têm a incumbência apenas de fabricar o produto conforme as especificações de projeto do cliente e com preços competitivos. Entretanto, é durante a fabricação que ocorrem desvios que podem conduzir ao não cumprimento das especificações de tolerâncias dimensionais, de rugosidade e acabamento superficial, folgas e demais interferências que podem prejudicar a aplicação final do produto. Como consequência destes desvios ocorre o aumento do número de produtos refugados e, consequentemente, a elevação dos custos de produção (Quadros, 2020). No segmento naval, a ampla versatilidade e a diversidade de aplicações do alumínio conferem ao metal uma vantagem competitiva em relação a outros materiais, como o aço. O alumínio pode ser utilizado tanto na parte estrutural de embarcações de pequeno e médio porte, quanto nos acabamentos internos, por meio de laminados e perfis extrudados, que posteriormente podem ser curvados por meio de processos de conformação. Isso inclui perfis derivados de tarugos, os quais são empregados na construção de mastros para navios e barcos (Caveagna, 2021). Dessa forma, a busca constante por eficiência na fabricação desses componentes de alumínio se torna essencial para evitar desvios que possam resultar em produtos refugados e custos adicionais para as empresas de terceirização. É possível observar algumas aplicações de perfis de alumínio curvos no setor naval na figura 1.1.



Figura 1-1 Perfis de alumínio curvos na indústria naval

Nessas aplicações secundárias, a resistência à corrosão e a boa condução térmica do alumínio são características valorizadas (Caveagna, 2021).

Além das aplicações relacionadas à Engenharia Oceânica, na indústria automotiva os perfis de alumínio estão na vanguarda da busca pela eficiência de combustível, sendo usados em peças estruturais que reduzem o peso dos veículos e, consequentemente, aumentam sua economia de combustível. Já em aplicações na construção civil, eles desempenham um papel importante na formação de janelas, portas, fachadas, escadas e até mesmo em estruturas arquitetônicas icônicas, graças à sua maleabilidade e capacidade de resistir à corrosão em várias condições. Essa versatilidade também se estende ao transporte público, onde os perfis de alumínio contribuem para a construção de trilhos, plataformas de estações e estruturas para veículos. Na indústria eletrônica e tecnológica, eles oferecem condutividade térmica e elétrica, sendo usados em racks e suportes para equipamentos eletrônicos. A energia renovável encontra uma aplicação nos perfis de alumínio, que fornecem suporte para painéis solares e turbinas eólicas. Eles também estão presentes em equipamentos industriais, desde maquinário de processamento até sistemas de embalagem e máquinas agrícolas (Kissell e Ferry, 2010).

Os perfis de alumínio se inserem ainda em uma variedade de contextos, incluindo a criação de equipamentos esportivos, mobiliário moderno, displays, sistemas de prateleiras e muito mais. Sua adaptabilidade, aliada às propriedades mecânicas e químicas únicas, tornam-nos uma escolha essencial em diversos setores, onde a busca por eficiência, durabilidade e inovação é constante (Kissell e Ferry, 2010).

Diante disso, os perfis de alumínio conformados a frio são uma excelente escolha para aplicações estruturais que requerem alta resistência e leveza combinadas com a capacidade de conformar o material em formas complexas e precisas. Dentre os processos de conformação plástica, a calandragem é um processo frequentemente utilizado na conformação de perfis de alumínio, permitindo o curvamento de perfis em formas complexas, tais como arcos e curvas variáveis (Kissell e Ferry, 2010).

No processo de dobramento, uma série de variáveis podem exercer influência sobre o desvio do componente em relação às especificações pré-determinadas. Identificar e compreender essas variáveis, além de buscar a minimização de seus efeitos no processo, representa um desafio complexo. No entanto, obter sucesso nessa abordagem pode levar a um significativo retorno econômico, mediante a considerável redução dos custos associados aos resíduos de materiais durante a etapa de produção (Quadros, 2020). Nesse contexto, os avanços na área de mecânica computacional e técnicas de análise numérica de estruturas, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), tornam-se fundamentais para a identificação e análise dessas variáveis.

Nos últimos anos, houve significativos avanços na área de mecânica computacional e técnicas de análise numérica de estruturas, acompanhados por um aumento na sofisticação e disseminação de ferramentas de cálculo, incluindo hardware e software. Como resultado, a utilização de métodos numéricos de análise em engenharia de estruturas tornou-se amplamente difundida. Entre os vários métodos adotados, o MEF é o mais popular, graças à sua versatilidade, sólida fundamentação matemática e à existência de programas comerciais de alto desempenho (Bathe, 1996).

O MEF é uma poderosa ferramenta numérica amplamente utilizada na modelagem e análise de problemas em engenharia. Ao longo das últimas décadas, o MEF tem continuado a desempenhar um papel indispensável na solução de problemas complexos e diversos na comunidade científica e técnica (Reddy, 2018).

Pesquisadores e engenheiros têm reconhecido a versatilidade do MEF e sua capacidade de modelar uma ampla variedade de fenômenos físicos em diferentes áreas da engenharia. Através da utilização de elementos finitos, é possível discretizar o domínio de interesse em pequenos subdomínios, permitindo a solução de problemas complexos que seriam inacessíveis ou extremamente difíceis de resolver analiticamente (Zienkiewicz et al., 2013).

O MEF é baseado em uma abordagem discreta, onde a estrutura é dividida em pequenos elementos finitos que são então analisados individualmente. Essa abordagem permite uma modelagem precisa e detalhada da estrutura, permitindo que o engenheiro faça análises precisas e previsões confiáveis do comportamento da estrutura sob diferentes condições de carregamento (Chandrupatla e Belegundu, 2022).

Além disso, a ampla disponibilidade de programas comerciais de alto desempenho, como ANSYS, Abaqus e COMSOL, tornou o MEF ainda mais acessível e amplamente utilizado. Esses programas comerciais fornecem interfaces amigáveis para usuários, recursos avançados de modelagem e *solvers* robustos, tornando o MEF uma ferramenta eficaz para engenheiros de diversas áreas.

A simulação numérica de perfis estruturais é uma ferramenta de extrema relevância tanto do ponto de vista econômico quanto da segurança. Em relação ao aspecto econômico, a simulação permite a identificação e redução dos refugos no processo de conformação dos perfis, o que pode resultar em economias significativas de material e de custos. Em relação à segurança, a simulação permite avaliar o estado de fragilidade dos perfis gerado pelo processo de conformação, o que pode levar à adoção de medidas preventivas para evitar possíveis falhas ou acidentes futuros. Portanto, a simulação numérica de perfis estruturais é uma ferramenta chave para garantir a eficiência, a qualidade e a segurança no processo de produção e utilização desses componentes (Moaveni, 2014).

A metodologia adotada para a realização desta dissertação de mestrado em Engenharia Oceânica consistirá no desenvolvimento e validação de um modelo computacional utilizando o software ANSYS, que é baseado no MEF. Com isso, estudos de caso serão realizados através da simulação numérica do processo de calandragem de perfis extrudados em alumínio 6061 T6 representativos de aplicações na Engenharia Oceânica. A metodologia proposta visa contribuir para a compreensão dos efeitos da calandragem em perfis estruturais de alumínio, fornecendo informações para o desenvolvimento de projetos e garantindo a qualidade e a confiabilidade dos produtos obtidos por meio desse processo de fabricação.

1.1 Motivação e justificativa

A motivação para a execução deste trabalho na área da Engenharia Oceânica surge da necessidade de obter informações específicas relacionadas à conformação de perfis estruturais em alumínio, com o objetivo de aplicá-las em contextos marítimos. Embora a literatura existente aborde apenas alguns tipos de perfis e geometrias simples, é essencial ampliar o conhecimento nesse campo para enfrentar os desafios encontrados na Engenharia Oceânica.

O estudo proposto visa analisar, por meio de simulação numérica, os efeitos de diferentes raios de curvatura no processo de conformação de calandragem em perfis de alumínio, relacionando-os aos defeitos que podem surgir em ambientes marítimos. Durante esse processo, é importante avaliar as tensões de von Mises em comparação com o limite de resistência do material, a fim de estabelecer uma relação com a ocorrência de pequenas trincas. Essas trincas internas podem representar um risco estrutural significativo em aplicações marítimas, comprometendo a resistência e a integridade dos perfis.

Além disso, é essencial investigar a possibilidade de deformações excessivas na seção transversal dos perfis calandrados, uma vez que o ambiente marítimo impõe condições desafiadoras, como a exposição a esforços dinâmicos, ondas e corrosão. A ocorrência de deformações excessivas poderia resultar na perda das características geométricas originais do perfil, inviabilizando seu uso em estruturas oceânicas. Essas deformações poderiam comprometer a funcionalidade e a aplicabilidade dos perfis, impactando negativamente a eficiência e a segurança de estruturas marítimas.

É evidente a relevância deste estudo para a Engenharia Oceânica, uma vez que se busca garantir a qualidade, a confiabilidade e a segurança dos perfis estruturais utilizados em diversas aplicações no ambiente marítimo. O conhecimento aprofundado dos efeitos dos raios de curvatura no processo de conformação é indispensável para o desenvolvimento de estruturas oceânicas mais resilientes, capazes de resistir aos desafios impostos pelo ambiente marinho, aumentando assim a sustentabilidade e a eficiência das atividades relacionadas à Engenharia Oceânica.

1.2 Objetivos

Desenvolvimento de modelo computacional para a simulação numérica do processo de dobras em perfis extrudados em alumínio, visando sua aplicação na análise de diferentes perfis e a identificação de possíveis defeitos de fabricação.

1.3 Objetivos específicos

Desenvolver uma metodologia de análise do processo de dobramento de perfis extrudados através de simulação numérica.

Realizar a validação do modelo numérico através da comparação com resultados experimentais.

Obter a relação entre a curvatura resultante do processo de calandragem e a ocorrência de defeitos em 4 perfis de alumínio com diferentes seções transversais, realizando simulações com no mínimo 3 raios de curvatura distintos para cada perfil, sendo possível assim, estabelecer uma correlação robusta e abrangente entre as variáveis de curvatura e defeitos. A análise desses dados permitirá identificar padrões consistentes e, assim, determinar a influência direta da curvatura nos defeitos resultantes.

2 | Fundamentação Teórica

Antes de dar continuidade a este estudo é necessário a compreensão de alguns temas e conceitos, para que assim seja possível o pleno entendimento de tal estudo e suas finalidades, como por exemplo: estudos anteriores aplicados a esta temática, princípios de um processo de conformação, funcionamento do processo de calandragem, tipos de deformações e as tensões promovidas neste processo, anisotropia, modelagem numérica, entre outros.

2.1 Estado da Arte

A simulação numérica do processo de calandragem tem sido objeto de diversos estudos na literatura, porém, é importante notar que, enquanto há uma quantidade significativa de trabalhos discutindo calandragem em materiais metálicos, como aço, é notável a escassez de pesquisas sobre calandragem de perfis em alumínio. Segundo Hosford e Caddell (2011), a calandragem é um processo de conformação que é utilizado para dar forma a materiais metálicos, como aço, cobre e alumínio, e é amplamente utilizado na fabricação de peças para a indústria automotiva, aeroespacial e de construção civil.

Entre as pesquisas existentes neste tema, é possível destacar a de Hansen e Jannerup (1979), que focaram na compreensão geométrica do processo de flexão de três rolos do aço, ou seja, o objetivo da pesquisa foi obter um modelo geométrico mais preciso para controlar o processo de dobra. O modelo foi formulado para encontrar a posição do rolo superior correspondente à curvatura desejada do material. Neste trabalho foi analisado a sensibilidade do modelo geométrico em relação à variação na geometria da máquina e às características do material. O trabalho limitou-se a flexão de vigas com base na teoria simples de flexão de vigas (Euler-Bernoulli).

Já Yang e Shima (1988) tiveram como objetivo simular numericamente o processo de curvatura de três rolos em forma de pirâmide para determinar as distribuições de tensão e deformação durante o processo. Para a simulação, os autores desenvolveram um modelo matemático baseado em uma análise de elementos finitos que considerou o efeito da deflexão lateral da placa de aço durante o processo de curvatura. Os resultados da simulação mostraram que as tensões máximas ocorreram nas bordas da placa durante a curvatura, e que a distribuição de tensão na direção da espessura da placa foi uniforme em todo o comprimento da curva. Além disso, as deformações na direção da espessura da placa foram menores em comparação com as deformações nas direções longitudinais e transversais. Os autores concluíram que a simulação numérica pode ser uma ferramenta útil para analisar o processo de curvatura de três rolos em forma de pirâmide e que a distribuição de tensão e deformação obtida a partir da simulação pode ser usada para otimizar o processo de curvatura e melhorar a qualidade do produto final.

Gandhi e Raval (2006) desenvolveram um modelo analítico para otimizar a posição do rolo superior em um processo de conformação cilíndrica de placas de aço em múltiplas passagens com três rolos. O objetivo era minimizar a deformação elástica da placa e maximizar a eficiência do processo. O modelo considerou a distribuição de tensões e deformações durante o processo, usando um método analítico para calcular a distribuição em cada passagem. Os resultados mostraram que a posição do rolo superior pode ser otimizada para melhorar a qualidade do produto final e a eficiência do processo. O modelo pode ser utilizado para prever a posição ideal do rolo superior em processos semelhantes e otimizar outros processos na indústria metalúrgica.

Taylor et al. (2008) realizaram uma análise de elementos finitos para investigar a deformação de chapas de aço em um processo de dobramento com três rolos. A simulação ajudou a determinar a geometria final da chapa dobrada, incluindo sua altura e raio de curvatura, e mostrou que a geometria dos rolos e as propriedades do material afetam a distribuição de tensões e deformações. Os autores concluíram que simulações numéricas podem ser úteis para otimizar processos de dobramento de chapas, melhorar a qualidade do produto e ser aplicadas a outros processos de conformação de metais.

Spoorenberg, Snijder, e Hoenderkamp (2010) analisaram as tensões residuais em seções de flanges largos curvadas com rolos. O processo de curvamento com rolos é frequentemente utilizado na indústria para produzir peças de aço curvas com diferentes geometrias, como seções de flanges largos. No entanto, o processo de curvamento pode levar à ocorrência de tensões residuais nas peças de aço, que podem afetar a qualidade do produto final. Para investigar as tensões residuais em seções de flanges largos curvadas com rolos, os autores utilizaram a análise de elementos finitos. O modelo de elementos finitos foi desenvolvido para simular o processo de curvamento com rolos e analisar as tensões residuais nas seções de flanges largos após o processo de curvamento. Os resultados da simulação numérica mostraram que as tensões residuais nas seções de flanges largos são afetadas pela geometria do rolo e pelas propriedades do material. Em particular, foi observado que a tensão residual máxima ocorre na parte inferior da seção curvada. Além disso, a simulação permitiu determinar a distribuição de tensões residuais nas seções de flanges largos após o processo de curvamento e comparar os resultados com as medições experimentais.

No trabalho de Feng e Champiaud (2011), foi desenvolvido um modelo de simulação numérica para analisar o processo de conformação assimétrica de três rolos. O objetivo do estudo foi investigar a distribuição de tensões e deformações durante o processo de conformação e avaliar a influência da assimetria na qualidade do produto final. Foi utilizado um modelo de simulação numérica baseado na teoria da plasticidade para analisar a distribuição de tensões e deformações em diferentes etapas do processo de conformação. O modelo considerou a geometria dos rolos, as propriedades mecânicas do material e a influência da assimetria do processo de conformação na distribuição de tensões e deformações. Os resultados da simulação mostraram que a assimetria do processo de conformação pode levar a uma distribuição de tensões e deformações não uniforme ao longo da chapa de aço. Além disso, a simulação permitiu a determinação da geometria

final da chapa conformada, incluindo a altura da peça conformada e o raio de curvatura final. Por fim, os resultados numéricos e experimentais foram comparados e foi encontrado um desvio abaixo de 6%, assim os autores concluíram que o modelo de simulação numérica desenvolvido pode ser utilizado para prever a distribuição de tensões e deformações em um processo de conformação assimétrica de três rolos

Ktari et al. (2012) estudaram vários parâmetros de três processos de flexão de rolos. Os parâmetros incluem a posição do rolo superior, a distância entre os rolos inferiores e a espessura da chapa metálica de aço e construído um modelo de elementos finitos bidimensional no ambiente ABAQUS/Explicit, sendo validado o modelo experimentalmente. A evolução do raio de curvatura inicial versus o raio obtido foi estabelecida por simulação numérica do processo de laminação para obter o retorno elástico e comparado com a solução analítica.

Shakil et al. (2015) realizaram um estudo paramétrico para investigar a influência de diferentes parâmetros no processo de conformação de chapas de aço utilizando rolos cilíndricos. O objetivo do estudo foi analisar a distribuição de tensões e deformações durante o processo de conformação e avaliar a influência dos parâmetros no desempenho do processo. Foram utilizadas técnicas de simulação numérica baseadas na teoria da plasticidade para investigar a deformação da chapa em diferentes etapas do processo de conformação. O modelo de simulação considerou a geometria dos rolos, as propriedades mecânicas do material e os parâmetros de processo, como a força de compressão, a velocidade de conformação e a espessura da chapa. Os resultados da simulação mostraram que a força de compressão, a velocidade de conformação e a espessura da chapa têm uma grande influência na distribuição de tensões e deformações durante o processo de conformação. Além disso, o estudo permitiu a determinação dos parâmetros ideais do processo para obter uma distribuição de tensões e deformações uniforme ao longo da chapa. Os autores concluíram que o estudo paramétrico pode ser útil para otimizar o processo de conformação de chapas utilizando rolos cilíndricos

Thakare et al. (2019) desenvolveu um modelo matemático para prever o deslocamento do cilindro superior do processo de calandragem. Foram considerados parâmetros geométricos, operacionais, e materiais relacionados ao aço para a modelagem. A variação percentual entre os resultados experimentais e os valores previstos foi também determinada. A partir dos resultados obtidos com o modelo desenvolvido foi possível afirmar que tal modelo é preciso e fiável, uma vez que a variação percentual foi inferior a 5%.

Em Thanasoulas e Gantes (2020) a tensão residual de membrana e as deformações de membros de aço dobrados por rolos, compreendendo seções circulares ocas (CHS), foram examinadas. Modelos detalhados de elementos finitos foram desenvolvidos para simular o procedimento de curvamento de peças CHS de forma confiável, por meio de análises implícitas contabilizando não-linearidades geométricas, de contato e materiais. A convergência da malha foi seguida do estudo paramétrico com o objetivo de avaliar a influência das principais características de flexão causada pelos rolos nas distribuições de tensão/deformação desenvolvidas, sendo elas: o diâmetro e a espessura CHS, o raio de

curvatura, a tensão de escoamento do aço, o comprimento de dobra, o diâmetro dos rolos de dobra e o ângulo de encapsulamento das matrizes de dobra. Variações foram encontradas nas formações de tensões residuais, atribuídas à presença de tensões de cisalhamento e transversais na peça de trabalho CHS dentro do comprimento de flexão de três pontos. As distribuições de tensões residuais obtidas foram resumidas, e uma distribuição característica foi proposta com base nas deformações plásticas que são encontradas mais comumente.

A partir dos trabalhos apresentados é possível afirmar que, pesquisas sobre a simulação numérica de calandragem de perfis de alumínio é fundamental devido à escassez de estudos específicos nessa área. O alumínio é amplamente utilizado em várias indústrias, e otimizar o processo de calandragem para esse material é essencial para a eficiência e segurança. Preencher essa lacuna na literatura é relevante economicamente, reduzindo custos e resíduos, e também em termos de segurança industrial, ajudando a prevenir falhas e acidentes. Portanto, esta pesquisa é justificada pela necessidade de avançar o conhecimento e melhorar as práticas na calandragem de perfis de alumínio.

2.2 Processos de conformação: uma abordagem classificatória

A indústria de fabricação tem se beneficiado enormemente dos processos de conformação, que desempenham um papel relevante na produção de uma ampla gama de componentes e produtos. Esses processos envolvem a aplicação de forças mecânicas sobre materiais para alterar sua forma, tamanho e propriedades físicas. Com o objetivo de proporcionar uma compreensão aprofundada dos processos de conformação, este estudo apresenta uma classificação abrangente com base em quatro grupos principais: produto semi-acabado, tipo de solicitação, temperatura e aplicação da força (Kalpakjian e Schmid, 2016).

Na figura 2.1 é possível observar a divisão da classificação dos processos de conformação.

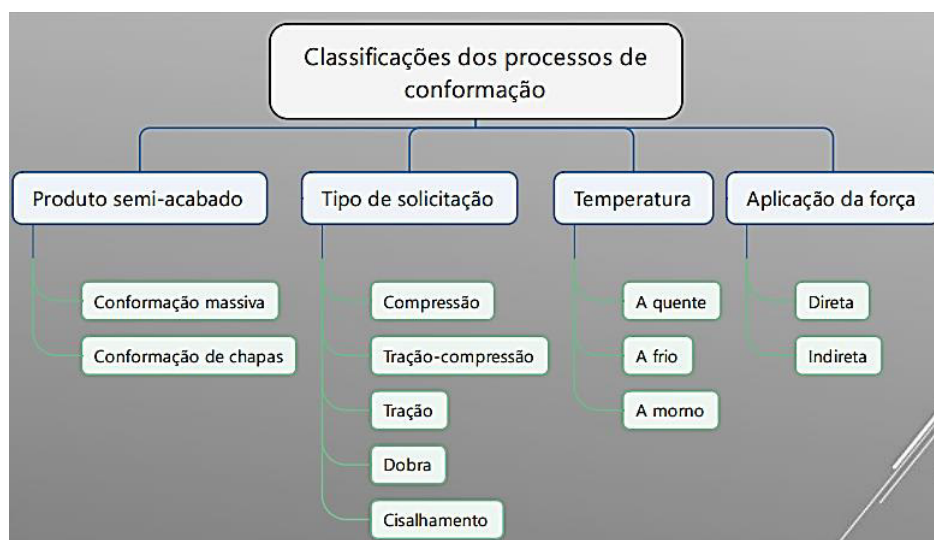


Figura 2-1 – Classificação dos processos de conformação.

Fonte: Din 8580.

A primeira divisão na classificação dos processos de conformação se concentra no produto semi-acabado. Nessa categoria, é possível distinguir dois principais subgrupos: conformação massiva e conformação de chapas. A conformação massiva refere-se à deformação de materiais sólidos, como barras, blocos e lingotes, utilizando forças compressivas, tração, cisalhamento ou uma combinação delas. Por outro lado, a conformação de chapas envolve a deformação de materiais planos, como chapas metálicas, por meio de compressão, tração, dobra ou cisalhamento (Din 8580).

Na figura 2.2 é possível observar algumas características dos dois sub-grupos que compreendem a classificação dos produtos semi-acabados, bem como produtos fabricados por meio desses dois sub-brupos.

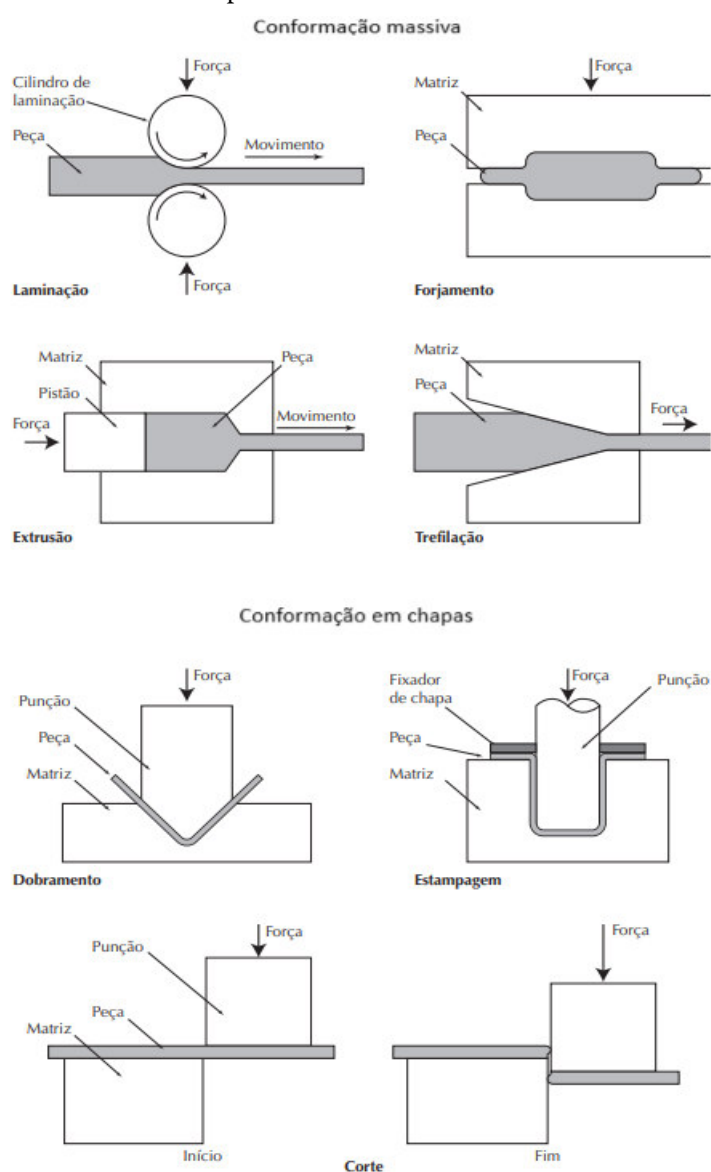


Figura 2-2 – Sub-grupos de produtos semi-acabados.

Fonte: Kiminami; Castro; Oliveira, 2013.

2.2.1 Tipo de solicitação

O segundo grupo de classificação concentra-se no tipo de solicitação aplicado durante o processo de conformação. Existem cinco principais tipos de solicitação: compressão, tração-compressão, tração, dobra e cisalhamento. A compressão envolve a aplicação de forças que reduzem o tamanho de um material, enquanto a tração-compressão combina a aplicação de forças de tração e compressão, resultando em uma deformação mais complexa. A tração, por sua vez, estica o material para aumentar seu comprimento, a dobra modifica a forma original do material por meio de uma curvatura e o cisalhamento causa um deslizamento relativo das camadas do material (Hosford e Caddell, 2014).

Na figura 2.3 é possível observar alguns processos de conformação definidos com esta classificação.

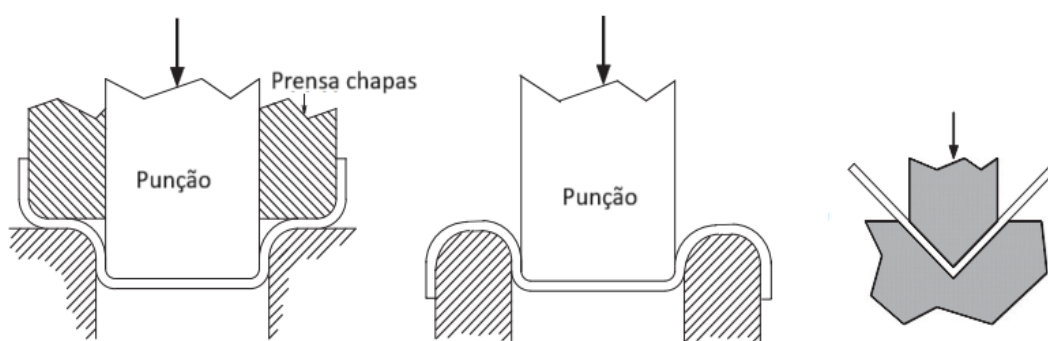


Figura 2-3 – Classificação por tipos de solicitação.

Fonte: Adaptado de Hosford e Caddell, 2011.

2.2.2 Temperatura

A terceira divisão na classificação dos processos de conformação leva em consideração a temperatura em que ocorre a deformação do material. Existem três principais faixas de temperatura: a quente, a frio e a morno. A conformação a quente é realizada a temperaturas elevadas, próximas ou acima da temperatura de recristalização do material, resultando em uma maior plasticidade e menor resistência ao fluxo. A conformação a frio ocorre em temperatura ambiente ou abaixo dela, tornando o material mais rígido e difícil de ser deformado. Já a conformação a morno é realizada em uma faixa intermediária de temperatura, proporcionando um equilíbrio entre a plasticidade e a resistência (Juneja, 2010).

