

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
RIO GRANDE DO SUL

ROBSON CAMARGO

**ANÁLISE COMPUTACIONAL SOBRE ESTAMPABILIDADE DE
TAMPAS METÁLICAS PRODUZIDAS A PARTIR DE FOLHA DE
FLANDRES**

CAXIAS DO SUL

2024

ROBSON CAMARGO

**ANÁLISE COMPUTACIONAL SOBRE ESTAMPABILIDADE DE TAMPAS
METÁLICAS PRODUZIDAS A PARTIR DE FOLHA DE FLANDRES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais para a obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Desenvolvimento de Materiais de Engenharia

Orientador: Prof. Dr Juliano Cantarelli Toniolo

CAXIAS DO SUL

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C172a Camargo, Robson
Análise computacional sobre estampabilidade de tampas metálicas produzidas a partir de folha de flandres / Robson Camargo. – 2025.
xv, 46 f. : il. , color.
Orientador: Juliano Cantarelli Toniolo.

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Caxias do Sul. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais. Mestrado Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais, Caxias do Sul, BR-RS, 2025.

1. Anisotropia. 2. Estampagem (Metais). 3. Simulação (Computadores digitais). Toniolo, Juliano Cantarelli. II. Título.

CDU 669.1



Dissertação intitulada 'ANÁLISE COMPUTACIONAL SOBRE ESTAMPABILIDADE DE TAMPAS METÁLICAS PRODUZIDAS A PARTIR DE FOLHA DE FLANDRES', de autoria de Robson Camargo, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

Documento assinado digitalmente
gov.br VINICIUS MARTINS
Data: 10/03/2025 22:13:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Vinícius Martins
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-riograndense

Prof. Dr. Carlos Alberto Bork
Confederação Nacional da Indústria

Documento assinado digitalmente
gov.br LISIANE TREVISAN
Data: 25/02/2025 16:08:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Lisiane Trevisan
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

Documento assinado digitalmente
gov.br JULIANO CANTARELLI TONIOLO
Data: 25/02/2025 15:26:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Juliano Cantarelli Toniolo – Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

Profa. Dra. Cinthia Gabriely Zimmer
Coordenadora do PPG-TEM

Prof. Dr. Juliano Cantarelli Toniolo
Coordenador Adjunto do PPG-TEM

Data de aprovação: 23 de dezembro de 2024

Rua Avelino Antônio de Souza, 1730 | Bairro Nossa Senhora de Fátima | CEP:
95043-700 | Caxias do Sul/RS

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr Juliano Cantarelli Toniolo pela orientação, dedicação e ensinamentos.

Aos Professores do IFRS e colegas do mestrado pelas horas de conversas e aprendizado.

A empresa Metalgráfica Renner por acreditar e viabilizar o projeto de pesquisa disponibilizando recursos e materiais.

Ao Prof. Alisson da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), pela generosa cessão da licença do software QForm.

A minha esposa Rita, pela atenção, carinho, compreensão e amor durante toda a jornada deste desafio.

Aos meus pais, Jorge e Lenir, e aos meus irmãos, Rogers e Caroline, pelo amor e incentivo ao estudo.

E a todos que de alguma forma contribuíram para o sucesso deste trabalho.

“Só fazemos melhor aquilo que repetidamente insistimos em melhorar. A busca da excelência não deve ser um objetivo, e sim um hábito” (Aristóteles).

RESUMO

Este estudo investiga as causas de falhas no processo de estampagem de tampas metálicas fabricadas a partir de folhas de Flandres de espessura 0,36 mm. Por meio de ensaios mecânicos (tração, Erichsen e análise de anisotropia) e simulações computacionais utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), foram identificados fatores críticos relacionados às propriedades anisotrópicas do material e aos parâmetros do processo de conformação mecânica. Os resultados experimentais indicaram variações significativas no índice de anisotropia (r) e na resistência mecânica em diferentes direções de laminação, enquanto a simulação computacional destacou regiões suscetíveis a rupturas e deformações. A análise da Curva Limite de Conformação (CLC) revelou que o ponto crítico de tensão está associado a regiões específicas da peça, influenciadas por parâmetros de processo e variabilidade no material. Como os resultados do ensaio de tração demonstraram uma fraca correlação entre a tensão máxima e alongamento entre os ensaios, foi utilizada uma ferramenta estatística para aprofundamento, com a utilização de critério p-valor para análise da significância do resultado. Este trabalho concluiu que há novos cenários a serem estudados para que o resultado da simulação computacional e resultado prático tenham melhor convergência, recomendando-se a obtenção de temperatura do ferramental para novos estudos e também estudos contemplando variação de dureza, visando se ter uma aproximação ainda maior dos resultados, para que sejam produzidas peças funcionais, e que se reduza o altíssimo índice de rejeito atual de 46% proporcionando uma produção de tampas metálicas sem defeitos como rugas e rompimentos, garantindo maior confiabilidade no processo e no produto final.

Palavras chave: Anisotropia, conformação mecânica, estampagem, folha de flandres, simulação computacional.

ABSTRACT

This study investigates the causes of failures in the stamping process of metal lids manufactured from 0.36 mm thick tinplate. Through mechanical tests (traction, Erichsen and anisotropy analysis) and computational simulations using the Finite Element Method (FEM), critical factors related to the anisotropic properties of the material and the parameters of the mechanical forming process were identified. The experimental results indicated significant variations in the anisotropy index (r) and mechanical strength in different rolling directions, while the computational simulation highlighted regions susceptible to ruptures and deformations. Analysis of the Forming Limit Curve (CLC) revealed that the critical stress point is associated with specific regions of the part, influenced by process parameters and material variability. As the results of the tensile test demonstrated a weak correlation between maximum tension and elongation between tests, a statistical tool was used for further analysis, using a p-value criterion to analyze the significance of the result. This work concluded that there are new scenarios to be studied so that the result of the computational simulation and practical results have better convergence, recommending obtaining the temperature of the tooling for new studies and also studies contemplating hardness variation, aiming to have an even closer approximation. greater results, so that functional parts are produced, and the extremely high current reject rate of 46% is reduced, providing the production of metal lids without defects such as wrinkles and breaks, guaranteeing greater reliability in the process and in the final product.

Keywords: Anisotropy, mechanical forming, stamping, tinplate, computer simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tampa metálica (Autor, 2024).....	2
Figura 2 - Composição das camadas da folha de flandres (CSN 2003).....	4
Figura 3 - Fluxo para produção da bobina de folha de flandres (Aiyiagroup, 2004)	8
Figura 4 - Linha de corte de chapas (Cinbal, 2024)	9
Figura 5 - Formas de comercialização das folha de flandres (Autor, 2024).....	9
Figura 6 - Exemplo de gráfico Tensão x Deformação (Adaptado pelo Autor, 2024).....	11
Figura 7 - Esquema sobre os coeficientes de anisotropia para chapas laminadas (Santos, 2017).....	12
Figura 8 - Alongamento dos grãos decorrente do processo de laminação (Schaeffer, 2004).....	13
Figura 9 - Esquemático sobre os elementos que compoem a ferramenta do ensaio Erichsen (Dieter, G. E., 2007).....	16
Figura 10 - Diagrama de determinação de Curvas Limites de Conformação. (Adaptado de Lange, 1993).....	18
Figura 11 - Dimensões da tampa metálica (Autor, 2024).....	22
Figura 12 - Disposição de como foram retirados os corpos de prova para o ensaio de tração e anisotropia (Autor, 2024).....	23
Figura 13 - Geometria e dimensões da amostra para ensaio de tração e anisotropia (Autor, 2024).....	24
Figura 14 - Disposição de como foram retirados os corpos de prova para o ensaio Erichsen (Autor, 2024).....	25
Figura 15 - Dimensão do blanque para o ensaio Erichsen (Autor, 2024).....	25
Figura 16 - Distribuição de tensões coletas a partir do programa QForm (Adaptado pelo Autor, 2024).....	28
Figura 17 - Tela das Curvas Limites de Conformação (CLC) da simulação computacional coletadas do programa QForm (Adaptado pelo Autor, 2024).....	29
Figura 18 - (a) Tela de resultados gráficos coletadas do programa QForm. (b) Tela de resultados gráficos coletadas do programa QForm com ampliação de 10X para visualização da escala de cores (Adaptado pelo Autor, 2024).....	30
Figura 19 - Tela de histograma coletadas do programa QForm (Adaptado pelo Autor, 2024).....	31

Figura 20 - Captura de tela de relatório gerado pelo programa TESC (Adaptado pelo Autor, 2024).....	34
Figura 21 - Influência da anisotropia nas tensões (Adaptado de Schaeffer, 2004).....	36
Figura 22 - Correlação entre as tensões de estudo computacional e ensaio de tração (Autor, 2024).....	36
Figura 23 - Resultado do estudo de correlação entre tensão máxima do ensaio de tração. (b) Resultado sobre a variável alongamento do ensaio Erichsen (Autor, 2024).....	40
Figura 24 - (a) Gráfico da correlação entre tensão máxima dos ensaios e (b) Gráfico da correlação entre o alongamento dos ensaios (Autor, 2024).....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Elementos químicos da folha de flandres, CSN (2003).....	5
Tabela 2 – Espessura nominal, tolerâncias e massa para folha laminada de aço de baixo teor de carbono (Adaptado de ABNT, 2006).....	6
Tabela 3 – Têmpera para folhas metálicas de simples redução (ABNT, 2006).....	7
Tabela 4 – Dados inseridos no programa QForm (Elaborado pelo autor).....	26
Tabela 5 – Resultados do ensaio de tração (elaborado pelo autor).....	32
Tabela 5 – Resultados do ensaio de tração (elaborado pelo autor).....	38
Tabela 6 – Resultados do ensaio Erichsen (elaborado pelo autor).....	38

SIGLAS, TERMOS E ABREVIações

<i>A</i>	<i>Área</i>
<i>AISI</i>	<i>American Iron and Steel Institute (Instituto Americano de Ferro e Aço)</i>
<i>Al</i>	<i>Alumínio</i>
<i>C</i>	<i>Carbono</i>
<i>CLC</i>	<i>Curva Limite de Conformação</i>
<i>Cr</i>	<i>Cromo</i>
<i>CSN</i>	<i>Companhia Siderúrgica Nacional</i>
<i>Cu</i>	<i>Cobre</i>
<i>F</i>	<i>Força</i>
<i>g/m²</i>	<i>Gramas por metro quadrado</i>
<i>HAZ</i>	<i>Heat-Affected Zone (Zona Termicamente Afetada)</i>
<i>IE</i>	<i>Índice Erichsen</i>
<i>Kgf</i>	<i>Quilograma-força</i>
<i>MEF</i>	<i>Método dos Elementos Finitos</i>
<i>mm</i>	<i>Milímetro</i>
<i>mm/s</i>	<i>Milímetro por segundo</i>
<i>Mn</i>	<i>Manganês</i>
<i>MPa</i>	<i>Megapascal</i>
<i>Ni</i>	<i>Níquel</i>
<i>P</i>	<i>Fósforo</i>
<i>r</i>	<i>Índice de anisotropia</i>
<i>R</i>	<i>Raio</i>
<i>r_m</i>	<i>Anisotropia média</i>
<i>S</i>	<i>Enxofre</i>
<i>Si</i>	<i>Silício</i>

t	Espessura final	mm
t_o	Espessura inicial	mm
w	Largura final	mm
w_o	Largura inicial	mm

LISTA DE SÍMBOLOS

ε_t	<i>Deformação verdadeira na espessura</i>	-
ε_w	<i>Deformação verdadeira na largura</i>	-
Δ_r	<i>Anisotropia planar</i>	-
σ_r	<i>Tensão radial</i>	<i>Mpa</i>
σ_t	<i>Tensão tangencial</i>	<i>Mpa</i>
φ	<i>Deformação</i>	-

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVO	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1.	CARACTERÍSTICAS DAS FOLHAS DE FLANDRES	4
3.2.	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	9
3.3.	ENSAIO DE ANISOTROPIA	11
3.4.	ENSAIO ERICHSEN	15
3.5.	CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO	17
3.6.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	18
3.7.	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	19
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1.	FOLHA DE FLANDRES E TAMPA METÁLICA.....	21
4.2.	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	22
4.3.	ENSAIO DE ANISOTROPIA	24
4.4.	ENSAIO DE ERICHSEN	24
4.5.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	26
4.6.	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	27
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	28
5.2.	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	32
5.3.	ENSAIO DE ANISOTROPIA	33
5.4.	ENSAIO DE ERICHSEN	37
6.	CONCLUSÕES	43
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
8.	REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

A principal matéria-prima para a fabricação de tampas metálicas para baldes de produtos químicos é a folha de flandres. Segundo CSN (2023), em sua composição, a folha de flandres tem uma camada de aço base que possui baixo teor de carbono, que é ideal para a estampagem de tampas metálicas, e tem em ambos lados do material camada de estanho, aplicado através de processos eletrolíticos, visando atender requisitos de resistência mecânica, conformabilidade, acabamento e resistência à corrosão.

CABRAL (2000), afirma que a embalagem ou seus sistemas precisam de vantagens competitivas a partir de aspectos importantes como o seu *design* e redução de custo, por isso o tema precisa ser amplamente explorado e deve haver aprimoramento da tecnologia e do aprendizado.

Para a análise de defeitos em estudos de engenharia tem se recorrido cada vez mais à simulação computacional, para que seja uma ferramenta auxiliar aos ensaios que fornecem dados experimentais. Segundo Tekkaya & Martins (2009), a aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF) na conformação mecânica pode trazer benefícios significativos, como a redução de custos, a melhoria na qualidade dos produtos, o aumento na velocidade de desenvolvimento de novos processos e a ampliação do conhecimento técnico sobre o processo. Contudo, a alta complexidade envolvida na simulação computacional baseada no MEF em operações de conformação mecânica apresenta um obstáculo desafiador para engenheiros e pesquisadores, pois estes precisam conhecer com profundidade para replicar características sobre o material e condições de contorno.

