

Fabiano José Kretzschmar

**CHAPAS DE AÇO LAMINADAS A FRIO PARA APLICAÇÕES
COM REQUISITO DE PLANICIDADE RESTRITA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Claudimir Antonio Carminatti, Dr.

Co-orientador: Prof. Hazim Ali Al-Qureshi, PhD.

Joinville
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Kretzschmar, Fabiano José

Chapas de aço laminadas a frio para aplicações com
requisito de planicidade restrita / Fabiano José
Kretzschmar ; orientador, Claudimir Antonio Carminatti ;
coorientador, Hazim Ali Al-Qureshi. - Joinville, SC, 2017.
134 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas.

Inclui referências

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Aço laminado a
frio. 3. Recozimento em caixa. 4. Ondulação localizada. 5.
Instabilidade plástica. I. Carminatti, Claudimir Antonio.
II. Al-Qureshi, Hazim Ali. III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e
Ciências Mecânicas. IV. Título.

Fabiano José Kretzschmar

**CHAPAS DE AÇO LAMINADAS A FRIO PARA APLICAÇÕES
COM REQUISITO DE PLANICIDADE RESTRITA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (PosECM) da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 07 de fevereiro de 2017.

Prof. Dr. Breno Salgado Barra
Coordenador PosECM - UFSC

Banca Examinadora

Prof. Claudimir A. Carminatti, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Hazim Ali Al-Qureshi, PhD
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Alexandre Mikowski, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Derce de Oliveira Souza Recouvreux, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Kassim Shamil Fadhil Al-Rubaie, Dr.
Centro Universitário SOCIESC – UNISOCIESC

AGRADECIMENTOS

Dedico especial agradecimento a

- Prof. Hazim Ali Al-Qureshi, pelos direcionamento, ensinamentos e atenção com a qual sempre me distinguiu;
- Prof. Claudimir A. Carminatti, pela consideração, orientações e correções fundamentais à realização deste trabalho;
- Minha mãe Rovená, por ter forjado em mim os fundamentos que nortearam minhas escolhas, pelo amor e dedicação que me inspiram;
- Minha esposa Raquel, pelo suporte incondicional, amor e paciência;
- Meus sogros Regina e Nelson, pelo incansável apoio nas horas mais difíceis;
- À empresa ArcelorMittal Vega, pela oportunidade e recursos para a produção deste trabalho;
- Meu gerente Christian Ferreira, pelos conselhos e apreço para com a minha pessoa;
- Meus amigos e colegas de trabalho, pelo esforço adicional praticado durante as minhas ausências na equipe;
- Acima de tudo, agradeço a Deus por ter colocado no meu caminho todas as pessoas aqui mencionadas e pelas respostas às orações nos momentos de decisão.

“O coração do entendido adquire o conhecimento,
e o ouvido dos sábios busca a sabedoria.”

Provérbios 18:15

RESUMO

A planicidade isenta de ondulações é um requisito essencial aos aços aplicados em painéis longos de produtos da linha branca, móveis e painéis arquitetônicos. Os aços com planicidade restrita caracterizam-se também pela espessura baixa e resistência relativamente elevada, o que os torna um produto siderúrgico peculiar. Os aços laminados a frio recozidos em caixa representam uma opção dentro deste mercado, mas as limitações naturais do processo produtivo tornam o atendimento aos requisitos de planicidade um desafio, principalmente em função das ondulações intermediárias que ocorrem na chapa, as limitações de correção dos laminadores do tipo quadro e a ausência de aplainamento posterior. Neste contexto, esta dissertação trata da correção de deficiências de planicidade através do desenvolvimento de um método de produção de um aço ABNT NBR 5915 com espessura entre 0,50 e 0,60 mm e largura entre 1100 e 1550 mm, recozido em caixa para aplicação em gabinetes de refrigeradores. Uma formulação matemática foi desenvolvida para estudar a instabilidade plástica correlacionando a deformação e as deficiências de planicidade a partir da teoria de Swift. A metodologia empregada envolveu a introdução de uma ondulação central controlada da ordem de 30 i-units na fase de laminação a frio e a sua correção após o recozimento em caixa no laminador de encruamento. Um lote de 10 bobinas produzidas nestas condições foi avaliado na linha de inspeção e os resultados do experimento foram comparados estatisticamente com o histórico de produção do material. Um estudo da redução da espessura devida a deformação em instabilidade plástica foi conduzido para avaliar as condições de empescoamento da chapa em função da deficiência de planicidade. Amostras dos testes em linha de produção foram avaliados em laboratório, de modo a conhecer o efeito das ondulações sobre algumas propriedades mecânicas finais da chapa e a sua estrutura cristalina. A avaliação da deformação em instabilidade plástica demonstrou que ondulações superiores a 1000 i-units podem comprometer a espessura e causar o empescoamento da chapa, no entanto deficiências na planicidade final da ordem de 30 i-units já seriam suficientes para degradar o aspecto do material e impossibilitar a sua aplicação

em produtos da linha branca. Os resultados do experimento conduzidos na linha de produção demonstraram que a ondulação central controlada foi eficaz na eliminação das ondulações localizadas, porém a planicidade geral da chapa não experimentou evolução estatisticamente significativa em relação ao material produzido anteriormente. Os ensaios laboratoriais apontaram que não houve variação nas propriedades mecânicas e na morfologia do aço testado. O experimento contribuiu na formulação de um modelo mais refinado do processo produtivo, o qual foi aplicado com sucesso e possibilitou a homologação do material por diversos fabricantes, permanecendo em fornecimento regular com aplicação em painéis de produtos da linha branca e móveis de aço.

Palavras-chave: Planicidade, Instabilidade plástica, Ondulação localizada, Laminação a frio.

ABSTRACT

Buckles-free flatness is an essential requirement for steel applied to long panels of white goods, furniture and architectural panels. The steels with restricted flatness are also characterized by low thickness and relatively high strength, which makes these steel products quite peculiar. Batch annealed cold rolled steels represent an option within this market, although due to some natural limitations of the production processes meeting the flatness requirements are much of a challenge, mainly due to the occurrence of quarter buckles, the limitation of shape correction put up by the 4-high mill stands and the absence of flattener and leveller. This dissertation addresses the correction of flatness deficiencies and proposes the development of a production method for an ABNT NBR 5915 batch annealed steel ranging from 0,50 to 0,60 mm in thickness and a from 1100 to 1550 mm in width, for application in refrigerator cabinets. The selected technique involved the introduction of steady and controlled central buckles of around 30 i-units into the entire coils during cold rolling, and its correction after annealing within the temper mill. A set of ten coils produced under these conditions had its wave height and wavelength measured on the inspection line and the experimental results were statistically compared to that material production records. A theoretical analysis of lack of flatness and true deformation on the instability strains based on Swift's theory was carried on to evaluate the necking conditions of isotropic and anisotropic steel strips submitted to cold rolling. Samples from the shop floor experiment were taken to the laboratory, in order to know the effect of buckles on some mechanical properties of the plate and its crystalline structure. The evaluation of plastic instability demonstrated that buckles of up to 1000 i-units can compromise the strip thickness and cause the rejection of the coil owing by a necking issue, however flatness flaws of just 30 i-units are able to degrade the appearance of the material and block off its application in appliances and other long panels. Test results from the inspection line demonstrated that the insertion of centre buckles into the cold rolled strip was effective to eliminate the quarter buckles at the finishing line but overall sheet flatness did not experienced statistically significant improvement when compared to the

previously produced material. The laboratory tests indicated that there were no change in the main mechanical properties and the morphology of the tested steel as well. This experiment contributed to the formulation of a more refined model of the production process, which was successfully applied and led to several homologations, remaining the restricted flatness coils for long panels in regular supply for white goods and steel furniture customers.

Keywords: Flatness, Plastic instability, Quarter buckles, Cold Rolling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cadeira de laminação tipo quadruo.....	32
Figura 2 – Laminação de uma chapa (transformação a volume constante).....	32
Figura 3 – Relação de velocidades durante a laminação.....	34
Figura 4 – Diagrama dos esforços atuantes sobre a chapa durante a laminação.....	35
Figura 5 – O atrito no momento da mordida na chapa.....	36
Figura 6 – Comparação entre as curvas tensão x deformação de engenharia e verdadeira.....	38
Figura 7 – Esboço da deformação na laminação.....	39
Figura 8 – Os principais defeitos de forma.....	41
Figura 9 – Representação de um ondulado hipotético.....	42
Figura 10 – Efeito da ondulação no comprimento das fibras.....	42
Figura 11 – Relação entre comprimento de onda, altura e i-units.....	43
Figura 12 – Representação esquemática das principais categorias de ondulados.....	44
Figura 13 – Ocorrência de ondulado intermediário em uma bobina LAF.....	45
Figura 14 – Inspeção visual da planicidade em uma linha de encruamento.....	46
Figura 15 – Medição manual da planicidade.....	47
Figura 16 – Rolo medidor de planicidade Shapemeter.....	48
Figura 17 – Imagem da tela computacional de um medidor do tipo Shapemeter.....	49
Figura 18 – Carta de planicidade de uma bobina gerada pelo Shapemeter.....	50
Figura 19 – Deformação não homogênea em um processo de laminação.....	52
Figura 20 – Representação gráfica das subtangentes.....	53
Figura 21 – Fluxograma de produção de uma usina siderúrgica.....	57
Figura 22 – Forno de vigas caminhantes e imagem de uma unidade.....	58
Figura 23 – Laminador a quente da ArcelorMittal/Nippon Steel Calvert.....	60
Figura 24 – Recristalização dinâmica.....	60
Figura 25 – Laminador a frio de quatro cadeiras.....	62

Figura 26 – Base de recozimento vista em corte.	64
Figura 27 – Planta de recozimento em caixa.	64
Figura 28 – Diagrama típico de um ciclo de recozimento.	65
Figura 29 – Linha de recozimento contínuo.	66
Figura 30 – Imagens da aplicação de flexão (+) e (-) na laminação de chapa plana.	67
Figura 31 – Laminador de Encruamento da ArcelorMittal Vega.	67
Figura 32 – Mesa de inspeção de uma linha de inspeção.	69
Figura 33 – Comprimento desigual das fibras internas e externas da chapa.	70
Figura 34 – Diagrama do experimento proposto.	73
Figura 35 – Perfil da chapa com forte ondulação central.	75
Figura 36 – Carta de planicidade de uma bobina com forte ondulação central.	75
Figura 37 – Corpo de prova pronto para ensaio de tração.	78
Figura 38 – Guilhotina para corte das peças.	78
Figura 39 – Centro de usinagem.	79
Figura 40 – Máquina de Tração Instron modelo 5585.	79
Figura 41 – Peças embutidas para o ensaio metalográfico.	80
Figura 42 – Microscópio para análise metalográfica.	81
Figura 43 – Espessura da chapa em função da flecha e corda da ondulação.	90
Figura 44 – Espessura da chapa em função da planicidade.	91
Figura 45 – Deformação efetiva em função da planicidade, para valores de $X=\sigma_2/\sigma_1$, e considerando material isotrópico e $n=0,25$	92
Figura 46 – Teste de normalidade da amostra do histórico de produção.	94
Figura 47 – Teste de normalidade para o lote experimental.	95
Figura 48 – Comparação estatística entre as amostras TCM HIST e TCM EXPERIME.	96
Figura 49 – Detalhe da comparação estatística entre as amostras, sendo “Before” o histórico e “After” o experimento.	96
Figura 50 – Sumário da Flecha da população do histórico de produção.	99
Figura 51 – Sumário da Flecha da população do experimento realizado.	100
Figura 52 – Intervalos de Confiança para FLECHA.	101
Figura 53 – Sumário da Corda da população do histórico.	103
Figura 54 – Sumário da Corda da população do experimento.	104
Figura 55 – Intervalo de confiança para corda.	105

Figura 56 – Planicidade de uma bobina do teste.	106
Figura 57 – Comparação entre as amostras transversais.....	108
Figura 58 – Comparação entre as amostras longitudinais.	108
Figura 59 – Subtangente difusa em instabilidade plástica corrigida para chapa anisotrópica, em função da razão das tensões principais.....	109
Figura 60 – Resultados da metalografia das amostras com e sem ondulação.	111
Figura 61 – Imagem dos blanks antes da conformação.....	112
Figura 62 – Imagem dos gabinetes durante a produção.....	113
Figura 63 – Imagem do produto final.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões típicas de aços para aplicações com planicidade restrita.	30
Tabela 2 – Medida após correção de planicidade por tipo de equipamento.....	51
Tabela 3 – Composição da liga do material de teste.....	71
Tabela 4 – Níveis do fator de entrada no experimento.....	74
Tabela 5 – Parâmetros para o embutimento a quente.	80
Tabela 6 – Simulação de dados para a construção das Figuras 42 a 44.....	89
Tabela 7 – Medição da planicidade após TCM.	94
Tabela 8 – Medição final da planicidade do lote experimental...	97
Tabela 9 – Dados do experimento para Flecha (mm).	98
Tabela 10 – Dados do experimento para Corda (mm).	102
Tabela 11 – Propriedades mecânicas dos corpos de prova. ...	107
Tabela 12 – Resultados da análise do tamanho de grão.	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AGC – automatic gauge control, ou controle automático de espessura
- AWC – automatic width control, ou controle automático da largura
- BA – Batch annealing, ou recozimento em caixa
- BF – bobina a frio, produto do LTF
- Blank – forma cortada a partir de matéria prima plana ou pré formada
- BQ – bobina a quente, produto do LTQ
- CAL – Continuous annealing line, ou linha de recozimento contínuo
- CDP – corpo de prova
- CRC – cold rolled coils, ou bobinas laminadas a frio, recozidas e encruadas
- CVC – continuous variable crown ou coroa continuamente variável
- ENC – laminador de encruamento, o mesmo que SPM
- FH – full hard, ou bobina laminada a frio
- Gap – distância livre entre os cilindros de trabalho
- HGC – hydraulic gauge control ou controle hidráulico de abertura
- HSM – hot strip mil ou laminador de tiras a quente
- i-units – unidade de medida de planicidade
- LAF – laminador a frio, o mesmo que CRC
- LE – tensão limite de escoamento
- LR – limite de resistência à tração
- LTF – laminador de tiras a frio, o mesmo que CSM
- LTQ – Laminador de tiras a quente, o mesmo que HSM
- REC – Recozimento em caixa, o mesmo que BA
- SPM – Skin pass mil, ou laminador de encruamento

LISTA DE SÍMBOLOS

- μ – coeficiente de atrito
- μ – média de uma população (estatística)
- ε – deformação verdadeira
- \varnothing – diâmetro
- τ – tensão de cisalhamento
- σ – tensão de engenharia
- $\bar{\sigma}$ – tensão verdadeira
- σ – desvio padrão (estatística)
- σ^2 – variância de uma população (estatística)
- ω – velocidade angular
- δ, Δ – diferencial entre medidas
- α – nível de significância (estatística)
- e – deformação de engenharia
- F – flecha
- F_z – força, sendo (z) um índice qualquer
- h – espessura
- L – comprimento
- b – largura
- n - quantidade de medidas de uma amostra (estatística)
- P – carga
- R – anisotropia
- r – raio
- s^2 – variância amostral de uma população (estatística)
- v – velocidade linear
- \bar{x} – média amostral de população (estatística)
- X – razão entre tensões principais
- Z_d – tangente instantânea ou subtangente difusa
- Z_l – subtangente localizada
- Z_0 – variável aleatória normal padrão (estatística)
- $\Phi(z)$ – função distribuição cumulativa (estatística)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 OBJETIVO GERAL	27
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES	29
2.1 A LAMINAÇÃO DE METAIS	31
2.2 O ATRITO	35
2.3 DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO VERDADEIRA.....	37
2.4 ONDULAÇÕES	40
2.5 A ONDULAÇÃO INTERMEDIÁRIA	44
2.6 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA PLANICIDADE	45
2.7 TENSÕES RESIDUAIS.....	51
2.8 INSTABILIDADE PLÁSTICA.....	52
3 SÍNTESE DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO	57
3.1 O FORNO DE REAQUECIMENTO.....	58
3.2 O LAMINADOR A QUENTE.....	59
3.3 O LAMINADOR A FRIO	61
3.4 O RECOZIMENTO EM CAIXA.....	63
3.5 LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO	66
3.6 A LINHA DE INSPEÇÃO.....	68
3.7 SLITTER, TESOURAS DE BORDA, APLAINADORA E REBOBINADEIRA.....	69
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
4.1 SELEÇÃO DO MATERIAL	71
4.2 ESTUDO DA DEFORMAÇÃO EM INSTABILIDADE PLÁSTICA.....	72
4.3 EXPERIMENTO REALIZADO EM LINHA DE PRODUÇÃO	72
4.4 ENSAIOS EM LABORATÓRIO	77
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
5.1 DEFORMAÇÃO EM INSTABILIDADE PLÁSTICA.....	83

5.2 EXPERIMENTO COMPREENDENDO INSERÇÃO DE ONDULAÇÃO CENTRAL NAS CHAPAS	93
5.2.1 Inferência estatística para flecha	98
5.2.2 Inferência Estatística para Comprimento de Onda.....	102
5.3 CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALGRÁFICAS COM A ONDULAÇÃO	106
5.3.1 Ensaios de Tração Simples	106
5.3.2 Metalografia.....	110
5.4 RESULTADOS DO PRODUTO FINAL	112
6 CONCLUSÃO	115
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
REFERÊNCIAS.....	119
Apêndice A: Curvas Tensão x Deformação de amostras com ondulação.....	127
Apêndice B: Curvas Tensão x Deformação de amostras sem ondulação.....	129
Apêndice C: Ensaio Metalográfico de Amostras com Ondulação.....	131
Apêndice D: Ensaio Metalográfico de Amostras sem Ondulação.....	133

1 INTRODUÇÃO

Aços planos laminados a frio são tradicionalmente empregados nas indústrias da linha branca e de móveis de aço, que aplicam as chapas na fabricação de seus gabinetes. Como também acontece em outros segmentos do mercado, estes produtos vêm sofrendo uma contínua redução na espessura do metal ao longo dos anos, resultado das sucessivas otimizações dos processos produtivos (SOUSA, 2012).

Esta evolução tem efeito direto sobre outro importante requisito de qualidade destes produtos: a planicidade das chapas de aço. Segundo Abdelkhalek et al. (2010), o controle da forma da chapa é essencial para otimizar o processo de laminação a frio. Com a crescente demanda por aços mais resistentes, mais finos e mais largos, requisitos mais restritos são aplicados sobre o controle da planicidade durante a laminação a frio.

Malik (2007) aponta que, dos critérios dimensionais de qualidade, a planicidade da chapa é o mais difícil de ser controlado, particularmente na laminação a frio de chapas finas, como resultado das pequenas variações no coroamento da chapa durante a redução da espessura.

Linhas de produção que empregam chapas de aço na fabricação de gabinetes planos requerem planicidade isenta de defeitos de forma, também conhecida como planicidade restritiva, pois seus blanks não sofrem conformação profunda como estiramento e repuxado, apenas sequências de dobramento, apartamento e furação. Estas tarefas causam escoamento plástico e fratura com endurecimento local, porém as deformações não afetam a planicidade do restante dos painéis (MARCINIAK; DUNCAN; HU, 2002).

O fluxograma típico da produção de bobinas de aço compreende sucessivas etapas de conformação mecânica e aplicação de ciclos térmicos. Cada uma destas etapas contribui na realização da qualidade do produto e pode, em maior ou menor escala, favorecer a formação de defeitos de forma no produto em processamento.

As ondulações são provenientes de um diferencial de comprimento entre as fibras do metal, o qual está intimamente ligado à variação da espessura local da chapa. Estas variações de espessura são produzidas durante as etapas de laminação

pela deformação imposta ao metal que está sendo trabalhado. Deformações irregulares podem causar ondulações localizadas, de difícil correção, devido à concepção construtiva e limitações de projeto das cadeiras de laminação.

Desta forma a planicidade original da chapa de aço entregue pelas usinas siderúrgicas e as beneficiadoras é naturalmente conservada durante as etapas de fabricação dos produtos nas linhas de montagem dos clientes, sem a possibilidade de correções durante estas etapas ou posteriormente. Esta limitação faz com que os defeitos de forma dificultem ou impossibilitem a utilização das bobinas de aço. Um material com aplainamento deficiente será facilmente perceptível e antiestético quando aplicado em superfícies expostas de produtos como automóveis, eletrodomésticos, móveis, etc. (RIZZO, 2011).

A evolução dinâmica dos referenciais de qualidade deste mercado tem levado as usinas siderúrgicas a produzirem bobinas destinadas a aplicações com planicidade restrita em linhas de recozimento contínuo. Nestas linhas, o ciclo térmico é aplicado com a chapa em movimento e continuamente tracionada, o que pode contribuir na redução de defeitos de forma, requerendo em contrapartida equipamentos mais sofisticados e maiores investimentos para instalação e manutenção.

Alternativamente as bobinas laminadas a frio podem ser recozidas em instalações de recozimento em caixa, que se caracterizam pela fabricação por batelada e por um ciclo térmico mais longo, no qual as bobinas permanecem empilhadas e bobinadas do carregamento ao descarregamento. Este processo é menos favorável à eliminação de eventuais ondulações, pois a chapa não é tensionada.

A consecução de bobinas laminadas a frio isentas de ondulações, por meio de recozimento em caixa, representa uma iniciativa inovadora na produção de produtos planos de aço para a indústria em geral e uma alternativa a mais para o mercado, sempre pronto a buscar opções de fornecimento que aliem qualidade e custo compatível.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é eliminar deficiências de planicidade em chapas de aço laminadas a frio com o propósito de qualificar o material para aplicação com sucesso na fabricação de painéis longos que requeiram planicidade isenta de ondulações.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender os fundamentos teóricos da planicidade em chapas submetidas a um estado biaxial de tensão e os mecanismos de formação das ondulações;
- Desenvolver uma metodologia matemática que permita correlacionar a ondulação com a deformação em instabilidade plástica em um processo de laminação;
- Empreender um experimento em linha de produção que permita avaliar estatisticamente a melhoria da planicidade quando comparada ao processo normal de produção;
- Analisar a influência das ondulações nas propriedades mecânicas e metalográficas das chapas produzidas.

2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Aços para bens de consumo são aplicados na fabricação de automóveis, utilidades domésticas e comerciais, e na fabricação de embalagens para o acondicionamento de produtos. Segundo o Instituto de Aço Brasil (IAB), estas aplicações representam cerca de 40% do consumo de aço no país, sendo que a linha branca responde por 7,4% deste total (RIZZO, 2011).

Os aços destinados à fabricação de móveis de aço e produtos da linha branca (refrigeradores, fogões, lavadoras de roupas, lavadoras de louças e fornos de micro-ondas) são compreendidos em algumas famílias de produtos siderúrgicos, definidas pela classe de aço, de acordo com as normas que se dispõe a atender. Estas normas determinam a composição química dos aços e as restrições em termos de suas propriedades mecânicas. As dimensões típicas das aplicações são apresentadas na Tabela 1, bem como as principais propriedades mecânicas e os componentes químicos. De acordo com a definição da American Iron and Steel Institute (AISI), os aços apresentados são aços baixo carbono ou ultra baixo carbono (GINZBURG, 1989). De acordo com a classificação proposta por Chiaverini (2012), os aços das aplicações da Tabela 1 são “chapa fina”, uma vez que são compreendidos entre 0,30 mm e 6,00 mm de espessura e a largura é superior a 300 mm. Os principais requisitos destes materiais compreendem:

- 1) elevada trabalhabilidade;
- 2) boa soldabilidade;
- 3) superfície sem defeitos;
- 4) características de acabamento;
- 5) baixo custo.

Tabela 1 – Dimensões típicas de aços para aplicações com planicidade restrita.