A figura 2.4 mostra alguns processos classificados pela temperatura em que ocorre a deformação do material.



Figura 2-4 – Classificação por temperatura.

Fonte: Souza, 2022.

2.2.3 Aplicação da força

O quarto e último grupo de classificação considera a forma como a força é aplicada durante o processo de conformação. Existem duas principais abordagens: direta e indireta. Na conformação com força direta, a força é aplicada diretamente sobre o material, geralmente por meio de martelos, prensas ou cilindros. Na conformação com força indireta, a força é aplicada por meio de ferramentas intermediárias (Juneja, 2010).

A figura 2.5 ilustra alguns processos de conformação divididos pela aplicação de força.

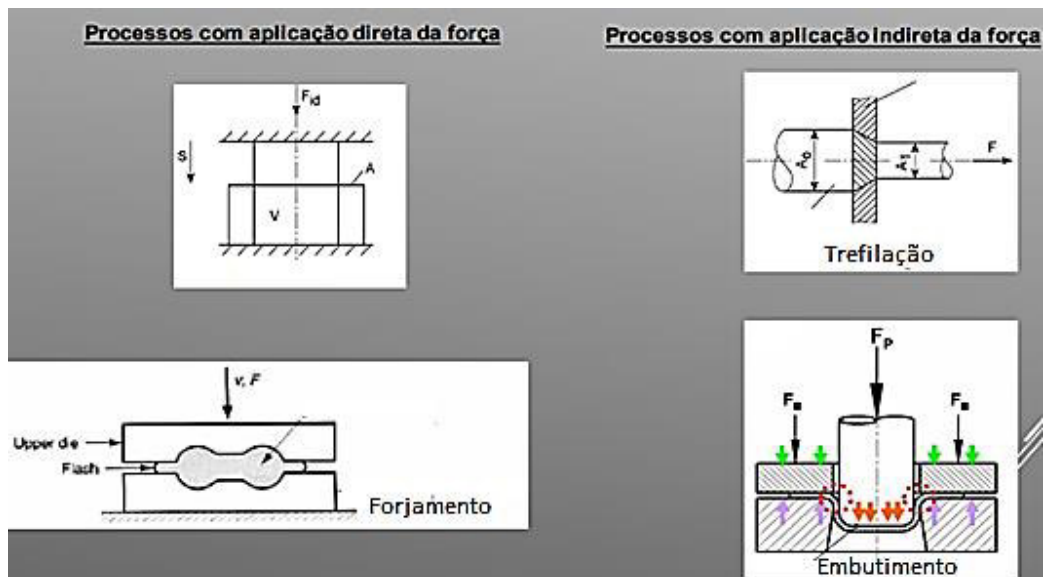


Figura 2-5 – Classificação por aplicação da força.

Fonte: Souza, 2022.

2.3 Tensão e deformação verdadeira e de engenharia

A compreensão das propriedades mecânicas dos materiais e sua resposta à aplicação de forças é indispensável para analisar e otimizar os processos de conformação. Dois conceitos-chave nesse contexto são a tensão e a deformação, que podem ser avaliadas tanto na forma de engenharia quanto na forma verdadeira.

2.3.1 Tensão e Deformação Verdadeira

A tensão verdadeira é definida como a força aplicada em relação à área de seção transversal instantânea do material. Ela leva em consideração a mudança contínua na área devido à deformação. Por outro lado, a deformação verdadeira é a medida da mudança na forma e tamanho do material em relação à sua configuração inicial (Ashby e Jones, 2019).

Durante os processos de conformação, como a extrusão, forjamento, calandragem, entre outros, ocorrem altas taxas de deformação verdadeira, resultando em mudanças significativas na forma do material. O comportamento do material nessas condições é melhor descrito pela tensão e deformação verdadeira, pois elas fornecem uma visão mais precisa dos efeitos da deformação no material (Ashby e Jones, 2019).

2.3.2 Tensão e Deformação de Engenharia

A tensão de engenharia é calculada dividindo-se a força aplicada pela área de seção transversal original do material. Já a deformação de engenharia é obtida dividindo-se a variação no comprimento do material pela sua extensão inicial (Hibbeler, 2022).

Em processos de conformação que envolvem baixas taxas de deformação, como a estampagem ou o corte, a deformação de engenharia é uma medida conveniente e amplamente utilizada. Ela permite uma avaliação simplificada das propriedades mecânicas do material, como sua resistência à tração e ductilidade (Hibbeler, 2022).

2.3.3 Correlação da tensão e deformação verdadeira com os Processos de Conformação

A correlação entre tensão, deformação verdadeira e de engenharia com os processos de conformação é importante para a compreensão do comportamento do material e o projeto adequado dos processos.

Em processos de conformação com altas taxas de deformação, as curvas de tensão-deformação verdadeira fornecem informações importantes sobre a capacidade do material de suportar grandes deformações sem falha. Essas informações são essenciais para determinar a viabilidade e a eficiência desses processos (Callister e Rethwisch, 2020).

Em contrapartida, processos de conformação com baixas taxas de deformação, são melhor analisados utilizando curvas de tensão-deformação de engenharia. Essas curvas podem fornecer informações sobre a resistência do material e sua capacidade de suportar cargas sem rompimento (Callister e Rethwisch, 2020).

Em resumo compreensão das características da tensão e deformação verdadeira e de engenharia é indispensável para a análise e otimização dos processos de conformação. A escolha apropriada desses parâmetros depende do tipo de processo de conformação e das taxas.

A figura 2.6 faz uma comparação das curvas tensão e deformação verdadeira e de engenharia.

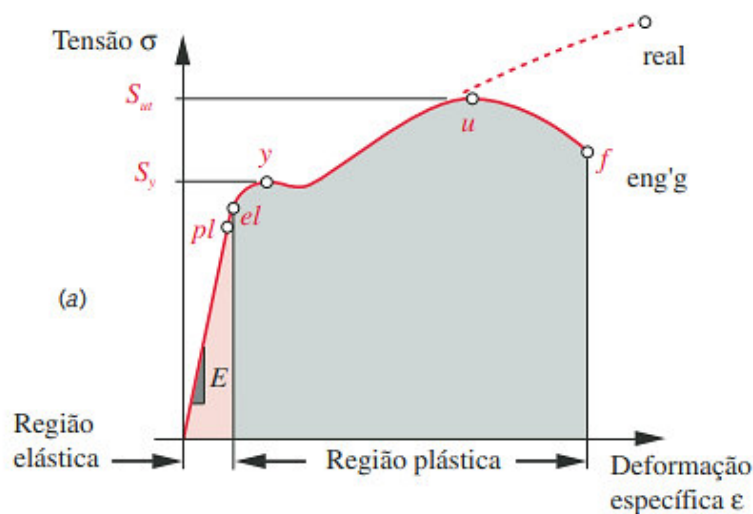


Figura 2-6 – Comparação das curvas tensão x deformação verdadeira e de engenharia

Fonte: Norton, 2013.

A comparação entre as curvas de tensão e deformação verdadeira e de engenharia é essencial para entender as propriedades mecânicas de um material durante os processos de conformação.

A curva de tensão e deformação de engenharia mostra um comportamento linear inicial, indicando uma resposta elástica do material. À medida que a deformação aumenta, ocorre uma transição para o regime plástico, em que a deformação é permanente. Essa curva pode atingir um limite de escoamento, no qual o material começa a apresentar deformação plástica significativa. Já a curva de tensão e deformação verdadeira é mais suave e contínua, representando as mudanças contínuas na área de seção transversal do material durante a deformação. Ela mostra um aumento gradual da deformação, refletindo a plasticidade do material de forma mais precisa (Norton, 2013).

2.4 História e Aplicações do Alumínio e sua Liga 6061-T6

O alumínio é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre e tem sido uma parte essencial da vida humana desde tempos remotos. Sua descoberta e utilização ao

longo da história refletem um fascinante desenvolvimento científico e tecnológico. O presente capítulo aborda o alumínio em geral, desde sua descoberta até suas aplicações contemporâneas, fornecendo um contexto introdutório para compreendermos a liga de alumínio 6061-T6, objeto central desta dissertação (Mondolfo, 2013).

2.4.1 História do Alumínio

A história do alumínio remonta a tempos antigos. Por séculos, a humanidade utilizou compostos de alumínio, como alume de potássio, em diversas aplicações, como tingimento de tecidos e como mordente para fixar tinturas em materiais têxteis. No entanto, a utilização do alumínio metálico em si permaneceu um mistério até meados do século XIX (Totten, 2018).

No século XIX, vários cientistas e pesquisadores em diferentes partes do mundo realizaram experimentos para isolar o alumínio metálico a partir de seus compostos. Em 1825, Hans Christian Oersted produziu pequenas quantidades de alumínio puro por meio de uma reação química envolvendo potássio e cloreto de alumínio. Esse processo, no entanto, era complexo e dispendioso, tornando o alumínio mais caro que o ouro na época. A busca por uma forma mais viável de produção continuou (Totten, 2018).

Em 1886, dois cientistas independentes, Charles Martin Hall, nos Estados Unidos, e Paul Héroult, na França, desenvolveram independentemente um método eletrolítico para produzir alumínio de forma econômica e em grande escala. Esse processo, conhecido como o processo Hall-Héroult, revolucionou a indústria do alumínio, tornando-o acessível e amplamente utilizado (Totten, 2018).

2.4.2 Alumínio na Atualidade

Atualmente, o alumínio é um material amplamente utilizado em diversas indústrias, incluindo aeroespacial, automotiva, construção civil, naval e muitas outras. Sua combinação única de propriedades, como alta resistência específica, leveza, resistência à corrosão e excelente condutividade térmica e elétrica, o torna um recurso valioso em uma ampla gama de aplicações (Totten, 2018).

Uma das ligas de alumínio mais importantes e amplamente utilizadas é a 6061-T6. Composta principalmente de alumínio, magnésio e silício, essa liga possui excelente resistência mecânica e é especialmente adequada para processos de conformação, como a calandragem. Sua aplicação em projetos navais é essencial, proporcionando soluções estruturais confiáveis e eficientes em ambientes marítimos desafiadores (Totten, 2018).

2.4.3 Alumínio 6061 T6

De acordo com as propriedades físicas e metalúrgicas do alumínio, conforme abordado em Kissell (2010), Davis (2009), Hatch (1984) e Drits e Fridlyander (2003), a liga 6061-T6 é uma das ligas de alumínio mais amplamente utilizadas na indústria devido às suas excelentes propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Trata-se de uma liga de

alumínio com adição de elementos de liga, tais como silício, magnésio e cobre, que conferem características específicas ao material.

O dígito "6061" na designação da liga representa o número de liga da norma *Aluminium Association* e indica que a liga é composta por aproximadamente 97,9% de alumínio, 1% de magnésio, 0,6% de silício, 0,3% de cobre e traços de outros elementos. Essa composição confere à liga 6061-T6 uma combinação única de alta resistência mecânica, boa usinabilidade e boa soldabilidade.

O sufixo "T6" na designação refere-se a um tratamento térmico aplicado ao material. O tratamento térmico T6 consiste em aquecer a liga a uma temperatura específica, seguido de um processo de resfriamento controlado. Esse tratamento confere à liga uma maior resistência mecânica e dureza, tornando-a especialmente adequada para aplicações que requerem elevada capacidade de carga e rigidez estrutural.

A liga 6061-T6 é amplamente utilizada em diversos setores industriais, incluindo aeronáutica, automobilística, naval e de construção civil. Em aplicações navais, essa liga é empregada em perfis estruturais, chapas, e outras peças que exigem alta resistência e baixo peso. A sua combinação de propriedades torna-a uma escolha popular para componentes críticos em navios e embarcações, garantindo a segurança e confiabilidade em ambientes marítimos desafiadores.

2.4.4 Propriedades Mecânicas da Liga de Alumínio 6061-T6

A liga de alumínio 6061-T6 possui um conjunto único de propriedades mecânicas que a tornam altamente valorizada em diversas aplicações. Na tabela 2.1 estão listadas as principais propriedades mecânicas desta liga.

Tabela 2-1 Propriedades mecânicas do alumínio 6061.

Propriedade	Valor
Massa Específica	2700 kg/m ³
Modulo de Young	70 GPa
Coefficiente de Poisson	0,33
Limite de escoamento	249,9 MPa
Limite de resistência	290,66 MPa
Alongamento uniforme	16%

Fonte: Kissel, 2010.

De acordo com Kissell (2010), essas propriedades mecânicas fazem da liga 6061-T6 uma excelente escolha para aplicações em que a resistência, leveza e capacidade de conformação são requisitos essenciais. A combinação de alta resistência à tração, módulo de elasticidade moderado e boa tenacidade torna essa liga ideal para componentes estruturais em projetos navais que exigem confiabilidade e resistência em ambientes marítimos desafiadores.

Na figura 2.7 pode ser observado a curva tensão x deformação verdadeira do alumínio 6061-T6.

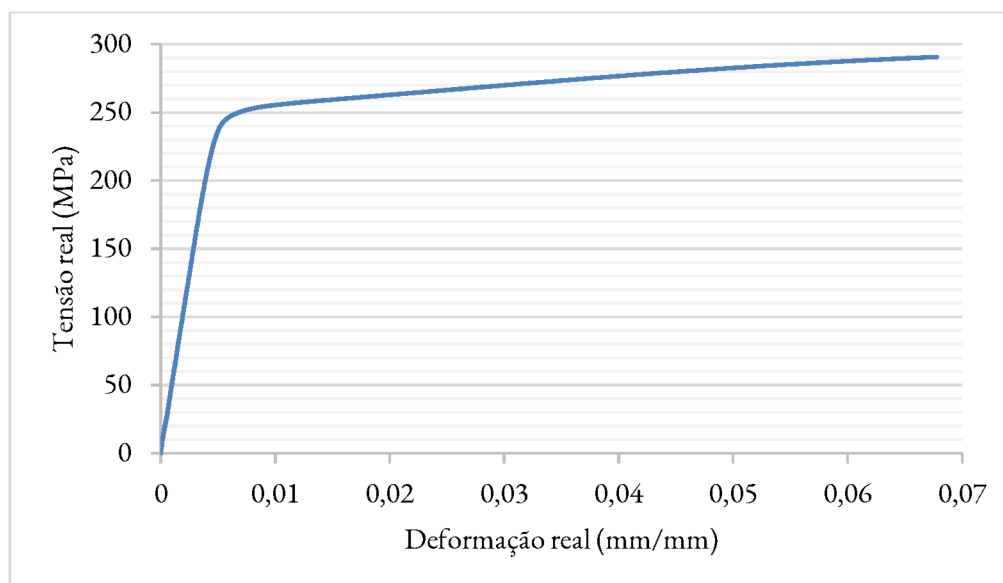


Figura 2-7 Curva tensão x deformação verdadeira para o alumínio 6061-T6.

Fonte: Souza, 2022.

2.5 Anisotropia

A anisotropia é um conceito elementar que desempenha um papel significativo na compreensão das propriedades físicas de diversos materiais, especialmente os metálicos. Em termos simples, a anisotropia se refere à dependência das propriedades de um material em relação à direção em que estão sendo medidas. Em outras palavras, um material anisotrópico exibirá diferentes características quando testado ou observado em diferentes direções (Callister, 2018).

No contexto de materiais metálicos, a anisotropia surge devido à estrutura cristalina única desses materiais. Os metais são compostos por átomos organizados em um padrão repetitivo e ordenado, conhecido como rede cristalina. Essa estrutura interna cria uma base para a anisotropia. À medida que os átomos se alinham em diferentes orientações na rede cristalina, as propriedades do material, como condutividade elétrica, condutividade térmica, elasticidade e resistência mecânica, podem variar substancialmente em diferentes direções (Callister, 2018).

A anisotropia é frequentemente observada nas propriedades mecânicas dos metais, como dureza e resistência. Isso ocorre porque a movimentação de átomos em uma rede cristalina varia dependendo da direção em que uma força é aplicada. Consequentemente, a capacidade de um material resistir a deformações ou fraturas também varia de acordo com a direção das forças. (Callister, 2018).

É importante ressaltar que neste trabalho não foi adotado a anisotropia, o material foi definido como isotrópico.

2.6 Encruamento em Materiais Metálicos

O encruamento, um fenômeno intrínseco aos materiais metálicos, ocorre quando esses materiais são submetidos a deformações plásticas, como dobramento, estampagem, forjamento, entre outros. Esse processo leva à multiplicação e acumulação de discordâncias na estrutura cristalina do material, resultando em mudanças significativas em suas propriedades físicas e mecânicas (Dowling, 2012).

O endurecimento gradual causado pelo encruamento é acompanhado por um aumento na resistência do material, embora sua ductilidade e tenacidade possam diminuir. Isso implica que, à medida que o material é deformado, ele se torna mais resistente a cargas, mas também mais frágil. A sensibilidade à fratura por entalhe também pode ser agravada pelo encruamento (Dowling, 2012).

A aplicação de tratamentos térmicos pós-deformação pode ajudar a reduzir os efeitos do encruamento, permitindo uma recuperação parcial das propriedades originais do material. No entanto, em muitos casos, o encruamento é uma consideração importante no projeto e fabricação de componentes, pois pode influenciar profundamente o comportamento do material sob diferentes condições de carga (Dowling, 2012).

2.7 Processo de calandragem

O processo de conformação alvo deste trabalho é a calandragem, processo que consiste na conformação de materiais através de cilindros de uma calandra. O mesmo consiste num processo de conformação plástica para conformar chapas, perfis ou tubos, fazendo passar o material entre um conjunto de rolos convenientemente posicionados (Rodrigues e Martins, 2010).

A calandragem permite a dobragem contínua da matéria prima e visa a mudança de forma ao longo de seu comprimento e não da sua seção transversal. As máquinas ferrentas que permitem este tipo de operação denominam-se calandras e são formadas em sua maioria por um conjunto de três rolos (Rodrigues e Martins, 2010).

Existem diversas variações de calandras disponíveis no mercado, contudo, as mais comuns são aquelas equipadas com dois rolos fixos e um rolo móvel. Nesse tipo de calandra, o rolo fixo é responsável por girar enquanto o rolo móvel tem a capacidade de girar e se movimentar para cima e para baixo, de acordo com o controle do operador, como demonstrado na figura 2.8. Vale ressaltar que o raio de curvatura do material pode variar de acordo com a distância entre os rolos da calandra, o que permite que a máquina seja ajustada para atender às necessidades específicas de cada projeto (González, 2000).

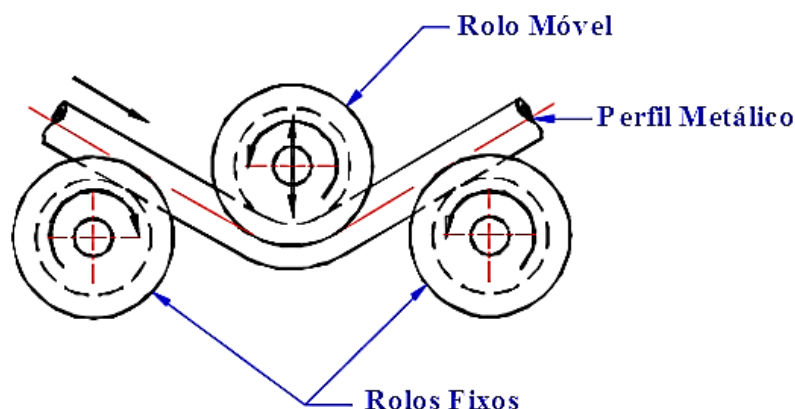


Figura 2-8 - Posicionamento dos rolos de uma calandra.

Fonte: Adaptado de González, 2000.

A calandra para tubos e perfis apresentam conjuntos de rolos ou cilindros sobrepostos com aproximadamente 200 mm de diâmetro. Podem curvar qualquer tipo de perfil: tubos, barras, cantoneiras, perfil em T, etc (González, 2000). A figura 2.9 ilustra uma calandra de tubos e perfis.

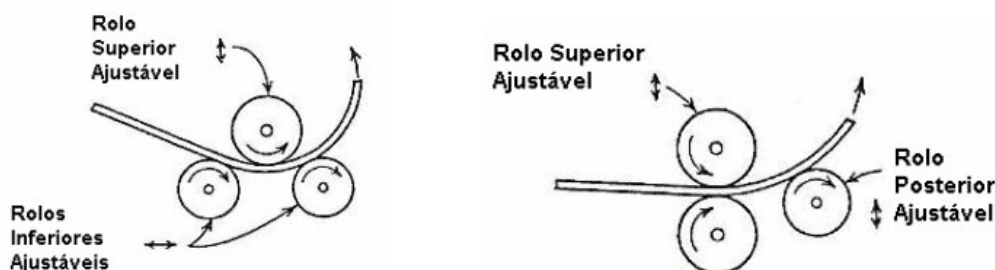


Figura 2-9 - Calandra de tubos e perfis.

Fonte: Adaptado Campbell, 1981

As calandras têm a capacidade de operar através de diferentes métodos de acionamento, podendo ser manuais, elétricos, hidráulicos ou automáticos com programação. Além disso, elas apresentam duas configurações distintas: horizontais, que possuem um plano de trabalho paralelo ao chão, e verticais, onde o plano de trabalho é perpendicular ao piso (Zhao e Jiang, 2017).

A calandra é um equipamento de alta precisão, por isso, necessita ser manuseado por profissionais qualificados que possuam amplo conhecimento nessa técnica. O equipamento é totalmente parametrizado para obtenção da peça final, adequada às necessidades do projeto. Por isso, a calandragem de perfis é demandada para novos projetos de construção, obras e aplicação em componentes industriais. Os perfis são elementos estruturais, peças que podem trazer diversos benefícios para as mais variadas demandas. Por isso, realizar a calandragem de forma adequada, visando manter as características mecânicas e ótimo acabamento no perfil é muito importante (Zhao e Jiang, 2017).

2.8 Dobramento e curvamento

Dobramento e curvatura são termos comumente utilizados na área da mecânica e engenharia para descrever diferentes características de deformação de materiais.

O dobramento é usualmente definido como a deformação plástica de uma chapa metálica ao longo de uma linha reta. A operação de dobramento pode ser considerada como um sistema com sete componentes: produto, peça/material, equipamento, punção/matriz, zona de deformação, interface e ambiente. O tipo clássico de conformação por dobramento é a operação para obter curvatura cilíndrica ou cônica em rolos, chamada de calandras (Marcondes, 2014).

O curvamento de chapas e perfis é uma operação pela qual se dá forma cilíndrica ou oval, total ou parcial, a uma chapa ou barra. É realizada por meio de esforços de flexão feitos por ferramenta manuais, dispositivos ou máquinas. Tal operação é executada a quente ou a frio (Costa, 2010).

2.8.1 Raio mínimo de curvatura

O raio de curvatura mínimo é geralmente determinado pela quantidade de fratura da superfície externa aceitável. No entanto, muitos outros fatores podem limitar o raio de curvatura. Por exemplo, o enrugamento da superfície interna da curvatura pode ser preocupante se ocorrer antes do início da fratura na superfície externa (Rodrigues e Martins, 2010).

Quanto menor o raio de curvatura maior é a tensão desenvolvida na região tracionada. Um excessivo tracionamento provocado por um pequeno raio de curvatura pode vir a romper as fibras externas da chapa dobrada. Define-se o raio interno mínimo de curvatura como o menor valor admissível para o raio para se evitar grande variação na espessura da chapa na região dobrada (Rodrigues e Martins, 2010).

O raio mínimo, portanto, é um limite de conformação, que indica o mínimo para o material não romper, no entanto, alguns metais muito dúcteis apresentam um raio mínimo igual à zero, ou seja, as peças podem ser achatadas sobre si mesmas sem romper, mas este processo não é muito utilizado por expor as ferramentas a grandes esforços (Rodrigues e Martins 2010).

Segundo Rodrigues e Martins (2010) o raio de curvatura é um ponto muito importante no processo de fabricação, uma vez que o material sofrerá vários esforços durante o processo. A utilização de ferramentas com raios internos muito pequenos, induz valores muito elevados das deformações das fibras externas, podendo originar o aparecimento de fissuras ou mesmo fratura. Assim, o habitual é definir o raio mínimo de dobra, r_{min} , como sendo aquele para o qual surgem fissuras na superfície exterior da chapa, expressando-se geralmente o seu valor em termos da espessura da chapa.

2.8.2 Defeitos potenciais originados na fabricação de perfis curvos

Os perfis curvos são fabricados principalmente por um processo de dobra posterior dos perfis retos semi-acabados, que são obtidos favoravelmente a partir de tarugos por extrusão convencional. Semelhante à flexão de chapas metálicas, o retorno elástico ocorre no processo de flexão de perfis devido à existência de tensão residual, que resulta em desvio geométrico e redução da precisão da curvatura. As tensões residuais são definidas como aquelas tensões que permanecem no material após a causa original das tensões ter sido removida, que são induzidas por uma variedade de mecanismos, incluindo deformações inelásticas (plásticas) em processos de conformação a frio ou gradientes não uniformes / de alta temperatura / incompatibilidade térmica em processos de conformação/fabricação a quente (Zhou et al., 2015).

Além disso, ocorrem defeitos particulares durante o processo de flexão do perfil, como deformação da seção transversal, torção de seções transversais assimétricas ou perfis simétricos ao longo de eixos não principais, instabilidade das paredes do perfil (enrugamento). Além disso, as grandes deformações induzidas, principalmente no extradorso, podem degradar a estrutura metalúrgica (Tekkaya e Chatti, 2014). Os defeitos mecânicos são mostrados na figura 2.10.

fissura 	enrugamento 
colapso 	abaulamento 
deformação local 	deformação da seção transversal 
deslocamento 3D 	torção 

Figura 2-10 – Defeitos mecânicos para formar perfis curvos.

Fonte: Adaptado de Tekkaya e Chatti (2014).

A deformação transversal dos perfis é geralmente o principal problema com a flexão de perfis. Torna-se cada vez mais crítico com o aumento da complexidade da seção transversal e especificação geométrica mais rígida. A torção da seção transversal ocorre durante a flexão de perfis assimétricos onde o centro de gravidade (CG) e o centro de cisalhamento (CS) da seção transversal não são coincidentes (Tekkaya e Chatti, 2014).

Modificações de acordo com um projeto de produção correto podem ser aplicadas a uma seção transversal para reduzir a deformação e torção da seção transversal (Selvaggio et al., 2009), como mostrado na figura 2.11.

O aspecto mais importante dessas modificações é aumentar a rigidez do perfil e reduzir a assimetria (reduzir a distância entre CG e CS), o que pode ser realizado pela adição de almas bem como aumento da espessura das paredes. Ambas as ações aumentam a área da seção transversal e adicionam peso a uma seção.

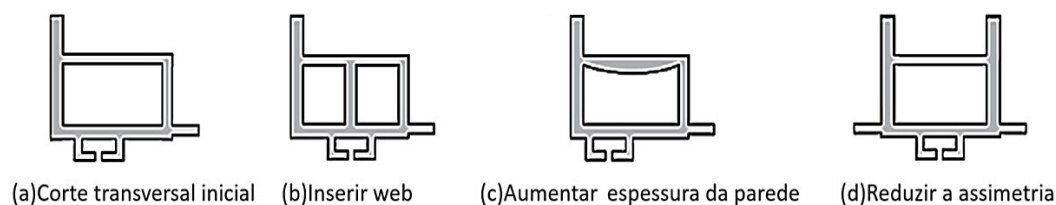


Figura 2-11- Modificações feitas para reduzir a deformação e torção da seção transversal de acordo com um projeto de produção correto.

Fonte: Adaptado de Selvaggio et al. (2009).