A caracterização das propriedades das folhas de flandres ocorre por meio do ensaio de tração em três direções, 0°, 45°, 90° em relação ao sentido de laminação. Apesar do ensaio Erichsen ser o ensaio que mais se aproxima do comportamento de estampagem, o mesmo, geralmente, não é utilizado para caracterização de propriedades porque foi convencionalizado e é utilizado, principalmente, para a obtenção do índice de estampabilidade (índice Erichsen).

As folhas de flandres são até hoje materiais de pouca literatura técnica e os poucos fabricantes mantêm apenas o mínimo de informações disponíveis para os fabricantes de

embalagens metálicas, principalmente, porque consideram seus estudos e resultados de ensaios como propriedade intelectual competitiva. Apesar de existir uma abordagem prática de como cada especificação de folha de flandres se comporta no processo de estampagem, praticamente inexistem estudos comparando diferentes ensaios buscando descobrir correlação das propriedades, neste caso, da tensão máxima e alongamento.

Muitos dos desafios técnicos e científicos fundamentais foram resolvidos no passado, resultando em uma diminuição do interesse por novas pesquisas nesse campo. Segundo (PEPELNJAK; BARISIC, 2007), periódicos e pesquisas recentes estão focando na comparação do processo de estampagem da prática com a simulação virtual, por elementos finitos, similarmente como este trabalho analisa a estampagem da tampa metálica.

Este artigo buscou possíveis soluções para o rompimento da tampa metálica para baldes de produtos químicos, conforme Figura 1, que teve um rompimento indesejado no processo de estampagem e que teve um rejeito de 46% da produção, um índice extremamente alto e que torna a produção inviável.



Figura 1 – Tampa metálica (Autor, 2024).

Então, se busca preencher essas lacunas e descobrir possíveis causas ao combinar métodos experimentais e computacionais. Por conseguinte, buscou-se correlacionar os resultados do ensaio de tração com o ensaio Erichsen, visto que o primeiro gera resultados uniaxiais e o segundo biaxiais.

2. OBJETIVO

O objetivo principal do trabalho é o estudo das possíveis causas para o rompimento da tampa metálica, correlacionando os dados experimentais obtidos nos ensaios com o resultado da simulação computacional. Para cumprimento deste objetivo, três são os tópicos necessários:

- 1) Realização e análise da computacional para comparação com os resultados encontrados na prática de estampagem.
- 2) Realização dos ensaios de tração, anisotropia e Erichsen, a fim de confrontar e correlacionar com os problemas encontrados na tampa metálica.
- 3) Por meio de ferramentas estatísticas, comprovar utilizando correlação linear e critério de p-valor se tensão máxima e o alongamento do ensaio de tração tem forte correlação com as mesmas variações do ensaio Erichsen, de forma a utilizá-lo de com confiabilidade para a soluções de problemas, para isso o nível de significância estabelecido foi 0,05.

3. REVISÃO DE LITERATURA

A folha de flandres é amplamente utilizada na indústria de embalagens devido à sua combinação de leveza (baixa densidade), resistência e versatilidade. Sua produção envolve processos metalúrgicos complexos, incluindo a laminação e a aplicação de revestimentos protetores, que influenciam diretamente suas propriedades mecânicas e de corrosão. Para compreender e aprimorar o desempenho desse material, esta revisão bibliográfica, visou apresentar fundamentos sobre a sua composição química, processo de produção, ensaios e ferramentas de análise computacional e estatística. Ensaios mecânicos, como o de tração, e métodos avançados de simulação computacional são frequentemente empregados para investigar propriedades anisotrópicas e prever possíveis falhas em aplicações práticas. Além disso, ferramentas estatísticas são essenciais para a análise de dados experimentais, auxiliando na validação de projeto e processo, apoiando

na identificação de variáveis críticas no processo de fabricação. Esses aspectos serão abordados nesta revisão, destacando sua relevância para aplicações industriais específicas, como a fabricação de tampas metálicas.

3.1. CARACTERÍSTICAS DAS FOLHAS DE FLANDRES

A folha de flandres, também conhecida como folha estanhada ou simplesmente flandres, é uma lâmina de aço com baixo teor de carbono revestida por estanho em um ou dois lados de suas faces, por meio de processo de eletrodeposição. Possui mais de um material em sua composição, conforme mostrado na Figura 2, e as suas características visam o atendimento de requisitos como resistência mecânica, conformabilidade, acabamento e resistência à corrosão, conforme Companhia Siderúrgica Nacional (2003).

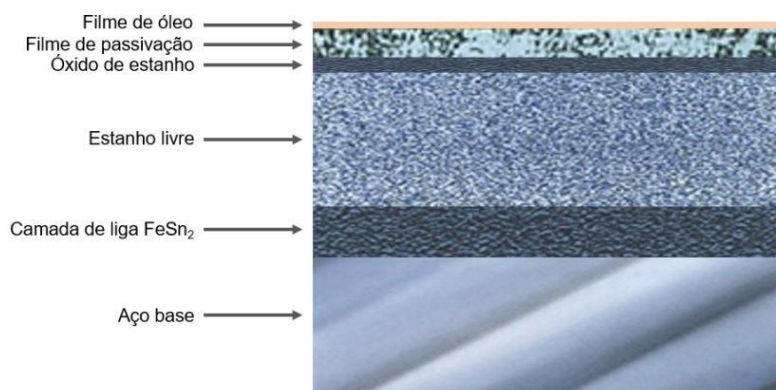


Figura 2 – Composição das camadas da folha de flandres (CSN, 2003).

Segundo a NBR 6665 (ABNT, 2006), e como visto na Figura 2, o principal material da folha de flandres é a camada de aço base que possui baixo teor de carbono com variação de 0,06 a 0,15%. A faixa que contempla este teor é responsável por proporcionar a ductibilidade ao material, pois é uma das características mais buscadas em componentes de tampas metálicas, que além de sofrerem processo de estampagem, ainda precisam suportar quedas e impactos na aplicação final e no cliente, quando já há produto envazado.

Destaca-se a composição do estanho pela sua resistência à corrosão, que protege as camadas subjacentes da oxidação. A camada de estanho cria uma barreira física entre o

aço base e o ambiente externo, impedindo que a umidade e os produtos químicos entrem em contato direto com o metal base. A composição química da folha de flandres pode ser observada na Tabela 1.

Elemento químico	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Al	Outros Elementos
Teores máximos (%)	0,13	0,60	0,020	0,030	0,020	0,20	0,15	0,10	0,020 mín.	0,020 máx.

Tabela 1 – Elementos químicos da folha de flandres (CSN, 2003).

Os elementos químicos presentes na composição da folha de flandres desempenham funções específicas que resultam nas propriedades do material e no comportamento durante o processo de estampagem, e, entre eles, destaca-se o carbono (C), que mesmo em teores baixos (máximo de 0,13%), é fundamental para garantir resistência mecânica. Já o manganês (Mn), com teor máximo de até 0,60%, atua como desoxidante e melhora a resistência ao desgaste e a tenacidade, sendo importante para evitar trincas durante a conformação.

A folha de flandres da tampa metálica em estudo, é fabricada pelo processo de laminação por simples redução, sendo responsável por ajustar a espessura do material enquanto mantém suas dimensões laterais praticamente constantes. Nesse processo, o material é comprimido entre cilindros rotativos, promovendo deformações plásticas controladas que melhoram suas propriedades mecânicas, como a resistência e a dureza, além de assegurar a uniformidade dimensional.

A NBR 6665 (ABNT, 2006), padroniza as espessuras para materiais à base de aço. Segundo a norma, as medições de espessura equivalem ao resultado encontrado por medição utilizando micrômetro. A espessura das folhas de flandres podem apresentar erros em relação ao valor nominal, conforme a Tabela 2.

Simple redução espessura (mm)	Dupla redução espessura (mm)	Tolerância \pm (mm)
0,30	----	0,015
0,31	----	0,016
0,32	----	0,016
0,33	----	0,017
0,34	----	0,017
0,35		0,018
0,36		0,018
0,37	----	0,019
0,38	----	0,019

Tabela 2 – Espessura nominal, tolerâncias e massa para folha laminada de aço de baixo teor de carbono (Adaptado de ABNT, 2006).

A definição de dureza se dá pela resistência que um corpo tem de penetrar em outro corpo. A dureza é medida através do ensaio de dureza e com um equipamento denominado durômetro. Este tipo de ensaio é classificado como um ensaio não destrutivo, porém, as medições são feitas de forma pontual em regiões do material. Costuma-se utilizar folhas metálicas com dureza menor para estampagem de componentes como tampas, anéis e fundos. Enquanto, costuma-se utilizar folhas com mais dureza para corpos de embalagens, principalmente para embalagens maiores, devido à apresentar uma maior resistência nas aplicações.

Têmpera	Espessura $\leq 0,21\text{mm}$		0,21 < espessura $\leq 0,28\text{mm}$		> 0,28 mm	
	Nominal	Tolerância	Nominal	Tolerância	Nominal	Tolerância
T 50	53 máx	-	52 máx	-	51 máx	-
T 52	53	± 4	52	± 4	51	± 4
T 57	58	± 4	57	± 4	56	± 4
T 61	62	± 4	61	± 4	60	± 4
T 65	65	± 4	65	± 4	64	± 4

Tabela 3 – Têmpera para folhas metálicas de simples redução (ABNT, 2006).

Como pode ser observado na Tabela 3, é comum encontrar o termo dureza como têmpera, ambos remetem ao mesmo significado. A têmpera é baseada na escala de dureza Rockwell 30T, no qual indica o grau de encruamento de folhas de flandres produzidas por

processo de simples redução, o que caracteriza uma combinação de propriedades interrelacionadas (ABNT, 2006).

Da mesma forma que a têmpera, o estanho é uma importante característica para seleção de folha de flandres. O revestimento contendo estanho em ambas faces do material visa, principalmente, fornecer resistência à corrosão. Folhas de flandres em aplicações de embalagens metálicas não utilizadas somente com o revestimento de estanho, sempre recebem uma aplicação de verniz em um processo posterior. Porém, neste estudo e em análises de material costuma-se utilizar a folha chamada virgem, ou seja, sem verniz e conforme produzido na siderúrgica, a fim de se estudar somente as variáveis originais da matéria-prima.

Segundo DANTAS et al (1996), o estanho apresentado em folhas de flandres está contido de duas formas: a liga de estanho com aço (FeSO_2), que tem a função de proteger externamente o aço base contra corrosão, e o estanho livre, que corresponde ao restante do estanho que é não é pertencente à liga.

O processo de produção da folha de flandres, inicia com a produção do aço base, em sua fase inicial, na aciaria, que é semelhante aos aços utilizados pela indústria em geral, por isso não será explicitado neste trabalho. Após o término do lingotamento do material na aciaria e, como pode ser visto na Figura 3, o mesmo passa pelo processo de laminação para que se tenha a matéria-prima final para posterior processo de produção das embalagens metálicas.

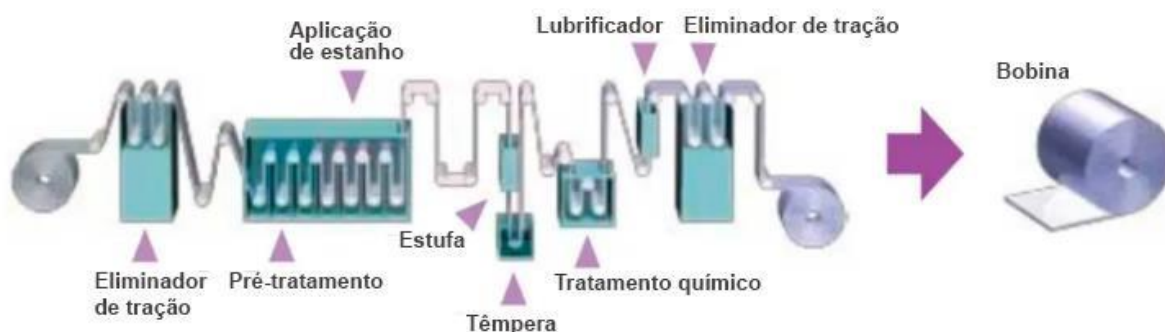


Figura 3 - Fluxo para produção da bobina de folha de flandres (Aiyiagroup, 2004).

As principais diferenças em relação aos aços mais comuns utilizados na indústria se dão pelas etapas diferenciadas que são mostradas na Figura 3. No início do processo, o material passa por um equipamento, denominado eliminador de tração, o qual possui a função de eliminar tensões resultantes do processo anterior. Após, ocorre uma etapa de aquecimento do material em uma estação de pré-tratamento, para que ocorra a aplicação de estanho de forma eletrolítica. Para a cura do estanho, fator importante do processo, o material passa por uma estufa. A seguir, ocorre a etapa de oleamento no lubrificador e, por fim, a etapa de eliminação de tração, para que finalmente a folha de flandres possa ter seu processamento finalizado em forma de bobina.

No passado muitas indústrias trabalhavam com as bobinas de folhas de flandres para a estampagem de componentes. Essas bobinas precisavam de alimentadores para que o material fosse estampado na prensa. No entanto, nos dias atuais, está cada vez mais em desuso a utilização de bobinas no processo de estampagem de componentes para embalagens metálicas. A forma mais produtiva é a utilização de folhas cortadas em linhas de corte, como ilustra a Figura 4, que resultam em folhas denominadas folhas de corte reto ou folha quadrada, porque dessa forma cada empresa pode comprar folhas cortadas no comprimento que gerar mais rendimento para o seu processo produtivo.