Denominação	Norma	Aplicação Típica	Espessura [mm]		Largura [mm]		LE [MPa]		LR [MPa]		Al. [%]		Dureza HRB		Composição Química* [%]				
			min	max	min	max	min	máx	min	máx	min	max	min	max	C	Mn	P	S	
1008/1010	SAE J403	Peças estruturais sem restrição de propriedades mecânicas	0,4	0,8	900	1600	**	**	**	**	**	**	**	**	0,15	0,6	0,03	0,035	
CS-A/B/C	ASTM A 1008																		
DS, DDS-A/B/C	ASTM A 1008	Peças estruturais sem restrição de propriedades mecânicas Painéis externos com garantia de propriedades mecânicas	0,4	0,7	900	1600	115	275	**	**	30	70	0,08	0,50	0,02	0,030			
QCV/EEV/EPV	NBR 6651	Peças para esmaltagem vítrea: fornos e queimadores de fogões	0,4	0,8	900	1600	140	280	270	370	31	50-65	0,10	0,50	0,04	0,035			
... 240/280/300 ...	NBR 5915-5	Painéis externos com garantia de propriedades mecânicas	0,5	0,6	1100	1550	300	360	380	460	25	50	0,10	0,70	0,12	0,025			

Fontes: ArcelorMittal (2015); Cia. Siderúrgica Nacional (2016); Usiminas (2016).

2.1 A LAMINAÇÃO DE METAIS

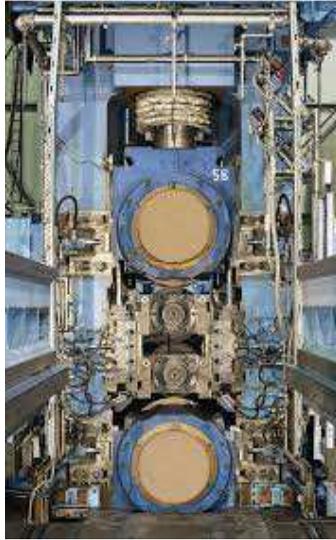
Para Kalpakjian e Schmid (2009), a laminação é um processo de redução da espessura ou mudança da seção de uma peça longa pela aplicação de forças compressivas através de um par de rolos.

A laminação de metais é um processo de conformação mecânica por compressão contínua, ou passo a passo, por meio de uma ou mais ferramentas rotativas, em que o escoamento do metal produz-se pelas forças de pressão aplicadas externamente (AL-QURESHI, 2010). Estas ferramentas rotativas compreendem conjuntos de cilindros superpostos montados simetricamente, aos quais, juntamente com os seus mancais, montantes, suportes e demais componentes, dá-se o nome de cadeira de laminação (RIZZO, 2007).

O tipo mais popular de cadeira para laminação a frio é o tipo 4-high, ou quadro (ROBERTS, 1978). Esta afirmação permanece atual até os dias de hoje. Nesta cadeira de laminação, os cilindros de trabalho são apoiados em cilindros de encosto de diâmetro maior, como pode ser visto na Figura 1, com o objetivo de aumentar a rigidez do conjunto e elevar as cargas de laminação. Entre os fatores que determinam a escolha do diâmetro dos cilindros estão a velocidade de laminação, a redução de espessura da chapa, o arranjo da refrigeração, o desgaste e a prevenção da fragmentação dos cilindros (ROBERTS, 1978 apud GREENBERGER, 1959).

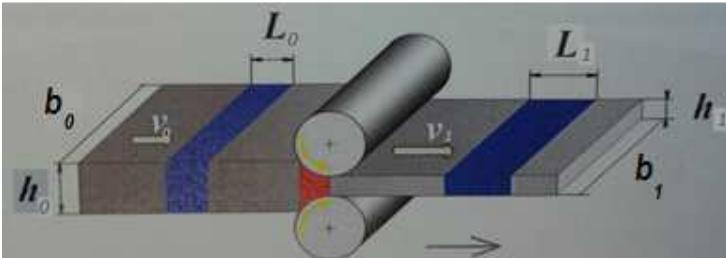
A cadeira de laminação é posicionada perpendicularmente à chapa de metal que é trabalhada. A distância entre os cilindros é menor do que a espessura do metal sendo laminado, de modo que a espessura do aço é reduzida ao mesmo tempo em que o metal é alongado (HINGOLE, 2015). Esta deformação é realizada pela combinação dos esforços de tração e compressão que são aplicados à chapa, os quais geram a redução na espessura e o alongamento do metal. Não há acúmulo ou perda de material durante este processo; todo o metal que é admitido na entrada da cadeira sai da mesma no estado laminado e, para todos os propósitos, o volume total é assumido como sendo constante (ROBERTS, 1983). A representação deste processo é apresentada na Figura 2.

Figura 1 – Cadeira de laminação tipo quadro.



Fonte: SMS-SIEMAG (2016).

Figura 2 – Laminação de uma chapa (transformação a volume constante).



Fonte: Adaptado de Fonstein (2011).

A largura do material não sofre variação apreciável ($b_0 = b_1$), desta forma podemos simplificar os termos referentes a largura da chapa nos dois lados da igualdade. Portanto a redução na espessura se traduz completamente no aumento do comprimento da bobina ($L_1 > L_0$). A relação entre as velocidades

de entrada e saída da cadeira é obtida a partir da lei da conservação da massa. A Equação (1) representa a relação original de volume constante.

$$L_0 h_0 b_{\text{tr}} = L_1 h_1 b_{\text{tr}} \quad (1)$$

Se derivarmos a Equação (1) em relação ao tempo, obtemos:

$$\frac{\partial L_0}{\partial t} h_0 = \frac{\partial L_1}{\partial t} h_1 \quad (2)$$

ou

$$v_0 h_0 = v_1 h_1 \quad (3)$$

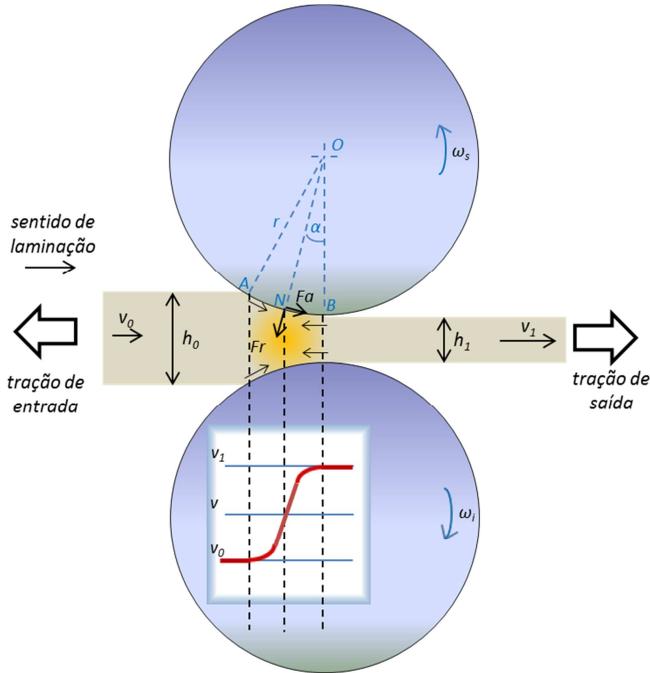
ou também

$$v_1 = \left(\frac{h_0}{h_1} \right) v_0 \quad (4)$$

Assim, observamos que a velocidade de saída da cadeira (v_1) é maior do que a velocidade de entrada (v_0), enquanto a velocidade periférica dos cilindros de trabalho (v) é constante. Por este motivo, ocorre escorregamento relativo entre os cilindros e a chapa ao longo do arco de contato (AB) (Figura 3). A velocidade da chapa e dos cilindros se iguala em um ponto do arco de contato chamado ponto neutro (N) (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

Para todos os efeitos, os diâmetros dos cilindros de trabalho superior e inferior são considerados iguais, de modo que as velocidades angulares dos cilindros superior e inferior também o sejam, isto é, $\omega_i = \omega_s$.

Figura 3 – Relação de velocidades durante a laminação.



i = inferior; s = superior; N = ponto neutro; α = ângulo de contato; AB = arco de contato; r = raio dos cilindros de trabalho.

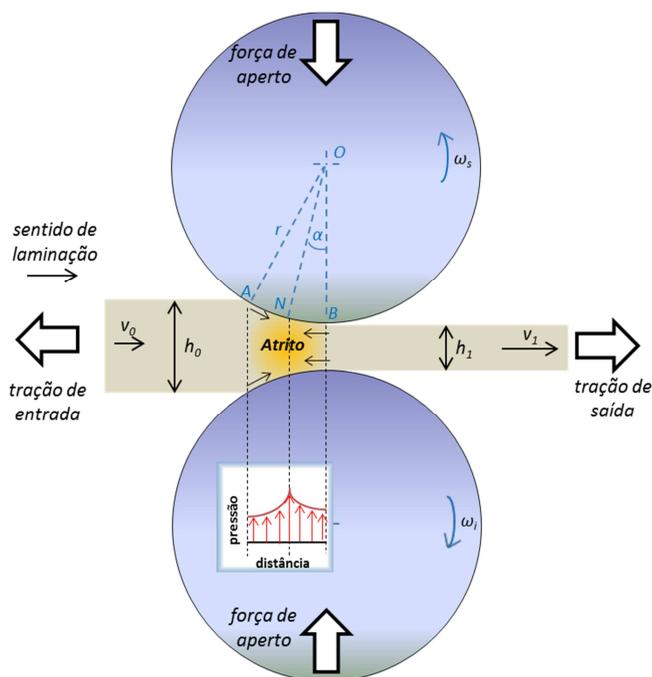
Fonte: Adaptado de Al-Qureshi (2010).

A laminação a frio deforma plasticamente os grãos do metal no sentido do movimento da chapa, e diz-se que o material passa ao estado encruado, caracterizado por grãos alongados e estrutura cristalina com elevada densidade de defeitos. Segundo Padilha e Siciliano Jr. (2005), a densidade e distribuição dos defeitos gerados na deformação plástica dependem de fatores tais como estrutura cristalina do metal, temperatura, quantidade e velocidade da deformação, pureza do metal e a energia de defeito de empilhamento.

Considerando um estado biaxial de carregamento, como o mostrado na Figura 4, podem ser identificados os esforços atuantes sobre o material durante o processo. As tensões na laminação podem ser calculadas pela teoria da laminação de Von Karman (1925), a partir do método de equilíbrio de forças, o

critério de escoamento de Von Mises e a equação da plasticidade de Levy-Mises (AL-QURESHI, 2010). No detalhe da Figura 4 está representada a colina de fricção: ascendente do início do contato chapa-cilindros até o plano neutro, e descendente a partir deste até o término do contato entre chapa-cilindros.

Figura 4 – Diagrama dos esforços atuantes sobre a chapa durante a laminação.



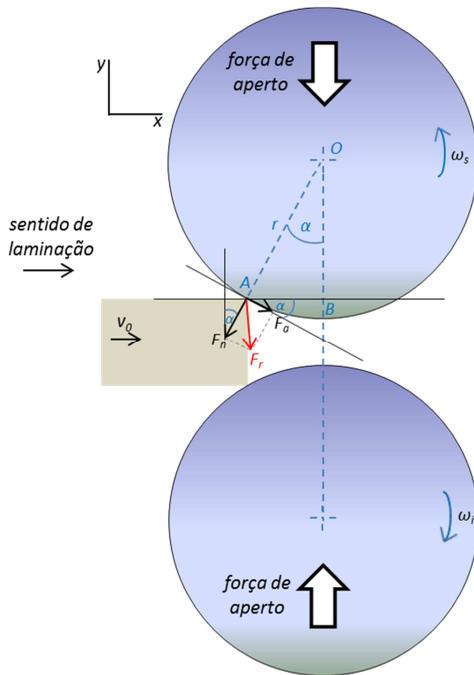
Fonte: Adaptado de Al-Qureshi (2010).

2.2 O ATRITO

Segundo Roberts (1983), na ausência de trações na chapa e de atrito entre a chapa e os cilindros, a laminação não seria possível, dado que a energia de deformação não poderia ser transferida dos cilindros de trabalho à chapa.

Para Helman e Cetlin (2005), a existência de atrito entra a chapa e os cilindros é uma condição necessária à laminação. No momento em que a chapa entra em contato com os cilindros de laminação, duas forças atuam sobre ela: uma força normal à superfície do cilindro F_n e a força de atrito F_a tangente ao mesmo, tendo F_r como a força resultante conforme indicado na Figura 5. Para que a chapa seja arrastada e entre na mordida dos cilindros, o somatório das forças no eixo x deve ser positivo. Caso esta condição não seja satisfeita, a chapa não entra na cadeira de laminação, ou requer auxílio adicional para fazê-lo. Ziang et al. (2008) complementam que na interface rolo-chapa a fricção, a lubrificação e o desgaste tem uma significativa influência sobre a precisão dimensional e a qualidade da superfície da chapa.

Figura 5 – O atrito no momento da mordida na chapa.



Fonte: Adaptado de Helman e Cetlin (2005).

Portanto:

$$\sum F_x \geq 0 \quad (5)$$

De acordo com Spiegel (1992):

$$F_a \cos \alpha - F_n \sin \alpha \geq 0 \quad (6)$$

Considerando um modelo de atrito de Coulomb (μ):

$$\mu = \frac{F_a}{F_n} \quad (7)$$

Assim obtemos a condição limite para a mordida da chapa:

$$\mu \geq \tan \alpha \quad (8)$$

A partir do momento em que a chapa é arrastada para os cilindros, o processo de laminação pode continuar com ângulos de contato menores do que o ângulo de mordida. A força resultante aplicada não estará mais no ponto de entrada, mas situada em algum ponto do arco de contato.

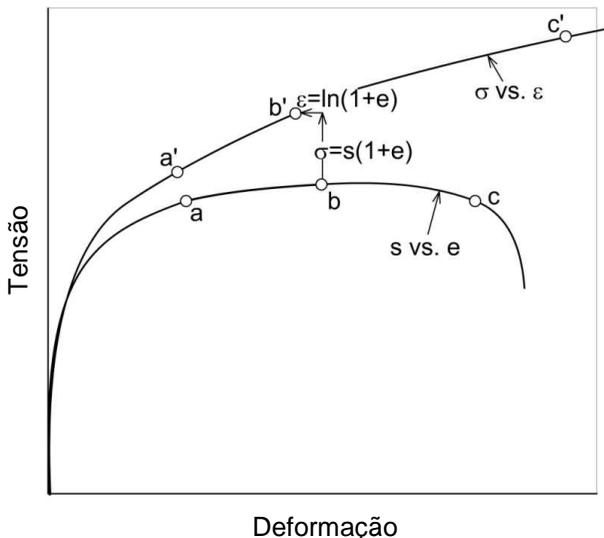
2.3 DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO VERDADEIRA

Os ensaios dos materiais visam fornecer informações acerca das propriedades dos mesmos sob condições específicas que servirão para definir sua aplicação em projetos de engenharia.

Considere-se um corpo de prova (CDP) submetido a um ensaio de tração uniaxial. Do início da aplicação da carga até a ruptura, observam-se quatro regiões distintas: (a) região de comportamento elástico, (b) região de deslizamento de discordâncias, (c) região de encruamento uniforme e (d) região de encruamento não uniforme (GARCIA; SPIN; DOS SANTOS, 2008). Este ensaio fornece as curvas tensão x deformação de engenharia e verdadeira, sendo esta superior aquela, notadamente na porção de maior deformação das curvas, as regiões (c) e (d) (MOOSBRUGGER, 2002).

A Figura 6 apresenta a comparação entre as curvas tensão x deformação de engenharia (linha a-b-c) e verdadeira (a'-b'-c').

Figura 6 – Comparação entre as curvas tensão x deformação de engenharia e verdadeira.



Fonte: Adaptado de Hosford e Caddell (2007).

Segundo Dieter (1961), o conceito de deformação linear média pode ser definido como a razão entre um diferencial de comprimento e o comprimento original na mesma direção. A deformação em um ponto é a razão da deformação ao comprimento medido, quando este se aproxima de zero. Mais exatamente do que referir a mudança de comprimento ao comprimento original, é mais útil definir a deformação como a variação na dimensão linear dividida pelo valor instantâneo desta dimensão.

Considerando um CDP de comprimento inicial (L_0) e comprimento final (L), a deformação linear média conforme esta definição pode ser calculada pela Equação (9).

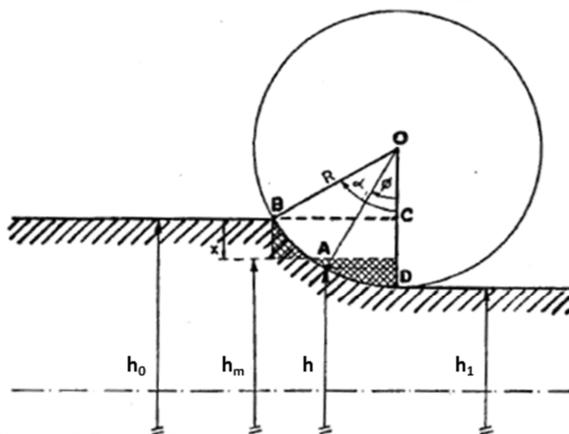
$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (9)$$

Enquanto a Equação (10) define a deformação verdadeira (ε).

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (10)$$

Sendo um material de espessura inicial (h_0) e espessura final (h) submetido a um esforço de compressão, como uma chapa sendo laminada, semelhante à da Figura 7.

Figura 7 – Esboço da deformação na laminação.



Fonte: Adaptado de Helman e Cetlin (2005).

A deformação convencional em compressão num ponto (A) qualquer que pertence ao arco de contato BD, admitindo deformação homogênea na espessura, é calculada pela Equação (11) (AL-QURESHI, 2010).

$$e = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h}{h_0} \quad (11)$$

Neste mesmo ponto (A) a deformação logarítmica ou verdadeira é calculada a partir da Equação (12) (CHAKRABARTY, 2010).

$$\varepsilon = \int_h^{h_0} \frac{dh}{h} = \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) = \ln\left(\frac{1}{1-e}\right) = -\ln(1-e) \quad (12)$$

2.4 ONDULAÇÕES

Os defeitos de planicidade na tira bobinada podem assumir muitas formas, a maioria das quais são caracterizadas por ondas ou ondulações, estendendo-se por toda a sua largura ou confinadas a porções estreitas da mesma (ZHOU et al., 2007). Dentro da gama de defeitos que podem degradar a planicidade das chapas finas temos os defeitos de perfil e os defeitos de forma.

Os defeitos de perfil estão relacionados a um diferencial na espessura transversal, o coroamento da chapa, enquanto os defeitos de forma estão relacionados a um diferencial no comprimento das fibras, as ondulações (THEIS; HAZEN, 2009). O coroamento da bobina a quente é definido pelo Laminador de Tiras a Quente (LTQ) e não pode ser significativamente alterado nas etapas a frio.

Há uma tendência natural aos materiais laminados a frio terem ondulação de bordas. A espessura da chapa deve ser maior no centro para manter o material seguindo apropriadamente nos equipamentos de laminação. Se a coroa não está presente, o metal tenderá a escorregar de lado a lado, com resultados potenciais catastróficos (METALRESOURCES, 2015).

Rizzo (2011) define as opções do perfil básico da bobina a quente (BQ) como sendo de três tipos: côncavo, convexo ou chato, mas também apresenta variantes como perfil simétrico, assimétrico ou irregular. A combinação entre os perfis básicos e as variantes gera uma gama de tipos de perfis. Os defeitos de perfil da BQ serão abordados neste trabalho somente como pré-requisito para o processo a frio: perfil levemente convexo e simétrico.

Dentre os vários defeitos de planicidade causados por diferenciais de comprimento entre as fibras do material plano, destacam-se (Figura 8):

- i. Defeitos ocasionados por comprimento diferencial entre as superfícies, como os empenos (longitudinal e transversal);
- ii. Defeitos provenientes de comprimento diferencial ao longo da largura da chapa, como os ondulados de bordas, ondulado central e camber.

Figura 8 – Os principais defeitos de forma.



Fonte: Adaptado de Theis (2002).

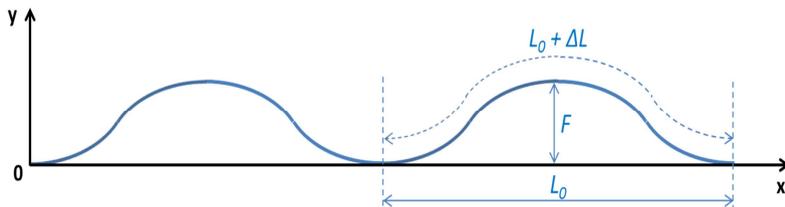
A ondulação pode ser definida como uma variação no comprimento longitudinal das fibras do material. Os processos de laminação são os responsáveis pelo aumento deste comprimento longitudinal, porém é desejável que esta modificação seja regular e homogênea, sob o risco de se introduzirem na chapa defeitos de forma.

Kalpakjian e Schmid (2009) apontam que as ondulações de bordas em chapas são o resultado da aplicação da flexão nos cilindros. Em se tratando de chapas planas, a deformação irregular pode ocorrer em qualquer ponto transversal e/ou longitudinal da bobina, bem como em mais de uma região da mesma, sempre no sentido da laminação.

Sumarizando, a ondulação é caracterizada por uma variação de comprimento (ΔL) e, com base no princípio de conservação do volume, é necessário que ocorra uma correspondente redução na espessura local. A Figura 9 ilustra a representação hipotética de uma ondulação, onde o termo (L_0) representa o comprimento linear de uma fibra da chapa em estado perfeitamente plano, o termo ($L_0 + \Delta L$) constitui o comprimento original da fibra adicionado do comprimento correspondente à deformação irregular, doravante denominado comprimento de onda ou corda e o termo (F) representa a amplitude da ondulação, altura da onda ou flecha (F).

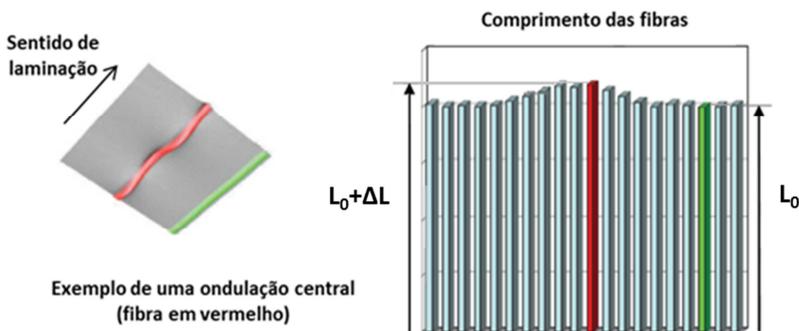
A Figura 10 retrata esta ondulação em perspectiva na região central de uma chapa qualquer, e a correspondente variação no comprimento das fibras.

Figura 9 – Representação de um ondulado hipotético.



Fonte: Adaptado de SMS-DEMAG (2003).

Figura 10 – Efeito da ondulação no comprimento das fibras.



Fonte: Adaptado de Fonstein (2011).

Apesar de a planicidade ou a sua deficiência serem facilmente visíveis, a medição ou determinação da intensidade do aplainamento de uma chapa laminada é uma tarefa relativamente complexa. A teoria assume que a ondulação pode ser representada por um modelo não linear senoidal modificado. Segundo Rizzo (2011), um alongamento relativo qualquer ($\Delta L/L$) pode ser calculado a partir da Equação (13), a qual também é citada por Theis e Hazen (2009), Sms-Demag (2003) e Metalresources (2015).

