

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

JOSÉ ROBÉRIO DE CASTRO FERREIRA

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA 6 σ PARA MELHORIA DE QUALIDADE NA
PLANICIDADE DE TIRAS A QUENTE COM ESTUDO VOLTADO SOBRE O
SISTEMA DE RESFRIAMENTO (*LAMINAR FLOW*) DA LTQ#2/CSN**

FORTALEZA

2014

JOSÉ ROBÉRIO DE CASTRO FERREIRA

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA 6 σ PARA MELHORIA DE QUALIDADE NA
PLANICIDADE DE TIRAS A QUENTE COM ESTUDO VOLTADO SOBRE O
SISTEMA DE RESFRIAMENTO (*LAMINAR FLOW*) DA LTQ#2/CSN

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu

Co-Orientador: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug

FORTALEZA

2014

JOSÉ ROBÉRIO DE CASTRO FERREIRA

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA 6 σ PARA MELHORIA DE QUALIDADE NA
PLANICIDADE DE TIRAS A QUENTE COM ESTUDO VOLTADO SOBRE O
SISTEMA DE RESFRIAMENTO (*LAMINAR FLOW*) DA LTQ#2/CSN

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: ____ / ____ / ____ .

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug (Co-Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva (Coordenador do Curso)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, nosso Pai Celeste, Grandioso, Senhor da Vida, aquele que nos guia pela grande jornada. Tenho gratidão eterna por minha existência, Fé e Amor que o Senhor sempre me atribuiu a sobrevivência com paciência e inteligência todos os dias de minha vida.

Aos meus pais José Roseno Ferreira e Maria Anita de Castro por contribuírem diretamente na construção de meu caráter, pelos incentivos e apoios na vida pessoal e profissional. Tenho gratidão eterna a eles por, mesmo diante de muitas dificuldades, ter me dado um ensinamento disciplinado, humilde e honesto, sendo eles exemplos de vida pra mim, orgulho e razão de meu viver.

A minha mulher e companheira Ilana Correia de Almeida, razão de minhas forças nessa jornada da vida, na qual sou muito grato por sua importante presença em minha vida, por estar ao meu lado em todos os momentos, e principalmente por seu amor.

A toda minha Família e colegas das cidades de Fortaleza, Horizonte, Chorozinho, Pacajue e Maranguape pelo apoio e incentivo na vida pessoal e profissional.

Aos meus amigos companheiros de faculdade Marcos Paulo Mesquita, José Alex de Oliveira, Manoel Vasconcelos, Tomaz Costa, Jefferson Willis, João Paulo Pinheiro, Nathália Figueiredo, Laércio Pereira, Frank Webston e Cleber Iury agradeço o ótimo convívio e todo o aprendizado que tive durante minha fase acadêmica na Universidade.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho da Unidade de Laminação a Quente da CSN Engenheiros Danilo Guelli(Gerente Geral da Laminação a Quente da CSN), Sebastião José Azevedo (Gerente da Laminação a Quente), Sidney Ferreira, Euclides Emanuel, Fábio Araújo (Fabão), Thiago Vieira, Alan Granadeiro, Rafael Nascimento, Ilmo, Jéssica Gonçalves, Sandro Luiz, Michele Mendes, Elvam Miron, Fábio Capitulino, Ricardo Lessa e Thiago Reis agradeço todo o aprendizado profissional e pessoal que o grupo me ensinou.

Ao amigo Engenheiro Arthur Guimarães Alves, agradeço pela orientação industrial, dedicação, paciência, e ensinamentos para o desenvolvimento deste trabalho, além da grande ajuda familiar que o mesmo me dispôs.

Aos Professores Hamilton Gomes, Jeferson Klug e Marcelo José pela orientação acadêmica que proporcionou o ótimo desfecho do presente projeto.

A Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) pela excelente experiência que obtive no Estágio Supervisionado, ganhando muito conhecimento em termos profissionais e maturidade em termos pessoais.

A todos os professores do Curso de Engenharia Metalúrgica da UFC que ao longo dessa jornada acadêmica me proporcionaram ganhos de conhecimento para a formação profissional e pessoal.

“Ninguém tem maior amor do que aquele
que dá sua vida pelos que ama.”

(Jó, 15:13)

RESUMO

Algumas décadas atrás, a Produtividade era apenas o principal objetivo da maioria das Indústrias, porém, com a grande evolução industrial nas últimas décadas, o mercado consumidor passou a ser mais exigente na escolha de seu produto, e assim o consumidor ganhou mais liberdade de escolha a partir de várias indústrias fornecedoras. Dessa forma, as indústrias realizaram estudos e viram que para conseguir alcançar sucesso sobre o mercado consumidor, a Produtividade não era apenas o único motivo a se preocupar, e sim outros dois fatores: A Qualidade do Produto e o Valor do Produto. O que se sabe é que, com uma combinação de boa produtividade e boa qualidade pode-se obter um produto que agregue um valor adequado para o cliente garantindo sua satisfação, e conseqüentemente atraindo um bom mercado consumidor para a indústria de forma a trazer um excelente retorno financeiro para a mesma. Para alcançar esse excelente retorno financeiro, a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) trabalha procurando equilibrar os dois fatores: PRODUTIVIDADE x QUALIDADE. Com a tecnologia e automação empregada em seus processos, a Usina consegue atingir uma boa Produtividade, e por tanto o fator diferencial é então a QUALIDADE DO PRODUTO. A partir desse momento entra em atuação na indústria a Engenharia com suas pesquisas, tecnologias e desenvolvimentos a serem adotados de forma a otimizar os processos e principalmente garantir ao produto obtido uma excelente qualidade. O presente trabalho é voltado ao estudo da qualidade dos produtos da empresa cujo tema foi resultante de um levantamento de dados em relação às reclamações dos clientes da mesma. Segundo levantamento, foi observado que as maiores reclamações são de Bobinas de Aço fora das condições padrão de Planicidade. Sendo assim, nesse trabalho faz-se um estudo teórico e prático sobre Laminação a Quente (especificamente, no Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* da LTQ#2) com aplicação da Metodologia 6 σ para busca de melhoria de qualidade em termos de planicidade de bobinas de aço, obtendo como consequência a total satisfação dos clientes da empresa.

Palavras-Chave: Sistema de Resfriamento *Laminar Flow*, Planicidade, Microestrutura e Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

A few decades ago, productivity only was the main goal of most industries, however, with the large industrial development in the past decades, the consumer market has become to be more demanding in choosing its product, and so the consumer obtained more freedom of choice from various supplier industries. Thus, industries performed studies and concluded that to obtain success on the consumer market, Productivity wasn't the only reason to worry, but two other factors: Product's Quality and Product's Cost. What is known is that with a combination of a good productivity and a good quality can get a product that adds an appropriate value for the client ensuring his satisfaction, and thus attracting a good consumer market for the industry to bring an excellent financial return to it. To obtain this excellent financial return, the National Steel Company (CSN) works seeking to balance the two factors: PRODUCTIVITY x QUALITY. With the technology and the automation used in its processes, the company can obtain a good productivity, and therefore the differential factor is then the PRODUCT'S QUALITY. From this moment comes into operation in the industry, the Engineering with its researches, technologies and developments to be adopted to optimize processes and especially to ensure an excellent quality to final product. This project is directed to a study about the products' quality of the company whose theme was resultant of a survey of data in relation to complaints of the company's customers. According to a survey of data, it was observed that the biggest complaints are about coils of steel outside the standard conditions of flatness. Therefore, in this project makes a theoretical and practical study of Hot Rolling (specifically , in the Cooling System Laminar Flow of LTQ# 2) with application of the 6σ methodology to obtainment of improvement of the quality in terms of flatness of steel coils, obtaining as result the total satisfaction of the company's customers.

Key-Words: Cooling System Laminar Flow, Flatness, Microstructure and Mechanical Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de Bobinas com Desvio de Planicidade	28
Figura 2 – Levantamento de Dados sobre Reclamações de Clientes da CSN.....	30
Figura 3 – Exemplos de defeitos de planicidade em bobinas de aço	31
Figura 4 – Levantamento de Dados sobre Interferência no CT por Acanoamento nos Aços	32
.....	
Figura 5 – Esquema de um Trem Contínuo de Laminação	35
Figura 6 - Fornos reaquecimento de placas LTQ#2	36
Figura 7 - Laminador de Desbaste LTQ#2	36
Figura 8 - Laminador de Acabamento LTQ#2	37
Figura 9 – Sistema de Resfriamento <i>Laminar Flow</i> LTQ#2	37
Figura 10 – Bobinadora LTQ#2	38
Figura 11 – Planta Industrial da Unidade de Laminação(LTQ#2) da CSN	38
Figura 12 – Esquema do Sistema de Resfriamento <i>Laminar Flow</i> da LTQ#2	40
Figura 13 – Partes do Sistema de Resfriamento <i>Laminar Flow</i>	41
Figura 14 – As 3 Regiões de Transferência de Calor observadas ao longo do Sistema <i>Laminar Flow</i>	43
.....	
Figura 15 – Ondulações de um Produto Laminado	45
Figura 16 – Amplitude do Desvio de Planicidade (Flecha, h)	46
Figura 17– Condições de Planicidade que podem ser observadas em Placas Laminadas	47
.....	
Figura18 - Exemplo Diagrama ou Gráfico de Pareto	52

Figura 19 - Exemplo Diagrama de Dispersão.....	54
Figura 20 - Exemplo de gráficos para análise de residuais	54
Figura 21 - Exemplo de Gráfico de Controle	56
Figura 22 – Etapas da Metodologia 6 Sigma	57
Figura 23 – Diagrama de Pareto da Matriz de Causa e Efeito	60
Figura 24 – Diagrama de Pareto para o RPN das Causas de Falha	64
Figura 25 – Diferentes Estratégias de Resfriamento estabelecidas nos testes realizados aos Aços IF (Espessura: 3. 33 mm) e Aço Microligado ao Nb (Espessuras: 4.03 , 6.40 e 9.44 mm)	68
Figura 26.a - Ondulômetro utilizado	68
Figura 26.b - Flecha medida(h) nas Bobinas	69
Figura 27 - Corte da Bobina para obtenção de amostras para Ensaio em Laboratório	69
Figura 28 – Regiões ao longo da Espessura de interesse em estudo	70
Figura 29 – Micrografia das 7 Bobinas de Aço IF (Espessura: 3.33 mm)	72
Figura 30 – Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico (em μm) ao longo da espessura para as 7 Bobinas de Aço IF	73
Figura 31 – Quadro Comparativo (Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico em função da Microestrutura) para o Aço IF	74
Figura 32 – Micrografia das 3 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4.03 mm)	75
Figura 33 – Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico (em μm) ao longo da espessura para as 3 Bobinas de Aço Microligado ao Nb	76

Figura 34 – Quadro Comparativo (Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico em função da Microestrutura) para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4.03 mm)	77
Figura 35 – Micrografia das 7 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm)	79
Figura 36 – Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico (em μm) ao longo da espessura para as 7 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm)	79
Figura 37 – Quadro Comparativo (Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico em função da Microestrutura) para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm)	80
Figura 38 – Micrografia das 4 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9.44 mm)	82
Figura 39 – Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico (em μm) ao longo da espessura para as 4 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9.44 mm)	83
Figura 40 – Quadro Comparativo (Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico em função da Microestrutura) para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9.44 mm)	84
Figura 41 - Variação do Diâmetro Médio do Grão (Face Inferior e Superior) para diferentes Espessuras da Tira a Quente, considerando todas as Estratégias de Resfriamento estabelecidas	86
Figura 42 - Variação do Diâmetro Médio do Grão (Face Inferior e Superior) para diferentes Espessuras da Tira a Quente de Aço Microligado ao Nb, considerando apenas as Estratégias de Resfriamento de 70%-30% e 60%-40%	87

Figura 43 – Variação da Flecha Média para as Diferentes Estratégias de Resfriamento para o Aço IF (Espessura: 3.33 mm)	88
Figura 44 - Diferentes Estratégias de Resfriamento estabelecidas ao Aço IF em função da Flecha Média e Variação do Diâmetro Médio do Grão Ferrítico (Face Inferior e Face Superior)	89
Figura 45 – Perfil de Microdureza ao longo da espessura para as 7 Bobinas de Aço IF	90
Figura 46 – Quadro Comparativo (Perfil da Microdureza em função do Tamanho de Grão) para o Aço IF	91
Figura 47 – Perfil de Microdureza ao longo da espessura para as 3 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4.03 mm)	93
Figura 48 – Quadro Comparativo (Perfil da Microdureza em função do Tamanho de Grão e Fração Perlítica) para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4.03 mm)	94
Figura 49 – Perfil de Microdureza ao longo da espessura para as 7 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm)	96
Figura 50 – Quadro Comparativo (Perfil da Microdureza em função do Tamanho de Grão e Fração Perlítica) para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm)	97
Figura 51 – Perfil de Microdureza ao longo da espessura para as 4 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9.44 mm)	99
Figura 52 – Quadro Comparativo (Perfil da Microdureza em função do Tamanho de Grão e Fração Perlítica) para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9.44 mm)	100
Figura 53 – Resistência Mecânica das 7 Bobinas de Aço IF (Esp: 3.33 mm)	102

Figura 54 – Resistência Mecânica das Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Esp: 4.03 mm)	103
Figura 55 – Resistência Mecânica das 7 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Esp: 6.40 mm)	104
Figura 56 – Resistência Mecânica das 4 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Esp: 9.44 mm)	105
Figura 57 - Ductilidade das 7 Bobinas de Aço IF (Esp: 3.33 mm)	106
Figura 58 – Ductilidade das 3 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Esp: 4.03 mm)	107
Figura 59 – Ductilidade das 7 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Esp: 6.40 mm)	108
Figura 60 – Ductilidade das 4 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Esp: 9.44 mm)	109
Figura 61 – Desenho Esquemático do Modo de Resfriamento 25% / 75%	110
Figura 62 – Novo Padrão de Resfriamento adotado para a melhoria de qualidade na Planicidade das Tiras a Quente	111
Figura 63 – Ocorrências de TB por Interferência na medição da Temperatura de Bobinamento em 2013	112
Figura 64 – Número de reclamações da Mercedes por Desvio de Planicidade em 2013	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tolerâncias no desvio de aplainamento das chapas finas a quente	46
Tabela 2: Tolerância de planicidade para chapas laminadas a quente	46
Tabela 3 - Exemplo do SIPOC	50
Tabela 4 - Exemplo do FMEA adaptado	51
Tabela 5 - Exemplo para pontuação RPN	52
Tabela 6 – Exemplo de Modelo 5W/2H	55
Tabela 7 – Ferramenta de Qualidade (SIPOC)	58
Tabela 8 – Ferramenta de Qualidade e Estatística (Matriz de Causa e Efeito)	59
Tabela 9 – Critérios de Pontuação para as Causas de Falha identificadas pelo FMEA	62
Tabela 10 – Causas de Falha no Processo do Trem Acabador	63
Tabela 11 – Causas de Falha no Processo de Resfriamento da Tira via <i>Laminar Flow</i>	63
Tabela 12 – Causas de Falha no Processo de Medição do CT	64
Tabela 13 – <i>Ranking</i> das Causas de Falhas conforme pontuação de RPN	65
Tabela 14 – Ações Rápidas (<i>Quick Hits</i>) para prevenção das Causas de Falha Projeto/processo	66

LISTA DE SIGLAS

ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração

ARBL – Alta Resistência e Baixa Liga

AISE – *Association of Iron and Steel Engineers*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

BC – Baixo Carbono

CP – Corpo de Prova

CSN – Companhia Siderúrgica Nacional

CT – *Coiling Temperature* (Temperatura de Bobinamento)

CTC – *Coiling Temperature Control* (Controle da Temperatura de Bobinamento)

DMAIC – *Define, Measure, Analyse, Improve, Control*

DBS – *Data Binary System* (Software de Armazenamento e Controle de dados operacionais da CSN)

FDT – *Finish Delivery Temperature* (Temperatura Final de Acabamento)

FMEA – *Failure Mode and Effects Analysis* (Análise de Efeitos e Modos de Falhas)

GLQ – Gerência de Laminados a Quente

GMQ – Gerência de Manutenção dos equipamentos de Laminados a Quente

h – Flecha Média (Média das amplitudes de ondulações laterais presente em bobinas)

IF – *Interstitial Free* (Livre de Intersticiais)

LDC – Linha de Decapagem Contínua

LE – Limite de Escoamento

LNE 50 – Nome de Especificação de Aço conforme NBR 6655(Composição e Propriedades específicos)

LPBQ - Linha de Preparação de Bobinas a Quente

LR – Limite de Resistência

LTF - Linha de Laminação de Tiras a Frio

LTQ#1 - Linha de Laminação de Tiras a Quente nº 1

LTQ#2- Linha de Laminação de Tiras a Quente nº 2

LZC– Linha de Zincagem Contínua

MC – Médio Carbono

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

Nb – Nióbio

RPN – *Risk Priority Number* (Índice de Risco e Prioridade)

SIPOC – *Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Costumers*

TB – Temperatura de Bobinamento Baixa

TGM – Tamanho de Grão Médio

V(Superior) - Vazão de Água na Parte Superior do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow*

V(Inferior) - Vazão de Água na Parte Inferior do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow*