Figura 4 – Linha de corte de chapas (Cinbal, 2024)

As dimensões de corte de folhas retangulares obedecem a medida da largura da bobina que é fixa, já o comprimento, conhecido como avanço, é definido pela empresa

compradora do material, pois cada empresa seleciona o melhor avanço para ter o melhor aproveitamento de material, ou seja, menos sucata.

A Figura 5a ilustra a folha de flandres cortada em formato retangular, a fim de reduzir se ter maior um maior aproveitamento do material, enquanto a Figura 5b ilustra a folha de flandres em forma de bobina.



Figura 5 – Formas de comercialização das folha de flandres (Autor, 2024).

3.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Devido à necessidade de se ter produtos cada vez com menor espessura e que atendam os requisitos de fabricação, também com qualidade superior e funcionalidade perfeita, o mercado de produtos estampados tem sido cada vez mais exigente, advém dessa necessidade a importância de realizar a caracterização e conhecimento das chapas metálicas, garantindo qualidade, baixo custo de produção, baixo índice de refugo, conforme Ferrarini (2004).

O ensaio de tração amplamente utilizado para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais é classificado como um ensaio destrutivo, visto que o material é submetido a esforço uniaxial, a fim de se obter deformação até a ruptura do material (PERINI, 2008). Ele permite determinar parâmetros como o limite de elasticidade, resistência à tração máxima e alongamento na ruptura, que são fundamentais para entender o

comportamento do material sob a atuação de carga. Esses dados são essenciais para a caracterização de materiais metálicos, como as folhas de flandres, utilizadas na fabricação de componentes estruturais e funcionais, e, quando é executado corretamente, fornece dados suficientes para caracterização do material (DAVIS, 2004).

Segundo Chiaverini (1986), o ensaio de tração consiste na aplicação de uma força sobre a superfície de um corpo sólido, resultando em uma deformação na direção do esforço exercido. Quando essa força provoca o alongamento do material, dá-se o nome de tensão de tração. Nesse contexto, observa-se sempre a relação entre a tensão aplicada e a deformação gerada.

A aplicação de uma força de tração na superfície transversal de uma peça resulta em seu alongamento, cuja extensão é proporcional à tensão aplicada, conforme Chiaverini (1986). As máquinas utilizadas nesse processo são altamente automatizadas, permitindo um sistema eficiente de captação e processamento de dados.

Segundo Norton (2004), deformação específica, módulo de elasticidade, limite elástico, resistência ao escoamento, limite de ruptura, entre outros, são propriedades obtidas a partir do ensaio de tração e do gráfico tensão-deformação. O limite de resistência (tensão máxima) demonstra a tensão máxima que um material suporta.

A Figura 6, apresenta gráfico Tensão x Deformação genérico para indicar o ponto de tensão máxima (limite de resistência à tração), que juntamente com o alongamento, são as variáveis estudadas e comparadas neste trabalho.

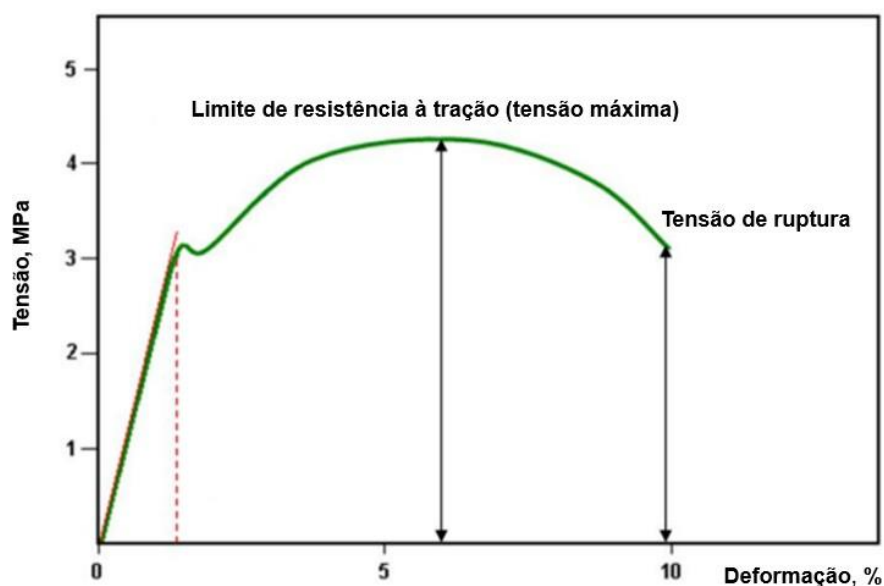


Figura 6 – Exemplo de gráfico Tensão x Deformação (Adaptado pelo Autor, 2024).

De acordo com SCHAEFFER (2009), o parâmetro primordial nos processos de conformação mecânica é a tensão de escoamento, pois é a partir dela que se inicia a fase de deformação plástica e o encruamento do material. Porém, tão importante quanto o escoamento, é a tensão máxima que equivale à máxima resistência à tração, ou seja, corresponde ao momento que ocorre a estricção do material, que resultará, posteriormente, no rompimento que é definido pelo limite de ruptura.

3.3. ENSAIO DE ANISOTROPIA

A anisotropia é a propriedade de um material que apresenta características físicas ou mecânicas diferentes quando avaliado em diferentes direções. Nos metais laminados, como a folha de flandres, o resultado é a chamada anisotropia de orientação preferencial, que é causada pelo alinhamento dos grãos, conforme o sentido da deformação aplicada. Segundo CIMM (2012), o índice (ou coeficiente) de anisotropia é a razão entre a deformação verdadeira na largura (ϵ_w) e na espessura (ϵ_t), conforme a Equação 1.

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)} \quad (1)$$

A Figura 7, apresenta o esquema sobre os coeficientes de anisotropia de chapas laminadas. O método utilizado para as definições de realização do ensaio com objetivo de descobrir o índice de anisotropia é a a norma ASTM 517, que é específica para materiais laminados e com foco em aplicações de estampagem profunda (ASTM, 2010).

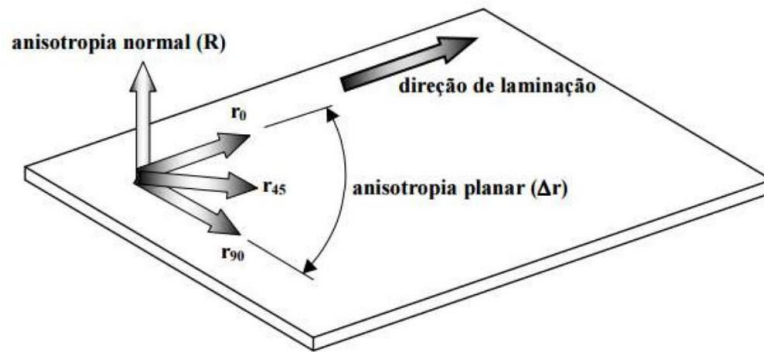


Figura 7 – Esquema sobre os coeficientes de anisotropia para chapas laminadas (Santos, 2017).

O índice de anisotropia, também chamados de fator de Lankford, é calculado para as três direções em relação à laminação (0°, 45°, 90°) e estes resultados são base para o cálculo da anisotropia média normal e anisotropia planar, conforme as Equações 2 e 3.

$$r_m = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ} + 2 \times r_{45^\circ}}{4} \quad (2)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2 \times r_{45^\circ}}{2} \quad (3)$$

Nas quais:

r_m : Valor médio de anisotropia

r_{0° : índice de anisotropia a 0°

r_{45° : índice de anisotropia a 45°

r_{90° : índice de anisotropia a 90°

Nota-se na Figura 8, que os grãos cristalinos estão alongados na direção da maior deformação de tração, e, este alongamento dos grãos é resultado do processo, pelo qual os planos cristalinos passaram por deformação no processo de laminação.

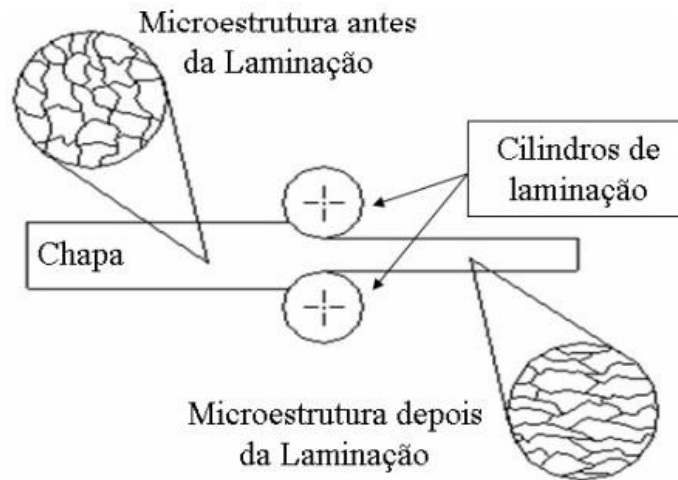


Figura 8 – Alongamento dos grãos decorrente do processo de laminação (Schaeffer, 2004).

No processo de laminação ocorre o alongamento dos grãos, conforme Figura 8, e a temperatura do processo ocorre abaixo da temperatura de recristalização. Durante o processo ocorre uma resistência do material que deve passar pelos cilindros de laminação (duos) para que resulte na redução da espessura. O resultado do processo de laminação, se tratando de microestrutura, é o encruamento do material, no qual os grãos por sofrerem esforço mecânico quando submetidos à redução de espessura nos laminadores, assumem uma direção orientada ao sentido de laminação, gerando grãos menos uniformes e com uma dureza superior devido à discordâncias geradas na estrutura, conforme Callister (2019).

Segundo (MECKING; KOCKS, 1981), o encruamento do material é resultante da deformação plástica, decorrente do movimento das discordâncias e do acúmulo dessas discordâncias, também da redução da mobilidade.

Para a interpretação dos resultados da anisotropia, é essencial compreender sobre os índices de anisotropia. Materiais com índice de anisotropia inferior a 1 são classificados como materiais que não possuem boa estampabilidade, porque apresentam uma deformação maior na espessura do que na largura para a mesma solicitação mecânica, ocasionando reduções excessivas e críticas na direção da espessura (SCHAEFFER, 2004).

Materiais anisotrópicos com valor de anisotropia média (r_m) maior que 1 indicam que a redução na espessura é menor do que na largura.

Um índice de anisotropia com valor elevado ($r_m > 1$) é indicado para estampagem profunda, já que permite uma maior resistência à redução da espessura durante o processo de conformação. Segundo BRESCIANI (2011), isso é positivo porque para alcançar uma melhor condição de estampabilidade, deve-se buscar, durante a fabricação da chapa por laminação, obter altos valores do índice de anisotropia normal média e baixos valores para o índice de anisotropia planar.

O ensaio de tração e anisotropia utiliza Equipamento Universal de Ensaio, que desempenha um papel central na caracterização mecânica de materiais metálicos, sendo amplamente utilizado também em estudos de compressão e flexão. Entre os modelos disponíveis no mercado, a máquina universal de ensaios da marca EMIC destaca-se por sua robustez, versatilidade e precisão, características essenciais para a obtenção de resultados confiáveis.

Equipamentos como a EMIC, possuem controle eletrônico de carga e deslocamento, com sistema que permite a realização de ensaios conforme normas técnicas internacionais, como ASTM e ISO. Devido aos equipamentos universais de ensaios terem uma alta capacidade de carga, podem avaliar a maioria dos materiais metálicos. Além disso, existem diversos acessórios modulares, como extensômetros e dispositivos de fixação, que aumentam sua versatilidade em aplicações diversas.

O equipamento universal de ensaios envia os dados para o programa TESC, programa que é específico para a aplicação e desenvolvido para o controle e análise de ensaios nas máquinas universais de ensaios da EMIC. A partir deste programa, é possível configurar e executar ensaios mecânicos de forma precisa, fornecendo uma interface amigável para o controle dos parâmetros experimentais, como a taxa de aplicação de carga e o registro de deslocamentos.

Além disso, os equipamentos universais de ensaios trabalham em conjunto com programas que organizam os resultados e fazem a apresentação gráfica, entre eles, destaca-se o programa TESC, que acompanha os equipamentos da marca EMIC e oferece

ferramentas avançadas para a aquisição, processamento e análise de dados, permitindo a geração de gráficos em tempo real, como curvas tensão-deformação, e a exportação dos resultados para formatos compatíveis com outros programas de análise. Os recursos destes programas são essenciais para a condução das análises de tração, estampabilidade (Erichsen) e anisotropia.

3.4. ENSAIO ERICHSEN

Os ensaios para análise de conformação se dividem em três categorias. A primeira categoria se refere à obtenção das propriedades mecânicas e o ensaio de tração é o mais utilizado para esse fim. A segunda categoria, se refere aos ensaios que simulam processo similar à uma deformação do processo, neste caso o ensaio Erichsen é o principal, pois tem similaridade com o processo de estampagem (carga biaxial). Já a terceira categoria, é a Curva Limite de Conformação, que indica a máxima deformação que um material pode suportar sob variados modos de conformação (YOSHIDA, 1959).

No ensaio Erichsen, é utilizado um corpo de prova em forma de blanche, conforme a Figura 9, e definido por norma para espessura entre 0,2 mm e 5,0 mm. Durante o procedimento, o blanche é fixado por um prensa-chapa que aplica uma carga de 1000 kgf, sendo então submetido a um estiramento biaxial de tensões de tração até a ocorrência da ruptura. A ferramenta empregada consiste em um punção esférico que opera em conjunto com uma matriz cilíndrica. O punção é lubrificado, geralmente com graxa grafitada resistente ao calor. A partir do diâmetro inicial do disco e da altura do copo formado durante o ensaio, calcula-se o Índice de Erichsen, o qual representa a altura crítica de estiramento do material em condições padrões.

