

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

MATHEUS DE BRITO GREGOLIS

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS FUNDAMENTOS DOS PROCESSOS
DE LAMINAÇÃO A FRIO E A QUENTE E CÁLCULOS ANALÍTICO E
NUMÉRICO DOS PASSES DE LAMINAÇÃO**

Ilha Solteira - SP

2026



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS DE BRITO GREGOLIS

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS FUNDAMENTOS DOS PROCESSOS DE
LAMINAÇÃO A FRIO E A QUENTE E CÁLCULOS ANALÍTICO E
NUMÉRICO DOS PASSES DE LAMINAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira,
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Ângelo Menezes

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G821r Gregolis, Matheus de Brito.
Revisão bibliográfica dos fundamentos dos processos de laminação a frio e a quente e cálculos analítico e numérico dos passes de laminação / Matheus de Brito Gregolis. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
105 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2026

Orientador: Miguel Ângelo Menezes

Inclui bibliografia

1. Laminação. 2. Conformação mecânica. 3. Passos de laminação. 4. Potência de laminação. 5. Automatização. 6. Python.

ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos 27 dias do mês de Julho do ano de dois mil e vinte e seis, as 18h30min, por videoconferência, no Departamento de Engenharia Mecânica, do Campus da UNESP, da Faculdade de Ilha Solteira, o discente Matheus de Brito Gregolis, matriculada sob o número 191053325, tendo como banca examinadora, o orientador Prof. Ph.D. Miguel Ângelo Menezes, o Engenheira Mecânica Lorena Silva Neris Caron (Whirlpool) e o D. Sc. Engenheiro Mecânico Ricardo Kazuo Itikava (Faculdade Anhanguera - São José dos Campos), apresentou o Trabalho de Graduação intitulado: "*Revisão Bibliográfica dos Fundamentos dos Processos de Laminação a Frio e a Quente e Cálculos Analítico e Numérico dos Passes de Laminação*", obtendo o CONCEITO APROVADO e NOTA FINAL: (10,0) Dez.

Por ser verdade, os membros da banca examinadora e o discente assinam em seguida.



Prof. Ph.D. Miguel Ângelo Menezes (Orientador)

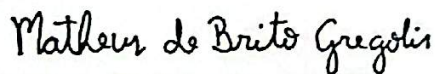
gov.br

Documento assinado digitalmente
LORENA SILVA NERIS CARON
Data: 27/07/2026 20:18:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng^a. Mec. Lorena Silva Neris Caron (Whirlpool)



D. Sc. Engenheiro Mecânico Ricardo Kazuo Itikava (Anhanguera - SJC)



Matheus De Brito Gregolis (Discente)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por sempre me agraciar com o privilégio de ter por perto pessoas que me elevam e por me guiar nas decisões corretas da vida e acompanhar nas consequências das escolhas incorretas.

Aos meus pais, Márcia Moimas de Brito e Sérgio Gregolis, e a minha irmã, Stephanie de Brito Gregolis Lovo, minha eterna gratidão. Vocês são a base de tudo o que conquistei e os principais responsáveis por eu estar onde estou e ser a pessoa que eu sou hoje. Nada disso teria sido possível sem o amor, o incentivo e o apoio incondicional de vocês me proporcionam todos os dias, amo vocês.

Agradeço aos meus amigos que moraram comigo nas Repúblicas Rep.Tente e Soberana, por compartilharem comigo os anos em que vivi em Ilha Solteira e por me ensinarem tantas lições sobre a vida. Sou grato por estarem presentes em minha caminhada, não apenas nos momentos de alegria, mas também nas dificuldades que a faculdade e a vida longe de casa me apresentaram.

Em especial, aos amigos que acompanharam o desafio de perto, estando presentes do início ao fim da minha graduação. Obrigado Danilo Albuquerque Ribeiro, César A. Correia, Pedro L. Coelho, Marcos A. Gueshi Pires, João V. Durso Ferraz, pelo companheirismo e por estarem presentes sempre que precisei. Inclusive durante a elaboração deste trabalho, ajudando ativamente.

Por fim, meu sincero agradecimento ao professor Miguel Ângelo Menezes, por aceitar me orientar, e ajudar com o pedido repentino de apresentação, obrigado pelo senso de urgência e a preocupação em sempre priorizar o bem do aluno.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para esta conquista, meu muito obrigado.

"Se eu vi mais longe, foi por estar sobre os ombros de gigantes."

— *Isaac Newton*

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais conceitos relacionados aos processos de laminação a frio e a quente. Inicialmente, foram abordados aspectos como a importância da laminação para a indústria, os conceitos de tensão e deformação, as propriedades mecânicas e microestruturais dos materiais, incluindo discordâncias, tratamentos térmicos e temperatura homóloga. Também foram estudadas as diferenças entre os processos de laminação a quente e a frio, os principais defeitos de laminação e os fundamentos teóricos dos cálculos empregados no estabelecimento dos passes de laminação. Com base na revisão realizada, foi desenvolvido um algoritmo em linguagem *Python* com o objetivo de automatizar o processo iterativo de cálculo dos passes e da potência de laminação, tornando os cálculos mais rápidos, padronizados e menos suscetíveis a erros. Os resultados obtidos confirmam a experiência de que a redução percentual na laminação é proporcional ao valor da carga de separação, ou seja, as maiores reduções ocorrem no desbaste, para maiores níveis de carga, conforme o número de passes aumenta. O contrário é observado nos passes de acabamento. Portanto, os resultados demonstram a aplicabilidade da ferramenta computacional como suporte ao estudo e a análise de processos de laminação, evidenciando a integração entre os fundamentos da engenharia mecânica e as técnicas de programação.

Palavras chaves: Laminação; Conformação mecânica; Passos de laminação; Potência de laminação; Automatização; *Python*.

ABSTRACT

This work presents a literature review on the main concepts related to metal forming, with a focus on the rolling process. Initially, topics such as the importance of rolling to industry, the concepts of stress and strain, the mechanical and microstructural properties of materials, including dislocations, heat treatments, and homologous temperature, were addressed. The differences between hot rolling and cold rolling processes, the main rolling defects, and the theoretical foundations of the calculations used in rolling pass design were also studied. Based on the literature review, a Python algorithm was developed to automate the iterative calculation process of rolling passes and rolling power, making the calculations faster, standardized, and less susceptible to errors. The results obtained confirm the empirical observation that the percentage reduction during rolling is proportional to the separation force; specifically, the greatest reductions occur during roughing—associated with higher load levels—as the number of passes increases. The opposite trend is observed during finishing passes. The results demonstrate the applicability of the computational tool as a support for the study and analysis of rolling processes, highlighting the integration of mechanical engineering fundamentals with programming techniques.

Keywords: Rolling; Metal Forming; Rolling Passes; Rolling Power; Automation; Python.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de aço dos principais setores consumidores em 2024	1
Figura 2 - Produção mundial de aço bruto em 2024	2
Figura 3 - Faturamento da indústria siderúrgica no terceiro semestre de 2025	3
Figura 4 – Limites dimensionais dos produtos planos	4
Figura 5 - Armazenamento de produtos planos	5
Figura 6 - Chapa conformada como capô para utilização automobilística	6
Figura 7 - Ranhuras estampadas para absorção de impacto	7
Figura 8 - Aplicação de chapas laminadas em aeronaves	8
Figura 9 - Laminados de Compósito- Metal	9
Figura 10 - Chapa fina conformada em gabinete	10
Figura 11 - Chapas de aço carbono revestidas	10
Figura 12 - Esquema ilustrativo da laminação contínua	11
Figura 13 - Esquema representativo do lingotamento + Laminação contínua	12
Figura 14 - Processo de laminação automatizado	13
Figura 15 - Conceito mecânico da laminação	15
Figura 16 - Tipos de Laminadores	17
Figura 17 - Cadeira de laminação	18
Figura 18 - Laminador planetário	18
Figura 19 – Tensões normais de compressão e tração	20
Figura 20 - Tenção cisalhante	20
Figura 21 - Área instantânea	21
Figura 22 - Deformação elástica	22
Figura 23 - Deformação plásticas	23
Figura 24 - Dutilidade e fragilidade	28
Figura 25 - Cálculo da Tenacidade	29
Figura 26 - Microestrutura cristalina	30
Figura 27 - Principais microestruturas metálicas	30
Figura 28 - Formação de grãos e contorno de grãos	31
Figura 29 - Discordância em cunha	32
Figura 30 - Discordância hélice	33
Figura 31 - Discordância mista	33
Figura 32 - Analogia da lagarta	34

Figura 33 - Deformação plásticas final	34
Figura 34 - encontro entre grãos de orientações diferentes	35
Figura 35 - Encruamento	36
Figura 36 - Recuperação, recristalização e crescimento de grãos	37
Figura 37 - Tensionamento não uniforme	40
Figura 38 - Deformação na laminação a quente	42
Figura 39 - Ondulação nas bordas	44
Figura 40 - Rolos fabricados fletidos	45
Figura 41 - Defeitos geométricos na espessura das chapas	45
Figura 42 - <i>Zipper Cracks</i>	46
Figura 43 – Embaralhamento, Trincas laterais e Fendilhamento	47
Figura 44 - Defeito Boca de jacaré	47
Figura 45 - Vazios e porosidades	48
Figura 46 - Segregações e Inclusões	49
Figura 47 - Defeito casca de laranja	49
Figura 48 - Bandas de Luders	50
Figura 49 - Forças atuando na laminação	51
Figura 50 - Gráfico de distribuição de pressão	53
Figura 51 - Geometria para determinar espessura máxima do laminador	55
Figura 52 - Trabalho na laminação	61
Figura 53 - Tratamento de dados	75
Figura 54 - Simulação e ajuste de espessura	76
Figura 55 - Cálculo dos passes e acabamento	77
Figura 56 -Interface homem máquina do algoritmo	78
Figura 57 - Resultados do passe de simulação e primeiro passe	78
Figura 58 - Resultados obtidos	79
Figura 59 - Gráfico em relação aos passes	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos produtos planos	4
Tabela 2 - Produtos da Laminação	16
Tabela 3 - Tipos de ensaios de dureza	27
Tabela 4 - Intervalo da temperatura homologa em relação ao processo	39
Tabela 5 - Resultados obtido para o cenário pelo algoritmo	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

LCM – Laminados de Compósito-Metal

LISTA DE SIMBOLOS

A	Área
A_0	Área original
A_f	Área final
F	Força
V	Força cisalhante
σ	Tensão Verdadeira
S	Tensão de Engenharia
σ_N	Tensão Normal
τ	Tensão Cisalhante
ϵ	Deformação
ε	Deformação verdadeira
e	Deformação de engenharia
γ	Deformação de cisalhamento
θ'	Diferença entre o ângulo reto original e ângulo final
L	Comprimento instantâneo
L_0	Comprimento original
L_f	Comprimento final
ΔL	Variação de comprimento
K	Coeficiente de resistência
n	Coeficiente de encruamento
E	Módulo de Young
U_r	Módulo de resiliência
σ_l	Tensão no escoamento
ϵ_l	Deformação no escoamento
$\%AL$	Redução do comprimento percentual
$\%RA$	Redução da área percentual
b	Vetor de Burgers
T	Temperatura
T_h	Temperatura homologa
T_m	Temperatura do material
h_0	Espessura inicial

h_f	Espessura final
$\bar{h}$	Espessura média
h_p	Espessura final proposta
R	raio do rolo de laminação
L_p	Comprimento de arco do rolo
μ	Coefficiente de atrito
Q	Fator de atrito
Q_p	Fator de atrito para laminação aquecida
P	carga de separação
P'	carga de separação para laminação a quente
σ'	Tensão para estado de deformação plana
b	Largura
b_0	Largura inicial
b_f	Largura final
N_t	Potência de laminação
a	braço do trabalho dos rolos para laminação a frio
n	Velocidade angular em rpm
w	Velocidade angular em rads/s
Δh_{max}	Diferencial de espessura máxima
$\Delta h_{max}'$	Diferencial de espessura máxima corrigido
F_c	Fator de correção
F_c	Fator de correção
Pot	Potência média
u	Energia por unidade de volume
$\dot{V}$	Vazão volumétrica

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	A INDÚSTRIA DE BASE E SUA IMPORTÂNCIA.....	1
1.2	PRODUTOS PLANOS, ARMAZENAMENTO E SUAS APLICAÇÕES	3
1.2.1	Formas de armazenamento dos produtos planos	5
1.2.2	Aplicação dos produtos planos na indústria	6
1.3	LAMINAÇÃO, EFICIÊNCIA E AUTOMAÇÃO	10
2	OBJETIVO	14
3	REVISÃO LITERARIA	15
3.1	LAMINAÇÃO	15
3.2	LAMINADORES	16
3.3	CONCEITOS FÍSICOS EMPREGADOS NA LAMINAÇÃO	19
3.3.1	Tensão	19
3.3.2	Deformação elástica e plástica	21
3.3.1	Deformação de Engenharia e Real.....	24
3.4	PROPRIEDADES METALÚRGICAS EMPREGADAS NA LAMINAÇÃO ..	25
3.4.1	Propriedades mecânicas dos metais.....	25
3.4.2	Microestrutura dos metais.....	29
3.4.3	Discordâncias	31
3.4.4	Mecanismos de aumento de resistência	34
3.4.5	Tratamentos térmicos	36
3.5	PROCESSOS DE LAMINAÇÃO EM RELAÇÃO A TEMPERATURA	38
3.5.1	Temperatura homóloga.....	38
3.5.2	Laminação a frio	39
3.5.1	Laminação a Quente	41
3.6	DEFEITOS NA LAMINAÇÃO.....	42
3.6.1	Ondulamento e dobramento.....	43
3.6.2	Trincas e fendilhamentos	46
3.6.3	Defeitos estruturais	47
3.7	DEFEITOS SUPERFICIAIS.....	49
4	ANÁLISE TEÓRICA.....	51
4.1	CÁLCULOS NA LAMINAÇÃO	51
4.1.1	Relações geométricas e forças	51
4.1.2	Potência pelo método da energia de deformação uniforme.....	56

4.1.3	Potência pelo método <i>Slab</i> Simplificado	58
5	ESTUDO DE CASO – CÁLCULO ANALÍTICO DOS PASSES DE LAMINAÇÃO	62
5.1	CÁLCULO DOS PASSES DE LAMINAÇÃO.	62
5.2	DEMONSTRAÇÃO DOS CÁLCULOS DOS PASSES DE LAMINAÇÃO ..	64
5.3	SOLUÇÃO NUMÉRICA.....	74
6	CONCLUSÃO	81
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	81
	REFERÊNCIAS.....	83
	APENDICE A	87

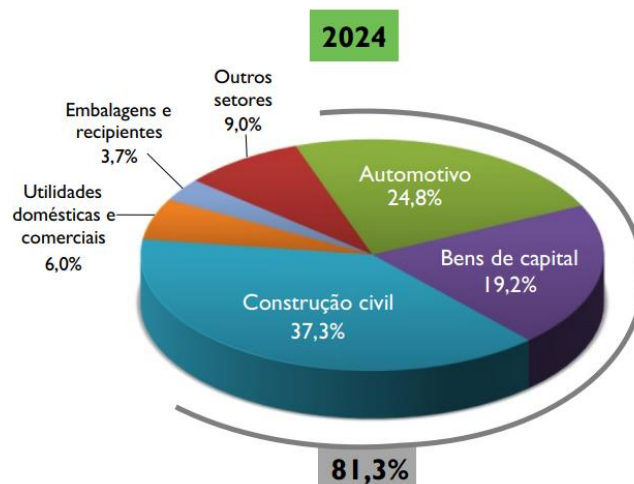
1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como função contextualizar o tema abordado no trabalho, por meio de dados e aspectos importantes que envolvem os processos da indústria metalúrgica, engenharia mecânica e principalmente da conformação e laminação de chapas metálicas, enfatizando a necessidade da redução de complexidade nos processos industriais por meio da automatização de operações repetitivas.

1.1 A indústria de base e sua importância

Como a própria denominação sugere, a indústria de base constitui a estrutura central da cadeia manufatureira global. Ela é a responsável direta pela transformação de matérias-primas em insumos qualificados para diversos setores da indústria de transformação. Entre suas principais entregas, destacam-se os tarugos, placas, chapas metálicas e os rolos laminados, fundamentais para os complexos processos fabris encontrados em indústrias como a automotiva, de embalagens, aeronáutica, naval e de linha branca. Além de outros produtos semiacabados, como os vergalhões e arames, que são consumidos massivamente pelo setor de construção civil, tornando-o o maior setor consumidor de aço nacional, como se pode observar na Figura 1.

Figura 1 - Consumo de aço dos principais setores consumidores em 2024

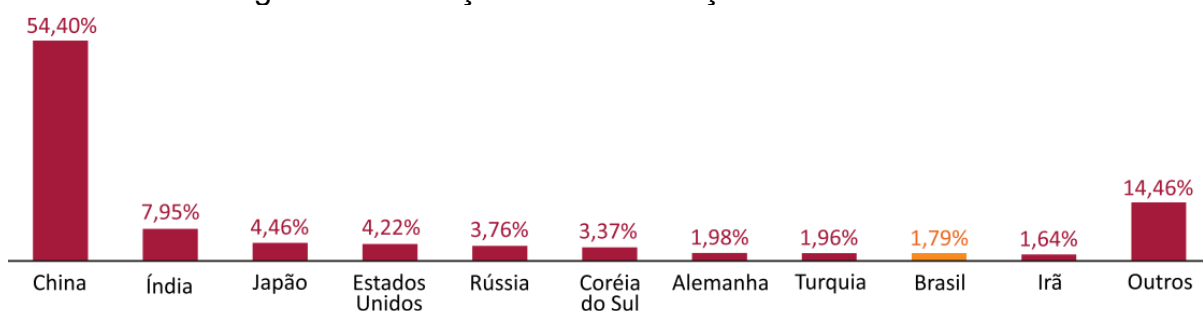


Fonte: ECON (2024) [1].

Devido a corrida pelo progresso, uma crescente da construção civil e industrialização do país se torna presente, afetando diretamente a produção de aço e produtos semiacabados, como consequência o consumo deste tipo de produto apresentou um crescimento de 3,5% no ano de 2024, atingindo o volume de 34,45 milhões de toneladas. Em paralelo, a produção nacional de aço bruto se consolidou em 33,75 milhões de toneladas neste mesmo ano [3], o que mostra que cerca de 700 mil toneladas de aço consumidas são de origem importadas, cerca de apenas 2% do consumo nacional.

Esses indicadores não apenas expõe a dimensão do parque fabril nacional, mas também demonstram o motivo pelo qual o Brasil se posiciona como nono (9º) maior produtor de aço de todo planeta, com valores de produção próximo ao de grandes países fortes, como Alemanha e Turquia, conforme se pode analisar na Figura 2.

Figura 2 - Produção mundial de aço bruto em 2024



Fonte: Industria Siderurgica [2].

Logicamente, ao movimentar uma quantidade tão expressiva de matérias-primas e bens de produção, movimenta-se também uma quantia proporcionalmente grande da economia de um país. Segundo o Instituto do Aço [4], os dados consolidados mais recentemente em relação a indústria siderúrgica nacional, divulgado no relatório trimestral de 2025, apontam que, apenas no terceiro trimestre de 2025, cerca de R\$ 31 bilhões foram movimentados apenas no mercado siderúrgico interno do Brasil, com uma estimativa de mais de os R\$ 120 bilhões durante todo o ano. Caso se some os valores obtidos no mercado externo, chega-se a um valor aproximado de R\$ 40,5 bilhões no trimestre e R\$ 121 bilhões ao ano, os valores referentes a cada mês do terceiro trimestre podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3 - Faturamento da indústria siderúrgica no terceiro semestre de 2025

Especificação/ Specification	Unidade/ Unit 10 ³	3º Trimestre/ 3 rd Quarter		
		Julho/ July	Agosto/ August	Setembro/ September
Faturamento / Net Sales	R\$	13.427.196	13.433.349	14.067.532
	US\$	2.432.463	2.469.365	2.624.539
Mercado Interno / Domestic Market	R\$	10.348.522	10.213.982	10.458.009
	US\$	1.874.732	1.877.570	1.951.121
Mercado Externo / Foreign Market	R\$	2.918.087	3.084.393	3.425.313
	US\$	528.639	566.984	639.051

Fonte: [4].

Com os dados apresentados, consegue-se ter um pouco da compreensão do impacto gerado pela indústria de base no cenário social e econômico brasileiro, e como seus produtos servem como base para a produção de diversos outros setores de grande importância, colocando-a em posição de “Mãe de Todas as Indústrias”.

1.2 Produtos planos, armazenamento e suas aplicações

Um dos produtos semiacabados obtidos pela indústria de base mais utilizado pelas demais indústrias, são os produtos planos; os quais possuem inúmeras aplicações, sendo utilizados principalmente em processos de estampagem, perfilação e cortes.

Os produtos laminados possuem diversas formas e tamanhos, na sua maioria a classificação destes produtos é realizada a partir de sua geometria, considerando como produto plano, todo aquele que tenha sido laminado e possua seção transversal retangular, com a largura muitas vezes maior que a espessura [5]. Na Tabela 1, observa-se de forma mais precisa essa classificação estabelecidas pela ABNT e as suas diferenças.

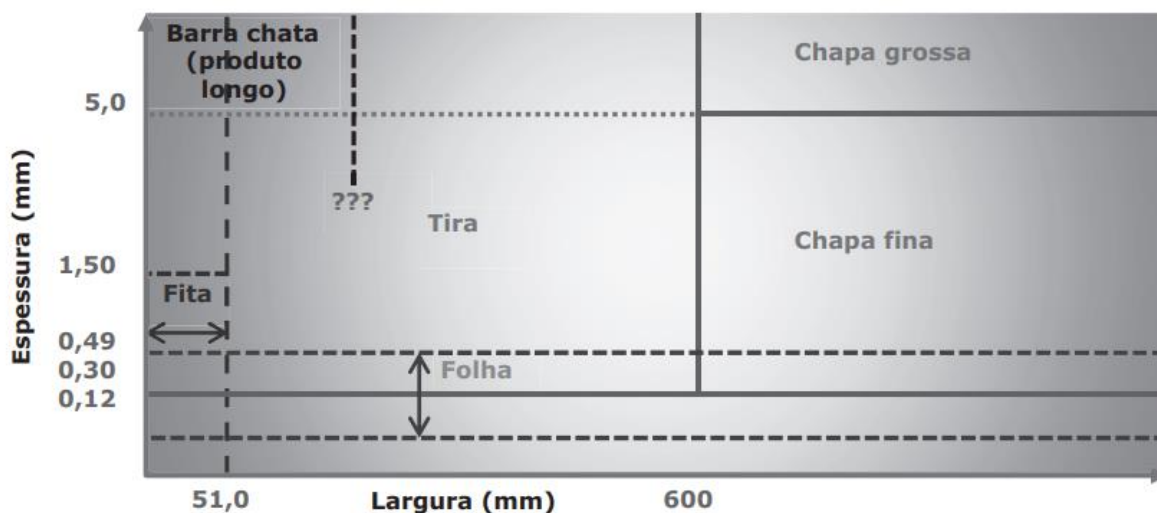
Tabela 1 - Classificação dos produtos planos

Classificação	Descrição
Bobina	Produto plano laminado, com largura mínima de 600 mm, enrolado na forma cilíndrica e com comprimento variável.
Chapas	Produto plano de aço, com largura superior a 600 mm, laminado a partir de placa, podendo ser obtido de bobina.
Tiras	Produto laminado plano, com largura igual ou inferior a 600 mm.
Fitas	Produto plano laminado, com espessura igual ou inferior a 1,50 mm e largura igual ou inferior a 51,00 mm, utilizado como elemento de fixação e compactação no acondicionamento e/ou na embalagem.
Folha	Produto plano laminado de aço baixo carbono, com espessuras entre 0,12 e 0,49 mm, revestido com estanho ou cromo, e não revestido.

Fonte: Adaptado [5].

Na Figura 4, pode-se observar uma seção transversal, fora de escala, que apresenta melhor a classificação geométrica dada pela NBR 6215/2011, segundo [5].

Figura 4 – Limites dimensionais dos produtos planos



Fonte: Adaptado [5].

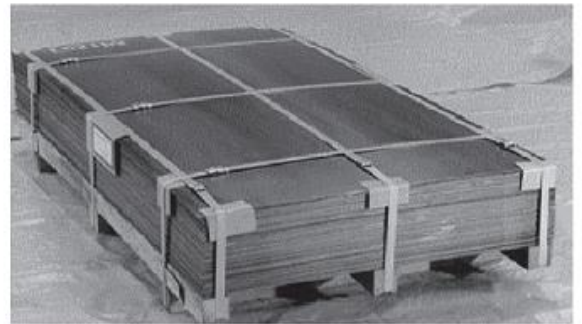
1.2.1 Formas de armazenamento dos produtos planos

Uma vez considerado um produto plano, o insumo pode ser armazenado de diversas forma, cada forma com uma aplicação diferente, em que se pode observar as principais formas de armazenamento na Figura 5.