VOC – Voz do Cliente

UBC – Ultra Baixo Carbono

5W/2H – *What, Where, When, Why, Who, How, How Much*

6σ - Metodologia de redução na variabilidade de processos e problemas

∅ - Diâmetro médio do Grão Ferrítico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
2 OBJETIVOS	33
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
3.1 Laminação a quente	35
3.2 Sistema de Resfriamento <i>Lamina Flow</i> da Unidade LTQ#2 da CSN	39
3.3 Planicidade da chapa laminada	44
3.4 Metodologia 6 sigma	48
3.4.1 <i>Modo DMAIC</i>	49
3.4.1.1 <u>Define (Fase Definir)</u>	49
3.4.1.1.1 <u>VOC</u>	49
3.4.1.1.2 <u>SIPOC</u>	50
3.4.1.1.3 <u>FMEA</u>	51
3.4.1.2 <u>Measure (Fase Medir)</u>	52
3.4.1.3 <u>Analyse (Fase Analisar)</u>	53
3.4.1.3.1 <u>Análise de Regressão Linear</u>	53
3.4.1.4 <u>Improve (Fase Melhorar)</u>	55
3.4.1.5 <u>Control (Fase Controlar)</u>	55
3.4.1.5.1 <u>Gráficos de Controle</u>	56
4 METODOLOGIA E RESULTADOS	57
4.1 <i>Define (Fase Definir)</i>	57
4.1.1 <i>SIPOC</i>	58

4.1.2 Matriz de Causa e Efeito	59
4.1.3 Diagrama de Pareto	60
4.1.4 Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA)	61
4.1.5 Quick Hits do FMEA (Ações Rápidas do FMEA)	65
4.2 Measure (Fase Medir)	66
4.2.1 Testes realizados no Sistema de Resfriamento Laminar Flow	66
4.2.2 Medição de Planicidade	68
4.2.3 Corte para obtenção de amostras	69
4.2.4 Ensaio de Tração	70
4.2.5 Ensaio de Metalografia	70
4.2.5.1 Tamanho de Grão	71
4.2.5.2 Microdureza	71
4.3 Analyse (Fase Analisar)	71
4.3.1 Análise da Evolução Microestrutural	71
4.3.1.1 Aço IF (Espessura: 3,33 mm)	71
4.3.1.1.1 <u>Micrografia ao longo da Espessura</u>	71
4.3.1.1.2 <u>Tamanho de Grão</u>	73
4.3.1.1.3 <u>Discussões dos Resultados</u>	73
4.3.1.2 Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4,03 mm)	75
4.3.1.2.1 <u>Micrografia ao longo da Espessura</u>	75
4.3.1.2.2 <u>Tamanho de Grão</u>	76
4.3.1.2.3 <u>Discussões dos Resultados</u>	77

4.3.1.3 <u>Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6,40 mm)</u>	78
4.3.1.3.1 <u>Micrografia ao longo da Espessura</u>	78
4.3.1.3.2 <u>Tamanho de Grão</u>	79
4.3.1.3.3 <u>Discussões dos Resultados</u>	80
4.3.1.4 <u>Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9,44 mm)</u>	82
4.3.1.4.1 <u>Micrografia ao longo da Espessura</u>	82
4.3.1.4.2 <u>Tamanho de Grão</u>	83
4.3.1.4.3 <u>Discussões dos Resultados</u>	83
4.3.1.5 <u>Discussões dos Resultados em comparação com os testes para espessuras diferentes</u>	85
4.3.2 <u>Análise de Planicidade</u>	88
4.3.2.1 <u>Planicidade do Aço IF</u>	88
4.3.2.2 <u>Discussões dos Resultados</u>	88
4.3.3 <u>Análise da Microdureza</u>	90
4.3.3.1 <u>Aço IF (Espessura: 3,33 mm)</u>	90
4.3.3.1.1 <u>Perfil de Microdureza</u>	90
4.3.3.1.2 <u>Discussões dos Resultados</u>	90
4.3.3.2 <u>Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4,03 mm)</u>	93
4.3.3.2.1 <u>Perfil de Microdureza</u>	93
4.3.3.2.2 <u>Discussões dos Resultados</u>	93
4.3.3.3 <u>Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6,40 mm)</u>	96
4.3.3.3.1 <u>Perfil de Microdureza</u>	96

4.3.3.3.2 <u>Discussões dos Resultados</u>	96
4.3.3.4 Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9,44 mm)	99
4.3.3.4.1 <u>Perfil de Microdureza</u>	99
4.3.3.4.2 <u>Discussões dos Resultados</u>	99
4.3.4 Análise das Propriedades Mecânicas	102
4.3.4.1 Análise da Resistência Mecânica	102
4.3.4.1.1 <u>Aço IF (Espessura: 3,33 mm)</u>	102
4.3.4.1.2 <u>Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4,03 mm)</u>	103
4.3.4.1.3 <u>Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6,40 mm)</u>	104
4.3.4.1.4 <u>Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9,44 mm)</u>	105
4.3.4.2 Análise da Ductilidade	106
4.3.4.2.1 <u>Aço IF (Espessura: 3,33 mm)</u>	106
4.3.4.2.2 <u>Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4,03 mm)</u>	107
4.3.4.2.3 <u>Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6,40 mm)</u>	108
4.3.4.2.4 <u>Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9,44 mm)</u>	109
4.4 Improve (Fase Melhorar)	110
4.5 Control (Fase Controlar)	112
5 CONCLUSÕES	115
6 PROPOSTAS PARA TRABALHO	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

1 INTRODUÇÃO

A Unidade de Laminação de Tiras a Quente (LTQ#2) da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) situada na Cidade de Volta Redonda é um complexo industrial com capacidade de produção de cerca de 5,1 milhões de t/ano. A LTQ#2 em sua responsabilidade de fornecer Produtos Laminados possui tecnologias que permitem a produção de Laminados a Quente que atendam às tolerâncias mais restritivas do mercado (com espessuras variando entre 2 a 12,7 mm e larguras entre 675 a 1545 mm) para uma grande variedade de Aços, procurando manter acima de tudo a garantia do fornecimento de um Produto Laminado de excelente qualidade.

A LTQ#2 é um setor muito importante para manter a boa produtividade da Usina Siderúrgica. Há algumas décadas atrás, a Produtividade era apenas o principal objetivo da maioria das Indústrias, porém, com a grande evolução industrial nas últimas décadas o mercado consumidor passou a ser mais exigente na escolha de seu produto, e assim o consumidor ganhou mais liberdade de escolha a partir de várias indústrias fornecedoras.

Dessa forma, as indústrias realizaram estudos e viram que para conseguir alcançar sucesso no mercado consumidor, a Produtividade não era apenas o único motivo a se preocupar, e sim outros dois fatores: A Qualidade do Produto e o Valor do Produto.

O que se sabe é que, com uma combinação de boa produtividade e boa qualidade pode-se obter um produto que agregue um valor adequado para o cliente garantindo sua satisfação, e conseqüentemente atraindo um bom mercado consumidor para a indústria de forma a trazer um excelente retorno financeiro para a mesma.

Para alcançar esse excelente retorno financeiro, a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) trabalha procurando equilibrar os dois fatores PRODUTIVIDADE X QUALIDADE. Com a tecnologia e automação empregada em seus processos, a Usina consegue atingir uma boa Produtividade, e por tanto o fator diferencial é então a QUALIDADE DO PRODUTO.

A partir desse momento entra em atuação na indústria a Engenharia com suas pesquisas, tecnologias e desenvolvimentos a serem adotados de forma a otimizar os processos e principalmente garantir ao produto obtido uma excelente qualidade.

As Bobinas produzidas na CSN durante sua fabricação são submetidas à análise de vários equipamentos de medição (Perfilômetros, Pirômetros, etc.) que visam observar e controlar quaisquer desvios fora das condições de qualidade do Produto Laminado.

Os principais parâmetros que tem um grande “peso” na Qualidade do Produto Laminado são: Condições de Forma (Perfil Transversal e Planicidade) e Propriedades Mecânicas (associadas com as condições de tratamento termomecânico e microestrutura do Produto Laminado).

Segundo RIZZO [14] para as Condições de Forma (Perfil Transversal e Planicidade), sabe-se que ao longo da Unidade de Laminação a Quente existem alguns fatores que prejudicam na Qualidade do Produto Laminado, através da geração de Desvios no Perfil Transversal (ex: gerando uma Coroa no Produto fora das condições normais) e de Desvios na Planicidade (ex: gerando defeitos como *Camber*, Ondulado Central, Ondulado Unilateral/Bilateral, Acanoamento, etc.) (Figura 1):



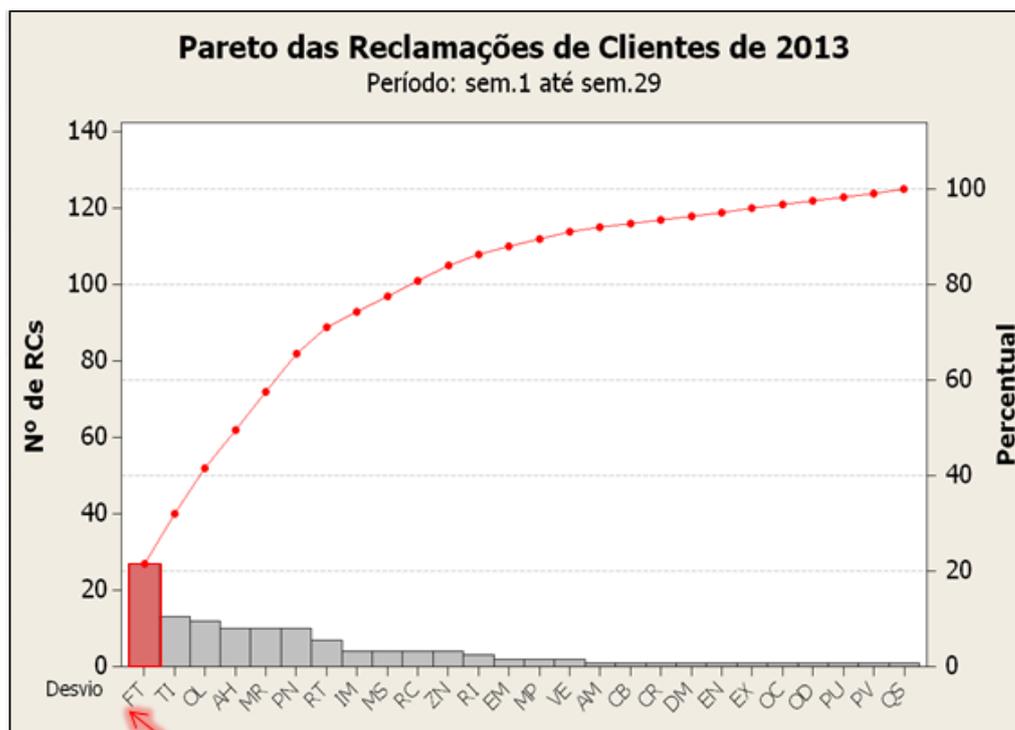
Figura 1 – Exemplo de Bobinas com Desvio de Planicidade (Fonte: [3])

Dentre os fatores que podem prejudicar a Qualidade do Produto Laminado em relação às condições de forma (perfil transversal e planicidade)[14]:

- a) Desequilíbrio na aplicação dos esforços de conformação durante a Laminação a Quente dos produtos planos;
- b) Cilindros Desnivelados;
- c) Impactos do material durante o seu deslocamento na Mesa de Rolos;
- d) Sistemas Roll Bending e Roll Shifting com problemas;
- e) **Resfriamento heterogêneo dos produtos no Sistema de Resfriamento.**

Para as Condições de Propriedades Mecânicas, sabe-se que ao longo da Unidade de Laminação a Quente também existem fatores que prejudicam na Qualidade do Produto Laminado, através da geração de propriedades mecânicas não-uniformes e indesejáveis, dentre os principais fatores destaca-se, o RESFRIAMENTO DIFERENCIADO, pois é na etapa de resfriamento da tira que ocorrem as principais transformações de fase que vão conferir ao aço suas propriedades mecânicas definitivas [14].

O presente trabalho é voltado ao estudo da qualidade dos produtos da empresa cujo tema foi resultante de um levantamento de dados em relação às reclamações de clientes internos e externos da mesma (Figura 2). Segundo o levantamento foi observado que as maiores reclamações são de bobinas fora das condições adequadas de Planicidade.



FT: Fora de Aplainamento

Figura 2 – Levantamento de Dados sobre Reclamações de Clientes da CSN

(Fonte: Minitab)

Sendo assim, nesse trabalho faz-se um estudo teórico e prático sobre Laminação a Quente (especificamente, no Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* da LTQ#2) com aplicação da Metodologia 6σ para busca de melhoria de qualidade em termos de planicidade de bobinas de aço, obtendo como consequência a total satisfação dos clientes da empresa.

Uma influência relevante por parte do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* pode causar desvios de Planicidade e Geração de Propriedades Mecânicas Não-Uniformes Indesejáveis, prejudicando então na qualidade do Produto Laminado. Desta forma, este trabalho visa realizar investigações, explorando as condições e limitações do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* com uso da Metodologia 6 Sigma, além de propor trabalhos futuros como medidas corretivas das eventuais causas metalúrgicas para esses problemas de qualidade.

O Material principal em estudo é o Aço Microligado ao Nb (Aço que recebe mais reclamações de Desvio de Planicidade pelos clientes), porém é de conhecimento dos próprios engenheiros e técnicos da Unidade de Laminação a Quente da CSN que o desvio de Planicidade pode ser evidenciado no Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* pela ocorrência do fenômeno de Acanamento (a Tira a Quente tem um formato de “cano”) (Figura 3), o que propicia estagnação de água na parte superior da Tira a Quente durante sua passagem ao longo da Mesa de Resfriamento, e isso acaba gerando interferência na medição da Temperatura de Bobinamento pelo Pirômetro, dando um “falso” sinal de Temperatura de Bobinamento Baixa, quando na realidade o material está na temperatura normal.

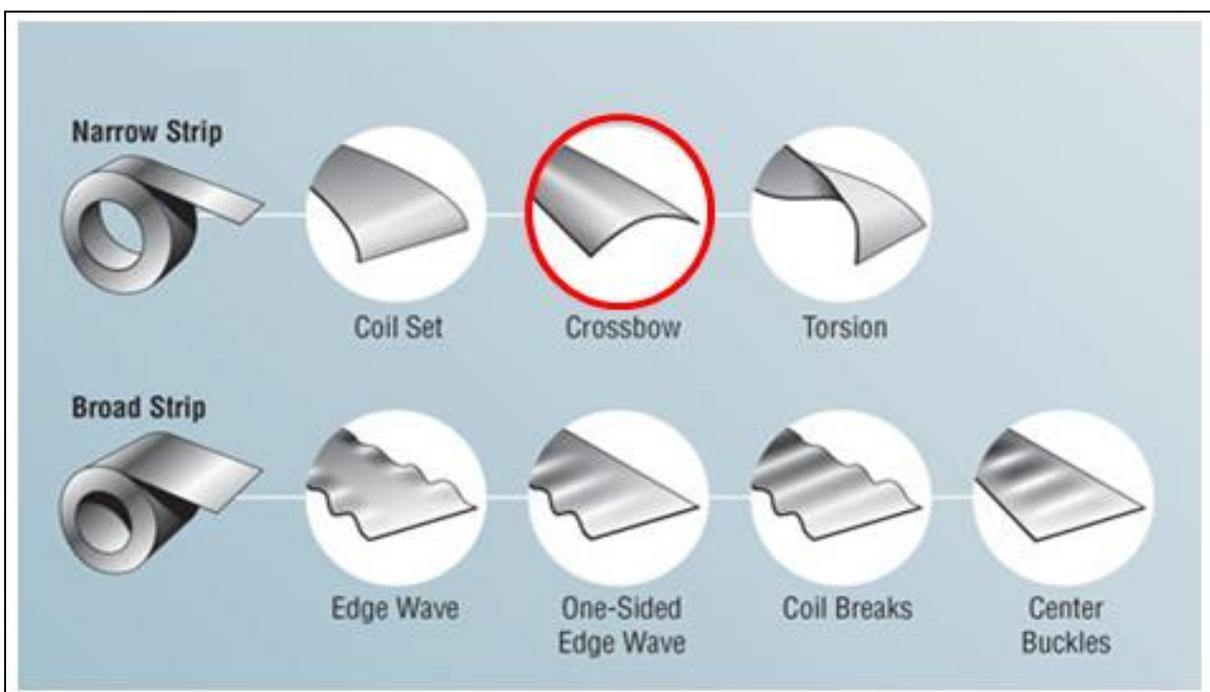


Figura 3 – Exemplos de defeitos de planicidade em bobinas de aço (Fonte: [3])

Logo, foi feito um levantamento de dados do Aço que mais sofria o fenômeno de Acanamento (Figura 4) e definiu-se que esse Aço seria objeto para frente de testes iniciais do presente projeto. No Levantamento de Dados, o Aço IF teve mais ocorrências de Temperatura de Bobinamento Baixa pelo fenômeno do Acanamento, e então o Aço IF também é estudado.