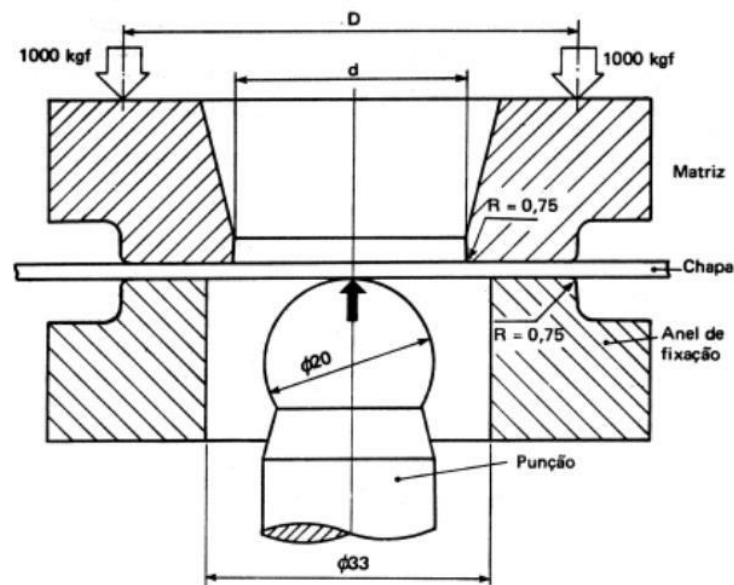


Figura 9 – Esquemático sobre os elementos que compoem a ferramenta do ensaio Erichsen (Dieter, G. E., 2007).

Comumente o ensaio Erichsen é utilizado prioritariamente para comparação e diferentes especificações de chapas metálicas, por exemplo, no estudo de duas especificações diferentes, aquela que resultar no índice de Erichsen (IE) mais elevado, terá uma condição superior para estampagem profunda. Este ensaio ainda permite que sejam obtidas informações sobre a granulação do material, do fibramento mecânico e defeitos locais (LOBÃO, 2003). O índice Erichsen corresponde a distância em milímetros percorrida pelo punção até o momento do contato com a chapa até o aparecimento da trinca, ou seja, $IE=h$.

A tensão máxima que se observa durante o ensaio está relacionada à resistência do material ao esforço combinado de tração e compressão que ocorre durante o embutimento. Embora o ensaio não forneça diretamente a curva tensão-deformação, a altura máxima antes da fratura reflete a capacidade do material de suportar às tensões.

3.5. CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

A Curva Limite de Conformação (CLC) possui uma importante aplicação no meio industrial, já que tem aplicação direta nos processos de estampagem porque a curva obtida é comparada com a estampagem real de um componente. Desta forma, saberá se o componente será estampado sem defeitos (PAUL, 2021).

Ainda, a Curva Limite de Conformação representando o limite máximo de deformação que o material pode suportar antes de falhar por estrição localizada. Ela é construída com base em testes experimentais ou simulações, traçando a relação entre as deformações principal (maior) e secundária (menor). A CLC é amplamente utilizada como critério de falha, pois identifica a transição entre zonas seguras e aquelas onde ocorrem defeitos, como fissuras ou rupturas, sendo fundamental para o projeto e a otimização de processos de conformação (SILVEIRA NETTO, 2018).

Assim, este estudo buscou um dos principais métodos de assegurar que a tampa metálica será estampada sem defeitos ou com defeitos como ruptura, enrugamento ou orelhamento. Na Figura 10 é possível visualizar o diagrama, que disponibiliza informações sobre as deformações que os materiais conseguem suportar em determinadas condições conforme as deformações plásticas ao longo do processo de conformação, a partir da combinação das suas deformações da combinação principais máximas (φ_1) e mínimas (φ_2) (BANABIC, 2013).

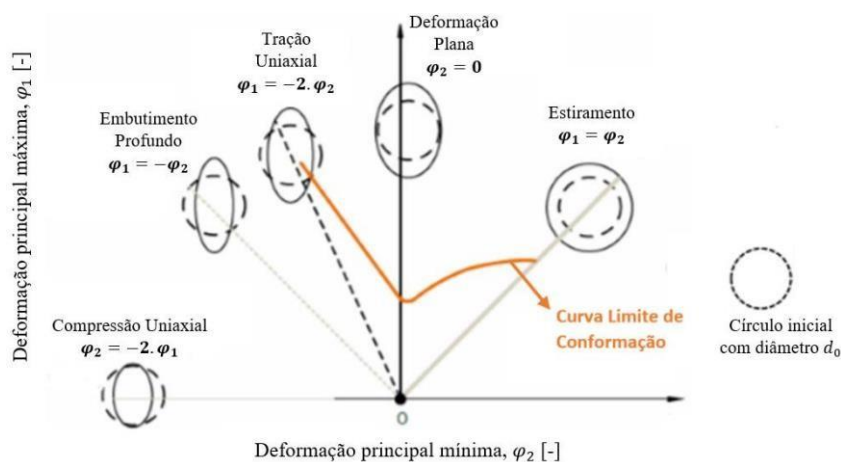


Figura 10 – Diagrama de determinação de Curvas Limites de Conformação (Adaptado de Lange, 1993).

As Curvas Limites de Conformação, conforme ilustra a Figura 10, são definidas de modo que a curva CLC representa o ponto crítico entre a deformação segura e o início das falhas. Essa informação é fundamental para determinar se o processo de estampagem resultará em uma peça confiável para sua aplicação final.

3.6. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional tem se tornado uma ferramenta indispensável para a engenharia, permitindo a análise de componentes sob diferentes condições sem a necessidade de testes físicos extensivos. No estudo de falhas, ela oferece uma maneira econômica e eficiente de prever o comportamento do material e identificar áreas críticas (BATHE, 1996).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica utilizada para realizar cálculos aproximados em sistemas contínuos. Para facilitar sua compreensão, esse método é dividido em duas etapas principais. De acordo com Guidi e Silva (2009), a primeira etapa envolve a discretização da estrutura ou problema, subdividindo-o em pequenos elementos de tamanho finito conectados entre si por pontos chamados nós. Esses nós formam uma malha de elementos finitos, concentrando as forças de ligação entre os elementos nesse espaço específico.

Programas como ABAQUS®, ANSYS®, QForm® e LS-DYNA® são amplamente utilizados para modelar o comportamento mecânico de materiais e esses destacam-se por terem módulos específicos para conformação mecânica. Esses programas empregam o método dos elementos finitos (MEF) para resolver equações complexas que descrevem o comportamento do material ou ferramental.

A precisão de uma simulação depende diretamente dos parâmetros de entrada, como propriedades mecânicas obtidas em ensaios experimentais. Para folhas de flandres, incluir informações sobre anisotropia e resistência à tração é essencial para garantir a fidelidade dos resultados. Segundo ALVES (2009), se o engenheiro não sabe modelar o problema sem ter o computador, ele não deve fazê-lo tendo o computador. A afirmação é

baseada no fundamento de que a teoria é o alicerce para a reprodução dos comportamentos físicos no estudo computacional, bem como a interpretação dos mesmos.

Uma etapa fundamental na validação de simulações é a comparação dos resultados computacionais com dados experimentais. No caso da tampa metálica em estudo, as observações principais devem ser focadas nas regiões com concentração de tensão acima do projetado, para que se possa analisar se coincide com a falha observada no processo de estampagem.

Pesquisas anteriores, como as de Santos *et al.* (2019), demonstraram a eficácia da simulação no estudo de falhas em materiais laminados. Esses trabalhos fornecem uma base para a aplicação da metodologia ao problema em questão.

3.7. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística desempenha um papel crucial em estudos de engenharia, permitindo validar modelos teóricos, interpretar variações em dados experimentais e comparar resultados de forma quantitativa. Em ensaios mecânicos, ela auxilia na identificação de tendências, avaliação de incertezas e estabelecimento de correlações significativas entre variáveis. Essa abordagem é essencial para garantir a confiabilidade dos resultados e fundamentar decisões baseadas em evidências robustas.

Entre os diversos métodos estatísticos, a correlação linear avalia a força e a direção da relação linear entre duas variáveis. Esse tipo de análise é particularmente relevante na engenharia, onde modelos previsionais frequentemente se baseiam em equações lineares devido à sua simplicidade e capacidade de interpretação intuitiva. O coeficiente de correlação linear, denotado por " r ", varia de -1 a +1, indicando a intensidade e o sentido da relação: valores próximos de +1 indicam uma forte relação linear positiva; próximos de -1, uma forte relação negativa; e próximos de 0, uma relação linear fraca ou inexistente (Montgomery & Runger, 2018).

No contexto de ensaios de engenharia, como o de tração e o de Erichsen, a correlação linear pode ser utilizada para avaliar a dependência entre variáveis como tensão

máxima e deformação. Tal abordagem permite verificar se uma variável pode ser predita com base na outra, contribuindo para a otimização de processos industriais (Montgomery & Runger, 2018).

O p-valor, critério utilizado para verificação da significância dos resultados, é uma métrica central na inferência estatística, usada para determinar a significância estatística dos resultados obtidos em um experimento ou análise. Ele representa a probabilidade de que os resultados observados sejam tão extremos quanto os obtidos, assumindo que a hipótese nula seja verdadeira. Em termos práticos, a hipótese nula usualmente afirma que não há diferença significativa ou relação entre as variáveis em estudo (Siegel & Castellan, 1988). A interpretação do p-valor segue os seguintes princípios:

- p-valor $< 0,05$: Evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula, indicando que as diferenças observadas são improváveis de ocorrer por acaso e, portanto, são estatisticamente significativas;

- p-valor $\geq 0,05$: Evidência insuficiente para rejeitar a hipótese nula, sugerindo que as diferenças podem ser atribuídas à variabilidade aleatória dos dados.

Esse limiar de significância (0,05) é amplamente utilizado, mas pode variar conforme o contexto do estudo ou a área de aplicação. Em estudos onde erros do tipo I (rejeitar uma hipótese nula verdadeira) são mais críticos, um limiar mais rigoroso pode ser adotado (Fisher, 1925).

A utilização de ferramentas como a correlação linear e o p-valor é essencial para a interpretação e validação de dados em estudos de engenharia. No entanto, é importante considerar suas limitações e complementar sua análise com outras abordagens, garantindo uma avaliação mais robusta e confiável dos resultados. Dessa forma, é possível promover avanços em processos industriais e em aplicações científicas de forma mais assertiva e embasada (Montgomery & Runger, 2018; Nuzzo, 2018).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para a análise da estampabilidade de tampas metálicas produzidas a partir de folha de flandres. Inicialmente, são descritos os materiais empregados, considerando as características da folha de flandres. Em seguida, detalham-se os procedimentos experimentais realizados, como ensaios de tração, ensaio de anisotropia e ensaio Erichsen, além das ferramentas e equipamentos utilizados. Por fim, são abordados os aspectos metodológicos da simulação computacional, com ênfase nos parâmetros adotados, no modelo numérico desenvolvido e nos critérios empregados para avaliar os resultados obtidos.

4.1. FOLHA DE FLANDRES E TAMPA METÁLICA

A peça objeto deste estudo é a tampa metálica, produzida a partir de folha de flandres, que é utilizada em baldes de produtos químicos. A tampa metálica é um produto utilizado em baldes metálicos para produtos químicos. A Figura 11 ilustra as principais dimensões da tampa metálica, na qual possui espessura de 0,36 mm.

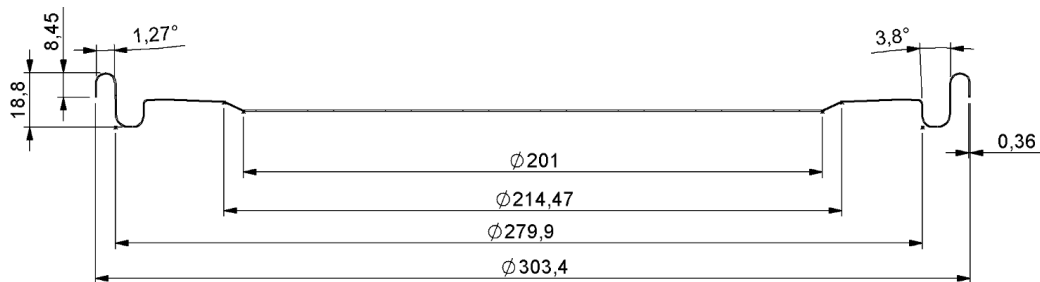


Figura 11 – Dimensões da tampa metálica (Autor, 2024).

As tampas metálicas não possuem requerimento sobre a geometria, por isso cada fabricante pode ter as dimensões e geometria conforme sua necessidade. No entanto, as características da tampa devem suportar as condições da aplicação e cumprir sua função com plenitude e a matéria-prima para as tampas metálicas, deve ter composição química conforme a norma NBR 6665 (2006). A folha de flandres deste estudo é fabricada pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). O material analisado apresenta espessura de 0,36 mm, dureza T57 e camada de estanho de 2,8 g/m² em cada lado da folha de flandres.

4.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado seguindo os critérios estabelecidos pela norma ASTM E517-19:2000, que define metodologia para a obtenção de propriedades mecânicas de materiais metálicos em condições controladas. O método envolveu a preparação e o ensaio de 18 corpos de prova, sendo seis amostras para cada orientação em relação à direção de laminação do material (0°, 45° e 90°).