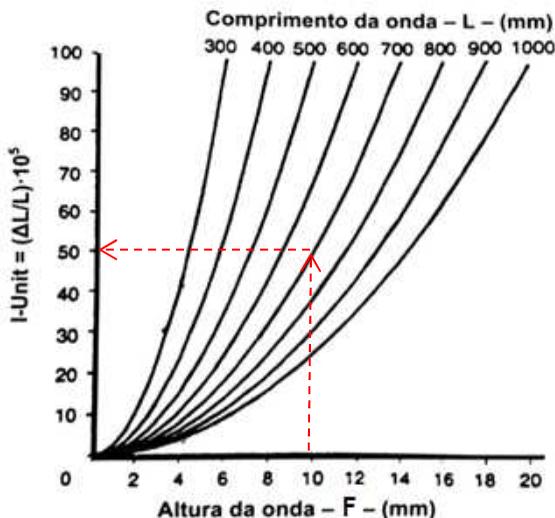
$$\frac{\Delta L}{L} = \left(\frac{\pi F}{2 L} \right)^2 \quad (13)$$

A planicidade em i-units tem relação direta com o alongamento relativo. Dependendo das dimensões da flecha e corda, este pode tornar-se um valor muito diminuto, dificultando a sua utilização. Para o cálculo da planicidade em i-units, é necessária a multiplicação por 10^5 , conforme dado na equação (14) (SMS-DEMAG, 2003).

$$i\text{-units} = \left(\frac{\Delta L}{L}\right) \cdot 10^5 \quad (14)$$

Assim temos que, para um dado binômio flecha e corda, obtemos a correspondente planicidade em i-units. A Figura 11 apresenta esta relação para diversas combinações de medidas. No detalhe temos uma ondulação hipotética com 10 mm de flecha e 700 mm de comprimento de onda. Traçando-se uma linha vertical a partir do ponto correspondente a 10 mm de altura da onda até atingir a curva correspondente a 700 mm de comprimento de onda, e então rebatendo este ponto paralelamente ao eixo das abscissas até encontrar o eixo das ordenadas, temos que a planicidade equivalente é de 50 i-units, aproximadamente.

Figura 11 – Relação entre comprimento de onda, altura e i-units.

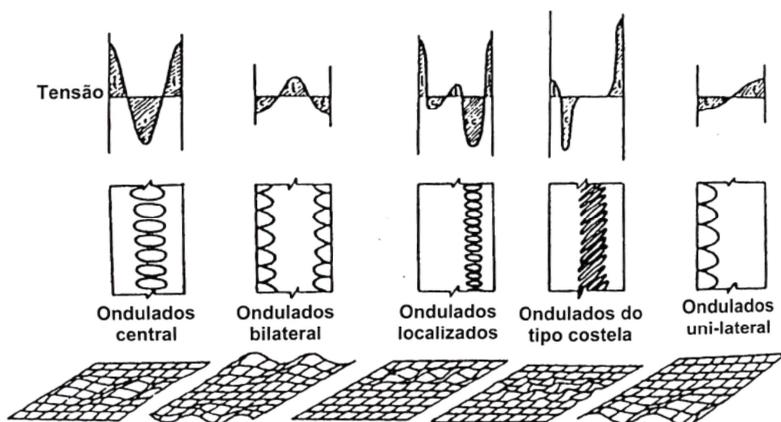


Fonte: Rizzo (2011).

2.5 A ONDULAÇÃO INTERMEDIÁRIA

A literatura tradicional aborda os defeitos de forma provenientes de um incremento de comprimento entre as fibras do material com ênfase em dois tipos clássicos: ondulação central e de bordas (ASM, 1993). No entanto, as ondulações não estão limitadas a apenas estes dois tipos. Existem vários outros que, embora menos evidentes, são igualmente prejudiciais ou em certos casos mais agressivos do que os tipos clássicos. A Figura 12 apresenta as principais categorias de ondulados, correspondentes aos casos típicos de distribuição das tensões ao longo da largura do laminado plano (RIZZO, 2011).

Figura 12 – Representação esquemática das principais categorias de ondulados.



Fonte: Rizzo (2011)

Laminadores dispõem de atuadores projetados para a correção dos ondulados centrais e de bordas, mas devido à sua concepção construtiva, não é muito frequente haver atuadores dedicados à correção de ondulados localizados (Figura 13) ou sua efetividade é limitada, o que faz este tipo de defeito ser extremamente prejudicial à qualidade do produto. Quando uma ondulação ocorre nesta região, uma das principais ações de impedimento e correção torna-se a segregação desta parte da bobina.

Figura 13 – Ocorrência de ondulado intermediário em uma bobina LAF.



Fonte: Autor (2016).

Roberts (1978) associa a ocorrência destes ondulosos a distribuições irregulares de tensões, enquanto Hara, Yamaha e Tagaki (1991) apontam a aplicação da flexão (bending) não parabólico dos cilindros de trabalho. Turley, Pollastrelli e Brecy (1999) desenvolveram controles on-line do perfil da abertura (gap) para controlar a planicidade e corrigir as ondulações localizadas. Ramirez (2003) enfatizou o papel do desalinhamento tipo camber na geração de tensões assimétricas e que resultam em defeitos localizados, enquanto Lin et al. (2003) atribuem a ondulação localizada à instabilidade de forma resultante da dinâmica da laminação. Parece haver evidência para associar a ondulação localizada com um perfil transversal adverso e, por implicação, com um perfil transversal não uniforme de tensões longitudinais (ZHOU et al., 2007).

2.6 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA PLANICIDADE

De acordo com a Association of Iron and Steel Engineers (AISE), a planicidade pode ser definida como um parâmetro mensurável que descreve a presença de ondulações ou

encurvamentos e suas posições e tamanhos ao longo do material (GINZBURG, 1989). De forma geral, existem três métodos para avaliar a planicidade de uma chapa, as quais fornecem dados que podem ser tratados estatisticamente:

- 1) Inspeção visual em linha de produção com a chapa em movimento (Figura 14), onde a ocorrência de ondulações é registrada como: “sim” ou “não” (variável qualitativa);

Figura 14 – Inspeção visual da planicidade em uma linha de encruamento.



Fonte: Autor (2016).

- 2) Inspeção visual com a chapa parada ou em amostra retirada da mesma, utilizando-se instrumentos como, por exemplo, escala reta e cunha graduadas (Figura 15). A ocorrência de ondulações é registrada sob a forma de: “flecha” x “comprimento de onda”, sendo as medidas dadas pela leitura na resolução dos instrumentos, e que costumeiramente é em milímetros (variável quantitativa discreta amostral);

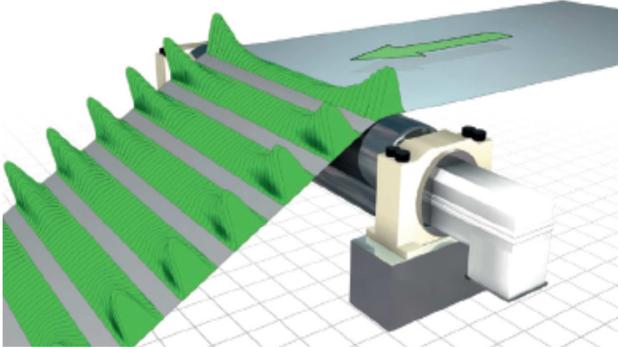
Figura 15 – Medição manual da planicidade.



Fonte: Autor (2016).

- 3) Medição instantânea ou online por meio de um equipamento ou sistema que faz a função do instrumento. Para a medição da planicidade, há no mercado diversas marcas e princípios de funcionamento: óptico, com contato, sem contato, a laser, a vácuo, eletromagnético, entre outros, cada qual exibindo vantagens, limitações e recursos específicos. Independente da tecnologia, estes instrumentos compreendem sensores que são parametrizados e permitem estimar, de acordo com um determinado sinal recebido, o valor da planicidade. A Figura 16 apresenta a imagem de um instrumento conhecido como medidor de forma, ou “Shapemeter”. Trata-se de um equipamento em forma de rolo, e que dispõe de dezenas de transdutores eletromagnéticos alinhados ao longo de fileiras longitudinais. Estes transdutores medem a pressão exercida pela chapa durante o seu movimento, a qual é transformada em medida de planicidade por meio de algoritmos. O Shapemeter é costumeiramente instalado entre a última cadeia de laminação e a enroladeira.

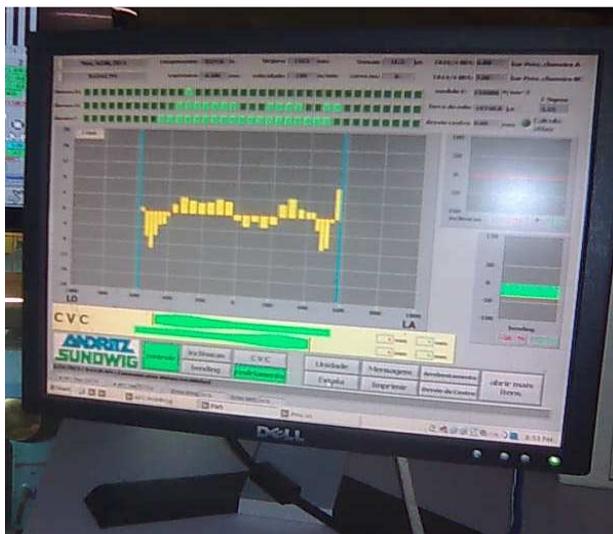
Figura 16 – Rolo medidor de planicidade Shapemeter.



Fonte: ABB (2014).

Os dados coletados pelo instrumento são transformados em medidas. A medida instantânea do Shapemeter é um valor totalizado dado em i-units e apresentado em uma tela computacional (Figura 17). Nesta imagem podem ser observadas diversas barras (em amarelo) oscilando a partir de uma linha horizontal fixa. Esta linha representa a ondulação zero, as barras acima da linha representam baixa tensão sobre os sensores (ondulação) e as barras abaixo da linha zero representam pontos com tensão mais elevada (chapa esticada). O perfil ideal de planicidade é definido pela medida de zero i-units: um perfil plano também conhecido como “flat”. O perfil real, no entanto, pode afastar-se deste alvo devido ao coroamento da chapa e deficiências de forma. Resultados da ordem de 15 i-units são considerados satisfatórios para um laminador a frio (LTF). Quanto maior a medida, mais ondulado está presente e menos plana é a chapa.

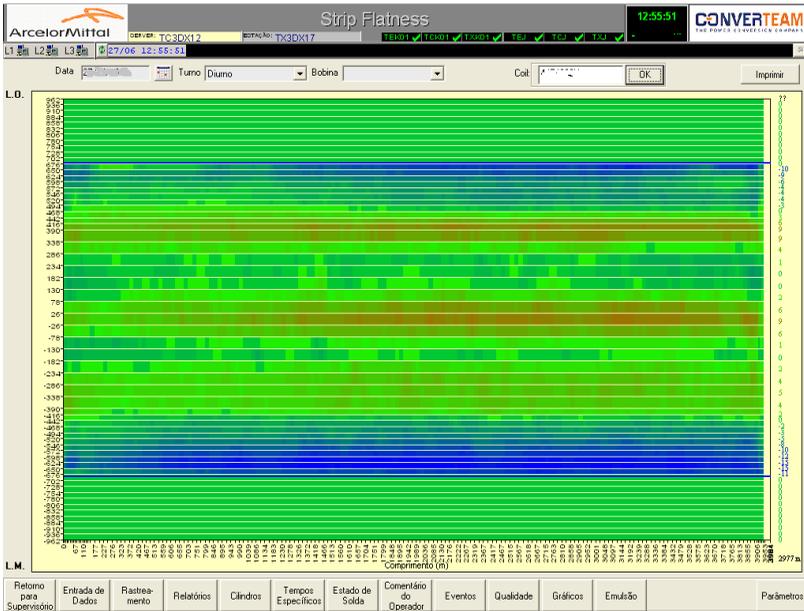
Figura 17 – Imagem da tela computacional de um medidor do tipo Shapemeter.



Fonte: Autor (2016).

As medidas instantâneas são transformadas em um mapa de planicidade que indica as regiões em que a chapa está mais tensionada e as regiões em que a chapa está menos tensionada ou frouxa. O produto de saída desta medição é conhecido com carta de planicidade da bobina (Figura 18), a qual representa graficamente os pontos medidos e cuja diferenciação entre os estados de tensão é feita por meio de cores, o que também pode ser parametrizado, com base nos valores das medições pontuais de planicidade. Neste caso, os pontos em azul e suas variantes representam as regiões tensionadas da chapa, sendo que quanto mais intensa a cor azul, mais tensionada a chapa se encontra naquele local. Os pontos de coloração avermelhada representam o oposto, regiões de tensão baixa. Os pontos verdes são pontos neutros. Nestes pontos a medida é zero ou próxima de zero. As variações de tonalidade entre estes limites representam regiões de transição dentro do intervalo.

Figura 18 – Carta de planicidade de uma bobina gerada pelo Shapemeter.



Fonte: ARCELORMITTAL (2016).

A Tabela 2 apresenta valores comparativos de planicidade em i-units, que podem ser obtidos na saída de linha de diferentes processos de correção de planicidade (THEIS e HAZEN, 2009). Naturalmente, o grau de correção aplicável depende de fatores não declarados, como o nível de ondulação existente na matéria prima, os recursos de correção disponíveis para a atuação, a experiência operacional, entre outros.

Tabela 2 – Medida após correção de planicidade por tipo de equipamento.

Tipo de Equipamento	Medida de saída [i-units]
Cadeira de Laminação	15
Endireitadeira ou Niveladora	5-10
Aplainadora de rolos com zero tensão	5
Aplainadora de rolos com 20% tensão	< 5
Aplainadora sob tensão com 50-60% tensão	0-5
Aplainadora esticadora com 100% tensão	0-5

Fonte: Theis e Hazen (2009).

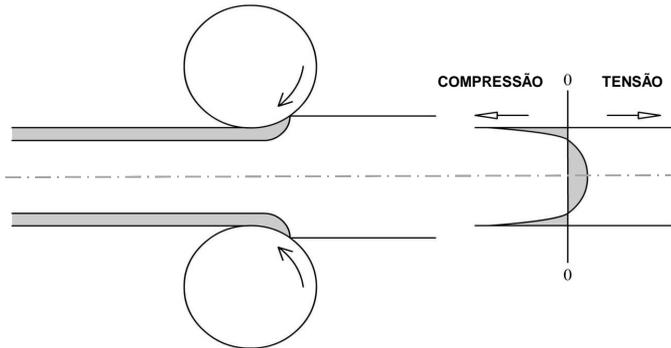
2.7 TENSÕES RESIDUAIS

Segundo Dieter (1961), as tensões residuais são o sistema de tensões trativas e compressivas que podem existir em um corpo quando o mesmo está livre de forças externas. Elas podem ser referidas também como tensões internas ou tensões aprisionadas.

As tensões residuais são produzidas sempre que um corpo está submetido a uma deformação plástica não homogênea (Figura 19) e devem ser consideradas apenas como tensões elásticas. O valor máximo que pode ser atingido é o valor do limite elástico do material. Qualquer valor excedente sem forças externas opostas vai ser dissipado na forma de deformação plástica até atingir o valor da tensão de escoamento do material. Tran, Tardif e Limam (2015) confirmaram experimentalmente que as tensões residuais são aliviadas pela formação de imperfeições geométricas.

Em um processo de laminação as fibras da superfície tendem a alongar-se enquanto as fibras centrais permanecem inalteradas. Como a chapa deve permanecer uma massa contínua, entre a superfície e o centro deve ocorrer a acomodação da deformação. As fibras centrais tendem a restringir as fibras da superfície, enquanto as fibras da superfície procuram esticar as fibras centrais. O resultado é um padrão residual de tensões no centro da chapa.

Figura 19 – Deformação não homogênea em um processo de laminação.



Fonte: Dieter (1961).

2.8 INSTABILIDADE PLÁSTICA

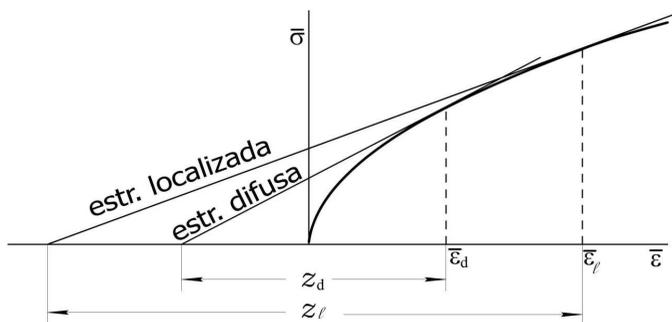
Um material homogêneo, dúctil e encruável sujeito a uma carga de tração simples, bem como a uma tensão plana ou biaxial progressiva deforma-se homogênea até que a carga atinja um determinado valor, além do qual a diminuição da área da seção excede o incremento proporcional à tensão de escoamento.

Segundo Al-Qureshi (2008), neste ponto a carga alcança seu valor máximo, a deformação homogênea torna-se instável e, posteriormente, o alongamento ocorre pela estrição localizada sob constante diminuição da carga. O limite de resistência à tração do material é baseado nesta máxima carga, embora a fratura real ocorra posteriormente sob condições completamente diferentes, e esta resistência é essencialmente uma função da característica do encruamento do material, e, portanto, de suas propriedades plásticas.

A perda de estabilidade precede a fratura nos processos de conformação dos metais, e ocorre quando se atinge a carga máxima que o material pode suportar, ponto em que a deformação aumenta sem o correspondente aumento da carga. Para Meier (2010), o início da instabilidade plástica ocorre quando a taxa de endurecimento por deformação iguala-se à taxa de redução da espessura, e o pescoço desponta em algum ponto não homogêneo da peça.

Existem pelo menos duas possibilidades de instabilidade plástica: estrição difusa e estrição localizada. A Figura 20 ilustra os dois tipos de instabilidade.

Figura 20 – Representação gráfica das subtangentes.



Fonte: Al-Qureshi, 2008.

A Equação (21) apresenta a correlação entre a tensão verdadeira, a deformação verdadeira e a subtangente para estrição (Z). No caso da subtangente para estrição difusa, $Z_d = 1$, enquanto para estrição localizada, $Z_l = 2$ (AL-QURESHI, 2008 apud HILL, 1950).

Da definição de tensão, temos:

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{A} \quad (15)$$

$$P = \bar{\sigma}A \quad (16)$$

Onde $\bar{\sigma}$ representa a tensão efetiva, P é a carga aplicada e A é a área instantânea do corpo de prova. Então escrevendo a relação diferencial temos:

$$dP = Ad\bar{\sigma} + \bar{\sigma}dA \quad (17)$$

No ponto de máxima carga ($dP=0$) temos:

$$\frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} = -\frac{dA}{A} \quad (18)$$

Considerando volume constante, onde A = área da seção transversal instantânea e L = comprimento do corpo de prova:

$$AL = A_1L_1 = \text{constante} \quad (19)$$

Escrevendo o diferencial, temos:

$$AdL + LdA = 0, \text{ ou também:}$$

$$\frac{dL}{L} = -\frac{dA}{A} = d\bar{\varepsilon} \quad (20)$$

Então substituindo a Equação (18) na Equação (20), temos:

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \bar{\sigma} \quad \text{ou} \quad \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \frac{\bar{\sigma}}{Z_d} \quad (21)$$

onde ($\bar{\sigma}$) representa a tensão verdadeira, ($\bar{\varepsilon}$) a deformação verdadeira ou logarítmica e (Z_d) é a subtangente para estrição difusa, neste caso ($Z_d=1$).

Chakrabarty (2010) afirma que a estrição localizada se desenvolve apenas se a taxa de trabalho a frio for menor do que um valor crítico, para o qual ele é exatamente equilibrado pela taxa de redução de espessura no pescoço. Desde que as tensões normais transmitidas através da estrição sejam proporcionais à tensão aplicada, a subtangente crítica para estrição localizada é $(1+R)$ vezes aquela para estrição difusa, onde R é função da anisotropia.

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \frac{\bar{\sigma}}{(1+R)} \quad (22)$$

Segundo a teoria de Swift (1952) para materiais isotrópicos, podemos calcular a subtangente (Z_d) em instabilidade plástica para uma chapa carregada sob um estado plano de tensões, por meio da Equação (17) partindo das relações de Von-Mises ($\sigma_3=0$) (AL-QURESHI, 2008).

$$\bar{\sigma}^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 \quad (23)$$

Dividindo os termos por σ_1^2 e fazendo $X=\sigma_2/\sigma_1$, temos:

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 \sqrt{(1 - X + X^2)} \quad (24a)$$

$$\sigma_1 = \bar{\sigma} / \sqrt{(1 - X + X^2)} \quad (24b)$$

Escrevendo a diferencial da Equação (23), temos:

$$2\bar{\sigma} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = 2\sigma_1 \frac{d\sigma_1}{d\bar{\varepsilon}} - \sigma_1 \frac{d\sigma_2}{d\bar{\varepsilon}} - \sigma_2 \frac{d\sigma_1}{d\bar{\varepsilon}} + 2\sigma_2 \frac{d\sigma_2}{d\bar{\varepsilon}} \quad (25)$$

Sabendo que:

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \bar{\sigma} ; \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} = \sigma_1 ; \frac{d\sigma_2}{d\varepsilon_2} = \sigma_2 \quad (26)$$

Então para uma situação particular de carregamento em que todas as deformações aumentam a uma razão constante e supondo carregamento biaxial ($\sigma_3=0$), então:

$$\frac{d\bar{\varepsilon}}{2\bar{\sigma}} = \frac{d\varepsilon_1}{(2\sigma_1 - \sigma_2)} = \frac{d\varepsilon_2}{(2\sigma_2 - \sigma_1)} = -\frac{d\varepsilon_3}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (27)$$

Multiplicando-se todos os termos da equação por (σ_1) e fazendo $X = \sigma_2/\sigma_1$:

$$\frac{d\bar{\varepsilon} \sigma_1}{2\bar{\sigma}} = \frac{d\varepsilon_1}{(2-X)} = \frac{d\varepsilon_2}{(2X-1)} = -\frac{d\varepsilon_3}{(1+X)} \quad (27b)$$

Substituindo a equação (24b) no primeiro termo da equação (27b), temos:

$$\frac{d\bar{\varepsilon}}{2(\sqrt{1-X+X^2})} = \frac{d\varepsilon_1}{2-X} = \frac{d\varepsilon_2}{2X-1} = -\frac{d\varepsilon_3}{1+X} \quad (28)$$

Substituindo as Equações (26) em (27) temos:

$$\frac{d\bar{\varepsilon}}{2\bar{\sigma}} (2\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{d\sigma_1}{\sigma_1} \quad \rightarrow \quad \frac{d\sigma_1}{d\bar{\varepsilon}} = \frac{\sigma_1}{2\bar{\sigma}} (2\sigma_1 - \sigma_2) \quad (29)$$

$$\frac{d\bar{\varepsilon}}{2\bar{\sigma}} (2\sigma_2 - \sigma_1) = \frac{d\sigma_2}{\sigma_2} \quad \rightarrow \quad \frac{d\sigma_2}{d\bar{\varepsilon}} = \frac{\sigma_2}{2\bar{\sigma}} (2\sigma_2 - \sigma_1) \quad (30)$$

Substituindo as Equações (29) e (30) na Equação (25) com $X=\sigma_2/\sigma_1$:

$$4\bar{\sigma}^2 \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = 4\sigma_1^3 - 3\sigma_1^3 X - 3\sigma_1^3 X^2 + 4\sigma_1^3 X^3$$

$$4\bar{\sigma}^2 \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \sigma_1^3 (4 - 3X - 3X^2 + 4X^3) \quad (31)$$

Então, substituindo a Equação (24b) na Equação (31):

$$\bar{\sigma}^2 \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \frac{\bar{\sigma}^3 (1+X)(4-7X+4X^2)}{4(1-X+X^2)^{3/2}}$$

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \frac{\bar{\sigma}(1+X)(4-7X+4X^2)}{4(1-X+X^2)^{3/2}} \quad (32)$$

Assim, obtemos uma igualdade semelhante a Equação (21), onde:

$$Z_d = \frac{4(1-X+X^2)^{3/2}}{(1+X)(4-7X+4X^2)} \quad (33)$$

O termo (Z_d) representa a subtangente para estrição difusa em um material isotrópico. Para um material anisotrópico, a equação da subtangente difusa em instabilidade plástica é definida pela Equação (34), onde (r_0) é a resistência à deformação através da espessura em uma amostra cortada no sentido da laminação e (r_{90}) na transversal ao sentido de laminação (AL-QURESHI, 2008).

$$Z_d = \sqrt{\frac{2(r_0 r_{90} + r_0 + r_{90})^{1/2} \{r_0 r_{90} + r_{90} - 2r_0 r_{90} X + (r_0 r_{90} + r_0) X^2\}^{3/2}}{3 \{ (r_0 r_{90} + r_{90} - r_0 r_{90} X)^2 + [(r_0 r_{90} + r_0) X - r_0 r_{90}]^2 X \}}} \quad (34)$$

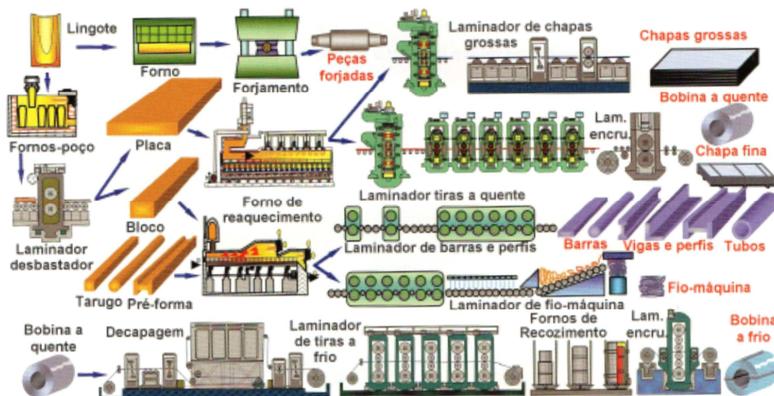
Se considerarmos o material isotrópico e substituirmos ($r_0=r_{90}=1$) na Equação (34), a mesma reduz-se à Equação (33).