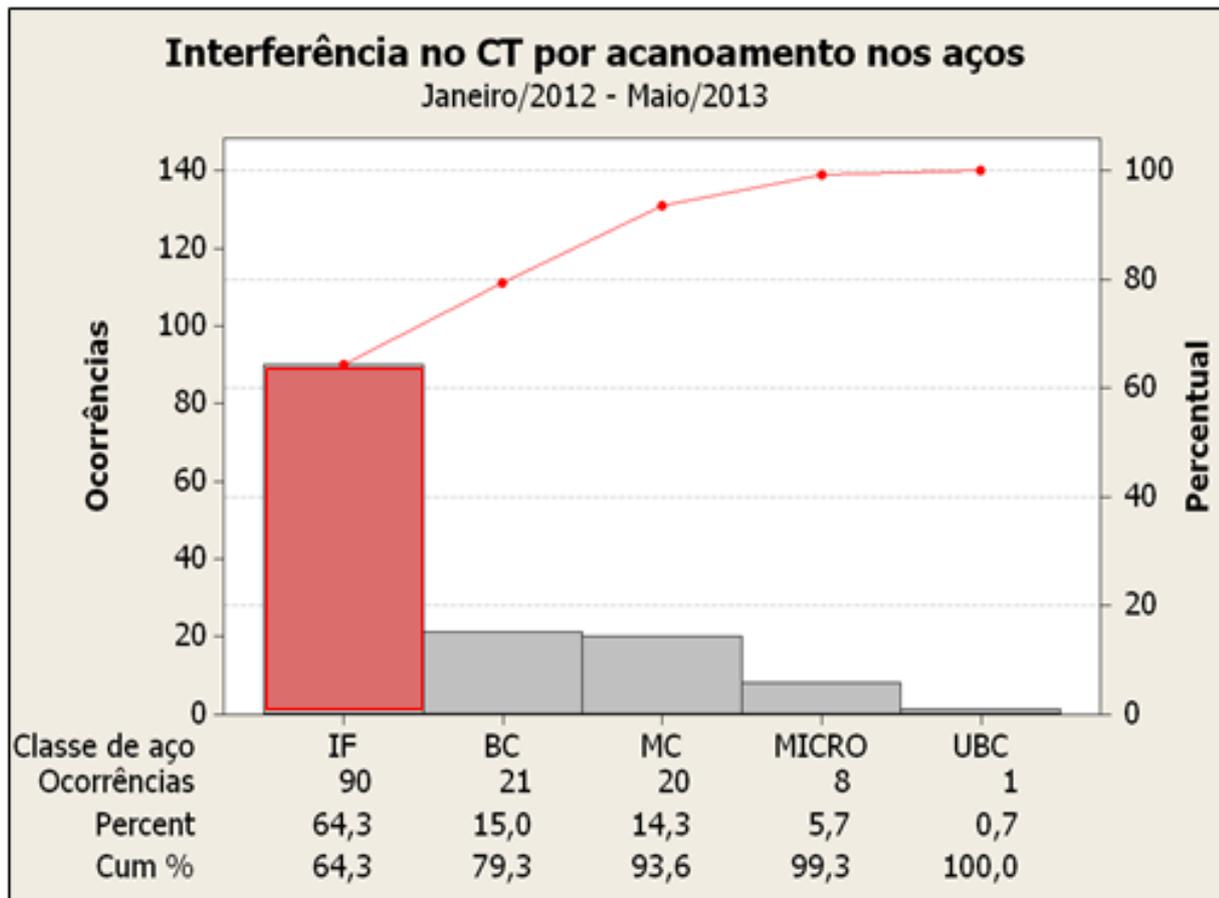


Figura 4 – Levantamento de Dados sobre Interferência no CT por Acanoamento nos Aços

(Fonte: Minitab)

São realizados, inicialmente, experimentos com base em alterações feitas no Modelo do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* (CTC) de modo a realizar diferentes estratégias de resfriamento em Bobinas sem prejudicar o processamento das mesmas. Então é feito um estudo comparativo entre as Bobinas para verificar eventuais influências sobre sua Qualidade em relação a desvios de Planicidade(conforme medições e inspeção realizados) e Propriedades Mecânicas Não-Uniformes(conforme ensaios mecânicos, dureza e metalografia realizados).

2 OBJETIVOS

Objetivos Gerais

- Aplicação da Metodologia 6σ no presente trabalho, de forma a tornar o seu desenvolvimento mais eficiente;
- Estudar a influência do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* na geração de defeitos de planicidade em tiras a quente;
- Explorar as limitações do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow*, de forma a propor medidas para manter a garantia na produção de bobinas com excelente qualidade pela CSN.

Objetivos Específicos

- Realização de testes experimentais com base em alterações no Modelo Computacional que controla o Sistema de Resfriamento *Laminar Flow*;
- Realização de medições de planicidade em tiras a quente que foram submetidas aos testes experimentais;
- Realização de medições de Tamanho de Grão ao longo da espessura das tiras a quente que foram submetidas aos testes experimentais, de forma a verificar alguma relação entre homogeneidade granulométrica e planicidade;
- Realização de medições de Microdureza ao longo da espessura das tiras a quente que foram submetidas aos testes experimentais, de forma a verificar alguma variação significativa que possa prejudicar a planicidade das tiras a quente;
- Realização de ensaios de tração nas tiras a quente que foram submetidas aos testes experimentais, de forma a verificar algum desvio de propriedades mecânicas (fora das condições pedrões especificadas pelos clientes) resultante dos testes realizados;
- Aplicação de uma Medida Corretiva (Solução) para resolver o problema relacionado a ocorrência de desvios de planicidade nas tiras a quente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Laminação a Quente

Segundo Rizzo [14], a Laminação é um processo de conformação mecânica onde o material é forçado a transpassar entre dois cilindros, estes girando em sentidos opostos, praticamente com a mesma velocidade superficial e espaçados entre si em uma distância menor que o valor da dimensão inicial do material a ser deformado. Ao passar entre os cilindros à tensão gerada entre a Placa e os Cilindros promove uma deformação Plástica na qual a espessura é diminuída, o comprimento é aumentado e a largura pode ser aumentada ou em alguns casos pode não ser alterada.

A Laminação a Quente é um processo termomecânico cuja finalidade é transformar Placas de Aço grossas em Produtos Laminados de Aço com pequenas espessuras, de modo que a temperatura do material seja suficiente para quando for encruado durante a deformação o mesmo, em seguida, ser submetido a recristalização no intervalo entre passes de Laminação.

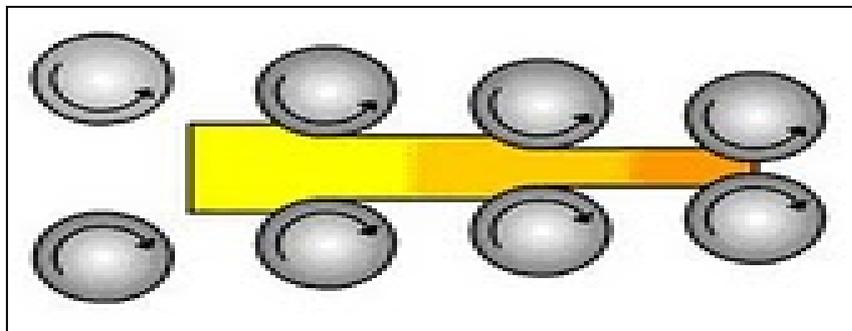


Figura 5 – Esquema de um Trem Contínuo de Laminação (Fonte: [14])

Na unidade de Laminação a Quente (LTQ#2) da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) o processo de Laminação consiste em enfiar as placas num forno de reaquecimento e, logo após o enfiamento, processar essas placas na área de Laminação (Constituído por Laminadores de Desbaste e de Acabamento) e então realizar o resfriamento do Produto Laminado (Tira a Quente) em uma Mesa de Resfriamento (Sistema *Laminar Flow*), concluindo o processo com o Bobinamento do Produto Laminado para dar a forma econômica ao mesmo [3]. Assim, o Processo de Laminação a Quente da CSN consiste em cinco etapas:

a) Reaquecimento das Placas

- Objetivo: Reaquecer uniformemente as Placas até se tornarem suficientemente plásticas para o processamento subsequente.
- Temperatura de Enfornamento: Ambiente ou a Quente.
- Temperatura de Extração: Acima de 1150°C
- Produto Laminado: Placa Quente



Figura 6 - Fornos reaquecimento de placas LTQ#2 (Fonte: CSN)

b) Laminação de Desbaste

- Objetivo: Realizar as primeiras etapas de redução de espessura, definir a largura do Esboço através da atuação dos Laminadores Verticais. Nessa etapa se eliminam a estrutura bruta de fusão e vazios das Placas, refinando os grãos.
- Temperatura de Início de Processo: 1150 – 1250 °C
- Temperatura de Término de Processo: Acima de 1000°C
- Produto Laminado: Esboço



Figura 7 - Laminador de Desbaste LTQ#2 (Fonte: CSN)

c) Laminação de Acabamento

- Objetivo: Reduzir a espessura do Esboço até a espessura desejada. Este processo termomecânico é fundamental para o atendimento das propriedades especificadas da Tira a Quente.
- Temperatura de Início de Processo: Acima de 980°C
- Temperatura de Término de Processo: 830 – 950 °C
- Produto Laminado: Tira a Quente



Figura 8 - Laminador de Acabamento LTQ#2 (Fonte: CSN)

d) Resfriamento da Tira (Sistema de Resfriamento *Laminar Flow*)

- Objetivo: Realizar um resfriamento da Tira de modo a atingir uma Temperatura de Bobinamento adequada. Esse resfriamento associado com o processo termomecânico anterior são os responsáveis por garantir que a microestrutura do Aço atenda às propriedades mecânicas especificadas.
- Temperatura de Início de Processo: 830 – 950 °C
- Temperatura de Término de Processo: 550 – 750 °C
- Produto Laminado: Tira a Quente resfriada



Figura 9 – Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* LTQ#2 (Fonte: CSN)

e) Bobinamento

- Objetivo: Compactar a Tira de forma a dar um forma mais econômica a mesma, melhorando as condições de transporte e logística.
- Temperatura de Bobinamento: 550 – 750 °C
- Produto Laminado: Bobina a Quente

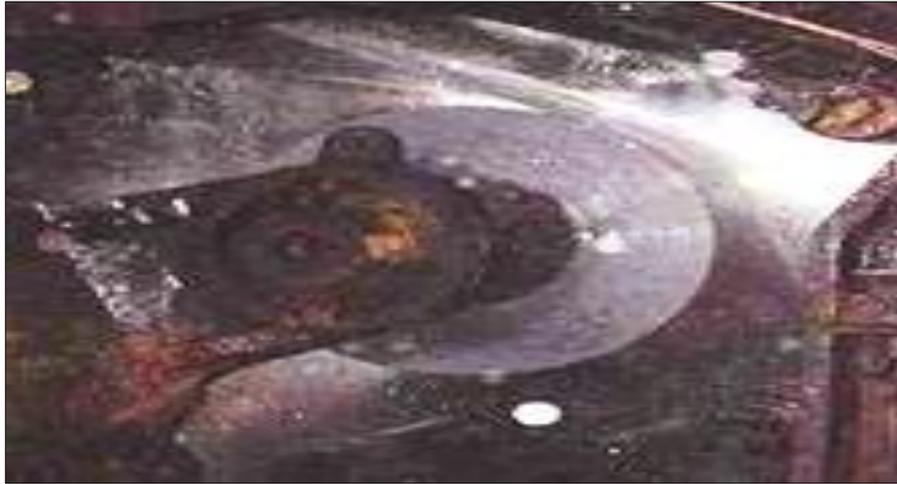
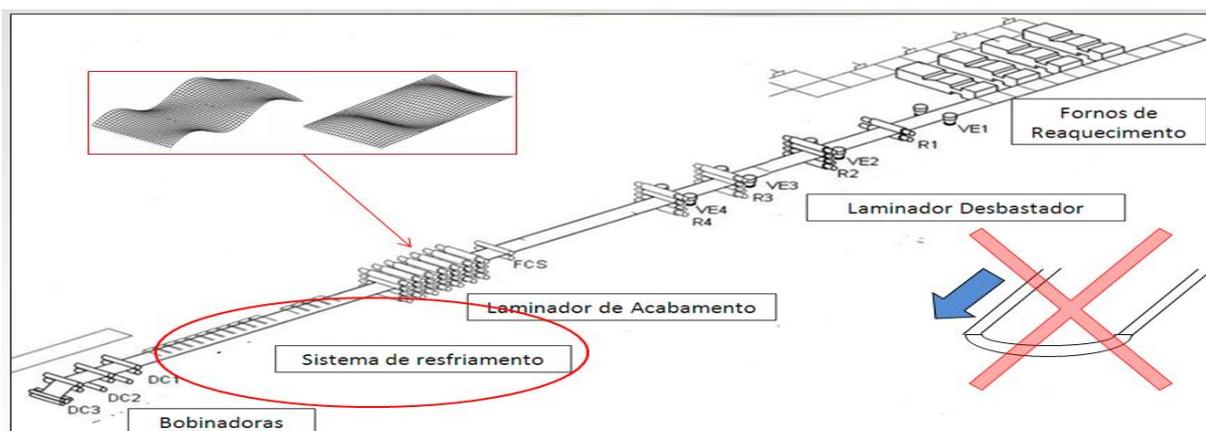


Figura 10 – Bobinadora LTQ#2 (Fonte: CSN)

O presente trabalho é voltado para um estudo teórico e prático da etapa de Resfriamento da Tira, em que na LTQ#2, o processo é realizado em uma Mesa de Resfriamento constituída de Chuveiros na parte superior e inferior cujo Produto Laminado é submetido a um resfriamento forçado com água que sai destes chuveiros. Deseja-se estudar, principalmente, a influência do Sistema de Resfriamento (*Laminar Flow*) na geração de desvios de Planicidade nas tiras laminadas a quente (Figura 11):



Como manter a planicidade do acabamento?

Figura 11 – Planta Industrial da Unidade de Laminação(LTQ#2) da CSN (Fonte: CSN)

3.2 Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* da Unidade LTQ#2 da CSN

O resfriamento da Tira após sua passagem pela última Cadeira do Trem de Acabamento é muito importante no processo, pois é nessa etapa que a Tira é submetida a transformações de fases que vão conferir ao Aço suas propriedades mecânicas finais. De fato, o objetivo principal deste resfriamento controlado é proporcionar um resfriamento homogêneo ao longo da Tira, de forma a obter uma Temperatura de Bobinamento dentro das condições (Par Térmico) desejadas, e consequentemente garantir boas propriedades mecânicas para a mesma [3].

Para o resfriamento controlado de Tiras em uma Unidade de Laminação a Quente, pode-se ter 3 tipos de sistema de resfriamento[4]:

- a) Tipo Spray (Jato de água dos Chuveiros na forma de *Spray*);
- b) Tipo Laminar (Jato de água dos Chuveiros na forma de Fluxo Laminar);
- c) Tipo Cortina (Jato de água dos Chuveiros na forma de Cortina).

A Eficiência do Sistema de Cortina é MAIOR, porém, o ajuste fino de temperaturas é MAIOR no Sistema Laminar. O ideal é se trabalhar com os dois tipos em conjunto (ex : Antiga Linha de Processo de Laminação LTQ#1/CSN).

O Sistema de Resfriamento Controlado adotado pela Unidade LTQ#2/CSN é do tipo Laminar(onde o fluxo de água que incide na superfície da Tira é laminar, isto é, um jato de água em que durante sua queda não pode haver a formação de gotas, e sim deve ser um jato de água contínuo) denominado *Laminar Flow*.

Este Sistema de Resfriamento é composto por 14 Bancos de Resfriamento (14 Bancos na parte superior e 14 na parte inferior da Mesa de Resfriamento)[4]:

- a) Na parte Superior, cada Banco contem 8 Chuveiros (cada Chuveiro é constituído por 71 Tubeiras), sendo assim, tem-se:
 - 14 Bancos x 8 Chuveiros/Banco = 112 Chuveiros na parte superior do *Laminar Flow*
 - 112 Chuveiros x 71 Tubeiras/Chuveiro = 7952 Tubeiras na parte superior do *Laminar Flow*.

b) Na parte Inferior, o *Laminar Flow* é constituído por 117 Chuveiros do Tipo A(Chuveiros constituídos por 11 Tubeiras) e 117 Chuveiros do Tipo B (Chuveiros constituídos por 12 Tubeiras), sendo assim, tem-se:

- $(117 \text{ Chuveiros do Tipo A} \times 11 \text{ Tubeiras/Chuveiro}) + (117 \text{ Chuveiros do Tipo B} \times 12 \text{ Tubeiras/Chuveiro}) = 2691 \text{ Tubeiras}$ na parte inferior do *Laminar Flow*.

c) Na parte lateral (Lado Motor) do final de cada Banco de Resfriamento existe um *Spray* cuja função é projetar um jato de água na direção da superfície da Tira, de modo a remover qualquer camada de água estagnada sobre a Tira que possa prejudicar as trocas térmicas e/ou a medição do CT pelo Pirômetro. Sendo assim, tem-se:

- $14 \text{ Bancos} \times 1 \text{ Spray/Banco} = 14 \text{ Sprays Laterais no } \textit{Laminar Flow}$.

O Esquema do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* e suas partes é apresentado nas figuras 12 e 13, respectivamente.