Figura 5 - Armazenamento de produtos planos



(a)



(b)



(c)

Fonte: Adaptada de [5].

A Figura 5.a ilustra a forma de armazenamento de bobina e folhas, a Figura 5.b representa a forma de armazenar as chapas e tiras, também conhecido nas indústrias como “*Blanks*”, e pôr fim a Figura 5.c representa o armazenamento de fitas, também conhecido como “*Rolos*”.

1.2.2 Aplicação dos produtos planos na indústria

Uma vez armazenados e distribuídos, os produtos planos alimentam os principais mercados consumidores e tecnológicos da atualidade, o que justifica uma apresentação das aplicações desses produtos:

- **Indústria automotiva** - A evolução tecnológica da indústria automotiva anda lado a lado com a evolução tecnológica dos processos de laminação e estampagem, e a capacidade de conformação dos produtos planos. Como visto anteriormente, a indústria automotiva é considerada um dos maiores consumidores de chapas e bobinas metálicas, com um foco maior em ligas ou metais mais leves e com maior ductilidade, facilitando os intensos e progressivos processos de estampagem das chapas, com o objetivo de obter peças como laterais de portas, para-choques, capôs e até mesmo componentes estruturais internos de segurança [6]. Na figura 6 se pode observar uma chapa laminada que foi estampada para ser a estrutura de um capô.

Figura 6 - Chapa conformada como capô para utilização automobilística

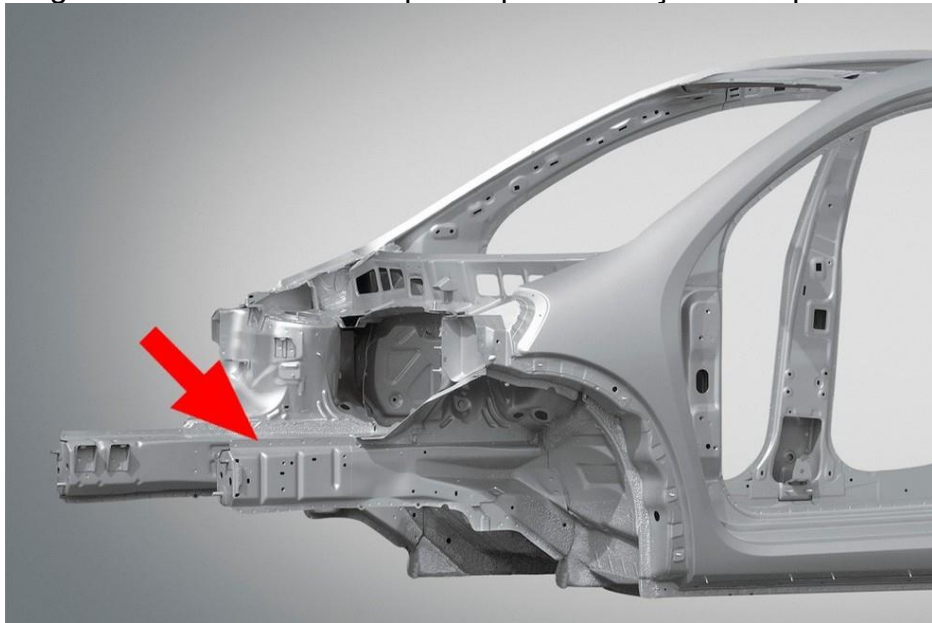


Fonte: [5].

O automobilismo trás necessidades muito fortes, como a segurança e a eficiência, a estrutura de um automóvel não pode ser algo pesada, devido ao aumento do consumo de combustível e tão pouco, algo rígido ou indeformável,

devido a absorção de impacto e segurança dos passageiros. Deste modo a utilização de produtos planos conformados se torna a escolha perfeita, por trazer um peso menor as estruturas de produtos perfilados, e principalmente, maior capacidade de moldagem durante a estampagem, permitindo planejar o formato da estrutura utilizada. Atualmente os carros possuem ranhuras em pontos específicos, com o intuito de determinar onde ocorrerá a deformação da estrutura, em caso de impactos, direcionando assim a absorção da energia, deformando a área em que traz menos risco ao condutor [8]; um exemplo desta aplicação pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Ranhuras estampadas para absorção de impacto



Fonte: [8].

- **Indústria aeronáutica** – Se na indústria automobilística a segurança já é um dos principais focos durante o desenvolvimento do produto, na aeronáutica ela é a principal preocupação. Desse modo, a necessidade de matérias primas leves e resistentes se mostra muito presente na engenharia aeronáutica, promovendo a utilização de chapas finas de alumínio, titânio, níquel e aços inoxidáveis devido a sua capacidade de não oxidar, densidade baixa e resistência alta [9]. Outra propriedade extremamente importante para a aeronáutica é o acabamento superficial da peça, devido as altas temperaturas e pressões, a grandes altitudes, em que qualquer trinca, rachadura ou superfície irregular, pode ser um concentrador de tensão, que pode provocar acidentes letais [11]. Na Figura 8 se

pode observar uma das aplicações dos produtos planos dentro da indústria aeronáutica, utilizadas na fuselagem de aeronaves.

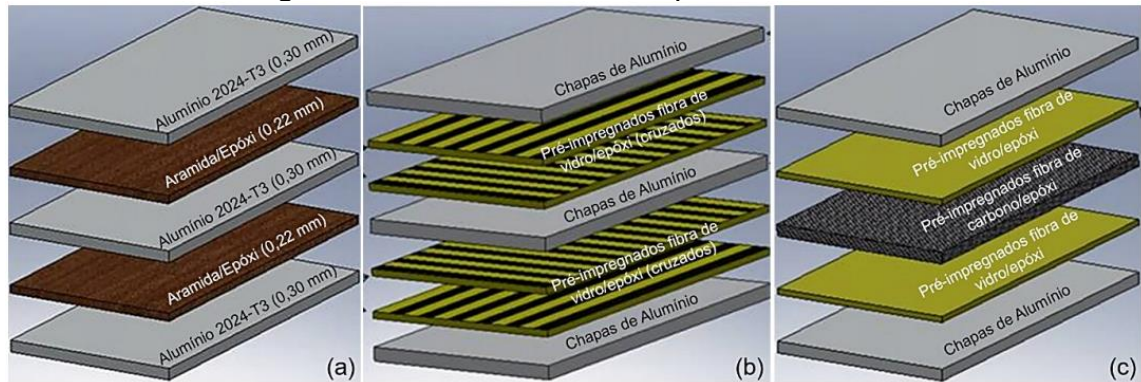
Figura 8 - Aplicação de chapas laminadas em aeronaves



Fonte: [10].

As aplicações de produtos planos obtidos por laminação na indústria aeronáutica, nem sempre são diretas, como visto no exemplo anterior, em que chapas metálicas, como a de alumínio, podem ser combinados com outras matérias primas, como aramida, fibra de vidro e carbono, para se obter os compósitos; materiais muito utilizados nesta indústria; devido a sua maior resistência a tração, compressão e principalmente a propagação de trincas, tornando-os opções muito mais seguras. Um exemplo de compósito são os LCM's (Laminados de Compósito- Metal), que são obtidos através de diversas camadas intercaladas de chapa metálica e fibras resinas, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Laminados de Compósito- Metal



Fonte: [11].

- **Indústria de linha branca** – Diferente das aplicações anteriores, a indústria de eletrodomésticos, também conhecida como “Linha branca”, tem como principal propósito o uso de produtos planos garantir a estética final do produto, baseada em bons acabamentos e na resistência mecânica, sobretudo, a demanda por produtos que chamem a atenção do consumidor e a necessidade de resistência estrutural, por serem bens duráveis.

Como, nessa indústria, as chapas e bobinas metálicas passam por processos severos de conformação, como estampagem profunda, dobramento e união plásticas, também conhecida como *clinchning*, a matéria prima precisa se mostrar dútil o suficiente para não romper. Entretanto, devido a necessidade estética e estrutural dos gabinetes de eletrodomésticos, as propriedades que mais se destacam para estes insumos são, o bom acabamento e a resistência mecânica; o que favorece a utilização de aços laminados a frio [12], que trazem maior resistência devido ao encruamento obtido no processo, e principalmente, um controle rigoroso da espessura e rugosidade das chapas, que proporciona um acabamento superficial excelente. Um exemplo de gabinete conformado a partir de uma chapa laminada a frio é mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Chapa fina conformada em gabinete



Fonte: [13].

Dentre as aplicações da linha branca, os produtos planos mais procurados são de espessuras inferiores a 1,05mm, como exige a norma ABNT-NBR 11888, na sua maioria aços carbonos pré-pintados, revestido de esmalte, fosfato, galvanizado ou zincado; esse revestimento, comumente branco, é o que traz nome para a esta indústria [12], como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Chapas de aço carbono revestidas



Fonte: [13].

1.3 Laminação, Eficiência e automação

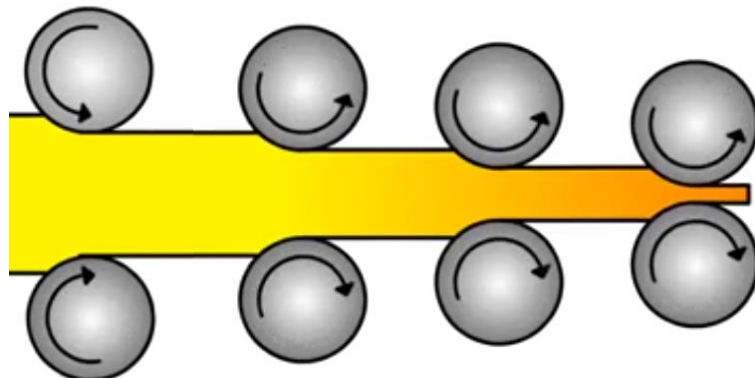
Uma vez abordados os produtos planos, principais insumos utilizados pelas indústrias de bens duráveis, torna-se necessário discutir o processo de conformação pelo qual eles são obtidos, sendo esse processo a laminação.

A laminação é o processo de conformação mecânica mais utilizado na indústria atualmente, essa soberania ocorre devido ao excelente controle dimensional proporcionado pelo processo do produto final, sobretudo, devido a sua alta capacidade de produção, com altos índices de eficiência, podendo alcançar eficiências que variam entre 75% e 95% [14].

Esse alto rendimento decorre principalmente, por conta da própria dinâmica do processo, que, em geral, dispensa o uso de ferramentas complexas (exceto no caso de cilindros perfilados), exigidas por outros métodos de conformação, como a estampagem profunda e o forjamento. Na sequência, abordar-se a um pouco mais sobre os processos e os fundamentos que permitem tais considerações.

- **laminação contínua:** A laminação contínua é um dos fundamentos mais simples dentre os utilizados na fabricação de insumos metálicos, composto por diversas reduções de espessura do metal, até que o mesmo atinja a dimensão desejada, realizadas através da utilização de trens de laminação dispostos em linha, pelos quais o metal em conformação passa por cadeias de rolos em série. Isso permite sucessivas laminações de forma ininterrupta, sincronizadas, sem pausas, *setups* de máquinas ou retrocessos de matéria prima, fazendo com que, em alguns maquinários industriais, o material atinja velocidades de até 40 m/s [15]. A velocidade e a simplicidade do processo mitigam custos e diminuem o tempo de fabricação, aumentando assim a produtividade e a eficiência. Na Figura 12, é mostrado um esquema ilustrativo deste processo.

Figura 12 - Esquema ilustrativo da laminação contínua

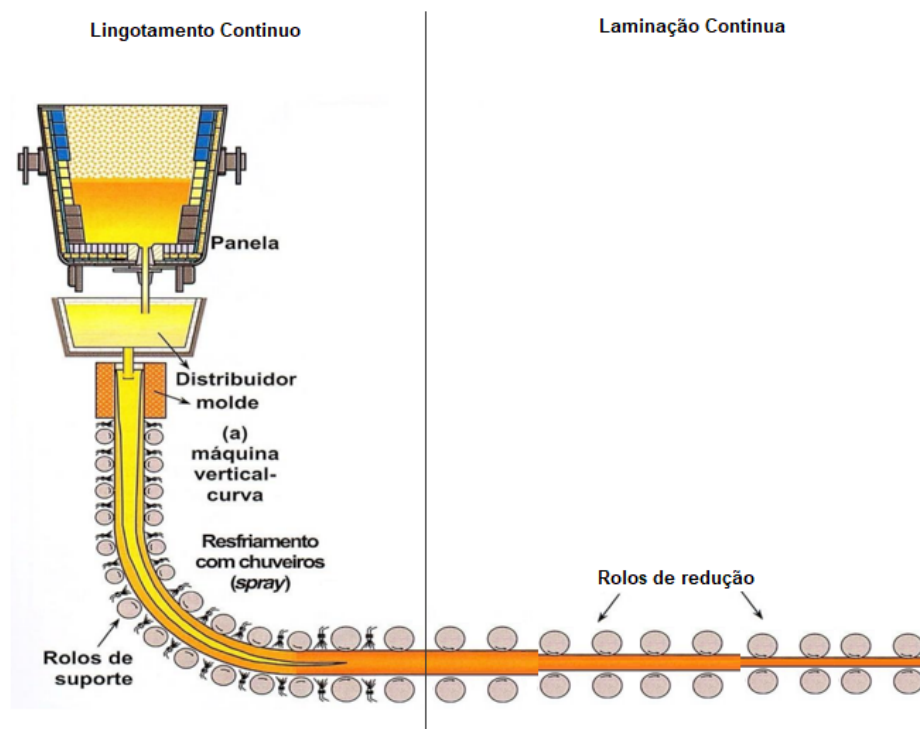


Fonte: Adaptada de [18].

- **Lingotamento + laminação contínua:** Para tornar o processo de fabricação de produtos planos ainda mais eficiente, é possível unir o processo anterior, a laminação, aquele responsável por fazer lingotes, o lingotamento contínuo, o qual é um processo considerado de transferência de calor, onde o metal fundido é solidificado [16]. O maquinário utilizado no processo de lingotamento contínuo é composto por diversas peças, sendo as principais o Distribuidor, responsável por alimentar o veio de metal fundido, o Molde responsável por trocar calor com o metal e iniciar o resfriamento do mesmo, a Zona de resfriamento secundário, composta por rolos e chuveiros (*spray*), responsáveis por conformar e finalizar a solidificação do metal.

A combinação entre o lingotamento e a laminação utilizada neste processo, elimina algumas etapas de fabricação, como o reaquecimento do lingote, para realização da laminação a quente, além de eliminar o manuseio e transporte do lingote, reduzindo expressivamente os custos com armazenamento, *setups* de matéria prima e tempo de processamento, aumentando substancialmente a produção de produtos planos. Um esquema representativo do processo pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Esquema representativo do lingotamento + Laminação contínua

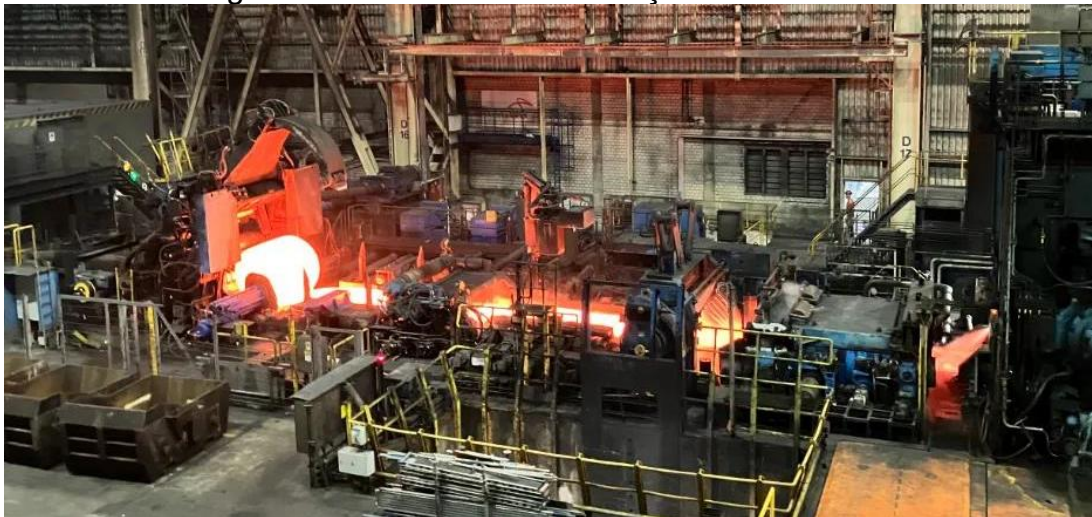


Fonte: Adaptado de [17].

- **Automação e controle dos processos:** Para que a laminação ocorra com eficiência, qualidade e velocidade tão altas é necessário o controle rigoroso sobre processo. O controle das principais variáveis de fabricação, como temperatura, potência e força aplicada pelos rolos, velocidade de laminação e principalmente espessura das chapas, são cruciais para a entrega de um produto plano de qualidade e com bom acabamento superficial.

Na indústria de base, os laminadores altamente automatizados produzem chapas e folhas com tolerâncias rigorosas, em altas taxas de produção, com baixo custo unitário e peso, principalmente quando a laminação está anexada ao lingotamento contínuo [15]. Este controle ocorre através da utilização de sensores de raio x ou isótopos, que medem a espessura do produto plano sem interromper o fluxo; sendo a informação obtida pelos sensores utilizada por um sistema de *feedback*, que regula a espessura do vão entre os rolos (Trabalho a quente), ou as tensões de saída entre as cadeias de rolo (Trabalho a frio) [16]. Um exemplo de um processo automatizado de laminação pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 - Processo de laminação automatizado



Fonte: [19].

2 OBJETIVO

São objetivos do presente trabalho:

- Realizar uma revisão bibliográfica dos principais conceitos relacionados aos processos de laminação a frio e a quente, abordando temas como tensão e deformação, propriedades mecânicas e metalúrgicas dos materiais, como os fundamentos envolvidos nos processos, de modo a proporcionar uma melhor compreensão do processamento;
- Desenvolver, com base na fundamentação obtida, um algoritmo em linguagem *Python* para automatizar os cálculos iterativos do Método *SLAB* Simplificado, que permite a determinação do Número de Passes, como a Carga e a Potência de Laminação a partir das condições de entrada definidas pelo usuário.

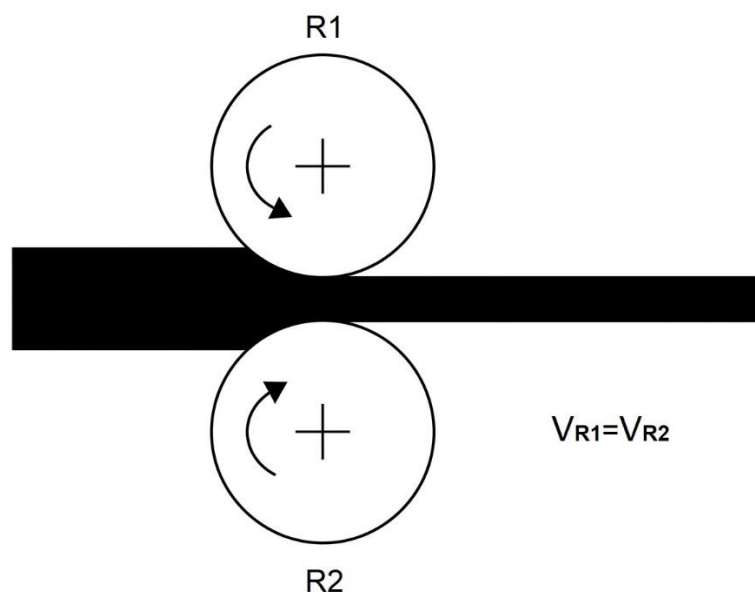
3 REVISÃO LITERARIA

Neste capítulo, aborda-se os conceitos teóricos relacionados ao processo de laminação, os quais servirão como fundamento para o desenvolvimento e automatização dos cálculos iterativos do processo.

3.1 Laminação

Laminação pode ser definido como o processo de conformação plástica dos metais realizada a partir da compressão do material entre dois ou mais rolos, que giram sentidos contrários e giram na mesma velocidade, que estão distantes entre si a uma espessura menor que a espessura do material ao qual será laminado, para cumprir o objetivo do processo, que é diminuir a espessura do metal através da conformação [20]. Mas, como consequência, ao diminuir a espessura pode gerar um pequeno aumento na largura e comprimento, devido a “fuga” do material conformado para as áreas as quais não estão sofrendo as ações dos rolos. Podemos ilustrar o conceito descrito da laminação na Figura 15.

Figura 15 - Conceito mecânico da laminação



Fonte: Adaptada de [20].

As principais forças envolvidas no processo de laminação são a compressão e a força de cisalhamento promovida pelo prensamento dos rolos, consequentemente a

força de atrito se torna uma importante componente para o processo, auxiliando no movimento de “puxar” o metal conformado. Como qualquer outro processo de conformação a laminação possui um produto inicial que é transformado em um produto final, neste caso o produto inicial são os lingotes. A terminologia dos produtos finais da laminação não atingiu um consenso, contudo, segundo Dieter [14], pode-se separar nos produtos dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Produtos da Laminação		
Produto	Descrição	Seção/Dimensões
Bloco	Produto da primeira redução por laminação	Área da seção > 36 pol ²
Tarugo	Redução posterior por laminação	Seção mínima: 1 1/2 x 1 1/2 pol
Placa	Peça laminada a quente	Seção > 16 pol ² ; largura ≥ 3x espessura
Chapa	Produto laminado com espessura maior	Espessura > 1/4 de pol
Folha	Produto laminado mais fino, com acabamento de alta qualidade	Espessura < 1/4 de pol
Tira	Produto laminado mais estreito	Largura < 24 pol
Laminação de Pó	Processo que usa pó metálico compactado e sinterizado	Sem dimensões específicas, usado para minimizar desbaste

Fonte: Adaptado de Dieter [14].

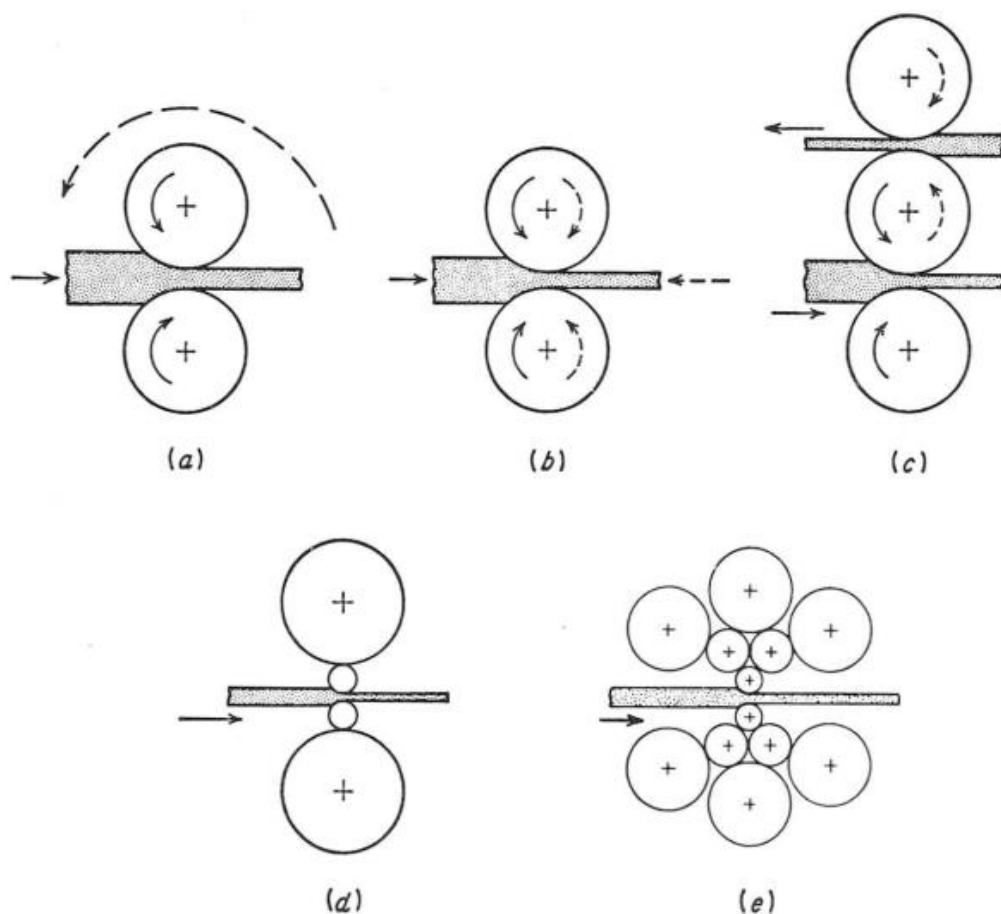
3.2 Laminadores

Os laminadores são equipamentos industriais compostos principalmente por rolos laminadores, mancais, uma estrutura metálica chamada gaiola, responsável por fixar os demais componentes e um motor que fornece potência ao sistema. Devido as enormes forças exercidas, na casa dos milhares de toneladas, os equipamentos envolvidos no processo são necessariamente robustos e consequentemente custosos.