2.9 Modelagem numérica dos processos de conformação

A aplicação do MEF nos problemas de conformação começou como uma extensão da técnica de análise estrutural no regime de deformação plástica. Vários métodos de aproximação foram desenvolvidos e aplicados a processos de conformação. Os mais conhecidos são: o método da deformação homogênea, o método dos blocos, o método de campo de linhas de escorregamento, os métodos do limite superior e inferior e o método geral de Hill. Esses métodos são úteis na predição da força de carregamento, mudanças de geometria e modos de fluxo do material, contudo, uma determinação mais acurada dos efeitos de vários parâmetros do processo se tornou possível com o MEF (Kobayashi, 1989).

Por exemplo, a simulação de estampagem de chapas permite avaliar as regiões das peças que poderão sofrer trincas, enrugamento, redução de espessura e retorno elástico, propondo medidas corretivas das ferramentas antes de sua fabricação e sugerir ajustes do processo, tais como a utilização de lubrificantes e pressão de trabalho no prensa-chapas (Reis, 2004).

2.10 Tensões residuais

Tensões residuais são aquelas que permanecem na peça quando todas as suas solicitações externas são removidas. Essas tensões aparecem frequentemente em peças submetidas a diferentes processos térmicos ou mecânicos (fundição, soldagem, laminação, forjamento, usinagem, dobramento, têmpera, etc.). Elas representam um dos principais potenciais para diversos problemas como a formação de trincas, falta de estabilidade dimensional e uma maior tendência para a estrutura sofrer fratura frágil, diminuindo a vida útil do componente além de comprometer seu comportamento (Modenesi, 2008); entretanto, também podem atuar benéficamente. Em geral tensões residuais de compressão na superfície são mais favoráveis, pois aumentam a vida em fadiga de um componente mecânico, e o oposto ocorre com tensões residuais de tração, pois diminuem a vida em fadiga (Totten e Howes, 2003).

As tensões residuais são de natureza elástica, elas redefinem a tensão de escoamento numa determinada região (caso a tensão de escoamento seja ultrapassada). Também se

define as tensões residuais como sendo ordinárias, ou seja, uma tensão de tração irá se somar com outra tensão de tração, ou ainda, uma tensão de tração irá se subtrair com outra tensão de compressão e vice-versa. As tensões residuais podem ser aliviadas aquecendo o material até uma temperatura a qual a tensão de escoamento do material é igual ou inferior às tensões residuais presentes no material, ou seja, neste caso as tensões residuais irão causar deformações plásticas (escoamento do material) e serão aliviadas (Donato, 2008).

3 | Metodologia

Aqui são apresentadas as etapas necessárias para o pleno desenvolvimento do trabalho, com o propósito de obter êxito na validação do modelo computacional do processo de calandragem de perfil laminado e, também, realizar o estudo de caso com os perfis de alumínio.

Referente ao processo de conformação estudado deste trabalho é possível classificá-lo como um processo de conformação por dobra conforme mostra a figura 2.1. Este enfoque se justifica pela natureza intrínseca da calandragem, onde forças controladas são aplicadas de maneira precisa para moldar o material em conformidade com as especificações desejadas.

O software ANSYS® Mechanical, foi utilizado para realizar a análise estrutural do problema via MEF.

A validação do modelo computacional foi realizada com um estudo de caso considerando um perfil laminado de aço S235 em formato I submetido a esforços verticais impostos pelos rolos da calandra. Os resultados para a tensão residual obtidos numericamente serão comparados com resultados experimentais encontrados de Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp (2010). Os demais perfis analisados neste trabalho dispõem da mesma metodologia utilizada para a simulação numérica do perfil I de aço S235, porém são de alumínio 6061 T6.

3.1 Descrição do modelo computacional

3.1.1 Descrição geral

Segundo Stolarski, Nakasone, Yoshimoto (2018) um software de elementos finitos normalmente é constituído por três módulos fundamentais: a) Pré-processamento; b) Processamento ou solução; e c) Pós-processamento. Normalmente a comunicação entre os módulos é feita através de matrizes de dados com uma formatação que normalmente é pré-estabelecida pelo módulo de cálculo.

O módulo de pré-processamento é por onde o usuário entra com as informações pertinentes ao problema a ser resolvido como por exemplo: geometria, dados do material, condições de contorno, carregamentos, tipo de elemento, grau de refino da malha, etc. É muito comum este módulo possuir uma ferramenta de CAD que auxilia o usuário a entrar com a geometria e condições de contorno do problema e geração de malha. Com as informações fornecidas pelo usuário o módulo de pré-processamento gera matrizes de dados de entrada que então são passadas para o módulo de cálculo (Zhang, 2019).

O módulo de processamento ou solução recebe as matrizes de dados de entrada e a partir dessas executa as rotinas de cálculos de elementos finitos conforme foi programado. Após o cálculo são geradas matrizes de saída de dados. As matrizes de saída de

dados podem ser passadas para o módulo de pós-processamento para visualização. No caso de problemas que são resolvidos de forma incremental, as matrizes de saída de dados também podem ser utilizadas para realimentação do módulo de cálculo (Zhang, 2019).

O módulo de pós-processamento é onde o usuário pode visualizar os resultados como geometria deformada, campos de tensão, campos de deformação, forças de reação, etc. É muito comum esse módulo apresentar a possibilidade de se traçar gráficos de variáveis escolhidas pelo usuário.

Tanto quanto o pós-processamento, onde se avalia os resultados obtidos, o pré-processamento e em especial as condições de contorno, exigem do engenheiro amplo estudo da peça ou conjunto de peças e como estes interagem ou são afetados pelas forças, apoios e outros fatores que influenciem sua resistência e desempenho para a função a que se destinam. Quanto mais próximas ou exatas forem aplicadas as condições de contorno das reais condições de trabalho da peça ou conjunto, mais confiáveis serão os resultados obtidos na análise (Lee, 2023).

O pacote Workbench, utilizado neste trabalho, é desenvolvido para proporcionar um ambiente no qual vários tipos de simulações possam ser realizadas. Este pacote atende uma gama de tecnologias, tais como CFD (análise fluidodinâmica computacional), MEF (método dos elementos finitos) e ferramentas de otimização de design.

O modelo tridimensional desenvolvido para este trabalho foi construído para capturar as nuances do processo de calandragem de perfis metálicos através de uma análise estática estrutural. O modelo também utiliza propriedades como curva tensão x deformação verdadeira, módulo de Young, coeficiente de Poisson entre outras, assegurando resultados fiéis à realidade. Ele incorpora quatro tipos diferentes de elementos finitos: o elemento hexaédrico de ordem linear com 8 nós (SOLID185), o elemento hexaédrico de ordem quadrática com 20 nós (SOLID186), o elemento tetraédrico de ordem quadrática com 10 nós (SOLID187), e o elemento tetraédrico de ordem linear com 4 nós (SOLID285). A escolha desses elementos foi baseada em uma análise comparativa de desempenho.

Cada elemento finito foi cuidadosamente avaliado em termos de estabilidade e precisão. Essa determinação foi respaldada por testes de convergência de malha, onde se verificou a estabilidade dos resultados obtidos com esses elementos e com comparações com testes experimentais encontrados na literatura.

O modelo desenvolvido também conta com algumas simplificações no processo a fim de promover menor esforço computacional, sempre mantendo a premissa de que essas simplificações não impactam significativamente nos resultados finais. A figura 3.1 mostra um organograma do modelo computacional desenvolvido.

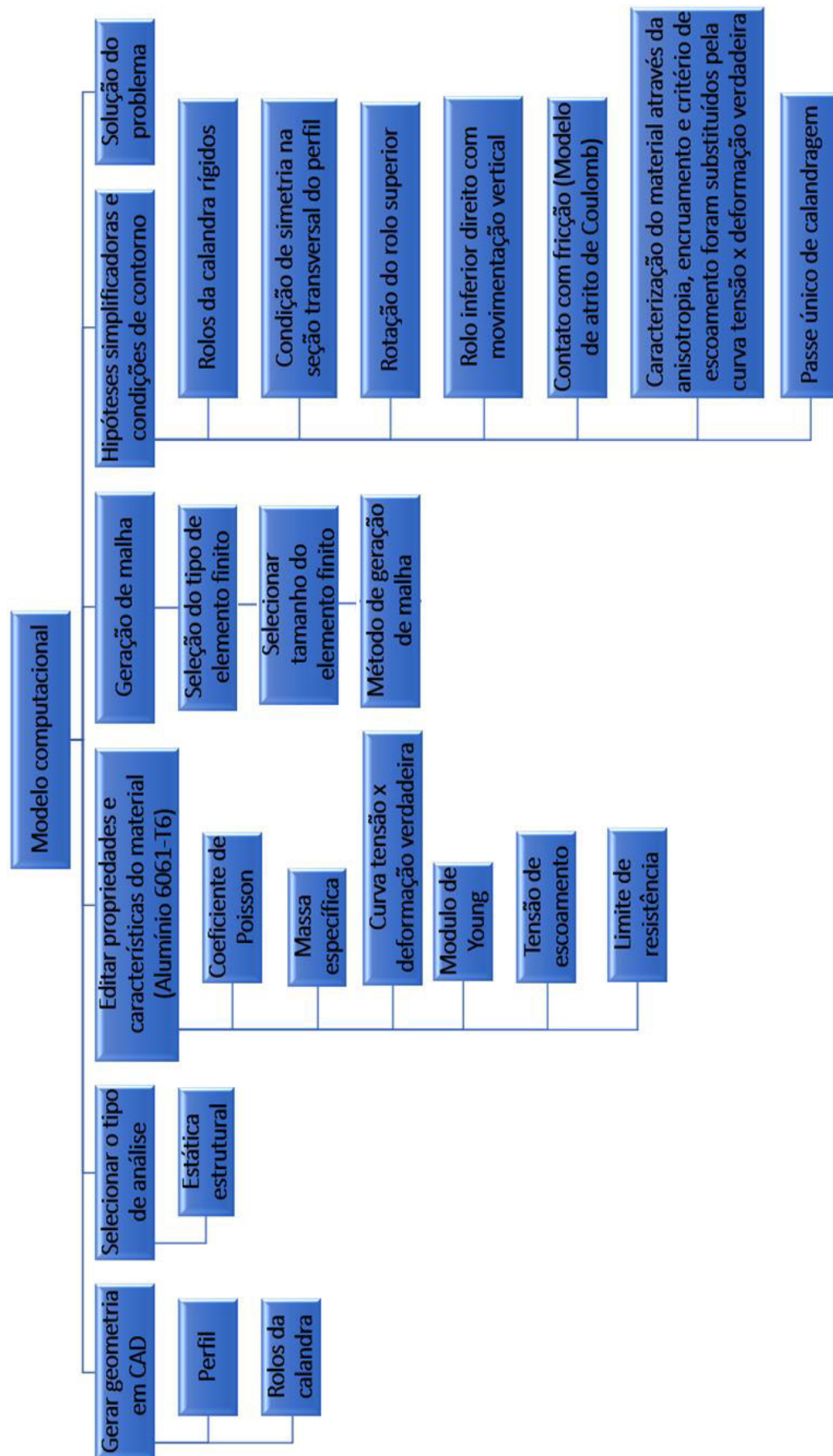


Figura 3-1 Organograma do modelo computacional

Fonte: Próprio autor.

3.1.2 Fundamentos matemáticos e numéricos do ANSYS Workbench: uma abordagem específica ao modelo proposto

Na essência do software, o MEF desmembra problemas complexos em elementos discretos menores, permitindo uma resolução numérica eficaz. No contexto do modelo desenvolvido para este estudo, o software opera com equações de equilíbrio e conservação, fundamentando a descrição do comportamento dos sistemas específicos de perfis metálicos durante o processo de calandragem (Moaveni, 2014).

Essas equações são convertidas em um formato discreto através de métodos numéricos, como diferenciação finita e integração numérica. Nesse sentido, o domínio é dividido em elementos, e as equações diferenciais são transformadas em equações algébricas resolvidas numericamente. Para sistemas não-lineares, algoritmos iterativos, como o método de Newton-Raphson, são aplicados progressivamente para atingir a convergência. Além disso, o software se beneficia de bibliotecas matemáticas especializadas, desempenhando funções críticas, como cálculos matriciais e resolução de sistemas de equações lineares. Estas operações complexas são essenciais para a simulação numérica precisa (Moaveni, 2014).

É primordial ressaltar que, embora os detalhes exatos dos códigos que o ANSYS Workbench utiliza não sejam divulgados, a abordagem geral é integrada para modelar, simular e analisar o processo de calandragem de perfis metálicos, garantindo uma representação fiel da realidade.

3.1.3 Simplificações adotadas no modelo computacional

No desenvolvimento do modelo computacional, algumas simplificações foram implementadas. Estas simplificações são fundamentais para viabilizar a simulação complexa e detalhada, garantindo que os resultados obtidos sejam coerentes com os objetivos propostos e as restrições dos recursos computacionais disponíveis.

Uma das simplificações notáveis é a exclusão da anisotropia do material, ou seja, o material comporta-se isotropicamente. Esta escolha foi feita com base na decisão de incorporar a curva tensão-deformação verdadeira do material, o que oferece uma representação mais precisa do comportamento mecânico em relação às deformações elásticas e plástica. Ademais, ao desconsiderar a anisotropia, foi possível reduzir a complexidade do modelo.

Outra simplificação relevante foi baseada em Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp (2010) que consiste em adotar um único passe de calandragem para determinar o raio de curvatura final dos perfis. A realidade industrial frequentemente envolve múltiplos passes, mas esta simplificação foi introduzida para agilizar a análise, tornando o processo computacionalmente mais eficiente. É importante salientar que na prática para perfis de alumínio é utilizado somente um único passe de calandragem. Além disso, a simulação de metade da geometria, com aplicação de condição de simetria também foi baseada em Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp (2010), esta simplificação permitiu

reduzir substancialmente a quantidade de elementos finitos necessários, acelerando a solução numérica e, consequentemente, reduzindo o tempo de processamento.

A idealização do comportamento dos rolos da calandragem também foi realizada. Adotou-se a premissa de que os rolos são rígidos, enquanto o material do perfil é considerado flexível. Além disso, apenas o rolo superior foi designado como motor, com os rolos inferiores girando livremente assim como em Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp (2010). Estas simplificações são fundamentais para simplificar o problema, permitindo que a análise seja realizada de maneira eficiente e viável.

3.1.4 Etapas de pré-processamento

3.1.4.1 Preparação da geometria

Na análise do perfil I foi adotada uma condição de simetria da geometria bem como em Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp (2010), com o intuito de modelar somente a metade do seu perfil, e assim diminuir a quantidade de nós e elementos, consequentemente diminuindo o tempo de processamento. Na figura 3.2 pode ser observado um perfil I em condição de simetria (somente a metade do perfil) com suas respectivas dimensões.

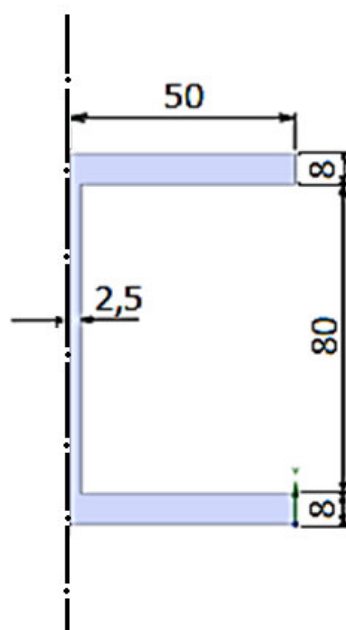


Figura 3-2 – Dimensões, em mm, viga I usada na validação do modelo computacional (Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp, 2010).

Fonte: Próprio autor.

Na figura 3.3 é possível visualizar as dimensões de todo o conjunto simulado (perfil e rolos da calandra) do caso simulado para a validação do modelo computacional.

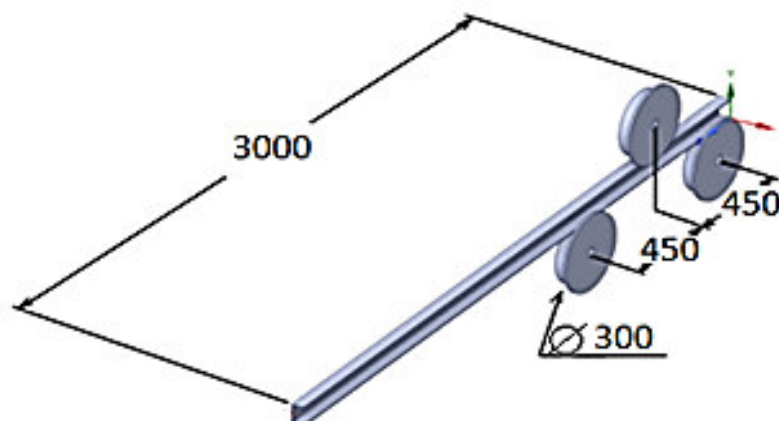


Figura 3-3 – Dimensões, em mm, do conjunto de calandra e perfil (Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp, 2010).

Fonte: Próprio autor.

3.1.4.2 Materiais dos componentes

As propriedades do material definem as características estruturais de cada componente para uma simulação. E cada simulação pode ter um conjunto diferente de materiais para qualquer componente. O software permite que sejam acrescentados materiais de acordo com a necessidade de projeto, simplesmente editando as propriedades do material. As propriedades mais importantes na análise estrutural são o módulo de Young (módulo de elasticidade), o coeficiente de Poisson e os limites elásticos e de resistência do material.

Ao realizar simulações no ANSYS Workbench, uma etapa crítica é a modelagem do comportamento dos materiais. Ao contrário de critérios de escoamento predefinidos, o software permite a integração de dados reais do material por meio de sua curva tensão-deformação verdadeira na opção *multilinear isotropic hardening*. Isso significa que os dados do material, obtidos a partir de testes de laboratório ou literatura, podem ser inseridos no software, sendo possível assim, adotar a não-linearidade do material. No modelo numérico desenvolvido neste estudo foram inseridos os dados da curva tensão x deformação verdadeira, fazendo com que os resultados tendessem a valores mais próximos dos reais. Neste estudo o material adotado para todos os perfis (com exceção do perfil I utilizado para validação do modelo computacional) foi o alumínio 6061 T6. A curva tensão x deformação verdadeira para o material do perfil I (aço S235) foi obtida em Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp (2010), e pode ser observado na figura 3.4, em quanto que a curva tensão x deformação verdadeira para o material dos demais perfis (alumínio 6061 T6) está representada na figura 2.7.

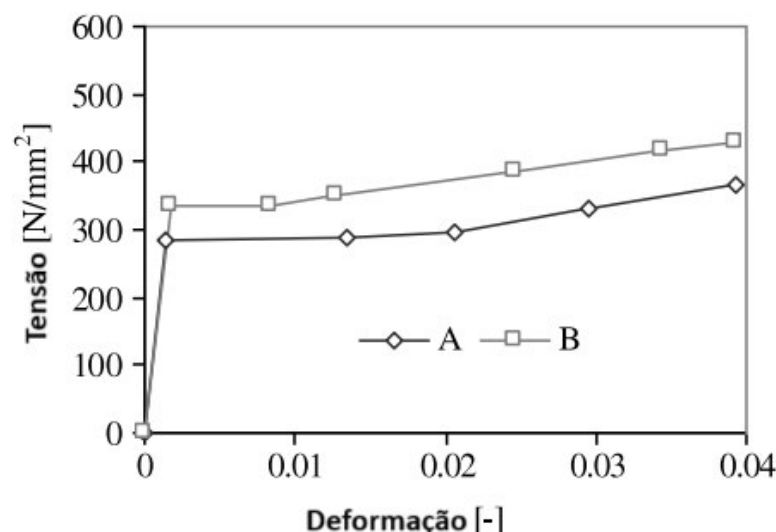


Figura 3-4 Curva tensão x deformação verdadeira para o aço S235

Fonte: Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp (2010).

3.1.4.3 Condições de contorno

Foi utilizada a opção de carregamento de deslocamento remoto no rolo inferior direito para realizar o deslocamento vertical deste rolo em 53 mm, e a condição de rotação de junta no rolo superior, realizando assim um deslocamento horizontal do perfil através do atrito do perfil com o rolo, assim como em Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp (2010).

O uso de um único rolo para forçar o movimento da seção do perfil através dos rolos, e a simulação de apenas um único passe de calandragem para promover a curvatura final desejada são simplificações da modelagem.

3.1.4.4 Contatos

No ANSYS Workbench existem diferentes tipos de contato que determinam como os corpos podem se mover em relação ao outro. A maioria desses tipos só se aplica a regiões de contato formadas por faces. Os tipos são: *Bonded* (Ligado ou colado), *No separation* (Sem separação), *Frictionless* (Sem atrito), *Rough* (Áspero) e *Frictional* (Com atrito). Nesta análise foi utilizado o contato *Frictional* (Com atrito) para promover a movimentação do perfil devido à rotação do rolo. Para isso o modelo de atrito de Coulomb foi selecionado, ele estabelece que a força de atrito estática e cinética é proporcional à força normal entre as superfícies e é multiplicada por um coeficiente de atrito estático ou coeficiente de atrito cinético, respectivamente (ANSYS help system, 2023).

Na simulação numérica, foi utilizado o modelo de atrito de Coulomb, este modelo de atrito é utilizado para analisar o comportamento de componentes mecânicos em contato, como em simulações de contato entre peças ou estruturas. O coeficiente de atrito, que é uma propriedade essencial neste modelo, pode ser ajustado para refletir diferentes condições de superfície e materiais (ANSYS help system, 2023).

Assim como em Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp (2010) para alcançar o movimento do perfil foi necessário adotar um coeficiente de atrito não realista grande ($\mu = 0,8$). O emprego de um coeficiente de atrito mais realista de, por exemplo, $\mu = 0,1$ ou $\mu = 0,2$ como representativo para o contato de aço, produziu deslizamento entre o rolo e a superfície de contato.

Análises estruturais envolvendo contato são altamente não-lineares e necessitam de algoritmos computacionais adequados para resolver o problema de contato. Os elementos de contato do programa ANSYS são suportados por cinco algoritmos de contato diferentes: Lagrangiano aumentado, pura penalidade, restrição multiponto interna e Lagrangiano.

O algoritmo Lagrangiano aumentado foi selecionado, a restrição é satisfeita através dos multiplicadores de Lagrange, omitindo assim o uso de rigidez de penalidade alta, evitando dificuldades de convergência e mau condicionamento da matriz de rigidez global. Isso, no entanto, é à custa de mais iterações de equilíbrio em comparação com outros algoritmos (Ansys, 2022). Em tratamento de interface foi estabelecido a opção ajustar ao toque, esta opção define de que forma a interface de contato se origina. Na opção selecionada, quaisquer lacunas iniciais são fechadas e qualquer penetração inicial é ignorada, criando um estado inicial livre de tensão. Os pares de contato estão "apenas se tocando", conforme ilustrado na figura 3.5. Essa configuração é útil para garantir que o contato inicial ocorra mesmo se houver lacunas.

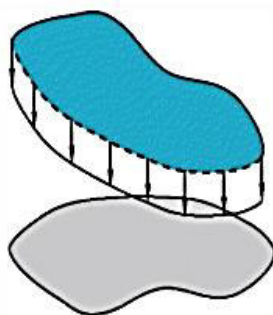


Figura 3-5 - Pares de contato.

Fonte: Adaptado Ansys, 2022.

Uma vez que os rolos da máquina têm uma rigidez muito maior em comparação com o perfil a ser calandrado, a interação entre os rolos e a superfície do perfil foi tratada como um tipo de contato rígido para flexível. As superfícies de contato dos rolos foram modeladas como infinitamente rígidas, enquanto as superfícies de contato do perfil foram modeladas como flexíveis.

3.1.4.5 Geração de malha e elementos utilizados

Os rolos foram modelados como corpos rígidos usando elementos TARGE170 tridimensionais. O elemento de contato CONTA174 é utilizado para modelar as superfícies de contato no perfil, proporcionando contato entre os rolos e o perfil. Quando os

elementos CONTA174 da superfície de contato do perfil penetram no elemento TARGE170 designado aos rolos rígidos, o contato é estabelecido. O contato é detectado nas localizações dos pontos de integração de Gauss, o que em geral fornece resultados mais precisos do que o esquema de detecção nodal que prescreve a detecção de contato nos nós de contato. O elemento de contato está localizado nas superfícies do elemento sólido e a disposição dos nós está em conformidade com o elemento de 20 nós homogêneo/sólido estrutural em camada SOLID186. A combinação dos elementos selecionados (TARGE170 e CONTA174) para o problema de contato classifica a interação de contato como o chamado contato superfície-superfície. O contato superfície-superfície suporta deslizamento, atrito e grandes deformações. Também foram testados os elementos finitos SOLID185, SOLID187 e SOLID285 para a modelagem do perfil.

O elemento SOLID185 é adequado para modelagem geral de estruturas sólidas 3-D, permitindo degenerações prismáticas, tetraédricas e piramidais quando usado em regiões irregulares. Esse elemento possui oito nós com três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais x , y e z . O elemento tem plasticidade, hiperelasticidade, enrijecimento por tensão, fluência, grande deflexão e grande capacidade de deformação. Outra característica do elemento é a capacidade de formulação mista para simular deformações de materiais elastoplásticos quase incompressíveis e materiais hiperelásticos totalmente incompressíveis. O sólido estrutural homogêneo SOLID185 usa o método de integração total (também conhecido como método de integração reduzida seletiva), formulação de deformação aprimorada, formulação de deformação aprimorada simplificada ou integração reduzida uniforme (Ansys, 2022).

O SOLID186 é um elemento sólido 3-D de ordem superior que exibe um comportamento de deslocamento quadrático. O elemento é definido por 20 nós com três graus de liberdade por nó: translações nas direções nodais x , y e z . O elemento suporta plasticidade, hiperelasticidade, fluência, enrijecimento por tensão, grande deflexão e grande capacidade de deformação. O mesmo possui capacidade de formulação mista para simular deformações de materiais elastoplásticos quase incompressíveis e materiais hiperelásticos totalmente incompressíveis. (Ansys, 2022).

O elemento SOLID187 é um elemento 3-D de ordem superior com um comportamento de deslocamento quadrático e é adequado para modelar malhas irregulares (como as produzidas a partir de vários sistemas CAD/CAM). O elemento é definido por 10 nós com três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais x , y e z . O elemento tem plasticidade, hiperelasticidade, fluência, enrijecimento por tensão, grande deflexão e grande capacidade de deformação. Além das características citadas, o mesmo possui capacidade de formulação mista para simular deformações de materiais elastoplásticos quase incompressíveis e materiais hiperelásticos totalmente incompressíveis (Ansys, 2022).

Já o elemento SOLID285 é um elemento uP misto de 4 nós e 3-D de ordem inferior. O elemento tem um comportamento de deslocamento linear e pressão hidrostática. O elemento é adequado para modelar malhas irregulares (como as geradas por vários sistemas CAD/CAM) e materiais gerais (incluindo materiais incompressíveis). O elemento

é definido por quatro nós com quatro graus de liberdade em cada nó: três translações nas direções nodais x , y e z e uma pressão hidrostática para todos os materiais, exceto materiais hiperelásticos quase incompressíveis. Para materiais quase incompressíveis, em vez de pressão hidrostática, a taxa de variação de volume é usada em cada nó junto com os três graus de liberdade de translação. O elemento tem plasticidade, hiperelasticidade, fluência, enrijecimento por tensão, grande deflexão e grande capacidade de deformação. É capaz de simular deformações de materiais elastoplásticos quase incompressíveis, materiais hiperelásticos quase incompressíveis e materiais hiperelásticos totalmente incompressíveis (Ansys, 2022).

O elemento CONTA174 é usado para representar o contato e deslizamento entre superfícies alvo 3-D e uma superfície deformável definida por este elemento. O elemento é aplicável a análises de contato estrutural 3-D e campo acoplado. Ele pode ser usado tanto para contato baseado em par quanto para contato geral. No caso de contato baseado em par, a superfície alvo é definida pelo tipo de elemento alvo 3-D, TARGE170. No caso de contato geral, a superfície alvo pode ser definida por elementos CONTA174 (superfícies deformáveis) ou elementos TARGE170 (corpos rígidos) (Ansys, 2022).