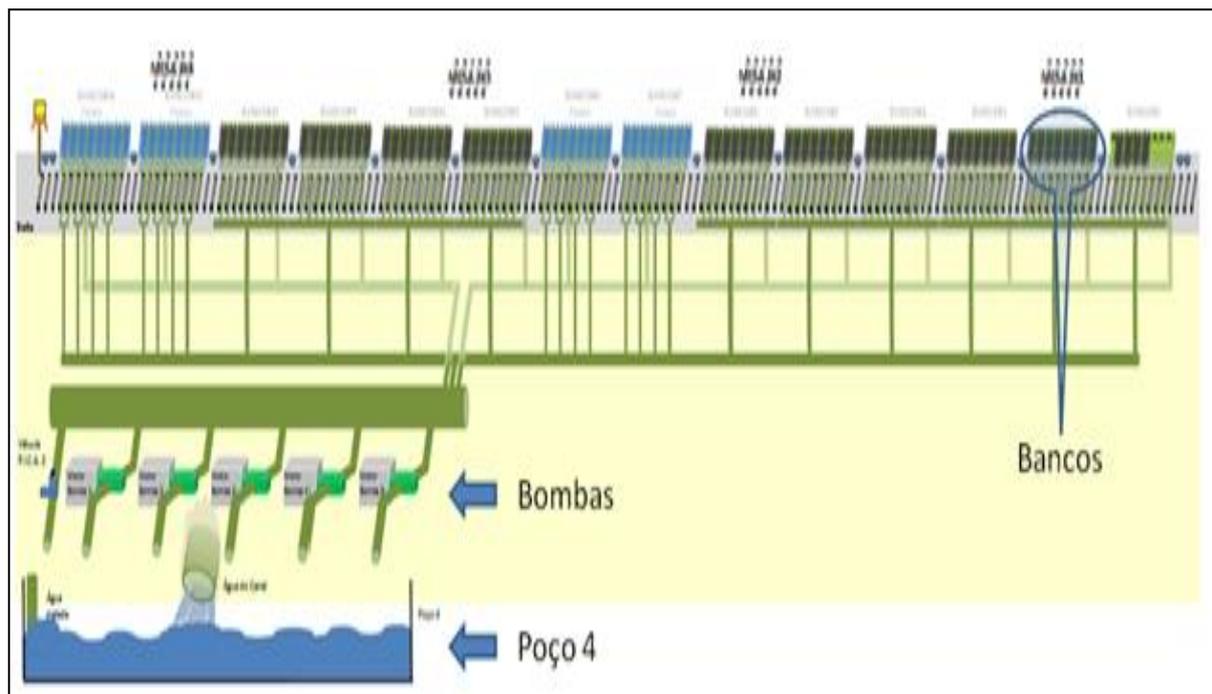


Figura 12 – Esquema do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* da LTQ#2 (Fonte: [3])

Sabe-se que, o Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* da LTQ#2 é constituído por 14 Bancos de Resfriamento tanto na parte superior como na parte inferior, sendo que 10 Bancos são denominados como Bancos Comuns (Bancos cujos Chuveiros são acionados simultaneamente para fornecer água) e os outros 4 Bancos são denominados como Bancos Vernier (Bancos cujos Chuveiros são

acionados individualmente para fornecer água, com o objetivo de fazer um ajuste fino no resfriamento da Tira caso necessário). Sendo assim, no *Laminar Flow* da LTQ#2 tem-se:

a) Bancos nº 1,2,3,4,5,6,9,10,11 e 12 (Bancos Comuns)

b) Bancos nº 7,8,13 e 14 (Bancos Vernier)

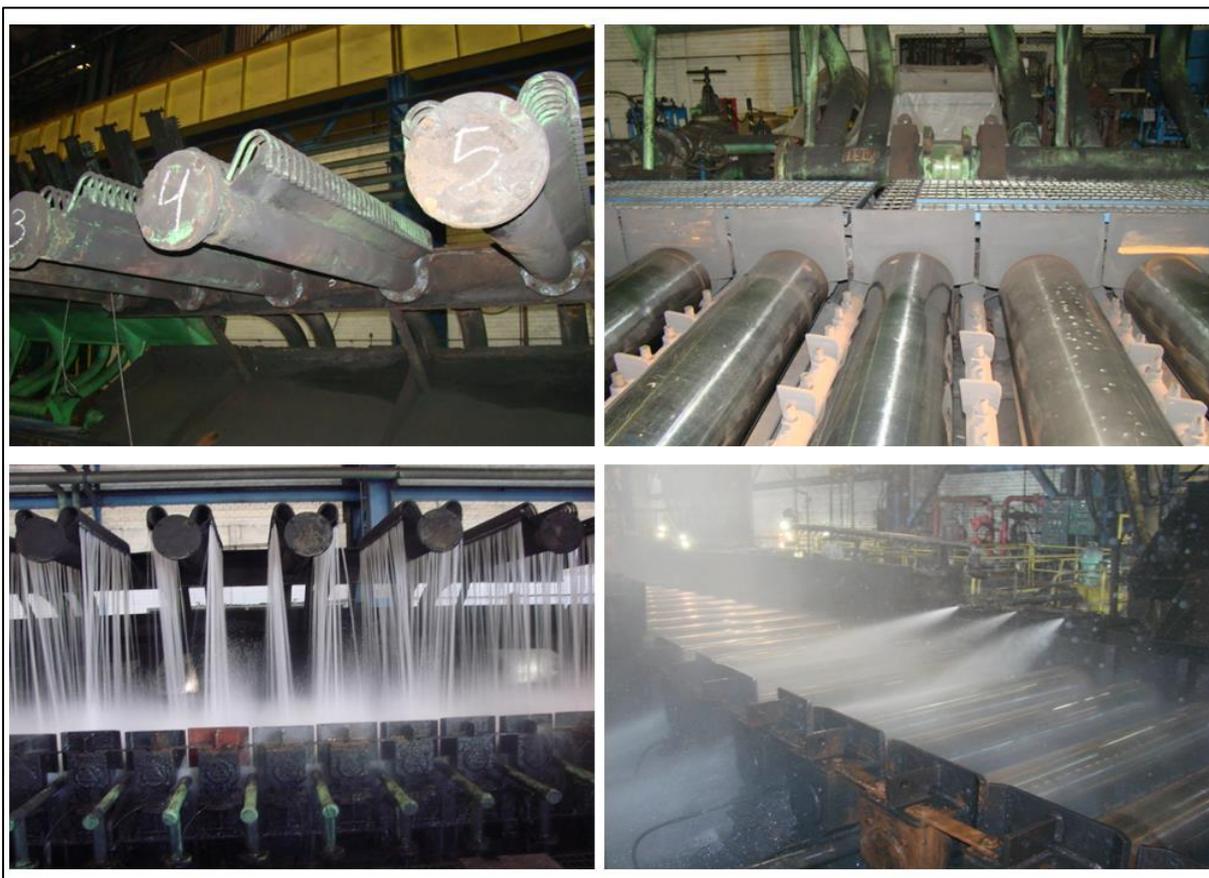


Figura 13 – Partes do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* (Fonte: CSN)

A maneira como atua o Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* depende de vários parâmetros, tais como [4]:

- a) Grau do Aço (Composição Química);
- b) Dimensões do Aço (Espessura e Largura);
- c) FDT (Temperatura final de Acabamento);
- d) Velocidade de deslocamento da Tira;
- e) CT (Temperatura de Bobinamento).

De acordo com as informações referentes ao Grau do Aço, Dimensões, FDT Visado, Velocidade visada de deslocamento da Tira ao longo da Mesa de Resfriamento e CT Visado, então é definido um Padrão Inicial de Resfriamento para a Tira conforme determinado por uma função do Modelo do *Laminar Flow* (*Cooling Temperature Control* – CTC). Porém, sabe-se que a nível industrial, nem tudo ocorre segundo o esperado, por exemplo, durante o processamento do Produto Laminado pode-se ter desvios de Espessura, de FDT Visado, de Velocidade de Deslocamento Visada, de CT Visado. Para manter uma condição de resfriamento adequada ao Aço mesmo diante desses desvios que a Tira pode estar submetida, existe uma Função no Modelo do *Laminar Flow* que propõe alterações dinâmicas no Padrão de Resfriamento a medida que o Sistema verifica estes desvios fora das condições esperadas.

Pelo Padrão Inicial de Resfriamento, têm-se informações iniciais do número de Bancos de Resfriamento a serem abertos, a ordem de abertura desses Bancos e o tempo em que eles irão ficar abertos. A partir daí, de acordo com os desvios dos principais parâmetros necessários ao Modelo CTC é feito então alterações dinâmicas no Número de Bancos a serem abertos, a Ordem de Prioridade de Abertura e o tempo de abertura dos Bancos. Essas alterações dinâmicas são feitas por uma Função no Modelo CTC com o objetivo de manter o funcionamento do Sistema *Laminar Flow* dentro das condições desejadas de resfriamento para assegurar um CT uniforme ao longo da Tira e dentro dos padrões especificados (Par Térmico).

A Vazão de cada Tubeira que compõe o Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* deve ser constante, pois a água que chega aos Bancos de Resfriamento vem com uma pressão constante controlada por uma válvula reguladora de pressão. Logo o que não é contante é a relação entre a Vazão Total Superior e a Vazão Total Inferior ($70\% V(\text{Superior}) / 30\% V(\text{Inferior})$), distribuição de água que se trabalha na CSN) do *Laminar Flow*, na qual vai depender do número de Bancos de Resfriamento que foram abertos durante a passagem da Tira pela Mesa de Resfriamento. No presente trabalho procurou alterar essa razão entre $V(\text{Superior})$ e $V(\text{Inferior})$, a partir de alterações referentes a indisponibilizar/fechar Bancos Superiores de Resfriamento que seriam abertos para o resfriamento.

Através dos jatos de água projetados pelos Chuveiros dos Bancos de Resfriamento, procura-se obter um resfriamento uniforme ao longo da Tira. Os Chuveiros Superiores estão localizados a uma altura de 1,75 m da Mesa de Saída do Laminador, enquanto os Chuveiros Inferiores estão localizados entre os rolos da mesa de resfriamento a cerca de 100 mm abaixo da superfície da Tira.

O resfriamento do material pode ser controlado através das seguintes maneiras [8]:

- Pela variação de vazão de água atuando-se em uma válvula de controle eletro-pneumática;
- Pelo modo de abertura dos Bancos de Resfriamento (depende de quais Bancos de Resfriamento estão disponíveis);
- Pela Velocidade de deslocamento da Tira (depende da velocidade da última Cadeira do Trem de Acabamento e da Velocidade do Mandril da Bobinadora).

A partir da saída da Tira da última Cadeira do Trem Acabador até a Bobinadora existem 3 regiões distintas onde a Tira tende a perder calor(Figura 14)[11]:

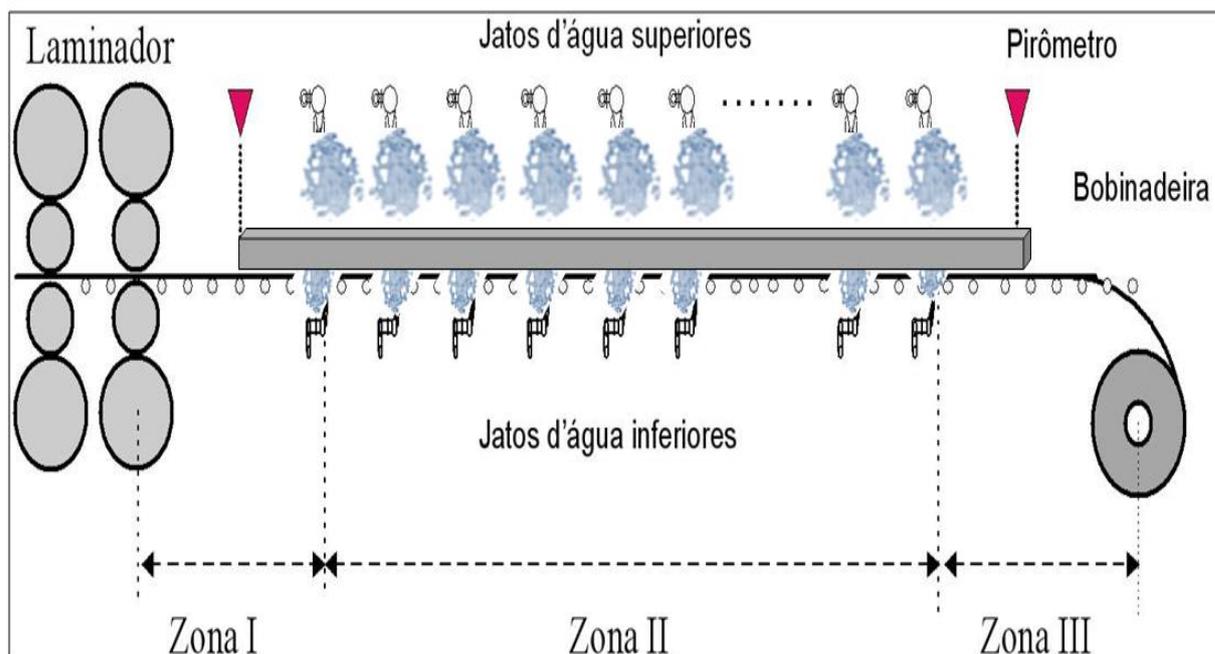


Figura 14 – As 3 Regiões de Transferência de Calor observadas ao longo do Sistema *Laminar Flow* (Fonte: [11])

Zona I: Após sair da última Cadeira do Trem de Acabamento e antes do primeiro Banco de Resfriamento em uso do *Laminar Flow*, um dado elemento da Tira tende a perder calor principalmente por Radiação e, em menor intensidade, por Condução para a Mesa de Rolos.

Zona II: Entre o primeiro e último Banco de Resfriamento em uso, um dado elemento da Tira é submetido a um ciclo de resfriamento pela ação do impacto do fluxo laminar de água intercalado com períodos de recuperação da temperatura superficial entre os jatos de água. O processo de recuperação de temperatura consiste no transiente de Condução de calor através da espessura da Tira do interior para a superfície resfriada de volta a condição estável de distribuição de temperatura. Um resfriamento secundário ocorre entre os jatos de água por Radiação, através de perdas por Condução para a Mesa de Rolos e pela água acumulada na superfície superior da Tira.

Zona III: Entre o último Banco de Resfriamento em uso e a Bobinadora, um dado elemento da Tira também tende a perder calor apenas por Radiação e, em menor intensidade, por Condução para a Mesa de Rolos (Perda de calor semelhante a Zona I).

3.3 Planicidade de Chapa Laminada

A obtenção de produtos com o Perfil Transversal e Planicidade dentro dos requisitos estabelecidos pelas normas técnicas, ou padrões da empresa ou ainda por especificações de clientes é um dos principais desafios da Laminação de Produtos Planos a Quente [14].

Um produto laminado plano ao ser colocado livre de restrições sob uma superfície plana, pode apresentar Ondulações ou Curvaturas que distorcem a sua Planicidade(Figura 15). De acordo com estudo realizado pela AISE, **a Planicidade pode ser definida como parâmetro mensurável que descreve a presença de Ondulações ou Encurvamentos, e suas posições e tamanhos ao longo do material** (GINZBURG, 1989). Um material com deficiência no aplainamento será facilmente perceptível e antiestético quando for utilizado em superfícies expostas de produtos como automóveis, eletrodomésticos, móveis, etc. Além do aspecto estético,

a deficiência de planicidade da chapa também pode gerar tensões irregulares no produto final, distorções nas peças , dificuldade de fabricação ao empregar-se métodos de Soldagem Automática , etc [11].

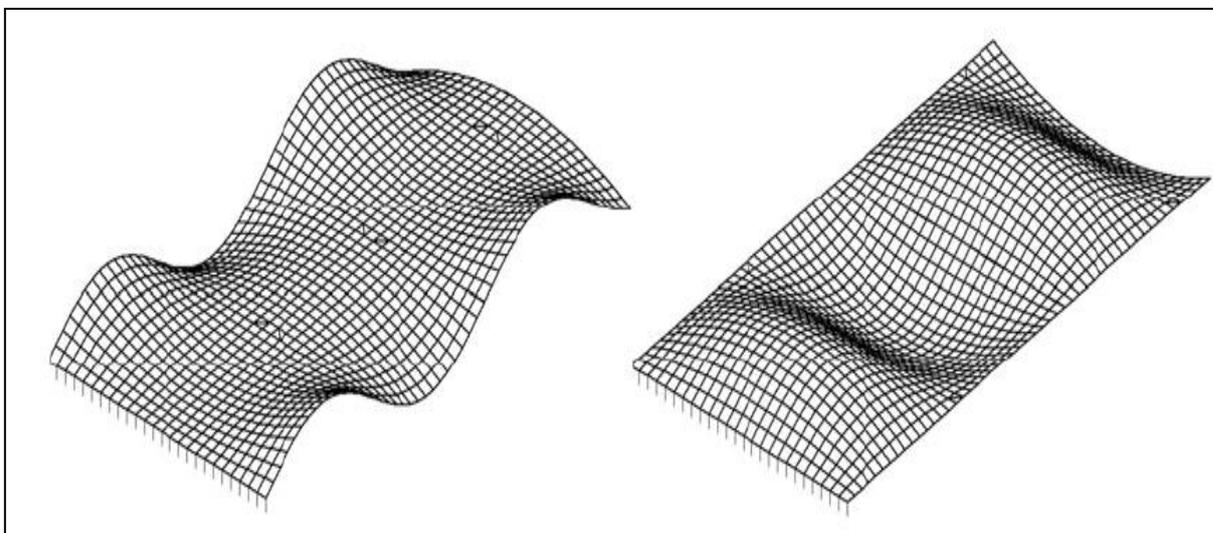


Figura 15 – Ondulações de um Produto Laminado (Fonte: [14])

Observa-se que a Planicidade está diretamente relacionada com a variação do Perfil de Seção Transversal da chapa antes e depois de uma Cadeira de Laminação. Se o perfil de uma seção transversal que sai de uma Cadeira for geometricamente dissimilar ao perfil correspondente ao material que entrou, surgirão tensões longitudinais que, dependendo da sua intensidade, provocarão diferentes alongamentos gerando ondulosos na chapa.

Apesar de ser em alguns casos facilmente visível, a medição ou determinação da intensidade do aplainamento (ou Planicidade) de uma chapa laminada é uma atividade relativamente complexa. Algumas Normas consideram como tolerância para a Planicidade, o Desvio Máximo de uma superfície plana horizontal (Flecha, h), ou seja , apenas a amplitude do Ondulado (Figura 16), este é o caso da Norma ASTM A568 e a NBR 11.888. Partindo deste conceito, os valores máximos permitidos por estas normas são mostrados nas Tabelas 1 e 2.