Existem diversos modelos de laminadores, sendo que a classificação dos mesmos é feita a partir do número de rolos que o equipamento possui, como pode ser visto na Figura 16. Os laminadores mais simples, também chamados de *Laminadores duo*, possuem dois rolos laminadores, que possuem o mesmo diâmetro e rotacionam na

mesma direção, como visto na Figura 16.a. Esse tipo de laminador ainda podem possuir uma segunda configuração onde os rolos realizam o movimento alternado de rotação chamado de *Laminadores duo reversível*, deste o modo o material laminado pode passar para a frente e para trás através dos rolos, como visto na Figura 16.b. Uma outra solução é a utilização de três rolos, como visto na Figura 16.c, esse tipo de laminador é conhecido com *Laminador trio* constituído por um rolo condutor superior, um inferior e um rolo intermediário que se move a partir da fricção. Uma técnica muito utilizada para diminuir a potência necessária para os rolos condutores é a implementar rolos de menores diâmetros, contudo por resistirem menos é necessária a utilização de rolos de encosto com maiores diâmetros, esse tipo de laminador é conhecido como *Laminador quadro* e pode ser visto na Figura 16.d. Por fim, o *Laminador agrupado*, visto na Figura 16.e, em que cada rolo de trabalho é suportado por dois rolos de encosto, um modelo muito utilizado desse tipo de laminador é o *laminador Sendzimir*.

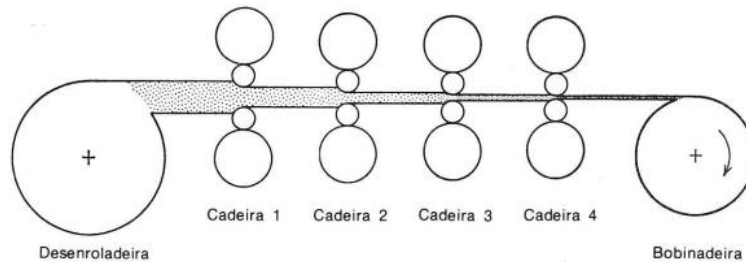
Figura 16 - Tipos de Laminadores



Fonte: [14].

Processos industriais sempre buscam aumentar a produtividade e com esse objetivo uma configuração comumente utilizada é a instalação de laminadores em série, ou seja, um atrás do outro, formando um trem de laminação, também conhecido como *Cadeira de laminação*, como visto na Figura 17.

Figura 17 - Cadeira de laminação

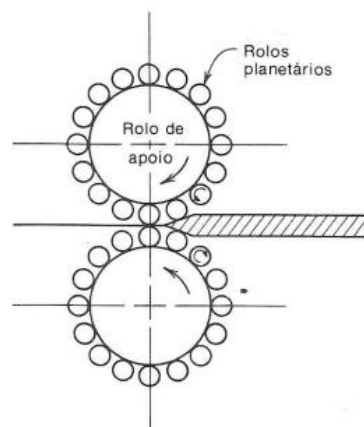


Fonte:[14].

Devido aos diferentes diâmetros dos rolos do laminador as velocidades também são diferentes em cada cadeira, de modo que a velocidade dos rolos da cadeira sucessiva seja síncrona a velocidade da tira metálica na saída da cadeira. Tanto a desenroladeira quanto a bobinadeira neste laminador possuem funções além de fornecer o material, também exercem uma força horizontal de tração de ré e avante na tira.

Outro modelo de laminador, utilizado na laminação a quente, é o laminador planetário, ele é constituído por dois conjuntos de rolos de apoios envolvidos por um grande número de rolos planetários, como visto na Figura 18.

Figura 18 - Laminador planetário



Fonte:[14].

Este modelo tem como principal característica a grande redução a quente de uma placa diretamente para uma fita em um único passe, cada rolo planetário impõe uma redução quase constante ao material, pois assim que um rolo perde o contato com a placa outro par de rolos faz contato repetindo a mesma redução. Deste modo a redução final é o somatório de várias reduções sucessivas, o que torna o processo semelhante a um forjamento. Contudo este laminador torna necessária utilização de rolos alimentadores para a placa na entrada e rolos alisadores na saída para melhorar o acabamento superficial.

3.3 Conceitos físicos empregados na laminação

Para que seja possível se controlar o processo de laminação e obter os resultados desejados inicialmente, para o produto final, é necessário que se conheça os conceitos físicos por trás do processo de conformação.

3.3.1 Tensão

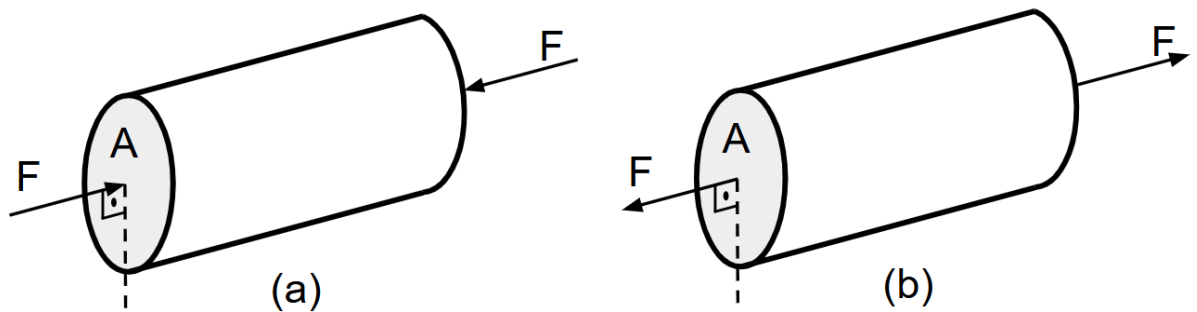
De forma objetiva, a Tensão é a grandeza física responsável por representar a intensidade das forças exercidas internamente nos materiais para resistir as cargas exercidas externamente a ele. De forma prática a tensão pode ser definida matematicamente como a razão entre a Força (F) e a área (A) em que esta pressão é aplicada [21], como se pode observar na Equação (1).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

As tensões são separadas em dois tipos fundamentais, sendo classificadas pela direção a qual a força exercida sobre a área é aplicada, sendo essas classificações as seguintes:

- **Tensão normal (σ_N):** Este tipo de tensão ocorre quando a força aplicada sobre o material ocorre de forma perpendicular ou normal ao plano da superfície, ela pode ocorrer como força de compressão (Empurrando o material), como visto na Figura 19.a, ou de tração (Puxando o material), visto na Figura 19.b [21].

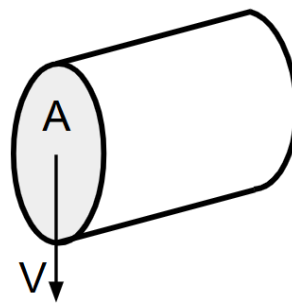
Figura 19 – Tensões normais de compressão e tração



Fonte: Elaborado pelo Autor.

- **Tensão cisalhante (τ):** A tensão cisalhante, por sua vez, ocorre quando a força aplicada é paralela ou tangente ao plano da área, de modo a promover o deslizamento entre as seções, promovendo o “corte” do material, denomina-se a força cisalhante como V [22], o esquema físico pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 - Tensão cisalhante



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quando utilizado pela engenharia, as tensões podem ainda ser distinguidas por tensões de engenharia (S) e as tensões verdadeiras (σ).

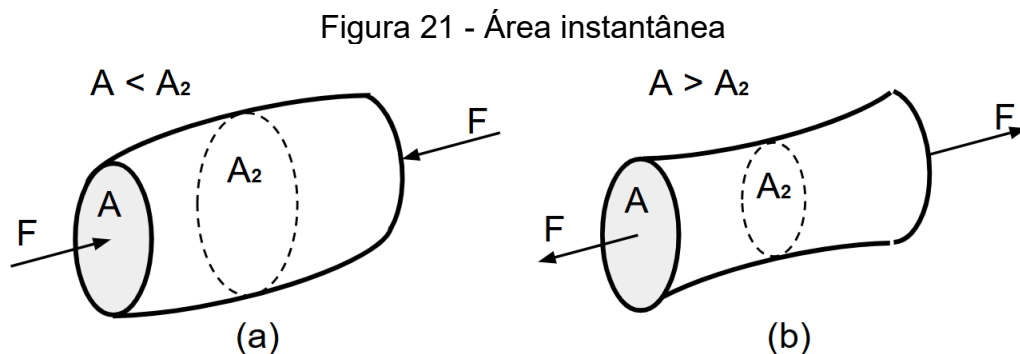
Se nos itens anteriores a classificação do tipo de tensão ocorria devido a direção da força, a diferenciação entre as tensões verdadeiras e as de engenharia ocorrem de acordo com a forma em que a área afetada é analisada, podendo ser:

- **Tensão de Engenharia (Nominal):** Na tensão de engenharia a área analisada é a área original da seção transversal (A_0), ou seja, a seção transversal antes da aplicação da carga, sem nenhum tipo de deformação. É mais comumente

utilizada em projetos de engenharia pois os engenheiros costumam trabalhar no regime elástico, onde as variações dimensionais são desprezíveis [22]. A tensão de engenharia pode ser dada pela Equação (2).

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

- **Tensão de Verdadeira (Logarítmica):** Já na tensão verdadeira a área utilizada para análise é a área instantânea (A) da seção transversal, ou seja, a área que o corpo apresenta no momento da medição [15], representada pela equação (1). Deste modo se representa a tensão real que o material está sendo submetido à medida que a seção transversal vai deformando e aumentando, no caso de compressão e diminuindo no caso do alongamento, como exemplificado na Figura 21.a para compressão e Figura 21.b para tração.



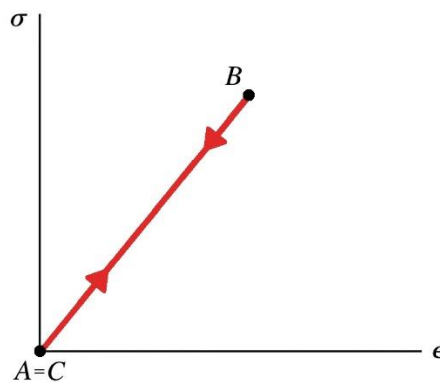
Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.3.2 Deformação elástica e plástica

Deformação (ϵ) é basicamente toda e qualquer mudança que possa ocorrer no tamanho ou forma de um material que está sendo submetido por uma força ou mudança de temperatura [21]. Mas a deformação não ocorre da mesma maneira quando submetida a qualquer tipo de carga. Quando se analisa essa grandeza física, nota-se que ela se comporta de duas formas diferentes, sendo elas as deformações permanentes (plásticas), e as recuperáveis (elásticas), assim sendo, deve-se ressaltar como funciona cada uma delas.

Toda deformação que tenha um comportamento reversível, ou recuperável, ocorre somente enquanto o material está submetido a algum tipo de força, voltando a seu tamanho ou forma inicial quando se retira a força e, classifica-se como uma deformação elástica [23]. Um exemplo gráfico da deformação elástica pode ser visto na Figura 22, em que AB representa o carregamento e BC o descarregamento do material.

Figura 22 - Deformação elástica



Fonte: Adaptada de [23].

Pode-se observar que o ponto A=C, demonstra que a geometria inicial do corpo foi recuperada completamente e a deformação foi recuperável.

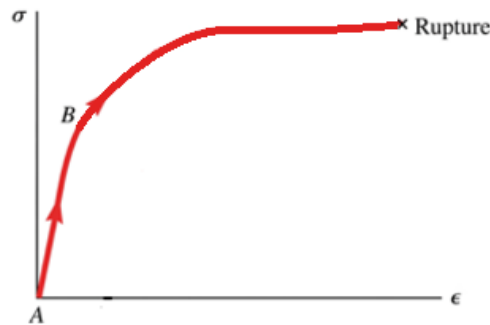
A equação que rege o regime elástico matematicamente é determinada pela Lei de Hooke, que diz que a deformação elástica é diretamente proporcional à tensão aplicada sobre o material, sendo expressa pela Equação (3).

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3)$$

Onde o E é o Módulo de Young e representa a rigidez do material, que é caracterizado pelo coeficiente angular da reta no gráfico tensão x deformação para o regime elástico [21].

A deformação plástica, por sua vez, é toda aquela que tenha um comportamento permanente, após a retirada da ação da tensão aplicada, alterando o formato inicial do corpo de forma irreversível, sendo considerada uma deformação plástica [23]. Um exemplo gráfico da deformação plástica pode ser visto na Figura 23, no gráfico existem 2 curvas distintas a AB e a CD.

Figura 23 - Deformação plásticas



Fonte: [23]

Onde a curva AB representa o carregamento do material, sendo possível notar que a deformação não retorna a zero (ponto A), o que demonstra que a deformação causada pelo carregamento é irreversível. Caso o descarregamento ocorresse no campo anterior ao ponto B, a deformação seria reversível.

A Deformação plástica fisicamente ocorre quando a tensão ultrapassa o limite de escoamento (σ_0) do material, uma propriedade mecânica, que no gráfico da tensão x deformação, é representada pelo ponto em que a equação deixa de ser linear, que na Figura 23 estaria próximo ao ponto B. Isso é o que define a equação de Hollomon representada pela Equação (4), adequada para um material recozido [24].

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \quad (4)$$

Onde K é coeficiente de resistência do material, este coeficiente representa a tensão verdadeira necessária para gerar uma deformação plástica verdadeira igual a 1, e n é o coeficiente de encruamento do material, que define a capacidade de deformação do material. Caso o material analisado tenha algum tipo de encruamento inicial, é necessário considerar essa deformação inicial observada, descrita pela Equação de Swift, Equação (5), em que ϵ_0 representa a deformação inicial do material [14].

$$\sigma = K \cdot (\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (5)$$

Os coeficientes n , K e ϵ_0 podem ser obtidos na curva logarítmica tensão x deformação verdadeira, dos pontos entre o limite de escoamento e a carga máxima.

Além das equações de Hollomon e Swift, existe um outro conceito físico muito importante, que atua sobre o regime plástico dos materiais. Toda deformação imposta, imprime uma mudança nas dimensões iniciais do material, contudo caso as mudanças dimensionais não sejam causadas por retirada ou adição de material ao corpo, o mesmo deve manter seu volume constante, deste modo, obtém-se a Equação (6), que representa a Constância volumétrica durante a deformação plástica, onde o somatório das deformações deve ser igual zero.

$$\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0 \quad (6)$$

É importante ressaltar que um material pode sofrer ambas os tipos de deformação, e que para atingir a zona plástica do material, primeiramente se deve ultrapassar a zona elástica, obtendo uma deformação total ao final do processo, esta deformação total nada mais é que a soma das duas deformações ocorridas [14], como visto na Equação (7).

$$\epsilon_{Total} = \epsilon_{Elástica} + \epsilon_{Plástica} \quad (7)$$

3.3.1 Deformação de Engenharia e Real

Assim como a tensão, existem diferentes formas de se analisar a deformação, considerando aproximações (Deformação de Engenharia) ou com valores mais próximos aos reais (Deformação Verdadeira), estas formas de se analisar a deformação podem ser discutidas na sequência:

- **Deformação de Engenharia:** Assim como nas tensões, a deformação de engenharia (e) utiliza as dimensões originais do corpo que está sofrendo deformação, no caso a variação de comprimento ocorrido (ΔL) em relação ao comprimento original (L_0), e pode ser representado matematicamente pela Equação (8) [23].

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{(L_f - L_0)}{L_0} \quad (8)$$

- **Deformação verdadeira:** A deformação verdadeira (ε), leva em consideração o comprimento instantâneo (L) do material, ou seja, o comprimento do corpo no momento da análise, sendo a deformação verdadeira mais precisa, por não aproximar o comprimento, como faz a de Engenharia. A mesma pode ser definida matematicamente pela Equação (9).

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (9)$$

Sabendo que o comprimento instantâneo é basicamente o comprimento final (L_f) no momento em que o corpo está sendo analisado, pode-se obter uma relação entre deformação de engenharia e deformação verdadeira. Para isso, da Equação 8 se pode obter a Equação (10).

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{(L_f - L_0)}{L_0} = \frac{L_f}{L_0} - 1$$

$$\frac{L_f}{L_0} = e + 1 \quad (10)$$

Deste modo, considerando que $L_f = L$, ao se substituir a Equação (10) na Equação (9), obtém-se a Equação (11), que permite a determinação da deformação verdadeira a partir da deformação de engenharia.

$$\varepsilon = \ln(e + 1) \quad (11)$$

3.4 Propriedades metalúrgicas empregadas na laminação

Para compreensão dos efeitos que a laminação causa no material laminado e para obtenção das propriedades finais desejadas para os produtos obtidos pelo processo, é necessário se entender os principais conceitos metalúrgicos envolvidos.

3.4.1 Propriedades mecânicas dos metais

Quando submetidos a algum tipo de tensão os metais podem se comportar de diversas formas, dependendo de como sua estrutura está disposta no momento. Assim sendo, torna-se necessário se conhecer melhor o comportamento e características dos materiais e suas principais propriedades:

- **Rigidez:** A rigidez mecânica de um material é definida como a resistência que um mesmo possui a deformação elástica, matematicamente a rigidez é representada pelo Módulo de Young (E), obtido na Equação (3), ou seja, quanto maior a rigidez do material, menor será a deformação elástica resultante do tensionamento [26].
- **Resiliência:** Esta propriedade representa a capacidade que um material tem de absorver energia durante o comportamento elástico e após a remoção da carga permitir a recuperação dessa energia. A resiliência pode ser representada matematicamente pelo módulo de resiliência (U_r), que para uma região elástica linear pode ser obtida a partir da Equação (12).

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_l \cdot \epsilon_l \quad (12)$$

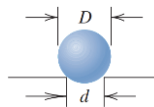
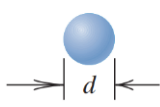
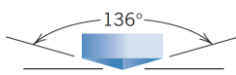
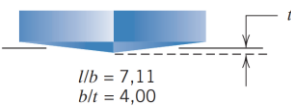
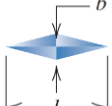
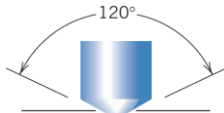
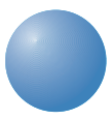
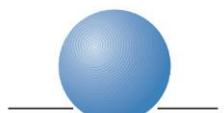
Onde σ_l é a tensão no escoamento e ϵ_l a deformação neste mesmo ponto. Assim sendo, os materiais mais resilientes são aqueles que possuem elevadas resistências ao escoamentos e baixos módulos de elasticidade [26].

- **Dureza:** A dureza é definida pela capacidade a qual o material analisado pode sofrer uma deformação plástica localizada, como um risco ou indentação na superfície. O primeiro sistema de identificação de dureza dos materiais, os colocava em uma escala de qual tinha capacidade de riscar o outro, onde o menor número da escala era representado pelo talco com 1 e o maior número da escala era representado pelo diamante, como o 10, esta escala é chamada de Escala Mohs.

Atualmente existem diversos tipos de ensaios de dureza, com o objetivo de avaliar essa propriedade para cada material e, apesar de algumas diferenças, todos possuem o mesmo princípio de medição, onde um indentador

é pressionado sobre a superfície do material, com uma carga predefinida e controlada. O intuito dos ensaios é realizar uma deformação plástica localizada no material, de acordo com as dimensões de profundidade e largura das marcas, e utilizando equações específicas em cada tipo de ensaio se converte essas dimensões em um valor de dureza. Os principais tipos de ensaio de dureza, e suas principais características, podem ser comparadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Tipos de ensaios de dureza

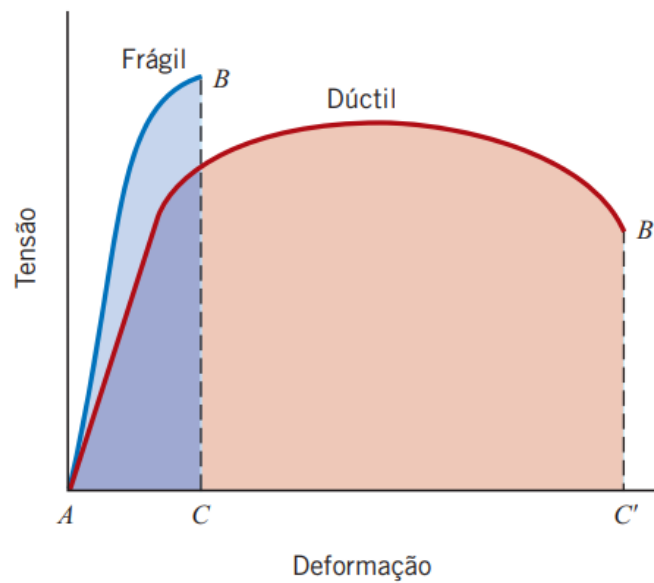
Tipo de Ensaio	Tipo de Indentador	Forma do indentador		Carga
		Visão lateral	Visão superior	
Brinell	Esfera de carbeto de tungstênio ou aço			P kg
Vickers	Pirâmide de diamante			P g
Knoop	Pirâmide de diamante			P g
Rockwell	Cone de diamante de $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{2}$ In			60kg
				100kg
				150kg
Rockwell superficial	Esfera de aço de diâmetro de $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{2}$ In			15kg
				30kg
				45kg

Fonte: Adaptada de [26].

É importante ressaltar, que como a dureza não é uma propriedade muito bem definida, devido as diferenças experimentais de cada tipo de ensaio, não existe nenhuma forma de converter o resultado de um ensaio para o outro.

- **Dutibilidade e Fragilidade:** A Dutibilidade nada mais é que uma medida do grau de deformação plástica que um material consegue receber antes da fratura, já a fragilidade é a denominação um material pouco dútil, ou seja, um material que possui uma deformação plástica muito pequena antes de romper. A Figura 24 mostra uma representação gráfica desses dois comportamentos.

Figura 24 - Dutilidade e fragilidade



Fonte: [26].

Onde o Ponto B e B' representam o ponto em que o material se rompe. Matematicamente, pode-se determiná-las tanto do alongamento percentual (%AL) quanto da redução de área percentual (%RA), expressas respectivamente pelas Equações (13) e (14).

$$\%AL = \left(\frac{L_f - L_0}{l_0} \right) \cdot 100 \quad (13)$$

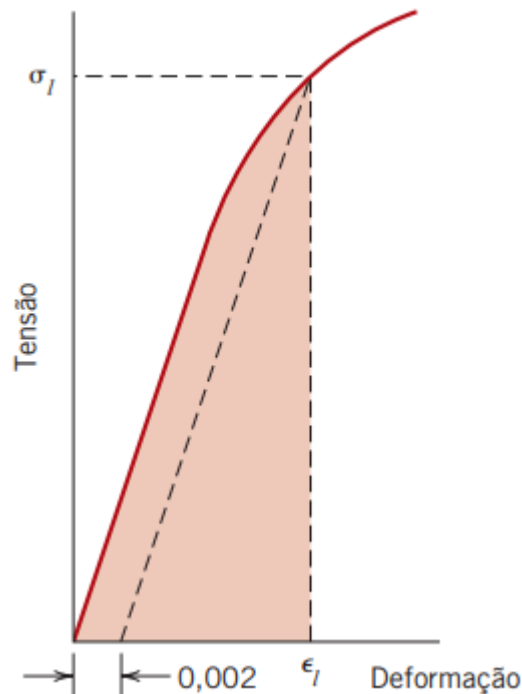
$$\%RA = \left(\frac{A_f - A_0}{A_0} \right) \cdot 100 \quad (14)$$

Logo, pode-se definir que materiais dúteis tem maior capacidade de se deformar plasticamente, enquanto materiais frágeis apresentam pouca ou quase nenhuma deformação plástica.

- **Tenacidade:** Representa a capacidade que um material possui de absorver energia e se deformar plasticamente antes de fraturar, outra definição para a tenacidade envolve a tenacidade a fratura, que basicamente é a resistência que um material trincado possui a fratura. Em uma situação estática, a tenacidade pode ser determinada para os metais a partir da área sob a curva Tensão x

Deformação de engenharia de um material até o ponto de fratura, como mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Cálculo da Tenacidade



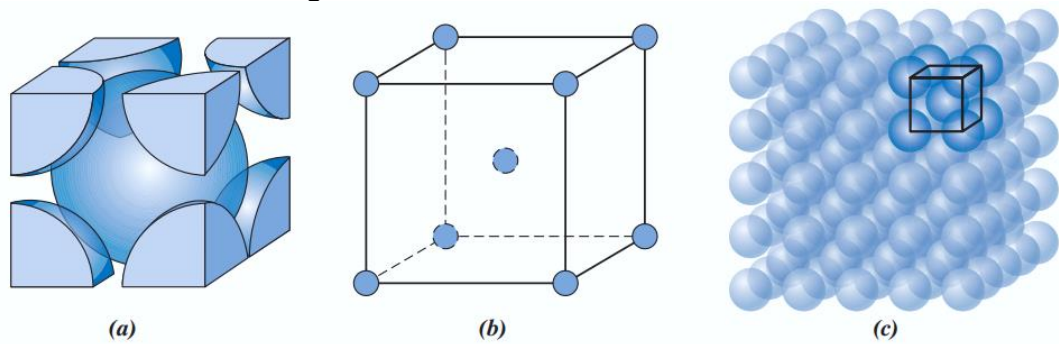
Fonte: [26].