A figura 3.6 mostra os elementos finitos utilizados no presente trabalho para modelar o processo de conformação de dobra de 3 rolos.

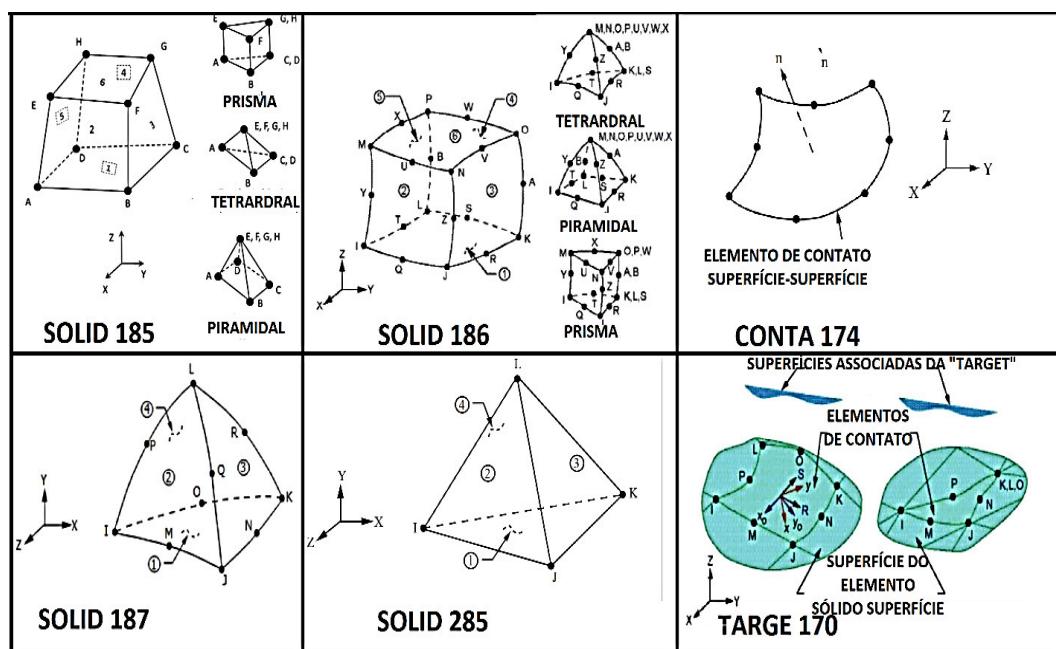


Figura 3-6 – Elementos finitos utilizados na simulação numérica.

Fonte: Adaptado Ansys, 2022.

4 | Resultados

Inicialmente, um perfil I de aço será utilizado para realizar a validação do modelo numérico, os parâmetros mostrados anteriormente como diâmetro dos rolos, distância entre rolos, dimensões do perfil I, dados do material do perfil (aço S235) e resultados experimentais, foram obtidos a partir do trabalho de Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp (2010). Então, empregando o modelo computacional validado, diferentes perfis simulados numericamente adotando os parâmetros fornecidos por Souza (2022), tais como, dimensões dos perfis e propriedades mecânicas do material (alumínio 6061 T6), conforme metodologia apresentada na seção 3.

4.1 Validação do modelo computacional: perfil I

4.1.1 Teste de convergência de malha

Inicialmente foi feito o teste de convergência de malha, de forma a avaliar se os resultados estão independentes da discretização espacial utilizada. Portanto, busca-se o tamanho ideal de malha para que se encontre a melhor relação entre acurácia e custo computacional. O tamanho ideal de malha é quando os resultados obtidos variam minimamente em relação ao refinamento da malha.

Como parâmetro para o teste de convergência de malha foi adotada a máxima tensão de tração no flange do perfil I, obtida nos resultados experimentais de Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp (2010). A magnitude desta tensão obtida experimentalmente corresponde a 353,6 MPa. Cabe informar que todas as tensões comparadas neste trabalho encontram-se na superfície externa do perfil, devido aos dados experimentais das tensões neste local serem apresentados de forma mais completa em Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp (2010). A tabela 4.1 bem como as figuras 4.1 a 4.4 mostram os resultados para o teste de convergência de malha para os 4 tipos de elementos finitos considerados.

Tabela 4-1 Teste de convergência de malha perfil I.

Elemento Finito	Tamanho de elemento	Nº de nós	Tensão Máxima de Tração (MPa)	Diferença Relativa (%)	Tempo de Processamento
SOLID185	18	7983	186,57	-18,44	01 h 01 min
SOLID185	14	11031	220,97	-38,22	02 h 14 min
SOLID185	12	13149	305,43	30,15	03 h 03 min
SOLID185	11	14790	213,34	-4,63	03 h 30 min
SOLID185	10	16121	223,23	54,53	04 h 07 min

SOLID185		10533	101,49	-	04 h 22 min
SOLID186	22	15653	307,99	-6,66	01 h 22 min
SOLID186	18	22087	328,50	-2,61	03 h 47 min
SOLID186	16	28906	337,09	-2,02	05 h 40 min
SOLID186	14	32511	343,90	-1,17	07 h 11 min
SOLID186	12	39713	347,91	-0,61	08 h 53 min
SOLID186	11	7383	350,02	-	10 h 51 min
SOLID187	18	29963	283,32	-3,39	02 h 43 min
SOLID187	16	34124	292,94	-1,31	03 h 57 min
SOLID187	15	38446	296,77	-6,77	04 h 52 min
SOLID187	14	42078	316,87	8,94	05 h 28 min
SOLID187	12	50132	288,54	6,59	08 h 11 min
SOLID187	11	62005	269,53	-2,03	10 h 52 min
SOLID187	10	75224	274,99		15 h 17 min
SOLID285	18	25745	230,55	-5,93	00 h 35 min
SOLID285	16	31752	244,22	-4,23	01 h 55 min
SOLID285	15	34665	254,55	-2,23	02 h 23 min
SOLID285	14	39904	260,22	12,05	03 h 45 min
SOLID285	12	45590	228,85	17,19	04 h 51 min
SOLID285	11	57040	189,50	-	05 h 30 min

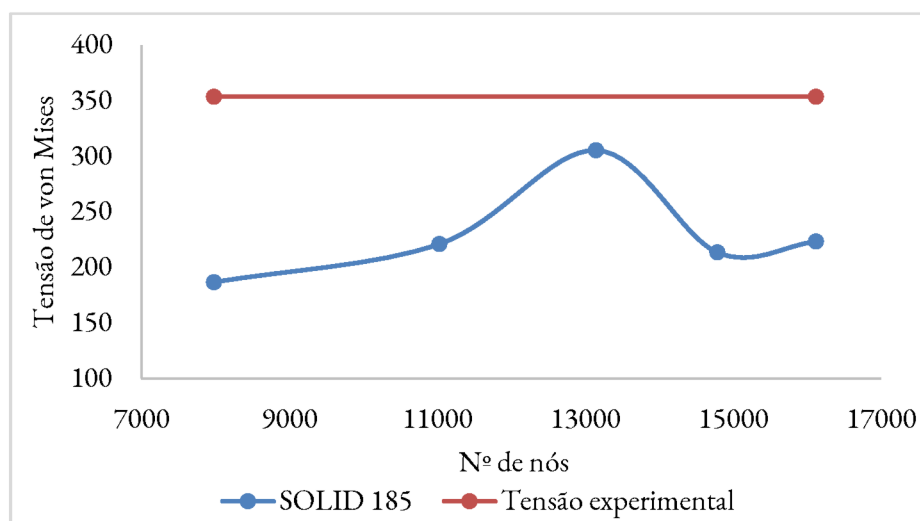


Figura 4-1 Gráfico de independência de malha SOLID 185

Fonte: Próprio autor.

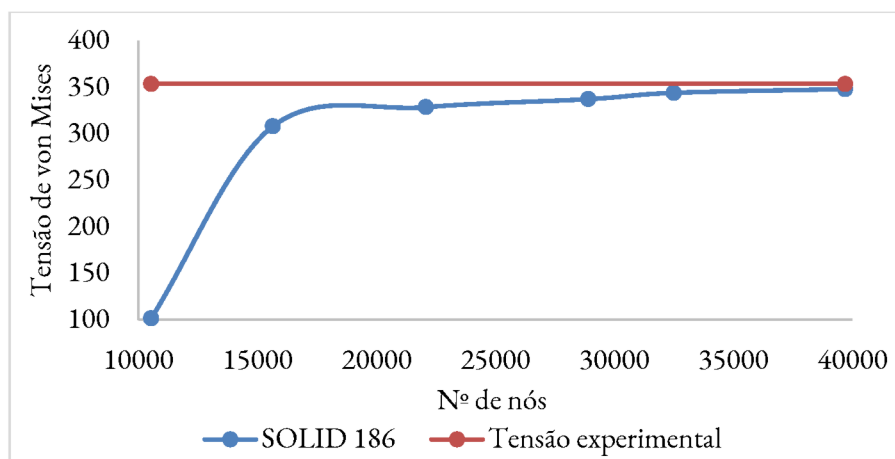


Figura 4-2 Gráfico de independência de malha SOLID 186

Fonte: Próprio autor.

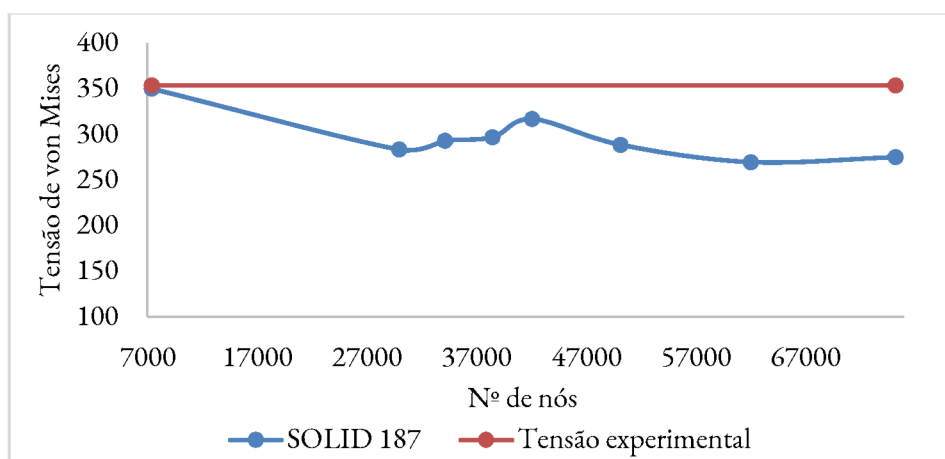


Figura 4-3 Gráfico de independência de malha SOLID 187

Fonte: Próprio autor.

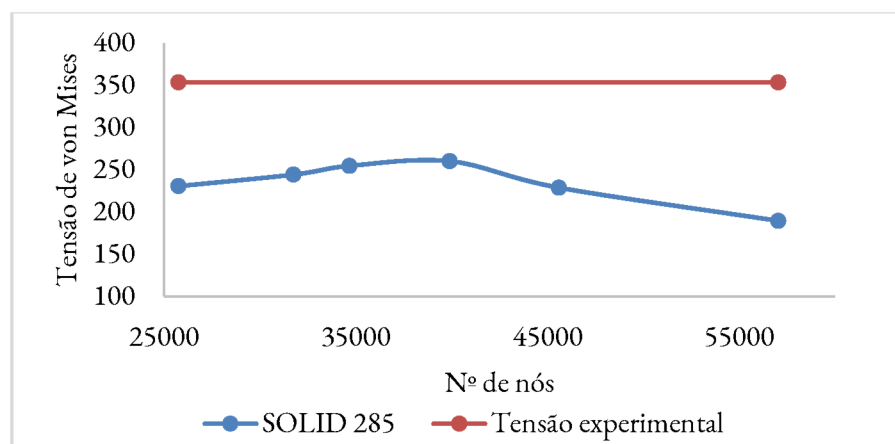


Figura 4-4 Gráfico de independência de malha SOLID 285

Fonte: Próprio autor.

Através dos resultados do teste de convergência de malha apresentados na tabela 4.1 observou-se que o SOLID186 e SOLID187 foram os únicos elementos finitos que mostraram resultados convergentes, desta forma foi selecionada a malha com 39713 nós do tipo SOLID186 para a modelagem computacional do problema, que obteve uma tensão máxima de tração de 347,91 Mpa, e atingindo uma diferença relativa entre dois refinamentos sucessivos menor que 1%. Ao comparar o resultado numérico obtido para a tensão máxima de tração ao resultado experimental, obteve-se um erro de -1,61%. Na figura 4.5 é possível observar um exemplo de como o refino de malha foi feito ao longo da espessura e do comprimento do perfil I com o elemento finito SOLID186.

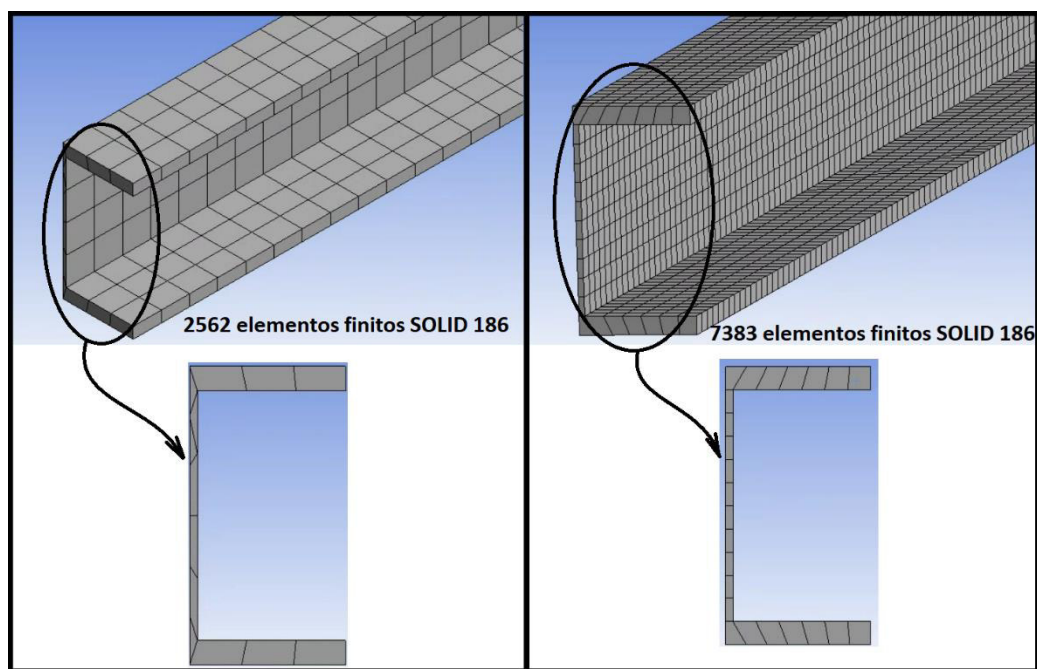


Figura 4-5 Discretização do refino de malha.

Fonte: Próprio autor.

Como visto na figura 4.5, o refinamento de malha foi conduzido mediante um processo estrategicamente elaborado. Este procedimento envolveu a manutenção da quantidade de elementos finitos na espessura do perfil I, enquanto aumentou-se de maneira progressiva a quantidade de elementos finitos ao longo de seu comprimento e largura.

Na figura 4.6 é possível analisar a qualidade do elemento gerado quando utilizado o elemento finito SOLID186 com 6033 elementos, no lado esquerdo da figura 4.6 pode ser vista a escala que distingue a qualidade de cada elemento gerado no perfil modelado neste trabalho, variando em uma escala entre 0 (elemento finito ruim) e 1 (elemento finito perfeito). Embora o elemento finito SOLID187 também seja adequado para modelar o problema, optou-se por fazer uma análise detalhada de malha somente do SOLID186 devido a ele ser ligeiramente mais estável no teste de convergência de malha, porém serão analisados os resultados de todos os elementos testados com a finalidade de assegurar quais elementos finitos são adequados para modelar este tipo de problema.

De acordo com o ANSYS® *Meshing User's Guide*, a qualidade do elemento da estrutura da malha é calculada por:

$$Quality = C \left[\frac{volume}{\sqrt{[\sum (edge\ length)^2]^3}} \right] \quad (3.1)$$

A equação (3.1) é válida para elementos de malha 3D no ANSYS® *Meshing*. Os parâmetros são os mesmos para elementos de malha 2D e 3D; volume e comprimento da borda. O termo C varia de acordo com o tipo de elemento utilizado.

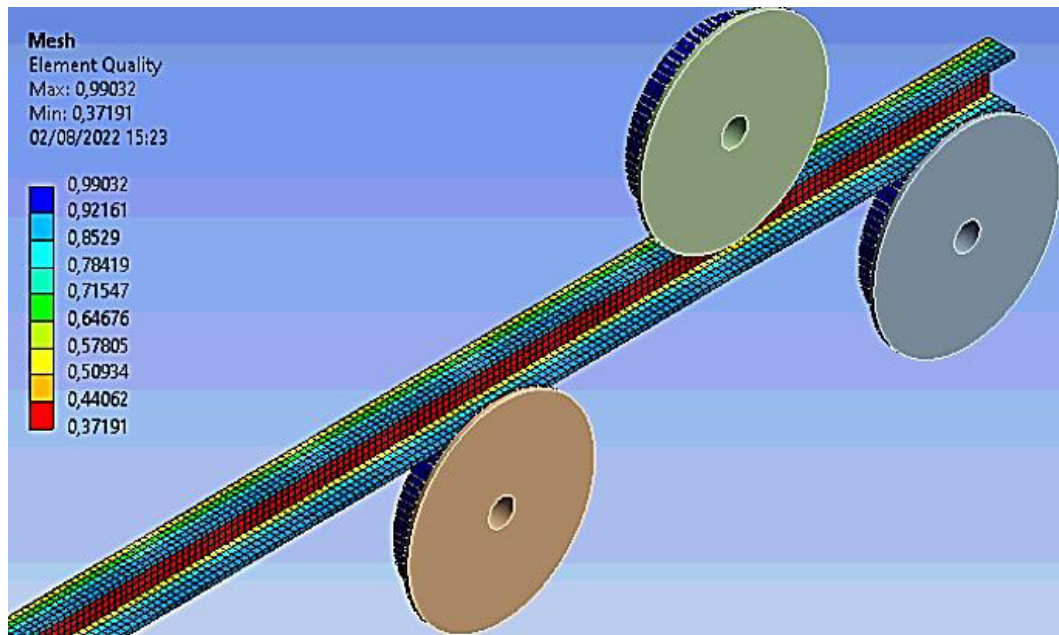


Figura 4-6 Malha obtida com o elemento SOLID186.

Fonte: Próprio autor.

A figura 4.7 mostra as tensões de von Mises resultantes do processo de conformação, porém para fazer a comparação com os resultados experimentais foi necessário obter as tensões residuais do processo, ou seja, as tensões elásticas existentes em um corpo sem a existência de carregamentos externos ou gradientes de temperatura. Para isso foram criados três *paths* na geometria após o descarregamento das forças. Os *paths* são caminhos criados na geometria analisada, com a finalidade de gerar os resultados da simulação numérica somente nestes caminhos.

A figura 4.8 proporciona uma visualização das variações nas tensões ao longo da linha neutra da seção transversal da viga I, abrangendo as diferentes fases do processo de calandragem. Essa representação gráfica revela uma análise detalhada das tensões ocorridas antes, durante e após o processo de conformação. As variações de tensões são claramente perceptíveis, destacando os efeitos da curvatura no perfil I.

Na figura 4.9 podem ser observadas as tensões residuais ao longo dos *paths*, foi criado um *path* na aba superior, um *path* na aba inferior e um *path* na alma da viga.

Por meio das tensões obtidas na simulação numérica foi possível fazer uma comparação destes resultados com os resultados experimentais de Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp (2010).

A análise comparativa dos resultados numéricos com os experimentais apresentada nas figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 é de suma importância para validar o modelo computacional proposto para a simulação numérica do processo de calandragem de 3 rolos em perfis de alumínio. As tensões obtidas numericamente foram medidas a uma distância de 1,5 metros no início do perfil. Os gráficos ilustram a distribuição das tensões residuais ao longo da viga I, permitindo uma avaliação abrangente da acurácia do modelo em diferentes regiões do perfil. É importante salientar que os resultados experimentais que serão comparados correspondem à parte externa da vida como mostra na figura 4.9.

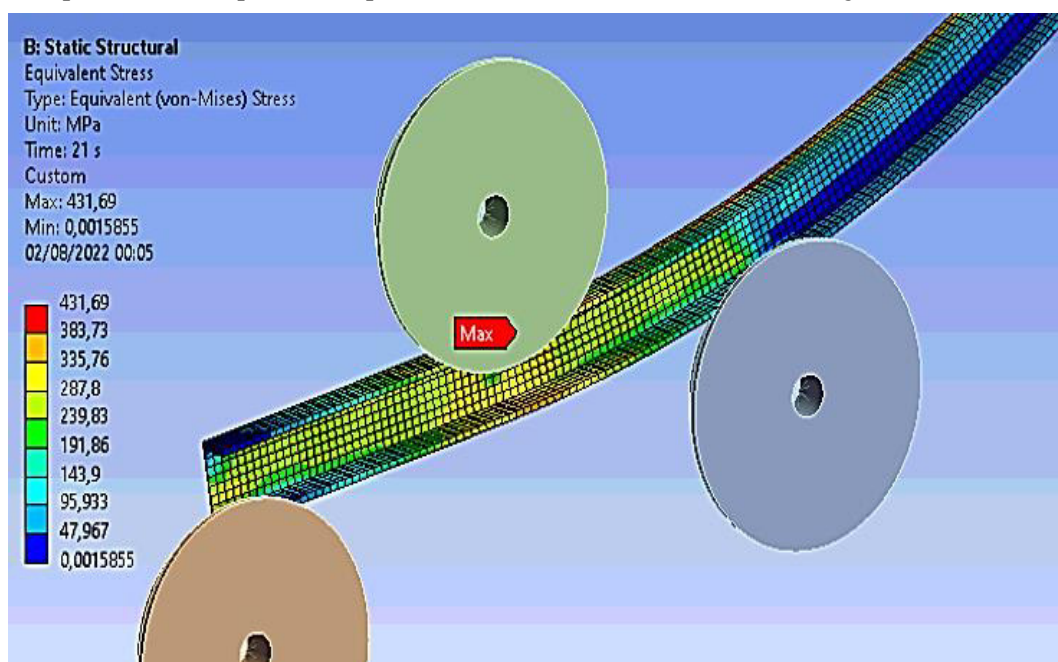


Figura 4-7 Tensões de von Mises.

Fonte: Próprio autor.

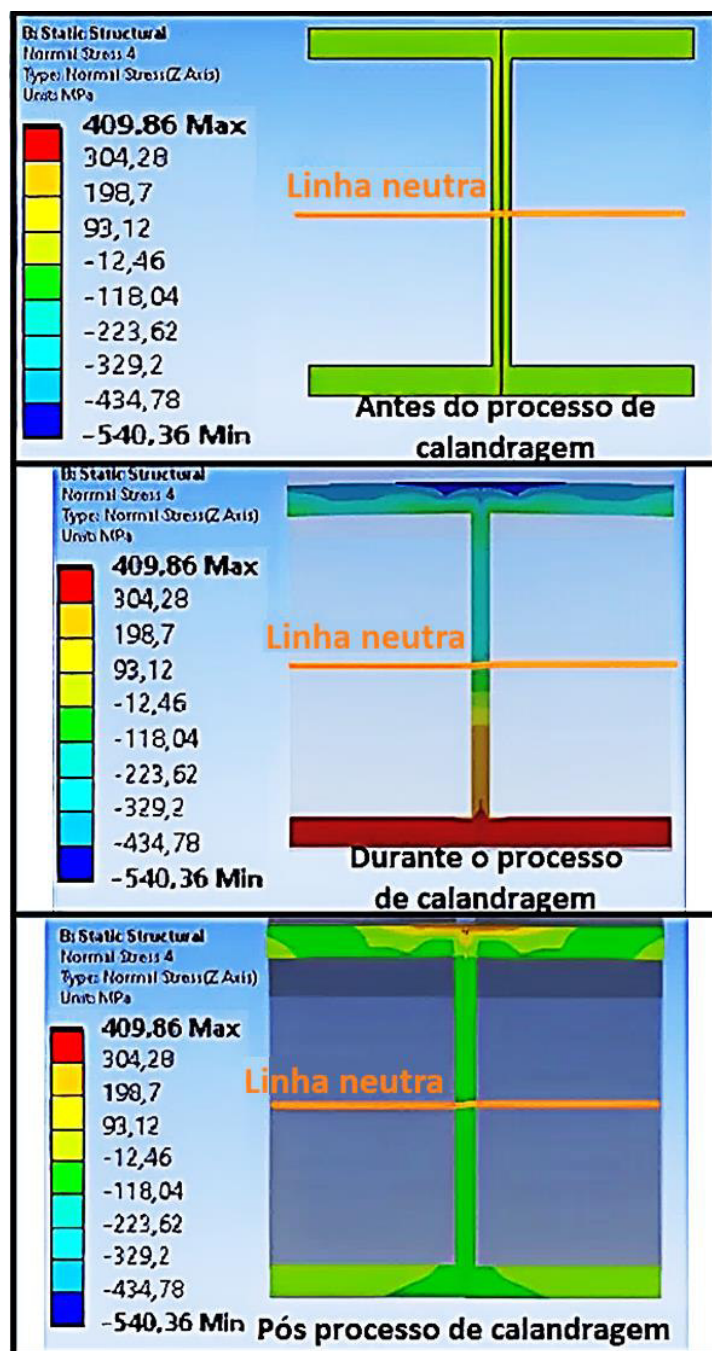


Figura 4-8 Tensões normais ao longo do processo de calandragem.

Fonte: Próprio autor.

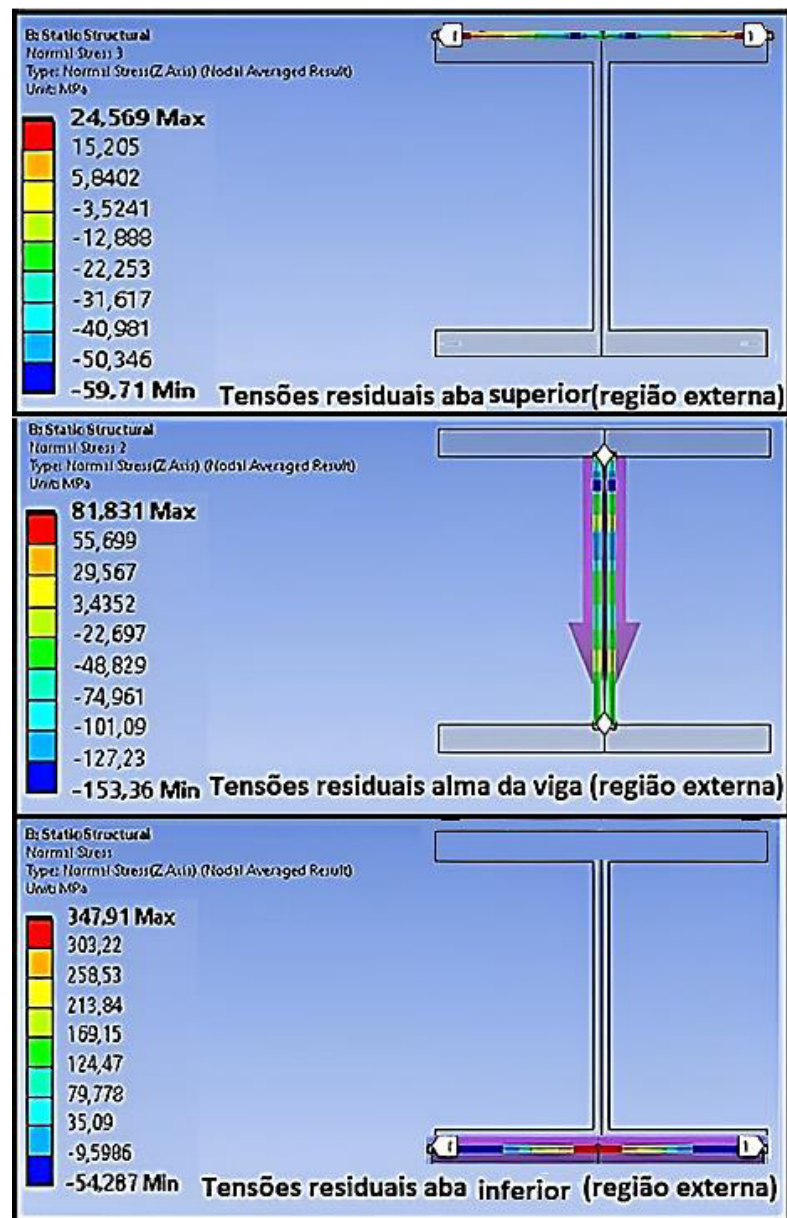


Figura 4-9 Tensões residuais.