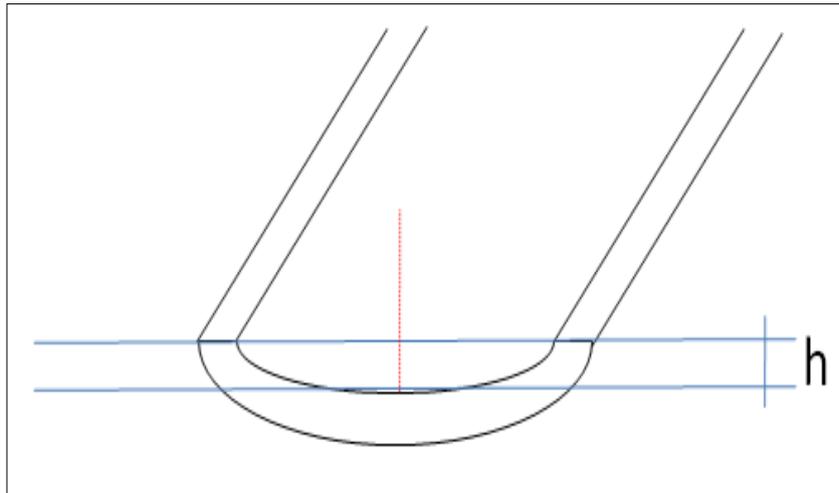


Figura 16 – Amplitude do Desvio de Planicidade (Flecha, h)

(Fonte: CSN)

Espessura nominal (e)	Desvio de aplainamento permitido em função da largura nominal (mm)					
	Aço baixa resistência			Aço alta resistência ^A		
	L ≤ 1.200	1.200 < L ≤ 1.500	L > 1.500	L ≤ 1.200	1.200 < L ≤ 1.500	L > 1.500
e ≤ 2,00	18	20	25	23	25	31
2,00 < e ≤ 5,00	15	18	23	19	23	29

Tabela 1: Tolerâncias no desvio de aplainamento das chapas finas a quente (NBR 11888, 1992).

^A No caso de aços de alta resistência com limite de escoamento mínimo especificado maior que 400 MPa, esses valores devem ser acrescidos de 25% (Fonte: [14])

Espessura especificada (mm)		Largura especificada (mm)	Tolerância de planicidade (mm)	
Acima de:	Até:		(para Limite de escoamento especificado)	
			< 310MPa	310 a 345MPa (mínimo)
1,2	1,5	≤ 900	45	60
		> 900 e ≤ 1.500	60	90
		> 1.500	75	...
1,5	4,5	≤ 1.500	45	60
		> 1.500 e ≤ 1.800	60	90
		> 1.800	75	120
4,5	< 6,0	≤ 1.200	45	60

Tabela 2: Tolerância de planicidade para chapas laminadas a quente sem processo de encruamento (aços carbono e ARBL) (ASTM A 568/A568M – 00a, 2000) (Fonte: [14])

Alguns autores preferem considerar que os defeitos de Planicidade em um material podem ser divididos basicamente em 2 tipos: ENCURVAMENTOS E ONDULAÇÕES. [14]

a) DEFEITOS NA FORMA DE ENCURVAMENTOS

- Defeito Tipo Canoa;
- Defeito Tipo Arqueado.

b) DEFEITOS NA FORMA DE ONDULAÇÕES

- Ondulado Lateral;
- Ondulado Central;
- Repuxado Lateral.

A Figura 17 apresenta algumas condições de planicidade que se pode esperar em Placas Laminadas.

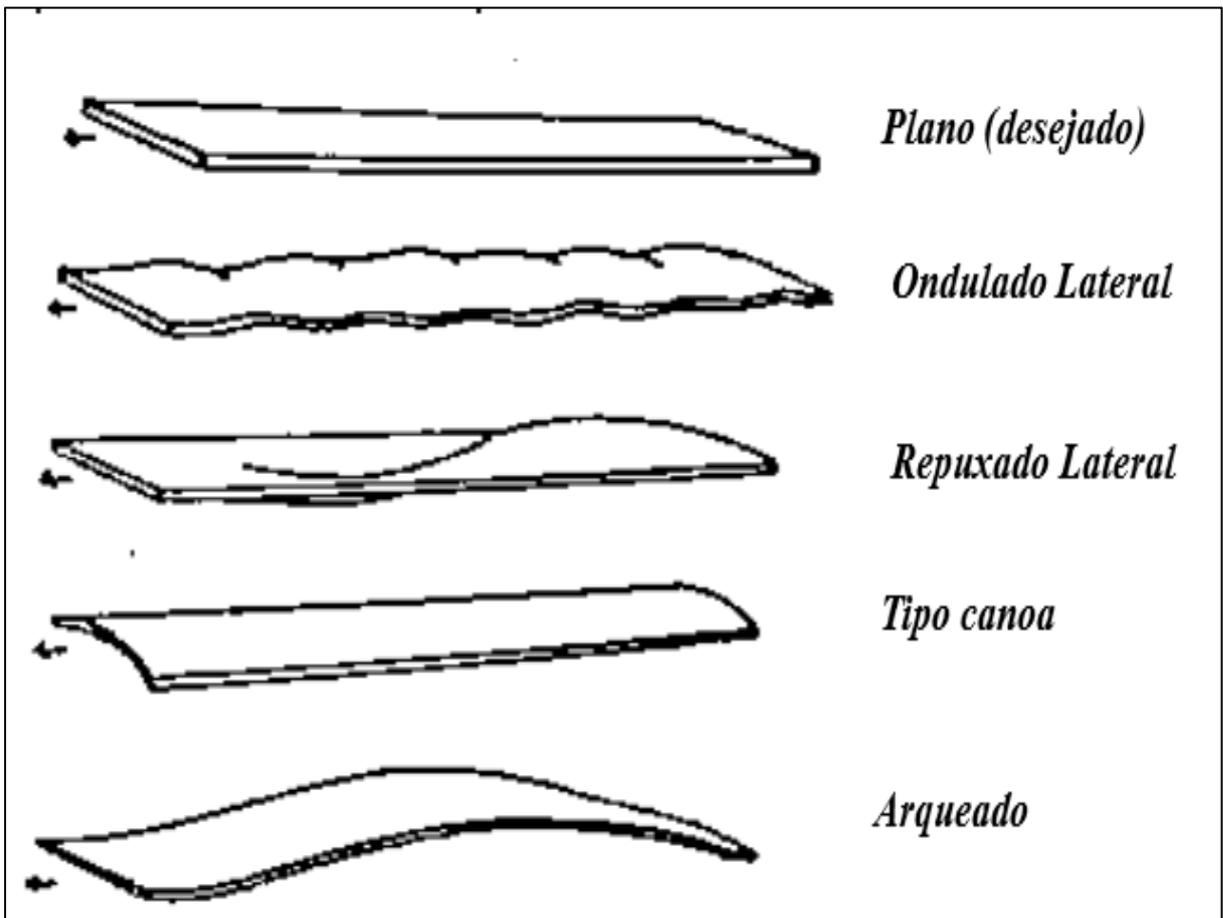


Figura 17 – Condições de Planicidade que podem ser observadas em Placas Laminadas (Fonte: [4])

Segundo RIZZO, Para as Condições de Forma, sabe-se que ao longo da Unidade de Laminação a Quente existem alguns fatores que prejudicam na Qualidade do Produto Laminado, através da geração de Desvios no Perfil Transversal (ex: gerando uma Coroa no Produto fora das condições normais) e de Desvios na Planicidade (ex: gerando defeitos como *Camber*, Ondulado Central, Ondulado Unilateral/Bilateral, Acanoamento, etc.), dentre esses fatores tem-se:

- a) Desequilíbrio na aplicação dos esforços de conformação durante a Laminação a Quente dos produtos planos;
- b) Variação na transferência de calor durante a Laminação;
- c) Variação da Linha de Passe durante a Laminação;
- d) Impactos do material durante o seu deslocamento na Mesa de Rolos;
- e) Montagem ou seleção incorreta de Cilindros e/ou Guias;
- f) Cilindros desnivelados;
- g) Sistemas Roll Bending e Roll Shifting com problemas;
- h) Resfriamento heterogêneo dos produtos no Sistema de Resfriamento.**

O Resfriamento não pode ser desigual nos dois lados da chapa para não provocar alterações da forma da chapa relacionadas com a tendência de maior contração do lado mais frio.

3.4 Metodologia 6 Sigma

A Metodologia 6 Sigma é uma metodologia muito utilizada pelas empresas que consiste em reduzir a variabilidade de processos, produtos e serviços utilizando ferramentas da Qualidade e Estatística, de modo a facilitar o desenvolvimento de projetos e, conseqüentemente atender as necessidades dos clientes.

A mesma é eficaz e estruturada, capaz de promover mudanças de processos, produtos e serviços através da compreensão das necessidades dos

clientes, levando em conta os aspectos importantes de um negócio, proporcionando um aumento significativo na satisfação dos colaboradores e clientes, devido à melhoria de processos/produtos. A Metodologia 6 Sigma é aplicada baseada no Modo DMAIC [5].

3.4.1 Modo DMAIC

O Modo DMAIC é um método disciplinado, estruturado e flexível, usado como via de condução de desempenho de projetos da Metodologia 6 Sigma. O mesmo é dividido em 5 Fases[5]:

D → *Define* (Fase Definir)

M → *Measure* (Fase Medir)

A → *Analyse* (Fase Analisar)

I → *Improve* (Fase Melhorar)

C → *Control* (Fase Controlar)

3.4.1.1 Define (Fase Definir)

Nesta fase, defini-se com clareza e precisão o escopo do projeto, definindo as situações e problemas que serão devidamente melhorados, levando-se em conta a necessidade do atendimento das expectativas do cliente. Werkema (2010) fazendo o uso das seguintes ferramentas, tais como: VOC, SIPOC, mapa de processo, matriz de causa/efeito e FMEA [15].

3.4.1.1.1 VOC

O VOC (Voz do Cliente) é a ferramenta que reúne os dados (oportunidades) identificados por pesquisas, enquetes ou entrevistas que representam os desejos e necessidades dos clientes de um determinado processo/produto.

3.4.1.1.2 SIPOC

O SIPOC (*Suppliers, Inputs, Process, Outputs e Customers*) é um diagrama constituído de cinco elementos abaixo relacionados (Tabela 3), que permite visualizar as inter-relações do escopo de trabalho (processo) a ser estudado. Esta ferramenta é desenvolvida do cliente, onde nascem às necessidades que são o foco de desenvolvimento ou estudo, para os fornecedores, fontes primárias das entradas de processo.

- **Suppliers** (Fornecedores) – São aqueles que alimentam o processo em si fornecendo as entradas;
- **Inputs** (Entradas/Insumos) - São os recursos que são utilizados para o processo. Ex.: documentos, materiais, energia, etc.;
- **Process** (Processos) – É a atividade de transformação das entradas que visam gerar uma saída;
- **Outputs** (Saídas/Resultados) – É o resultado do processo de transformação;
- **Consumers/customers** (Consumidores/Clientes) – São os clientes do processo.

SIPOC				
TÍTULO DO PROJETO:				
DATA DA ABERTURA:				
DATA PREVISTA PARA ENCERRAMENTO:				
RESPONSÁVEL:				
FORNECEDORES (S)	ENTRADAS (I)	PROCESSO (P)	SAÍDAS (O)	CLIENTES (C)
Fornecedor 1	Materiais	Formula da Receita	Produto	Clientes Internos
Fornecedor 2	Mão de Obra			
	Métodos			

Tabela 3 - Exemplo do SIPOC (Fonte: CSN)

3.4.1.1.3 FMEA

O FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*, ou Análise do Modo de Falha e Efeito), consiste em um modelo sistemático usado para prevenir e identificar falhas potenciais de um processo. Esta ferramenta permite identificar a criticidade da variável que possa afetar a saída do processo, avaliar quais os graus dos riscos que se associam às possíveis falhas, avaliar as prioridades para descoberta das causas fundamentais do problema. A Tabela 4 mostra o exemplo de formato usado para elaboração do FMEA. Gera-se um plano de ações corretivas para excluir ou diminuir as causas potenciais do problema [15].

É elaborado pela equipe com experientes especialistas do processo e que tenham entendimento das necessidades do cliente. A pontuação da criticidade das causas dos modos de falha é resumida em um índice de risco e prioridade ou *Risk Priority Number* (RPN). Este índice normalmente é obtido pela multiplicação das pontuações relacionadas à severidade do efeito, freqüência com que o processo é exposto à determinada causa e sua capacidade de detecção, conforme representado na Tabela 5.

FMEA - Failure Mode and Effects Analasys (Análise de Efeitos e Modos de Falhas)										
FMEA		<input type="checkbox"/> Produto <input checked="" type="checkbox"/> Processo		Data da elaboração:						
				Data da próxima revisão:						
ITEM	Nome do Componente / Equipamento	Função	Falhas Possíveis			Controles Atuais	Índices			
			Modo	Efeito(s)	Causas		S	F	D	RPN
Um	Conversor	Garantir reação de conversão	Reação Completa	Obstrução da tubulação por viscosidade elevada do produto	Ph inadequado	Inexistentes	10	4	6	240

Tabela 4 - Exemplo do FMEA adaptado (Fonte: [15])

Pont.	Severidade do Efeito	Frequência	Deteção
10	Perigoso sem advertencia	Muito alta Falha quase inevitável	Não se pode detectar
9	Perigoso com advertencia		Possibilidade muito remota de deteção
8	Perda da função primaria	Alta: Falhas repetidas	Possibilidade remota de deteção
7	Rendimento reduzido da função primária		Possibilidade muito baixa de deteção
6	Perda da função secundária	Moderada: Falhas ocasionais	Possibilidade baixa de deteção
5	Rendimento reduzido da função secundária		Possibilidade moderada de deteção
4	Defeito pequeno notado pela maior parte dos clientes		Possibilidade moderadamente alta de deteção
3	Defeito pequeno notado por alguns clientes	Baixa Poucas falhas relativas	Possibilidade alta de deteção
2	Defeito pequeno notado por clientes muito meticulosos		Possibilidade muito alta de deteção
1	Sem efeito	Remota: Falha é improvável	Deteção quase segura

Tabela 5 - Exemplo para pontuação RPN (Fonte: [15])

3.4.1.2 Measure (Fase Medir)

Após a definição do escopo do projeto e entendimento das limitações que devem ser levadas em consideração para a fase de análise e controle, deve-se antes entender numericamente a localização ou foco do problema, o que é identificado por meio de coleta de dados e estratificações, a fim de obter-se parâmetro de melhoria desejada. São utilizadas ferramentas, tais como: Cartas de Controle, Folha de Verificação, Gráfico Sequencial, Diagrama de Pareto, Histogramas, entre outras.

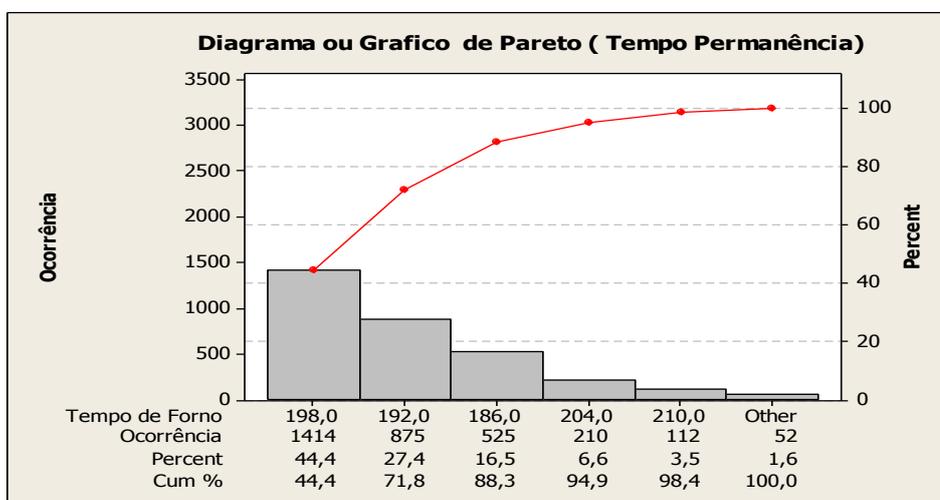


Figura18 - Exemplo Diagrama ou Gráfico de Pareto (Fonte: Minitab)

3.4.1.3 Analyse (Fase Analisar)

Nesta terceira fase, deve ser analisado o processo medido, através de ferramentas estatísticas priorizando, identificando e quantificando os fatores e seus efeitos nos resultados. Utiliza-se das ferramentas: Teste de Hipótese, Diagrama de Dispersão (Figura 19), Matriz de priorização, Regressão de variáveis, entre outras.

3.4.1.3.1 Análise de Regressão Linear

A técnica estatística de análise de regressão linear (Figura 20) é utilizada para modelamento e investigação entre variáveis quantitativas de um determinado processo, mostrando-se eficaz nas fases de análise, observação, verificação e execução de um estudo [18].

Segundo Rotonrado (2002) Com a análise de regressão é possível prever o valor da variável dependente (variável resposta) conhecida e valor da variável independente por meio da equação da reta [15].

$$Y = B_0 + B_1X$$

- Y = variável de resposta ou variável dependente
- X = variável explicativa, variável independente ou variável regressora;
- B_0, B_1 = parâmetros a serem estimados pela amostra
- B_0 : Muitas vezes, não tem interpretação prática, porém quando tiver representa o valor da variável resposta, quando $X=0$;
- B_1 : É o acréscimo ao valor da variável resposta para cada unidade de X , isto é, é uma medida de sensibilidade da variável aleatória Y em função das variações da variável X .

Para identificação da relação entre duas variáveis será necessário traçar um gráfico e nele adicionar pontos que representará as observações, usualmente chamado de gráfico de dispersão, no qual permite observar a relação entre as variáveis estudadas [18].