Onde a área em vermelho representa matematicamente o valor da tenacidade. Pode-se observar da Figura 24, que materiais frágeis, em geral são menos tenazes que os materiais dúteis, como pode ser visto pela diferença de tamanho entre as áreas abaixo das curvas. É possível o desenvolvimento de dois materiais com a mesma tenacidade, mas com diferentes utilidades.

3.4.2 Microestrutura dos metais

Os metais são materiais que apresentam microestruturas cristalinas, que por sua vez são compostas por átomos metálicos dispostos em geometrias específicas, geradas devido à natureza física dos átomos dos quais as compõem e as condições as quais o metal se cristalizou. O conjunto desses cristais metálicos pode ser chamado de grão metálico, os grãos são os principais responsáveis pelas propriedades físicas dos metais [26]. Um exemplo de uma dessas microestruturas pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 - Microestrutura cristalina

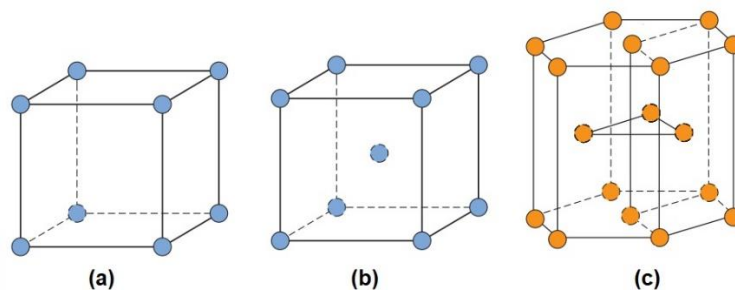


Fonte: [26].

Onde a Figura 26.a apresenta um cristal metálico de estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), a Figura 26.b é a representação da mesma estrutura cristalina, porém com esferas rígidas e menores, já a Figura 26.c representa um grão metálico composto por diversos destes cristais aglomerados.

Dentre as microestruturas dos cristais, existem 3 principais encontradas nos materiais metálicos, sendo essas a Cúbica de Face centrada (CFC), cujo átomos estão localizados nos oito vértices do cubo e no centro de cada uma das seis faces observada na Figura 27.a. A Cúbica de Corpo Centrada (CCC), cujo átomos estão dispostos nos oito vértices do cubo e um átomo fica posicionado exatamente no centro, como visto na Figura 27.b. E, por fim, a Hexagonal Compacta (HC) esta estrutura possui formato de um prisma hexagonal, onde os átomos ocupam os 12 vértices, o centro das duas bases hexagonais e os últimos 3 átomos se posicionam intercaladamente no interior da célula, como observado na Figura 27.c [26].

Figura 27 - Principais microestruturas metálicas



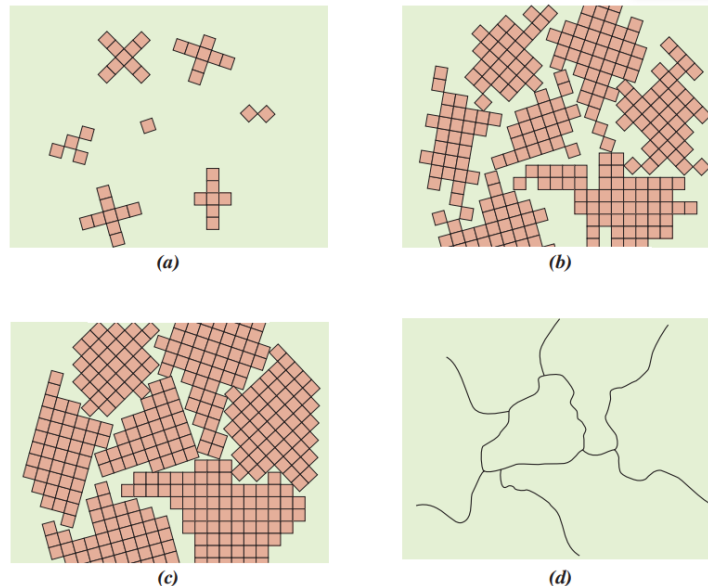
Fonte: Adaptada de [26].

Como já mencionado anteriormente as propriedades físicas dos metais são, na sua maioria, ocasionadas devido à forma a qual os grãos estão dispostos e podem se

movimentar dentro da estrutura metálica. A formação dos grãos ocorre durante a solidificação do metal, onde na estrutura policristalina, os grãos se originam em pontos distintos do metal fundido e vai se solidificando em direções distintas. Uma representação desta solidificação é representada na Figura 28.a, a qual cada quadrado representa cada célula unitária cristalina. Na figura 28.b vê-se a propagação dos grãos em direções distintas, na Figura 28.c a cristalização finalizada.

Por fim, na Figura 28.d, obtém-se uma representação de uma região de estruturas muito importantes para as propriedades dos materiais, denominada de Contorno de grãos, representada pelas linhas em preto. Essa região é onde ocorre o encontro dos grãos com diferentes orientações cristalográficas, responsável por gerar discordâncias nas estruturas dos grãos [27].

Figura 28 - Formação de grãos e contorno de grãos



Fonte: Adaptado de [27].

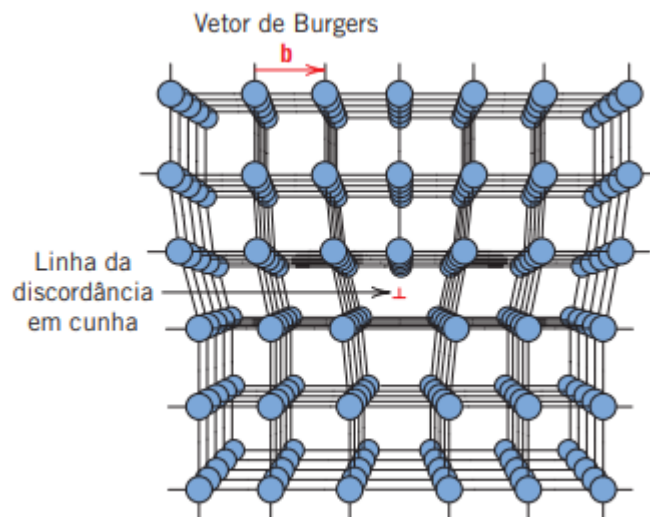
3.4.3 Discordâncias

Pode-se definir discordâncias como defeitos em linha na organização atômica dos cristais metálicos [28]. Elas ocorrem devido ao desalinhamento dos grãos em relação uns aos outros, e são o principal fator responsável pela deformação plástica. Os deslizamentos dos planos atômicos ocorrem de acordo com o vetor de Burguers, este vetor é representado pelo símbolo b e determina a direção em que os planos atômicos deslizam, além disso a sua magnitude determina a distância do escorregamento

unitário. Dentre as discordâncias existentes nos metais, pode-se destacar três tipos principais:

- **Discordâncias em cunha:** Ocorre quando existe uma inserção de um semiplano adicional de átomos no interior da rede cristalina, atuando como uma “cunha” entre os outros planos. Esse tipo de discordância ocorre perpendicularmente ao vetor de Burgers. Uma imagem representativa desta discordância é mostrada na Figura 29. A discordância em cunha pode ser representada pelo símbolo $\perp$.

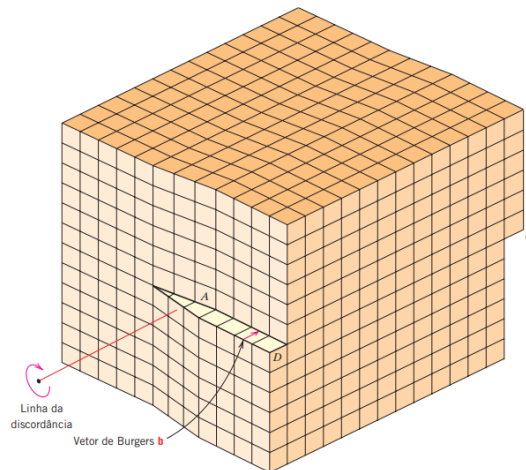
Figura 29 - Discordância em cunha



Fonte: [26].

- **Discordâncias em Hélice:** A discordância hélice é formada a partir de uma distorção por cisalhamento, é chamada em hélice devido à natureza em espiral formada pelas rampas de planos atômico ao redor da linha do defeito. Na Figura 30, observa-se o início dos degraus desse tipo de discordância. Este tipo de discordância ocorre paralelo ao vetor de Burgers e pode ser representada pelo símbolo de espiral.

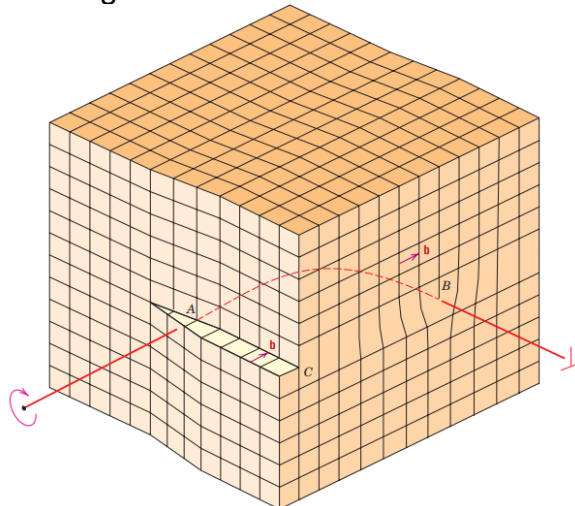
Figura 30 - Discordância hélice



Fonte: [26].

- **Discordâncias mistas:** Em um material real, pode-se encontrar discordâncias que não são puramente de cunha ou em hélice, sendo muito comum se encontrar grãos mistos, que possuam ambas os tipos de discordâncias, como mostrado na Figura 31, que mostra um exemplo de discordância mista. A discordância mista não é nem perpendicular nem paralela ao vetor de Burgers, pois possui componentes em ambas as orientações.

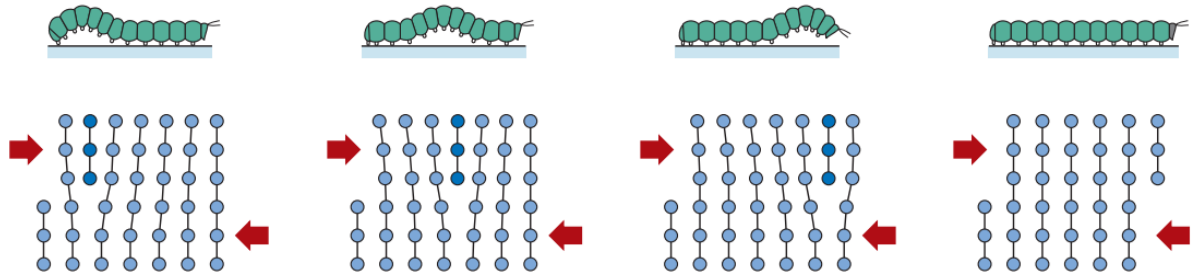
Figura 31 - Discordância mista



Fonte: [26].

O movimento realizado pelo deslizamento dos planos atômicos, muitas vezes se comportam de forma análoga ao movimento de uma lagarta, onde a corcova da lagarta representa o semiplano extra de átomos e as pernas os outros planos, tal analogia pode ser observada na Figura 32.

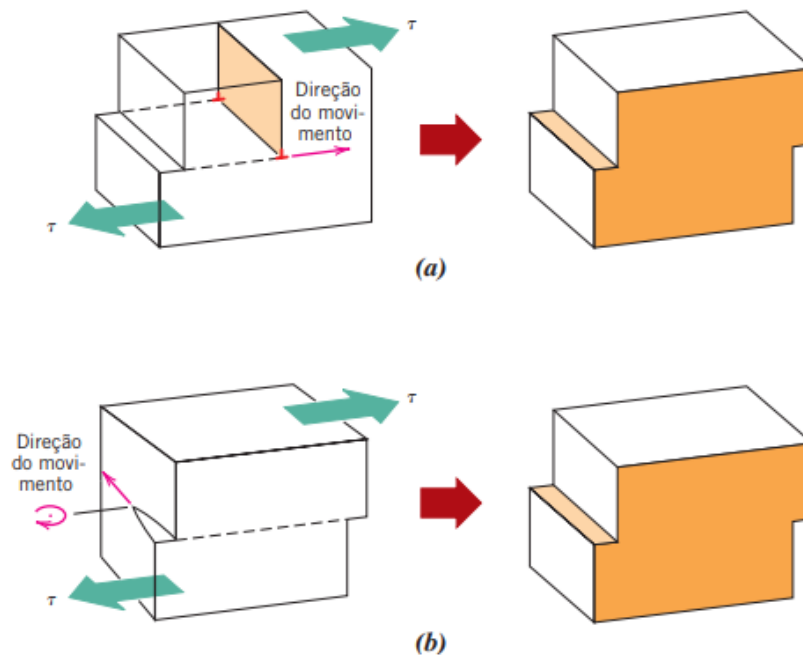
Figura 32 - Analogia da lagarta



Fonte: [26].

É importante informar também que, mesmo a direção do movimento do plano atômico, representado pelo vetor de Burgers, sendo diferente para as discordâncias em hélice e de cunha, a deformação plástica gerada pelo deslizamento será a mesma, como mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Deformação plástica final



Fonte: [26].

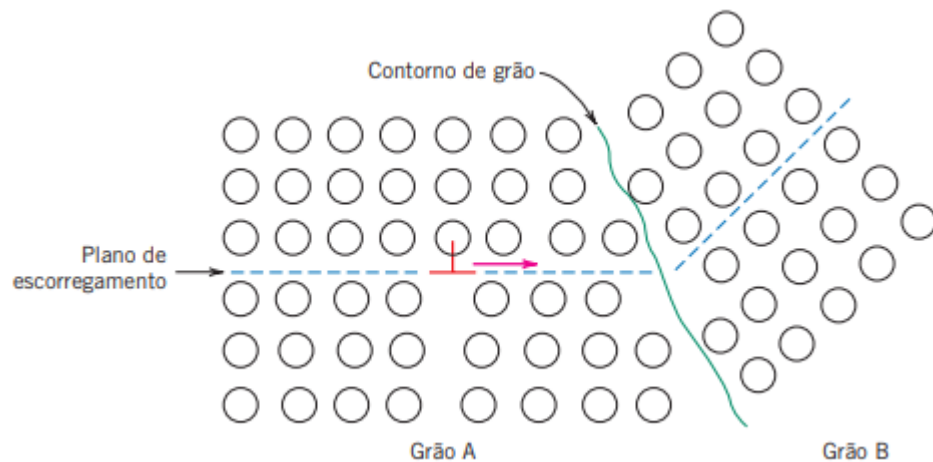
3.4.4 Mecanismos de aumento de resistência

Os mecanismos de aumento de resistência dos metais são técnicas utilizadas para tornar os materiais mais resistentes ou com maior dureza, eles são realizados a

partir da restrição do movimento das discordâncias [26]. Existem diversos mecanismos que podem provocar o aumento da resistência mecânica do material, mas pensando em laminação, deve-se destacar os seguintes:

- **Refino do tamanho de grãos:** O tamanho dos grãos influencia diretamente as propriedades mecânicas do material; grãos vizinhos, na sua maioria possuem orientações cristalográficas distintas, e como já mencionado anteriormente, o encontro entre os grãos de orientações diferentes são chamados de contornos de grãos. Os contornos de grãos atuam como uma barreira física que limita o deslizamento dos planos, devido a direção de movimento de um grão ser diferente do outro, como ilustrado na Figura 34.

Figura 34 - encontro entre grãos de orientações diferentes



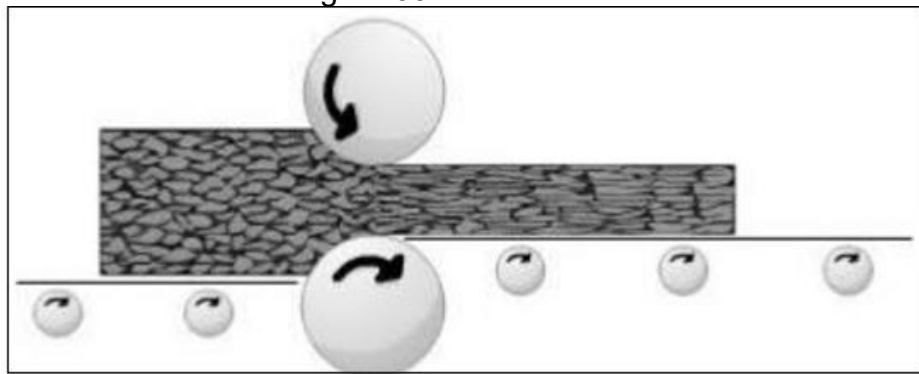
Fonte: [26].

Deste modo, ao diminuir o tamanho dos grãos de um metal, aumenta-se a quantidade dos mesmos dentro da estrutura metálica, aumentando também a desordem atômica e a quantidade de contornos de grão, tornando mais difícil realizar as deformações plásticas, consequentemente tornando o material mais resistente. O refino do grão pode ser obtido através de tratamentos térmicos específicos, que aumentam a taxa de solidificação do metal, tornando os grãos menores [26].

- **Encruamento:** É um processo que ocorre em temperaturas abaixo da temperatura de recristalização, e transforma materiais dúteis em materiais mais resistentes. O encruamento é realizado de forma mecânica durante as

deformações plásticas abaixo da temperatura de recristalização, em que a densidade de discordâncias aumenta, devido a multiplicação delas ou a formação de novas discordâncias, devido ao achatamento dos grãos proporcionados pela deformação. Como a densidade de discordâncias aumenta, a distância entre elas diminui, prejudicando ainda mais o deslizamento dos planos, exigindo ainda mais tensão para realizá-los e, conseqüentemente, criando mais discordâncias [26].

Figura 35 - Encruamento



Fonte: [29].

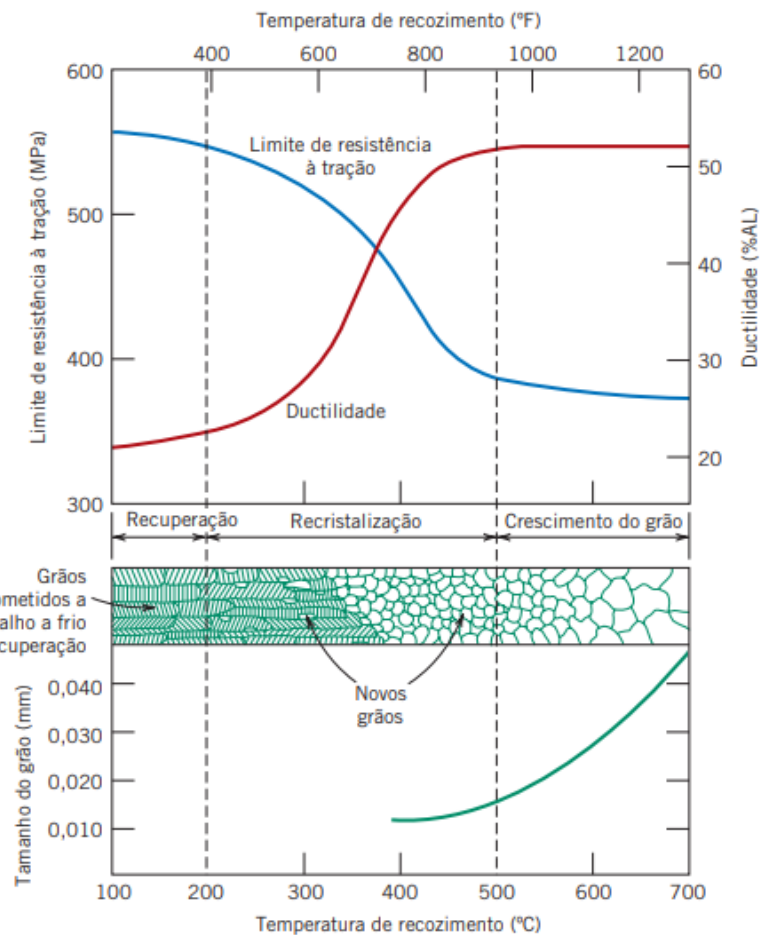
3.4.5 Tratamentos térmicos

Tratamentos térmicos são um conjunto de operações que envolvem o controle de temperatura tanto do aquecimento do material quanto do resfriamento; além da temperatura a velocidade do resfriamento dos metais também é controlada, sendo talvez a principal variável para os tratamentos. Desse modo, torna-se possível obter estruturas cristalográficas de acordo com o desejado e, conseqüentemente, as propriedades físicas que as estruturas proporcionam ao material. Dentre os tratamentos térmicos, pode-se destacar:

- **Recozimento:** Processo em que o metal é aquecido e mantido em temperatura elevada, seguido do resfriamento com velocidade lenta, o principal objetivo deste tratamento é reduzir as tensões residuais obtidas em processos de encruamento. Isso ocorre devido a um fenômeno denominado Recuperação, que ajuda no alívio das tensões por realizar a difusão atômica dos grãos encruados, diminuindo a quantidade de contorno de grãos e gerando novos

grãos com baixa energia de deformação. A recuperação é seguida por um outro fenômeno chamado de recristalização, que nada mais é que a formação de novos grãos livres de qualquer energia e equiaxiais, ou seja, grãos de mesmo tamanho e com baixa densidade de discordância. A última etapa no tratamento de recozimento é o crescimento de grãos, que como o próprio nome diz é o aumento do tamanho dos grãos, que consequentemente diminui a densidade de discordâncias, tornando o material mais dútil [26]. A Figura 36 mostra a relação da passagem do tempo em altas temperaturas com a ductilidade e o limite de resistência à tração do material.

Figura 36 - Recuperação, recristalização e crescimento de grãos



Fonte: [26]

É possível observar também na Figura 36 as etapas mencionadas do recozimento e uma representação da estrutura cristalina do material com o passar do tempo quando submetidos a altas temperaturas. Lembrando que após o crescimento de grãos é de extrema importância que a temperatura de resfriamento seja controlada, para não ocorrer a redução dos grãos.

- **Normalização:** A normalização é um tratamento realizado em materiais com estruturas cristalinas grosseira, grandes e não uniformes, com o objetivo de diminuir e padronizar os mesmos. Ele é realizado a partir do aquecimento acima da zona crítica do material, e deixado resfriar ao ar livre, de modo a tornar o resfriamento lento. A normalização torna os aços perlíticos mais tenazes.
- **Tempera:** Ao contrário dos dois tipos de tratamentos anteriores, a tempera não tem o objetivo de diminuir a resistência mecânica do material, muito pelo contrário, o objetivo deste tratamento é obter uma estrutura cristalina mais dura composta de martensita. Nesse tratamento o metal é aquecido até a austenitização e resfriado de maneira abrupta, normalmente sendo mergulhado em óleo, salmoura ou água. A alta velocidade de resfriamento impede a difusão do carbono no aço, forçando a rede cristalina mudar de CFC para TCC (Tetragonal de corpo centrado) [28].
- **Revenimento:** O revenimento é um tratamento térmico cujo objetivo é corrigir a fragilidade excessiva ocasionada nos materiais que passaram pelo tratamento de tempera. O material é aquecido abaixo da temperatura crítica e tem um resfriamento lento, deste modo aumentando levemente a tenacidade e reduzindo a fragilidade do metal.

3.5 Processos de Laminação em relação a temperatura

Assim como qualquer outro processo de conformação, a laminação pode ser realizada de diferentes formas, com o controle de diferentes variáveis, como velocidade dos rolos, espessura de laminação e número de rolos, contudo a principal variável que interfere no resultado obtido no material, após o processo, é a temperatura. Desse modo se pode classificar a laminação, em relação a temperatura, através de três tipos de trabalho distintos, sendo eles o trabalho a quente, trabalho a frio e o trabalho morno.

3.5.1 Temperatura homóloga

Apesar do nome ser sugestivo, a temperatura utilizada nos diferentes tipos de trabalho não é definida por temperaturas específicas e fixadas para todos os processos de conformação, ou seja, o trabalho a frio, não significa que os metais conformados estão a temperaturas baixas, mas sim que ele está sendo trabalhado abaixo da temperatura de recristalização [26].

Para melhor compreensão dos diferentes tipos de trabalho, precisa-se inicialmente compreender o conceito de temperatura homóloga (T_h), utilizado para fornecer uma escala comparativa universal entre os metais, já que a temperatura de fusão não é a mesma para todos, além disso a temperatura homóloga é utilizada para definir qual tipo de processo se está realizando. Segundo [15], a temperatura homóloga nada mais é que, a razão entre a temperatura atual do metal utilizado (T) no processo, pela temperatura de fusão deste mesmo material (T_m), onde ambas temperaturas são obrigatoriamente utilizadas na escala absoluta (K), conforme visto na Equação (15).

$$T_h = \frac{T}{T_m} \quad (15)$$

A partir do resultado do valor obtido da Equação (15), que por sua vez é adimensional, pode-se classificar o tipo de trabalho em que o processo de conformação está sendo realizado, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Intervalo da temperatura homóloga em relação ao processo

Processo	$T_h = T/T_m$
Trabalho a frio	< 0,3
Trabalho a morno	0,3 a 0,5
Trabalho a quente	> 0,5

Fonte: Adaptado de [15].