Fonte: Próprio autor.

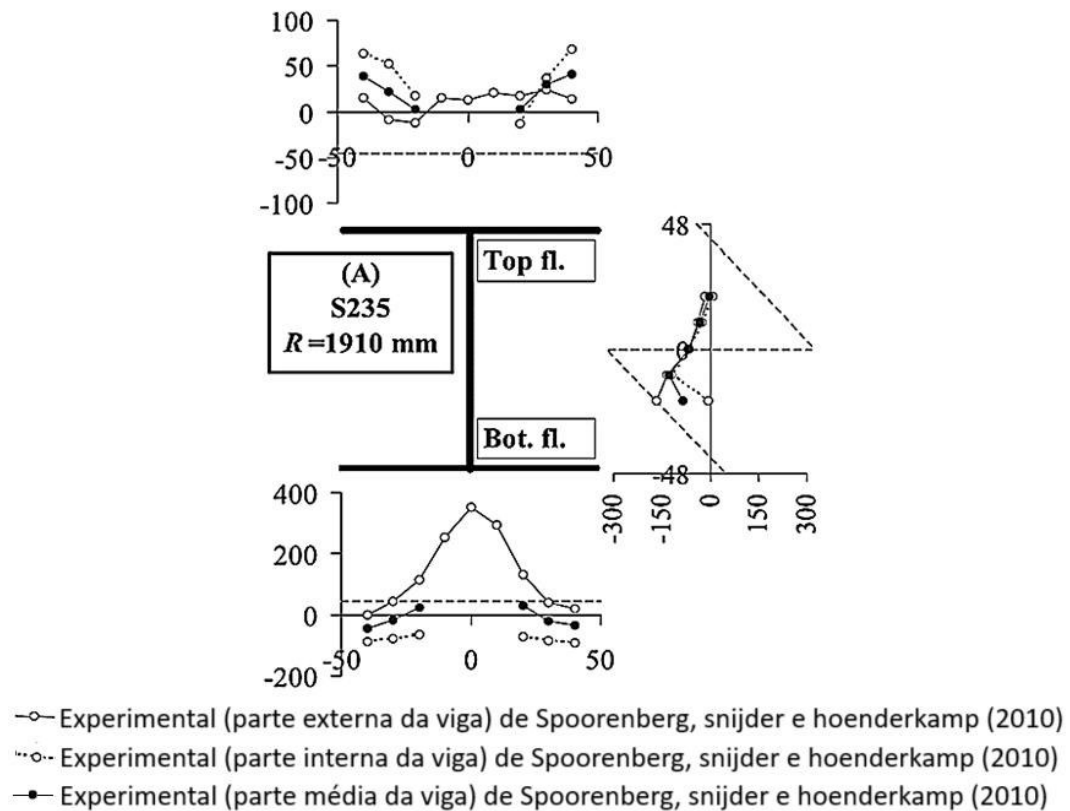


Figura 4-10 Resultados experimentais

Fonte: Spoorenberg, Snijder e Hoenderkamp (2010).

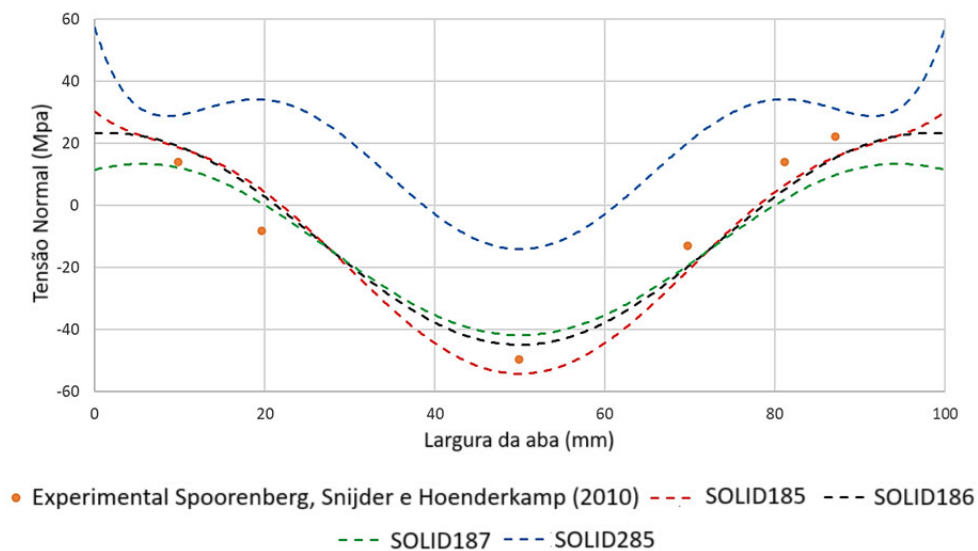


Figura 4-11 Comparação dos resultados numéricos e experimentais da aba superior do perfil I.

Fonte: Próprio autor.

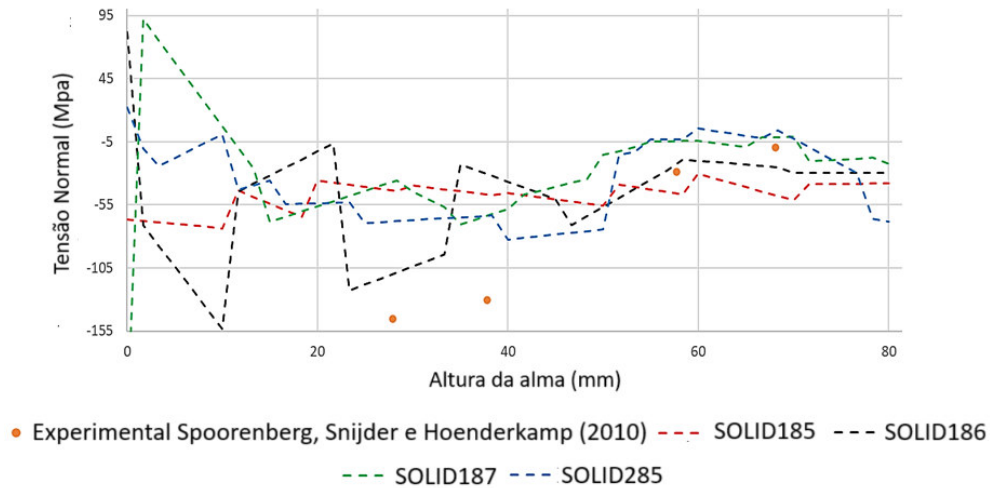


Figura 4-12 Comparação dos resultados numéricos e experimentais da alma do perfil I.

Fonte: Próprio autor.

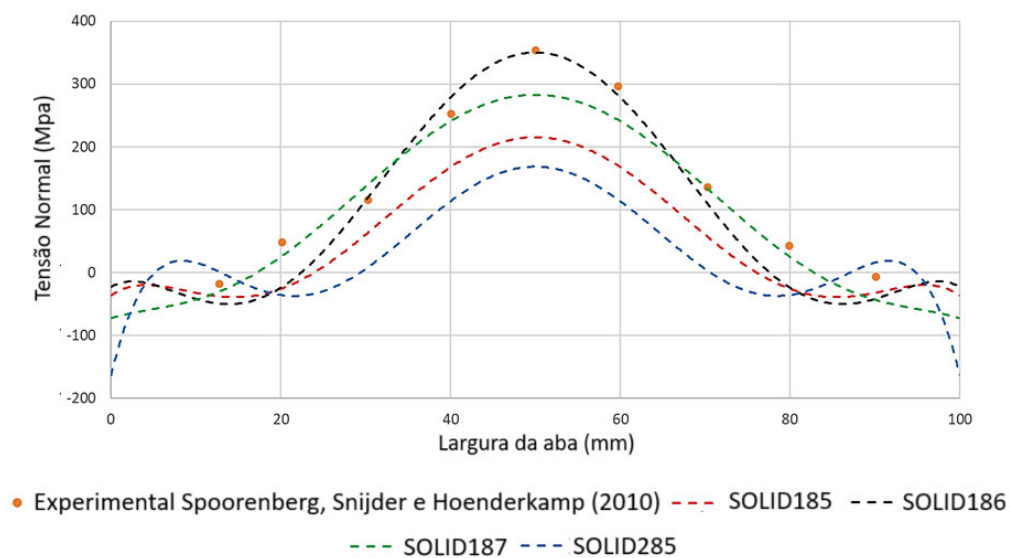


Figura 4-13 Comparação dos resultados numéricos e experimentais da aba inferior do perfil I.

Fonte: Próprio autor.

É importante ressaltar que a escala no eixo vertical (tensão normal) nas figuras 4.11, 4.12 e 4.13 não são iguais, esta variação foi adotada devido à dificuldade de análise dos resultados em uma mesma escala.

É relevante destacar que os perfis de tensões ao longo da viga, embora apresentem variações absolutas entre os diferentes elementos finitos testados, exibem comportamentos semelhantes aos dados experimentais. Isso sugere que o modelo computacional possui capacidade de capturar de forma adequada o comportamento mecânico do processo de calandragem. A região da alma do perfil I (figura 4.12) foi identificada como aquela

com menor acurácia nos resultados, apresentando discrepâncias mais significativas. No entanto, mesmo nessa região, os resultados numéricos ainda exibem moderada concordância em relação aos experimentais.

Destaca-se que o elemento finito SOLID285 apresentou os resultados com menor precisão em comparação aos demais elementos finitos. Por outro lado, o elemento finito SOLID186 revelou-se como a escolha mais acurada, com discrepância próxima a -1,61% entre aos resultados experimentais e numéricos. O elemento finito SOLID187 também demonstrou resultados precisos, embora com diferenças mais acentuadas na aba inferior do perfil I.

É possível observar, portanto, que o modelo computacional proposto, especialmente quando utilizando os elementos finitos SOLID186 e SOLID187, é capaz de representar de forma confiável o processo de calandragem de 3 rolos, possibilitando a previsão das tensões residuais ao longo do perfil. A boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais confere confiabilidade à ferramenta de simulação desenvolvida, fornecendo uma base sólida para futuros estudos de casos em perfis de seção transversal distintas. Em síntese, os resultados apresentados nas figuras 4.11 a 4.13 reforçam a robustez e a utilidade do modelo computacional desenvolvido para a simulação do processo de calandragem em perfis.

4.2 Estudo de caso

O modelo computacional desenvolvido e validado anteriormente apresentou uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais para o perfil I de aço S235. Esse sucesso na validação indica que o modelo possui uma representação adequada do processo de calandragem, considerando os efeitos físicos relevantes e a interação complexa entre os materiais e o processo de conformação.

Ao aplicar o mesmo modelo numérico e as mesmas condições de contorno aos perfis de alumínio, a base teórica já estabelecida através da validação permite uma abordagem mais robusta e confiável para o estudo de caso. Embora os perfis de alumínio possuam propriedades mecânicas distintas do aço S235, o modelo foi desenvolvido para considerar a variação material, podendo ser ajustado para incorporar as características específicas do alumínio em suas propriedades constitutivas.

Dessa forma, o modelo numérico pode ser adaptado para refletir as propriedades mecânicas do alumínio utilizado nos perfis de forma apropriada. Isso inclui ajustar parâmetros como o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, comportamento plástico e outras características relevantes do material.

Sendo assim, mesmo com a mudança dos perfis a serem calandrados e o material adotado seja distinto, a aplicação do modelo numérico previamente validado e a adoção das mesmas condições de contorno proporciona uma base sólida para a realização do estudo de caso, onde a simulação numérica do processo de calandragem aplicado a 4 diferentes perfis de alumínio foi desenvolvida. É importante ressaltar que os resultados

apresentados no estudo de casos são única e exclusivamente para os perfis com as dimensões apresentadas nas suas respectivas imagens, e não devem ser generalizados para casos semelhantes.

Um aspecto importante a se destacar é que o método de refino de malha utilizado para os 4 perfis do estudo de casos foi o mesmo utilizado na viga I e pode ser observada na figura 4.5, ou seja, manteve-se o número de elementos na espessura dos perfis ao passo que se ampliava os elementos na largura e no comprimento dos mesmos.

4.2.1 Perfil 1

O perfil 1 do estudo de caso consiste em um tubo de alumínio 6061 T6 de seção transversal quadrada. As dimensões deste perfil, bem como o perfil dos rolos utilizados no modelo numérica estão representados na figura 4.14. A metodologia utilizada para desenvolver o modelo numérico do perfil 1 consiste na mesma utilizada anteriormente para o perfil I

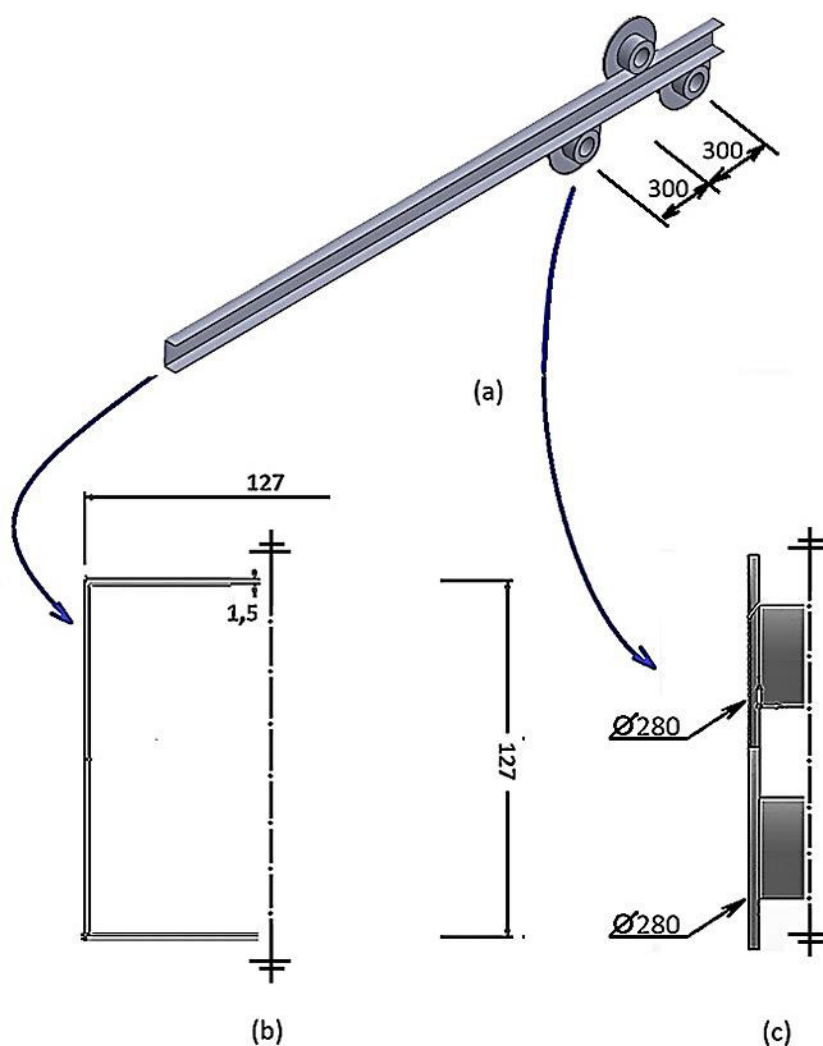


Figura 4-14 Perfil 1: (a) domínio computacional; (b) dimensões do perfil considerando a simetria; e (c) dimensões do laminador (em mm).

Fonte: Próprio autor.

4.2.1.1 Teste de convergência de malha para o perfil 1

Inicialmente foi feito o teste de convergência de malha, de forma a avaliar se os resultados estão independentes da discretização espacial utilizada. Durante o teste de convergência de malha realizado no perfil 1, foi observado que o elemento finito SOLID186 apresentou problemas de convergência devido à distorção da seção transversal do perfil durante o processo de calandragem e, conseqüentemente, uma distorção excessiva no elemento finito. Esse elemento mostrou-se inadequado para perfis com uma tendência significativa de distorção em sua seção transversal, especialmente em casos com raios de curvatura menores, que tendem a distorcer ainda mais a seção transversal do perfil e o elemento que o modela. Essa limitação do SOLID186 comprometeria a acurácia e a confiabilidade dos resultados obtidos. Por outro lado, o elemento finito SOLID187 demonstrou uma boa estabilidade, independentemente da distorção da seção transversal do perfil durante o processo de calandragem. Portanto, optou-se por utilizar o SOLID187 para modelar o perfil 1, levando em consideração essa vantagem e a necessidade de obter resultados mais precisos e confiáveis.

Além disso, após identificar essa limitação do SOLID186, foram realizados testes adicionais utilizando tanto o SOLID186 quanto o SOLID187 no perfil I (caso de validação do modelo), com o objetivo de avaliar a discrepância dos resultados de tensões durante o processo de conformação. Diferentemente da comparação anterior que se concentrou nas tensões residuais, esta análise visou analisar as tensões durante o processo.

Ambos os elementos finitos produziram resultados muito semelhantes, com uma diferença de aproximadamente 0,5% entre eles. Considerando que as tensões críticas ocorrem durante o processo de conformação, e que o objetivo principal é compará-las com os raios de curvatura promovidos, a utilização do elemento finito SOLID187 se mostra viável.

A tabela 4.2 e a figura 4.15 mostram o teste convergência de malha utilizando o elemento finito SOLID 187.

Tabela 4-2 Testes de convergência de malha para o perfil 1.

Elemento Finito	Tamanho do Elemento (mm)	Nº de Nós	Tensão Máx. de Tração (MPa)	Dif. Relativa (%)	Tempo de Proces.
SOLID187	13	51108	201,26	20,292	03 h 13 min
SOLID187	12	65413	160,42	-32,901	11 h 02 min
SOLID187	10	91333	213,20	-10,755	17 h 34 min
SOLID187	8	137394	236,13	2,4012	23 h 11 min
SOLID187	7	171940	230,46	-2,738	33 h 57 min
SOLID187	6	249746	236,77		47 h 42 min

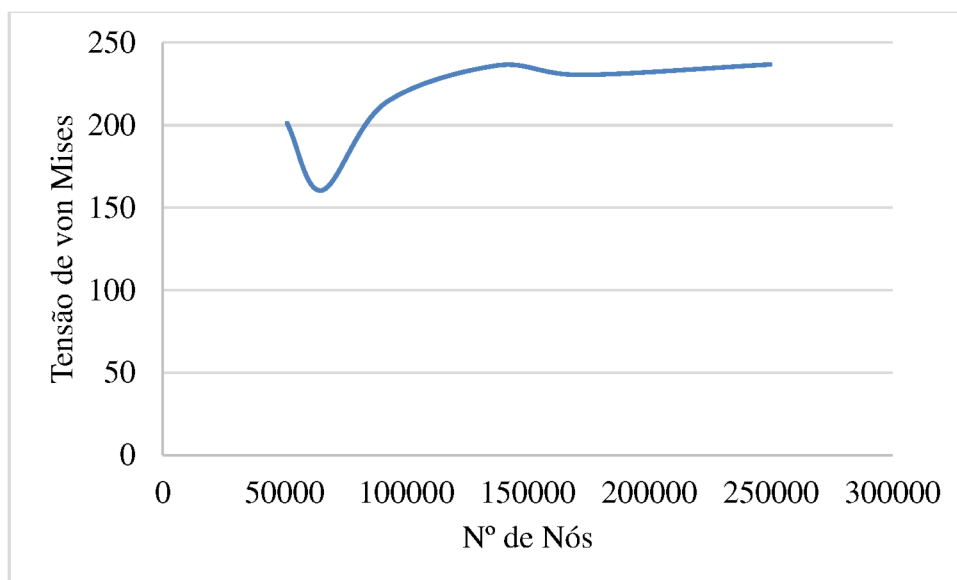


Figura 4-15 Gráfico de convergência de malha perfil 1

Através dos resultados do teste de convergência de malha apresentados na tabela 4.2 e na figura 4.11, foi selecionada a malha com 137394 nós para a modelagem computacional do perfil 1.

4.2.1.2 Resultados do perfil 1

Para uma compreensão plena dos resultados, é essencial esclarecer alguns aspectos importantes. Na tabela 4.3, a coluna referente à deslocamento está vinculada tanto ao gráfico quanto à equação de previsão de deslocamento aproximada, ambas exibidas na figura 4.17. Cada valor de deslocamento (D1 e D2) está associada a uma equação específica, descrevendo a evolução aproximada do deslocamento em uma região específica à medida que o raio de curvatura diminui. A variável r nas equações da figura 4.17 representa o raio de curvatura desejado no processo de calandragem. Ao inserir o valor de r , é possível obter o valor correspondente da variável D , indicando o deslocamento aproximado resultante nesse raio de curvatura.

É importante ressaltar que o termo "deslocamento aproximado" é utilizado devido à realização de uma regressão com base nos resultados obtidos nas simulações numéricas, utilizando valores predefinidos de raios e deslocamentos.

Outro ponto significativo na tabela 4.3 é a relação entre limite de resistência do material e máxima tensão de Von Mises ($\sigma_{\max}^{\text{VM}}$) desenvolvida durante o processo de calandragem para cada raio de curvatura, ela resulta em um fator de segurança, o limite de resistência utilizado para o material alumínio 6061 T6 foi 290.66 MPa. Conforme explicado por Hibbeler (2022), o limite de resistência representa a máxima tensão que um material pode suportar antes de ocorrer uma falha estrutural. Já a tensão de von Mises é um parâmetro utilizado para avaliar o estado de tensão em um material sujeito a cargas externas.

Portanto, é importante evitar operar um material em tensões de von Mises iguais ou muito próximas ao seu limite de resistência. Essas informações fornecem um contexto essencial para a compreensão dos resultados apresentados na figura 4.17 e na tabela 4.3 permitindo uma análise mais precisa dos deslocamentos e das tensões durante o processo de calandragem dos perfis de alumínio.

Referente aos deslocamentos admissíveis em seções transversais de perfis de alumínio, eles podem variar consideravelmente com base na aplicação, na natureza da estrutura e nas cargas envolvidas. O Eurocode (2020) oferece orientações gerais sobre o projeto de estruturas de alumínio, mas não fornece valores absolutos de deformações ou deslocamentos admissíveis, pois esses critérios tendem a depender da finalidade e do contexto da estrutura em questão.

Os limites de deslocamentos admissíveis podem variar de acordo com diversos fatores, incluindo:

- I. Tipo de estrutura: As exigências de deslocamentos podem variar significativamente entre estruturas como edifícios, pontes, equipamentos industriais, entre outras.
- II. Função estrutural: A função da estrutura e os níveis de carga que ela deve suportar afetarão os limites admissíveis de deslocamento. Estruturas críticas de segurança, por exemplo, podem ter critérios de deslocamento mais rígidos.
- III. Condições de serviço: Se a estrutura estiver sujeita a carregamentos permanentes ou variáveis, os deslocamentos admissíveis podem ser definidos de maneira diferente.
- IV. Conforto e estética: Algumas estruturas podem ter critérios específicos relacionados ao conforto humano e à aparência estética, o que pode influenciar os limites de deslocamento admissíveis.

Portanto, para determinar os valores específicos de deslocamentos admissíveis para perfis de alumínio, é necessário considerar as diretrizes do Eurocode 9 e também as normas nacionais ou regulamentos específicos do país onde a estrutura será utilizada.

A figura 4.16 e a tabela 4.3 mostram os resultados obtidos das tensões e deslocamentos referentes aos diferentes raios de curvaturas simulados no processo de calandragem do perfil 1, enquanto a figura 4.17 mostra os gráficos gerados a partir dos resultados dos deslocamentos do mesmo

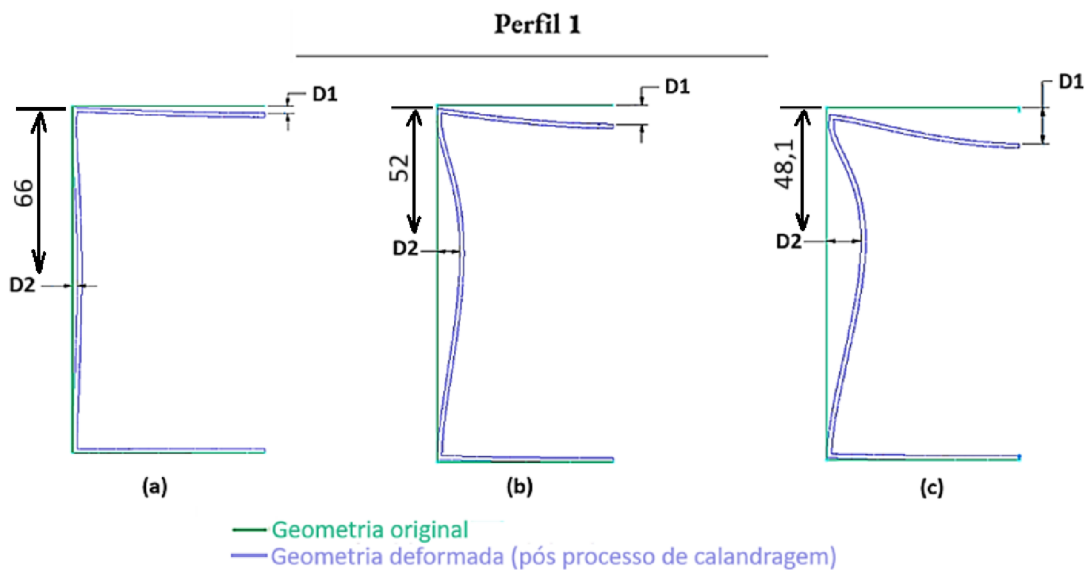


Figura 4-16 Deslocamentos perfil 1, (a) raio 38588,85mm; (b) raio 14275,17mm; (c) raio 10971,68 mm.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4-3 Resultados perfil 1.

r (mm)	Fator de segurança	$\sigma_{\max}^{VM}$ (MPa)	Deslocamento (mm)	
			D1	D2
38588,85	1,170	248,33	2,60	1,58
14275,17	1,072	271,14	6,71	8,14
10971,68	1,031	282,00	12,98	11,39

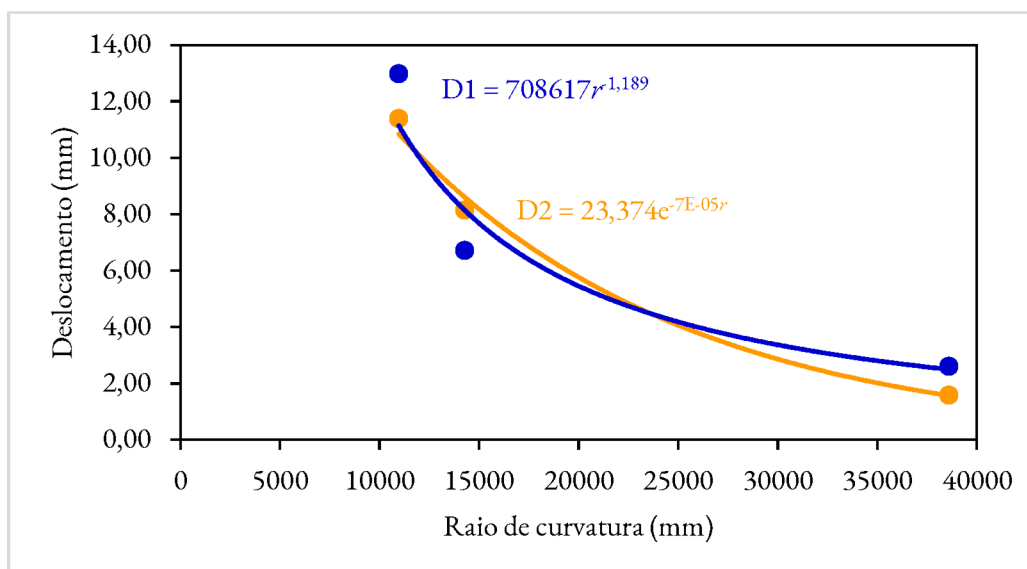


Figura 4-17 Gráficos de deslocamentos do perfil 1.