3 SÍNTESE DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO

Os aços são ligas ferro-carbono, onde este último está presente em baixa quantidade, com adição de alguns elementos químicos (tais como Si, Mn, Ti, Cr, etc.), os quais variam em tipo e quantidade de acordo com a aplicação do material. O processo produtivo dos aços é extenso, possuindo diversas etapas de processamento e alta complexidade (ANJOS, 2010).

Para Rizzo (2011), os aços planos laminados compreendem chapas finas, chapas grossas, tiras, folhas e fitas. Estes produtos podem ser fornecidos na forma linear ou enrolados na forma de bobinas e rolos. A característica comum a todos é a forma da seção transversal retangular, na qual a largura do produto é muito maior do que a sua espessura. A Figura 21 apresenta um fluxograma típico de uma usina siderúrgica integrada, onde é possível identificar os diversos tipos de produtos (longos e planos) e as respectivas linhas de produção necessárias à sua consecução.

Figura 21 – Fluxograma de produção de uma usina siderúrgica.



Fonte: Rizzo (2011).

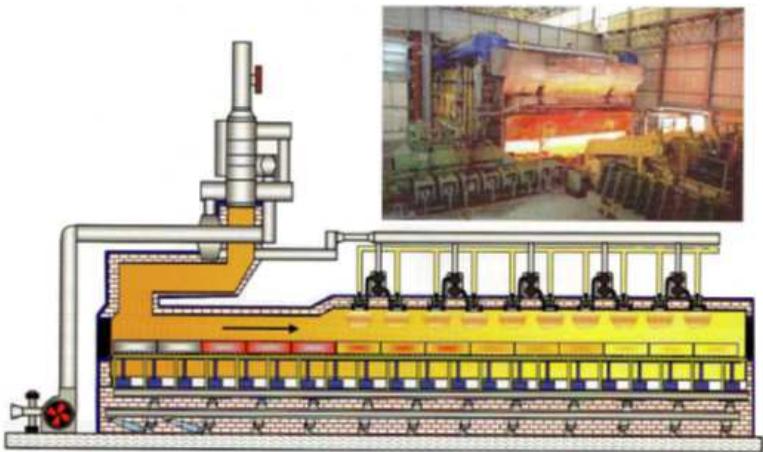
Dentre as etapas produtivas apresentadas, as mais importantes para a planicidade do produto laminado a frio (CRC) são contempladas a seguir e, serão abordadas em mais detalhes adiante. São elas:

- a) o aquecimento no forno de reaquecimento de placas
- b) a laminação a quente (LTQ)
- c) a laminação a frio (LTF)
- d) o recozimento (BA ou CAL)
- e) a laminação de encruamento (SPM)
- f) linhas posteriores, que compreendem inspeção e beneficiamento.

3.1 O FORNO DE REAQUECIMENTO

O forno de reaquecimento (Figura 22) é um equipamento cujo espaço de carga é encerrado por um forte isolamento térmico e compreende um conjunto de queimadores responsáveis pelo aquecimento e encharque das placas, além de sistemas auxiliares de tratamento de gases e movimentação das cargas. Sua função principal é elevar a temperatura dos produtos semi-acabados até a temperatura de austenitização, que tipicamente situa-se entre 1100-1350°C. Nesta situação o material possui ductilidade suficiente para permitir sua laminação de forma econômica até a seção desejada nos trens de produtos acabados (RIZZO, 2007). Para isto, as placas podem permanecer nos fornos por períodos de aproximadamente 3 a 4 horas.

Figura 22 – Forno de vigas caminhantes e imagem de uma unidade.



Fonte: Rizzo (2007).

Um dos principais problemas gerados durante o aquecimento de semi-acabados é a heterogeneidade de temperatura ao longo da espessura e/ou ao longo do comprimento, que pode causar o aumento da resistência à deformação (RIZZO, 2007). Este aquecimento inadequado é uma causa de ondulações de borda e central nas bobinas a quente (BQ). O aquecimento irregular pode criar tensões localizadas no esboço e prejudicar a fluidez do aço durante a laminação de desbaste que ocorre a seguir, caso a temperatura da placa não esteja completamente homogênea, e promover posteriormente a chamada planicidade latente, uma condição em que tensões internas estão distribuídas de forma irregular ao longo da largura da chapa, não sendo suficientes para formar ondulados. Porém, quando a chapa for cortada, estas tensões são liberadas causando ondulações na chapa (GINZBURG, 1989).

3.2 O LAMINADOR A QUENTE

O laminador a quente compreende um conjunto de cadeiras de laminação agrupadas por função: desbaste e acabamento. Trata-se de uma linha extensa, da proporção de centenas de metros, em que a placa semi-acabada e resplandecente sofre vários passes para redução da espessura. Segundo Rizzo (2011), os laminadores a quente são destinados à produção de chapas finas com espessuras que podem chegar entre 0,80 e 2,00 mm.

A placa é desbastada em passes de vai-e-vem até que esteja pronta para o passe final no trem acabador. Durante esta etapa o produto siderúrgico é chamado de esboço. O final da laminação a quente acontece no trem de laminação, ou trem acabador (Figura 23), um conjunto de 4 a 7 cadeiras de laminação montadas consecutivamente, responsáveis por dar as medidas finais à BQ. O passe no trem acabador é único e em seguida a bobina é resfriada com aplicação de jatos de água até a temperatura de bobinamento, situada aproximadamente entre 560 e 700°C.

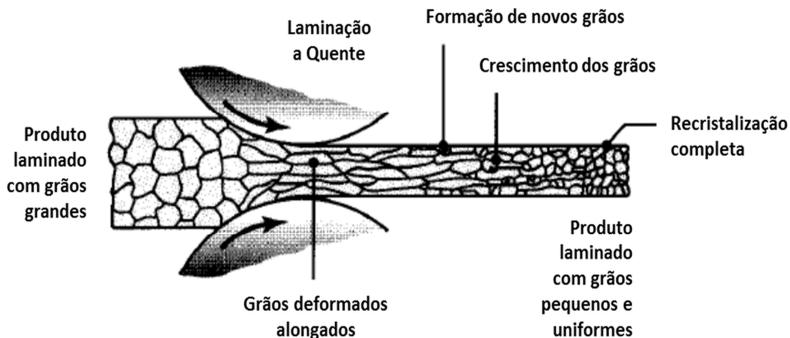
Figura 23 – Laminador a quente da ArcelorMittal/Nippon Steel Calvert.



Fonte: SMS-Group (2016).

Um efeito a registrar é a chamada *recristalização dinâmica*, pela qual o reticulado cristalino de um material laminado a quente, sendo encruado imediatamente, se rearranja formando novos grãos, que acabam coalescendo. O movimento dos grãos é favorecido pela elevada temperatura de processo, pois a *recristalização* é um comportamento ativado termicamente, e pelas altas taxas de deformação, que reduzem a temperatura de início da transformação (Figura 24) (OLIVEIRA, 2014).

Figura 24 – Recristalização dinâmica.



Fonte: Adaptado de Kalpakjian e Schmid (2009).

Rizzo (2011) destaca que a forma dos produtos laminados é de responsabilidade direta da laminação. O laminador a quente pode gerar defeitos de planicidade e forma, ondulados, empenos, desalinhamentos, dobra, amassados, entre outros. Para uma gama destes defeitos é possível aplicar uma correção. Nestes casos, a bobina a quente (BQ) defeituosa deve ser retrabalhada em uma linha de correção dotada de desempenadeira ou aplainadora.

Entre os parâmetros controlados nesta fase da produção estão a coroa e a cunha da chapa, medidas geradas por equipamentos medidores automáticos de perfil, os perfilômetros. Estas medidas são monitoradas de modo que se mantenham dentro dos limites de controle. Existem vários sistemas importantes para o controle da planicidade. Ginzburg (2009) aponta a coroa continuamente variável (CVC), cilindros de trabalho com coroamento simétrico, flexão, controle da tensão da tira pelo perfil, controle da coroa térmica dos cilindros de trabalho, retificação dos cilindros em linha, AWC e o sistema de inspeção de superfície. Nakajima et al. (1985) registraram os cilindros de encosto com tecnologia “pair-cross”, enquanto Fapiano (1981) cita a importância da retroalimentação da planicidade na malha de controle e as tensões entre cadeiras.

3.3 O LAMINADOR A FRIO

O laminador de tiras a frio (Figura 25) compreende um conjunto de 4 ou 5 cadeiras de laminação em sequência, as quais deformam sucessivamente a chapa de aço e reduzem a espessura da tira a taxas que atingem até 80% da espessura de entrada, atingindo valores inferiores a 0,40 mm com qualidade superficial e homogeneidade superiores à laminação a quente. A deformação a frio gera um acúmulo de energia no reticulado cristalino, e diz-se que o material encontra-se endurecido por deformação ou “full hard” (FH). Neste estado não há possibilidade da utilização direta do material, sendo necessárias etapas de beneficiamento posteriores para o pleno emprego do material.

Figura 25 – Laminador a frio de quatro cadeiras.



Fonte: SMS-DEMAG (2016).

Diferentemente da laminação a quente, na laminação a frio não ocorre recristalização dinâmica, pois a temperatura de processo é menor do que a temperatura de recristalização (HOSFORD; CADELL, 2007) e o material permanece fortemente deformado, como bobina FH. Segundo Padilha e Siciliano Jr. (2005), uma chapa de aço baixo carbono pode atingir 100°C durante a laminação a frio.

O controle da espessura e da planicidade é feito com o auxílio de instrumentos de medição online: medidores de espessura por raio-X e rolos medidores de planicidade tipo Shapemeter. Entre os atuadores que influenciam na forma do material laminado a frio estão os acionamentos de flexão, inclinação, CVC e refrigeração seletiva (FONSTEIN, 2011).

Kalpakjian e Schmid (2009) apontam que, devido a deformações não uniformes na abertura dos cilindros, podem se desenvolver tensões residuais nas chapas, especialmente durante a laminação a frio. A deformação plástica nestes casos é mais forte na superfície da chapa do que no restante da massa. Esta situação resulta em tensões compressivas na superfície e trativas no centro da tira.

Reed-Hill (1973) sugere que a deformação a frio acumula energia no material, na forma de defeitos cristalinos, cuja quantidade depende de fatores tais como taxa de deformação, composição do material, velocidade e temperatura da deformação.

3.4 O RECOZIMENTO EM CAIXA

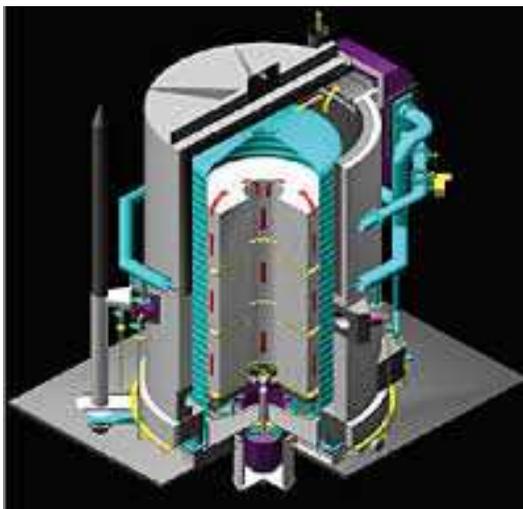
Segundo Ross (1988), existem diversas formas de recozimento, mas de forma geral pode ser estabelecido que “recozer” significa “amaciar”. As diferentes formas de recozimento são variações no processo de amaciamento, que cobrem o espectro de processamento, obtendo uma variedade de propósitos, todos os quais incluem a redução da dureza.

Smith e Hashemi (2012) sintetizam que a redução da ductilidade de um material deformado a frio é indesejável, e o amolecimento do mesmo é realizado em um forno aquecido a uma temperatura suficientemente elevada durante um considerável intervalo de tempo. A estrutura do material sofrerá uma série de alterações, chamadas de recuperação, recristalização e crescimento de grão.

O recozimento em caixa reestabelece a estrutura cristalina do metal ao seu estado original, aliviando as tensões residuais e promovendo a reorganização e crescimento dos grãos dentro do reticulado cristalino, por meio da reação entre defeitos puntiformes, aniquilação e rearranjo de discordâncias, formação de contornos de alto ângulo, absorção de defeitos puntiformes e discordâncias por contornos de alto ângulo em migração e redução da área total de contornos de grão. (PADILHA; SICILIANO Jr., 2005 apud HAESSNER, 1978).

O processo do recozimento em caixa consiste na formação de uma pilha de bobinas que passam por um ciclo de aquecimento, encharque e resfriamento controlados. Diz-se então que a bobina encontra-se em estado recozido. Na Figura 26 pode ser observada uma base de recozimento em corte e a Figura 27 apresenta uma planta de recozimento em caixa. Na Figura 28 pode ser observado o esboço típico de linhas de recozimento e encruamento da indústria nacional.

Figura 26 – Base de recozimento vista em corte.



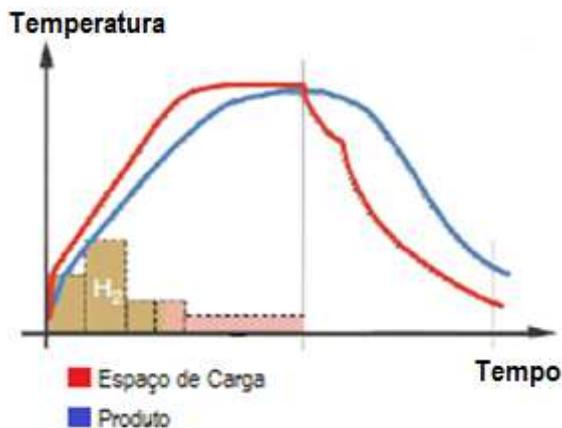
Fonte: Industrialheating (2003).

Figura 27 – Planta de recozimento em caixa.



Fonte: Ebner (2016).

Figura 28 – Diagrama típico de um ciclo de recozimento.



Fonte: Adaptado de Ebner (2016).

Um ciclo típico de recozimento em caixa compreende uma rampa de aquecimento até a temperatura de encharque, situada a aproximadamente 650-700°C, podendo conter ou não um patamar intermediário. Em seguida, ocorre a manutenção das temperaturas por um tempo suficiente para restaurar as propriedades do metal base e aliviar as tensões internas, e, por fim, o resfriamento controlado, geralmente composto por duas etapas: resfriamento com aplicação indireta de água e resfriamento por exaustão. O ciclo completo pode durar de 20 a 50 h. As etapas podem ser identificadas na Figura 28.

O recozimento contínuo (Figura 29) compreende um ciclo térmico semelhante, porém o tempo de ciclo é da ordem de minutos. As etapas de aquecimento, encharque e resfriamento acontecem com a chapa em movimento, a velocidades típicas da ordem de 100 a 200 m/min. Este movimento é produzido por rolos motorizados e enroladeiras, que tracionam a chapa. O efeito desta tração faz com que a chapa permaneça tensionada durante todo o processo, inclusive dentro do forno de recozimento. A aplicação de alta temperatura combinada com uma leve tensão trativa favorece a dissipação da energia acumulada no trabalho a frio, eliminando eventuais ondulações residuais presentes na chapa BF (GARCIA, SPIM e DOS SANTOS, 2000).

Figura 29 – Linha de recozimento contínuo.

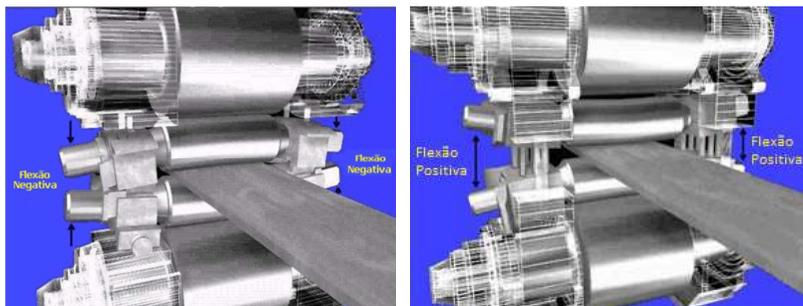


Fonte: Danieli (2016).

3.5 LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO

Uma linha de encruamento consiste de uma ou duas cadeiras de laminação, que efetuam correções e ajustes na forma e planicidade do material através dos atuadores de flexão e inclinação, além da aplicação de alongamento por compressão em chapa tensionada e em movimento. Este equipamento pode atingir velocidades da ordem de 1000 m/min. Como as demais cadeiras de laminação, o encruamento tem a capacidade de corrigir ou causar defeitos na planicidade da chapa. A Figura 30 ilustra uma cadeira de laminação com atuação de bending positivo e negativo.

Figura 30 – Imagens da aplicação de flexão (+) e (-) na laminação de chapa plana.



Fonte: SMS-GROUP (2016).

O laminador de encruamento (Figura 31) integra o processo de fabricação de chapas planas, situado logo após o recozimento, quer seja contínuo ou em caixa, acoplado ou não. No entanto, linhas de encruamento off-line podem ser linhas independentes utilizadas de forma flexível em vários estágios do processo (SIEMAG, 2016).

Figura 31 – Laminador de Encruamento da ArcelorMittal Vega.



Fonte: Autor (2016).

Ross (1988) define o encruamento como uma operação final de laminação de chapas de aço utilizada para produzir o acabamento final da superfície e simultaneamente obter propriedades mecânicas levemente melhoradas. Uma das principais funções desta linha de produção é a correção dos desvios de planicidade e ajuste do perfil da chapa (THEIS e HAZEN, 2009).

Para Rizzo (2011) uma linha de encruamento executa a melhoria da planicidade através da diminuição da intensidade das ondulações e com aplicação de baixo valor de redução de espessura, da ordem de 0,5 a 2,0%.

3.6 A LINHA DE INSPEÇÃO

A qualidade do produto é um dos aspectos mais críticos da manufatura, pois influencia diretamente a satisfação do cliente. O conceito de “a qualidade ser construída no produto ao longo de toda a fabricação, desde o projeto até a montagem final” tem substituído a inspeção final após a fabricação completa dos produtos (KALPAKJIAN e SCHMID, 2009). Este conceito é inquestionável, no entanto, em plantas siderúrgicas, onde o produto final são unidades de metal de várias toneladas de massa, cada qual gerando milhares de peças e componentes em linhas de fabricação e montagem, a inspeção que precede a expedição da bobina representa uma garantia adicional de qualidade (Figura 32).

A linha de inspeção em uma planta siderúrgica é onde se determina o estado final da qualidade de um produto, e dispõe de equipamentos específicos para medição e avaliação da qualidade. Além dos aspectos tecnológicos, a linha de inspeção funciona em baixa velocidade e o seu funcionamento pode ser interrompido, o que permite a plena aplicação dos recursos tecnológicos disponíveis bem como a máxima sensibilidade na avaliação dos requisitos do cliente. No caso do requisito de planicidade, permite a inspeção com a chapa parada e sem tensão – a melhor condição possível para esta avaliação.

Figura 32 – Mesa de inspeção de uma linha de inspeção.



Fonte: Autor (2016).

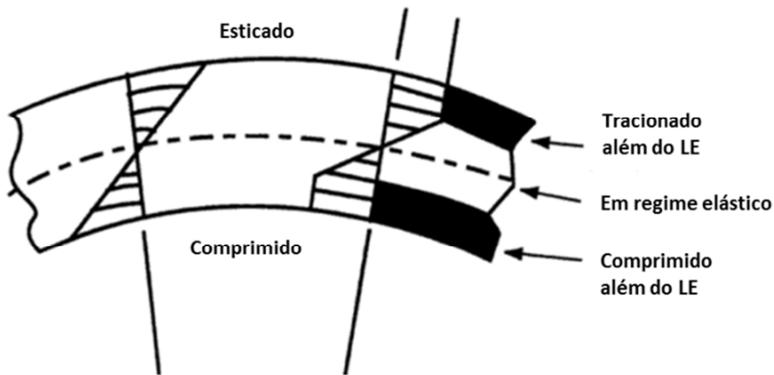
3.7 SLITTER, TESOURAS DE BORDA, APLAINADORA E REBOBINADEIRA

Segundo Theis (1999), os produtos planos de metal laminado iniciam como bobinas, e se faz necessário aparar a bobina na largura exata (slitter), cortar na medida do comprimento (blank) e aplainar antes das operações de fabricação e montagem subsequentes. Estas etapas de fabricação das peças que serão transformados em produtos da linha branca são realizadas nas linhas de beneficiamento.

Parte destas operações requerem o desbobinamento da bobina mãe e o rebobinamento da bobina filha (exceto o corte no comprimento, quando os blanks já estão prontos). Segundo Theis (1999), os processos de bobinamento e desbobinamento podem gerar tensões residuais. Por conseguinte, quanto mais se desenrola e reenrola a bobina, maior a possibilidade de se acumularem tensões internas no material, devido ao efeito dos sucessivos esforços de tensão e compressão aplicados às fibras

do material (Figura 33). Theis (2002) aponta que qualquer rolo do sistema, tais como rolos apoiadores, rolos da slitter, aplainadores, niveladores e, é claro, rolos alimentadores, que podem fletir ou que estão mal alinhados, podem produzir ondulações de bordas ou desalinhamento. Estes rolos podem aplicar uma pressão irregular em parte do material e danificar a forma da bobina durante o processo.

Figura 33 – Comprimento desigual das fibras internas e externas da chapa.



Fonte: Theis, 1999.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem por objetivo apresentar as etapas compreendidas no estudo e no experimento, que foram separadas em três etapas principais:

- a) A simulação da deformação da chapa em instabilidade plástica,
- b) O experimento realizado em linha de produção,
- c) Ensaio de laboratório: tração e metalografia.

4.1 SELEÇÃO DO MATERIAL

O material selecionado para os testes foi especificado para a fabricação das laterais de refrigeradores, que são os mais longos painéis que empregam aço com requisito de planicidade restrita atualmente em produção na ArcelorMittal Vega. O grau de aço escolhido foi um aço ABNT NBR 5915-5 cuja composição química é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição da liga do material de teste.

Elemento	Min (%)	Max(%)
Al	0,0100	0,0800
C	0,0020	0,0600
Mn	0,7500	0,9000
N	0,0000	0,0050
Nb	0,0000	0,0030
P	0,0600	0,0800
S	0,0000	0,0150
Si	0,0800	0,1200
Ti	0,0350	0,0550

Fonte: Laboratório ArcelorMittal (2016).