Na maioria dos metais, a temperatura de recristalização, ocorre em temperaturas homólogas de 0,3 a 0,5.

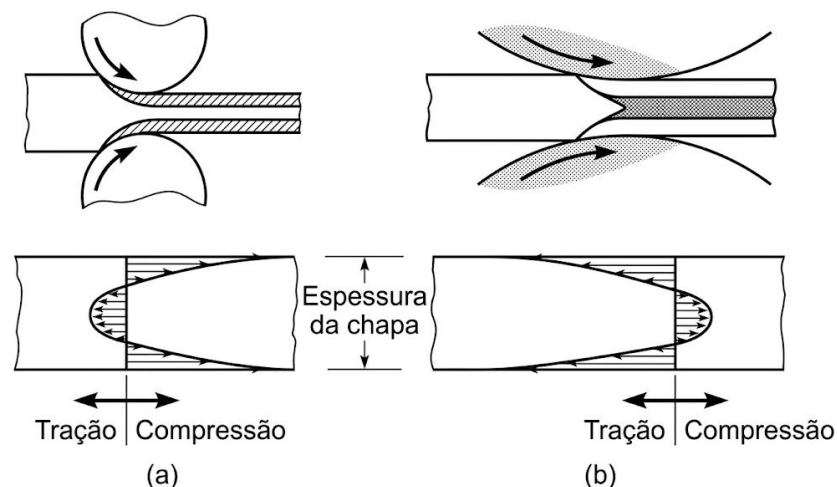
3.5.2 Laminação a frio

A laminação a frio é uma das etapas de maior destaque na indústria de chapas metálicas, por trazer diversas vantagens a indústria quando comparadas a processos semelhantes; dentre estas vantagens se pode destacar o fato de que é realizada abaixo da temperatura de recristalização ($T_h < 0,3$), podendo até mesmo ser feita a temperatura ambiente; o que elimina custos com aquecimento durante o processo, e consequentemente, com o investimento em equipamentos e combustíveis necessários para realizá-lo.

Outras duas vantagens obtidas pelo não aquecimento, são o excelente acabamento obtido no produto final, devido a eliminação da oxidação da superfície ocasionada pela energia fornecida pelo calor, que acelera a reação do metal com o oxigênio, eliminando assim a formação de carepas no metal, e a maior precisão dimensional, pois não ocorre a dilatação do metal, isso permite controles rigorosos e tolerâncias estreitas.

Pode-se também destacar como vantagem o encruamento gerado, pelo processo, assim como qualquer outro trabalho a frio, em que as cargas aplicadas sobre o material, acaba provocando o deslizamento entre as discordâncias, e consequentemente, o aumento das suas densidades. Isso, torna os grãos mais alongados, e o material mais encruado e resistente mecanicamente sem a necessidade de adições de ligas, normalmente caras para o processo. Na Figura 37, observa-se o comportamento do encruamento durante a laminação.

Figura 37 - Tensionamento não uniforme



Fonte: Adaptada de [15].

Na Figura 37.a, utiliza-se cilindros de pequeno diâmetro, ou uma redução de espessura reduzida por passe. Esses tipos de laminação a frio tendem a deformar plasticamente o metal mais nas superfícies do que no seu interior, resultando em tensões residuais de compressão nas superfícies e de tração no interior do material. Por outro lado, na Figura 37.b, nota-se uma situação inversa onde os cilindros possuem grande diâmetro, em que as reduções são elevadas; fato, que tende a deformar mais o interior do que as superfícies, causado pela restrição do atrito nas superfícies, o que gera tensões residuais de tração nas superfícies e de compressão no interior do material [15].

Entretanto, o mesmo fator que pode ser considerado vantagem, pode se mostrar como desvantagem, quando analisado por outros aspectos. O encruamento da chapa, pode aumentar sua dureza de forma excessiva, o que dificulta a laminação e implica em maiores tensões sobre o material, tornando-o cada vez mais encruado e resistente mecanicamente. Isso, dificulta a deformação e, portanto, consome maior energia para gerar maiores tensões. Outra desvantagem é o aumento da fragilidade do material, que ocorre juntamente ao aumento da dureza, devido à natureza da utilização desses produtos em estampagens profundas, dobramentos e cortes. A fragilidade, portanto, não é uma propriedade desejada, pois pode causar trincas ou fratura nas chapas, antes mesmo que ela atinja a forma final desejada [15].

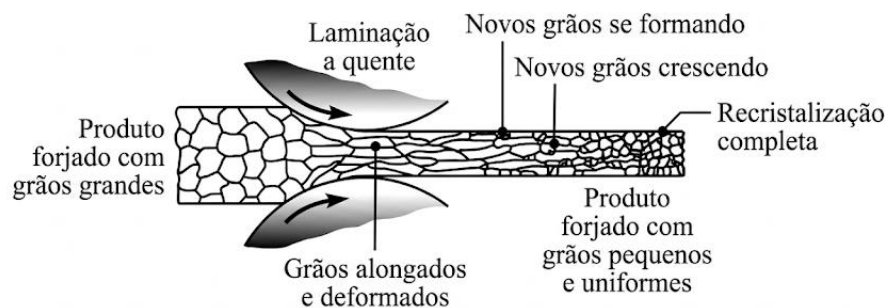
Dessa forma, para contornar os malefícios do encruamento, podem ser realizados tratamentos térmicos como o recozimento e normalização, entre os ciclos de redução da laminação, o que certamente diminuirá as tensões residuais das chapas, diminuindo a densidade de discordâncias. Todavia, esses tratamentos térmicos encarecem o processo e o deixa significativamente menos eficiente [26].

3.5.1 Laminação a Quente

Ao contrário da laminação a frio, o processo de laminação a quente ocorre acima da temperatura de recristalização do material, aquecidos através de grandes fornos industriais. O fator temperatura é fundamental para o aumento da ductilidade e redução da resistência ao escoamento do metal. Isso ocorre, mesmo havendo o alongamento dos grãos, em que o encruamento não acontece, pois o calor ao qual o

material é submetido ocasionalmente a recristalização, gerando novos grãos e promovendo seu crescimento de forma equiaxiais. Fato, que elimina possíveis tensões residuais, o que torna o processo muito mais eficiente quando o assunto analisado é a carga necessária para laminar o metal. A Figura 38 mostra um esquema das deformações que ocorrem junto a recristalização.

Figura 38 - Deformação na laminação a quente



Fonte: Adaptada de [15].

Outra vantagem que se tem neste tipo de laminação é a alta deformabilidade do material, que permite elevadas reduções sem gerar encruamento, o que elimina o risco de ruptura do material. Isso permite a laminação primária de desbaste, processo industrial que transforma lingotes em blocos ou tarugos, a partir dos laminadores de blocos. Esses laminadores são do tipo duo-reversível, sendo classificados pelo diâmetro dos rolos (de 24 a 54 pol), e que tem como objetivo transformar lingotes fundidos em blocos ou placas [14].

Entretanto, a necessidade de manter o material aquecido traz desvantagens envolvendo fatores indiretos, como custos de investimento dos equipamentos e fornos específicos para esse tipo de trabalho, combustível para mantê-los funcionando, perda de eficiência pela necessidade de espera pelo resfriamento do metal após laminação; quanto diretos como a baixa qualidade superficial devido a oxidação do material e a formação de carepas, a baixa precisão devido a contração e dilatação térmica que envolve o processo, ou as possíveis reações químicas que podem ocorrer com a atmosfera do forno, ou a descarbonetação superficial [14].

3.6 Defeitos na laminação

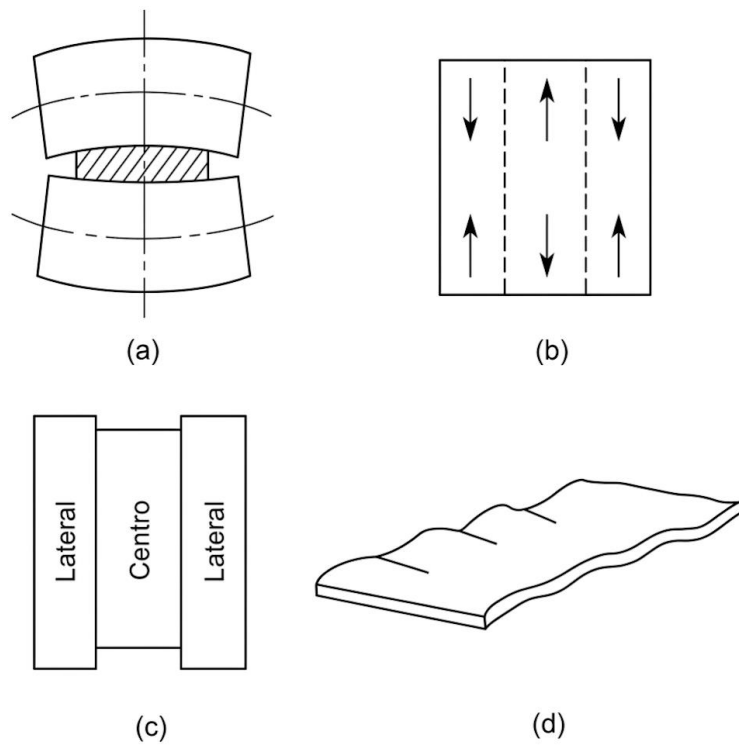
Os defeitos encontrados nos produtos laminados podem ocorrer por diversos fatores, e com diversas características, como descontinuidades, deformações indesejadas ou acabamentos ruins, que podem afetar a estrutura interna ou superfície das chapas. Para melhor compreender os motivos pelo quais tais defeitos ocorrem, pode-se classificá-los.

3.6.1 Ondulamento e dobramento

Com origem principal na interação dos rolos com o material laminado, devido as forças de laminação e deformação elástica dos rolos, os defeitos geométricos afetam o formato das chapas, tirando sua planicidade ou uniformidade de espessura.

Um exemplo desse tipo de defeito é a ondulação das bordas, causado devido a flexão dos rolos de laminação, exemplificado na Figura 39.a, de modo a tornar a abertura mais alta no centro que nas extremidades da chapa. A consequência do arqueamento do rolo é uma chapa com as bordas mais finas que o centro, contudo devido à propriedade de constância volumétrica do metal, as bordas tendem a se alongar mais que o centro, e por estarem fixas a ele, as extremidades sofrem compressão, como exemplificado nas Figuras 39.b. No caso hipotético onde as laterais não são presas ao centro tem-se algo parecido com o exemplo da Figura 39.c, e deste modo flambando lentamente, como exemplificado na Figura 39.d.

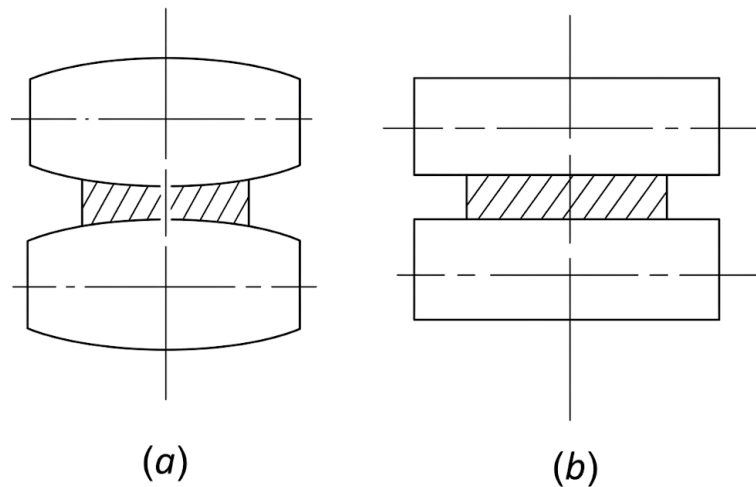
Figura 39 - Ondulação nas bordas



Fonte: Adaptada de [14].

Uma solução amplamente utilizada para este tipo de defeito é a construção dos rolos abaulados, com um perfil convexo, de modo a deixar o centro do rolo com o diâmetro maior, como observado na Figura 40.a, pois deste modo, quando o rolo fletir devido a sua deformação elástica, ele fique o mais próximo possível da planicidade. Na Figura 40.b se pode ver como os rolos durante a laminação, com as cargas de laminação atuando sobre eles e fletindo, deixando-os planos.

Figura 40 - Rolos fabricados fletidos

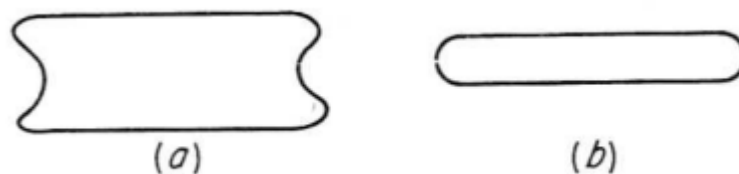


Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra tratativa melhor que construir os rolos convexos é utilizar bornes hidráulicos, que aplicam força sobre os rolos deformando-os elasticamente para correção do abaulamento excessivo, tornando o processo mais controlável.

Até aqui, apresentou-se somente defeitos que ocorrem na largura da chapa, contudo eles podem ocorrer também em suas espessuras. Em reduções leves, pode ocorrer deformações apenas na superfície das chapas, tornando suas seções transversais como mostrado na Figura 41.a, como o material sobressalente não é comprimido por nenhum material abaixo, sofre forças trativas, sendo empurrada pelo material do centro, provocando aparecimento de trincas nas arestas. O contrário também pode ocorrer, em reduções intensas se tem a formação de arestas abauladas, como visto na Figura 41.b, devido a deformação do centro com uma velocidade maior que as das extremidades, deste modo a superfície sofre forças de tração e o centro de compressão.

Figura 41 - Defeitos geométricos na espessura das chapas

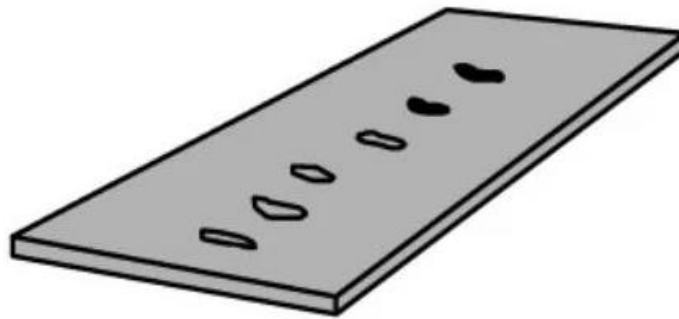


Fonte: [14].

3.6.2 Trincas e fendilhamentos

Esse tipo de defeito pode gerar descontinuidades nas chapas, formando trincas ou fendas que inutilizam a área afetada. O mesmo fator que pode causar as ondulações, pode causar trincas no centro da chapa, no sentido longitudinal, conhecidas como “*Zipper Cracks*”, como as extremidades se alongam mais que o centro, ele fica sob tensão de tração, para manter a continuidade do material, o que pode gerar as trincas mencionadas [15], como mostrado na Figura 42.

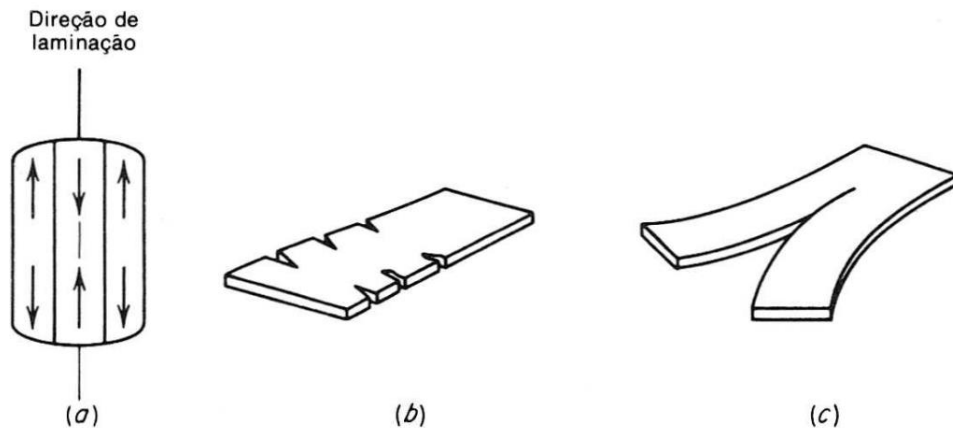
Figura 42 - *Zipper Cracks*



Fonte: [15].

Outro fator que pode ser um gerador de trincas é o espalhamento lateral do material, que com a diminuição da espessura, o material pode ir no sentido transversal da chapa, conflitando com o atrito. Como o atrito no centro da chapa é mais forte que nas extremidades, o material do centro se espalha consideravelmente menos, e essa diferença de velocidade de espalhamento faz com que as bordas se abaúlem, como mostra a Figura 43.a. Esse fenômeno é conhecido como “embaralhamento”, o que pode causar trincas nas arestas como mostrado na Figura 43.b. Em casos extremos, essa distribuição de deformação pode causar até mesmo o fendilhamento da chapa, defeito que divide a chapa ao meio, como mostra a Figura 43.c.

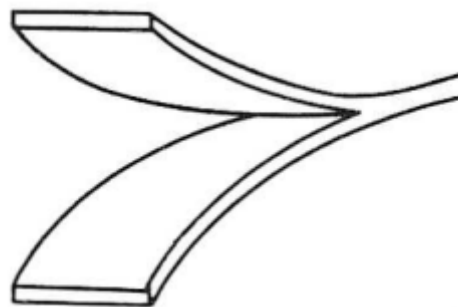
Figura 43 – Embaralhamento, Trincas laterais e Fendilhamento



Fonte: [14]

Quando se analisa a espessura, pode-se também ter um tipo de fendilhamento, nos casos onde a distribuição ocorre com compressão no centro e tração nas extremidades na direção da laminação. Para casos em que algum tipo de problema metalúrgico, como os descritos no próximo tópico estão presentes no interior da chapa, é possível a ocorrência de uma fratura que parte a espessura da chapa ao meio, dando origem ao defeito conhecido como boca de jacaré, exemplificado na Figura 44, que pode se amplificado caso algum dos rolos esteja empenado.

Figura 44 - Defeito Boca de jacaré



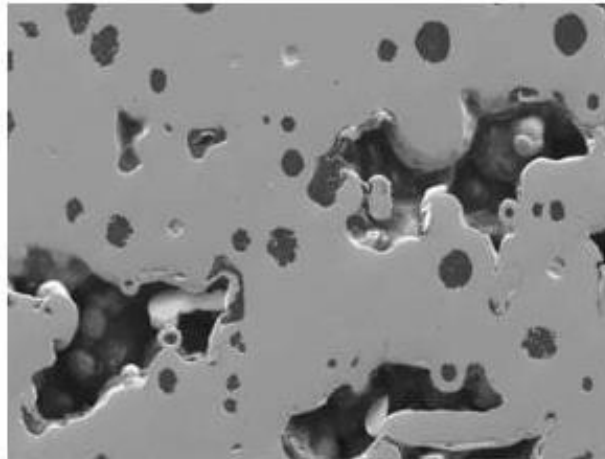
Fonte: [14].

3.6.3 Defeitos estruturais

Alguns defeitos encontrados nos produtos finais da laminação, podem ter origem em processos anteriores, como a fundição dos lingotes que serão utilizados de matéria prima para a laminação; por conta disso, esse tipo de defeito geralmente afeta a estrutura das chapas, por estarem presentes no interior dos produtos. Exemplos clássicos desse tipo de defeito são: - os vazios e porosidades, como mostrado na Figura 45, originados devido ao acúmulo de gases no interior do metal durante a

solidificação, ou pelos rechupes, causados pela contração do metal durante o resfriamento. Os vazios e porosidades podem tornar o material menos resistente por se tornarem concentradores de tensão, contudo a laminação a quente pode eliminar esse tipo de problema, comprimindo o metal, o que elimina os vazios [14].

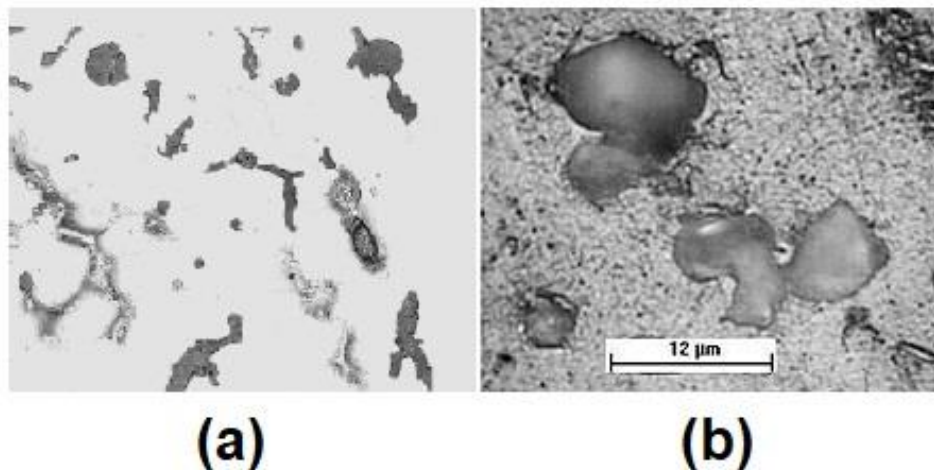
Figura 45 - Vazios e porosidades



Fonte: Adaptados de [33].

Pode-se ainda destacar dois outros defeitos que agem da mesma maneira, as inclusões e segregações. Ambos são causados por partículas e/ou elementos químicos acumulados no interior da chapa, sendo que a principal diferença entre eles estaria na causa do defeito. As inclusões são partículas sólidas estranhas, como óxidos ou restos de refratários que agem como concentradores de tensão, que podem originar trincas. Já as segregações são o acúmulo de elementos químicos distintos do aço, que resfriam após a liga metálica, o que gera fragilidade localizada no material [30]. Na Figura 46.a é mostrada uma imagem de segregações no material, ao passo que na Figura 46.b, a de uma inclusão.

Figura 46 - Segregações e Inclusões



Fonte: Adaptados de [31] e [32].

3.7 Defeitos Superficiais

Outros defeitos também muito comuns no processo de laminação, além da variação de espessura, pode envolver o acabamento superficial das chapas, devido aos grandes níveis de deformações plásticas. O material pode apresentar uma superfície rugosa, com aspecto similar ao de uma casca de laranja; daí nome do defeito de *Orange Peeling*. Este defeito é muito característico em chapas metálicas com grãos grosseiros, e retrata a heterogeneidade da deformação desses grãos, aparecendo em relevo na superfície, como mostrado na Figura 47.

Figura 47 - Defeito casca de laranja



Fonte: [34].

Além de rugosidade da superfície, podem também ser observadas algumas estrias, conhecidas como nervuras de distensão ou “Bandas de Luders”, que ocorrem como depressões como as mostradas na Figura 48. Esse tipo de defeito ocorre em metais com o limite de escoamento descontínuo e, portanto, associado a deformações não uniformes. Entretanto, é possível mitigar esse defeito a partir de uma laminação superficial a frio da ordem de 1/2 a 2% da espessura da chapa.

Figura 48 - Bandas de Luders



Fonte: [14].

4 ANÁLISE TEÓRICA

Neste capítulo, aborda-se os conceitos geométricos, analíticos e físicos relacionados aos processos de laminação a frio e a quente, os quais fundamentarão o desenvolvimento e automatização dos cálculos iterativos dura processo.

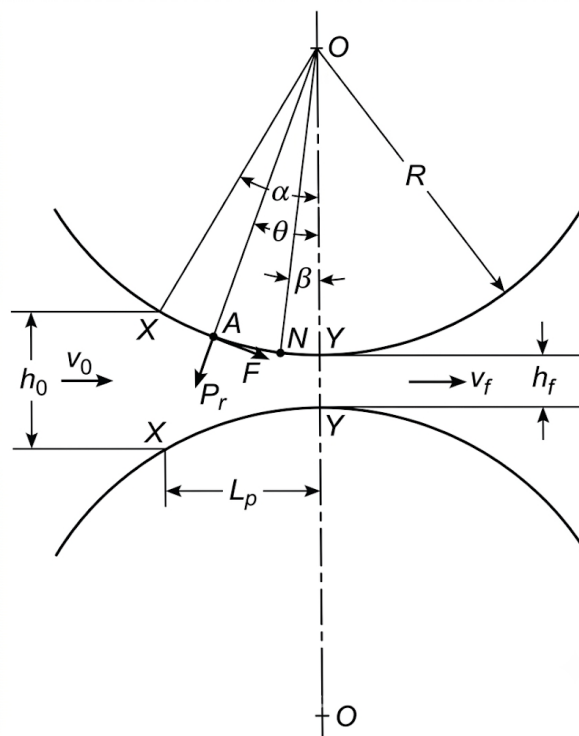
4.1 Cálculos na laminação

Demonstra-se geométrica e fisicamente como ocorre o processo e quais incógnitas se devem controlar, garantindo a eficiência do processo de laminação.