Fonte: Próprio autor.

Com base nos resultados obtidos para o perfil tubular quadrado (perfil 1) feito de alumínio 6061 T6, algumas observações relevantes podem ser feitas.

- I. Variação da tensão de von Mises com o raio de curvatura: Ao analisar os valores de raio de curvatura e máxima tensão de von Mises da tabela 4.3, observou-se uma relação inversamente proporcional entre essas duas variáveis. Conforme o raio de curvatura diminui, a tensão de von Mises tende a aumentar gradualmente. Essa relação é esperada, pois perfis com menor raio de curvatura experimentam maiores deformações durante o processo de calandragem, resultando em concentração de tensões.
- II. Aproximação do limite de resistência: Observou-se que à medida que o raio de curvatura diminui, a tensão de von Mises se aproxima progressivamente do limite de resistência do material. Isso indica que o perfil se aproxima do ponto de falha estrutural, e, portanto, é essencial considerar margens de segurança adequadas ao projetar ou utilizar perfis com menor raio de curvatura.
- III. Limite de aplicabilidade: Os resultados indicaram que o perfil com o maior raio de curvatura apresentou uma máxima tensão de von Mises de 248,33 MPa, representando aproximadamente 85,5% do limite de resistência do material, por outro lado, à medida que o raio de curvatura diminui, a tensão de von Mises se aproxima progressivamente do limite de resistência, atingindo seu valor máximo de 282,00 MPa, que representa aproximadamente 97% do limite de resistência do material. Essa informação é primordial para estabelecer limites práticos de aplicabilidade do perfil, assegurando que ele seja utilizado dentro de faixas seguras de tensão e resistência.
- IV. Observação dos deslocamentos em locais distintos ($D1$ e $D2$): Ao analisar os deslocamentos resultantes do processo de calandragem no perfil 1, é possível estabelecer uma relação entre esses deslocamentos e o defeito mecânico observado previamente na figura 2.10, neste contexto o defeito identificado foi a deformação na seção transversal. Isso sugere uma conexão direta entre as deformações induzidas pelo processo de calandragem e a manifestação dos defeitos mecânicos identificados na estrutura do perfil. A análise dos deslocamentos $D1$ e $D2$ do perfil 1 fornece um entendimento valioso sobre o comportamento do material durante o processo de calandragem. Ao observar os resultados das simulações, é evidente que os deslocamentos em $D1$ e $D2$ variam em relação aos diferentes raios de curvatura testados. Em raios de curvatura maiores, ambos os deslocamentos tendem a ser negligenciáveis, resultando em valores próximos de zero. Isso sugere uma menor concentração de tensões e deformações nessas áreas, indicando que o perfil está menos sujeito a distorções significativas. Por outro lado, em raios de curvatura menores, os deslocamentos $D1$ e $D2$ se tornam mais expressivos. Notavelmente, a relação entre $D1$ e $D2$ não segue um padrão, ou seja, em alguns casos, $D1$ é maior, enquanto em outros $D2$ apresenta valores superiores. Porém ao analisar a distribuição das tensões de von Mises (a 1,5 metros do

início do perfil), é possível observar que as regiões onde estão localizadas D1 e D2 coincidem com os locais de maiores tensões no perfil, juntamente com a região próxima a de maior inércia (base lateral do perfil), este fenômeno pode ser observado nas figuras 4.18 e 4.19. Essa variabilidade entre $D1$ e $D2$ ressalta a natureza complexa do processo de calandragem e suas influências na distribuição de tensões e deslocamentos.

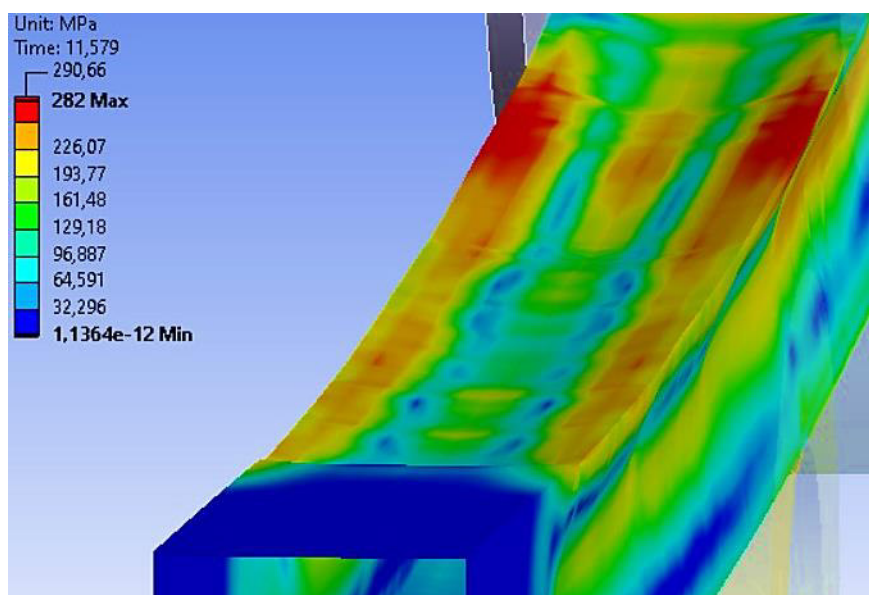


Figura 4-18 Tensões de von Mises região superior do perfil 1 com raio de curvatura de 10971,68.

Fonte: Próprio autor.

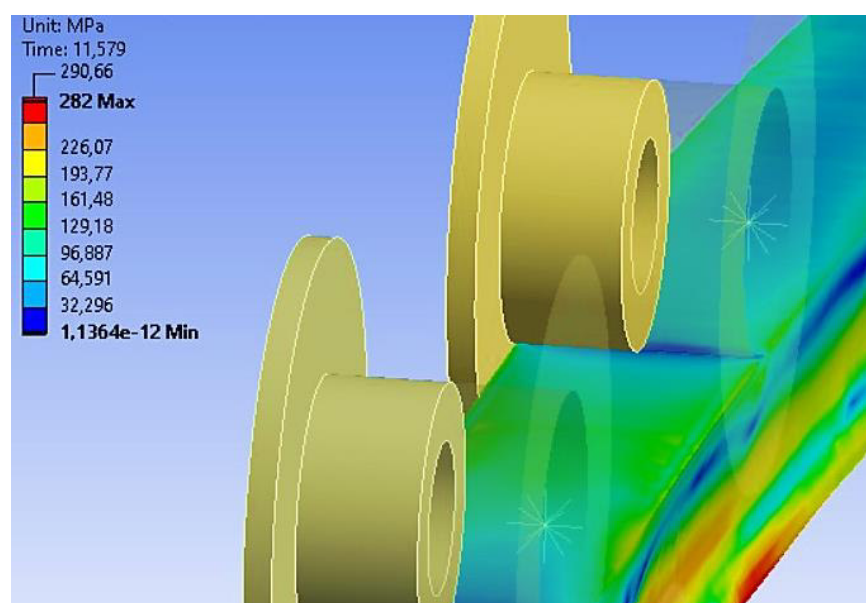


Figura 4-19 Tensões de von Mises região inferior do perfil 1 com raio de curvatura de 10971,68.

Fonte: Próprio autor.

É importante destacar que os itens I) e II) discutidos acima também são observados da mesma forma para os outros três perfis avaliados nesta dissertação. Por esse motivo, essas discussões específicas não serão reiteradas na análise dos demais perfis.

4.2.2 Perfil 2

O perfil 2 do estudo de caso consiste em um tubo de alumínio 6061 T6 de seção transversal circular, as dimensões deste perfil, bem como o perfil dos rolos utilizados no modelo numérica estão representados na figura 4.20. A metodologia utilizada para desenvolver o modelo numérico do perfil 2 consiste na mesma utilizada anteriormente na viga I.

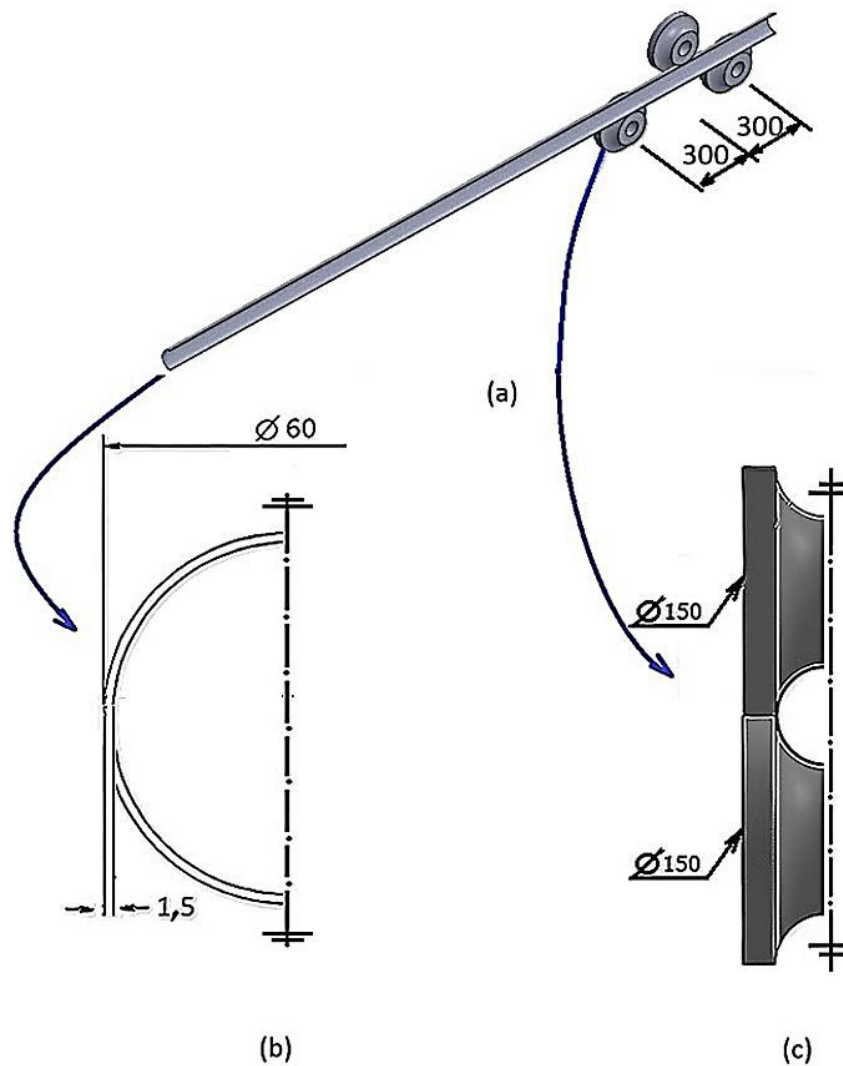


Figura 4-20 Perfil 2: (a) domínio computacional; (b) dimensões do perfil considerando a simetria; e (c) dimensões do laminador (em mm).

Fonte: Próprio autor.

4.2.2.1 Teste de convergência de malha para o perfil 2

A tabela 4.4 e a figura 4.21 mostram o teste convergência de malha utilizando o elemento finito SOLID187.

Tabela 4-4 Testes de convergência de malha perfil 2.

Elemento Finito	Tamanho do Elemento (mm)	Nº de Nós	Tensão Máx. de Tração (MPa)	Dif. Relativa (%)	Tempo de Proces.
SOLID187	16	8223	29,339	-9,2607	00 h 21 min
SOLID187	12	12350	32,056	-10,980	00 h 40 min
SOLID187	10	16485	35,576	-4,3540	00 h 56 min
SOLID187	8	27615	37,125	-2,6478	01 h 20 min
SOLID187	7	34625	38,108	1,7529	02 h 49 min
SOLID187	6	43259	37,44		03 h 58 min

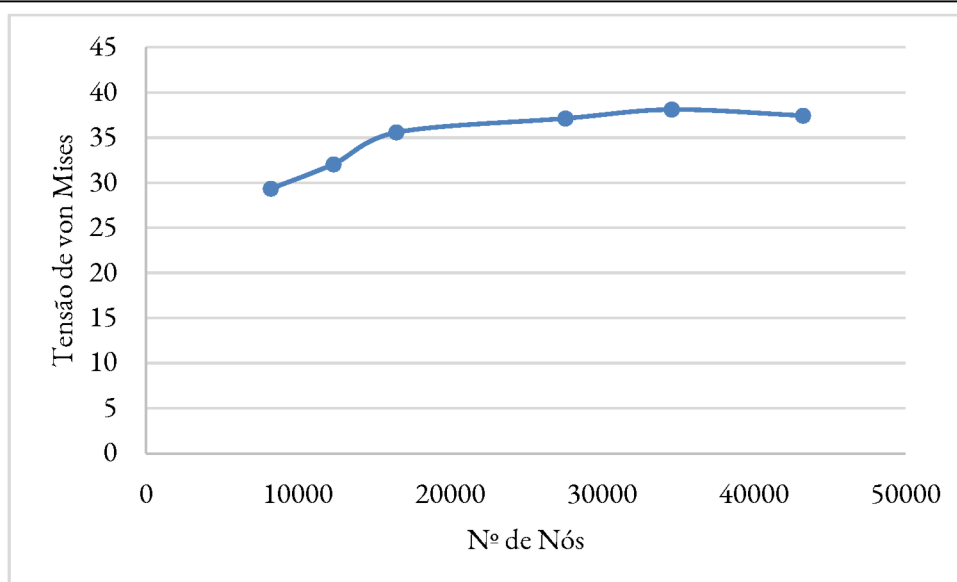


Figura 4-21 Gráfico de convergência de malha perfil 2

Através dos resultados do teste de convergência de malha apresentados na tabela 4.4 e na figura 4.21, foi selecionada a malha com 34625 nós para a modelagem computacional do perfil 2.

4.2.2.2 Resultados do perfil 2

Na figura 4.22 e na tabela 4.5, são exibidos os resultados provenientes das análises das tensões e deslocamentos que correspondem aos variados raios de curvatura utilizados durante a simulação do processo de calandragem aplicado ao perfil 2. Estes resultados refletem a influência da curvatura nas características mecânicas do perfil, apresentando uma visão detalhada das distribuições de tensão e dos deslocamentos ao longo da sua estrutura.

Na sequência, as figuras 4.23 e 4.24 proporcionam uma representação gráfica dos deslocamentos obtidos durante o processo de simulação do perfil 2. Ao focar especificamente nos deslocamentos, essas figuras oferecem uma perspectiva visual das deformações resultantes da aplicação da curvatura. Essa análise é fundamental para compreender como o perfil responde às forças envolvidas no processo de calandragem, destacando regiões de maior e menor deformação.

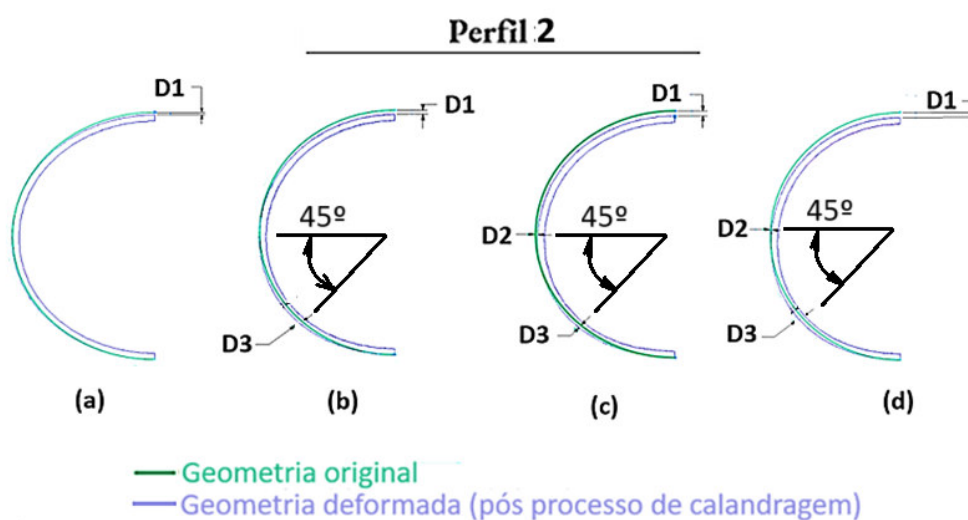


Figura 4-22 Deslocamentos perfil 2, (a) raio 3873,56 mm; (b) raio 1193,10 mm; (c) raio 447,89 mm; (d) raio 330,69 mm.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4-5 Resultados perfil 2.

r (mm)	Fator de segurança	$\sigma_{\max}^{vM}$ (MPa)	Deslocamento (mm)		
			D1	D2	D3
3873,56	1,135	256,020	0,62	-	-
1193,10	1,033	281,210	1,04	-	0,73
447,89	1,000	290,510	1,22	0,30	0,83
330,69	1,000	290,650	1,23	0,55	0,88

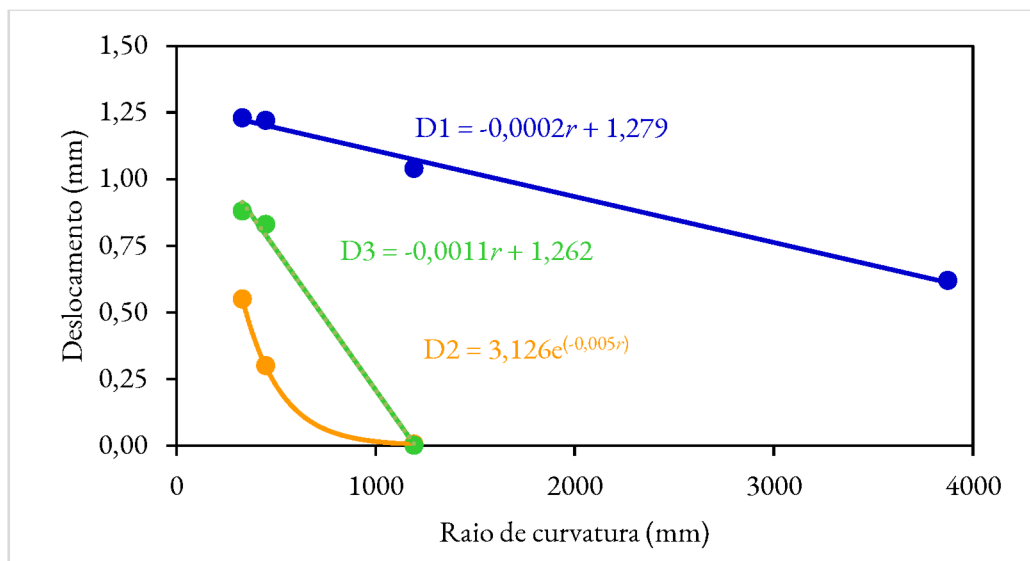


Figura 4-23 Gráficos de deslocamentos do perfil 2.

Fonte: Próprio autor.

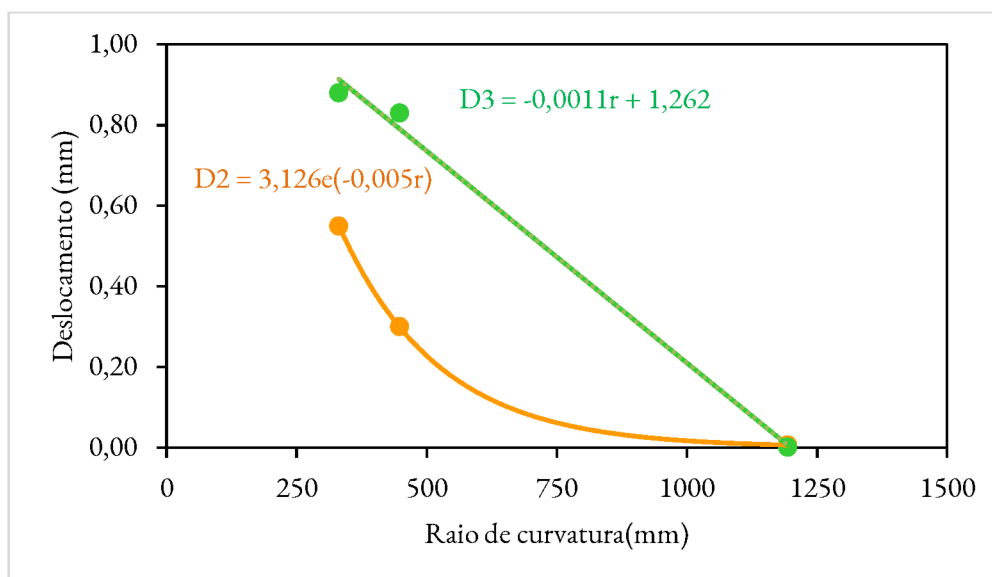


Figura 4-24 Gráfico detalhado de deslocamentos perfil 2.

Fonte: Próprio autor.

A análise dos resultados obtidos para o perfil de alumínio no estudo de caso dois revelou informações cruciais sobre o comportamento mecânico dos perfis submetidos ao processo de calandragem como:

- I. Limite de Aplicabilidade: Os resultados indicaram que perfis com menor raio de curvatura podem alcançar tensões de von Mises que se aproximam significativamente do limite de resistência do material. Esse fato ressalta a importância de definir limites práticos de aplicabilidade para garantir que os perfis sejam utilizados dentro de faixas de tensão e resistência seguras. Essa informação é necessária

para orientar a seleção de raios de curvatura em projetos que demandam alta resistência e integridade estrutural.

- II. Observação dos Deslocamentos em Locais Distintos ($D1$, $D2$ e $D3$): Ao examinarmos os deslocamentos gerados pelo processo de calandragem no perfil 2, é possível estabelecer uma correspondência entre esses deslocamentos e o defeito mecânico evidenciado anteriormente na figura 2.10, o defeito correspondente neste caso é a deformação na secção transversal. Uma descoberta especialmente intrigante nos resultados foi a variação nos deslocamentos nos diferentes pontos de observação ($D1$, $D2$ e $D3$). Isso aponta para uma diferenciação significativa nas tensões experimentadas por diferentes regiões do perfil, mesmo quando submetidas ao mesmo raio de curvatura.

Ao examinarmos os deslocamentos em $D1$, $D2$ e $D3$, notamos que eles são mais proeminentes em $D1$ quando comparados a $D2$ e $D3$. Porém ao analisar a distribuição das tensões de von Mises (a 1,5 metros do início do perfil) nas figuras 4.25 e 4.26, é possível notar que as regiões onde estão localizadas $D1$, $D2$ e $D3$ não seguem essa mesma relação, as tensões são distribuídas de forma semelhante parte superior e inferior do perfil. Essa disparidade nas tensões e deslocamentos demonstra a complexidade intrínseca do comportamento do material durante a calandragem, ressaltando a necessidade de análises mais localizadas e detalhadas.

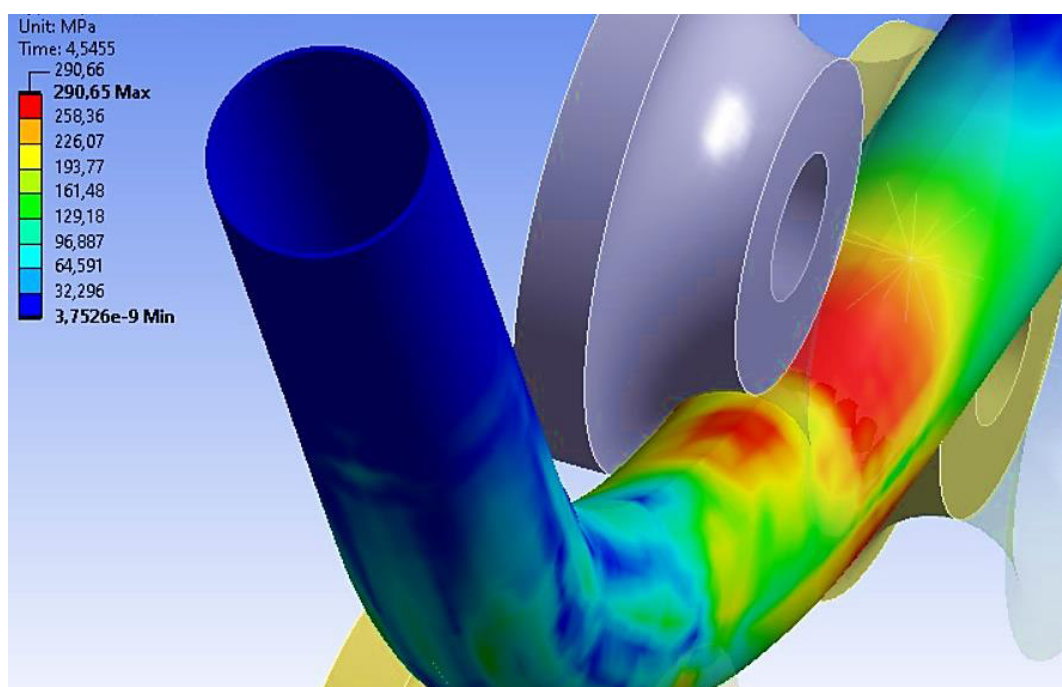


Figura 4-25 Tensões de von Mises região superior do perfil 2 com raio de curvatura de 330,69 mm.

Fonte: Próprio autor.

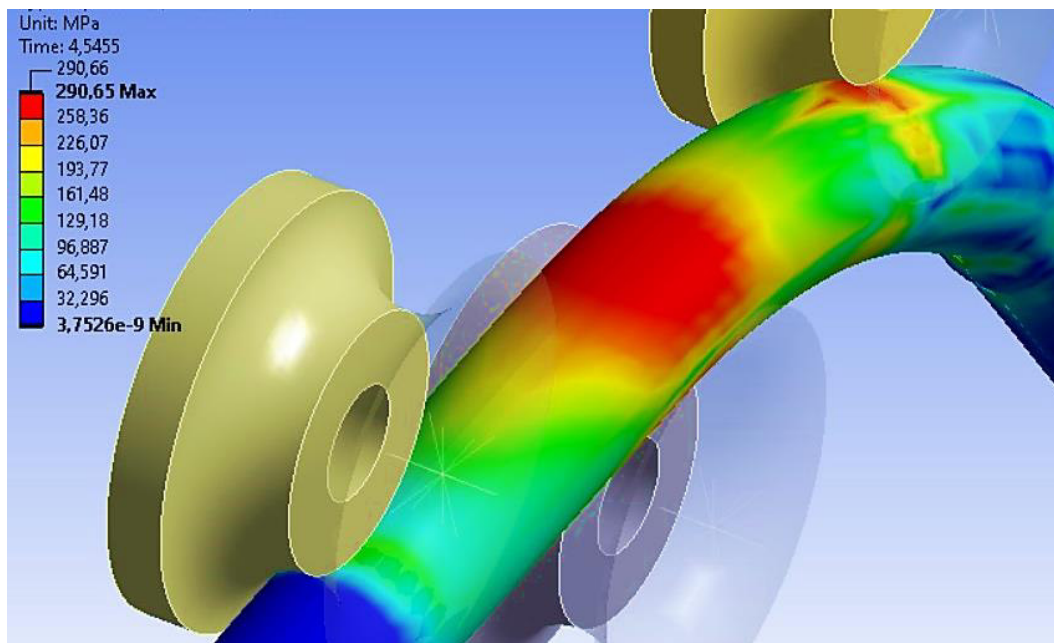


Figura 4-26 Tensões de von Mises região inferior do perfil 2 com raio de curvatura de 330,69 mm.