4.2 ESTUDO DA DEFORMAÇÃO EM INSTABILIDADE PLÁSTICA

A partir dos fundamentos de laminação foi desenvolvido um estudo da deformação em instabilidade plástica, uma teoria que relaciona a dependência entre a planicidade da chapa e as deformações limite em um processo de laminação de chapas finas. O desenvolvimento está apresentado no Capítulo 5 - Resultados. Para a realização do estudo da deformação em instabilidade plástica - cálculos e geração dos gráficos, foi empregado o software Excell do Microsoft Office versão 2010.

4.3 EXPERIMENTO REALIZADO EM LINHA DE PRODUÇÃO

Os testes planejados e aplicados na linha de produção tiveram por objetivo avaliar a qualidade da chapa de aço laminada a frio e recozida em caixa, concentradas nos atributos de planicidade, através de medições das ondulações presentes no material. O processo produtivo apontou a correção das ondulações localizadas como um alvo significativo a ser atingido, devido à dificuldade envolvendo a sua correção mediante a aplicação dos procedimentos disponíveis originalmente na linha de produção.

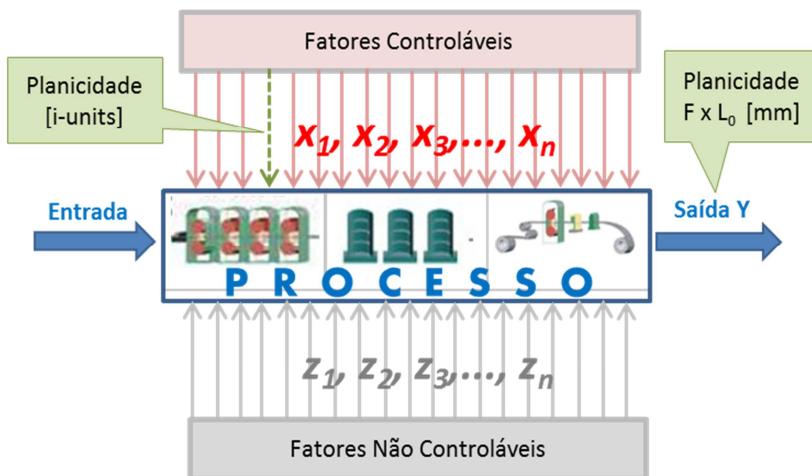
A proposta da elaboração deste experimento nasceu a partir de uma observação: ondulações localizadas não podiam ser corrigidas, porém ondulações centrais e de bordas sim, pois os laminadores dispunham de comandos e acionamentos para ajuste da planicidade nestas regiões da chapa, porém não naquela.

O experimento foi então concebido: eliminar as ondulações localizadas na chapa laminada a frio pela sobreposição de uma ondulação central controlada inserida durante a laminação a frio (fase TCM) e corrigida posteriormente no encruamento (fase SPM).

A proposta deste experimento compreendeu a manutenção da rota original de produção e dos parâmetros de processo nas linhas, exceto um fator: a planicidade na saída do laminador, que corresponde à inserção da ondulação localizada. Foi definido o nível visado para este parâmetro e definido um lote de produção experimental e o método de medição na saída do processo com a aplicação de uma instrução especial para a

tarefa. Na fase de planejamento os parâmetros significativos para a planicidade foram identificados, monitorados e mantidos, de modo a não interferirem nos resultados do experimento. O lote de produção histórico, referência para a comparação, foi obtido segundo os mesmos critérios. O diagrama experimental foi então definido conforme a Figura 34.

Figura 34 – Diagrama do experimento proposto.



Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2012).

O lote experimental foi definido como sendo de 10 bobinas, perfazendo aproximadamente 250 t de material. Considerando que cada bobina fornece 9 medidas de flecha e corda, tem-se ao final deste lote de produção 90 medidas que compõem o lote de dados experimentais. O lote experimental não foi produzido em sequência, mas ao longo de algumas campanhas, de forma aleatória. O lote de produção histórico foi composto por bobinas produzidas em condições similares de processo, porém com a planicidade inicial de costume, e evidentemente, contendo picos de ondulação localizada.

Neste experimento, o fator de entrada é a planicidade da bobina dada em i-units obtida a partir do rolo Shapemeter do TCM, enquanto a saída é a planicidade medida em (mm) dada pela flecha e comprimento de onda, medida sobre a mesa da

linha de inspeção. Foram realizadas análises em separado para a flecha e o comprimento de onda. Os níveis do fator de planicidade foram estabelecidos empiricamente conforme a Tabela 4. Para a avaliação dos resultados do experimento e comparação com o lote histórico, foi utilizado um programa de cálculo estatístico, sendo para tanto adotado o software Minitab versão 16.

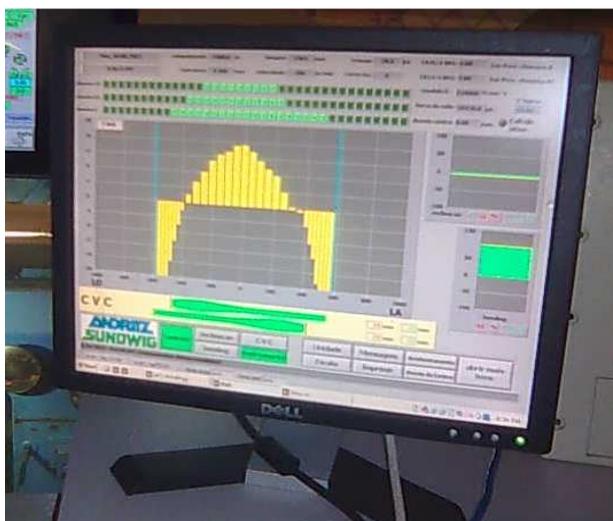
Tabela 4 – Níveis do fator de entrada no experimento.

Média histórica (i-units)	Experimento (i-units)
≤ 15	≥ 30

Fonte: Base de dados do N2 do TCM / ArcelorMittal (2016).

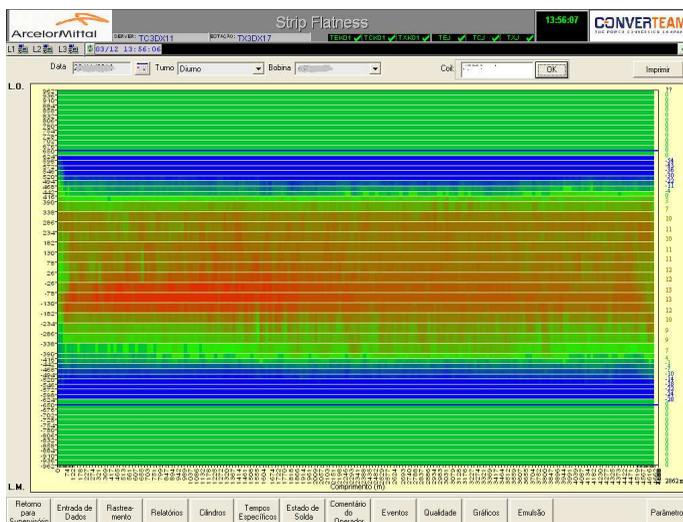
A questão central avaliada com base nos dados experimentais coletados foi o efeito da inserção de uma deficiência de planicidade controlada sobre a planicidade final do produto acabado CRC. Considerando que a ondulação central seja severa o suficiente para cobrir todos os picos de ondulação intermediária existentes na chapa, avaliar a hipótese de que esta técnica, sendo efetiva na eliminação dos ondulados localizados, melhora a planicidade final da chapa. Assim pretende-se comparar estes dois lotes de dados provenientes das duas populações independentes. Os lotes de dados experimental e histórico foram comparados por meio de inferência estatística: a diferença entre as médias. O perfil visual da ondulação controlada inserida na chapa é apresentado na Figura 35 enquanto a sua carta de planicidade pode ser observada na Figura 36.

Figura 35 – Perfil da chapa com forte ondulação central.



Fonte: Autor (2016).

Figura 36 – Carta de planicidade de uma bobina com forte ondulação central.



Fonte: Autor (2016).

Para todo o trabalho estatístico será adotado o intervalo de confiança (IC) de 95%, assim: $\alpha=1-(IC)=0,05$. Para o teste da diferença das médias no material laminado a frio serão adotadas as seguintes hipóteses:

1) Parâmetro de interesse: diferença na média das planicidades (i-units) no TCM

1a) Hipóteses:

Hipótese nula: $H_0: \mu_{\text{hist}} - \mu_{\text{exp}} = \Delta$

Hipótese alternativa: $H_1: \mu_{\text{hist}} - \mu_{\text{exp}} \neq \Delta$

1b) Estatística do teste:

$$z_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - \Delta}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}\right)}}$$

onde (μ_{hist}) e (μ_{exp}) são a média do lote de dados histórico e experimental, (z_0) é a variável aleatória normal padrão, (\bar{x}_n) representa a média da amostra aleatória, (σ) a variância da planicidade TCM, (n_n) o número de medidas e $\Delta=15-30= -15$ (valores da tabela 4).

2) Parâmetro de interesse: diferença na média da flecha (mm) na linha de inspeção:

2a) Hipóteses:

Hipótese nula: $H_0: \mu_{\text{hist}} - \mu_{\text{exp}} = \Delta$

Hipótese alternativa: $H_1: \mu_{\text{hist}} - \mu_{\text{exp}} > \Delta$

3) Parâmetro de interesse: diferença na média do comprimento de onda (mm) na linha de inspeção:

3a) Hipóteses:

Hipótese nula: $H_0: \mu_{\text{hist}} - \mu_{\text{exp}} = \Delta$

Hipótese alternativa: $H_1: \mu_{\text{hist}} - \mu_{\text{exp}} < \Delta$

2b e 3b) Estatística do teste:

$$z_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - \Delta}{\sqrt{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)}}$$

onde (μ_{hist}) e (μ_{exp}) são a média do lote de dados histórico e experimental, (z_0) é a variável aleatória normal padrão, (\bar{x}_n) representa a média das amostras, (s_n) a variância das amostras e (n_n) o número de medidas das populações, que devem ser maiores do que 40 para que este teste de amostras grandes seja válido (MONTGOMERY; RUNGER, 2012). Para estes casos $\Delta=0$.

4.4 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

A avaliação das propriedades mecânicas do aço foi realizada pelo laboratório metalúrgico da empresa ArcelorMittal Vega, situado em São Francisco do Sul - SC. Estes ensaios foram executados com o propósito de avaliar possíveis alterações no material entre as regiões plana e ondulada, uma vez que na região ondulada ocorre uma maior deformação a frio. Esta deformação adicional poderia alterar as propriedades mecânicas e o reticulado cristalino do material. De acordo com Raghavan e Garrison Jr. (2010), quando a espessura é reduzida por laminação a frio, a resistência do material aumenta, o alongamento sob tensão diminui, assim como o limite de deformação.

Propriedades tais como expoente de encruamento, coeficiente de anisotropia, dureza e outras, a despeito do interesse oportuno ao presente trabalho, não faziam parte da especificação do cliente ou não se dispunha de dados completos para possibilitar a realização de uma análise. Portanto foram selecionadas propriedades mecânicas especificadas pelo cliente para esta avaliação, a saber, tensão de escoamento (LE) e tensão limite de resistência à tração (LR).

Amostras do material, sendo algumas peças com ondulação e outras sem ondulação, foram retiradas na linha de inspeção e enviadas ao laboratório para realização de ensaios de tração e metalografia.

Para o ensaio de tração foram retirados corpos de prova (CDP) (Figura 37) em triplicada de duas regiões: com ondulação e sem ondulação, em duas direções: no sentido da laminação (0°) e na transversal (90°), perfazendo assim 12 CDP, os quais foram preparados segundo a norma ABNT NBR 6673. As peças foram cortadas em uma guilhotina mecânica Sorg (Figura 38), sendo os CDP confeccionados em uma fresadora CNC Travis modelo M800 (Figura 39) e ensaiados em uma máquina de tração Instron modelo 5585 (Figura 40).

Figura 37 – Corpo de prova pronto para ensaio de tração.



Fonte: Autor (2016).

Figura 38 – Guilhotina para corte das peças.



Fonte: Autor (2016).

Figura 39 – Centro de usinagem.



Fonte: Autor (2016).

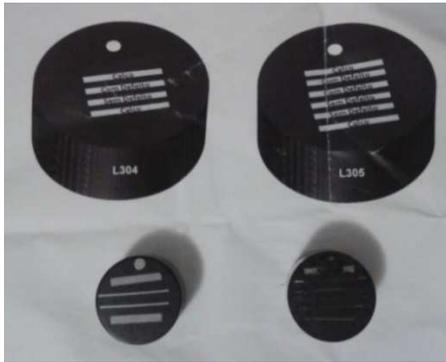
Figura 40 – Máquina de Tração Instron modelo 5585.



Fonte: Autor (2016).

As peças para os ensaios de metalografia (Figura 41) foram preparadas e identificadas segundo o procedimento laboratorial da ArcelorMittal Vega, que compreendeu a seleção e corte das seções em regiões adjacentes aos CDP dos ensaios de tração, a limpeza em lavadora ultrassônica e o embutimento, além das etapas principais de preparação. O seccionamento das amostras, a montagem, o lixamento, o polimento e a gravação são as cinco principais etapas da preparação de CDP's para metalografia (ASM, 1985). Para a observação da espessura da chapa, as amostras foram embutidas a quente em resina de pó de baquelite de acordo com os parâmetros indicados na Tabela 5.

Figura 41 – Peças embutidas para o ensaio metalográfico.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 5 – Parâmetros para o embutimento a quente.

Temperatura (°C)	Tempo de Aquecimento (min)	Tempo de Resfriamento (min)	Pressão de Embutimento (Bar)
150 ou 180	10 – 15	2 - 8	170 - 200

Fonte: ArcelorMittal Vega (2016)

Posteriormente as peças embutidas foram lixadas e polidas empregando lixas de granulometria nº 120, 320, 800, 1200 até 1500, sucessivamente em ordem crescente de número. O processo de polimento foi dividido em dois passos: polimento áspero e refinado. No polimento áspero foi aplicada pasta de diamante na faixa entre 3 e 6 μm e no polimento refinado foi aplicada pasta de diamante na faixa de 0,5 a 1 μm .

A análise do tamanho médio dos grãos foi realizada de forma aleatória, em áreas afastadas das bordas e com aumento de 100x, 200x e 500x (ampliação que permita a perfeita visualização dos grãos durante a medição), conforme a norma ASTM E-112, em região correspondente à espessura da chapa, perpendicular ao sentido de laminação. Em seguida as amostras foram atacadas quimicamente com solução Marshall's para revelar o contorno dos grãos. Na avaliação e classificação do tamanho médio dos grãos foi empregado um microscópio óptico Zeiss (Figura 42).

Figura 42 – Microscópio para análise metalográfica.



Fonte: Autor (2016).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do experimento e das análises serão apresentados seguindo a mesma ordem adotada anteriormente, adicionado de um tópico dedicado aos resultados obtidos na linha de produção do cliente. Cada tópico inclui uma discussão dos resultados imediatos.

- a) A simulação da deformação da chapa em instabilidade plástica;
- b) O experimento realizado em linha de produção;
- c) Ensaio de laboratório: tração e metalografia;
- d) Aplicação das chapas de aço no cliente.

5.1 DEFORMAÇÃO EM INSTABILIDADE PLÁSTICA

Este tópico é dedicado a examinar a influência de uma deficiência de planicidade, representada pela existência de ondulação, na instabilidade plástica em um processo de laminação a frio de uma chapa fina de aço. A perda da estabilidade de uma chapa fina sob tensão biaxial é um importante tema na área de conformação de chapas e as teorias clássicas de instabilidade plástica não levam em consideração imperfeições geométricas e microestruturais (AL-QURESHI; KLEIN; FREDEL, 2005). A análise é realizada a partir de um modelo não linear, senoidal modificado de variação da espessura e o limite de deformação calculado com base na teoria de Swift (1952) para materiais isotrópicos e anisotrópicos.

Reescrevendo a equação de conservação do volume – Equação (1) – temos que:

$$\frac{h_0}{h_1} = \frac{L_1}{L_0} \quad (35)$$

Considerando $\Delta L = L_1 - L_0$, e substituindo as Equações (13) e (35) temos:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \left(\frac{\pi F}{2 L_0} \right)^2 = \frac{L_1}{L_0} - 1 = \frac{h_0}{h_1} - 1 \quad (36)$$

onde L_0 =comprimento de onda, F =flecha, h = espessura, h_0 =inicial e h_1 =final.

Rearranjando a Equação 36, a partir da qual consideramos duas situações: (a) ausência de ondulação e (b) existência de ondulação:

$$h = \frac{h_0}{1 + \left(\frac{\pi F}{2 L_0}\right)^2} = h_0 \quad (37a)$$

$$h_B = \frac{h_0}{1 + \left(\frac{\pi F}{2 L_0}\right)^2} \quad (37b)$$

A Equação (37a) define a espessura (h) em um ponto qualquer da chapa. Caso não existam ondulações na chapa, então (h) se iguala à espessura nominal (h_0). No entanto, caso ocorram ondulações em uma determinada região, consideramos a Equação (37b) e a espessura (h) assume o índice (B). Neste caso, a condição ($h_B < h_0$) deve ser satisfeita. Quanto menor for o segundo termo do denominador da Equação (37b), melhor é a planicidade da chapa e menor é a variação da espessura, isto é, quanto menor é a flecha e/ou quanto maior o comprimento de onda, menor é a ondulação visível e menor é a deformação da mesma. Sendo que usualmente $F \ll L_0$.

Para estabelecer o efeito da deficiência de planicidade na instabilidade plástica, o material é assumido como sendo inicialmente isotrópico e obedecendo a lei do endurecimento no trabalho a frio. A relação entre tensão e deformação no regime plástico pode ser expressa a partir do modelo modificado de Ludwik, dado na Equação (38) (AL-QURESHI; KLEIN; FREDEL, 2005).

$$\bar{\sigma} = C (\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \quad (38)$$

onde $\bar{\sigma}$ é a tensão efetiva, $\bar{\varepsilon}$ é a deformação efetiva, ε_0 é a deformação a frio e C é uma constante de resistência do material.

Para um estado plano de tensões, as expressões de Von Mises e Levy-Mises para material isotrópico tornam-se, respectivamente, as Equações (24) e (26) (capítulo 2.8):

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 (1 - x + x^2)^{1/2} \quad (24)$$

$$\frac{d\varepsilon_1}{2-x} = \frac{d\varepsilon_2}{2x-1} = -\frac{d\varepsilon_3}{1+x} = \frac{d\bar{\varepsilon}}{2(1-x+x^2)^{1/2}} \quad (26)$$

Para obter a relação entre a deformação verdadeira e a deformação em uma direção, integramos a Equação (26):

$$\varepsilon_3 = -\frac{(1+x)\bar{\varepsilon}}{2(1-x+x^2)^{1/2}} \quad (39)$$

relembrando que x é a razão entre as tensões principais ($x=\sigma_2/\sigma_1$), a qual é assumida como constante ao longo do processo de conformação.

A deformação da espessura é dada pela Equação (12):

$$\varepsilon_3 = \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) \quad (12)$$

$$h_0 = h \exp(\varepsilon_3)$$

ou também:

$$h = h_0 / \exp(\varepsilon_3) \quad (40)$$

onde h_0 e h são as espessuras inicial e instantânea.

Substituindo a Equação (39) em (40), então a espessura instantânea pode ser expressa como:

$$h = h_0 / \exp\left[-\frac{(1+x)\bar{\varepsilon}}{2(1-x+x^2)^{1/2}}\right] \quad (41)$$

Como não há termo relacionado à planicidade, a Equação (41) aplica-se exclusivamente ao material plano. Para analisar o efeito da deficiência de planicidade na deformação em instabilidade é necessário inserirmos os termos de comprimento de onda e flecha na equação

A subtangente em instabilidade plástica para material isotrópico e anisotrópico é calculada a partir das Equações (33) e (34), respectivamente:

$$Z_d = \frac{4(1-X+X^2)^{3/2}}{(1+X)(4-7X+4X^2)} \quad (33)$$

$$Z_d = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(r_0 r_{90} + r_0 + r_{90})^{1/2} \{r_0 r_{90} + r_{90} - 2r_0 r_{90} X + (r_0 r_{90} + r_0) X^2\}^{3/2}}{\{(r_0 r_{90} + r_{90} - r_0 r_{90} X)^2 + [(r_0 r_{90} + r_0) X - r_0 r_{90}]^2 X\}}} \quad (34)$$

O limite da deformação equivalente em instabilidade plástica pode ser avaliado da seguinte equação (AL-QURESHI; KLEIN; FREDEL, 2005):

$$\bar{\varepsilon}_d = nZ_d \quad (42)$$

A razão das tensões principais (X) é constante em ambas as regiões da chapa fina, onde o índice (B) indica a região com ondulação, então:

$$x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = x_B = \frac{\sigma_{2B}}{\sigma_{1B}} \quad (43)$$

Usando as Equações (33) e (42), temos a expressão final para a deformação efetiva na região plana da chapa:

$$\bar{\varepsilon}_d = \frac{4n(1-X+X^2)^{3/2}}{(1+X)(4-7X+4X^2)} \quad (44)$$

Em uma chapa com incidência de ondulação, a Equação (30) pode ser modificada para a seguinte expressão, onde (B) indica a porção ondulada da chapa:

$$\bar{\sigma} = \sigma_1(1 - x + x^2)^{1/2} \quad (45a)$$

$$\bar{\sigma}_B = \sigma_{1B}(1 - x_B + x_B^2)^{1/2} = \sigma_{1B}(1 - x + x^2)^{1/2} \quad (45b)$$

As forças de equilíbrio por unidade de largura nas direções principais da porção ondulada da chapa são dadas por:

$$\sigma_1 h = \sigma_{1B} h_B \quad (46)$$

$$\sigma_2 h = \sigma_{2B} h_B$$

Dividindo as Equações (45a) e (45b), e considerando a equação (46), obtemos um parâmetro f que corresponde à razão entre as espessuras da porção ondulada e da porção plana (h_B/h):

$$\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_B} = \frac{\sigma_1}{\sigma_{1B}} = \frac{h_B}{h} = f \quad (47)$$

$$\bar{\sigma} = f \bar{\sigma}_B \quad (48)$$

A Equação (38) pode ser reescrita para as regiões plana e ondulada da chapa, como segue:

$$\bar{\sigma} = C(\bar{\varepsilon})^n \quad (38a)$$

$$\bar{\sigma}_B = C(\bar{\varepsilon}_d)^n \quad (38b)$$

$$\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_B} = \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_d} \right)^n = f \quad (49)$$

$$\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_d} = f^{1/n} \quad (50)$$

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_d f^{1/n} \quad (51)$$

O parâmetro f_i representa a razão de espessuras em instabilidade plástica, e pode ser derivado da Equação (37b):

$$f_i = \frac{h_B}{h_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi F}{2L_0} \right)^2} \quad (52)$$

Reconfigurando as Equações (42) e (51) temos a deformação efetiva em instabilidade plástica:

$$\bar{\varepsilon}_l = n Z_d f_i^{\frac{1}{n}} \quad (53)$$

$$\bar{\varepsilon}_l = \frac{4n(1-X+X^2)^{3/2}}{(1+X)(4-7X+4X^2)} \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi F}{2L_0} \right)^2} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (54)$$

A Equação (54) representa a deformação efetiva na instabilidade considerando o efeito da planicidade de uma chapa de material isotrópico. Quando a planicidade é negligenciada durante os cálculos, então o segundo termo da equação iguala-se à unidade e a equação se reduz à expressão de deformação em instabilidade para chapas de metal isentas de deficiências de planicidade (Equação 44). A Equação (55) pode ser empregada considerando a chapa de material anisotrópico.

$$\bar{\varepsilon}_i = n \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(r_0 r_{90} + r_0 + r_{90})^{1/2} \{r_0 r_{90} + r_{90} - 2r_0 r_{90} X + (r_0 r_{90} + r_0) X^2\}^{3/2}}{\{(r_0 r_{90} + r_{90} - r_0 r_{90} X)^2 + [(r_0 r_{90} + r_0) X - r_0 r_{90}]^2 X\}}} \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi F}{2L_0}\right)^2} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (55)$$

Nesta equação, (n) representa o coeficiente de encruamento, (X) representa a razão entre tensões principais, (F) e (L_0) indicam respectivamente a flecha e a corda da ondulação, e (r_0) e (r_{90}) são os coeficientes de anisotropia para as direções longitudinal e perpendicular ao sentido de laminação da chapa. Note-se que quando estes termos se igualam, temos novamente a equação (54), e, à medida que os valores destes termos se distanciam ($r_{90} > r_0$), mantidas as demais condições, a deformação efetiva diminui.