Para garantir que o processo de preparação (corte) das amostras fosse isenta de qualquer fato que pudesse modificar a característica original do material, os corpos de prova dos ensaios de tração (também Erichsen e anisotropia) foram produzidos por meio do processo de corte a jato de água. Esse método consiste em projetar um jato de água em alta velocidade e pressão, o qual é posteriormente combinado com um abrasivo na região do cabeçote, utilizando o princípio de vácuo *Venturi* para a mistura, conforme CHIAVERINI (1986).

Essa técnica foi escolhida devido à sua capacidade de realizar cortes precisos sem gerar calor significativo na região de corte, eliminando, assim, a formação de uma Zona Afetada pelo Calor (HAZ, do inglês *Heat-Affected Zone*), característica comum em métodos térmicos. Isso garante que os resultados dos ensaios sejam representativos das condições iniciais da chapa de flandres.

A ausência de *HAZ* é essencial para manter as propriedades mecânicas e microestruturais originais do material, garantindo que os resultados dos ensaios sejam representativos das condições iniciais da chapa de flandres. A máquina utilizada no processo é da marca FLOW, modelo MACH 2.

Todos os corpos de prova, tanto do ensaio de tração, anisotropia e Erichsen, foram obtidos a partir de bobinas metálicas com largura de 736 mm, que é a medida padrão utilizada na estampagem das tampas deste estudo. A Figura 12 ilustra a largura e disposição das amostras, conforme foram cortadas no processo de corte por jato de água.

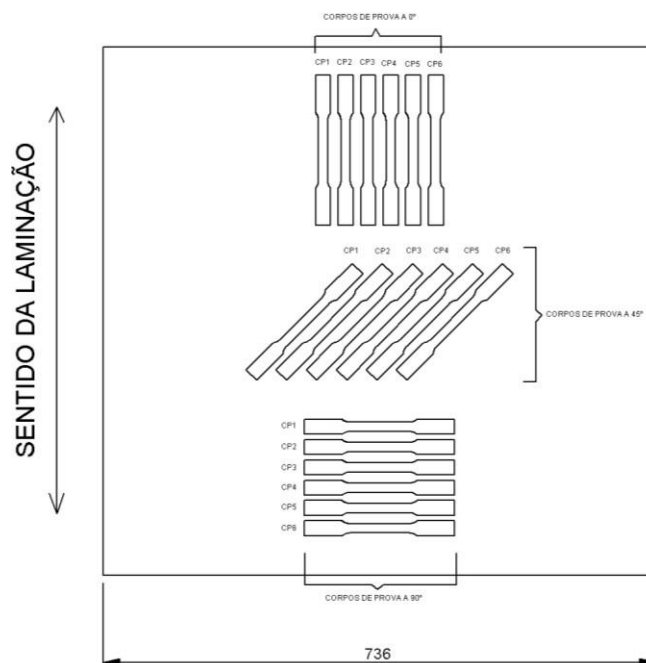


Figura 12 – Disposição de como foram retirados os corpos de prova para o ensaio de tração e anisotropia (Autor, 2024).

Os corpos de prova foram retirados preferencialmente da região central da folha de flandres. A identificação dos corpos de prova foi realizada conforme ilustrado na Figura 12, permitindo a rastreabilidade das amostras ao longo dos ensaios.

Os corpos de prova para o ensaio de tração foram produzidos conforme a norma ASTM E517-19:2000, A Figura 13 apresenta as dimensões adotadas para os corpos de prova utilizados no ensaio de tração.

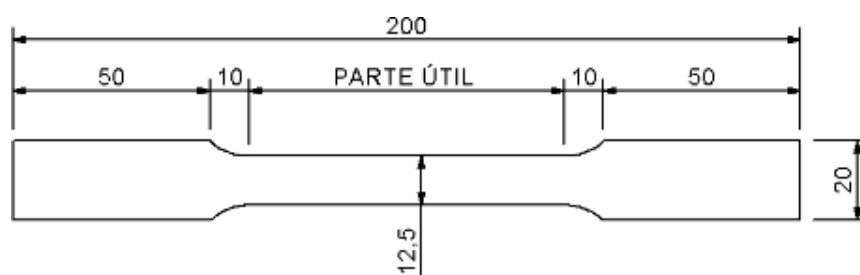


Figura 13 – Geometria e dimensões da amostra para ensaio de tração e anisotropia (Autor, 2024).

Os ensaios de tração foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 2000, configurada para uma velocidade de aplicação de 5 mm/min. O ensaio foi conduzido sob a condição de tração para aço retangular, com célula de carga de 2000 kgf, sem o uso de extensômetro. Os corpos de prova, conforme Figura 13, foram dimensionados como tipo A, conforme especificado pela norma, e submetidos ao ensaio até atingirem um limite de deformação de 15%.

4.3. ENSAIO DE ANISOTROPIA

Para a análise de anisotropia, o ensaio foi conduzido também com base na norma ASTM E517-19:2000, com as mesmas dimensões do corpo de prova do ensaio de tração e com a mesma velocidade. A metodologia envolveu a preparação de 3 corpos de prova para cada orientação em relação à direção de laminação: 0°, 45° e 90°, totalizando 9 corpos de prova.

Foi utilizado extensômetro para o ensaio de anisotropia, seguindo os requisitos estabelecidos pela norma ASTM E517-19. A utilização do extensômetro permite medir tanto a deformação na direção do carregamento (longitudinal) quanto deformação perpendicular a ela (transversal). Isso é essencial para calcular o índice de anisotropia.

4.4. ENSAIO DE ERICHSEN

Já para o ensaio Erichsen, a Figura 14 mostra a disposição dos blanques ao longo da folha de flandres. Neste caso, diferente dos corpos de prova do ensaio de tração e anisotropia, não classificados por ângulos, devido à geometria circular do corpo de prova.

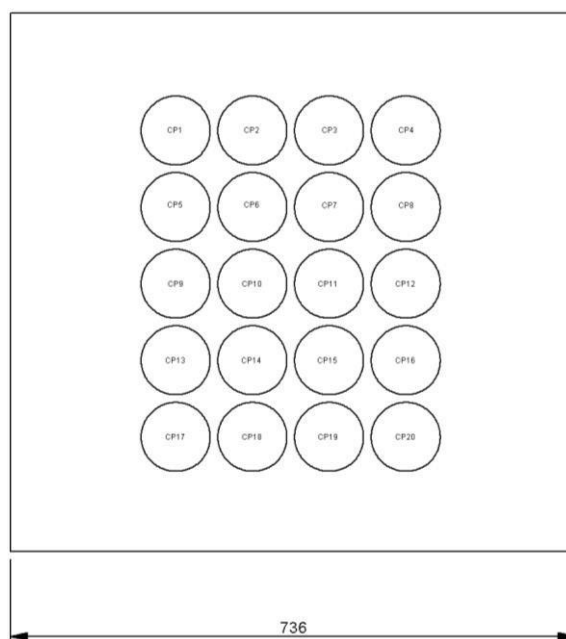


Figura 14 – Disposição de como foram retirados os corpos de prova para o ensaio Erichsen (Autor, 2024).

A quantidade dos corpos de prova para este ensaio foi 20, produzidos conforme a norma ABNT NBR 16281 (2014) e ensaiados na máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 60000, com velocidade de 0,08 mm/s. Esta norma possui as diretrizes para a realização do ensaio em chapas metálicas com espessuras entre 0,3 mm a 5,0 mm. O ensaio utilizou um punção esférico de 20 mm de diâmetro e um blanque de diâmetro 90 mm da folha de flandres, conforme ilustra a Figura 15, para aplicar carga sobre a chapa.

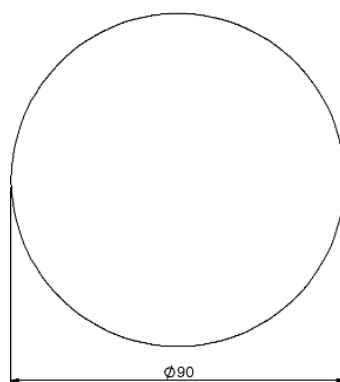


Figura 15 – Dimensão do blanque para o ensaio Erichsen (Autor, 2024).

O diâmetro do blanque, 90 mm, é bem superior ao diâmetro do punção, 20 mm, para garantir a representatividade e a confiabilidade do resultado. Se o diâmetro do

blanque fosse muito próximo ao diâmetro do punção, as bordas do material poderiam interferir no resultado, causando tensões adicionais ou deformações não uniformes. Um blanque maior garante que o ensaio avalie principalmente o comportamento do material na área central, onde ocorre a deformação mais significativa. Além disso, um blanque maior permite que essa fixação seja realizada de forma eficaz.

4.5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional foi realizada utilizando o programa QForm (QuantorForm LTD, Rússia), configurado no modo de conformação geral em 3D. O processo foi simulado em condições de trabalho a frio, com temperatura inicial do ar ambiente e das ferramentas ajustada para 20 °C. Para a matriz e o punção, foi utilizado o material aço AISI D6, previamente cadastrado no banco de dados do programa, assegurando precisão nas condições de contato e comportamento das ferramentas. As propriedades mecânicas e químicas atribuídas à folha de flandres, matéria-prima utilizada na fabricação da tampa metálica, foram configuradas no programa e estão detalhadas na Tabela 1. Essa configuração permitiu reproduzir com maior fidelidade as condições reais do processo.

(a)		(b)	
Propriedades mecânicas		Composição química	
Densidade	7850 Kg/m ³	C	0,13
Condutividade térmica	55,3 W/(m.K)	Si	0,02
Calor específico	491 J/(Kg.K)	Mn	0,6
Módulo de Young	210000 MPa	P	0,02
Coeficiente de Poisson	0,3	S	0,03
		Al	0,02
		Cu	0,2
		Cr	0,1
		Ni	0,15

Tabela 4 – Dados inseridos no programa QForm. (a) Propriedades mecânicas. (b) Composição química (Autor, 2024).

Na configuração dos parâmetros da ferramenta, que simulam as configurações da máquina e das ferramentas no programa QForm, foi selecionada uma prensa mecânica com capacidade de 120 T e velocidade de 330 mm/s. As malhas utilizadas foram geradas automaticamente, com aprimoramento da malha para melhorar a qualidade da análise numérica durante o processo para garantir a precisão das simulações, e empregaram elementos tetragonais. Essa abordagem permitiu uma modelagem eficiente e precisa do processo de conformação, refletindo as condições reais de operação da máquina e das ferramentas.

4.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a análise e organização dos dados foi utilizado o software Microsoft Office Professional Plus 2016, versão 2304. A correlação linear e o teste de significância proposto neste estudo foram realizados por meio da utilização do software R e utilizando o método de Pearson.

A correlação linear foi a ferramenta estatística utilizada no intuito de se avaliar como uma variável se altera em relação à outra. O critério empregado foi o p-valor, o qual indica a probabilidade de se obter uma diferença igual ou mais extrema entre as médias dos grupos analisados, assumindo que a hipótese nula seja verdadeira. A hipótese nula afirma que não há diferença significativa entre as médias dos grupos. O p-valor é calculado com base nos dados amostrais e fornece uma medida da evidência contra a hipótese nula.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo apresentam uma análise técnica dos fatores que afetam a estampabilidade de tampas metálicas fabricadas com folhas de Flandres. Para compreender os problemas de conformação, foram realizados ensaios de tração, análises de anisotropia e simulações computacionais com o uso do Método dos Elementos Finitos (MEF).

5.1. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional utilizando o programa QForm apresentou um resultado de estampagem muito próximo do encontrado na prática, não ocorreu o rompimento do material conforme a estampagem na prensa, porém, destaca-se um ponto de afinamento de espessura que tende a gerar rompimento a partir da mudança de qualquer variável do processo ou da matéria-prima. A Figura 16 ilustra o resultado da simulação computacional com a distribuição da tensão na tampa metálica.

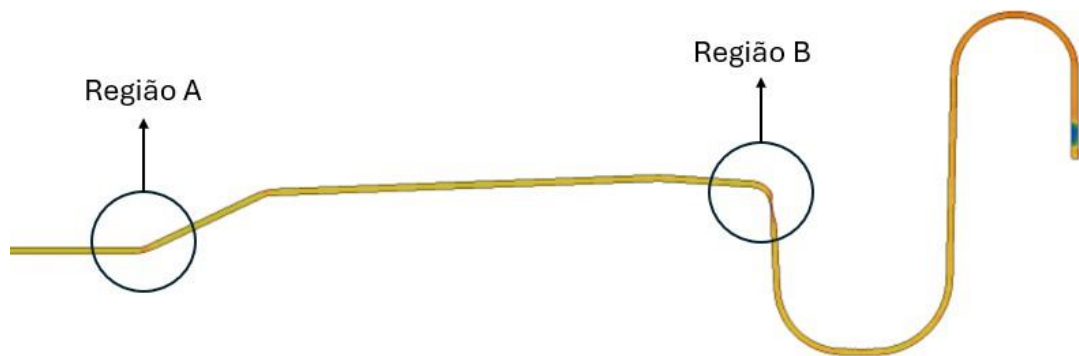


Figura 16 – Distribuição de tensões coletas a partir do programa QForm (Autor, 2024).

O rompimento durante o processo de estampagem na prensa, na tampa metálica física, ocorreu no ponto denominado Região A, que está indicada na Figura 16. Na simulação computacional, no mesmo ponto, o estudo computacional detectou um valor médio de aproximadamente 450 MPa, concentrando-se na região do raio da peça, e não acontecendo rompimento. Fica nítido que o ponto crítico do estudo realizado se concentra na região denominada Região B, equivalente a aproximadamente 635 MPa, e que decorre, principalmente, pelos principais deslocamentos de material estarem nessa região, bem como o maior atrito com as ferramentas de estampagem, e, também por ser a região que possui o ângulo mais fechado, isto é, quando o ângulo é muito próximo ou igual a 90°. No entanto, apesar de se ter um dos pontos de maior tensão na Região A, a mesma não está tendendo a um rompimento, e, atingiu tal comportamento porque iniciou-se a fase plástica após o limite de escoamento, um comportamento desejável se tratando de peças fabricadas por conformação mecânica por se manter peças com características sob

controle e volume constante. É comum no projeto de ferramentas o projeto de geometrias que evitem um retorno elástico e ocasionem um encruamento do material, impedindo um completo relaxamento das tensões residuais após o descarregamento, conforme LAJARIN (2012).