Fonte: Próprio autor.

4.2.3 Perfil 3

O perfil 3 do estudo de caso consiste em um perfil de alumínio 6061 T6, as dimensões deste perfil, bem como o perfil dos rolos utilizados no modelo numérica estão representados na figura 4.27. A metodologia utilizada para desenvolver o modelo numérico do perfil 3 consiste na mesma utilizada anteriormente na viga I

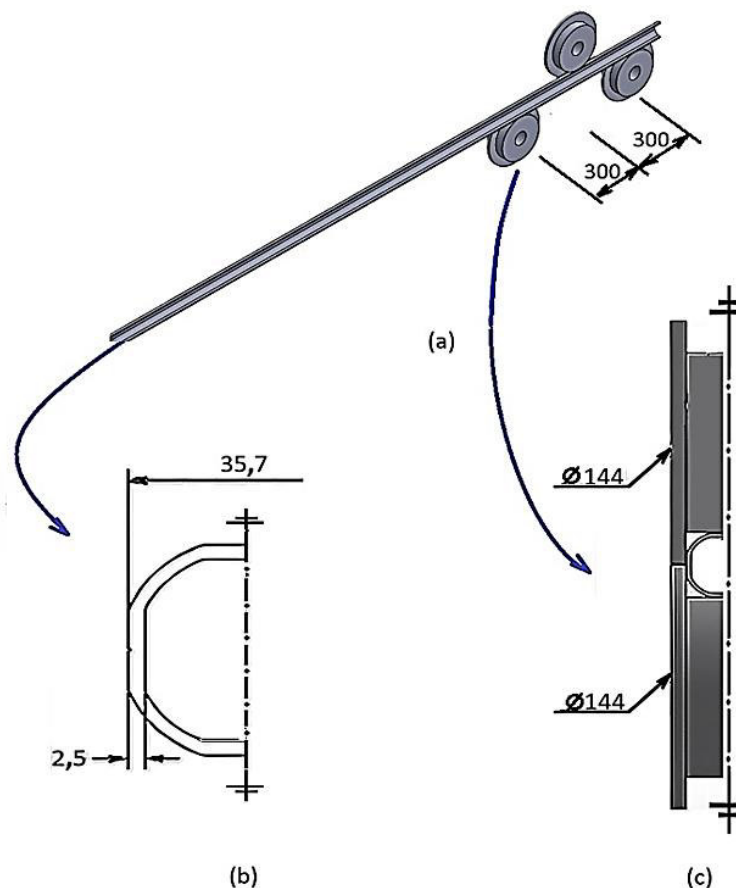


Figura 4-27 Perfil 3: (a) domínio computacional; (b) dimensões do perfil considerando a simetria; e (c) dimensões do laminador (em mm).

Fonte: Próprio autor.

4.2.3.1 Teste de convergência de malha perfil 3

A tabela 4.6 e a figura 4.28 mostram o teste convergência de malha utilizando o elemento finito SOLID187.

Tabela 4-6 Testes de convergência de malha perfil 3.

Elemento Finito	Tamanho do Elemento (mm)	Nº de Nós	Tensão Máx. de Tração (MPa)	Dif. Relativa (%)	Tempo de Proces.
SOLID187	11	14114	69,554	-37,324	00 h 31 min
SOLID187	10	15298	95,515	-20,527	00 h 42 min
SOLID187	9	16851	115,122	-4,7063	01 h 21 min
SOLID187	8	25278	120,54	-2,3311	02 h 13 min
SOLID187	6	36610	123,35	1,4916	03 h 09 min
SOLID187	5	47421	121,51		04 h 33 min

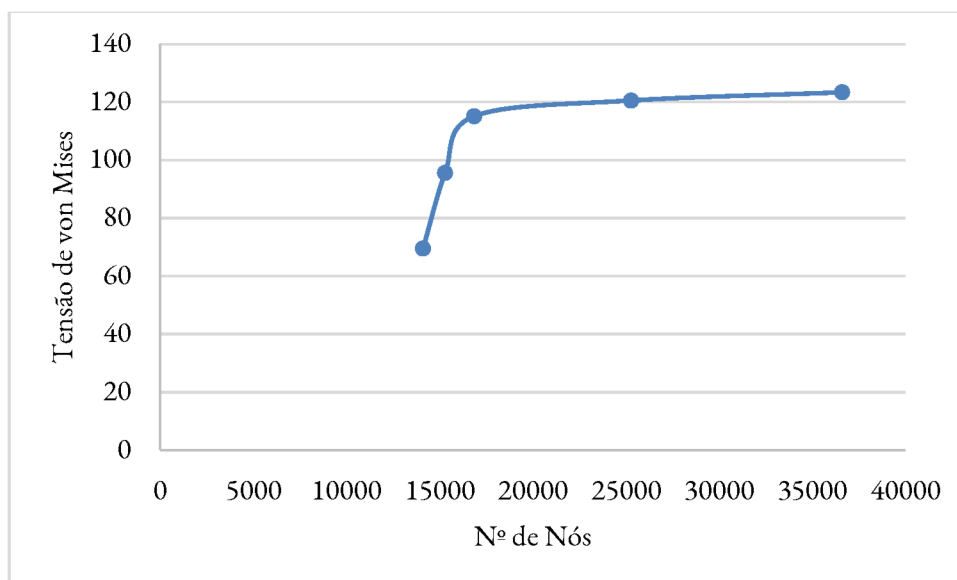


Figura 4-28 Gráfico de convergência de malha perfil 3

Através dos resultados do teste de convergência de malha apresentados na tabela 4.6 e na figura 4.28, foi selecionada a malha com 36610 nós para a modelagem computacional do perfil 3.

4.2.3.2 Resultados do perfil 3

No âmbito da figura 4.29 e da tabela 4.7, são apresentados os resultados das tensões e deslocamentos correlacionados com uma série diversificada de raios de curvatura, empregados no decorrer da simulação que incide sobre o processo de calandragem no perfil 3.

Prosseguindo, as figuras 4.30 e 4.31 proporcionam uma representação gráfica cujo enfoque central recai sobre os deslocamentos originados durante o processo simulado para o perfil 3. Ao voltar-se especialmente para os deslocamentos, estes gráficos outorga uma perspectiva visual que se desenha a partir das deformações resultantes da aplicação deliberada da curvatura. Esta análise ganha status de importância singular ao revelar a resposta do perfil perante as forças inerentes ao processo de calandragem, lançando um holofote sobre regiões de maior e menor deformação.

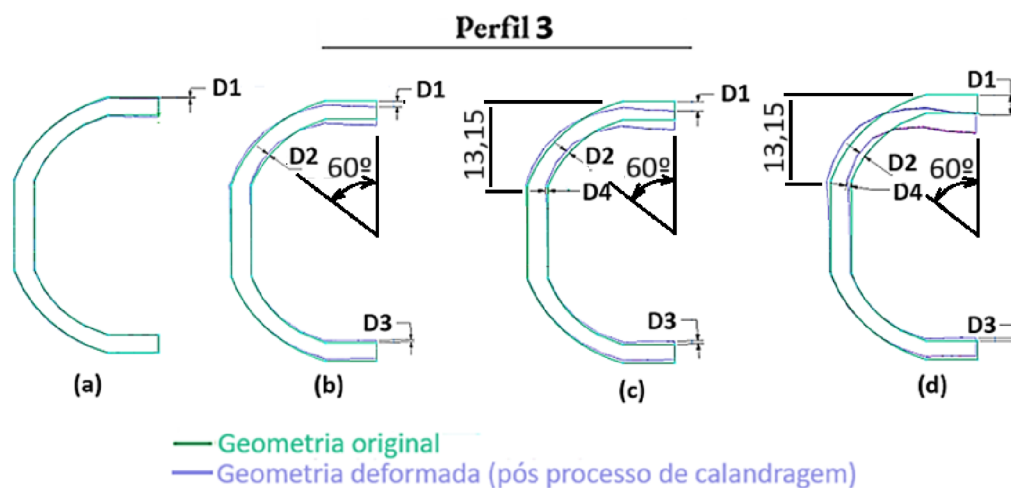


Figura 4-29 Deslocamentos perfil 3, (a) raio 3476,70 mm; (b) raio 1026,20 mm; (c) raio 553,80 mm; (d) raio 381,90 mm.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4-7 Resultados perfil 3.

r (mm)	Fator de segurança	$\sigma_{\max}^{VM}$ (MPa)	Deslocamento (mm)			
			D1	D2	D3	D4
3476,70	1,116	260,400	0,17	-	-	-
1026,20	1,063	273,490	0,80	0,28	0,31	-
553,80	1,014	286,640	1,28	0,42	0,40	0,32
381,90	1,000	290,650	2,59	0,73	0,40	0,51

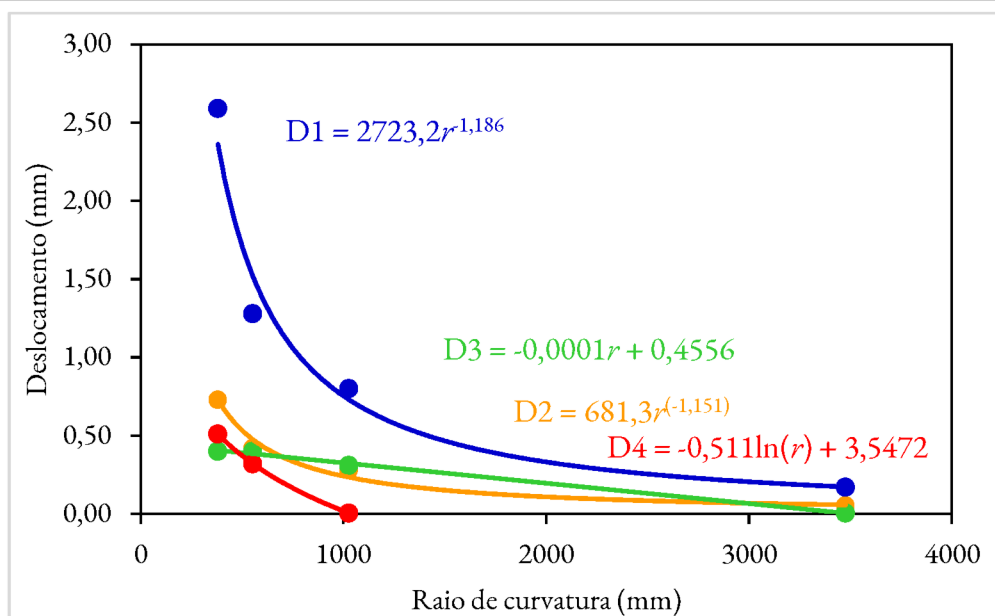


Figura 4-30 Gráficos de deslocamentos do perfil 3.

Fonte: Próprio autor.

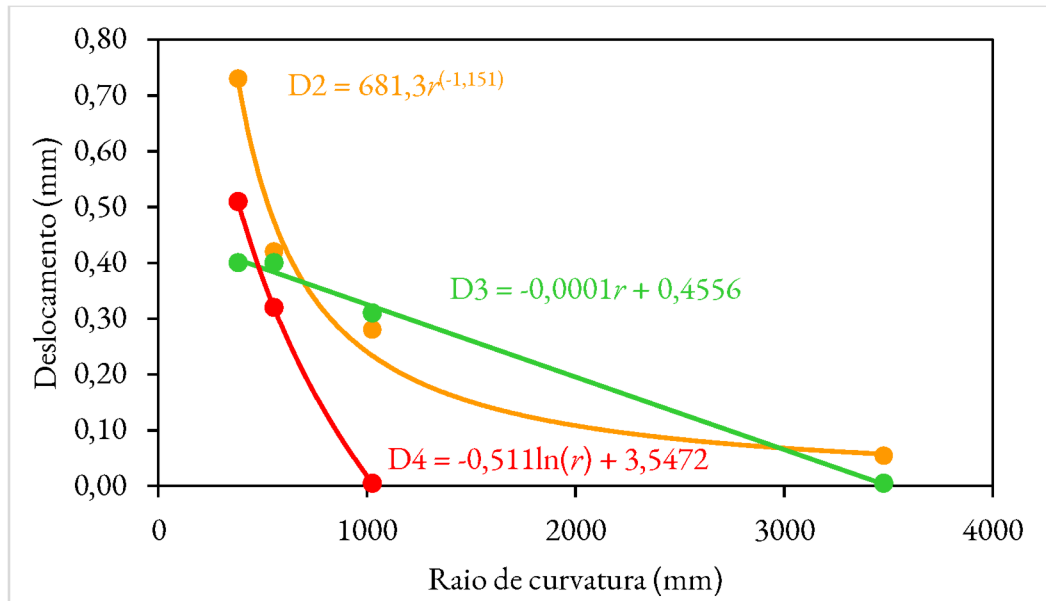


Figura 4-31 Gráficos detalhado de deslocamentos perfil 3.

Fonte: Próprio autor.

Por meio dos resultados obtidos do perfil 3 é possível destacar alguns pontos importantes em relação à magnitude das tensões e deslocamentos em comparação com a variação do raio de curvatura.

- I. Limite de aplicabilidade: Os resultados sugerem que o perfil com o maior raio de curvatura apresentou uma máxima tensão de von Mises de 260,40 MPa, representando aproximadamente 89,6% do limite de resistência do material. À medida que o raio de curvatura diminui, a tensão de von Mises se aproxima progressivamente do limite de resistência, atingindo seu valor máximo de 290,65 MPa, praticamente coincidindo com o limite de resistência do material. Esses valores são vitais para estabelecer os limites de aplicabilidade do perfil, garantindo que ele seja usado dentro de faixas de tensão seguras.
- II. Observação dos Deslocamentos em Locais Distintos ($D1$, $D2$, $D3$, $D4$): Quando examinamos os deslocamentos gerados durante o processo de calandragem no perfil 3, é possível estabelecer uma conexão com o defeito mecânico evidenciado na figura 2.10, o defeito mecânico neste caso é a deformação na seção transversal. Ao analisar os deslocamentos em diferentes pontos do perfil, notamos um padrão interessante. Nos locais $D1$, $D2$, $D3$ e $D4$, observamos diferentes níveis de deslocamento, especialmente à medida que o raio de curvatura diminui. Isso indica que as deformações são mais acentuadas nas regiões próximas às curvaturas mais acentuadas do perfil.

Ao investigar os deslocamentos em $D1$, $D2$, $D3$ e $D4$, é perceptível que os deslocamentos ganham maior destaque na região de $D1$ (a porção superior do perfil) em comparação com $D2$, $D3$ e $D4$. Porém ao analisar a distribuição das tensões

de von Mises (a 1,5 metros do início do perfil) nas figuras 4.32 e 4.33, é possível notar que as regiões onde estão localizadas D1, D2, D3 e D4 coincidem com as regiões de maiores tensões, entretanto não seguem a mesma proporção dos deslocamentos, as tensões são distribuídas de forma semelhante nestas regiões do perfil. Esta discrepância nos deslocamentos ilustra a complexidade intrínseca do comportamento do material durante o processo de calandragem, enfatizando a importância de análises focadas e minuciosas.

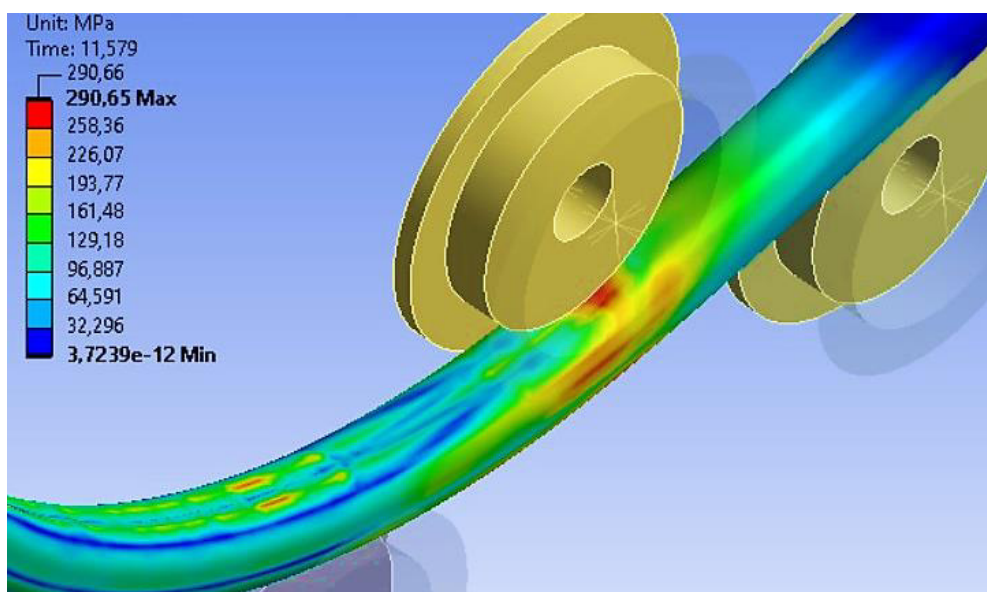


Figura 4-32 Tensões de von Mises região superior do perfil 3 com raio de curvatura de 381,90 mm.

Fonte: Próprio autor.

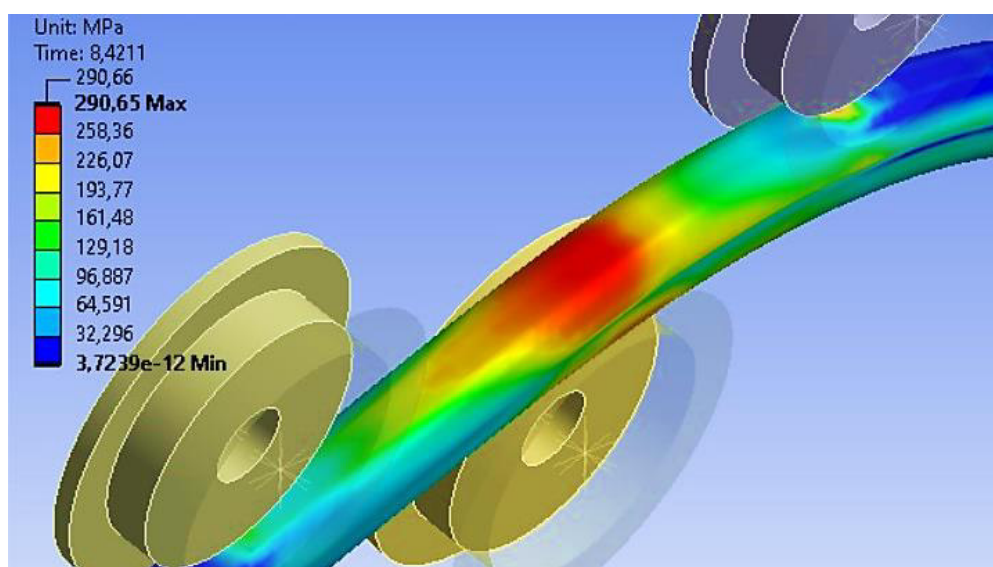


Figura 4-33 Tensões de von Mises região inferior do perfil 3 com raio de curvatura de 381,90 mm.

Fonte: Próprio autor.

4.2.4 Perfil 4

O perfil 4 do estudo de caso consiste em um perfil de seção transversal complexa de alumínio 6061 T6, as dimensões deste perfil, bem como o perfil dos rolos utilizados no modelo numérica estão representados na figura 4.34. A metodologia utilizada para desenvolver o modelo numérico do perfil 4 consiste na mesma utilizada anteriormente na viga I

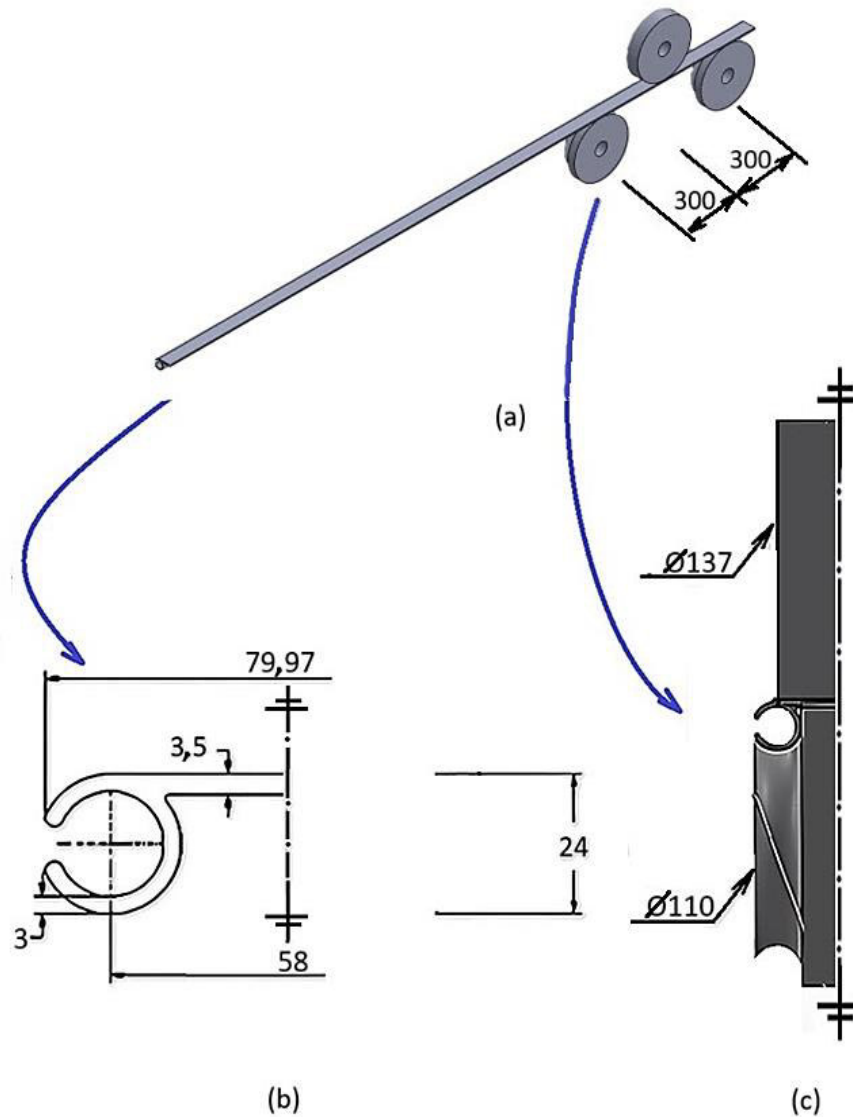


Figura 4-34 Perfil 4: (a) domínio computacional; (b) dimensões do perfil considerando a simetria; e (c) dimensões do laminador (em mm).

Fonte: Próprio autor.

4.2.4.1 Teste de convergência de malha para o perfil 4

A tabela 4.8 e a figura 4.35 mostram o teste convergência de malha utilizando o elemento finito SOLID187.

Tabela 4-8 Testes de convergência de malha perfil 4.

Elemento Finito	Tamanho do Elemento (mm)	Nº de Nós	Tensão Máx. de Tração (MPa)	Dif. Relativa (%)	Tempo de Proces.
SOLID187	18	12088	9,8008	-92,974	03 h 07 min
SOLID187	13	15813	18,913	-12,435	04 h 33 min
SOLID187	10	21639	21,265	-13,722	05 h 04 min
SOLID187	8	34180	24,183	-7,2530	06 h 17 min
SOLID187	7	40736	25,937	2,4945	09 h 29 min
SOLID187	6	51887	25,29	-5,9944	12 h 01 min
SOLID187	4	141581	26,806	-2,3651	16 h 15 min
SOLID187	3	307622	27,44		25 h 55 min

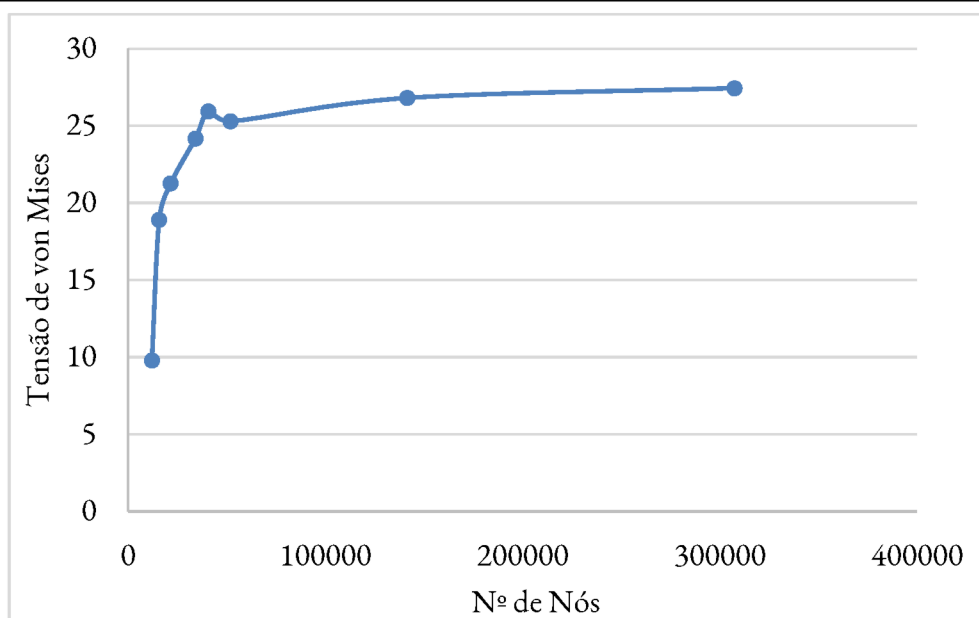


Figura 4-35 Gráfico de convergência de malha perfil 4

Através dos resultados do teste de convergência de malha apresentados na tabela 4.8 e na figura 4.35, foi selecionada a malha com 141581 nós para a modelagem computacional do perfil 4.

4.2.4.2 Resultados do perfil 4

Na figura 4.36 e na tabela 4.9, são apresentados os desfechos das análises realizadas sobre as tensões e deslocamentos em relação a diversos raios de curvatura empregados na simulação do processo de calandragem aplicado ao perfil 4. Esses resultados oferecem um olhar aprofundado sobre a relação entre a curvatura e as características mecânicas do perfil, proporcionando uma visão detalhada das distribuições de tensão e dos deslocamentos ao longo da estrutura.

A figura 4.37, por sua vez, apresenta uma representação gráfica focada no deslocamento obtido durante a simulação do perfil 4. Ao concentrar-se especificamente no deslocamento, essa figura oferece uma perspectiva visual do deslocamento resultante da aplicação da curvatura. Essa análise é de extrema importância para compreender como o perfil responde às forças envolvidas no processo de calandragem, destacando as regiões com maiores e menores deformações.