Medidas de planicidade podem variar significativamente. Para a análise dos resultados da deformação em instabilidade plástica foram selecionados dados reais da prática operacional e alguns dados hipotéticos, extremamente elevados, que complementam a Tabela 6, de modo a se ter uma visão mais ampla do espectro das ondulações. Desta forma, a Tabela 6 e as análises posteriores oferecem uma visão mais clara da relação entre uma determinada ondulação e os seus efeitos. Todos estes valores apontados foram reunidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Simulação de dados para a construção das Figuras 42 a 44.

Flecha (F) [mm]	Corda (L_0) [mm]	Fator de Forma (F/L_0)	Planicidade (i-units)
0	1000	0	0
1,5	600	0,0025	2
4	550	0,0073	13
6	500	0,012	36
7	400	0,018	76
10	300	0,033	274
20	200	0,10	2467
30	150	0,20	9870

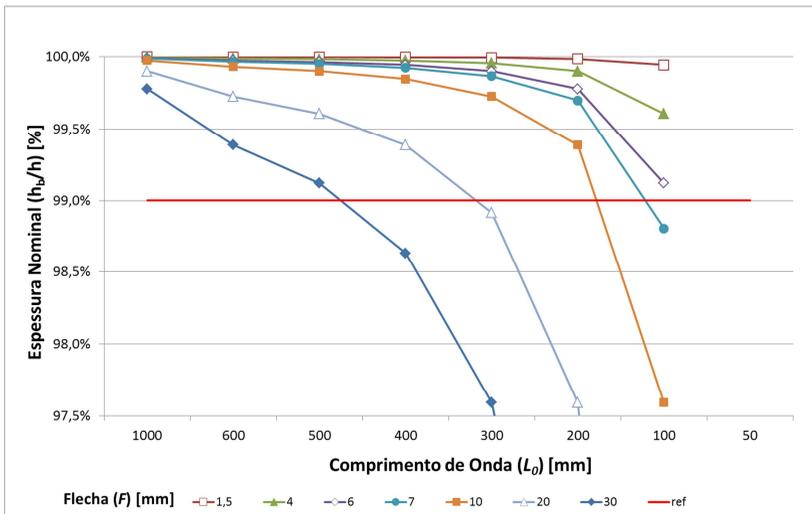
Fonte: Autor (2016).

Os dados de flecha=0 e corda=1000 mm representam a inexistência de ondulação, a situação ideal que é encontrada com frequência em situações práticas. A dimensão de 1000 mm foi adotada devido a limitação do instrumento de medição. Medidas de F entre 1-8 mm e L_0 entre 400-990 mm aparecem com alguma frequência na prática, ao passo que medidas de $F > 10$ mm e $L_0 < 300$ mm são raras. As flechas > 20 mm e cordas < 200 mm foram adicionadas a propósito.

A Figura 43 foi elaborada a partir da Equação (37b) onde as curvas representam a variação da espessura de uma chapa de aço com ondulações, quando estas variam de acordo com os dados apresentados na Tabela 6. No eixo da abscissa constam os comprimentos de onda, do maior ao menor. Cada linha traçada representa uma flecha fixa. A linha fixa em 99% representa o limite inferior de tolerância da espessura do produto. Abaixo deste limite a bobina seria desqualificada por não atender ao requisito de espessura, independente da especificação de planicidade. Nota-se que, quanto maior a flecha, mais facilmente se atinge o limite de tolerância da espessura: uma chapa ondulada com flecha de 7 mm seria desclassificada somente se o comprimento de onda fosse de 100

mm, bastante severo e pouco usual. Já uma ondulação com flecha de 30 mm seria desclassificada até mesmo com comprimentos de onda da ordem de 500 mm, uma medida que não é incomum. Os outros valores merecem atenção, mas podemos considerar que quanto menor a flecha, mais distante fica a possibilidade de a bobina ser recusada por falta de espessura. Para as medidas de flecha e corda mais frequentes, a espessura situa-se confortavelmente dentro dos limites de especificação, o que não significa que a chapa atenda ao requisito de planicidade restrita.

Figura 43 – Espessura da chapa em função da flecha e corda da ondulação.

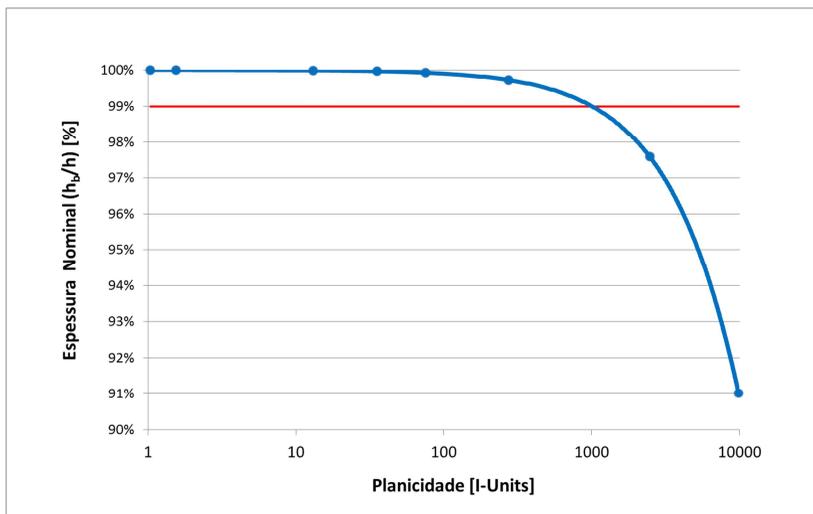


Fonte: Autor (2016).

A Figura 44 foi preparada a partir da Equação (37b) e relaciona a espessura com a planicidade dada em (i-units) proveniente dos fatores de forma (F/L_0) presentes na Tabela 6. O limite de espessura de 99% da espessura nominal foi mantido. A medida da espessura é adimensional e independente da espessura nominal, aplicando-se a qualquer espessura de entrada. Os dados da curva estão correlacionados ao experimento prático realizado, conforme apontado na Tabela 4.

A planicidade até 15 i-units é frequente durante a laminação a frio, considerada referencial para a aprovação do material naquela fase da produção, podendo ser fidedignamente representada pela Figura 17. Uma planicidade acima de 30 i-units é considerada inadequada para uma grande gama de aplicações, incluindo as aplicações de planicidade restrita.

Figura 44 – Espessura da chapa em função da planicidade.

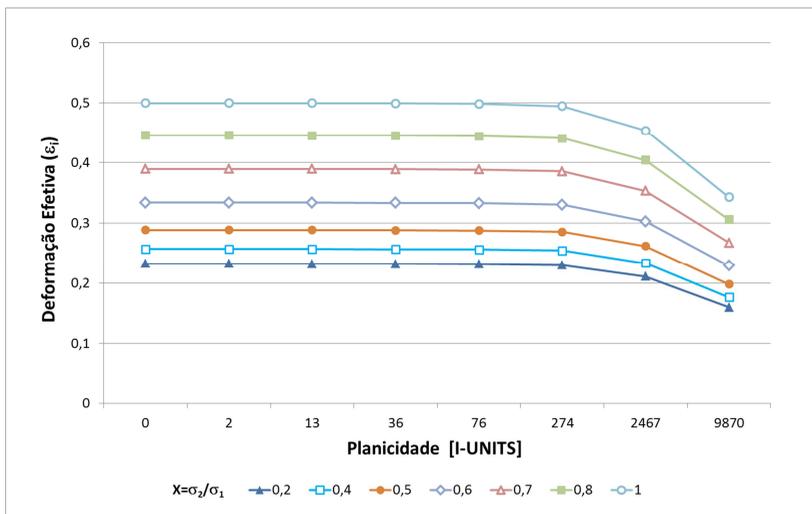


Fonte: Autor (2016).

Podemos observar na Figura 44 que a curva intercepta a linha do limite inferior de especificação aproximadamente no ponto de 1000 i-units, correspondente a um fator de forma de cerca de 0,065, o qual por sua vez pode estar relacionado a uma flecha entre 12-15 mm e um comprimento de onda de 200-235 mm. Estas medidas são significativamente ruins, porém raramente são encontradas na prática. Uma chapa com planicidade tão degradada não seria capaz de atender a nenhum requisito de forma, e considera-se que apenas uma anomalia de processo possa levar a um resultado desta ordem. As medidas de planicidade costumeiramente obtidas na linha de produção mantém a espessura da chapa confortavelmente distante do limite de desclassificação.

A Figura 45 foi obtida a partir da Equação (54) com os dados de planicidade em i-units e os fatores de forma da Tabela 6. Para a elaboração da Figura 45, a chapa foi considerada de material isotrópico e o coeficiente de encruamento igual a 0,25, um valor típico para aços de média resistência e qualidade estrutural (CHIAVERINI, 2012) e que concorda com a prática da produção. As curvas foram traçadas para diversos valores do fator de tensões principais (X), variando entre 0,2 e 1,0 – condições que representam a tensão (σ_2) variando entre 20% a 100% da tensão na direção principal (σ_1). O exame das curvas indica a influência da planicidade na deformação verdadeira em instabilidade plástica na região mais fina da chapa, e nas condições de empescoçamento da chapa sendo laminada.

Figura 45 – Deformação efetiva em função da planicidade, para valores de $X=\sigma_2/\sigma_1$, e considerando material isotrópico e $n=0,25$.



Fonte: Autor (2016).

Analisando a Figura 45, pode-se observar que o comportamento das curvas permanece linear até uma planicidade próxima a 274 i-units, porém o resultado é parcialmente influenciado pelos pontos selecionados e pela escala do eixo. Em um gráfico de dispersão seria observado que

as curvas apresentam comportamento linear até 8000-9000 i-units, para um intervalo do coeficiente de encruamento entre 0,1-0,4. Após este ponto ocorre uma queda gradual. O resultado indica principalmente que, nos níveis de planicidade histórico e experimental, a variação da deformação é imperceptível. A condição de empescoçamento em função da planicidade ocorre adiante, em níveis de planicidade praticamente inatingíveis em condições normais. É possível que para uma condição de ondulação severa, com planicidade a partir de 15000 i-units, o empescoçamento preceda um arrentamento de tira. Porém esta condição não foi comprovada na prática.

5.2 EXPERIMENTO COMPREENDENDO INSERÇÃO DE ONDULAÇÃO CENTRAL NAS CHAPAS

A primeira etapa da avaliação dos resultados do experimento trata de verificar se a alteração realizada na planicidade do laminador a frio foi estatisticamente significativa, ou seja, se a média dos dados confirma a hipótese formulada inicialmente ou se devemos rejeitar H_0 . Para isto são apresentados os dados de planicidade do lote experimental, e em seguida é realizada a comparação das médias dos dois lotes de dados.

Os dados de planicidade do lote experimental na saída do TCM são apresentados na Tabela 7, onde ID_BOB representa a identidade das unidades metal, que foram protegidas devido ao caráter confidencial desta informação.

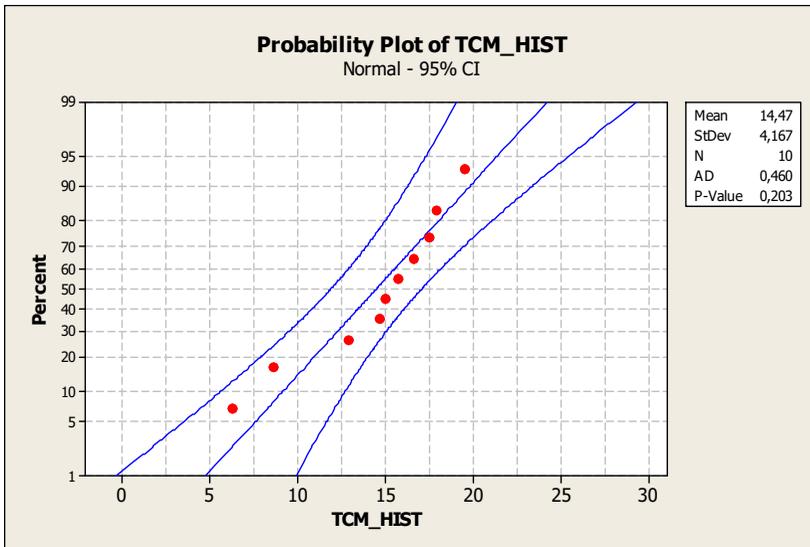
Faz-se necessário verificar a normalidade das duas amostras, suas médias e variâncias no MINITAB. Para a normalidade do material histórico é retirada uma amostra aleatória de tamanho $n=10$ no universo de dados. As Figuras 46 e 47 apresentam os resultados dos testes realizados com as amostras do experimento e do histórico, a partir dos dados provenientes do medidor on-line da saída do laminador (Shapemeter).

Tabela 7 – Medição da planicidade após TCM.

Sequência	ID_BOB	Planicidade [i-units]
1	xx96475A	25,1
2	xx92769D	29,3
3	xx15708N	33,7
4	xx16405K	38,5
5	xx81218D	30,4
6	xx89267F	28,7
7	xx89268D	30,4
8	xx89269B	26,4
9	xx89270F	30,2
10	xx89271D	31,6

Fonte: TCM / ArcelorMittal (2016).

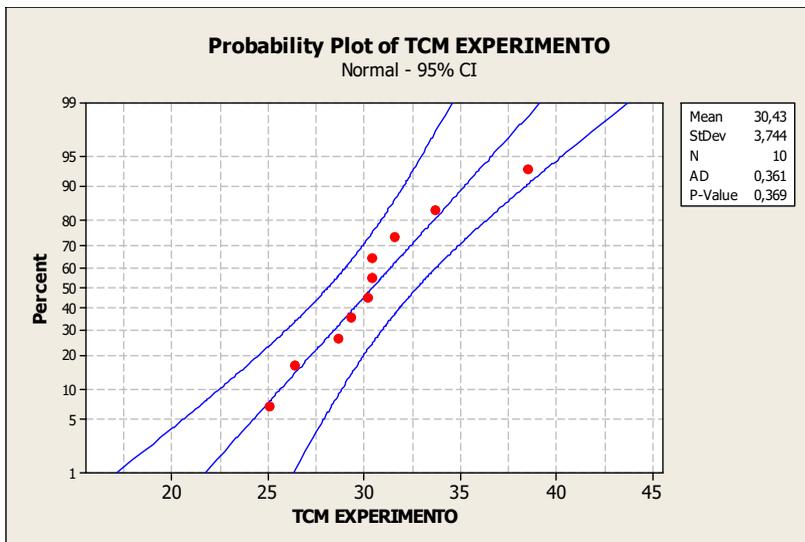
Figura 46 – Teste de normalidade da amostra do histórico de produção.



Fonte: Autor (2016).

A amostra foi aprovada no teste de normalidade e os dados para o cálculo do teste das médias são: $x_1=14,47$, $n_1=10$ e $\sigma_1=4,167$.

Figura 47 – Teste de normalidade para o lote experimental.



Fonte: Autor (2016).

A amostra foi aprovada no teste de normalidade e os dados para o cálculo do teste das médias são: $x_2=30,43$, $n_2=10$ e $\sigma_2=3,744$.

$$z_0 = \frac{14,47 - 30,43 - (-15)}{\sqrt{\left(\frac{4,167^2}{10} + \frac{3,744^2}{10}\right)}} = -0,54$$

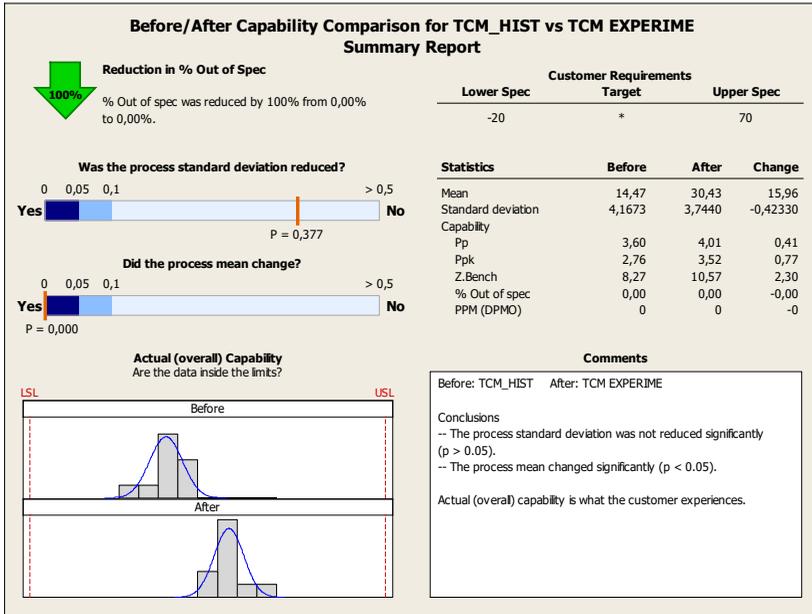
Da tabela de distribuição cumulativa normal padrão temos que para $z = -0,54$, $\Phi(z)=0,294599$.

Assim, o valor $P = 1 - \Phi(z) = 1 - 0,29 = 0,71 > \alpha$.

Portanto não podemos rejeitar H_0 . A média de valores do experimento é superior aos dados do histórico, e esta é uma conclusão forte.

Adicionalmente foi realizada uma comparação entre os valores do lote completo do histórico de produção do material (TCM HIST) e o lote experimental (TCM EXPERIME). Para este fim foi utilizada a ferramenta “capability comparison” do MINITAB. Os resultados são apresentados nas Figuras 48 e 49.

Figura 48 – Comparação estatística entre as amostras TCM HIST e TCM EXPERIME.



Fonte: Autor (2016).

Figura 49 – Detalhe da comparação estatística entre as amostras, sendo “Before” o histórico e “After” o experimento.

Statistics	Before	After	Change
Mean	14,47	30,43	15,96
Standard deviation	4,1673	3,7440	-0,42330

Fonte: Autor (2016).

A análise das Figuras 48 e 49 demonstra que a média da distribuição dos dados entre histórico versus experimento passou de 14,47 i-units (histórico: before) para 30,43 i-units (experimento: After), evidenciando que o procedimento realizado no TCM foi efetivo para atender os níveis estabelecidos na tabela 4. Observa-se que o desvio padrão reduziu de 4,16 i-units (histórico) para 3,74 i-units (experimento), apontando uma menor variabilidade nos dados do experimento em relação ao histórico. Os demais dados constantes na saída computacional não serão utilizados neste momento.

Os resultados das medições da planicidade final, realizadas na LIR, são apresentados na Tabela 8. O apontamento das medidas deve ser lido como segue: corda (mm) x flecha (mm). Estas medidas serão analisadas separadamente, uma vez que o MINITAB não reconhece o formato original destes dados.

Tabela 8 – Medição final da planicidade do lote experimental.

Bobi- na	Medidas: Corda [mm] x Flecha [mm]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1000x0	280x2	290x3	230x3	1000x0	1000x0	230x3	1000x0	1000x0
2	1000x0	250x3	1000x0	1000x0	250x3	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0
3	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	500x1,5	1000x0	1000x0	370x3	1000x0
4	1000x0	300x2	1000x0	1000x0	270x2	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0
5	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0
6	700x3	1000x0	1000x0	700x3	1000x0	420x2	650x3	1000x0	460x2,5
7	600x3	1000x0	1000x0	530x4	1000x0	500x3	1000x0	1000x0	700x3
8	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0
9	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0
10	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0	1000x0

Fonte: Dados da LIR/ArcelorMittal (2016).

5.2.1 Inferência estatística para flecha

O objetivo desta avaliação é verificar o efeito da alteração na planicidade inicial (TCM) sobre a flecha na planicidade do produto final. Para esta análise foi considerado o lote de dados históricos e o lote experimental. As medidas de flecha da Tabela 8 foram separadas e constam na Tabela 9 para possibilitar o cálculo pelo MINITAB. Cada bobina representa um tratamento, e as leituras representam as observações. Para a medida de flecha, quanto menor a medida, melhor.

Tabela 9 – Dados do experimento para Flecha (mm).

Bobina	Observações										Totais	Média
1	0	2	3	3	0	0	3	0	0	0	11,0	1,2
2	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	6,0	0,7
3	0	0	0	0	1,5	0	0	3	0	0	4,5	0,5
4	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	4,0	0,4
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
6	3	0	0	3	0	2	3	0	2,5	0	13,5	1,5
7	3	0	0	4	0	3	0	0	3	0	13,0	1,4
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0

Fonte: Dados da LIR/ ArcelorMittal (2016).

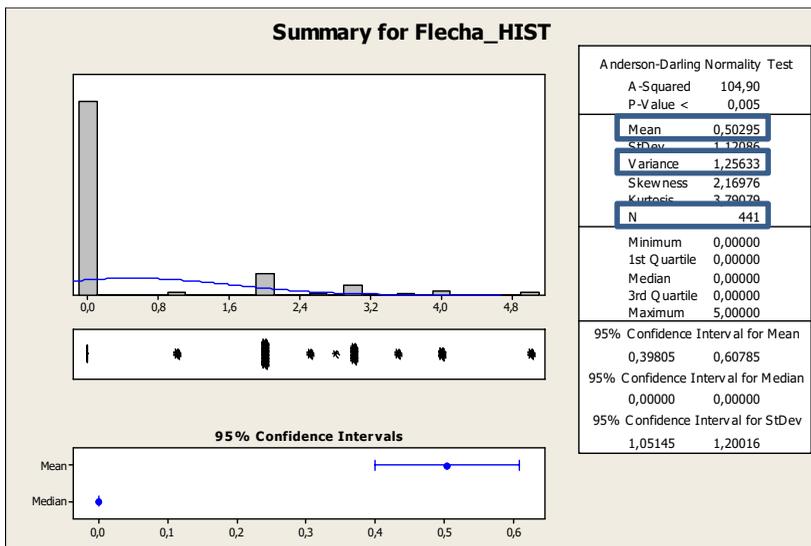
O relatório com o sumário dos dados de cada grupo é apresentado. Montgomery e Runger (2012) afirmam que para amostras grandes ($n > 40$) pode-se substituir a variância das populações pela variância das amostras no cálculo da diferença das médias, e que as populações de dados não precisam ser necessariamente normalmente distribuídas.

As hipóteses estatísticas são afirmações sobre os parâmetros de uma ou mais populações. Nesta análise foram

adotadas a hipótese nula H_0 , em que as médias são iguais, ou seja $\Delta\mu = 0$, e a hipótese alternativa H_1 , em que $\Delta\mu > 0$.

A Figura 50 apresenta o relatório dos dados do histórico de produção gerado pelo MINITAB, de onde temos que a média $\mu_1=0,50295$; a variância $\sigma_1^2=1,25633$ e a quantidade de amostras $n_1=441$.