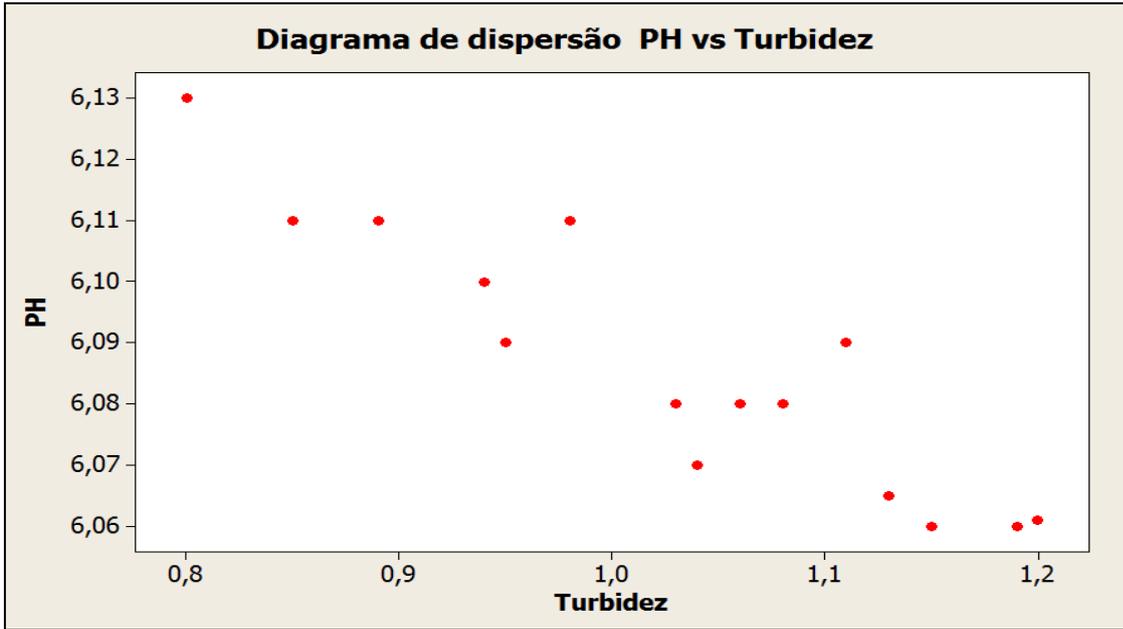


Figura 19 - Exemplo Diagrama de Dispersão (Fonte: Minitab)

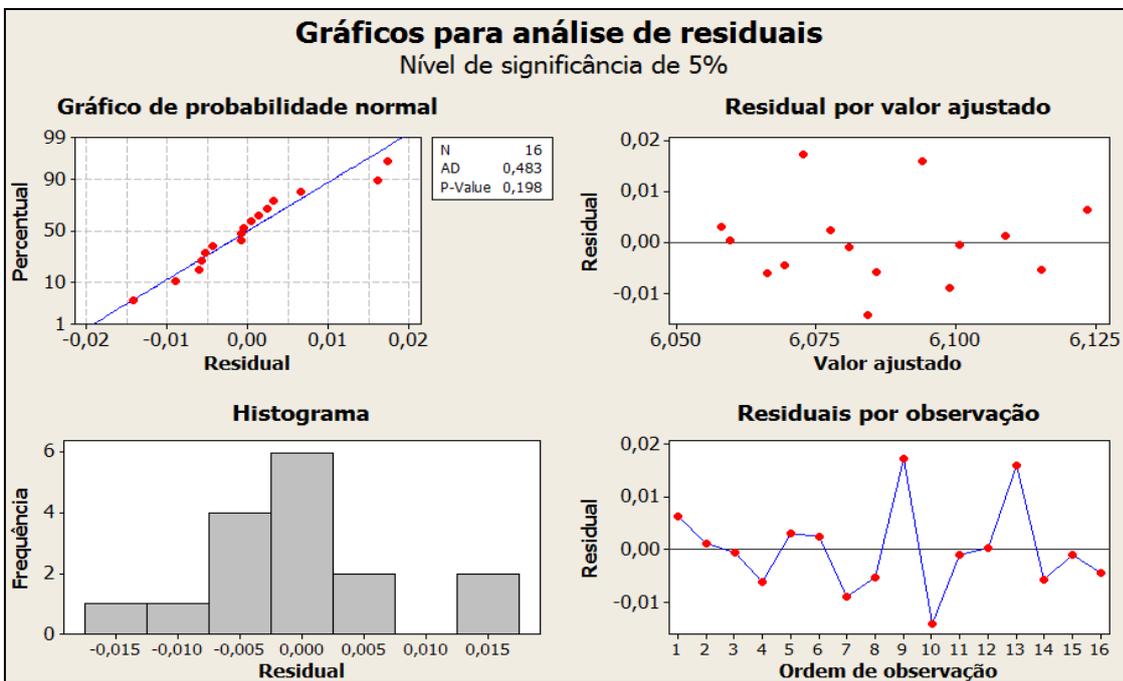


Figura 20 - Exemplo de gráficos para análise de residuais (Fonte: Minitab)

3.4.1.4 Improve (Fase Melhorar)

Nesta fase, são executadas as ações que visam à eliminação ou redução das causas potenciais do problema, testando e avaliando soluções, implementando ajustes e melhorias para obtenção de um processo com menor variabilidade. Utilizam-se as ferramentas: Brainstorming, Delineamento de Experimentos (DOE), Plano de Ação, 5W2H (Tabela 6), entre outras.

PLANO DE AÇÃO	
Nº: 001/2013	
Objetivo	Reduzir <u>cerca de 25%</u> o consumo de água potável.
O quê? (What?)	Reduzir os custos de água potável em até 25 %. Mensalmente é gasto R\$ 3.000,00. Precisamos economizar R\$ 750,00.
Onde? (Where?)	Moradores do <u>Codomínio</u> .
Quando? (When?)	02/02/2012.
Porque? (Why?)	Redução das despesas.
Quem? (Who?)	Moradores e Empresa de Manutenção.
Como? (How?)	Promover conscientização dos moradores. Reparar os vazamentos.
Quanto? (How much?)	7.560,00.

Tabela 6 – Exemplo de Modelo 5W/2H (Fonte: CSN)

3.4.1.5 Control (Fase Controlar)

Na ultima fase do DMAIC, para Werkema (2010) devem-se monitorar as soluções a fim de confirmar o sucesso e garantir que o alcance da meta seja mantido em longo prazo [18]. Para isso, são gerados controles que irão permitir a comparação dos dados coletados antes da implementação das soluções e após. Utilizam-se ferramentas tais como: Gráfico de controle IMR (média e amplitude móvel), gráficos Xbar, entre outros.

3.4.1.5.1 Gráficos de Controle

Os gráficos de controle (Figura 21) são ferramentas de maior efetividade para o controle gerencial, sendo utilizados nos processos produtivos para acompanhamento de parâmetros, fornecendo informações valiosas para sedimentação de melhorias do processo.

Segundo Montgomery (2004) existem algumas razões para popularização dos gráficos de controle no segmento industrial, tais como: comprovação de uma técnica que contribui para melhoria da produtividade; efetiva prevenção dos defeitos; busca a prevenção de ajustes desnecessários; fornecer informações sobre a capacidade de processo e de diagnósticos [12].

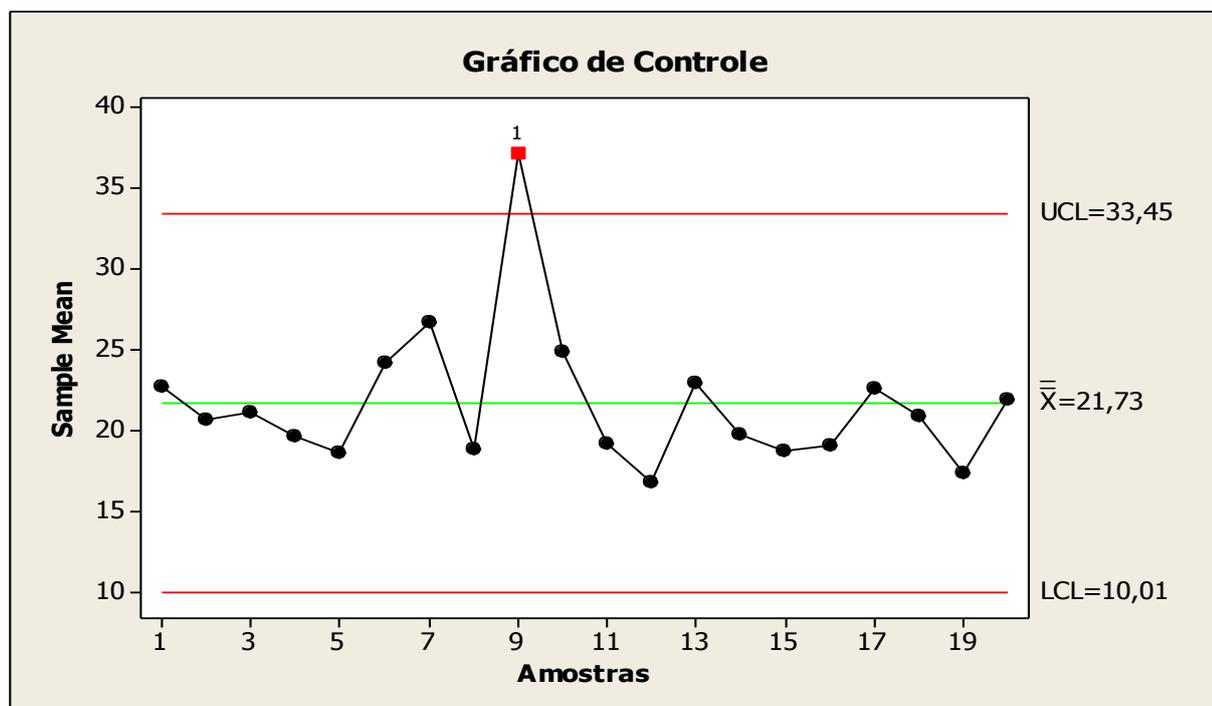


Figura 21 - Exemplo de Gráfico de Controle (Fonte: Minitab)

4 METODOLOGIA E RESULTADOS

No Presente trabalho empregou-se uma metodologia muito utilizada pelas empresas para seu bom desenvolvimento. Essa metodologia denominada por Metodologia 6 Sigma consiste em reduzir a variabilidade de processos, produtos e serviços utilizando ferramentas da Qualidade e Estatística, de modo a facilitar o desenvolvimento de projetos e, conseqüentemente atender as necessidades dos clientes.

Com base na Metodologia 6 Sigma, tem-se as seguintes etapas para o desenvolvimento do presente trabalho (Figura 22):



Figura 22 – Etapas da Metodologia 6 Sigma para o desenvolvimento do trabalho
(Fonte: CSN)

4.1 *Define* (Fase Definir)

Nessa fase procurou-se realizar um estudo detalhado do processo (no caso, Sistema de Resfriamento *Laminar Flow*), para elaborar uma lista de fatores/agentes que possivelmente influenciariam na ocorrência das principais variáveis de estudo do projeto (no caso, desvio de planicidade, Microestrutura e Propriedades Mecânicas do Produto Laminado) e conseqüentemente direcionar este de forma mais eficiente para o seu desenvolvimento.

Para isso utilizou-se de ferramentas da Qualidade e Estatística, como por exemplo SIPOC, Matriz de Causa e Efeito e Diagrama de Pareto, FMEA, etc.

4.1.1 SIPOC

É uma ferramenta da Qualidade que faz o levantamento dos fatores/agentes que influenciam nas variáveis do projeto (Processo/Produto):

S (*Suppliers* → Fornecedores)

I (*Inputs* → Entradas),

P (*Process* → Processo)

O (*Outputs* → Saídas)

C (*Costumers* → Clientes)

Segundo levantamento dos dados, obteve-se o seguinte SIPOC (Tabela 7):

2.1-SIPOC					
<small>FUNCIONALIDADE = Define o escopo de atuação do projeto</small> <small>Preencha os campos informativos abaixo. Exemplo:</small>					
TÍTULO DO PROJETO: Aplicação da Metodologia 6 Sigma para melhoria na Planicidade de Tiras a Quente com estudo voltado sobre o Sistema de Resfriamento <i>Laminar Flow</i> da Unidade de Laminação a Quente da CSN.					
DATA DA ABERTURA: 06/05/2013					
DATA PREVISTA PARA ENCERRAMENTO: 19/12/2013					
RESPONSÁVEL: José Robério de Castro Ferreira					
FORNECEDORES (S)	ENTRADAS (I)	PROCESSO (P)	SAÍDAS (O)	CLIENTES (C)	
GLQ	1. Qualidade da Água	tratamento térmico após processo de laminação do trem acabador (<i>Laminar Flow</i>): Responsável pelo resfriamento da Tira Laminada a Quente até esta atingir uma Temperatura de Bobinamento(CT) adequada, de forma a garantir as Propriedades Mecânicas visadas para o Material.	Desvio de Planicidade das Tiras Laminadas a Quente	Bobinadoras	
GMQ	2. Temperatura da Água		Características Microestruturais do Aço	LPBQ	
GDE	3. Condição de Funcionamento dos Chuveiros Superiores e Inferiores		Propriedades Mecânicas	LTF	Clientes Externos
	4. Condição de Funcionamento dos <i>Sprays</i> Laterais				LDC
	5. Velocidade da Tira				
	6. Relação entre Vazão de Água Superior e Inferior.				
	7. Vazão Total da Água				
	8. Pressão da Água				
	9. Altura da Coluna de Água.				
	10. FDT				
	11. CT				
	12. Espessura				
	13. Largura				
	14. Grau do Aço				
	15. Estratégia de Resfriamento / Modo de Resfriamento				
	16. Desvio de Planicidade advindo do Laminador de Acabamento				
	17. Irregularidade no Alinhamento das Tiras no <i>Laminar Flow</i>				
Quem entrega as entradas?	Quais as entradas necessárias para a execução do processo?	Como o processo é desenvolvido?	Quais as saídas que são entregues pelo processo?	Quem são os beneficiários destas saídas?	
Retomar para 2.0-DEFINIR		Sequir para 2.2-MAPA DO PROCESSO			

Tabela 7 – Ferramenta de Qualidade (SIPOC) (Fonte: CSN)

Com base nos dados do SIPOC foi necessário utilizar de uma outra ferramenta da Qualidade que também envolve Estatística, ferramenta esta chamada Matriz de Causa e Efeito, para ser decidido/priorizada as variáveis de estudo do presente projeto.

4.1.2 Matriz de Causa e Efeito

É uma ferramenta da Qualidade e Estatística que define/prioriza, através do efeito das causas sobre os problemas, as variáveis de estudo do presente projeto. Para isso utilizou-se das Entradas (*Inputs*) do SIPOC para análise dos dados. Foi feita uma pesquisa com vários engenheiros da área de Laminação, em que cada um atribuiu sua nota em relação a influência das 17 variáveis abaixo em relação as Saídas(*Outputs*) do SIPOC, no caso Desvio de Planicidade, Microestrutura e Propriedades Mecânicas.

A Matriz de Causa e Efeito (Causa → Entradas ; Efeito → Saídas) segue na Tabela 8:

ENTRADAS	Arthur Guimarães				Júlio Medrano				Sidney Ferreira				Média	SAÍDAS	Peso
	Y1	Y2	Y3	M1	Y1	Y2	Y3	M4	Y1	Y2	Y3	M5			
1. Qualidade da Água	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1,96	Desvio de Planicidade	9
2. Temperatura da Água	3	8	8	6,2	7	8	8	7,64	3	9	9	6,84	6,51		
3. Condição dos Chuveiros Superiores e Inferiores	5	5	4	4,68	7	8	8	7,64	7	7	7	7	6,61		
4. Condição dos Sprays Laterais	7	5	4	5,4	5	5	5	5	3	3	3	3	5,20	Propriedades Mecânicas	8
5. Velocidade da Tira	4	7	8	6,24	5	8	8	6,92	3	8	8	6,2	6,89		
6. Vazão de Água Superior e Inferior	9	8	8	8,36	8	8	8	8	9	7	7	7,72	7,79		
7. Vazão Total da Água	5	7	7	6,28	8	9	9	8,64	5	9	9	7,56	6,66		
8. Pressão da Água	4	4	4	4	6	5	5	5,36	5	5	5	5	4,14		
9. Altura da Coluna de Água.	5	4	4	4,36	6	5	5	5,36	5	3	3	3,72	3,74		
10. FDT	7	8	8	7,64	5	9	9	7,56	3	9	9	6,84	7,51		
11. CT	8	8	9	8,32	7	9	9	8,28	5	9	9	7,56	7,89		
12. Espessura	8	8	8	8	9	9	9	9	9	7	7	7,72	7,53		
13. Largura	6	4	4	4,72	9	3	3	5,16	7	7	7	7	5,85		
14. Grau do Aço	7	9	9	8,28	8	9	9	8,64	5	9	9	7,56	7,84		
15. Estratégia de Resfriamento	4	4	4	4	9	9	9	9	5	5	5	5	6,20		
16. Desvio de Planicidade advindo do Acabamento	9	4	4	5,8	9	3	3	5,16	3	3	3	3	5,17		
17. Camber na saída do acabamento	3	4	4	3,64	5	3	3	3,72	1	1	1	1	3,07		

Tabela 8 – Ferramenta de Qualidade e Estatística (Matriz de Causa e Efeito) (Fonte: CSN)

4.1.3 Diagrama de Pareto

É uma ferramenta Estatística que consiste de uma representação gráfica que permite priorizar a resolução de problemas através de um princípio chamado 80-20 (80% dos problemas de insatisfação dos clientes estão em 20% das causas). O que nos dá uma condição que para o desenvolvimento do projeto, basta que estudemos apenas 80% da somatória das médias das variáveis.