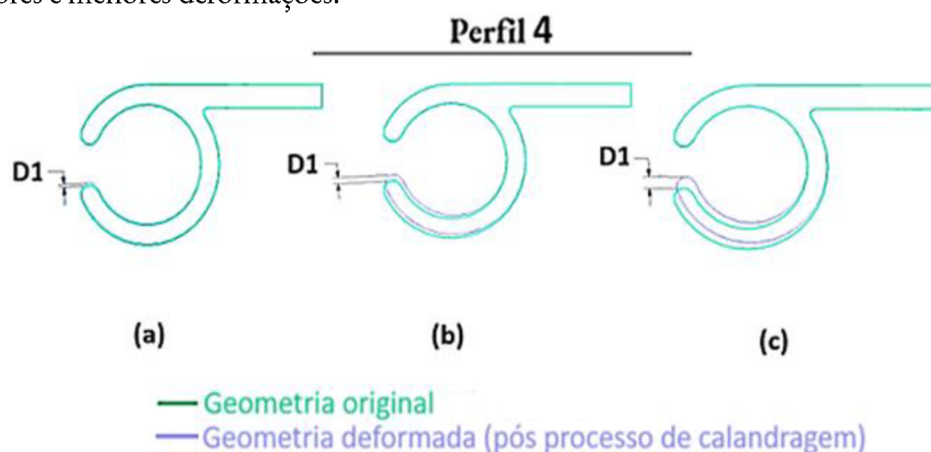


Figura 4-36 Deslocamentos perfil 4, (a) raio 3919,83 mm; (b) raio 1301,19 mm; (c) raio 659,58 mm; (d) raio 413,95 mm.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4-9 Resultados perfil 4.

r (mm)	Fator de segurança	$\sigma_{\max}^{vM}$ (MPa)	Deslocamento (mm)
			D1
1301,19	1,097	264,820	0,40
659,58	1,025	283,540	0,95
413,95	1,000	290,630	1,72

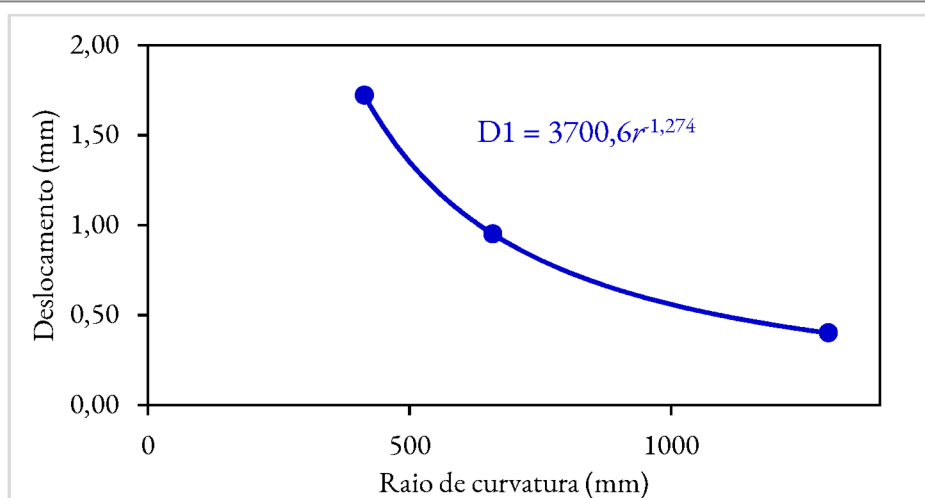


Figura 4-37 Gráficos de deslocamentos do perfil 4.

Fonte: Próprio autor.

Explorando os resultados do perfil 4, emergem aspectos cruciais relacionados à intensidade das tensões e deslocamentos em relação à variação do raio de curvatura. Estes resultados fornecem uma visão detalhada das respostas estruturais desse perfil sob diferentes condições de conformação como:

- I. Limite de aplicabilidade: Os resultados para o perfil 4 demonstram que o raio de curvatura mais amplo resulta em uma máxima tensão de von Mises de 264,82 MPa, representando aproximadamente 91,1% do limite de resistência do material. Em contraste, quando o raio de curvatura é significativamente menor, a tensão de von Mises atinge 290,63 MPa, quase atingindo o limite de resistência do material. Essa informação é vital para determinar a faixa segura de aplicabilidade do perfil em condições de carga específicas.
- II. Observação do Deslocamento (*D1*): Em relação ao deslocamento que foi originado no processo de calandragem no perfil 4, podemos correlacioná-lo com o defeito mecânico apresentado anteriormente na figura 2.10, deformação da seção transversal. Nos resultados obtidos para o perfil 4, é crucial destacar que o deslocamento na região *D1*, apresentou uma considerável singularidade. É notável que, ao contrário dos outros perfis onde múltiplos pontos demonstraram deslocamentos significativos, o perfil 4 exibiu uma concentração de deslocamento somente em *D1*. Essa observação sugere uma distribuição peculiar das tensões e deslocamentos na região *D1* (a 1,5 metros do início do perfil) analisando as Figuras 4.38 e 4.39 é possível observar que há 2 regiões submetidas a tensões elevadas, região superior do perfil e a região em *D1*, porém nota-se que a área submetida a tensões elevadas em *D1* é consideravelmente maior do que a área superior submetida as mesmas, o que explica a disparidade nos resultados de deslocamentos. Em contraste, as outras regiões no perfil manifestaram tensões e deslocamentos consideravelmente inferiores em comparação com *D1*. Esta dissimilaridade nos deslocamentos reitera a complexidade intrínseca do comportamento do material ao ser submetido ao processo de calandragem.

A marcante particularidade do deslocamento somente em *D1* no perfil 4 ressalta a necessidade de examinar cada configuração de perfil de forma detalhada e específica. Este resultado evidencia que variadas formas geométricas de perfil podem conduzir a diferentes padrões de deslocamentos, o que possui relevância significativa na otimização de projetos e na escolha de parâmetros para o processo de calandragem.

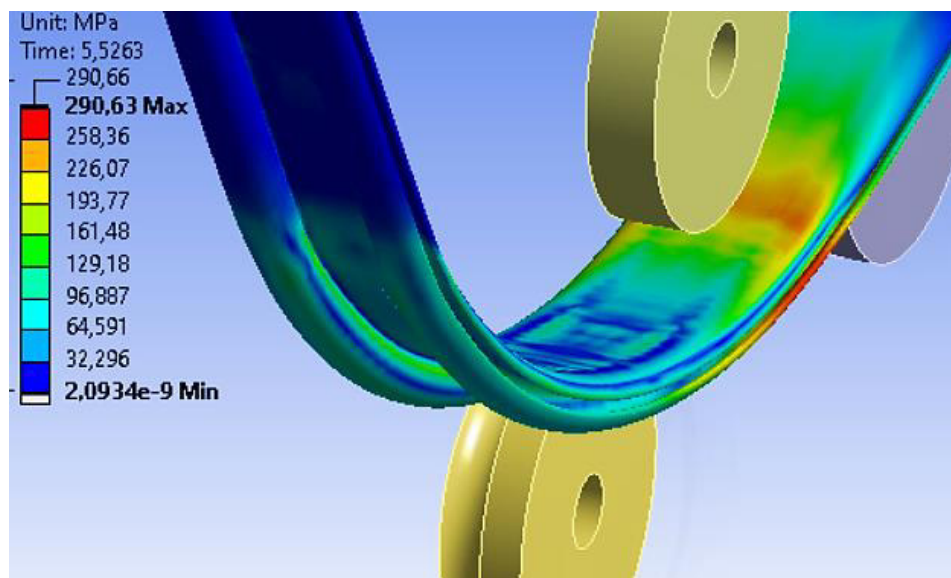


Figura 4-38 Tensões de von Mises região superior do perfil 4 com raio de curvatura de 413,95 mm.

Fonte: Próprio autor.

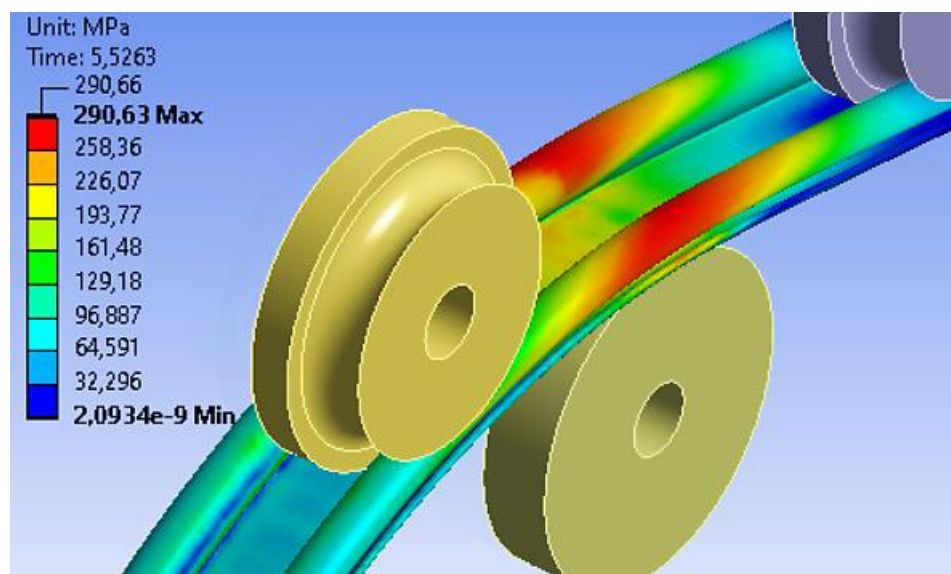


Figura 4-39 Tensões de von Mises região inferior do perfil 4 com raio de curvatura de 413,95 mm.

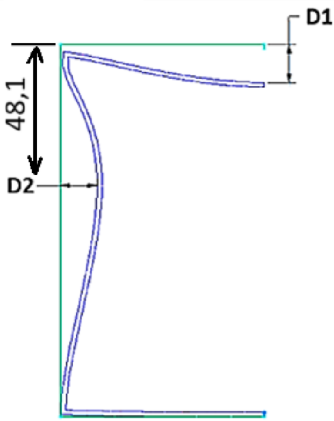
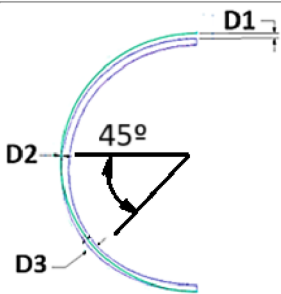
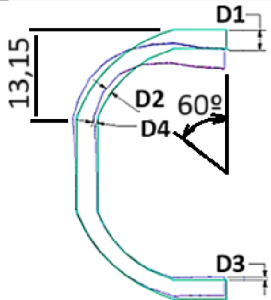
Fonte: Próprio autor.

4.3 Compilação de resultados

A compilação dos resultados obtidos a partir da análise dos quatro perfis de alumínio é apresentada na tabela 4.10. Esta tabela resume os principais dados e métricas relevantes extraídos das simulações numéricas realizadas para cada perfil. Por meio da análise desses resultados, é possível identificar padrões consistentes e tendências observadas nos

efeitos do processo de calandragem em diferentes perfis de seção transversal. É possível notar que a relação R^2 foi inserida nesta compilação de resultados, ela é uma medida estatística que indica a proporção da variabilidade dos dados. Em outras palavras, o R^2 fornece uma medida da adequação do ajuste do modelo aos dados observados. Quanto mais próximo o valor de R^2 estiver de 1, melhor o modelo se ajusta aos dados.

Tabela 4-10 Compilação de resultados do estudo de casos

Perfil	Eq. de previsão de deslocamentos	R^2	Fig. referência
	$D1 = 708617r^{1,189}$ $D2 = 23,374e^{-7E-05r}$	0,9154 0,9905	4.12
	$D1 = -0,0002r + 1,279$ $D2 = 3,126e^{(-0,005r)}$ $D3 = -0,0011r + 1,262$	0,9935 1,0000 0,9944	4.17 e 4.18
	$D1 = 2723,2r^{1,186}$ $D2 = 681,3r^{(-1,151)}$ $D3 = -0,0001r + 0,4556$ $D4 = -0,511\ln(r) + 3,5472$	0,9670 0,9803 0,9957 1,0000	4.23 e 4.24
	$D1 = 3700,6r^{1,274}$	1,0000	4.29

5 | Conclusões

A análise dos resultados obtidos a partir dos estudos dos perfis de alumínio, em conjunto com a investigação do perfil I, culmina em conclusões que promovem uma compreensão das complexidades do processo de calandragem e seus efeitos sobre o comportamento mecânico dos materiais. Ao unir os achados individuais dos casos de estudo, torna-se possível traçar um panorama das influências das variáveis do processo.

Inicialmente, a análise dos elementos finitos utilizados no modelo computacional revelou diferenças significativas em relação à convergência e precisão dos resultados. O SOLID186 se destacou como uma escolha robusta, proporcionando convergência sólida. Enquanto isso, o SOLID187 mostrou sua eficácia em perfis complexos ou propensos a distorções de malha. A capacidade de escolher entre esses elementos finitos depende das especificidades de cada perfil e da natureza dos resultados desejados, levando em consideração a estabilidade da malha e a complexidade da geometria.

Ao analisar os resultados individuais dos perfis de alumínio, observou-se que a medida que o raio diminui, as tensões tendem a aumentar, revelando uma associação direta entre curvatura e concentração de tensões. Os deslocamentos ($D1$, $D2$, Dn) também proporcionaram informações sobre a evolução dos deslocamentos ao longo dos perfis, a variação nos deslocamentos em diferentes pontos de observação evidencia diferenças significativas nas tensões geradas em diversas áreas dos perfis, mesmo sob o mesmo grau de curvatura. Ao examinar cada perfil de maneira isolada, é possível notar que a quantidade e a localização dos deslocamentos são características únicas de cada um. Os perfis 3 e 4 ilustram notáveis discrepâncias nesses aspectos. Enquanto o perfil 3 exibe quatro regiões distintas de deslocamentos ($D1$, $D2$, $D3$ e $D4$), o perfil 4 apresenta apenas uma ($D1$), sugerindo uma maior estabilidade dimensional no perfil 4. Esses resultados destacam a influência direta da curvatura nos deslocamentos, fornecendo informações cruciais para entender o comportamento dos perfis durante o processo de calandragem.

É crucial ressaltar que a variação nos deslocamentos dos perfis está associada à interação entre a geometria do perfil, o raio de curvatura e outros fatores mecânicos. Essa constatação enfatiza a importância de analisar cada perfil de forma específica, levando em consideração as particularidades de suas seções transversais e das condições de carga. Compreender as disparidades nos deslocamentos em diversas regiões do perfil torna-se fundamental para a otimização do projeto e para prevenir deslocamentos excessivos que possam comprometer a integridade estrutural.

A partir dessas informações, emerge uma compreensão das limitações do processo de calandragem com aço e alumínio. A relação entre curvatura, tensões e deformações fornece diretrizes importantes para o dimensionamento de perfis seguros e resistentes, evitando falhas estruturais. Essas conclusões não apenas contribuem para a otimização do processo de fabricação, mas também garantem a integridade dos perfis utilizados em aplicações de engenharia oceânica.

Portanto, em conjunto, os resultados dos estudos de caso e do perfil I oferecem uma visão das complexidades do processo de calandragem e suas implicações no comportamento mecânico dos perfis de alumínio. Isso proporciona um alicerce sólido para o avanço da pesquisa e a aplicação prática de perfis de alumínio em uma variedade de setores industriais.

O primeiro objetivo específico desta dissertação culminou no desenvolvimento de uma metodologia para analisar o processo intrincado de dobramento de perfis extrudados. A combinação de princípios teóricos, equações matemáticas e simulação numérica permitiu a criação de um conjunto analítico que permitiu solucionar o problema proposto. Essa metodologia oferece uma perspectiva única sobre o comportamento mecânico dos perfis durante o processo de calandragem. Através da implementação desta metodologia, emergiu uma ferramenta eficaz para a engenharia oceânica, permitindo a análise precisa e preditiva das tensões residuais e deslocamentos nos perfis, contribuindo para a otimização e segurança de estruturas marítimas.

O segundo objetivo específico desta pesquisa concentrou-se na validação do modelo numérico desenvolvido, utilizando uma comparação de resultados experimentais. A obtenção de uma convergência entre os dados simulados e experimentais reforçou a confiabilidade da metodologia proposta. Essa validação assegurou que o modelo numérico pode replicar com precisão o comportamento físico observado no processo de calandragem dos perfis de alumínio. Esse sucesso de validação não apenas demonstrou a eficácia da metodologia, mas também estabeleceu uma base sólida para a aplicação do modelo em cenários práticos, aumentando a confiança na sua capacidade de prever tensões e deslocamentos com precisão.

O terceiro objetivo específico visava investigar a influência da curvatura resultante do processo de calandragem na formação de defeitos em perfis de alumínio de diferentes geometrias. Ao conduzir simulações com uma ampla gama de raios de curvatura, foi possível estabelecer uma sólida relação entre essas variáveis e a ocorrência de defeitos. A análise detalhada dos resultados permitiu identificar padrões consistentes, fornecendo uma visão aprofundada das áreas mais propensas a falhas. Ao compreender como a curvatura afeta diretamente os defeitos formados, esse objetivo específico contribuiu para a compreensão substancial do processo de calandragem e fornecerá informações para o aprimoramento das práticas de fabricação e design de estruturas na engenharia oceânica.

A metodologia de simulação numérica desenvolvida proporcionou uma abordagem rigorosa para analisar o comportamento de perfis de alumínio durante o processo de calandragem. A validação sólida do modelo numérico com dados experimentais reforçou a confiança na precisão dessa metodologia. Além disso, a análise das relações entre

curvatura e defeitos ofereceu um entendimento dos fatores que influenciam a integridade estrutural desses perfis. No contexto mais amplo, essa pesquisa contribui para o aprimoramento das práticas de design e fabricação em engenharia oceânica, promovendo a segurança e eficiência de estruturas marítimas em ambientes desafiadores.

Além das contribuições já realizadas neste estudo, abrem-se perspectivas promissoras para futuras pesquisas na área de calandragem de perfis de alumínio. Recomenda-se aprofundar a investigação da metodologia desenvolvida, explorando sua aplicabilidade em cenários específicos da engenharia oceânica, como estruturas submarinas ou plataformas flutuantes. A consideração da influência de diferentes ligas de alumínio no processo de calandragem pode oferecer informações cruciais para a seleção de materiais mais adequados em ambientes marinhos desafiadores. Além disso, uma extensão do estudo para avaliar a resistência à oxidação dessas ligas após o processo de calandragem pode ser de grande relevância para garantir a durabilidade das estruturas. Também sugere-se a expansão da pesquisa para investigar os efeitos da variação de parâmetros operacionais, como velocidade de calandragem e temperatura, no comportamento mecânico dos perfis de alumínio. Essa análise mais aprofundada pode fornecer uma compreensão abrangente das condições ideais para o processo de calandragem, contribuindo para a otimização do desempenho e eficiência do método.

Referências

- Ansys Inc. (2022), ANSYS User's Manual: Analysis Systems.
- ANSYS. (2023). ANSYS Help System.
- Ashby, M.F.; Jones, D.R.H. (2019). Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications, and Design (5º ed.). Butterworth-Heinemann.
- Bathe, K. J. Finite Element Procedures. Prentice Hall. 1996.
- Bathe, K. J. (1996). Finite Element Procedures in Engineering Analysis. Prentice Hall.
- Braga, J.H.B. "Trefilação". Disponível em: <http://metal-e-forma.blogspot.com/p/conformacao-de-chapas.html>. Acessado em: 28 junho de 2022.
- Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2018). "Materials Science and Engineering: An Introduction." 10ª edição. John Wiley & Sons.
- Callister, W.D.; Rethwisch, D.G. (2020). Materials Science and Engineering: An Introduction (10º ed.). Wiley.
- Campbell, J.S. (1961), "Principles of manufacturing materials & processes. Tokyo: International student edition.
- Caveagna, L. H. (2021), "O impacto do alumínio na indústria naval". Revista alumínio. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/o-impacto-do-aluminio-na-industria-naval/>. Acessado em 16 julho de 2022.
- Chandrupatla, T. R.; Belegundu, A. D. (2022). Introduction to Finite Elements in Engineering (5ºed). Cambridge University Press.
- Cortiz. (2020), "Processo de laminação". São Paulo. Disponível em: <https://,kiu6serra-metal.com.br/processo-de-laminacao/>. Acessado em: 3 julho de 2022.
- Costa, M. B. S. (2010), "Tecnologia de Caldeiraria". Duque de Caxias: Escola Técnica Atenew. p.100. Duque de Caxias – RJ.
- Davis, J.R. (Ed.). (2009). ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys.
- Deutsches Institut für Normung. (2003). DIN 8580: Manufacturing Processes. Berlim, Alemanha: Beuth Verlag GmbH.

- Dieter, G.E. (1984), “Workability Testing Techniques”. Ohio: American Society for Metals.
- Donato; Gustavo, H. B. (2008), “Efeitos de Heterogeneidades Mecânicas sobre Forças Motrizes de Trinca em Juntas Soldadas: Determinação Experimental de Tenacidade e Extensão de Metodologias de Avaliação de Criticidade de Defeitos”. 284 f. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Dowling, N. E. (2012). *Mechanical Behavior of Materials* (4^o ed). Pearson.
- Drits, M.E., & Fridlyander, I.N. (2003). *Aluminum Alloys: Structure and Properties*.
- Eurocode 9 - Design of Aluminium Structures. (2020). European Committee for Standardization.
- Feng, Z.; Champlaud, H. (2011), “Modeling and Simulation of Asymmetrical Three-Roll Bending Process”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Elsevier, 19, pp 1913 – 1917.
- Gandhi, A. H.; Raval, H. K. (2006) “Analytical Modeling of Top Roller Position for Multiple Pass (3-Roller) Cylindrical Forming of Plates”, *Proceedings of IMECE, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Chicago, Illinois, USA, novembro. 5-10.
- González, P.C.S. (2000), “Técnica não Convencional para Dobramentos de Tubos de Parede Fina Usando Elastômero. Instituto Tecnológico de Aeronáutica”. Tese Pós-Graduação, p.150. São José dos Campos – SP.
- Hansen, N.E.; Jannerup, O. (1979), “Modelling of Elastic-Plastic Bending of Beams Using a Roller Bending Machine”, *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, Vol. 101, pp 304 – 310.
- Hatch, J.E. (1984). *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*.
- Hibbeler, R. C. (2022). *Mechanics of Materials* (11^o ed.). Pearson .
- Hosford, W. F.; Caddell, R. M. (2011). *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy* (4^o ed). Cambridge University Press
- Hosford, W. F.; Caddell, R. M. (2014). *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy* (4^o ed.). Cambridge University Press.
- Hosford, W. F.; Caddell, R. M. “*Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. 4th ed”. New York: Cambridge University Press, 2011.
- Juneja, B.L. (2010). *Fundamentals of Metal Forming* (2^o ed). New Age.
- Kalpakjian, S; Schmid, S.R. (2016). *Manufacturing Processes for Engineering Materials* (6^o ed.). Pearson.
- Kiminami, C. S.; Castro, W. B.; Oliveira, M. F. (2013). *Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos*. Blucher.
- Kissell, J. T., & Ferry, R. J. (2010). “*Aluminum Structures: A Guide to Their Specifications and Design*. 2nd ed”. John Wiley & Sons.
- Kobayashi, S.; Altan, T. (1989), “*Metal Forming and the Finite-Element Method*”. Oxford: Oxford University Press
- Krelling, M.S.C. (2022), “*Extrusão*”. Instituto federal de Santa Catarina.

- Ktari, A.; Antar, Z.; Haddar, N.; Elleuch, K. (2012), “Modeling and Computation of the three-roller bending process of steel sheets”, *Journal of Mechanical Science and Technology* 26 (1), Springer, pp 123~128.
- Lee, H. (2023). *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2023: Theory, Applications, Case Studies*. SDC Publications.
- Marcondes, P.V.P. (2014), “Manufatura de chapas metálicas – dobramento”. Universidade Federal do Paraná.
- Moaveni, S. (2014). *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS* (4^a ed.). Pearson.
- Moaveni, S. (2014). *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS* (4^o ed). Pearson.
- Modenesi, Paulo, J. (2008), “Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico”. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais.
- Mondolfo, L. F. (2013). *Aluminum Alloys: Structure and Properties* (2^o ed). Butterworth-Heinemann.
- Norton, R. L. (2013). *Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada* (4^o ed). Bookman.
- Okamoto, T.; Fukuda, T.; Hagita, H. (1973). “Material Fracture in Cold Forging- Systematic, Classification of Working Methods and Types of Cracking in Cold Forging”. *The Sumitomo Search*, n. 9, p.216-225.
- Poll, M.T. (2008), “Uma metodologia para automação do processo de conformação por calandras”. Dissertação de mestrado, p.28. Universidade federal de Santa Maria – RS.
- Quadros, G.N. (2020), “Análise dos fatores influenciadores na não conformidade dimensional do processo de dobramento”. Trabalho de Conclusão de Curso, p.9. Universidade de Caxias do sul – RS.
- Reddy, J. N. (2018). *Introduction to the finite element method* (4^o ed). McGraw Hill.
- Reis, C. L.; Cetlin, P. R.; Melo, T. M. F.; Casas, E. B. (2004), “Estudos de influência na simulação numérica de estampagem”. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, v.1, n.2, p.34-37.
- Rodrigues, J.; Martins, P. (2010) “Tecnologia Mecânica Volume II. Tecnologia da Deformação Plástica – Aplicações Industriais”. Portugal: Escolar Editora.
- Selvaggio, A.; Dirksen, U.; Tekkaya, A.E.; Schikorra, M.; Kleiner, M. (2009), “Increasing profile bending production accuracy with computational intelligence”. *Evolve Compuar*, 17, 561-576.
- Shakil A.; Kagzi; Harit; Raval, K. (2015), “Parametric Study on Cylindrical Roller Forming Process”, *Advances in Materials and Processing Technologies*, Taylor & Francis Group, Vol. 1, No. 3-4, pp 586 – 598.
- Souza, J.H.C. (2022), “TechnNOVA: Curso fundamentos de estampagem”
- Spoorenberg R.C; Snijder H.H; Hoenderkamp J.C.D. (2010), “Finite element simulations of residual stresses in roller bent wide flange sections”, *Journal of Constructional Steel Research* 67.

- Spoorenberg, R. C., Snijder, H. H., & Hoenderkamp, J. C. D. (2010). Experimental investigation of residual stresses in roller bent wide flange steel sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(6), 737–747.
- Stolarski, T.; Nakasone, Y.; Yoshimoto, S. (2018). *Engineering Analysis with ANSYS Software* (2^o ed.). Butterworth-Heinemann.
- Tailor, V. K.; Gandhi, A. H.; Moliya, R. D.; Raval, H. K. (2008) “Finite Element Analysis of Deformed Geometry in Three-Roller Plate Bending Process”, *International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2008*, Evanston, Illinois, USA, outubro 7-10.
- Tekkaya, A.E.; Chatti, S. (2014), “Dobra (Tubes, Profiles)”. Inside CIRP Encyclopedia of Production Engineering; Springer: Berlin, Germany.
- Thakare, Prafull, S.; Sandip, M.; Salodkar; Handa, C. C. (2019) “Development of Mathematical Model for Top Roller Displacement of Three-Roller Bending Machine Using Dimensional Analysis.” *Proceedings of International Conference on Intelligent Manufacturing and Automation*. Springer, Singapore.
- Thanasoulas, I.D.; Gantes, C.J. (2020) “Numerical investigation on the residual stresses of roller-bent circular hollow-sections”, *Journal of Constructional Steel Research Research* 164.
- Totten, G. E., Tiryakioglu, M., & Kessler, O. (Eds.). (2018). *Encyclopedia of Aluminum and Its Alloys, Two-Volume Set (Print) (Metals and Alloys Encyclopedia Collection)* 1st Edition, Kindle Edition.
- Totten, G; Howes, M; Inoue, T. (2003), “Handbook of residual stress and deformation of steel”. Ohio: ASM International.
- Waldunsteel (2022), “Forjamento com matriz aberta - o guia geral de perguntas frequentes”. Fenghuang Town, China. Disponível em: <https://waldunsteel.com/pt/forjamento-em-matriz-aberta/>. Acessado em: 2 julho de 2022.
- Yang, M.; Shima. S. (1988), “Simulation of Pyramid Type Three-Roll Bending Process”, *International Journal of Mechanical Science*, Vol.30, No.12, pp 877 – 886.
- Zhang, G. (2019). *Engineering Analysis with ANSYS Workbench 19*. College House Enterprises.
- Zhao, J.; Jiang, Z. (2017). *Rolling of Advanced High Strength Steels: Theory, Simulation and Practice* (1^o ed.). CRC Press.
- Zhou, W.; Zhou, H.; Zhang, R.; Pei, Y.; Fang, D. (2015), “Measuring residual stress and its influence on the properties of porous ZrO₂(ZrO₂+Ni) ceramic.Mater”. *Sci. Eng. UMA*, 622, 82-90.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Zhu, J. Z. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. (6 ed.). Butterworth-Heinemann.