4.1.1 Relações geométricas e forças

Para se entender a dinâmica do processo de laminação é de extrema importância se compreender quais as forças, cálculos e geometrias caracterizam o processo de laminação. Daí, a partir da Figura 49, introduz-se o assunto.

Figura 49 - Forças atuando na laminação



Fonte: [14].

Na Figura 49, observa-se uma chapa metálica de espessura h_0 entrando em um laminador a partir do plano XX , com uma velocidade v_0 . Ao sair do laminador no plano YY esta mesma chapa possui uma espessura reduzida h_f a uma velocidade v_f . Durante a laminação, a deformação da largura b , é desconsiderada, de modo a tornar toda deformação no sentido do alongamento, na direção da laminação. Tendo em mente a propriedade do volume constante, obtém-se a Equação (16).

$$b \cdot h_0 \cdot v_0 = b \cdot h_f \cdot v_f \quad (16)$$

A velocidade de laminação cresce de forma contínua conforme o desenvolvimento do processo, tornando-se nula em apenas um ponto, conhecido como “Ponto neutro” (N), mostrado na Figura 49; a velocidade neste ponto é similar a velocidade dos rolos, devido a ação da força de atrito causada por eles. No ponto A apresentado na Figura 49, e em qualquer outro ponto de contato entre a chapa e os rolos, duas forças atuam, sendo elas a radial (P_r) e a tangencial de atrito (F). No início do processo a velocidade dos rolos é maior que a da chapa, deste modo a força de atrito atua puxando a chapa para os rolos, como indicado na Figura 49. No ponto neutro a velocidade dos rolos é igual à da chapa, e após este ponto a velocidade da chapa é maior e o atrito atua contrário a saída da placa.

A componente radial P_r , também conhecida como carga de laminação (P), representa a força com a qual os rolos comprimem o metal, A pressão específica dos rolos (p) pode ser calculada pela relação entre a carga de laminação e a área em que ela está aplicada, que pode ser obtida multiplicando a largura da chapa pelo comprimento projetado do arco (L_p), mostrados na Figura 49, e expressa pela Equação (17), onde R é o raio dos rolos [14].

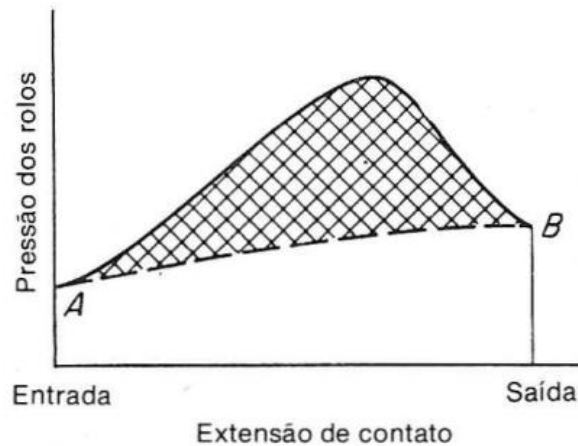
$$L_p = \left[R(h_0 - h_f) - \frac{(h_0 - h_f)^2}{4} \right]^{1/2} \approx [R(h_0 - h_f)]^{1/2}, \text{ logo:} \\ L_p \approx \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (17)$$

Logo a pressão específica é obtida pela Equação (18).

$$p = \frac{P}{b \cdot L_p} \quad (18)$$

Ao se observar os gráficos da pressão exercida pelos rolos pela extensão de contato deles (Figura 50), pode-se notar algo interessante sobre o ponto neutro. O pico do gráfico da distribuição de pressão representa o ponto neutro do processo, e ao contrário do idealizado, não existe um pico pontiagudo, o que mostra que o ponto neutro, na verdade é uma área.

Figura 50 - Gráfico de distribuição de pressão



Fonte: [14].

A área hachurada acima do pontilhado representa matematicamente a força necessária para superar a força de atrito entre o metal e os rolos, enquanto a área abaixo dela representa a força necessária para deformação homogênea do material por compressão, já que a soma destas duas áreas, ou seja, a área sobre toda a curva é proporcional à carga de laminação. Isto porque, multiplicando a área do gráfico pela largura da chapa se obtém, matematicamente, o valor desta carga [14].

O ângulo α apresentado na Figura 49 é conhecido como ângulo de contato, ou de ataque. Ao se decompor os vetores de forças, P_r e F em relação ao ângulo α , no plano de laminação, encontra-se os componentes horizontais, que atuam como:

- $P_r \cdot \sin(\alpha)$ – Atua como força normal (90° a superfície)
- $F \cdot \cos(\alpha)$ – Atua na direção de abertura dos rolos

Para o material entrar entre os rolos, a componente horizontal do atrito deve ser igual a componente da carga de laminação, logo obtém-se a Equação (19).

$$\begin{aligned}
 F \cdot \cos(\alpha) &= P_r \cdot \sin(\alpha) \\
 \frac{F}{P_r} &= \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} \\
 \frac{F}{P_r} &= \operatorname{tg}(\alpha)
 \end{aligned} \tag{19}$$

Levando em consideração equação de atrito (Equação 20) e isolando o coeficiente de atrito (μ), pode-se substituir a Equação (19), de onde tem-se a Equação (21).

$$F = \mu \cdot P_r \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{F}{P_r} &= \mu \\
 \mu &= \operatorname{tg}(\alpha)
 \end{aligned} \tag{21}$$

Para que a laminação ocorra, o atrito não pode ser nulo, caso contrário os rolos ficariam deslizando sobre o metal, com isso se conclui que $\mu > 0$, consequentemente $\operatorname{tg}(\alpha) > 0$.

É intuitivo o fato de que rolos de maiores raios podem possuir reduções diferentes de rolos com diâmetros menores, isso ocorre devido a diferença de comprimento dos arcos. Deste modo, considerando-se as condições de atrito e o ângulo de ataque de ambos os diâmetros dos laminadores, pode-se expressar a equação que determina a redução máxima que um laminador. Para isso, analisa-se a geometria do processo, considerando a simetria da chapa metálica, como mostrado na Figura 51.

$$(\Delta h)_{max} = \mu^2 \cdot R \quad (23)$$

Pode-se ressaltar que Δh é chamada de Redução total, que pode ser expressa de forma relativa e percentual, por intermédio da Equação (24).

$$r\% = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% \quad (24)$$

4.1.2 Potência pelo método da energia de deformação uniforme

Para calcular a potência utilizada para laminar o material se pode utilizar dois métodos principais, o primeiro deles é conhecido como Método da energia de deformação uniforme. Nesse método é necessário realizar algumas considerações, sendo elas: - o atrito é nulo, a deformação ocorre sob deformação plana, ou seja, considera-se que $b_0 = b_f$, o volume de material se mantém constante, a deformação é homogênea, como se negligencia o trabalho redundante, ou seja, despreza-se o atrito interno. Isso, portanto, implica que o trabalho definido no final seja inferior ao trabalho real. O método consiste em calcular a energia gasta (u) para deformar o volume do material, com auxílio da Equação (25).

$$u = \int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} \quad (25)$$

Assim sendo, para se obter o valor do trabalho é necessário calcular a deformação efetiva utilizando a equação da deformação Dorn, dada pela Equação (26).

$$d\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(d\epsilon_t - d\epsilon_b)^2 + (d\epsilon_b - d\epsilon_l)^2 + (d\epsilon_l - d\epsilon_t)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

Onde $d\epsilon_t$ representa a deformação na espessura, $d\epsilon_b$ a deformação na largura e $d\epsilon_l$ a deformação no comprimento. Sabendo que o volume é constante, Equação

(27), e considerando que não existe deformação no sentido da largura ($d\epsilon_b = 0$), tem-se:

$$d\epsilon_t + d\epsilon_b + d\epsilon_l = 0 \quad (27)$$

De onde isolando a deformação na espessura, na Equação (27), considerando ($d\epsilon_b = 0$), obtém-se (28):

$$\begin{aligned} d\epsilon_t &= d\epsilon_b - d\epsilon_l \rightarrow d\epsilon_t = -d\epsilon_l \\ d\epsilon_t &= (-d\epsilon_l) \end{aligned} \quad (28)$$

Substituindo a Equação (28) na Equação (26) e considerando a deformação na largura nula, tem-se:

$$\begin{aligned} d\bar{\epsilon} &= \frac{\sqrt{2}}{3} [(d\epsilon_t - d\epsilon_b)^2 + (d\epsilon_b - d\epsilon_l)^2 + (d\epsilon_l - d\epsilon_t)^2]^{\frac{1}{2}} \\ d\bar{\epsilon} &= \frac{\sqrt{2}}{3} [(d\epsilon_t - 0)^2 + (0 - d\epsilon_l)^2 + (d\epsilon_l - (-d\epsilon_l))^2]^{\frac{1}{2}} \\ d\bar{\epsilon} &= \frac{\sqrt{2}}{3} [d\epsilon_t^2 + d\epsilon_t^2 + 4 \cdot d\epsilon_t^2]^{\frac{1}{2}} \\ d\bar{\epsilon} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot d\epsilon_t \end{aligned} \quad (29)$$

Na Equação (29) a constante $\frac{2}{\sqrt{3}}$ (aprox. 1,155) surge do critério de escoamento de Von Mises aplicado à restrição lateral da chapa, ou seja, deformação no estado plano. A partir da deformação verdadeira na espessura, Equação (9), e a Equação (29), pode-se integrar a deformação infinitesimal $d\bar{\epsilon}$, obtendo-se a deformação média, mostrada pela Equação (30).

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot |\epsilon_t| \rightarrow \bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad (30)$$

Para o cálculo médio da energia de deformação uniforme, utiliza-se a tensão média de escoamento e a deformação média, e substituindo a deformação média da Equação (30), na Equação (25), considerando-se o volume, obtém-se a Equação (31).

$$U = \int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} dV \quad (31)$$

O próximo passo é calcular o fluxo de material ($\dot{V}$), que por sua vez, é obtido pela multiplicação da energia necessária por unidade de volume, pelo fluxo de material (Equação 32).

$$\dot{V} = b \cdot h_f \cdot v_f \quad (32)$$

Onde b é a largura, h_f a espessura final e v_f a velocidade de saída. Como a potência é igual a energia por volume multiplicada pelo fluxo de material, e como já definido essas duas grandezas, ($Pot = u \cdot \dot{V}$), a potência média pode ser dada pela Equação (33).

$$Pot = \int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} \cdot (b \cdot h_f \cdot v_f) \quad (33)$$

4.1.3 Potência pelo método *Slab* Simplificado

O segundo método existente para calcular a potência é o chamado de Método *Slab* ou método dos Blocos, este método é muito mais robusto, pois considera o equilíbrio de forças sofridas pelo material todo em “fatias” infinitesimais do volume total, o que deu origem ao nome “*Slab*”. Ao contrário do anterior considera o atrito entre rolos e chapas e se utiliza de equações diferenciais para encontrar a distribuição de pressão ao longo do contato, obtendo valores mais próximos aos reais. Devido à alta complexidade deste método, existem algumas simplificações que podem ajudar a chegar a um valor mais próximo do real sem a necessidade de utilização das equações diferenciais, que só seria possível resolver com o auxílio computacional. Assim sendo, no presente trabalho, o método *slab* será tratado de forma simplificada.

O atrito considerado no método é representado pelo parâmetro de atrito (Q), que representa a interação do atrito com a geometria dos rolos e o material, deste modo permitindo a análise do aumento da pressão ocasionada pelo atrito dos rolos.

- a) Na laminação a frio o atrito considerado é do tipo deslizante (Coulomb), em que o parâmetro de atrito para laminação a frio é definido pela Equação (34).

$$Q = \frac{\mu \cdot Lp}{\bar{h}} \quad (34)$$

Onde $\bar{h}$ a média de espessura entre a espessura de entrada e a de saída. É possível notar que o parâmetro de atrito é diretamente proporcional ao coeficiente de atrito μ e o comprimento de arco dos rolos Lp .

- b) Para a laminação a Quente, a situação se diferencia um pouco devido ao aumento de viscosidade do metal, impossibilitando a utilização do atrito de Coulomb e considerando o atrito viscoso, o que torna necessário o cálculo do parâmetro de atrito a quente (Q_p) utilizado na equação de Sims, uma variante da equação de Orowan-Pascoal, expressa pela Equação (35).

$$Q_p = 0,25 \cdot \left[\pi + \frac{Lp}{h} \right] \quad (35)$$

Para se encontrar a potência de laminação (Nt), no método *slab* simplificado, precisa-se inicialmente encontrar o valor da carga de laminação (P), que assim como qualquer carga é a multiplicação da pressão média de deformação pela área, como mostrado na Equação (36).

$$P = \bar{p} \cdot A \quad (36)$$

Onde A é a área de contato dos rolos com o material, sendo todo arco de contato do rolo, pela largura da chapa, Equação (37), e $\bar{p}$ é a pressão média de laminação, obtida ao integrar a distribuição de pressão sobre o arco de contato do rolo (Equação de Von Kármán), de onde obtém-se a Equação (38).

$$A = b \cdot Lp \quad (37)$$

$$\bar{p} = \sigma' \cdot \left[\frac{1}{Q} (e^Q - 1) \right] \quad (38)$$

Dessa forma, no caso da laminação a frio, pode-se substituir a Equação (37) e (38) na Equação (36), de maneira a se obter a equação que define P (Equação 39).

$$P = \bar{p} \cdot A \rightarrow P = \sigma' \cdot \left[\frac{1}{Q} (e^Q - 1) \right] \cdot b \cdot Lp$$

$$P = \sigma' \cdot \left[\frac{b}{Q} (e^Q - 1) \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \right] \quad (39)$$

Para o cálculo da carga de laminação, precisa-se fazer algumas considerações, como a condição de deformação plana no critério de escoamento de Von Mises, como a suposição de um material rígido plástico (σ'). Além disso, pode-se definir o valor do limite de escoamento em compressão sob deformação plana σ' , em função do limite de escoamento em compressão simples σ_0 , multiplicando por aproximadamente 1,15555 (15,5%); esse valor se refere ao valor adicional de tensão necessário para atuar devido a restrição da largura, como mostra a Equação (41).

$$\sigma' = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_0 \quad (41)$$

Todavia, para a laminação a quente, deve-se levar em consideração o atrito viscoso, o limite de escoamento em compressão uniaxial σ_0 , sendo a carga P estabelecida pela Equação (40) através da Equação (35).

$$P = \sigma_0 \cdot b \cdot Lp \cdot Q_p \quad (40)$$

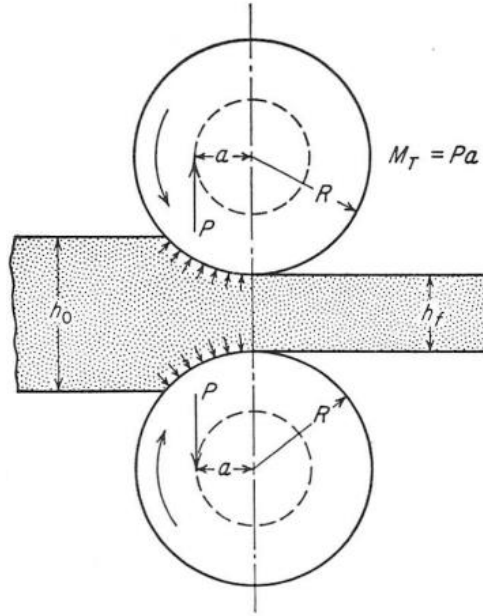
Com a carga dimensionada, pode-se calcular a potência da laminação para ambos os processos a frio ou a quente. Assim, inicialmente, precisa-se do trabalho realizado pelo cilindro (rolo) durante a laminação (W). O trabalho é definido pela carga P multiplicada pelo perímetro percorrido pelo cilindro, contudo na laminação se emprega geralmente 2 cilindros, o que implica na multiplicação da equação do trabalho por 2, como na Equação (43).

$$W = 2 \cdot P \cdot (2 \cdot \pi \cdot a) \quad (43)$$

Onde a representa o braço do torque, observado na Figura 52, que para reduções pequenas é definido pela Equação (44).

$$a = Lp/2 \quad (44)$$

Figura 52 - Trabalho na laminação



Fonte: [14].

Para obtenção da potência basta multiplicar o trabalho pelo tempo em que ele está atuando; no caso, multiplica-se pela rotação em RPM (n), em que se obtém o número de rotações por minuto. Daí, pode-se convertê-lo em cavalo vapor (CV). Sabe-se, que $1CV = 75kg \cdot m/s$, deste modo se entende que para cada minuto $4500kg \cdot m/min$ de potência são consumidos, implicando na equação da potência, definida pela Equação (45).

$$N_t = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot P \cdot n}{4500} \quad (45)$$

Contudo a Equação (45) não considera as perdas por atrito nos componentes como mancais, rolamentos e perdas sonoras e por calor, o que torna necessário o cálculo do rendimento do motor, η_t . Portanto, a Potência do motor é expressa pela Equação (46).

$$N_m = \frac{N_t}{\eta_t} \quad (46)$$

5 ESTUDO DE CASO – CÁLCULO ANALÍTICO DOS PASSES DE LAMINAÇÃO

Para melhor compreensão dos processos e métodos analíticos apresentados anteriormente para a laminação a frio e a quente, deve-se aplicá-los em cálculos reais e observar como a teoria se comporta ao ser utilizada em situações práticas.

5.1 Cálculo dos passes de laminação.

Sabemos que na maioria das vezes, a laminação direta da espessura inicial (h_0), para a espessura final (h_f) é muito agressiva, tanto para o material quanto para os equipamentos envolvidos, tornando essa prática inviável, deste modo, é comum a realização da laminação em diversos passes, cada vez diminuindo mais a redução até que o material atinja a espessura desejada inicialmente. O cálculo dos passes, são realizados de forma iterativa, ou seja, os valores obtidos na etapa anterior são utilizados para as etapas posteriores de cálculo, de modo a formar ciclos de cálculos, onde os mesmos fatores vão sendo redefinidos a partir do seu valor anterior.

Para iniciar os cálculos é necessária uma análise prévia levando em conta a carga de separação que os rolos suportam, pois em casos reais os rolos podem não suportar a força de reação que o material exerce sobre eles.

Para saber qual espessura mínima que os rolos conseguem laminar inicialmente, sem que a cara de separação (P) seja maior que a carga máxima que os rolos suportam (P_{max}), é realizado um cálculo que simula um passe de redução, calculando a carga no final do passe e comparando-a com o valor da carga P_{max} . Deste modo, inicia-se calculando o Δh_{max} a partir da Equação (23).

O próximo passo é calcular a espessura final desse primeiro passe teórico, para isso se deve lembrar que Δh_{max} é a diferença entre a espessura final e inicial, como visto na Equação (46).

$$\Delta h_{max} = h_0 - h_p \quad (46)$$

Onde h_p é a espessura final do passe. O próximo passo é calcular o fator de atrito Q a partir da Equação 34, para laminações a frio, ou a Equação 35, no caso de laminação a quente, contudo para isso é necessário calcular paralelamente o valor de Lp , Equação (17), e a espessura média do passe $\bar{h}$ expressa pela Equação (47).

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_p}{2} \quad (47)$$

Com o valor de Q calculado, pode-se obter o valor da carga de separação P , a partir da Equação (39) para trabalho a frio e Equação (40) para trabalho a quente.

Nessa etapa do cálculo, é de extrema importância saber que tipo de deformação está sendo analisada, pois caso a laminação esteja ocorrendo em estado de deformação plana, deve-se calcular a carga de separação a partir da tensão σ' , ou seja, pode-se utilizar a Equação (39) diretamente; caso contrário, se haja disponibilidade do limite de escoamento do material em compressão simples σ_0 , é necessário o cálculo de σ' , limite de escoamento em compressão sob deformação plana, a partir da Equação (41).

Se o valor obtido de P for maior que o valor de P_{max} , significa que o laminador não irá suportar a carga exigida para laminar essa espessura; logo deve ser feita uma correção da redução da espessura final do primeiro passe, deixando o espaço entre os rolos maior, e consequentemente, diminuído a carga de separação exigida.

Para isso, divide-se o valor de Δh_{max} , por um fator de correção F_c , obtendo um diferencial da redução da espessura corrigido ($\Delta h_{max}'$), como mostrado na Equação (48), que por sua vez terá uma espessura final de passe h_p maior, ao se utilizar a Equação (46).

$$\Delta h_{max}' = \frac{\Delta h_{max}}{F_c} \quad (48)$$

Esse fator de correção, deve ter como primeiro valor $F_c = 2$, contudo, ele varia de acordo com o número de vezes em que se corrige o valor de Δh_{max} . Ou seja, no caso da primeira correção, em que se divide Δh_{max} pela metade, não define uma carga de separação menor que a carga máxima suportada pelos rolos ($P > P_{max}$), deve-se refazer o passe simulado, mas utilizando o valor de $F_c = 3$, e no caso do valor corrigido $\Delta h_{max}' = \left(\Delta h_{max}'/3\right)$, ainda não tenha reduzido a espessura do passe o suficiente para diminuir a carga de separação, deve-se utilizar $F_c = 4$, e assim por diante, até que $P < P_{max}$.

Quando se atinge a condição de carga máxima, considera-se esse passe de correção, como o primeiro passe da laminação, pois o laminador consegue realizar a atividade, e seguir calculando os próximos passos, de forma que a chapa atinja a espessura final desejada. Os cálculos de passe são realizados da mesma forma, eliminando somente a necessidade de corrigir o Δh_{max} , que se torna constante.

É de boa prática calcular a redução percentual em cada passe, válido, a partir da Equação (24), para determinação em qual passe se obteve a maior redução.

Em alguns casos, geralmente após a laminação a quente, é comum a realização de passes de acabamento, realizados com laminação a frio, para melhorar o acabamento superficial da chapa ou melhorar a resistência mecânica por encruamento. Para isso é considerado como redução, uma porcentagem da maior redução percentual realizada em todo o processo, utilizando-se a Equação (24). Assim, considera-se como $r\%$ a porcentagem desejada da maior redução percentual, e isolando-se o h_0 na equação para encontrar a espessura a qual a chapa deve iniciar o passe de acabamento, sem que o valor final de h_f seja menor que o desejado no início do processo.

Por fim, calcula-se o valor da potência de laminação (N_t) exigida para realização do processo de laminação, sendo comum utilizar na Equação (45), para o valor de P , equivalente a maior carga utilizada no processo, de forma a obter a potência máxima utilizada. Caso a velocidade angular cilindros seja definida em rad/s , a velocidade dos cilindros deve ser convertida para RPM utilizando a Equação (49), onde w é a velocidade angular do cilindro em rad/s .

$$n = \frac{w \cdot 60}{2\pi} \quad (49)$$

5.2 Demonstração dos cálculos dos passes de laminação

Para exemplificação de como seriam calculados os passes durante um processo de laminação, vamos apresentar um cenário real e realizar o estudo de caso.

Necessita-se reduzir a espessura de uma chapa de aço *ABNT 1020* de dimensões iniciais $650 \times 4,2 \text{ mm}$ para uma espessura final de $650 \times 1,52 \text{ mm}$. O laminador no qual a operação a frio será realizada possui dois cilindros de 250 mm de diâmetro a uma

velocidade angular constante de 4 rad/s . Para esse laminador, tem-se que a carga de separação máxima admissível de 300 tons , com um coeficiente de atrito na interface chapa-cilindro de $\mu = 0,08$ e um limite de escoamento médio em compressão sob deformação plana de $\sigma' = 46,2 \text{ kg/mm}^2$. Desse modo, deseja-se determinar as seguintes informações:

- A redução máxima por passe suportada pelo equipamento;
- O número de passes, considerando 2 passes de acabamento, aplicando uma redução equivalente a apenas 1% da redução máxima do processo;
- A potência de laminação para o passe mais severo.