Assim segue (Figura 23):

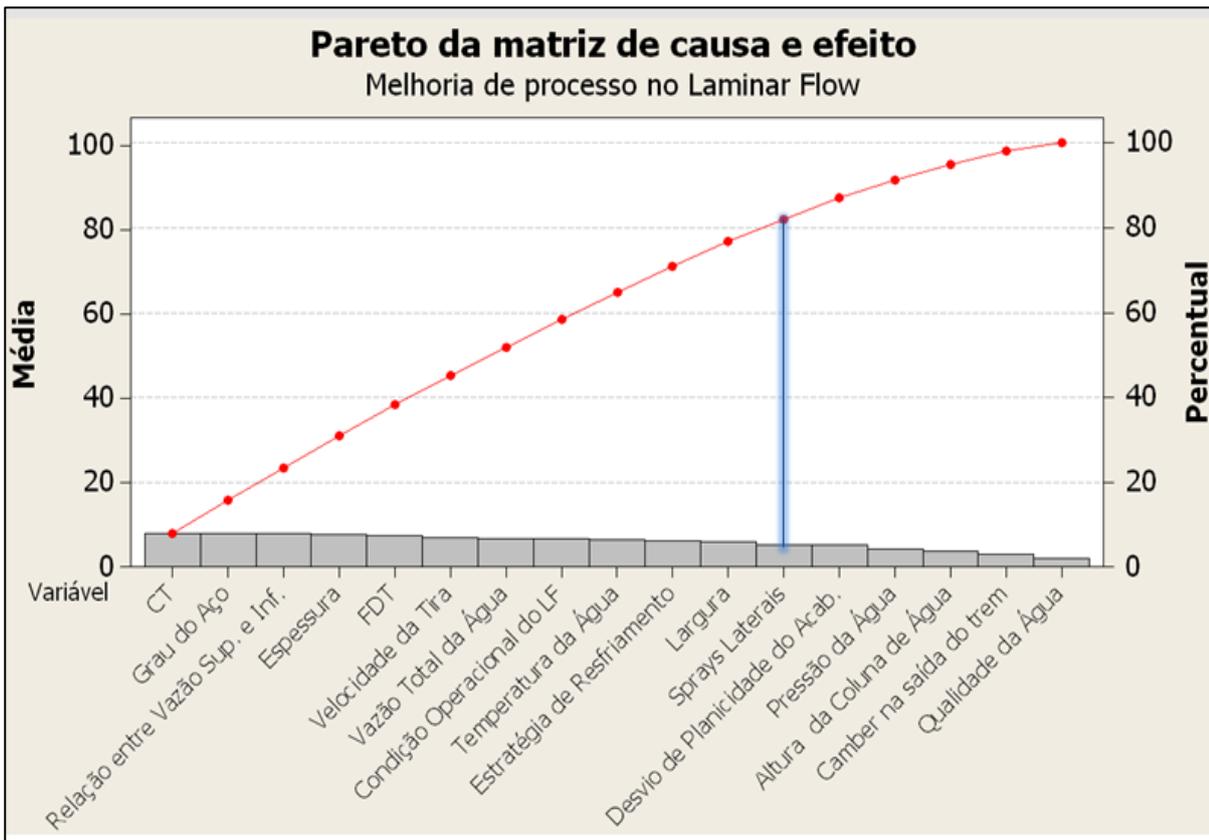


Figura 23 – Diagrama de Pareto da Matriz de Causa e Efeito (Fonte: Minitab)

Segundo Diagrama de Pareto, dentre as 17 variáveis do projeto, estudaríamos todas as variáveis até reta vertical azul da figura acima, isto é:

- 1) CT (Temperatura de Bobinamento)
- 2) Grau do Aço
- 3) Relação entre Vazão Superior e Inferior
- 4) Espessura da Tira

- 5) FDT (Temperatura de Acabamento)
- 6) Velocidade da Tira
- 7) Vazão Total da Água
- 8) Condição Operacional dos Chuveiros Superior e Inferior
- 9) Temperatura da Água
- 10) Estratégia de Resfriamento
- 11) Largura da Tira
- 12) Condição Operacional dos *Sprays* Laterais

As variáveis nº 1,2,4,5,6,7 e 11 são variáveis do material, enquanto as variáveis nº 8,9 e 12 são variáveis operacionais. O desenvolvimento do presente trabalho foi voltado a nível de processo, sendo então que as variáveis citadas anteriormente não podem ser avaliadas em termos práticos. Logo tem-se apenas as variáveis nº 3 e 10 (Relação entre Vazão Superior e Inferior e Estratégia de Resfriamento) para um estudo prático suficiente para o desenvolvimento do projeto de forma coerente.

4.1.4 Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA)

É uma ferramenta da Qualidade que faz um levantamento de ocorrências de possíveis falhas durante a realização da atividade de um dado Processo/Equipamento, informando as Causas, Efeitos, Controle Atual e Controle Adequado para o Processo/Equipamento. No caso, essa ferramenta foi utilizada no presente projeto para identificação de possíveis falhas que poderiam ocorrer durante a realização dos testes do Projeto, de modo que evitasse a ocorrência das mesmas e, conseqüentemente evitar que estas interfiram nos resultados obtidos nos testes.

A pontuação das Causas das Falhas de Processo/Equipamento pelos Engenheiros ocorre da seguinte forma (Tabela 9):

Os Engenheiros da LTQ#2 atribuíam notas de 1 a 10 para:

- O Grau de Severidade do Efeito que a Causa da Falha poderia estabelecer;
- O Grau de Frequência com que a Causa da Falha podia acontecer;
- O Grau de Detecção que a Causa da Falha podia estabelecer.

Pont.	Severidade do Efeito	Frequência	Detecção
10	Perigos o sem advertencia	Muito alta Falha quase inevitável	Não se pode detectar
9	Perigoso com advetencia		Possibilidade muito remota de detecção
8	Perda da função primaria	Alta: Falhas repetidas	Possibilidade remota de detecção
7	Rendimento reduzido da função primária		Possibilidade muito baixa de detecção
6	Perda da função secundária	Moderada: Falhas ocasionais	Possibilidade baixa de detecção
5	Rendimento reduzido da função secundária		Possibilidade moderada de detecção
4	Defeito pequeno notado pela maior parte dos clientes		Possibilidade moderadamente alta de detecção
3	Defeito pequeno notado por alguns clientes	Baixa Poucas falhas relativas	Possibilidade alta de detecção
2	Defeito pequeno notado por clientes muito meticulosos		Possibilidade muito alta de detecção
1	Sem efeito	Remota: Falha é improvável	Detecção quase segura

Tabela 9 – Critérios de Pontuação para as Causas de Falha identificadas pelo FMEA
(Fonte: [5])

Foi avaliado 3 Processos/Equipamentos: Laminador de Acabamento, Sistema de Resfriamento *Laminar Flow*, Pirômetro medidor da Temperatura de Bobinamento. Para cada um foi questionado várias Falhas de Processo/ Equipamento com suas respectivas Causas, estas foram pontuadas pelos Engenheiros da LTQ#2 da CSN (Tabelas 10, 11 e 12), de modo a tomar eventuais medidas (Ações Rápidas – *Quick Hits*) durante a execução dos testes do presente projeto.

1ª ATIVIDADE DO PROCESSO: Processamento no trem acabador	
MODO DE FALHA 1: Temperatura de FDT fora do visado	
<p>CAUSA 1: Variação da velocidade de acabamento</p> <p>EFEITO 1: Variação na temperatura de saída do acabamento</p> <p>QUAL O CONTROLE ATUAL DA FALHA ? Acompanhamento do processo</p> <p>COMO MELHORAR ESTE CONTROLE? Avaliar efeito do resfriamento para bobinas com o mesmo set-up de velocidade.</p>	<p>FREQÜENCIA=> 1</p> <p>SEVERIDADE=> 7</p> <p>DETECÇÃO=> 2</p> <p>RPN=> 14</p>
<p>CAUSA 2: Variação no perfil de redução do laminador</p> <p>EFEITO 2: Variação na temperatura de processamento e na temperatura de saída.</p> <p>QUAL O CONTROLE ATUAL DA FALHA ? Acompanhamento do processo</p> <p>COMO MELHORAR ESTE CONTROLE? Avaliar efeito do resfriamento para bobinas com mesma distribuição de carga</p>	<p>FREQÜENCIA=> 1</p> <p>SEVERIDADE=> 7</p> <p>DETECÇÃO=> 2</p> <p>RPN=> 14</p>
MODO DE FALHA 2: Variação na planicidade da tira na saída do laminador	
<p>CAUSA 3: Instabilidade no processo (necessidade de atuação em nivelamento, velocidade por meio do vernier, bending e shifting)</p> <p>EFEITO 3: Variação na planicidade da tira</p> <p>QUAL O CONTROLE ATUAL DA FALHA ? Acompanhamento do processo</p> <p>COMO MELHORAR ESTE CONTROLE? Avaliar efeito do resfriamento para bobinas em que o processo ocorreu sem intervenções dos operadores no laminador e de forma estável.</p>	<p>FREQÜENCIA=> 2</p> <p>SEVERIDADE=> 7</p> <p>DETECÇÃO=> 5</p> <p>RPN=> 70</p>

Tabela 10 – Causas de Falha no Processo do Trem Acabador (Fonte: CSN)

2ª ATIVIDADE DO PROCESSO: Processo de resfriamento da tira via laminar flow	
MODO DE FALHA 3: Sistema de resfriamento fora das condições de projeto para operação	
<p>CAUSA 4: Entupimento de tubeiras e bicos, altura da coluna de água, temperatura da água, qualidade da água, condição das bombas de recirculação, condição da válvula controladora de pressão, condição dos sprays laterais.</p> <p>EFEITO 4: Resfriamento irregular</p> <p>QUAL O CONTROLE ATUAL DA FALHA ? Planilha em excel preenchida pelo técnico de processo das bobinadoras/laminar flow</p> <p>COMO MELHORAR ESTE CONTROLE? Verificar condições operacionais antes de realizar os testes. Desenvolver controle com previsões de restabelecimento e responsáveis para cada pendência.</p>	<p>FREQÜENCIA=> 7</p> <p>SEVERIDADE=> 7</p> <p>DETECÇÃO=> 2</p> <p>RPN=> 98</p>
MODO DE FALHA 4: Mesas de saída do acabamento com perfil fora do padrão	
<p>CAUSA 5: Rolos de mesa com diâmetro fora do padrão</p> <p>EFEITO 5: Empeno lateral, dobras de topo, sucata na bobinadora.</p> <p>QUAL O CONTROLE ATUAL DA FALHA ? Gráficos fornecidos pela oficina de cilindros.</p> <p>COMO MELHORAR ESTE CONTROLE? Desenvolver controle com gráficos 3D que mostrem o trajeto real da tira ao atravessar a mesa.</p>	<p>FREQÜENCIA=> 6</p> <p>SEVERIDADE=> 6</p> <p>DETECÇÃO=> 3</p> <p>RPN=> 108</p>
<p>CAUSA 6: Topografia da mesa irregular</p> <p>EFEITO 6: Empeno lateral dobras de topo e sucata na bobinadora</p> <p>QUAL O CONTROLE ATUAL DA FALHA ? Não há</p> <p>COMO MELHORAR ESTE CONTROLE? Verificar topografia das mesas</p>	<p>FREQÜENCIA=> 3</p> <p>SEVERIDADE=> 6</p> <p>DETECÇÃO=> 4</p> <p>RPN=> 72</p>
<p>CAUSA 7: Espelhos, aventais e refrigeração dos rolos de mesa fora do padrão.</p> <p>EFEITO 7: Empeno lateral dobras de topo, marcas e sucata na bobinadora</p> <p>QUAL O CONTROLE ATUAL DA FALHA ? Não há</p> <p>COMO MELHORAR ESTE CONTROLE? Criar controle com estes itens de verificação</p>	<p>FREQÜENCIA=> 4</p> <p>SEVERIDADE=> 5</p> <p>DETECÇÃO=> 2</p> <p>RPN=> 40</p>

Tabela 11 – Causas de Falha no Processo de Resfriamento da Tira via *Laminar Flow* (Fonte: CSN)

3ª ATIVIDADE DO PROCESSO: Medição da temperatura de bobinamento	
MODO DE FALHA 5: Acanoamento das tiras acumulando água na zona de medição	
<p>CAUSA 8: Sprays laterias operando fora dos padrões</p> <p>EFEITO 8: Interferências no CT devido ao acúmulo de água na zona de medição</p> <p>QUAL O CONTROLE ATUAL DA FALHA ? Não há</p> <p>COMO MELHORAR ESTE CONTROLE? Criar controle com estes itens de verificação</p>	<p>FREQÜENCIA=> 7</p> <p>SEVERIDADE=> 7</p> <p>DETECÇÃO=> 2</p> <p>RPN=> 98</p>
<p>CAUSA 9: Prioridade de abertura dos bancos não é determinada com o intuito de reduzir o volume de água aplicado próximo à região do pirômetro (seções superiores dos bancos 10,11,12 por exemplo)</p> <p>EFEITO 9: Interferências no CT devido ao acúmulo de água na zona de medição</p> <p>QUAL O CONTROLE ATUAL DA FALHA ? Não há</p> <p>COMO MELHORAR ESTE CONTROLE? Estudar efeito da variação na prioridade de abertura dos bancos na planicidade e estabilidade de medição.</p>	<p>FREQÜENCIA=> 7</p> <p>SEVERIDADE=> 7</p> <p>DETECÇÃO=> 3</p> <p>RPN=> 147</p>
<p>CAUSA 10: Distribuição da vazão no laminar flow de 70% de água pela face superior e 30% pela face inferior.</p> <p>EFEITO 10: Resfriamento irregular gerando tensões que podem causar acanoamento.</p> <p>QUAL O CONTROLE ATUAL DA FALHA ? Não há</p> <p>COMO MELHORAR ESTE CONTROLE? Estudar efeito da variação no volume de água aplicado na face superior e na face inferior na planicidade e estabilidade de medição.</p>	<p>FREQÜENCIA=> 8</p> <p>SEVERIDADE=> 7</p> <p>DETECÇÃO=> 3</p> <p>RPN=> 168</p>

Tabela 12 – Causas de Falha no Processo de Medição do CT (Fonte: CSN)

Baseada nas notas calcula-se um parâmetro chamado de RPN que determina o “peso” da importância de cada Causa de Falha, e assim é direcionado a prioridade de Causas de Falhas a serem avaliadas para a implementação de medidas de prevenção (Ações Rápidas – *Quick Hits*) a ocorrências dessas Falhas durante a realização dos testes do presente Projeto (Figura 24 e Tabela 13).

RPN = Severidade * Frequência * Detecção

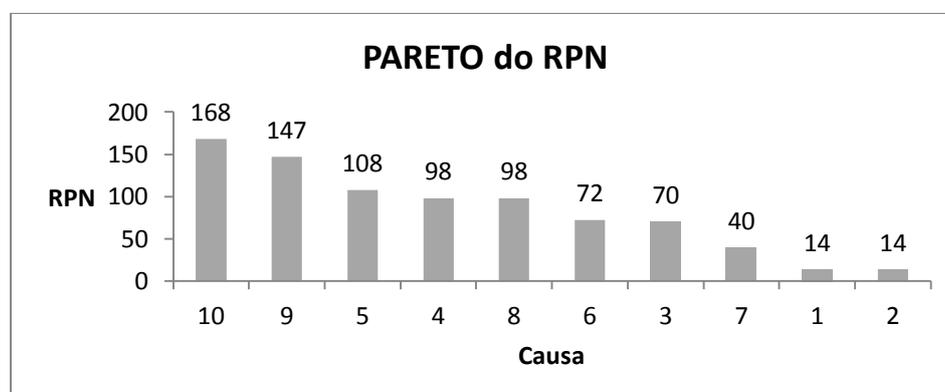


Figura 24 – Diagrama de Pareto para o RPN das Causas de Falha (Fonte: CSN)

<p>1º Causa 10 (Distribuição da vazão no laminar flow de 70% de água pela face superior e 30% pela face inferior)</p> <p>2º Causa 9 (Prioridade de abertura dos bancos não é determinada com o intuito de reduzir o volume de água aplicado próximo à região do pirômetro)</p> <p>3º Causa 5 (Rolos de mesa com diâmetro fora do padrão)</p> <p>4º Causa 4 (Entupimento de tubeiras e bicos, altura da coluna de água, temperatura da água, qualidade da água, condição das bombas de recirculação, condição da válvula controladora de pressão, condição dos sprays laterais)</p> <p>5ª Causa 8 (Sprays laterais operando fora dos padrões)</p> <p>6º Causa 6 (Empeno lateral dobras de topo e sucata na bobinadora)</p> <p>7º Causa 3 (Instabilidade no processo (necessidade de atuação em nivelamento, velocidade por meio do vernier, bending e shifting)</p> <p>8º Causa 7 (Espelhos, aventais e refrigeração dos rolos de mesa fora do padrão)</p> <p>9º Causa 1 (Variação da velocidade de acabamento)</p> <p>10º Causa 2 (Variação no perfil de redução do laminador)</p>

Tabela 13 – *Ranking* das Causas de Falhas conforme pontuação de RPN
(Fonte: CSN)

4.1.5 Quick Hits do FMEA (Ações Rápidas do FMEA)

É uma ferramenta da Qualidade que faz um levantamento de medidas preventivas em relação às Causas de Falhas dos Processos/Equipamentos descritos na ferramenta FMEA. Para cada Causa de um dado Modo de Falha é estabelecido uma melhoria sugerida (Ação Rápida – *Quick Hits*) com a Aprovação de sua implementação pelo Grupo de Engenharia da LTQ#2, com seu prazo de execução, responsável pela medida adotada e o *status* da Ação Rápida (Tabela 14).