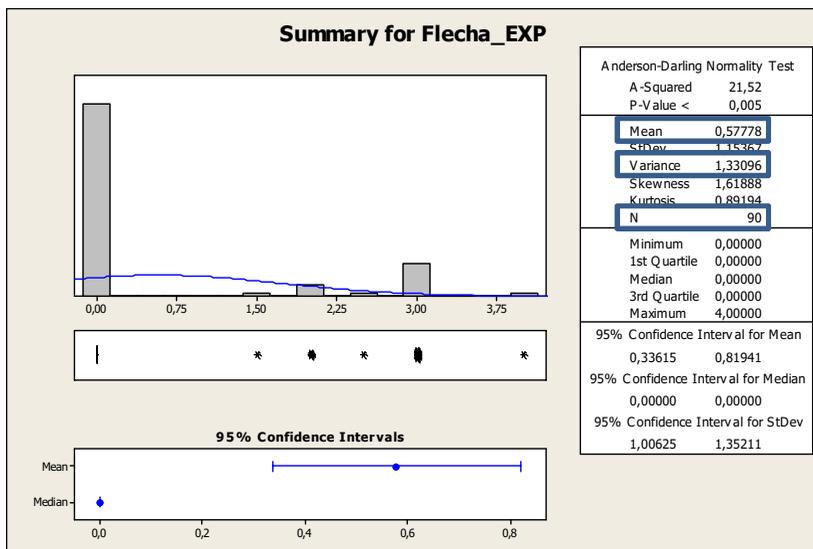
Figura 50 – Sumário da Flecha da população do histórico de produção.



Fonte: Autor (2016).

A Figura 51 apresenta o relatório dos dados do experimento aleatório gerado no MINITAB, que nos fornece os seguintes dados: a média $\mu_2=0,57778$; a variância $\sigma_2^2=1,33096$ e a quantidade de amostras $n_2=90$.

Figura 51 – Sumário da Flecha da população do experimento realizado.



Fonte: Autor (2016).

O teste da diferença de médias é calculada a partir da fórmula:

$$z_0 = \frac{0,50295 - 0,57778 - 0}{\sqrt{\left(\frac{1,25633}{441} + \frac{1,33096}{90}\right)}} = -0,56$$

Da tabela de distribuição cumulativa normal padrão: $\Phi(z)=0,287740$.

Assim, o valor $P = 1 - \Phi(z) = 1 - 0,29 = 0,71 > \alpha$.

Portanto não rejeitamos H_0 . A média de valores do experimento é semelhante aos dados do histórico de flecha, e esta é uma conclusão forte.

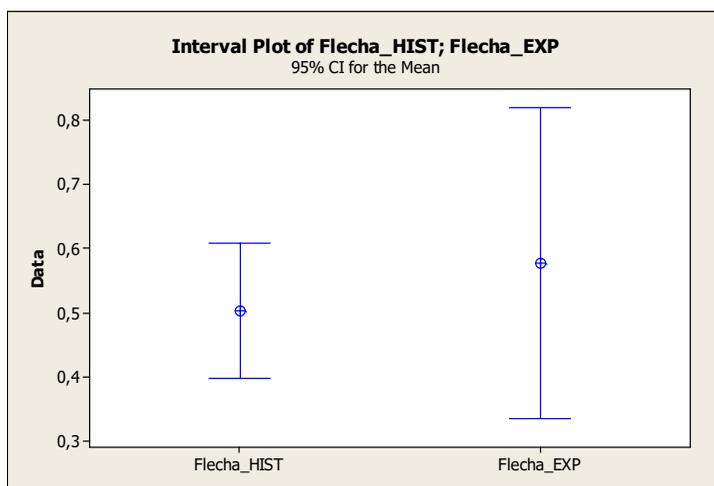
O intervalo de confiança (IC) é uma faixa de valores derivada da estatística da amostra, com probabilidade de conter o valor de um parâmetro de população desconhecido. Montgomery e Runger (2012) definem o intervalo de confiança (IC) bilateral para a média como sendo:

$$\bar{x} - z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (56)$$

onde \bar{x} é a média da amostra, μ é a média, z é a variável aleatória, α é o nível de significância, σ é o desvio padrão amostral e n a quantidade de amostras.

Pretende-se avaliar os intervalos de confiança dos dados históricos e experimental para a flecha, considerando $\alpha=0,05$, para um intervalo de confiança de 95%. A comparação dos intervalos de confiança dos dados de flecha é apresentada na Figura 52. Este diagrama representa um sumário gráfico das distribuições de dados onde constam a tendência central bem como a sua variabilidade. Este diagrama é especialmente interessante para comparar os grupos de dados. O sinal de “+” circulado representa a média dos dados e a linha vertical representa o intervalo, cujas extremidades são os limites deste intervalo. Observa-se que as médias são ligeiramente diferentes, mas as barras do intervalo se sobrepõe integralmente, indicando que a diferença observada não é significativa.

Figura 52 – Intervalos de Confiança para FLECHA



Fonte: Autor (2016).

5.2.2 Inferência Estatística para Comprimento de Onda

A segunda parte desta análise compreendeu a avaliação do comprimento de onda na planicidade do produto final (medido na LIR) mediante a alteração na planicidade inicial (TCM). De igual modo, aplicamos o teste para diferença de médias com auxílio do MINITAB aos lotes de dados histórico e experimental, visando confirmar se há diferenças específicas entre os dois grupos.

Nesta análise também foi adotada a hipótese nula H_0 em que as médias dos dois grupos são iguais, ou seja, $\Delta\mu=0$, e a hipótese alternativa H_1 como sendo $\Delta\mu<0$.

As medidas da corda para o experimento realizado constam na Tabela 10. Cada bobina representa um tratamento, e as leituras representam as observações. Quanto maior o comprimento de onda, melhor o resultado de planicidade, uma vez que o comprimento de onda é o denominador da equação de planicidade em i-units.

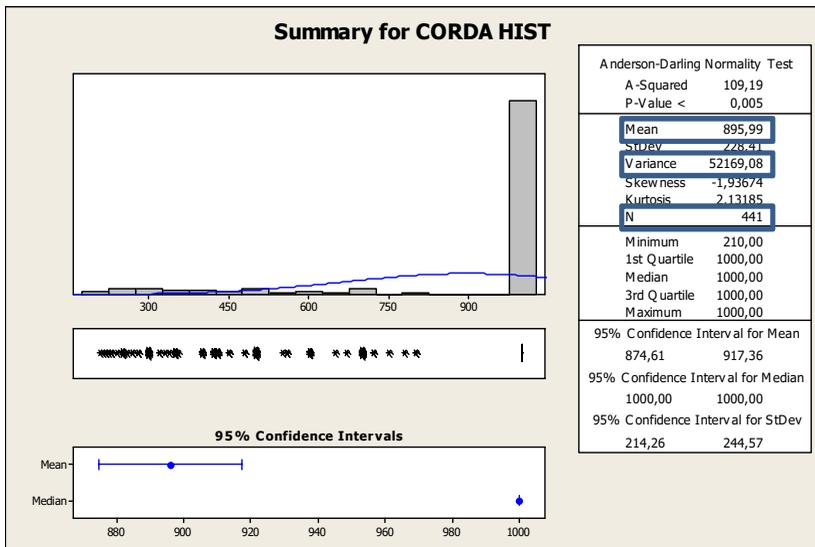
Tabela 10 – Dados do experimento para Corda (mm).

Bobina	Observações										Totais Média	
1	1000	280	290	230	1000	1000	230	1000	1000	6030	670	
2	1000	250	1000	1000	250	1000	1000	1000	1000	7500	833	
3	1000	1000	1000	1000	500	1000	1000	370	1000	7870	874	
4	1000	300	1000	1000	270	1000	1000	1000	1000	7570	841	
5	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	9000	1000	
6	700	1000	1000	700	1000	420	650	1000	460	6930	770	
7	600	1000	1000	530	1000	500	1000	1000	700	7330	814	
8	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	9000	1000	
9	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	9000	1000	
10	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	9000	1000	

Fonte: LIR/ ArcelorMittal (2016).

A Figura 53 apresenta os resultados para a análise dos dados históricos medidos para a corda realizada utilizando o software MINITAB, de onde temos que a média $\mu_1=895,99$; a variância $\sigma_1^2=52.169,08$ e a quantidade de amostras $n_1=441$.

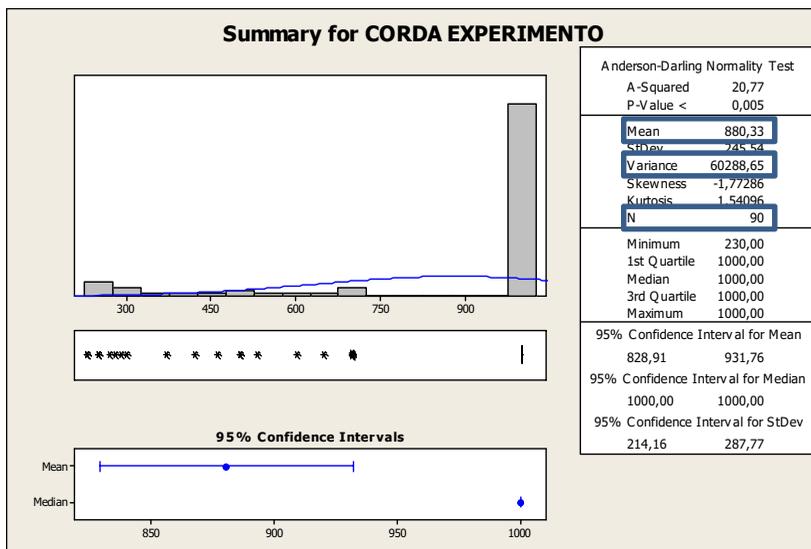
Figura 53 – Sumário da Corda da população do histórico.



Fonte: Autor (2016).

A Figura 54 apresenta os resultados da análise das medidas obtidas na saída computacional para o experimento desenvolvido para a corda, de onde obtemos que a média $\mu_1=880,33$; a variância $\sigma_1^2=60.288,65$ e a quantidade de amostras $n_1=90$.

Figura 54 – Sumário da Corda da população do experimento.



Fonte: Autor (2016).

O teste da diferença de médias para o comprimento de onda é calculado a partir da fórmula:

$$z_0 = \frac{895,99 - 880,33 - 0}{\sqrt{\left(\frac{52169,08}{441} + \frac{60288,65}{90}\right)}} = 0,56$$

Da tabela de distribuição cumulativa normal padrão: $\Phi(z)=0,708840$.

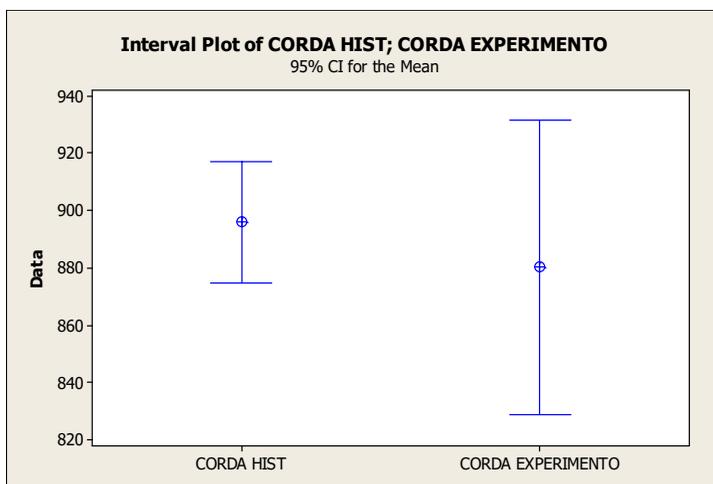
Assim, o valor $P = 1 - \Phi(z) = 1 - 0,71 = 0,29 > \alpha$.

Portanto não rejeitamos H_0 . A média de valores do experimento é semelhante aos dados do histórico de medidas da corda.

Pretende-se avaliar os intervalos de confiança dos dados históricos e experimental para a corda, considerando $\alpha=0,05$, para um intervalo de confiança de 95%. A comparação dos dados de flecha é apresentada na Figura 55. A comparação dos intervalos de confiança dos dados de flecha é apresentada na Figura 52. O diagrama aponta que que as médias são diferentes,

conforme a análise dos sumários, mas as barras do intervalo se sobrepõe por completo, indicando que esta diferença não é significativa.

Figura 55 – Intervalo de confiança para corda.



Fonte: Autor (2016).

Na avaliação da corda, com base nos dados utilizados nesta análise, não há evidências estatísticas suficientes para afirmar que há diferença entre os grupos de dados histórico e experimental.

Em suma, não há evidências para se afirmar que exista uma diferença estatisticamente significativa entre os dados do histórico de produção e do experimento aleatório realizado, tanto para a flecha quanto para a corda. Desta forma, conclui-se que o processo foi capaz de corrigir o defeito de planicidade inserido propositalmente na chapa na fase de laminação a frio, o qual não causou prejuízo à qualidade final do produto. Portanto, a hipótese inicial de que a linha de Encruamento seria capaz de corrigir o defeito de ondulação central foi confirmada.

A Figura 56 apresenta uma imagem do material produzido durante o desenvolvimento do experimento, onde é possível observar uma planicidade visualmente isenta de deficiências de forma.

Figura 56 – Planicidade de uma bobina do teste.



Fonte: Autor (2016).

5.3 CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALGRÁFICAS COM A ONDULAÇÃO

Para verificar se ocorreram alterações nas chapas com a inserção proposital de ondulações foram realizados ensaios de tração e metalográficos.

5.3.1 Ensaios de Tração Simples

Corpos de prova (CDP) longitudinais (na direção da laminação, isto é, 0°) e transversais (a 90° da direção de laminação), foram retirados de regiões com ondulação e sem a presença de ondulação. A comparação entre os resultados do ensaio de tração nestas regiões pode apontar variações nas propriedades mecânicas do material, especificamente o limite de escoamento e limite de resistência. Os valores de LE e LR estão adequados à especificação do cliente para este material e os resultados de laboratório são apresentados na Tabela 11.

As curvas geradas a partir dos resultados dos ensaios de tração são apresentadas nos anexos A e B (sem retoques).

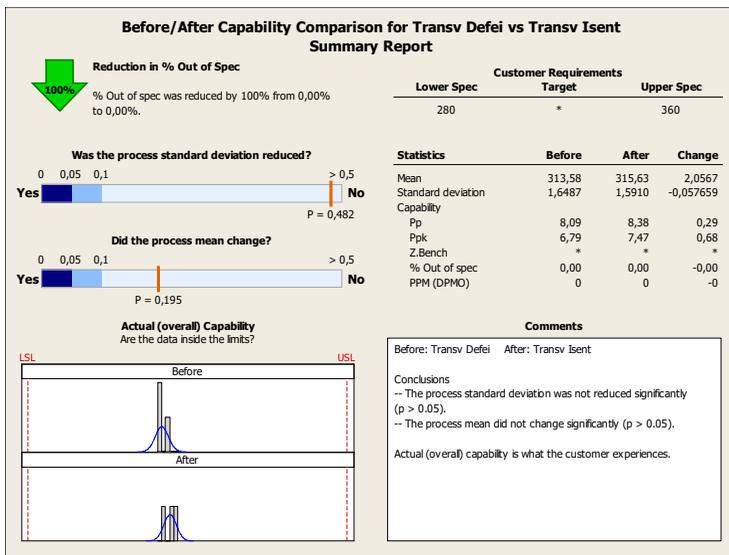
Tabela 11 – Propriedades mecânicas dos corpos de prova.

Amostra Direção n.º	Ondulação	Limite de escoamento [MPa]	Limite de Resistência [MPa]
Transversal #1	SIM	315,48	439,47
Transversal #2	SIM	312,66	439,44
Transversal #3	SIM	312,59	439,18
Longitudinal #1	SIM	300,80	438,44
Longitudinal #2	SIM	301,67	439,49
Longitudinal #3	SIM	300,15	438,52
Transversal #1	NÃO	315,70	448,18
Transversal #2	NÃO	314,01	448,20
Transversal #3	NÃO	317,19	448,25
Longitudinal #1	NÃO	299,61	440,97
Longitudinal #2	NÃO	299,29	439,37
Longitudinal #3	NÃO	299,96	442,52

Fonte: Laboratório ArcelorMittal Vega (2016).

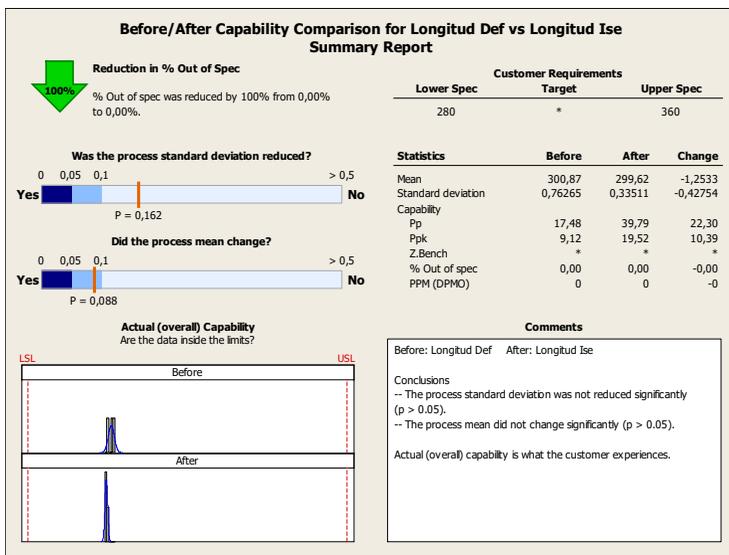
Uma comparação direta entre os resultados dos CDP transversais e longitudinais, com e sem ondulação demonstra pequenas variações no limite de escoamento e no limite de resistência devido à introdução da ondulação. As comparações simuladas podem ser vistas nas Figuras 57 e 58.

Figura 57 – Comparação entre as amostras transversais.



Fonte: Autor (2016).

Figura 58 – Comparação entre as amostras longitudinais.



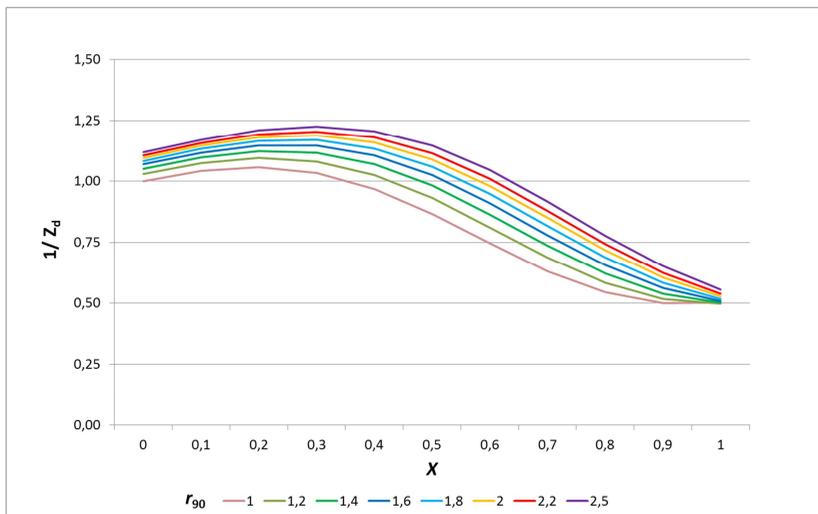
Fonte: Autor (2016).

Os CDP transversais apresentaram uma diferença de 0,6% na média dos resultados entre lotes, e a diferença entre os desvios padrão foi de 3,5%. Considerando a pequena quantidade de dados, a média e o desvio padrão dos lotes não apresentaram variação estatisticamente significativa.

Da mesma forma, a variação entre os lotes das amostras longitudinais, com e sem ondulação, foram considerados similares, sem variação estatisticamente significativa.

Nota-se, no entanto, uma variação relevante entre as medidas de limite de escoamento nas amostras a 0° e a 90° , tanto no lote com ondulação como no lote sem ondulação. Esta variação é da ordem de aproximadamente 5%, e indica uma maior resistência a deformação plástica na direção normal à direção de laminação (R_{90}). Observamos, portanto, um comportamento ligeiramente anisotrópico da chapa, e assim a subtangente de estrição difusa (Z_d) pode sofrer uma correção, de acordo com a Equação (34). A Figura 59 apresenta as curvas que representam esta correção.

Figura 59 – Subtangente difusa em instabilidade plástica corrigida para chapa anisotrópica, em função da razão das tensões principais.



Fonte: Autor (2016).

A anisotropia mecânica é definida como a razão da deformação verdadeira na largura pela deformação verdadeira na espessura. A anisotropia r_{90} corresponde ao CDP retirado na direção transversal ao sentido de laminação. Quando o material apresenta comportamento anisotrópico, observa-se uma variação nesta medida, em comparação à medida r_0 do CDP retirado na direção longitudinal. As curvas da figura 58 indicam esta variação de r_{90} entre 1 e 2,5 enquanto r_0 permanece inalterado. No eixo das ordenadas temos a razão entre as tensões principais X e no eixo das abscissas temos o inverso da subtangente difusa $1/Z_d$, que representa o denominador no termo direito da igualdade na Equação (21). Observa-se comportamento semelhante as teorias clássicas, e que, à medida que a anisotropia normal (r_{90}) aumenta, o inverso da subtangente difusa ($1/Z_d$) eleva-se gradualmente, sendo que este comportamento se aplica indistintamente a todos os valores de X . Pode-se concluir, examinando a Figura 59, que quanto mais anisotrópico é o material ($r_{90} > r_0$), menor é a subtangente em instabilidade plástica e, por conseguinte, a deformação efetiva na instabilidade.

5.3.2 Metalografia

Os ensaios metalográficos visaram a análise da microestrutura dos materiais após o processo, em função da diferença de deformação a que foram submetidos. A técnica empregada permitiu a visualização da microestrutura das amostras e a comparação do tamanho de grão ASTM. As amostras de chapa plana e ondulada foram retiradas na linha de inspeção.

Foi observado que a estrutura cristalina do aço nas amostras é homogênea, com grãos semelhantes nas regiões central e extremidades das amostras, e sem aparente impacto causado pela presença da ondulação. A Figura 60 apresenta as imagens das amostras com ampliação de 500x, enquanto as ampliações de 100x e 200x encontram-se nos apêndices C e D.

Pode-se observar que as imagens são similares, não há a presença de variações na estrutura cristalina, como grãos coalescidos provenientes de recozimento excessivo, ou grãos alongados em função da deformação, ou seja, na sensibilidade desta técnica não foi possível observar alterações entre as amostras.

Figura 60 – Resultados da metalografia das amostras com e sem ondulação.

Amostra da região
ondulada



Amostra da região
plana



Fonte: Autor (2016).

A Tabela 12 apresenta os resultados da análise do tamanho de grão. O tamanho de grão (TG) nas amostras foi avaliado como tamanho ASTM 11 (ASTM E112-13), em ambas as amostras. Não houve variação perceptível em consequência da deformação na amostra ondulada.

Tabela 12 – Resultados da análise do tamanho de grão.

	Sem ondulação	Com ondulação
Tamanho de Grão ASTM	11	11

Fonte: Laboratório ArcelorMittal Vega (2016).

5.4 RESULTADOS DO PRODUTO FINAL

O material do teste foi transformado em blanks na linha de um beneficiador e então fornecido ao cliente final. O material permaneceu em estado de homologação durante um longo período, sob constante avaliação e em grau ascendente de criticidade de aplicação. Informações relacionadas a dados de produção e estatísticas do beneficiador e do cliente final, não tem autorização para divulgação, no entanto a taxa de descarte e defeitos não excederam a taxa considerada normal para esta aplicação. O material foi homologado e encontra-se em fornecimento regular, com planicidade adequada e qualidade geral consistente.

A aplicação do material na linha do cliente final pode ser observada nas Figuras 61, 62 e 63.

Figura 61 – Imagem dos blanks antes da conformação.



Fonte: Autor (2015).

Figura 62 – Imagem dos gabinetes durante a produção.



Fonte: Autor (2015).

Figura 63 – Imagem do produto final.



Fonte: Autor (2015).