Desta forma, buscou-se assegurar que a tampa metálica será estampada sem defeitos como ruptura, enrugamento ou orelhamento. Na Figura 17 é possível visualizar a Curva Limite de Conformação resultado do estudo computacional, que disponibiliza informações sobre as deformações que o material consegue suportar nas condições de contorno estabelecidas e conforme as deformações plásticas ao longo do processo de conformação, a partir da combinação das suas deformações da combinação principais máximas (φ_1) e mínimas (φ_2), segundo BANABIC (2013).

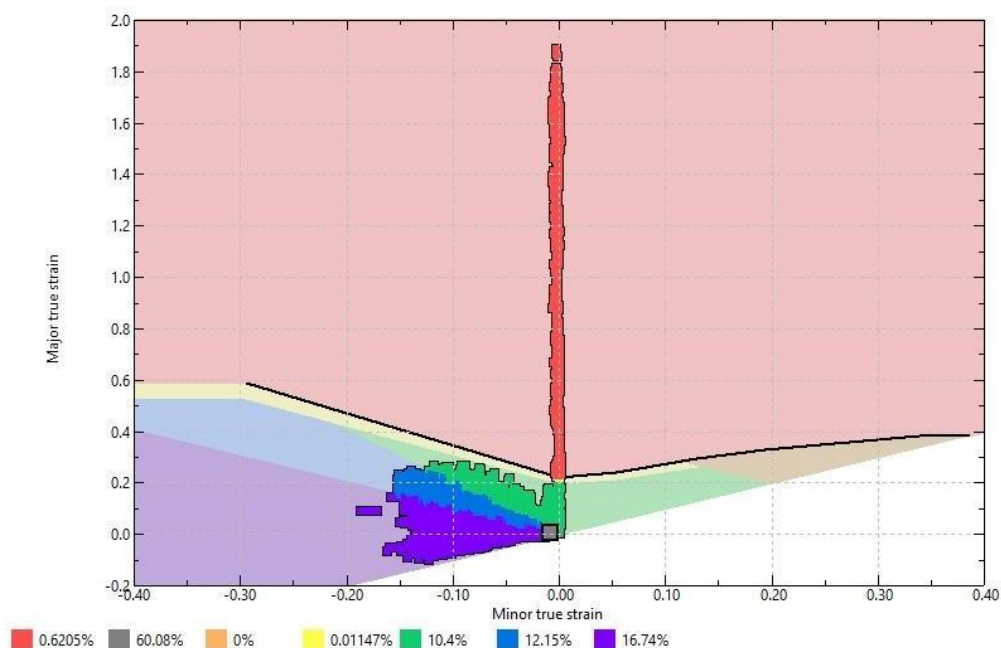


Figura 17 – Tela das Curvas Limites de Conformação (CLC) da simulação computacional coletadas do programa QForm (Autor, 2024).

Na definição das Curvas Limites de Conformação para a Folha de Flandres, a linha preta define o ponto crítico entre a deformação segura e o início de falhas, uma informação crucial para que se verifique se a estampagem de um componente resultará em uma peça confiável para a aplicação final. Desta forma, fica evidente que há uma região na

estampagem extremamente suscetível à falha, conforme a área vermelha em tom mais escuro mostrada na Figura 17.

Ainda, observa-se que as regiões abaixo da curva limite e da região vermelha, apresentam condições seguras para conformação, enquanto as regiões acima da curva, apresentam alta probabilidade de acontecer falha iminente. Destaca-se que a região em vermelho escuro, ocorre no estágio de deformação plana, no qual ocorrem tensões trativas na direção radial, enquanto na direção circunferencial as tensões são nulas. Geralmente, o modo de deformação plana, apresenta o menor limite de estampabilidade (HU; MARCINIAK; DUNCAN, 2002).

Uma das vantagens da simulação computacional é a interpretação gráfica, demonstrada na Figura 18, no qual facilita a tomada de decisão e permite que junto com outros resultados, como resultados experimentais, por exemplo, complementem o entendimento para conclusões assertivas e que realmente impactem positivamente na melhoria do processo ou produto, também na solução de problemas do mesmo.

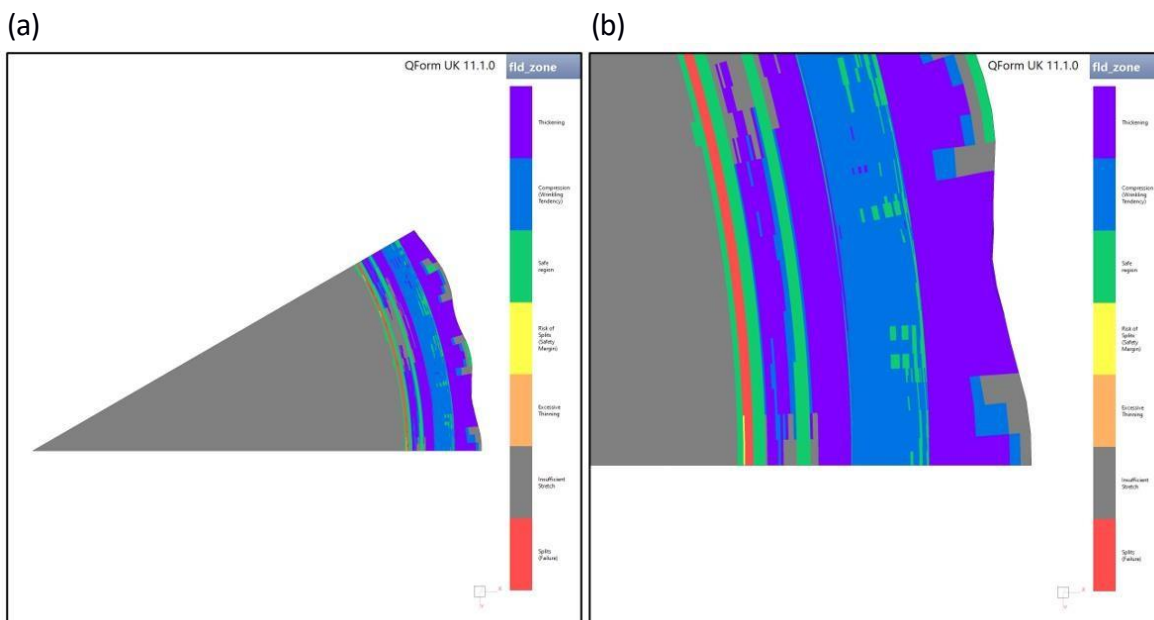


Figura 18 – (a) Tela de resultados gráficos coletadas do programa QForm. (b) Tela de resultados gráficos coletadas do programa QForm com ampliação de 10X para visualização da escala de cores (Autor, 2024).

A Figura 18, resultado da simulação computacional, deixa evidente que a região com coloração azul tende a gerar enrugamento, enquanto a zona de coloração vermelha tende ao rompimento do material e geração de defeito na tampa metálica. É importante salientar que condições de processo, como mudança de capacidade da prensa, utilização de lubrificantes e ajustes de ferramental podem modificar resultados. Por isso, a simulação computacional deve ser uma ferramenta a ser utilizada com outros métodos para que o produto tenha a melhor condição possível para cumprir a função na qual foi projetado.

De forma a complementar os resultados discutidos sobre a Curva Limite de Conformação e sobre visualização da distribuição das tensões, fez-se uso do recurso de histograma do programa QForm. O uso de histogramas para representar tensões em uma análise de engenharia é importante porque fornece uma visão clara e detalhada da distribuição das tensões na peça estudada, visto que as concentrações de tensões (ou *hot spots*) são regiões onde os valores de tensão são significativamente maiores. Também, permite visualizar, conforme a Figura 19, quais intervalos de tensões são predominantes, a fim de identificar rapidamente se existem tensões elevadas em uma parcela significativa ou mínima do material.

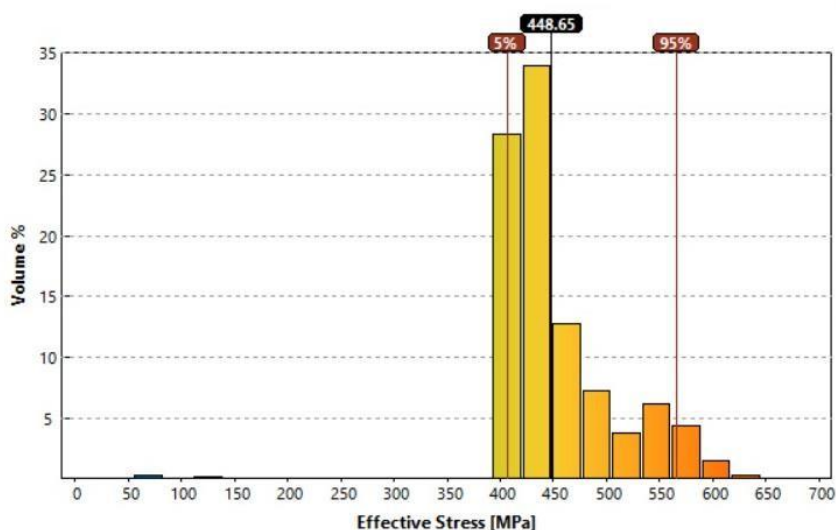


Figura 19 – Tela de histograma coletadas do programa QForm (Autor, 2024).

É possível perceber na Figura 19 que a maior parte do volume da peça apresenta tensões efetivas entre aproximadamente 400 MPa e 500 MPa, como evidenciado pelas barras mais altas do histograma. O intervalo com maior volume está centrado em torno de

448,65 MPa, próximo à média. A tensão máxima (653,82 MPa) é elevada e indica alta concentração de tensões, com alta probabilidade de falha. O desvio padrão de 63,55 MPa indica uma variação relativamente moderada, mas suficiente para exigir atenção em zonas críticas.

5.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Esta seção apresenta os resultados do ensaio de tração a partir da tensão máxima e alongamento encontrado. Cabe salientar, que geralmente o alongamento é apresentado em valores relativos (percentuais). No entanto, como este trabalho visa a análise conjunta com os resultados do ensaio Erichsen, que fornece resultados de deformação com valores absolutos (alongamento do ensaio de tração), os resultados deste ensaios foram equiparados para medida absoluta.

A Tabela 5 contempla os resultados do ensaio de tração, das variáveis tensão máxima e alongamento, no qual os corpos de prova foram divididos classificados em três grupos, um grupo para cada ângulo em relação à laminação.

Ângulo	Identificador	Tensão máxima (MPa)	Alongamento (mm)
0°	CP1	406,70	16,45
	CP2	399,32	15,85
	CP3	406,53	19,74
	CP4	416,88	16,65
	CP5	395,34	16,60
	CP6	400,07	12,96
45°	CP1	404,51	13,27
	CP2	406,61	9,03
	CP3	405,21	11,97
	CP4	393,36	14,82
	CP5	393,09	13,66
	CP6	395,21	14,75
90°	CP1	410,14	16,02
	CP2	402,19	15,02
	CP3	384,76	14,20
	CP4	391,32	15,01
	CP5	390,49	12,78
	CP6	393,01	16,76
Média da Tensão Máxima das amostras a 0° = 404,14 MPa			
Média da Tensão Máxima das amostras a 45° = 399,66 MPa			
Média da Tensão Máxima das amostras a 90° = 395,31 MPa			
Média do Alongamento das amostras a 0° = 16,37 mm			
Média do Alongamento das amostras a 45° = 12,91 mm			
Média do Alongamento das amostras a 90° = 14,96 mm			

Tabela 5 – Resultados do ensaio de tração (Autor, 2024).

Os valores de tensão encontrados na Tabela 5, referente ao ensaio de tração, (variando de 390,49 MPa a 416,88 MPa), possuem um desvio padrão de 8,01 para a tensão máxima e 2,27 para o alongamento, valor que está alinhado e coerente com os dados reportados por estudos sobre materiais metálicos semelhantes utilizados na conformação mecânica de Folha de Flandres T52 e T59, no qual tiveram desvio padrão de 5 e 9, respectivamente. Para o alongamento, no qual se obteve um valor médio de 33,75%, a diferença foi mais significativa, porém, coerente com o estudo citado (MORENO FILHO, 2007).

O valores de 9,03 mm a 19,74 mm sobre o alongamento, resultaram em maior variabilidade na deformação, principalmente na comparação com os resultados da simulação numérica, que prevê um comportamento homogêneo do material, visto que a composição química e especificações de processo são condições estáticas no estado simulacional, não contemplando as possíveis tolerâncias de composição química, ou mesmo defeitos de microestrutura. Essa diferença ressalta a importância da avaliação experimental para validar modelos computacionais.

5.3. ENSAIO DE ANISOTROPIA

A Figura 20 ilustra os resultados do ensaio de anisotropia, a partir da análise de 9 corpos de provas, sendo 3 corpos de prova para cada ângulo em relação à laminação. Sobre os ângulos ensaiados, 0°, 45°, 90°, obteve-se uma anisotropia média (r_m) a 1,33, 1,25 e 1,44, respectivamente. Materiais que após ensaio de anisotropia tem valor igual a 1 são denominados isotrópicos, significando que as propriedades mecânicas são iguais em todas direções, enquanto materiais com índice de anisotropia diferente de 1 são chamados de anisotrópicos.