Inicia-se o estudo de caso definindo os parâmetros associados ao cenário proposto, em que se tem:

$$\begin{aligned} h_0 &= 4,2\text{mm} ; h_f = 1,5\text{mm} ; R = 125\text{mm} ; b = 650\text{mm} \\ P_{max} &= 300\text{tons} ; \mu = 0,08 ; \sigma' = 46,2 \text{ kg/mm}^2 ; w = 4\text{rad/s} ; \\ &\textit{Estado plano de deformações e Laminação a Frio} \end{aligned}$$

Com os parâmetros definidos, pode-se iniciar o cálculo do primeiro passe, com o Δh_{max} original, para ver se a carga de separação é suportada pelo laminador

$$\Delta h_{max} = \mu^2 \cdot R = (0,08)^2 \cdot 125 \rightarrow \Delta h_{max} = \mathbf{0,8mm}$$

A partir do Δh_{max} , calcula-se o valor da espessura final proposta h_p e também o valor de L_p .

$$\Delta h_{max} = h_0 - h_p \rightarrow h_p = h_0 - \Delta h_{max} = 4,2 - 0,8 \rightarrow h_p = \mathbf{3,4mm}$$

$$L_p = \sqrt{R \cdot \Delta h_{max}} = \sqrt{125 \cdot 0,8} \rightarrow L_p = \mathbf{10mm}$$

Com h_p se calcula a espessura média $\bar{h}$

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_p}{2} = \frac{4,2 + 3,4}{2} \rightarrow \bar{h} = 3,8mm$$

Com os valores de L_p e $\bar{h}$ e levando em conta que a laminação está sendo realizada a frio, pode-se calcular o fator de atrito Q

$$Q = \frac{\mu \cdot L_p}{\bar{h}} = \frac{0,08 \cdot 10}{3,8} \rightarrow Q = 0,2105$$

Com o valor de Q e levando em conta que a tensão está em estado plano de deformação, podemos finalmente obter o valor da carga de laminação do primeiro passe.

$$P = \sigma' \cdot \left[\frac{b}{Q} (e^Q - 1) \cdot L_p \right] = 46,2 \left[\frac{650}{0,2105} \cdot (e^{0,2105} - 1) \cdot 10 \right] \rightarrow$$

$$\rightarrow P = 334250,7 \text{ kgf} \approx \mathbf{334,3 \text{ tons}}$$

A carga para a simulação de passe foi de $P = 334,3 \text{ ton}$, ao se comparar com a carga máxima suportada pelos cilindros $P_{max} = 300 \text{ tons}$, nota-se que $P > P_{max}$. Dessa forma, torna-se necessário corrigir o valor de Δh_{max} e recalculer a situação equivalente ao primeiro passe. Como é a primeira correção, o fator de correção $F_c = 2$, para tornar a redução inicial maior e, portanto, reduzir a carga de laminação.

$$\Delta h_{max}' = \frac{\Delta h_{max}}{F_c} = \frac{0,8}{2} \rightarrow \Delta h_{max}' = \mathbf{0,4mm}$$

Com o valor $\Delta h_{max}'$, deve-se recalculer todas os fatores como feito anteriormente de modo a obter o novo valor de P . Logo, calculando os novos valores de h_p e L_p , tem-se:

$$\Delta h_{max}' = h_0 - h_p \rightarrow h_p = h_0 - \Delta h_{max}' = 4,2 - 0,4 \rightarrow \mathbf{h_p = 3,8mm}$$

$$L_p = \sqrt{R \cdot \Delta h_{max}} = \sqrt{125 \cdot 0,4} \rightarrow \mathbf{L_p = 7,071mm}$$

Calculando-se a espessura média $\bar{h}$

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_p}{2} = \frac{4,2 + 3,8}{2} \rightarrow \bar{h} = 4mm$$

Calculando o novo valor de Q

$$Q = \frac{\mu \cdot Lp}{\bar{h}} = \frac{0,08 \cdot 7,071}{4} \rightarrow Q = 0,14142$$

Desse modo, obtém-se o valor da nova carga

$$P = \sigma' \cdot \left[\frac{b}{Q} (e^Q - 1) \cdot Lp \right] = 46,2 \left[\frac{650}{0,14142} \cdot (e^{0,14142} - 1) \cdot 7,071 \right] \rightarrow$$

$$\rightarrow P = 228092,7 \text{ kgf} \approx \mathbf{228,1 \text{ tons}}$$

Como se pode ver o valor da carga após a correção é de $P = 228,1 \text{ tons}$, que ao se comparar com a carga máxima suportada pelos cilindros $P_{max} = 300 \text{ tons}$, nota-se que $P < P_{max}$, ou seja, o laminador suporta essa redução sem sofrer nenhum tipo de dano. Assim sendo, considera-se esse cálculo, como um primeiro passo efetivo. Daí, calcula-se a redução percentual do primeiro passe, como:

$$r\% = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% = \frac{4,2 - 3,8}{4,2} \cdot 100 \rightarrow r\% = \mathbf{9,52\%}$$

Nesta demonstração foi necessário apenas uma correção de Δh_{max} , e os próximos passes são calculados na sequência, utilizando o valor de $\Delta h_{max}'$. Como o processo é iterativo, e os cálculos realizados nos passes são os mesmos, mudando apenas os valores de h_0 e h_f , onde o novo h_0 terá o valor do h_f do passe anterior até que a espessura h_f chegue ao valor da espessura desejada, resume-se os cálculos indicando o passe e os valores:

- **Calculando o 2º Passe:**

$$\Delta h_{max}' = 0,4mm$$

$$\Delta h_{max}' = h_0 - h_f \rightarrow h_f = h_0 - \Delta h_{max}' = 3,8 - 0,4 \rightarrow h_f = 3,4mm$$

$$L_p = \sqrt{R \cdot \Delta h_{max}} = \sqrt{125 \cdot 0,4} \rightarrow L_p = 7,071mm$$

Calculando o novo valor de $\bar{h}$

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_f}{2} = \frac{3,4 + 3,8}{2} \rightarrow \bar{h} = 3,6mm$$

Calculando o novo valor de Q

$$Q = \frac{\mu \cdot L_p}{\bar{h}} = \frac{0,08 \cdot 7,071}{3,6} \rightarrow Q = 0,1571$$

Calculando o novo valor de P

$$P = \sigma' \cdot \left[\frac{b}{Q} (e^Q - 1) \cdot L_p \right] = 46,2 \left[\frac{650}{0,1571} \cdot (e^{0,1571} - 1) \cdot 7,071 \right] \rightarrow$$

$$\rightarrow P = 229936,8 \text{ kgf} \approx \mathbf{229,9 \text{ tons}}$$

Calculando a redução percentual $r\%$

$$r\% = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% = \frac{3,8 - 3,4}{3,8} \cdot 100 \rightarrow r\% = \mathbf{10\%}$$

- **Calculando o 3º Passe:**

$$\Delta h_{max}' = 0,4mm$$

$$\Delta h_{max}' = h_0 - h_f \rightarrow h_f = h_0 - \Delta h_{max}' = 3,4 - 0,4 \rightarrow h_f = 3mm$$

$$L_p = \sqrt{R \cdot \Delta h_{max}} = \sqrt{125 \cdot 0,4} \rightarrow L_p = 7,071mm$$

Calculando o novo valor de $\bar{h}$

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_f}{2} = \frac{3 + 3,4}{2} \rightarrow \bar{h} = 3,2mm$$

Calculando o novo valor de Q

$$Q = \frac{\mu \cdot Lp}{\bar{h}} = \frac{0,08 \cdot 7,071}{3,2} \rightarrow Q = 0,1768$$

Calculando o novo valor de P

$$P = \sigma' \cdot \left[\frac{b}{Q} (e^Q - 1) \cdot Lp \right] = 46,2 \left[\frac{650}{0,1768} \cdot (e^{0,1768} - 1) \cdot 7,071 \right] \rightarrow$$

$$\rightarrow P = 232269,3 \text{ kgf} \approx \mathbf{232,3 \text{ ton}}$$

Calculando a redução percentual $r\%$

$$r\% = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% = \frac{3,4 - 3}{3,4} \cdot 100 \rightarrow r\% = \mathbf{10,53\%}$$

• **Calculando o 4º Passe:**

$$\Delta h'_{max} = \mathbf{0,4mm}$$

$$\Delta h'_{max} = h_0 - h_f \rightarrow h_f = h_0 - \Delta h'_{max} = 3 - 0,4 \rightarrow \mathbf{h_f = 2,6mm}$$

$$L_p = \sqrt{R \cdot \Delta h_{max}} = \sqrt{125 \cdot 0,4} \rightarrow \mathbf{L_p = 7,071mm}$$

Calculando o novo valor de $\bar{h}$

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_f}{2} = \frac{2,6 + 3}{2} \rightarrow \bar{h} = \mathbf{2,8mm}$$

Calculando o novo valor de Q

$$Q = \frac{\mu \cdot Lp}{\bar{h}} = \frac{0,08 \cdot 7,071}{2,8} \rightarrow Q = \mathbf{0,202}$$

Calculando o novo valor de P

$$P = \sigma' \cdot \left[\frac{b}{Q} (e^Q - 1) \cdot Lp \right] = 46,2 \left[\frac{650}{0,202} \cdot (e^{0,202} - 1) \cdot 7,071 \right] \rightarrow$$

$$\rightarrow P = 235314,7 \text{ kgf} \approx \mathbf{235,3 \text{ tons}}$$

Calculando a redução percentual $r\%$

$$r\% = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% = \frac{3 - 2,6}{3} \cdot 100 \rightarrow r\% = 13,33\%$$

• **Calculando o 5º Passe:**

$$\Delta h_{max}' = \mathbf{0,4mm}$$

$$\Delta h_{max}' = h_0 - h_f \rightarrow h_f = h_0 - \Delta h_{max}' = 2,6 - 0,4 \rightarrow \mathbf{h_f = 2,2mm}$$

$$L_p = \sqrt{R \cdot \Delta h_{max}} = \sqrt{125 \cdot 0,4} \rightarrow \mathbf{L_p = 7,071mm}$$

Calculando o novo valor de $\bar{h}$

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_f}{2} = \frac{2,6 + 2,2}{2} \rightarrow \mathbf{\bar{h} = 2,4mm}$$

Calculando o novo valor de Q

$$Q = \frac{\mu \cdot Lp}{\bar{h}} = \frac{0,08 \cdot 7,071}{2,4} \rightarrow \mathbf{Q = 0,2357}$$

Calculando o novo valor de P

$$P = \sigma' \cdot \left[\frac{b}{Q} (e^Q - 1) \cdot Lp \right] = 46,2 \left[\frac{650}{0,2357} \cdot (e^{0,2357} - 1) \cdot 7,071 \right] \rightarrow$$

$$\rightarrow P = 239456,9 \text{ kgf} \approx \mathbf{239,5 \text{ tons}}$$

Calculando a redução percentual $r\%$

$$r\% = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% = \frac{2,6 - 2,2}{2,6} \cdot 100 \rightarrow r\% = 15,38\%$$

• **Calculando o 6º Passe:**

$$\Delta h'_{max} = 0,4mm$$

$$\Delta h'_{max} = h_0 - h_f \rightarrow h_f = h_0 - \Delta h'_{max} = 2,2 - 0,4 \rightarrow h_f = 1,8mm$$

$$L_p = \sqrt{R \cdot \Delta h_{max}} = \sqrt{125 \cdot 0,4} \rightarrow L_p = 7,071mm$$

Calculando o novo valor de $\bar{h}$

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_f}{2} = \frac{2,2 + 1,8}{2} \rightarrow \bar{h} = 2mm$$

Calculando o novo valor de Q

$$Q = \frac{\mu \cdot L_p}{\bar{h}} = \frac{0,08 \cdot 7,071}{2} \rightarrow Q = 0,28284$$

Calculando o novo valor de P

$$P = \sigma' \cdot \left[\frac{b}{Q} (e^Q - 1) \cdot L_p \right] = 46,2 \left[\frac{650}{0,28284} \cdot (e^{0,28284} - 1) \cdot 7,071 \right] \rightarrow$$

$$\rightarrow P = 245417,2 \text{ kgf} \approx \mathbf{245,4 \text{ tons}}$$

Calculando a redução percentual $r\%$

$$r\% = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% = \frac{2,2 - 1,8}{2,2} \cdot 100 \rightarrow r\% = 18,18\%$$

- **Calculando o 7º Passe:**

$$\Delta h_{max}' = 0,4mm$$

$$\Delta h_{max}' = h_0 - h_f \rightarrow h_f = h_0 - \Delta h_{max}' = 1,8 - 0,4 \rightarrow h_f = 1,4mm$$

No sétimo passo, tem-se uma mudança das iterações anteriores, pois pode ser verificado que no cenário proposto a espessura final desejada é de $h_f = 1,52mm$; contudo, caso se continue reduzindo com o valor de $\Delta h_{max}' = 0,4mm$, a redução reduziria a espessura além do desejado. Desse modo, utiliza-se $h_f = 1,52mm$ para calcular um novo Δh_{max} , L_p e as demais grandezas pois, essa é a espessura final desejada.

$$\Delta h_{max}' = 1,8 - 1,52 \rightarrow \Delta h_{max}' = 0,28mm$$

$$L_p = \sqrt{R \cdot \Delta h_{max}} = \sqrt{125 \cdot 0,28} \rightarrow L_p = 5,9161mm$$

Calculando o novo valor de $\bar{h}$

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_f}{2} = \frac{1,8 + 1,52}{2} \rightarrow \bar{h} = 1,66mm$$

Calculando o novo valor de Q

$$Q = \frac{\mu \cdot L_p}{\bar{h}} = \frac{0,08 \cdot 7,071}{1,66} \rightarrow Q = 0,2851$$

Calculando o novo valor de P

$$P = \sigma' \cdot \left[\frac{b}{Q} (e^Q - 1) \cdot L_p \right] = 46,2 \left[\frac{650}{0,2851} \cdot (e^{0,2851} - 1) \cdot 7,071 \right] \rightarrow$$

$$\rightarrow P = 205575,2 \text{ kgf} \approx \mathbf{205,9 \text{ tons}}$$

Calculando a redução percentual $r\%$

$$r\% = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% = \frac{1,8 - 1,52}{1,8} \cdot 100 \rightarrow r\% = 15,56\%$$

Portanto, obtém-se no 6º passe a maior redução ($r\% = 18,18\%$) e a maior carga de separação ($245,42\text{tons}$). Para calcular os dois passes de acabamentos solicitados se deve obter o valor referente a 1% da maior redução. O cálculo deve ser feito considerando a espessura final de $h_f = 1,52\text{mm}$, logo primeiro calculamos o último passe e depois o penúltimo, pois o h_0 do último passe, será o h_f do penúltimo. Daí, vem:

$$r\% = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% = (0,01 \cdot 0,1818) = \frac{h_0 - 1,52}{h_0} \cdot 100 \rightarrow h_0 = \frac{1,52}{(1 - 1,818 \times 10^{-3})}$$

$$\text{Espessura do ultimo passe} \therefore h_0 = 1,52276839$$

$$(0,01 \cdot 0,1818) = \frac{h_0 - 1,52277}{h_0} \cdot 100 \rightarrow h_0 = \frac{1,52276839}{(1 - 1,818 \times 10^{-3})}$$

$$\text{Espessura do penultimo passe} \therefore h_0 = 1,525541828$$

Dessa forma, são necessários 9 passes; ou seja, 6 passes com $\Delta h = 0,4\text{ mm}$, 1 passe com $\Delta h = 0,27448\text{mm}$ e 2 passes de acabamento com $\Delta h = 0,00276\text{ mm}$. Por fim, calcula-se a potência exigida pelo processo para a maior carga de separação, ocorrida também no 6º passe; assim, converte-se a velocidade para RPM e se calcula o braço de aplicação de força a , para pequenas reduções na laminação a frio, de forma que:

$$n = \frac{w \cdot 60}{2\pi} = \frac{4 \cdot 60}{2\pi} \rightarrow n = 38,20\text{RPM}$$

$$a = L_p/2 = 7,071/2 \rightarrow a \cong 0,35355\text{mm}$$

Calculando a potência N_t

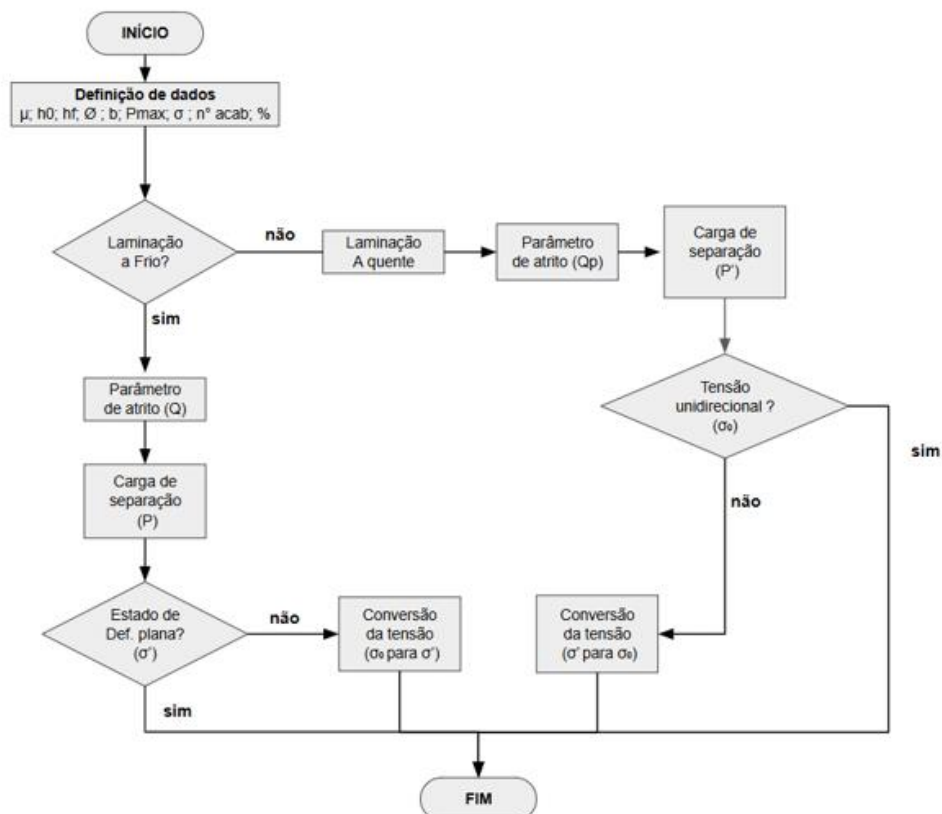
$$N_t = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot P \cdot n}{4500} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,35355 \cdot 245,42 \cdot 38,20}{4500} \rightarrow N_t \cong 92,6\text{CV}$$

5.3 Solução Numérica

Conforme demonstrado na seção anterior, os cálculos que envolvem os passes durante o processo de laminação, realizados por meio de cálculos iterativos manuais, apresentam um caráter altamente repetitivo. Essa característica não apenas demanda um elevado tempo de resolução, como também torna o processo suscetível a erros de atenção, quando realizado por humanos. Visando superar essas limitações, procurando introduzir maior agilidade e precisão ao processo, desenvolveu-se no presente trabalho um algoritmo computacional em linguagem *Python*, que simula matematicamente o cálculo dos parâmetros de cada passe, como permite descrever numericamente a distribuição da pressão média sobre os cilindros, desde a entrada até a saída da zona de deformação da chapa metálica.

Para realizar o algoritmo, os cálculos foram separados em três blocos de lógica distintos, o primeiro foi chamado de “Tratamento de dados”, esse bloco tem por objetivo coletar os parâmetros necessários para realizar os cálculos e tratá-los para que os cálculos sejam realizados de forma correta, o fluxograma de tratamento de dados pode ser visto na Figura 53.

Figura 53 - Tratamento de dados

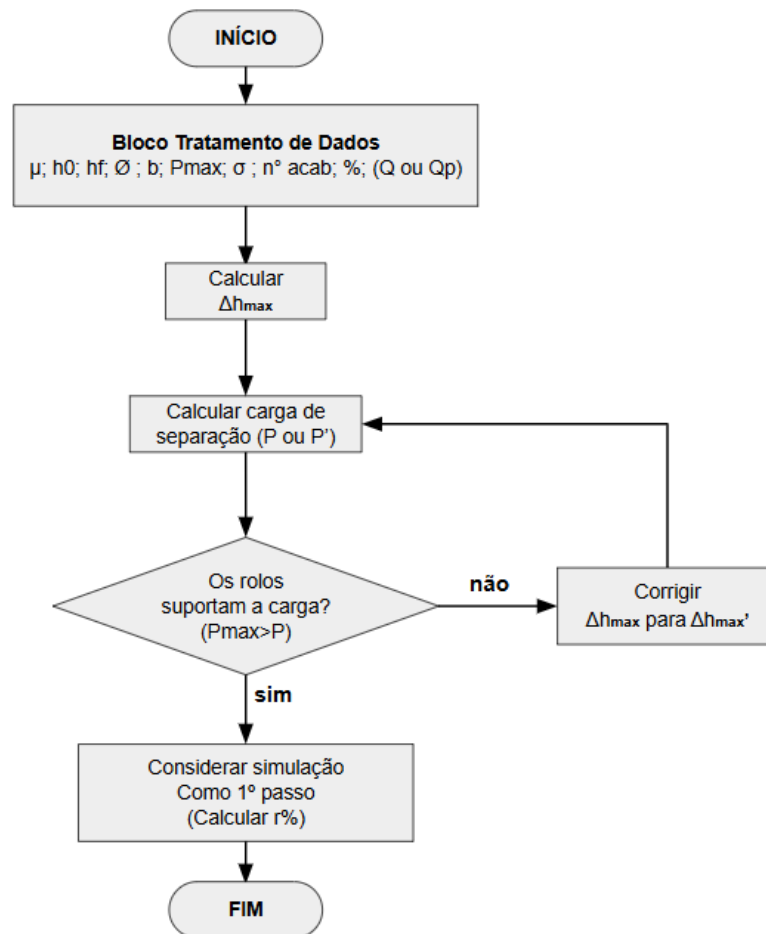


Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde pode ser entendida a lógica que define quais equações são utilizadas a partir do *input* do usuário, pois como observado anteriormente, as laminações a frio e a quente possuem formas distintas de calcular a carga de separação e os parâmetros de atrito. Além disso, o primeiro bloco do algoritmo analisa qual tipo de tensão e/ou cenário que está sendo considerado e, portanto, converte caso o tipo de laminação não seja compatível.

O segundo bloco de lógica é chamado de “Simulação e ajuste de espessura”, esse bloco tem por objetivo simular o primeiro passe considerando o Δh_{max} original e caso os rolos não suportem a carga solicitada corrige o Δh_{max} até uma carga $P < P_{max}$; tal lógica pode ser observada na Figura 54.

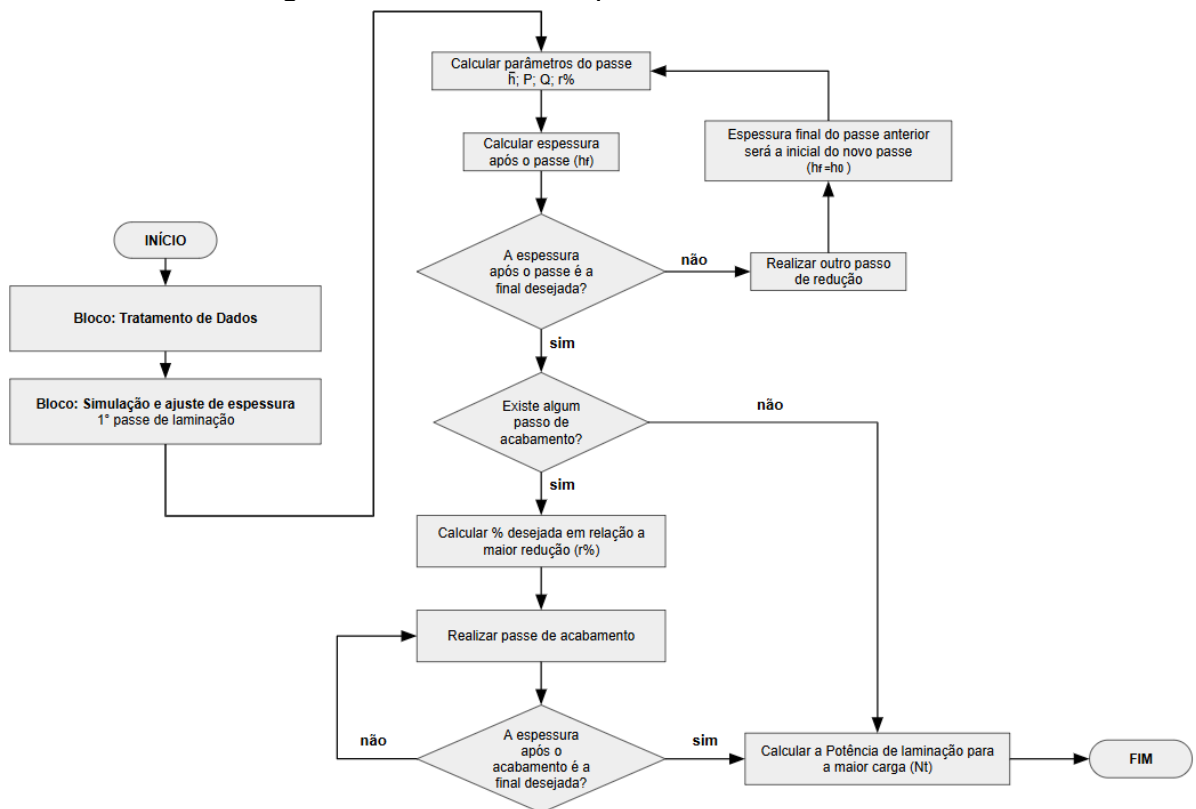
Figura 54 - Simulação e ajuste de espessura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo que o bloco funciona de forma iterativa, fazendo um *looping* de correção do Δh_{max} , até que a condição da carga seja atingida. Por fim, o último bloco é chamado de “Cálculo dos passes e acabamento”. Esse, tem por objetivo realizar o trabalho mais repetitivo, pois como o próprio nome diz, é empregado para calcular os passes de laminação e os de acabamento. Esse bloco possui dois *loops* interativos, um deles focado em realizar a laminação e o outro os passes de acabamento, deste modo ele acaba se tornando bloco principal do algoritmo. O que pode ser observado no fluxograma da Figura 55.