6 CONCLUSÃO

O requisito de planicidade restrita é determinante na aplicação de aços para painéis longos da linha branca, indústria de móveis de aço e placas arquitetônicas, onde a isenção de ondulações determina a utilização do material tanto quanto a sua resistência. Este trabalho foi realizado com o propósito de possibilitar a produção de chapas finas de aço laminado a frio sem revestimento, por meio de recozimento em caixa, com planicidade adequada ao atendimento dos requisitos de qualidade mais rigorosos do mercado. Para tanto, foi necessário eliminar as ondulações que ocorrem tipicamente no material laminado a frio, e mais especificamente, as ondulações intermediárias.

Eliminar ondulações em um processo de produção sem investimentos requer o desenvolvimento de um estudo aprofundado sobre conformação das chapas, compreensão e análise da deformação em instabilidade plástica e o desenvolvimento de um experimento concebido a eliminar ondulações localizadas por meio da inserção controlada de outro defeito na chapa durante uma fase anterior de produção.

O efeito da planicidade na instabilidade plástica foi estudado a partir da teoria de Swift para um processo de laminação a frio. A planicidade foi representada pela deformação irregular no sentido da laminação, que corresponde a uma variação no comprimento das fibras do material, e que por definição são ondulações. O método permitiu avaliar a condição de empescoçamento da chapa para materiais isotrópicos e anisotrópicos.

Um lote experimental de dez bobinas de aço destinadas à fabricação de painéis expostos para refrigeradores foi produzido com a inserção controlada de ondulação central na fase de laminação a frio, mantendo-se as demais condições e parâmetros de processo sob controle em suas respectivas linhas. A ondulação central inserida foi suficiente para cobrir os picos de ondulação localizadas remanescentes na tira.

A ondulação controlada representa uma deficiência de planicidade e também uma deformação adicional aplicada no produto em processo. Os resultados deste experimento foram avaliados à luz da teoria da instabilidade em deformação plástica, pelo qual compreendemos que uma deficiência de

planicidade pode afetar a deformação verdadeira e as condições de empescoamento do material, porém os resultados experimentais demonstraram que a ondulação inserida propositalmente situou-se em um patamar muito aquém de gerar algum efeito no material. A deficiência da planicidade causa deformação inaceitável a partir de aproximadamente 1000 i-units, quando a espessura da chapa varia em até 1%, valor típico para o limite da tolerância de espessura. Nesta condição, o defeito de forma é extremamente aparente, o que impossibilitaria a aplicação da chapa em produtos até mesmo sem requisito de planicidade restrita.

A planicidade das bobinas foi avaliada na linha de inspeção e os dados do lote de teste foram comparados estatisticamente com os dados históricos do mesmo material. O lote de teste foi produzido com uma ondulação média da ordem de 30 i-units e compreendeu 90 dados, enquanto o histórico de produção foi de 14 i-units representando 441 medidas. O resultado final do estudo apontou que não houve diferença estatisticamente significativa entre as duas populações de dados, tanto para a flecha quanto para o comprimento de onda das ondulações.

Foram realizados ensaios laboratoriais para analisar o comportamento do material após o processo, os quais compreenderam ensaios de tração e metalografia. Nos ensaios de tração foram avaliados os limites de escoamento e de resistência dos corpos de prova, os quais demonstraram que não houve diferença estatisticamente significativa entre os corpos de prova coletados em regiões da chapa com ondulação e plana. A análise de metalografia indicou ausência de grãos deformados na região analisada, com homogeneidade do tamanho de grão (TG=11) entre as amostras com ondulação e plana.

O experimento provou que a linha de encruamento foi capaz de corrigir a ondulação localizada característica do material por meio da inserção prévia da ondulação central controlada. A planicidade resultante do lote experimental, no entanto, não apresentou evolução estatisticamente significativa em relação ao lote histórico de produção. Portanto, o experimento, não permitiu atingir isoladamente o nível de qualidade definido no objetivo do trabalho. Foi necessário realizar um refinamento do modelo de planicidade apresentado, o qual compreendeu o planejamento de um experimento (DOE)

contemplando outros fatores e demais análises estatísticas. Após o refinamento do modelo e testes adicionais nas linhas de produção, as bobinas foram fornecidas aos fabricantes de refrigeradores, aprovadas e o produto foi homologado, com taxas de sucata e rejeições consideradas normais para a aplicação. O resultado do trabalho postula um novo ciclo de refinamento, visando a melhoria contínua do processo de produção e a abrangência de outros aços com requisito de planicidade restrita.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do estudo desenvolvido foi possível destacar algumas questões para trabalhos futuros, que se encontram listadas a seguir:

- Aplicação da metodologia para desenvolvimento de outras classes de aços com requisito de planicidade restrita;
- Modelamento para outras classes de aços e para outras aplicações e requisitos de qualidade.

REFERÊNCIAS

ABB. **Flatness Control Systems**. Stressometer Systems. 21/05/2014. Disponível em: <<http://www.abb.com/product/>>. Acesso em: 02 nov. 2016.

ABDELKHALEK, S.; MONTMITONNET, P.; POTIER-FERRY, M.; ZAHROUNI, H.; LEGRAND, N.; BUESSLER, P. Strip flatness modelling including buckling phenomena during thin strip cold rolling. **Ironmaking & Steelmaking**. v.37, n.4. p. 290-297, 2010.

AL-QURESHI, H.A. **Conformação e Instabilidade Plástica de Chapas Metálicas**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina – LabMAT, 2008. Apostila.

AL-QURESHI, H.A. **Processos e Mecanismos da Conformação dos Metais**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010. Apostila.

AL-QURESHI, H.A.; KLEIN, A.N.; FREDEL, M.C. Grain Size and Surface Roughness effect on the instability strains in sheet metal stretching. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 170, p. 204-210, 2005.

ASM - AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Forming and Forging**. Handbook Volume 14. ASM Intl, p. 972, 1537-1554, 1993.

ASM - AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metallography and Microstructures**. Handbook Volume 9. ASM Intl, p. 13-23. 1985.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112-13**. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, 2013.

ANJOS, M.S. **Desenvolvimento e Avaliação de Aços para Fins Elétricos Totalmente Processados em Recozimento em Caixa**. 2010. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

ARCELORMITTAL. **Catálogo Aços Planos América Latina – Brasil**. Edição 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5915-5**: Bobinas e chapas finas a frio de aço-carbono para estampagem – Especificação. Rio de Janeiro, 2008. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6673**: Produtos planos de aço - Determinação das propriedades mecânicas à tração. Rio de Janeiro, 1981. 14 p.

CHAKRABARTY, J. **Applied Plasticity**. 2nd edition. New York: Springer, 2010.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012.

CIA SIDERÚRGICA NACIONAL. **Catálogo Laminados a Frio**. Disponível em: <<http://www.csn.com.br>>. Acesso em: 29 out. 2016.

DANIELI. **Hot Dip Galvanizing Line**. Danieli News magazine. Edition 173, p. 74, 2016.

DIETER Jr, G.E. **Mechanical Metallurgy**. Metallurgy and Metallurgical Engineering Series. New York: Mc Graw-Hill. 1961.

EBNER. **Quality runs in the Family**. Ebner Hicon Journal. Disponível em: <<http://www.ebner.cc/en/hicon-journal/>>. Acesso em: 02 nov. 2016.

FAPIANO, D.J. **Flatness control in hot strip mill**. [Salem] US Patent 4261190 A 30.Jul.1979. 14. Abr., 1981.

FONSTEIN, N. **Metallurgy for Professionals: Cold Rolling and Annealing**. ArcelorMittal University. 2011. Apostila.

GARCIA, A.; SPIM, J.A.; DOS SANTOS, C.A. **Ensaios dos Materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

GINZBURG, V.B. **Flat Rolled Steel Processes Advanced Technologies**. Boca Raton. CRC Press. 2009.

GINZBURG, V.B. **Steel Rolling Technology – Theory and Practice**. New York: Marcel Dekker, 1989.

GREENBERGER, J.I. **Rolling of Metals**. Iron and Steel Engineer Year Book, 1959.

HAESSNER, F. Systematic survey and basic problems of recrystallization. In: Frank Haessner Editor. **Recrystallization of metallic materials**. Stuttgart, Germany: Institut für Werkstoffkunde und Herstellungsverfahren Technische Universität Braunschweig, 1978.

HARA, K; YAMAHA, T; TAGAKI, K. Shape controllability for quarter buckles of strip in 20-high sendzimir mills. **ISIJ International**, v. 31, p. 607-613, 1991.

HELMAN, H.; CETLIN, P.R. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2005.

HINGOLE, R.S. **Advances in Metal Forming Expert System for Metal Forming**. Vol. 206. Berlin: Springer-Verlag, 2015.

HOSFORD, W.F.; CADDELL, R.M. **Metal Forming Mechanics and Metallurgy**. 3rd Edition. New York: Cambridge University Press, 2007.

INDUSTRIALHEATING. 07/02/2003. **Troubleshooting Hydrogen Annealing of Steel Strip: Part 1**. Disponível em <<http://www.eurotherm.com/articles/>>. Acesso em: 10 set. 2016.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S.R. **Manufacturing Engineering and Technology**, 6th edition. Prentice Hall, 2009.

KARMAN, T. V. **Beitrag zur Theorie des Walzvorganges**. Z. angew. Math. U. Mech. 5.139, 1925;

LIN, Y.J; SUH, C.S; LANGARI, R; NOAH, S.T. **On the characteristics and mechanism of rolling instability and chatter**. ASME Trans. Manuf. Sci. Eng., v. 125, p.178-186, 2003.

MALIK, A.S. **Rolling Mill Optimization using an Accurate and Rapid New Model for Mill Deflection and Strip Thickness Profile**. 2007. 131 f. Dayton: Wright State University, Ph.D. Dissertation, 2007.

METALRESOURCES. **Flatness of Sheet Metal**. 2015. Disponível em: <<http://www.metalresources.net/index.php/resources/engineering/230-flatness-of-sheet-metal>>. Acesso em: 30 out. 2016.

MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J.L; HU, S.J. **Mechanics of Sheet Metal Forming**. Butterworth-Heinemann London, 2002.

MEIER, M. **Plastic Deformation and the Onset of Tensile Instability**. Dept. Chem. Eng. Mat. Sc. University of California, Davis. 2004.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC. 2012.

MOOSBRUGGER, C. **Atlas of Stress Strain Curves**. American Society for Metals Intl. 2nd edition: Materials Park, 2002.

NAKAJIMA, K.; KAWAMOTO, T.; HATAE, S.; OMORI, S.; TSUKAMOTO, H. Basic characteristics of pair crossed mill. **Mitsubishi technical review**, p.143-148, 1985.

OLIVEIRA, C.A.S. **Materiais Metálicos Industriais e Metalurgia Física II**. UFSC, Agosto de 2014. Notas de Aula.

PADILHA, A.F.; SICILIANO Jr., F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. 3^a ed. revisada e ampliada. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

RAGHAVAN, K.S.; GARRISON Jr, W.M. An investigation of the relative effects of thickness and strength on the formability of steel sheet. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, p. 5565-5574, 2010.

RAMIREZ, F. Leveling defects – causes and cures. **Metal Forming**, v. 37, n. 7, p 33-34, 2003.

REED-HILL, R.E. **Physical Metallurgy Principles**. New York: Van Nostrand, 1973.

RIZZO, E.M.S. **Processos de laminação a quente de produtos planos de aço**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2011.

RIZZO, E.M.S. **Processos de Laminação dos Aços: uma Introdução**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

ROBERTS, W.L. **Cold Rolling of Steel**. New York: Marcel Dekker, 1978.

ROBERTS, W.L. **Hot Rolling of Steel**. New York: Marcell Dekker, 1983.

ROSS, R.B. **Handbook of Metal Treatments and Testing**. 2nd edition. New York: Chapman and Hall, 1988.

SIEMAG. **Strip Processing Lines**. 2016. Disponível em: <<http://www.siemag.sms.group.com/>>. Acesso em: 02 nov. 2016.

SMITH, W.F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5. ed. Porto Alegre: Mc Graw-Hill, 2012.

SMS-DEMAG. **Vega Spm/ Ispm Training**. Sms-Demag. 2003. Apostila.

SMS-DEMAG. **High Tech Tandem Mills – Latest References in Steel processing**. 2016. Disponível em: <http://www.smsdemag.de/download/W6_303E_High-Tech_tandem_mills_-_Latest_references_in_steel_processing.pdf>. Acesso em: 14 set. 2016.

SMS-GROUP. **Innovations for Greater Customer Benefits.** SMS Group Newsletter, v. 3, p. 134-135, 2016.

SOUSA, C.J. **Metodologia para Otimização de Estrutura de Produtos da Linha Branca via Simulação Numérica aliada ao projeto de Experimentos.** 2012. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SPIEGEL, M.R. **Manual de Fórmulas, Métodos e Tabelas de Matemática.** Ed. rev. ampl. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1992.

SWIFT, H.W. Plastic Instability under Plane Stress. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 1, n. 1, p. 1-18, 1952.

THEIS, E. **Everything you need to know about flatteners and levellers for coil processing.** 10/2002. Disponível em: <<http://www.thefabricator.com>>. Acesso em: 12 set. 2016.

THEIS, E.; HAZEN, T. **Controlling Flat-Rolled Shape.** 02/2009. Stamping Journal. Disponível em <<http://www.thefabricator.com/article/stamping/>>. Acesso em: 09 jul. 2016.

THEIS, H.E. **Handbook of Metalforming Processes.** New York: Marcel Dekker, 1999.

TRAN, D.C; TARDIF, N; LIMAM, A. Experimental and numerical modeling of flatness defects in strip cold rolling. **International Journal of Solids and Structures**, v. 69-70, p. 343-349, 2015.

TURLEY, J.W; POLLASTRELLI, A; BRECY, M. Control of quarter buckle on sendzimir 20- mills. **Iron Steel Eng**, v. 76, n. 3, p. 35-40, 1999.

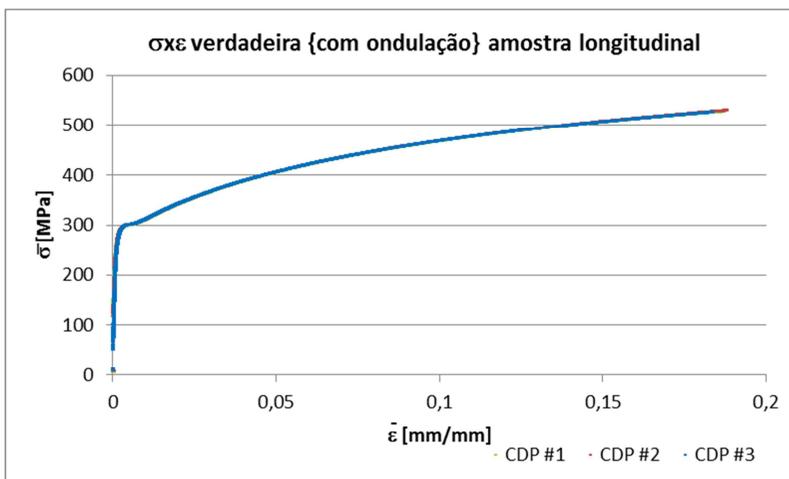
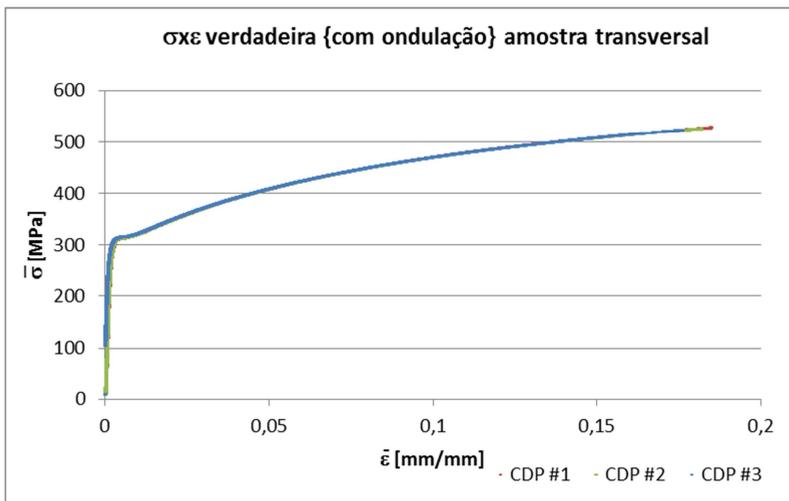
USIMINAS. **Catálogo Laminados a frio.** Disponível em: <<http://www.usiminas.com> >. Acesso em: 29 out. 2016.

VON KARMAN, T. **Beitrag zur theorie des walzvorganges.** Z. Angew. Mach. Mech., v. 5, 130, 1925.

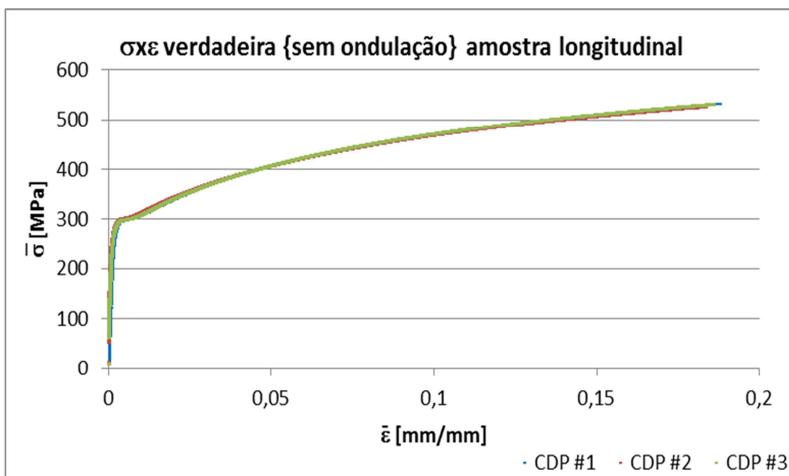
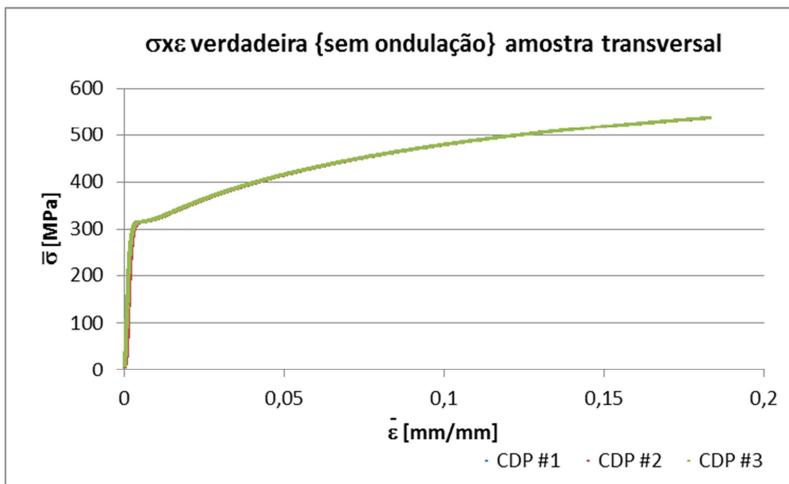
ZHOU, Z.; THOMSON, P.F.; LAM, Y.C.; YUEN, D.D.W. Prediction quarter buckling and herringbone buckling in rolled strip. In: **Proc. I Mech. E J. Mech. Sci.**, v. 221, p. 143-150, 2007.

ZIANG, Z.Y; XIONG, S.W; TIEU, A.K.; JANE WANG, Q. Modelling of the effect of friction on cold strip rolling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 201, p. 85-90, 2008.

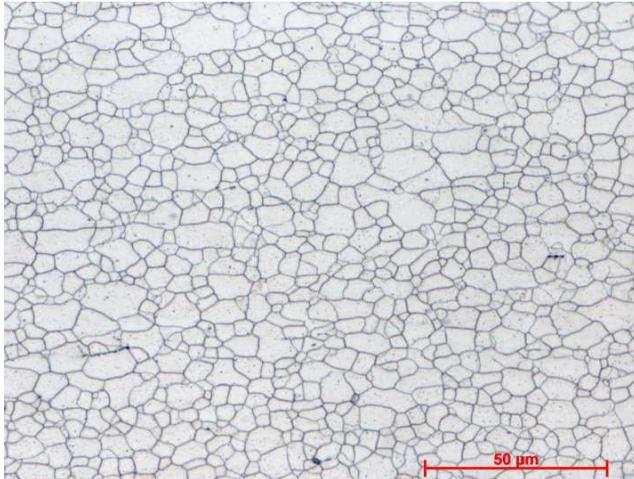
Apêndice A: Curvas Tensão x Deformação de amostras com ondulação.



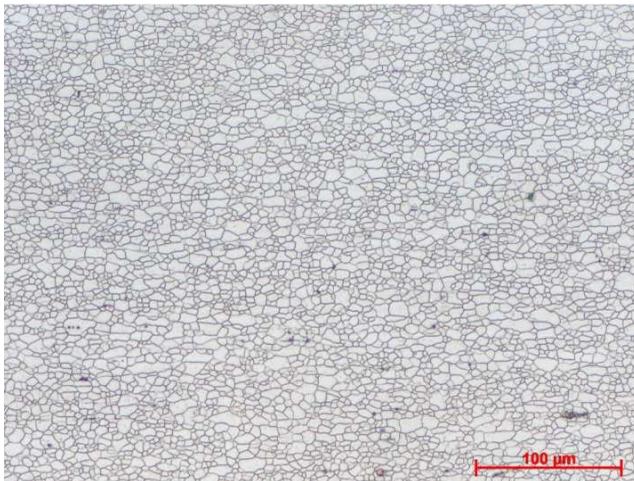
Apêndice B: Curvas Tensão x Deformação de amostras sem ondulação.



Apêndice C: Ensaio Metalográfico de Amostras com Ondulação.



500x TG=11

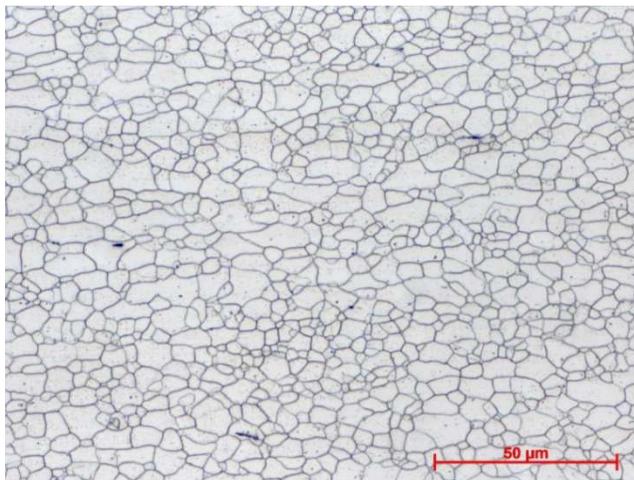


200x TG=11

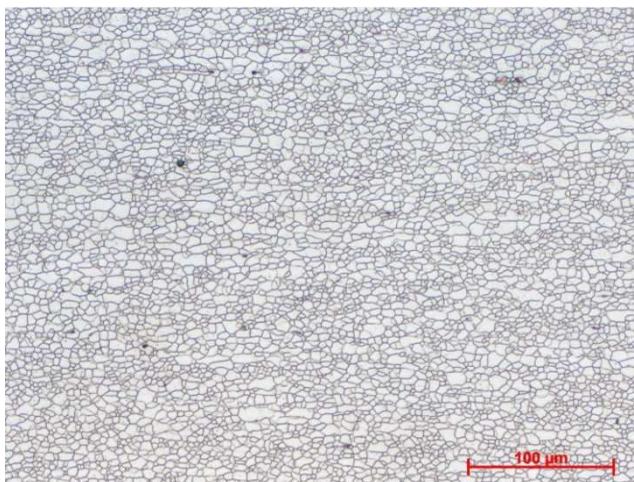


100x TG=11

Apêndice D: Ensaio Metalográfico de Amostras sem Ondulação.



500x TG=11



200x TG=11



100x TG=11