Corpo de Prova	Espessura (mm)	Compr. Inicial (L0) (mm)	Largura Inicial (W0) (mm)	Compr. Final (Lf) (mm)	Largura Final (Wf) (mm)	Fator R	Ângulo
CP 1	0,360	50,00	12,720	57,38	11,770	1,2934	0
CP 2	0,360	50,00	12,770	57,39	11,770	1,4502	0
CP 3	0,360	50,00	12,730	57,38	11,790	1,2581	0
CP 4	0,360	50,00	12,490	57,39	11,590	1,1848	45
CP 5	0,360	50,00	12,510	57,37	11,590	1,2486	45
CP 6	0,360	50,00	12,530	57,39	11,580	1,3377	45
CP 7	0,360	50,00	12,720	57,38	11,730	1,4300	90
CP 8	0,360	50,00	12,730	57,37	11,730	1,4697	90
CP 9	0,360	50,00	12,710	57,39	11,720	1,4293	90

Figura 20 – Captura de tela de relatório gerado pelo programa TESC (Autor, 2024).

Materiais com índice de anisotropia inferior a 1 são classificados como materiais que não possuem boa estampabilidade, porque apresentam uma deformação maior na espessura do que na largura para a mesma sollicitação mecânica, ocasionando reduções excessivas e críticas na direção da espessura (SCHAEFFER, 2004). Materiais anisotrópicos com valor de anisotropia média (r_m) maior que 1 indicam que a redução na espessura é menor do que na largura, para o presente estudo, o r_m foi de 1,32, calculado pela Equação 4.

$$r_m = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ} + 2 \times r_{45^\circ}}{4} \quad (4)$$

Onde:

r_m : Valor médio de anisotropia de um material.

r_{0° : índice de anisotropia do corpo de prova a 0° .

r_{45° : índice de anisotropia do corpo de prova a 45° .

r_{90° : índice de anisotropia do corpo de prova a 90° .

Observou-se que os valores de anisotropia normal aumentam com o aumento do grau de deformação, visto que quanto maior for a intensidade dos planos, maiores serão os valores de r_m . Segundo BRESCIANI (2011), isso é positivo porque para alcançar uma melhor condição de estampabilidade, deve-se buscar, durante a fabricação da chapa por laminação, obter altos valores do índice de anisotropia normal média e baixos valores para o índice de anisotropia planar. O r_m maior ou menor indica que o material será mais resistente ou mais fraco em determinadas direções, o que pode causar concentrações de

tensões nessas regiões e, assim, levar à formação de pontos críticos de falha em áreas com menor resistência.

Não tão crítico como uma fratura, mas de suma importância porque pode gerar peças com defeito, o resultado da variação da anisotropia planar (Δ_r). A análise computacional mostrou a possibilidade de formação de rugas em algumas regiões, bem como o cálculo, utilizando a Equação 5, corrobora com esta interpretação, resultando em um $\Delta_r=0,13$. Segundo RODRIGUES MARTINS (2005), para evitar o aparecimento de rugas é recomendável que a variação planar do material seja próxima de zero.

$$\Delta_r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2 \times r_{45^\circ}}{2} \quad (5)$$

Onde:

Δ_r : Variação de anisotropia planar.

r_{0° : índice de anisotropia do corpo de prova a 0° .

r_{45° : índice de anisotropia do corpo de prova a 45° .

r_{90° : índice de anisotropia do corpo de prova a 90° .

Um valor de $\Delta_r=0,13$ indica que há uma variação moderada da anisotropia, sugerindo que o material apresenta variações significativas nas propriedades, mas não em uma escala muito ampla. Uma solução prática para casos de baixo Δ_r é o projeto de um bom sistema de prensa chapas no ferramental de estampagem, de forma a prevenir concentrações excessivas de tensão nas bordas da peça e, assim, minimizar o risco de orelhamento e permitir que o material escoe de maneira mais controlada e previsível.

A Figura 21, possui quatro quadrantes para analisar o comportamento de tensões e anisotropia, geralmente se refere ao diagrama de tensões biaxiais ou diagrama de tensões de Hill, que é usado para descrever como um material anisotrópico responde a diferentes estados de tensão. Esse tipo de gráfico é comum no estudo de chapas metálicas, como folhas de flandres, e no comportamento plástico de materiais.

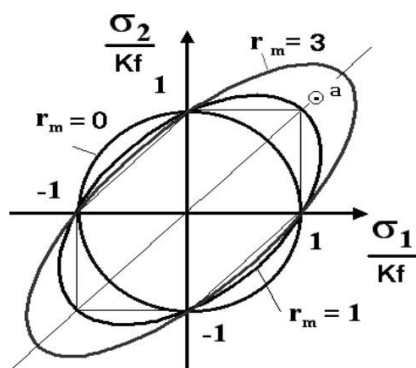


Figura 21 – Influência da anisotropia nas tensões (Adaptado de Schaeffer, 2004).

Os resultados de anisotropia que apresentam $r_{90^\circ} > r_{0^\circ} > r_{45^\circ}$, exatamente como os resultados deste estudo, são significados de uma capacidade de aumento de deformação no 2º quadrante e uma capacidade de reduzida no 1º quadrante. Isso significa que a curva CLC se rotaciona no sentido horário.

Uma forma de analisar a coerência dos resultados do estudo computacional com as tensões encontradas no ensaio experimental, é analisar o comportamento das curvas, conforme a Figura 22, a fim de entender se há correlação e similaridade no comportamento de ambos casos.

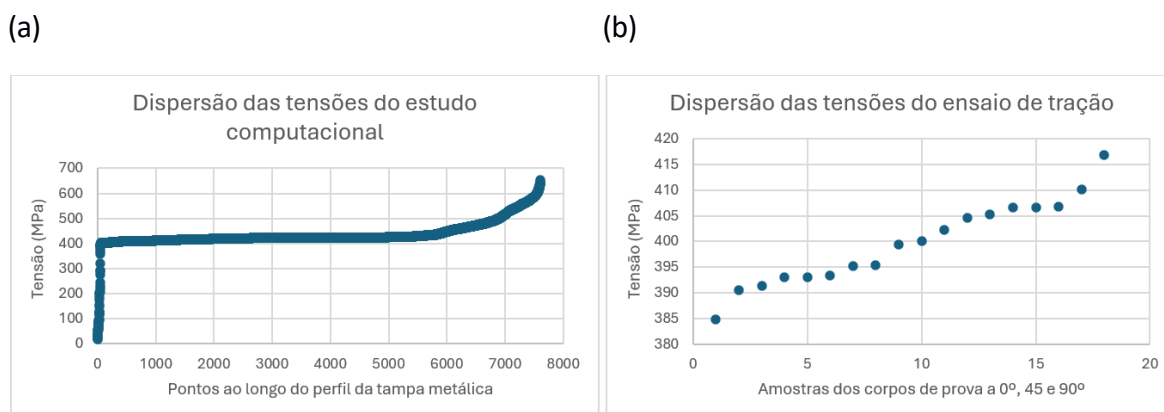


Figura 22 – Correlação entre as tensões de estudo computacional e ensaio de tração: (a) Dispersão das tensões do estudo computacional. (b) Dispersão das tensões do ensaio de tração (Autor, 2024).

O estudo computacional apresenta uma faixa de tensões maior muito devido ao alto número de pontos de tensão retirados do programa, de forma a ter a informação mais

precisa possível. Isso é de suma importância porque a geometria é enquadrada como geometria complexa e as distribuições de carga são heterogêneas, enquanto o ensaio de tração mede uma propriedade uniforme do material. Ambos os estudos mostram zonas de anisotropia, com tensões dependentes da direção ou da localização. Isso sugere que o modelo computacional está capturando, em certa medida, as características anisotrópicas do material.

No gráfico computacional, o aumento nas extremidades pode ser um efeito da geometria (bordas e transições geométricas) ou de tensões residuais introduzidas pelo processo de fabricação. Já no gráfico experimental, a diferença entre direções reflete a microestrutura do material, resultante do processo de fabricação, como a orientação preferencial de grãos. O estudo experimental e o computacional são complementares e indicam coerência no comportamento geral do material. Apesar de diferentes escalas de tensões, ambos mostram a relevância da anisotropia e a influência das direções de carregamento.

Ainda sobre a comparação dos resultados das tensões encontradas na simulação computacional e no ensaio, por se ter uma população de pontos de tensão imensamente maior na simulação, a curva apresenta resultados com excelente precisão. Já o número de pontos de tensão, um valor para cada amostra do ensaio, ou seja, 18 pontos, mostra que a tendência segue a mesma do estudo computacional, com uma variabilidade que pode se entender que é devido a um número bem mais reduzido de ponto de tensão, em relação do estudo computacional. Segundo o Teorema Central de Limite (TCL), quanto maior for o tamanho amostral, mais os resultados e as curvas tenderão a uma distribuição normal (BUSSAB, 2003).

5.4. ENSAIO DE ERICHSEN

Os resultados obtidos por meio do ensaio Erichsen são apresentados pelas variáveis tensão máxima e deformação, permitindo a análise do comportamento mecânico do material utilizado na tampa metálica. A Tabela 6 correspondente aos resultados dos dados experimentais.

Identificador	Tensão máxima (MPa)	Deformação (mm)
CP1	0,94	6,96
CP2	0,92	6,94
CP3	0,91	6,81
CP4	1,01	6,66
CP5	0,96	6,66
CP6	1,02	6,86
CP7	0,94	6,91
CP8	0,94	6,93
CP9	0,99	6,74
CP10	0,94	7,03
CP11	0,97	7,19
CP12	1,00	7,10
CP13	0,93	6,96
CP14	0,94	6,85
CP15	0,99	6,95
CP16	1,03	6,78
CP17	0,87	6,40
CP18	0,93	5,90
CP19	1,04	6,56
CP20	0,93	6,82

Tabela 6 – Resultados do ensaio Erichsen (Autor, 2024).

A Tabela 6 apresenta os resultados que foram encontrados para os 20 corpos de prova. A média da tensão máxima foi de 0,96 MPa e a deformação 6,80 mm. A variável deformação, que também é conhecida como índice Erichsen, é a variável que confronta a variável alongamento do ensaio de tração neste estudo, pois ambas indicam o deslocamento final menos o deslocamento inicial do corpo de prova durante o ensaio. Foi encontrado um desvio padrão de 0,044 MPa para a tensão máxima e 0,273 mm para o alongamento. O baixo desvio padrão indicou que os resultados do ensaio são confiáveis e que tendem estar próximos da média de um valor esperado.

Da mesma forma que os resultados do ensaio de tração, os resultados deste ensaio apresentaram um baixo desvio padrão, ainda sim, não é possível identificar qual das direções tem maior restrição à deformação, visto que não há distinção de direção da laminação em amostras no ensaio Erichsen, por serem em forma de discos (blanque circular).

A grande diferença dos resultados encontrados, considerando a média dos valores da tensão máxima do subgrupo do ensaio de tração de 399,70 MPa em relação à média de 0,96 MPa do ensaio Erichsen, corresponde a uma razão de aproximadamente 416 vezes, ou seja, uma magnitude relevante. Sobre a média dos resultados do alongamento do ensaio de tração e deformação do ensaio Erichsen, tem-se respectivamente, 14,74 mm e 6,80 mm, gerando uma razão menor entre os valores. Em uma primeira análise parece, gera-se um questionamento sobre o motivo por quais valores são tão discrepantes. No entanto, a diferença é justificada devido à diferença de geometria entre os corpos de prova, no qual tem-se uma área de 4,5 mm² do o corpo de prova do ensaio de tração e 6.358,5 mm² do corpo de prova do ensaio Erichsen. Como a tensão é definida por força dividida pela área (F/A), o quociente muito mais elevado do cálculo da tensão do ensaio Erichsen é justificado e corrobora com os resultados encontrados no ensaio realizado. Ainda, sobre a geometria e dimensões dos corpos de prova, deve-se convencionar que a espessura da chapa é pouco relevante, pois considerando a conservação do volume, a espessura é pouca significativa (LÜDER, 2015).

A partir das diferenças consideráveis encontradas entre a tensão máxima e alongamento entre o ensaio de tração e ensaio Erichsen, foi realizada correlação. Na Figura 23 a variável tensão máxima do ensaio de tração está caracterizada no cálculo como Tensão_TRA e a tensão máxima do ensaio Erichsen como Tensão_ER. Enquanto, a variável alongamento está caracterizada como Alongamento_TRA para o ensaio de tração e Alongamento_ER para o ensaio Erichsen.

(a)

(b)

<pre>Pearson's product-moment correlation data: dados\$Tensao_TRA and dados\$Tensao_ER t = -0.095267, df = 16, p-value = 0.9253 alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0 95 percent confidence interval: -0.4852856 0.4480405 sample estimates: cor -0.02381012</pre>	<pre>Pearson's product-moment correlation data: dados\$Alongamento_TRA and dados\$Alongamento_ER t = -0.77524, df = 16, p-value = 0.4495 alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0 95 percent confidence interval: -0.6035275 0.3035669 sample estimates: cor -0.1902694</pre>
---	---

Figura 23 – Resultado do estudo de correlação entre tensão máxima do ensaio de tração. (b) Resultado sobre a variável alongamento do ensaio Erichsen (elaborado pelo Autor).

A correlação linear entre a tensão máxima dos ensaios é negativa, com estimativa de aproximadamente 0,023. Quando a tensão máxima do ensaio de tração aumenta, a tensão máxima do ensaio Erichsen tende a diminuir em aproximadamente 2%, e vice-versa. A correlação foi demonstrada fraca, ou seja, muito próxima a zero. A correlação linear entre o alongamento dos ensaios também é negativa, com estimativa de 0,1903. Quando o alongamento do ensaio de tração aumenta, o alongamento do ensaio Erichsen tende a diminuir em aproximadamente 19%, e vice-versa.