Figura 55 - Cálculo dos passes e acabamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Algoritmo em si, inicia fazendo uma série de perguntas ao usuário, de forma que este possa definir os parâmetros e grandezas necessárias. A tela de interface entre usuário máquina após a respostas das perguntas pode ser vista nas Figuras 56 e 57.

Figura 56 -Interface homem máquina do algoritmo

```

Digite 1 para laminação a frio, ou 2 para laminação a quente:1
Digite 1 para tração/compressão, ou 2 para estado de deformação plana:2
Digite 1 caso tenha o valor de  $\sigma$ , ou 2 caso tenha o valor de  $\sigma'$ :2
Digite o valor de  $\mu$ :0.08
Digite o valor do diametro dos rolos (mm):250
Digite o valor da largura da chapa (mm):650
Digite o valor da espessura Inicial da chapa (mm):4.2
Digite o valor da espessura Final da chapa (mm):1.25
Digite o valor da carga máxima do laminador (tons):300
Digite o valor da tensão média de escoamento (Kg/mm2):46.2
Digite quantos passes de acabamento serão feitas:2
Digite quantos por cento (%) da maior redução deve ter os passes de acabamento:1
Digite qual a velocidade dos rolos em radianos (rad):4

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 57 - Resultados do passe de simulação e primeiro passe

```

h_max= 0.80 mm
o h corrigido sera de: 3.40 mm
o h médio sera de: 3.80 mm
Lp= 10.00 mm
Q=0.2105
P=334250.6542526557 Kgf ou P=334.2507 tons
Como a P > Pmax, corrigimos o H_max e recalculamos os valores
h_max= 0.40 mm
o h corrigido sera de: 3.80 mm
o h médio sera de: 4.00 mm
Lp= 7.07 mm
Q=0.1414
P=228092.7301186169 Kgf ou P=228.0927 tons
%r=9.5238%
Como a Pmax >= P, podemos concideramos a correção final como o passe inicial e continuamos a calcular os proximos passes da laminação

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos pelo algoritmo se mostraram os mesmos que os calculados empiricamente e foram realizados em menos de 1 segundo, como pode ser verificado através dos resultados obtidos mostrados nas Figuras 57e 58.

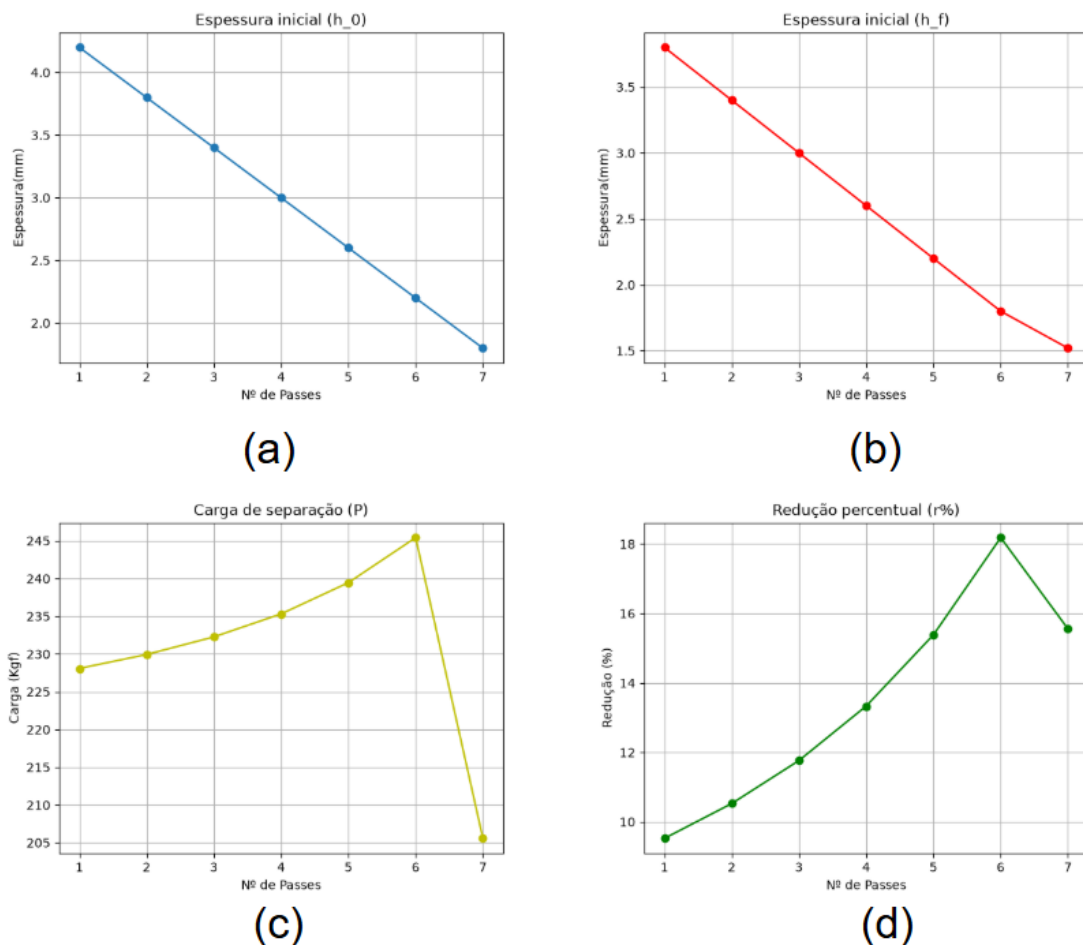
Figura 58 - Resultados obtidos

$P=148615.27831322816$ Kgf ou $P=148.6153$ tons
 A máxima redução em todo processo foi de $r= 22.22 \%$
 A espessura antes do 2º passo de acabamento, foi de 1.2472222222222222 mm
 A espessura antes do 1º passo de acabamento, foi de 1.2444506172839507 mm
 O número de passes necessários para reduzir para a espessura 1.25 mm, foi de 10
 A potência do processo para a maior carga é de 96 CV

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra vantagem que o algoritmo traduz é o de permitir a confecção de gráficos a partir de resultados obtidos, de maneira a possibilitar a observação do comportamento de cada grandeza. Na Figura 59, pode-se observar 4 gráficos em função do número de passes: - da Espessura inicial h_0 (Figura 59.a), da Espessura final h_f (Figura 59.b), da Redução percentual $r\%$ (Figura 59.c) e da Carga de separação P (Figura 59.d).

Figura 59 - Gráfico em relação aos passes



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível destacar pelos gráficos, que os cálculos refletem a física do processo de laminação, pois as espessuras iniciais e finais diminuem conforme o número de passes aumenta. Pode-se observar também que o gráfico da redução percentual é proporcional ao valor da carga de separação, ou seja, as maiores reduções ocorrem no desbaste, para maiores níveis de carga. O contrário é observado nos passes de acabamento. Além disso, os resultados obtidos, empregando-se o algoritmo, estão dispostos na Tabela 5

Tabela 5 - Resultados obtido para o cenário pelo algoritmo

Passe	Tipo de Passe	Δh_{max} (mm)	h após redução (mm)	h médio (mm)	Lp (mm)	Q	%r (Redução)	P (Kgf)	P (tons)
1º (Tentativa)	Simulação	0,8	3,4	3,8	10	0,2105	-	334.250,65	334,2507
1º (Corrigido)	Desbaste	0,4	3,8	4	7,07	0,1414	9,52%	228.092,73	228,0927
2º	Desbaste	0,4	3,4	3,6	7,07	0,1571	10,53%	229.936,78	229,9368
3º	Desbaste	0,4	3	3,2	7,07	0,1768	11,76%	232.269,53	232,2695
4º	Desbaste	0,4	2,6	2,8	7,07	0,202	13,33%	235.314,69	235,3147
5º	Desbaste	0,4	2,2	2,4	7,07	0,2357	15,38%	239.456,86	239,4569
6º	Desbaste	0,4	1,8	2	7,07	0,2828	18,18%	245.417,50	245,4175
7º	Desbaste	0,27448	1,52552	1,66	5,92	0,2851	15,56%	205.575,18	205,58
8º	(1º) Acabamento	0,00276	1,52276	1,5213	0,587	0,0308	0,18%	17913,17	17,91
9º	(2º) Acabamento	0,00276	1,52	1,52138	0,587	0,0309	0,19%	17914,07	17,91

Fonte: Elaborado pelo autor.

O código do algoritmo não se aplica somente ao cenário proposto, mas certamente, ele pode ser utilizado para calcular os passes para qualquer processo de laminação, sendo possível encontrá-lo no apêndice A do presente trabalho.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo apresentar de uma revisão compreensiva acerca dos principais conceitos relacionados com os processos de laminação a frio e a quente.

Além disso, de maneira a estabelecer melhor entendimento sobre os parâmetros, como dos cálculos iterativos envolvidos na análise do número de passes possíveis durante um processo de laminação, adicionalmente, desenvolveu-se um algoritmo computacional em linguagem *Python*, que simula matematicamente o cálculo dos parâmetros de cada passe, como permite descrever numericamente a distribuição da pressão média sobre os cilindros, desde a entrada até a saída da zona de deformação da chapa metálica.

A automação dos cálculos iterativos, empregando o algoritmo desenvolvido, mostrou-se eficiente tanto para os cálculos de passes, quanto para a definição da potência, reduzindo o tempo de execução drasticamente e minimizando erros humanos, sendo que os resultados obtidos apresentaram comportamento fisicamente coerente com o esperado, validando tanto os cálculos realizados quanto o uso do programa.

Finalmente, pôde ainda ser confirmado a partir dos resultados obtidos que a redução percentual é proporcional ao valor da carga de separação, ou seja, as maiores reduções ocorrem no desbaste, para maiores níveis de carga, conforme o número de passes aumenta. O contrário é observado nos passes de acabamento.

Os resultados, portanto, demonstram a aplicabilidade da ferramenta computacional como suporte ao estudo e a análise de processos de laminação, evidenciando a integração entre os fundamentos da engenharia mecânica e as técnicas de programação.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

São sugestões para trabalhos futuros:

- Aprofundamento nas teorias de cálculo de potência como o método de Slab considerando as equações diferenciais e não as simplificações.
- Revisar mais profundamente as teorias de laminação, a quente como as desenvolvidas por Von Kármán e Orowan-Pascoal.

- Automatizar os cálculos iterativos de outros processos de conformação, como trefilação.
- Melhorar a interface humano máquina, fazendo um aplicativo com o auxílio da linguagem Java, atualmente o algoritmo só funciona dentro dos próprios programas utilizados para fazê-lo.
- Aprofundar nas teorias de atrito, como o atrito de deslizamento e atrito de aderência (*Sticky*)

REFERÊNCIAS

- [1] INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aço & economia 2025**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2025. Disponível em: https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2025/09/Folder_AcoBrasil_Ecnomia_2025.pdf. Acesso em: 10 fev. 2026.
- [2] INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatísticas da Indústria do Aço 4º Trimestre 2026**. Rio de Janeiro: IAB, 2025a.
- [3] VIANA, Fernando Luiz E. Indústria siderúrgica. **Caderno Setorial ETENE**, Fortaleza, v. 10, n. 380, mar. 2025. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/3166/2217>. Acesso em: 10 fev. 2026.
- [4] INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatísticas da Indústria do Aço: 3º trimestre 2025**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2025. Disponível em: https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2025/11/Estatisticas-da-Industria-do-Aco_3o_TRI_2025.pdf. Acesso em: 11 fev. 2026.
- [5] ALSETTE. **Understanding the Basics of Automotive Stamping Dies**. Disponível em: <https://alsettevs.com/understanding-the-basics-of-automotive-stamping-dies/>. Acesso em: 12 fev. 2026.
- [6] RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Processos de decapagem, laminação a frio e recozimento de produtos planos de aço**. São Paulo: Blucher, 2022. Disponível em: https://storage.blucher.com.br/book/pdf_preview/9786555064544-amostra.pdf. Acesso em: 15 fev. 2026.
- [7] GORNI, Antonio Augusto. **Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades**. São Paulo: Aranda Eventos, 2009. Trabalho apresentado no 5º Congresso de Corte e Conformação de Metais. Disponível em: https://www.gorni.eng.br/Gorni_CongCCM_AHSS_Out2009.pdf. Acesso em: 15 fev. 2026.
- [8] AUTOESPORTE. **O que é carroceria com deformação programada?**. Autoesporte, 16 set. 2019. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/carros/noticia/2019/09/o-que-e-carroceria-com-deformacao-programada.ghtml>. Acesso em: 28 fev. 2026.

[9] SEATHER TECHNOLOGY. **Fabricação de chapas metálicas para o setor aeroespacial:** uma visão geral detalhada. Disponível em: <https://seathertechnology.com/pt/aerospace-sheet-metal-fabrication/>. Acesso em: 17 abr. 2026.

[10] KDMFAB. **Fabricação de chapas metálicas aeroespaciais 101:** um guia de conhecimento básico. KDM Fabrication, 30 maio 2024. Disponível em: <https://kdmfab.com/pt/fabricacao-de-chapas-metalicas-aeroespaciais/>. Acesso em: 17 abr. 2026.

[11] SKHABOVSKYI, Iaroslav. **Avaliação da aplicação de ancoradores por soldagem em laminados metal-fibra visando a indústria aeronáutica.** 2018. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/22087/3/Avalia%C3%A7%C3%A3oAplic%C3%A7%C3%A3oAncoradores.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2026.

[12] USIMINAS. **Laminados a frio.** [S. l.]: Usiminas, 2020. Disponível em: <https://www.usiminas.com/wp-content/uploads/2020/05/LAMINADOSFRIO-PORT.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2026.

[13] SCOTT AUTOMATION. **Laundry equipment lines.** 2026. Disponível em: <https://scottautomation.com/en/products/appliance-automation/laundry-systems>. Acesso em: 18 mai. 2026.

[14] DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica.** 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

[15] KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology.** 6. ed. in SI units. Singapore: Pearson, 2009.

[16] GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A., dos; CHEUNG, N. **Lingotamento contínuo dos aços.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2006

[17] RIZZO, E. M. **Introdução aos Processos de Lingotamento Contínuo dos Aços.** 1. ed: São Paulo: ABM, 2006.

- [18] PORTAL CIMM - CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. **Conformação - Trem Contínuo de Laminação a Quente**. YouTube, 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=J808S0Vlj5A>. Acesso em: 3 mai. 2026.
- [19] PRIMETALS TECHNOLOGIES. **ArcelorMittal Eisenhüttenstadt produces first coil after swift automation upgrade at hot-rolling mill**. Primetals Technologies, 12 set. 2024. Disponível em: <https://www.primetals.com/en/news/arcelormittal-eisenhuettenstadt-produces-first-coil-after-swift-automation-upgrade-at-hot-rolling-mill/>. Acesso em: 9 mai. 2026.
- [20] RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Processos de decapagem, laminação a frio e recozimento de produtos planos de aço**. São Paulo: Blucher, 2022. Disponível em: https://storage.blucher.com.br/book/pdf_preview/9786555064544-amostra.pdf. Acesso em: 9 mai. 2026.
- [21] AMARAL, Mariana Bamberg. **Resistência dos materiais**. Indaial: UNIASSELVI, 2021.
- [22] HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. Tradução de Arlete Simille Marques; revisão técnica de Sebastião Simões da Cunha Jr.; conversão para SI por S. C. Fan. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- [23] BEER, Ferdinand P., **Mecânica dos Materiais**. São Paulo: AMGH, 2015.
- [25] MORENO, Mariano Eduardo. **Determinação numérica da curva limite de estabilidade quanto à flambagem plástica em chapas metálicas**. 2006. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-12022016-105116/publico/Tese_Moreno_MarianoE.pdf. Acesso em: 28 mai. 2026.
- [26] CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8800475/mod_resource/content/1/47396597_3-Ciencia-e-Engenharia-de-Materiais-CALLISTER-9%C2%AA-Edicao-pdf.pdf. Acesso em: 28 mai. 2026.

- [27] ROSENHAIN, W. **An introduction to the study of physical metallurgy**. 2. ed. Londres: Constable & Company, 1915.
- [28] VALE, Alan Rafael Menezes do. **Tratamento térmico**. Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2011.
- [29] MORO, Norberto. **Processos de fabricação: Conformação mecânica I – generalidades, laminação e forjamento**. 2007. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina.
- [30] COSTA, Helio de Brito; MIRA, Fausto Moreno de. **Conformação mecânica dos metais. Processos de fabricação: conformação mecânica dos metais**. Volume I. Atualizada em 2000 por Carlos Augusto Silva de Oliveira. Florianópolis: Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 1985.
- [31] PIRES, José Carlos dos Santos; FERNANDES NETO, Marcolino; GARCIA, Amauri. **Avaliação do tamanho, da morfologia e da composição química de inclusões não metálicas em aço baixo carbono desoxidado ao alumínio**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 55, n. 1, p. 31-37, mar. 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/P3MqMGNH5Hqkf8xQzKfcp5S/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 27 jun. 2026.
- [32] TRENTON, Chin. **Segregação na fundição de ligas**: tipos, causas e mitigação. Stanford Advanced Materials, [s. d.]. Disponível em: <https://www.samaterials.pt/segregation-in-alloy-casting-types-causes-and-mitigation.html>. Acesso em: 27 jun. 2026.
- [33] MOLDIECASTING. **Porosidade na fundição sob pressão**: causas e soluções para peças de melhor qualidade. Moldiecasting, 9 mar. 2025. Disponível em: <https://moldiecasting.com/pt/blog/die-casting-porosity/>. Acesso em: 29 jun. 2026.
- [34] INDUSTRIAL METALLURGISTS. **Cause of Orange Peel on Sheet Metal Components**. Industrial Metallurgists, LLC, [s. d.]. Disponível em: https://www.imetllc.com/wp-content/uploads/2016/09/OrangePeel_article.pdf. Acesso em: 29 jun. 2026.

Apendice A

- Algoritmo de automatização de cálculos de passes e potência de laminação:

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

Lami_tip = int(input("\n Digite 1 para laminação
a frio, ou 2 para laminação a quente:"))
Def_tip = int(input("\n Digite 1 para
tração/compressão, ou 2 para estado de
deformação plana:"))
sigma_tip = int(input("\n Digite 1 caso tenha o
valor de  $\sigma$ , ou 2 caso tenha o valor de  $\sigma'$ :"))
mi = float(input("\n Digite o valor de  $\mu$ :"))
d = float(input("\n Digite o valor do diametro
dos rolos (mm):"))
b = float(input("\n Digite o valor da largura da
chapa (mm):"))
hi = float(input("\n Digite o valor da espessura
Inicial da chapa (mm):")) #h inicial original
hf = float(input("\n Digite o valor da espessura
Final da chapa (mm):")) #h final original
P_max = float(input("\n Digite o valor da carga
máxima do laminador (tons):"))
sigma = float(input("\n Digite o valor da tensão
média de escoamento (Kg/mm²):"))
acab = int(input("\n Digite quantos passes de
acabamento serão feitas:"))
pred = float(input("\n Digite quantos por cento
(%) da maior redução deve ter os passes de
acabamento:"))
P_ton=0
rad = float(input("\n Digite qual a velocidade
dos rolos em radianos (rad):"))
#-----
if (Def_tip==1): #estado normal de tenções
    if (sigma_tip==1): #Sigma
        tensão=sigma
    elif (sigma_tip==2): #Sigma linha
        sigma_correto =
sigma/(2/np.sqrt(3))#convertendo sigma linha
```

```
para sigma
    tensão = sigma_correto

elif (Def_tip==2): #estado plano de tenções
    if (sigma_tip==1): #Sigma
        sigma_L = sigma*(2/np.sqrt(3))
        tensão = sigma_L

    elif (sigma_tip==2): #Sigma linha
        tensão=sigma

r=d/2 #Raio do cilindro
h0=hi
hmax0 = pow(mi,2)*r #hmax original
hmax=hmax0 #hmax corrigido
i=2 #variavel contadora para correção
j=2

red=[]
p_ton=[]
maxLp=-1
h0lista=[]
hnlista=[]
while True:

    hn = h0-hmax #calculando a espessura
    final
    hb = (h0+hn)/2
    Lp = np.sqrt((r*hmax))
    along = h0/hf
    Q = (mi*Lp)/hb
    Qp = 0.25*(np.pi +(np.sqrt((r/hn))*((h0-
hn)/hn))))

    if (Lami_tip==1): #trabalho a frio
        P = tensão*((b/Q)*(np.exp(Q)-1)*Lp)

    elif (Lami_tip==2): #trabalho a quente
        P = tensão*b*np.sqrt((h0-hn)*r)*Qp

    P_ton = P/1000

    print(f"\n h_max= {hmax:.2f} mm")
    print(f"\n o h corrigido sera de: {hn:.2f}
mm")
    print(f"\n o h médio sera de: {hb:.2f} mm")
    print(f"\n Lp= {Lp:.2f} mm")
    print(f"\n Q={Q:.4f}")
    print(f"\n P={P} Kgf ou P={P_ton:.4f}
```

```

tons")

    if(P_ton>P_max):
        hmax=(hmax0/i)
        i=i+1

    if P_ton <= P_max: break
    print("\n Como a P > Pmax, corrigimos o
H_max e recalculamos os valores")

maxLp=Lp if Lp>maxLp else maxLp
red.append (((hmax)/h0)*100) #calculando a
redução e adicionando a fila
print(f"\n %r={red[0]:.4f}%")

p_ton.append (P_ton)
h0lista.append(h0)
hnlista.append(hn)

print("\n Como a Pmax >= P, podemos
concluímos a correção final como o passe
inicial e continuamos a calcular os proximos
pases da laminação")

h0=hn #espessura a partir da primeira
passada

while True:

    hn = h0-hmax #calculando a espessura
final
    if hn<hf:
        hn=hf
        hmax=h0-hn
        red.append (((hmax)/h0)*100)

        hb = (h0+hn)/2
        Lp = np.sqrt((r*hmax))
        maxLp=Lp if Lp>maxLp else maxLp
        along = h0/hn
        Q = (mi*Lp)/hb
        Qp = 0.25*(np.pi +(np.sqrt((r/hn))*((h0-
hn)/hn))))

        if (Lami_tip==1): #trabalho a frio
            P = tensão*((b/Q)*(np.exp(Q)-1)*Lp)

        elif (Lami_tip==2): #trabalho a quente
            P = tensão*b*np.sqrt((h0-hn)*r)*Qp

        P_ton = P/1000
        p_ton.append (P_ton) #adicionando
carga na fila
        print(f"\n O {j}º passe da laminação tem
como resultados:")
        print(f"\n h_max= {hmax:.2f} mm")
        print(f"\n o h corrigido sera de: {hn:.2f}

```

```

mm")
    print(f"\n o h médio sera de: {hb:.2f} mm")
    print(f"\n Lp= {Lp:.2f} mm")
    print(f"\n Q={Q:.4f}")
    print(f"\n %r={red[j-1]:.4f}%")
    print(f"\n P={P} Kgf ou P={P_ton:.4f}
tons")
    j=j+1

    h0lista.append(h0)
    hnlista.append(hn)
    h0=hn
    if h0<=hf :break

maxred=max(red)
print (f"A maxima redução em todo processo
foi de %r= {maxred:.2f} %")

acabred=pred*maxred/10000 #dividido por
100 da pred e 100 da maxred

hn=hf

for k in range (acab,0,-1):

    h0=hn*(1-acabred)
    hn=h0
    print (f"A espessura antes do {k}º passo de
acabamento, foi de {h0} mm")

    print (f"O numero de passes necessários para
reduzir para a espessura {hf} mm, foi de {(j-
1)+acab}")

n=(60*rad)/(2*np.pi)

nt= (4*np.pi*(maxLp/2)*max(p_ton)*n)/4500

print (f"A potência do processo para a maior

```


carga é de {round(nt)} CV")

```
plt.plot(range(1,j),h0lista,"o",linestyle="-")
plt.title("Espessura inicial (h_0)")
plt.grid()
plt.xlabel("Nº de Passes")
plt.ylabel("Espessura(mm)")
plt.show()
```

```
plt.plot(range(1,j),hnlista,"ro",linestyle="-")
plt.title("Espessura inicial (h_f)")
plt.grid()
plt.xlabel("Nº de Passes")
plt.ylabel("Espessura(mm)")
plt.show()
```

```
plt.plot(range(1,j),p_ton,"yo",linestyle="-")
plt.title("Carga de separação (P)")
plt.grid()
plt.xlabel("Nº de Passes")
plt.ylabel("Carga (Kgf)")
plt.show()
```

```
plt.plot(range(1,j),red,"go",linestyle="-")
plt.title("Redução percentual (r%)")
plt.grid()
plt.xlabel("Nº de Passes")
plt.ylabel("Redução (%)")
plt.show()
```