A Figura 24 apresenta a visão gráfica sobre a correlação entre a variável tensão máxima dos dois ensaios. Após a realização de um teste de significância para a estimativa da correlação linear, foi obtido valor de p-valor maior que 0,05. Portanto, a correlação estimada não é estatisticamente significativa na população ou não é estatisticamente diferente de zero. Já a correlação entre o alongamento dos ensaios, apesar de ser considerada baixa, ainda não é tão próxima a zero.

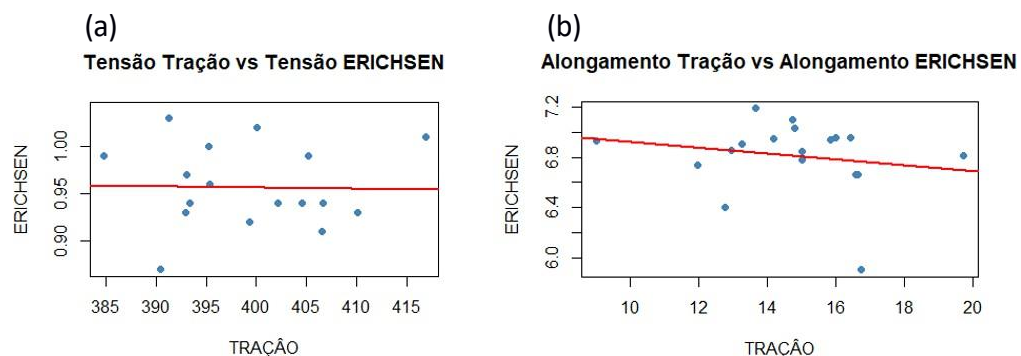


Figura 24 – (a) Gráfico da correlação entre tensão máxima dos ensaios e (b) Gráfico da correlação entre o alongamento dos ensaios (Autor, 2024).

A Figura 24 ilustra as linhas de tendência na cor vermelha e os pontos são referentes à dispersão ao redor da linha de tendência. A metodologia empregada se trata de uma análise de correlação simples, onde se buscou determinar a relação linear entre duas variáveis.

A fim de compreender o comportamento de forma mais minuciosa, é importante citar que no estiramento biaxial, como ocorre no ensaio Erichsen, onde ocorrem tensões radial e tangencial, ambas tensões podem ser diferentes devido à distribuição de forças de deformação na chapa, nas quais surgem em direções distintas: tensão radial (σ_r), na qual

age na direção que vai do centro da área deformada até a borda da chapa e a tensão tangencial (σ_t), na qual age ao longo da circunferência da área deformada, perpendicular à tensão radial.

Sob determinadas condições, especialmente em situações de deformação biaxial simétrica, como no ensaio de Erichsen, as tensões radial e tangencial podem apresentar valores aproximados, embora não sejam necessariamente idênticas. A magnitude da diferença entre essas tensões é influenciada por variáveis como o grau de deformação, a geometria do punção e a espessura da chapa. A fórmula para a tensão radial também é semelhante à fórmula da tensão tangencial, dependendo da forma como a força é distribuída radialmente na chapa. A Equação 6 para a tensão radial (σ_r) é:

$$\sigma_r = \frac{F}{2\pi \cdot t \cdot r} \quad (6)$$

Onde,

t = espessura da chapa

r = raio do punção

Esta fórmula também pode ser aplicada à tensão tangencial (σ_t), já que ambas as tensões são afetadas de maneira similar pela geometria do punção esférico e pela espessura da chapa. Em diversas situações de estiramento biaxial, como no ensaio Erichsen, a tensão radial (σ_r) e a tensão tangencial (σ_t) tendem a ser aproximadamente equivalentes, em virtude da simetria presente no processo de deformação. Isso acontece porque a chapa se deforma de maneira uniforme ao longo da superfície esférica formada pelo punção e porque tanto a tensão radial quanto a tensão tangencial dependem das mesmas variáveis: força aplicada, raio do punção e espessura da chapa. A Equação 2 apresenta o cálculo com base nos resultados gerais (médias) do ensaio de tração é:

$$\sigma_r = \frac{F}{2\pi \cdot t \cdot r} = \frac{6112}{2\pi \cdot 0,36 \cdot 10} = 270,3MPa \quad (7)$$

Dados:

Força aplicada: $F=6112$ N

Espessura da chapa: $t=0,36$ mm

Raio do punção:

$R=10$ mm

Para este caso, considera-se tensão radial (σ_r) = tensão tangencial (σ_t). Isso reflete a simetria do estiramento biaxial. No entanto, se houver anisotropia no material ou se o estiramento não for completamente simétrico, as tensões radial e tangencial podem diferir. No ensaio Erichsen, a tensão radial e a tensão tangencial podem ser iguais ou muito próximas em magnitude devido à simetria do processo de deformação. No entanto, em condições específicas, como anisotropia do material ou deformações não homogêneas, essas tensões podem se diferenciar. Portanto, é válido utilizar a aproximação para determinar as tensões no ensaio Erichsen, ressaltando as ressalvas com relação a anisotropia do material, que pode ser observada através dos ensaios de tração.

Ainda, pode-se supor que por meio de um recozimento contínuo se tenha uma variação inferior entre os ângulos estudados e com isso o processo de estampagem tenha um melhor resultado, ou seja, mais uniforme. No entanto, como qualquer processo de fabricação, o recozimento contínuo tem variações e tolerâncias estabelecidas para a condição final do material.

Estudo anterior utilizando folha de flandres T59 CA LEX, do fornecedor Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), comparou um suposto novo material, T59 CA, que por ser processado por recozimento de forma contínua teria uma redução da variação entre os ângulos de 0° , 45° e 90° , porém, tal trabalho mostrou que, apesar do material T59 CA LEX ser processado em caixas, ainda assim possui uma melhor conformabilidade VIEIRA *et al* (2004). Portanto, o simples fato da forma que ocorre o recozimento pode não garantir que a estambabilidade seja suficiente, ou seja, pode ser que mesmo com recozimento contínuo não se consiga um resultado esperado e que seja necessário estudar uma nova combinação de características de folha de flandres com outra espessura, dureza ou camada de estanho.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado a análise computacional do processo de estampagem da tampa metálica em conjunto com a caracterizações das propriedades mecânicas da folha de flandres a partir de ensaio de tração, anisotropia e Erichsen, no qual visou investigar causas para o rompimento do material com espessura de 0,36 mm. A partir das diferenças encontradas entre a tensão máxima e alongamento entre o ensaio de tração e Erichsen, foi realizada correlação linear para compreensão e interpretação dos resultados.

Foi comprovado com a aplicação do teste de significância que o ensaio Erichsen não é recomendado análise de propriedades mecânicas, pois foi atestado que a tensão máxima e alongamento dos ensaios não tendem a um mesmo valor. O ensaio de tração se mostrou o ensaio mais adequado para a comparação com o estudo computacional e investigação dos motivos sobre o rompimento da tampa metálica.

A fraca significância e correlação das variáveis do ensaio Erichsen não permite, de forma alguma, que fossem base para correlação com a simulação computacional. No entanto, a comparação de dois modelos ou espessuras de folhas de flandres pelo ensaio Erichsen com a finalidade de simplesmente descobrir qual material tem a maior estampabilidade ou índice continua sendo válida.

Verificou-se que os resultados dos ensaios de tração foram coerentes com outro trabalho científico publicado por MORENO FILHO

(2007), também sobre folha de flandres, e que os resultados da simulação computacional e do ensaio de anisotropia, apresentaram conclusões semelhantes e que sinalizam possíveis problemas e regiões de fissuras e enrugamento, comprometendo a função do componente tampa metálica. Durante o estudo das Curvas Limites de Conformação (CLC), no qual se busca que cada região tenha seus pares de deformação abaixo da curva limite, de forma que assegure a funcionalidade do componente e a isenção de falhas, se viu como resultado um ponto crítico, indicado e denominado como Região B, conforme imagem de resultado do estudo computacional.

O rompimento da tampa metálica no local ocorrido na prática diverge do estudo computacional apenas pela localização que se encontra no perfil do componente. No entanto, demonstra e aponta que a condição crítica está localizada na Região B. Possível variação e deslocamento desse ponto de rompimento pode ser devido à tolerância da dureza do material, que pode não estar uniforme ou mesmo dentro da tolerância especificada no projeto. Por não ocorrer recristalização durante o processo de laminação a frio, tem-se maior dureza e menor ductilidade. Por isso, recorre-se ao recozimento com o objetivo de recuperação das propriedades originais, proporcionando melhores condições para as tolerâncias de processo e produto (CHIAVERINI, 1986).

O processo de recozimento da bobina de flandres ocorreu em caixas, no qual a bobina passou pelo processo térmico. Quando o recozimento é realizado por não seja não contínuo, ou seja, por batelada em caixas como é o caso deste estudo, é necessário um controle de variáveis muito mais rigoroso porque é necessário que todas regiões da bobina estejam com a dureza dentro da tolerância estimada para uma folha de flandres com dureza T57. Por isso, pode-se supor que o deslocamento do ponto crítico no estudo simulacional pode ter ocorrido por uma variação de dureza do material, e, para aprofundamento, sugere-se novo estudo que simule a dureza do material na condição mínima e máxima de dureza. Certamente, o resultado da simulação proposta junto com o resultado da simulação realizada, possibilitará um perfeito entendimento de como as tensões críticas se deslocam na tampa metálica a partir do momento que os valores de dureza transitam entre os valores mínimos e máximos da especificação.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Avanço na caracterização dos corpos de prova considerando amostras que tiveram recozimento por caixa *versus* recozimento contínuo;
2. Análise da composição química das amostras como variável adicional ao estudo.

8. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16281:2014. **Determinação do índice de embutimento em chapas de aço pelo método Erichsen modificado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6665 – Folhas laminadas de aço-carbono revestidas eletroliticamente com estanho ou cromo ou não revestidas – Especificação**. São Paulo: ABNT, 2006.

ASTM. **E 517-00 – Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal**. 2010.

BANABIC, D. et al. **Development of a new procedure for the experimental determination of the forming limit curves**. CIRP Annals: Manufacturing Technology, Cluj-Napoca, p. 255-258, 2013.

BATHE, K. J. **Finite element procedures**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.

BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I. B. da; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. **Conformação plástica dos metais**. 6. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2011.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. L. **Estatística básica**. 5. ed. São Paulo: Saraiva, 2003.

CABRAL, A. C. D. A. **A embalagem e os novos canais de venda**. In: BRASIL PACK TRENDS 2005 – EMBALAGEM DISTRIBUIÇÃO E CONSUMO. Anais... Campinas: CETEA/ITAL, 2000. p. 49-68.

CALLISTER, W. D. Jr.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 10. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2019.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. Vol. 2. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

CIMM. **A estampabilidade dos materiais metálicos**. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6487-a-estampabilidade-dos-materiais-metalicos. Acesso em: 10 jun. 2024.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. **Folhas metálicas: estrutura do revestimento**. Disponível em: <https://www.csn.com.br/homepage/acos-planos/folhas-metalicas/>. Acesso em: 10 jun. 2023.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica**. Vol. III. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

DANTAS, S. T.; ANJOS, V. D. A.; SEGANTINI, E.; GATTI, J. A. B. **Avaliação da qualidade de embalagens metálicas: aço e alumínio**. Campinas: CETEA/ITAL, 1996. 313 p.

DAVIS, J. R. **Tensile testing**. 2. ed. Materials Park, OH: ASM International, 2004.

FERRARINI, J. L. **Caracterização de chapas metálicas para estampagem**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

HU, S. J.; MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J. L. **Mechanics of sheet metal forming**. Woburn: Elsevier Science, 2002.

LAJARIN, S. F. **Influência da variação do módulo de elasticidade na previsão computacional do retorno elástico em aços de alta resistência**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

LANGE, K. **Forming handbook**. New York: McGraw Hill and SME, 1993.

LOBÃO, M. C. **Determinação de curvas limite de conformação por procedimentos experimentais e simulação numérica do processo de estampagem**. 2003. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

LÜDER, O.; ARNDT, J. **Influence of sheet thickness on formability testing: a discussion on volume conservation and stress distribution**. International Journal of Material Forming, 2015.

MECKING, H.; KOCKS, U. F. **Kinetics of flow and strain-hardening**. Acta Metallurgica, v. 29, n. 11, p. 1865–1875, 1981.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 7th ed. New York: Wiley, 2018.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 2. ed. São Paulo: Bookman, 2004. 931 p.

PAUL, S. K. **Controlling factors of forming limit curve: a review**. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, v. 2, 2021.

PERINI, F. G. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados**. 2008. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia mecânica**. [S.l.]: Escolar, 2005.

SANTOS, A. **Análise de textura cristalográfica por difração de raios X em aços IF com diferentes adições de titânio, nióbio e fósforo**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2009.

SCHAEFFER, L. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SILVEIRA NETTO, S. E. **Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação**. 2018. 90 p. Dissertação (Mestrado Acadêmico) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

TEKKAYA, A. E.; MARTINS, P. A. F. **Accuracy, reliability and validity of finite element analysis in metal forming: a user's perspective**. Engineering Computations, v. 26, n. 8, p. 1026-1055, 2009.

VIEIRA, J. F.; SOUZA, P. R. C. de; CABRAL, C. A. O.; PLAUT, R. L. **Caracterização da estampabilidade de folhas de flandres**. In: 41º Seminário de laminação – Processos e produtos laminados e revestidos, v. 41, 2004.

YOSHIDA, K. **Classification and systematization sheet metal press forming process**. IPCR, n. 1514, v. 53, p. 126-187, 1959.