#	MODO DE FALHA	MELHORIA SUGERIDA	APROVAÇÃO	PRAZO	RESPONSÁVEL	STATUS
1	Temperatura de FDT fora do visado	Acompanhar os testes no laminar flow diretamente da cabine de operação do acabamento, orientando operadores a não variar o set-up de velocidade ou redução.	APROVADA	Imediatamente nos testes	José Robério	CONCLUÍDA
2	Varição na planicidade da tira na saída do laminador	Acompanhar processo no acabamento durante os testes. Caso ocorra instabilidade durante os testes, descartar a observação em questão.	APROVADA	Imediatamente nos testes	José Robério	CONCLUÍDA
3	Sistema de resfriamento fora das condições de projeto para operação	Desenvolver controle do caminho da tira para o sistema de resfriamento	APROVADA	30/11/2013	Arthur	CONCLUÍDA
3	Sistema de resfriamento fora das condições de projeto para operação	Inspecionar o sistema de resfriamento antes de executar os testes	APROVADA	Imediatamente nos testes	Arthur/José Robério	CONCLUÍDA
4	Mesas de saída do acabamento com perfil fora do padrão	Desenvolver controle com gráficos 3D que mostrem o trajeto real da tira ao atravessar a mesa.	APROVADA	30/11/2013	Arthur	CONCLUÍDA
4	Mesas de saída do acabamento com perfil fora do padrão	Verificar topografia das mesas J	APROVADA	Imediatamente nos testes	Romolo	PENDENTE
5	Acanoamento das tiras acumulando água na zona de medição	Estudar efeito da variação na prioridade de abertura dos bancos na planicidade e estabilidade de medição.	APROVADA	29/11/2013	Arthur	INICIADA
5	Acanoamento das tiras acumulando água na zona de medição	Estudar efeito da variação no volume de água aplicado na face superior e na face inferior na planicidade e estabilidade de medição.	APROVADA	29/11/2013	José Robério	CONCLUÍDA

Tabela 14 – Ações Rápidas (*Quick Hits*) para prevenção das Causas de Falha Projeto/processo (Fonte: CSN)

4.2 Measure (Fase Medir)

4.2.1 Testes realizados no Sistema de Resfriamento Laminar Flow

Como na fase DEFINIR, foi decidido que as variáveis de estudo seriam a Relação entre Vazão de Água Superior e Inferior e a Estratégia de Resfriamento, então procurou-se estudar simultaneamente as variáveis, e concluiu-se que os estudos seriam realizados com base em testes com alterações de dados feitas no Modelo Computacional (*Control Temperature Coil - CTC*) que controla as Estratégias de Resfriamento do Sistema *Laminar Flow*. Então essas alterações seriam evidenciadas no próprio processo de resfriamento a partir de variações no número

de Bancos de Resfriamento Indisponíveis (fecharíamos Bancos que seriam abertos durante o resfriamento da Tira) e, conseqüentemente ocorreria alteração na Vazão de Água na parte superior e inferior (Principais variáveis de estudo) do Sistema de Resfriamento.

Na CSN, a Relação entre Vazão de Água Superior e Inferior é dado da seguinte maneira:

Laminar Flow (Vazão Total =200 m³/min)
Vazão_(sup) = 140 m³/min(70%) e Vazão_(Inf) = 60 m³/min(30%)

No presente projeto as alterações foram feitas na Relação entre Vazão de Água Superior e Inferior a partir de alterações no número de Bancos Superiores Disponíveis, em que foi fechado Banco de Resfriamento um a um por Bobina.

$$V_{sup} = (140 \text{ m}^3/\text{min}) * [(\text{Número de Bancos Utilizados}) / 14]$$

$$V_{inf} = (60 \text{ m}^3/\text{min}) * [(\text{Número de Bancos Utilizados}) / 14]$$

À medida que se fecha um Banco de Resfriamento Superior, a Vazão Superior diminui.

Foi realizado 1 teste para o Aço IF (Aço com maior ocorrência de Temperatura de Bobinamento Baixa pelo fenômeno do “Acanoamento”) como frente de estudos iniciais, e 3 testes para o Aço Microligado ao Nb (Aço com maior número de reclamações por Desvio de Planicidade).

Para cada Aço existia um conjunto de Bobinas (Ítems), em que para cada Bobina realizava-se uma estratégia de resfriamento diferente a partir de alterações na Vazão de Água Superior (Indisponibilizando a ação de Bancos de Resfriamento) e Inferior. Isso foi obtido a partir de alterações no Modelo Computacional do Sistema de Resfriamento, em que dos 14 Bancos de Resfriamento disponíveis na parte superior, foram desativados Bancos de Resfriamento Superior um por um para cada Bobina e, conseqüentemente obtiam-se diferentes Estratégias de Resfriamento (diferentes Configurações de Vazão de Água na Parte Superior e Inferior da Mesa de Resfriamento) (Figura 25).

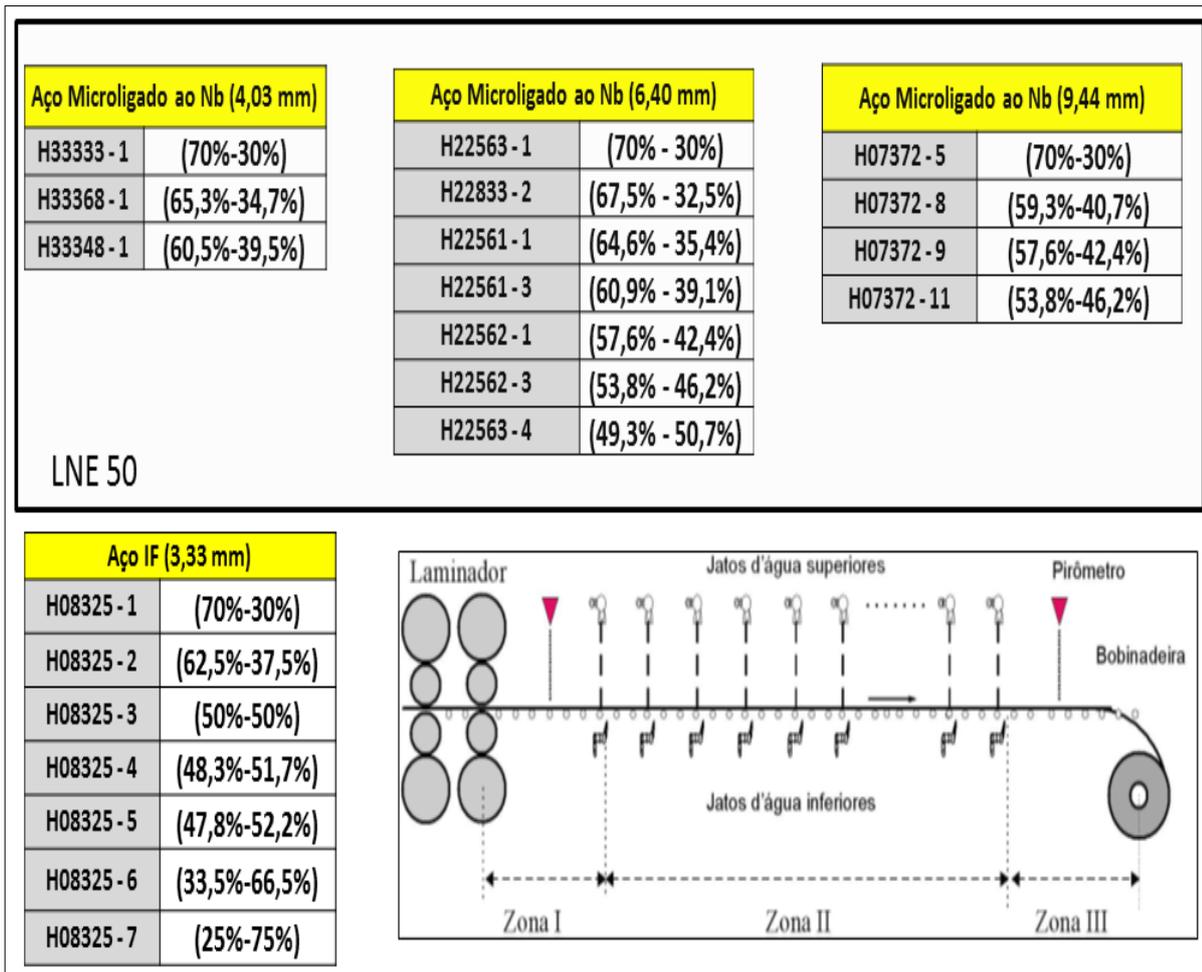


Figura 25 – Diferentes Estratégias de Resfriamento estabelecidas nos testes realizados aos Aços IF (Espessura: 3. 33 mm) e Aço Microligado ao Nb (Espessuras: 4.03 , 6.40 e 9.44 mm) (Fonte: CSN)

4.2.2 Medição de Planicidade

Na Planicidade, foi utilizado um Ondulômetro (Figura 26.a) em que procurou-se medir a Flecha/Amplitude de Ondulação (Figura 26.b) em vários pontos ao longo do comprimento de todas as Bobina do Aço IF, como segue na figura abaixo:



Figura 26.a - Ondulômetro utilizado (Fonte: CSN)

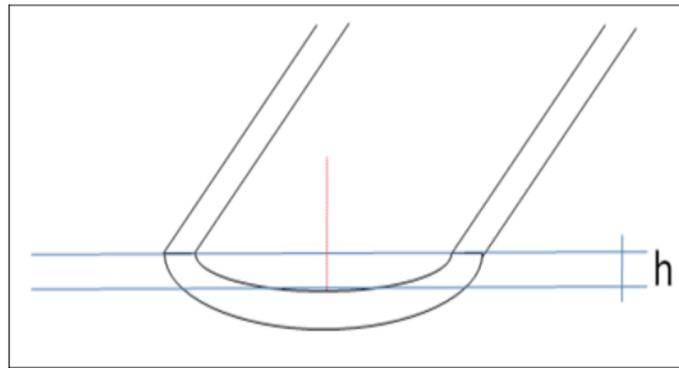


Figura 26.b - Flecha medida(h) nas Bobinas (Fonte: CSN)

4.2.3 Corte para obtenção de amostras

Após as modificações no Modelo Computacional do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* e, conseqüentemente a implementação das novas Estratégias de Resfriamento, tanto para o Aço Microligado ao Nb como para o Aço IF foi retirado amostras ao longo da cauda(parte inferior) da Bobina, de modo a obter-se amostras para Ensaios de Metalografia, Microdureza e Tração. O Corte do material foi realizado por um operador com o uso de um maçarico (Figura 27).

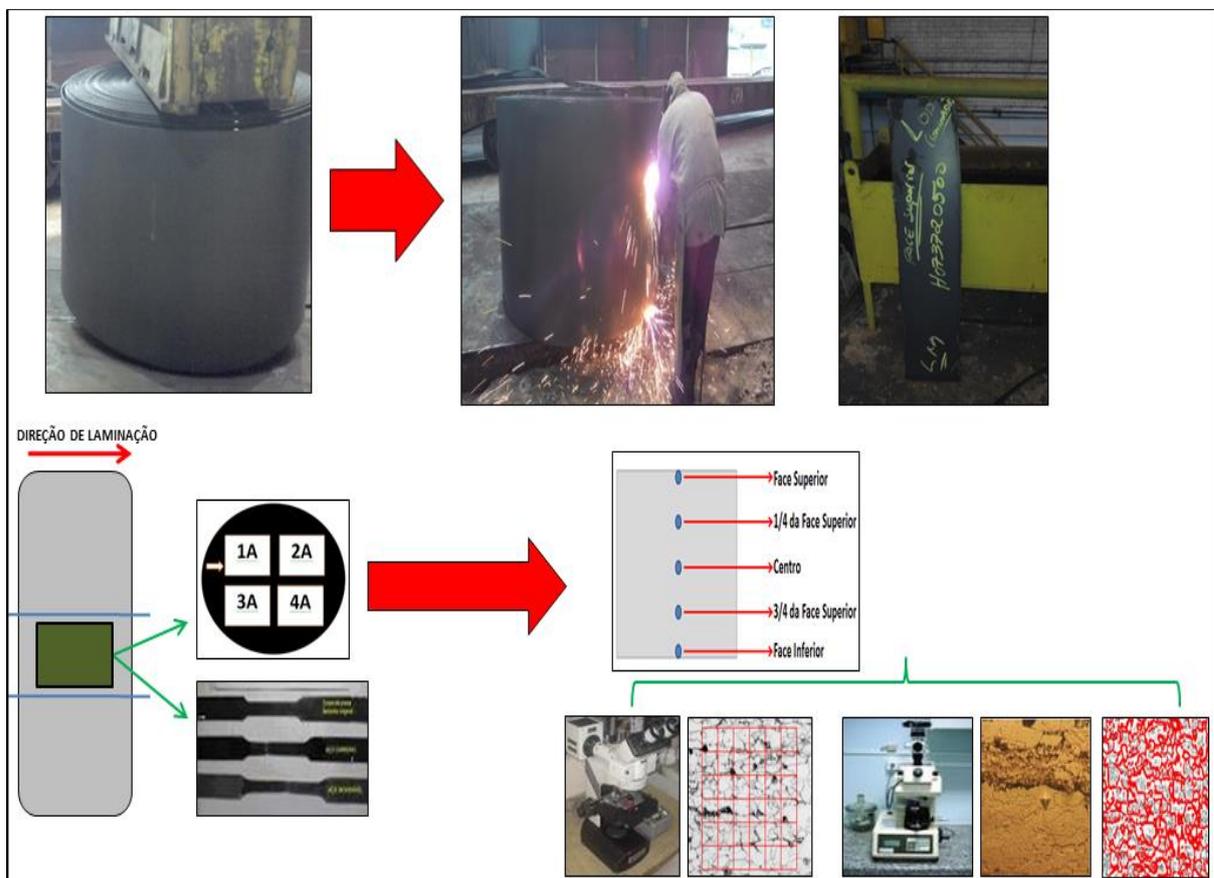


Figura 27 - Corte da Bobina para obtenção de amostras para Ensaios em Laboratório (Fonte: CSN)

4.2.4 Ensaio de Tração

O Ensaio de Tração foi realizado com o intuito de analisar a condições das Propriedades Mecânicas (LE, LR e Alongamento) dos materiais que foram submetidos as novas Estratégias de Resfriamento.

4.2.5 Ensaio de Metalografia

O Ensaio de Metalografia foi realizado com o intuito de analisar a Evolução Microestrutural (Tamanho de Grão) e Microdureza dos materiais em estudo. Em ambas as análises procurou-se estudar 5 pontos ao longo da espessura do material (Figura 28):

- Face Superior
- $\frac{1}{4}$ da Face Superior
- Centro
- $\frac{3}{4}$ da Face Superior
- Face Inferior

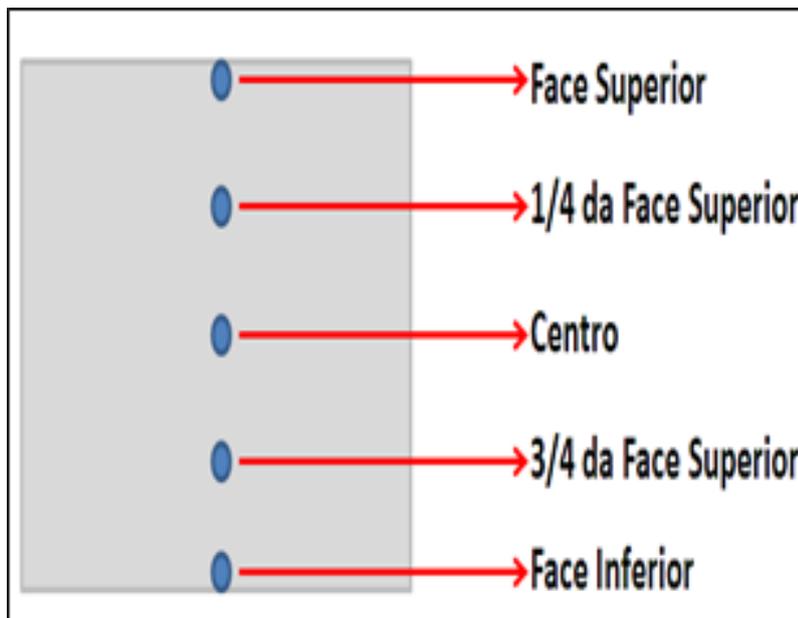


Figura 28 – Regiões ao longo da Espessura de interesse em estudo (Fonte: CSN)

4.2.5.1 Tamanho de Grão

Para as medições do Tamanho de Grão nos 5 diferentes pontos ao longo da espessura das Bobinas, utilizou-se de um Microscópio ótico, e pelo Método dos Interceptos (Malha: 7 x 7) e com o auxílio de um *Software* denominado por *ANALYSIS* foi calculado o Tamanho de Grão nos 5 pontos ao longo da espessura para todas as Bobinas que foram submetidas as novas Estratégias de Resfriamento.

4.2.5.2 Microdureza

Para as medições de Microdureza nos 5 diferentes pontos ao longo da espessura das Bobinas, utilizou-se de um Microdurômetro (Carga = 200 g, Tempo de Carga = 15 s), e então foi obtido o Perfil de Microdureza ao longo da Espessura para todas as Bobinas que foram submetidas as novas Estratégias de Resfriamento.

4.3 *Analyse* (Fase Analisar)

Nessa fase procurou-se analisar os resultados obtidos das medições feitas na fase anterior. No caso, foi analisado as condições de Planicidade, Evolução Microestrutural (Tamanho de Grão), Microdureza e Propriedades Mecânicas (Resistência Mecânica e Ductilidade) para as Bobinas que foram submetidas as diferentes Estratégias de Resfriamento implementas no Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* da LTQ#2 da CSN.

4.3.1 *Análise da Evolução Microestrutural (Tamanho de Grão ao longo da Espessura)*

4.3.1.1 Aço IF (Espessura: 3,33 mm)

4.3.1.1.1 Micrografia ao longo da Espessura

Para o Aço IF, foi obtido a Micrografia representativa da evolução microestrutural ao longo da espessura para as 7 Bobinas submetidas aos testes realizados (Figura 29). No caso, merece destacar a Bobina D (48,3% / 51,7%) que obteve uma evolução microestrutural ao longo da espessura fora do esperado, uma

vez que imaginava-se que as Bobinas E,F e G deveriam ter um Tamanho de Grão(a partir da face superior até o centro da espessura) maior que a Bobina D. No caso, foi analisado os gráficos de controle do processo de resfriamento pelo Programa DBS, e observou-se que para a Bobina D o Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* atuou de forma mais dinâmica, isto é, foi fornecido menos água para o resfriamento desta Bobina, dando condições suficientes para um maior crescimento de grão ao longo de toda espessura.

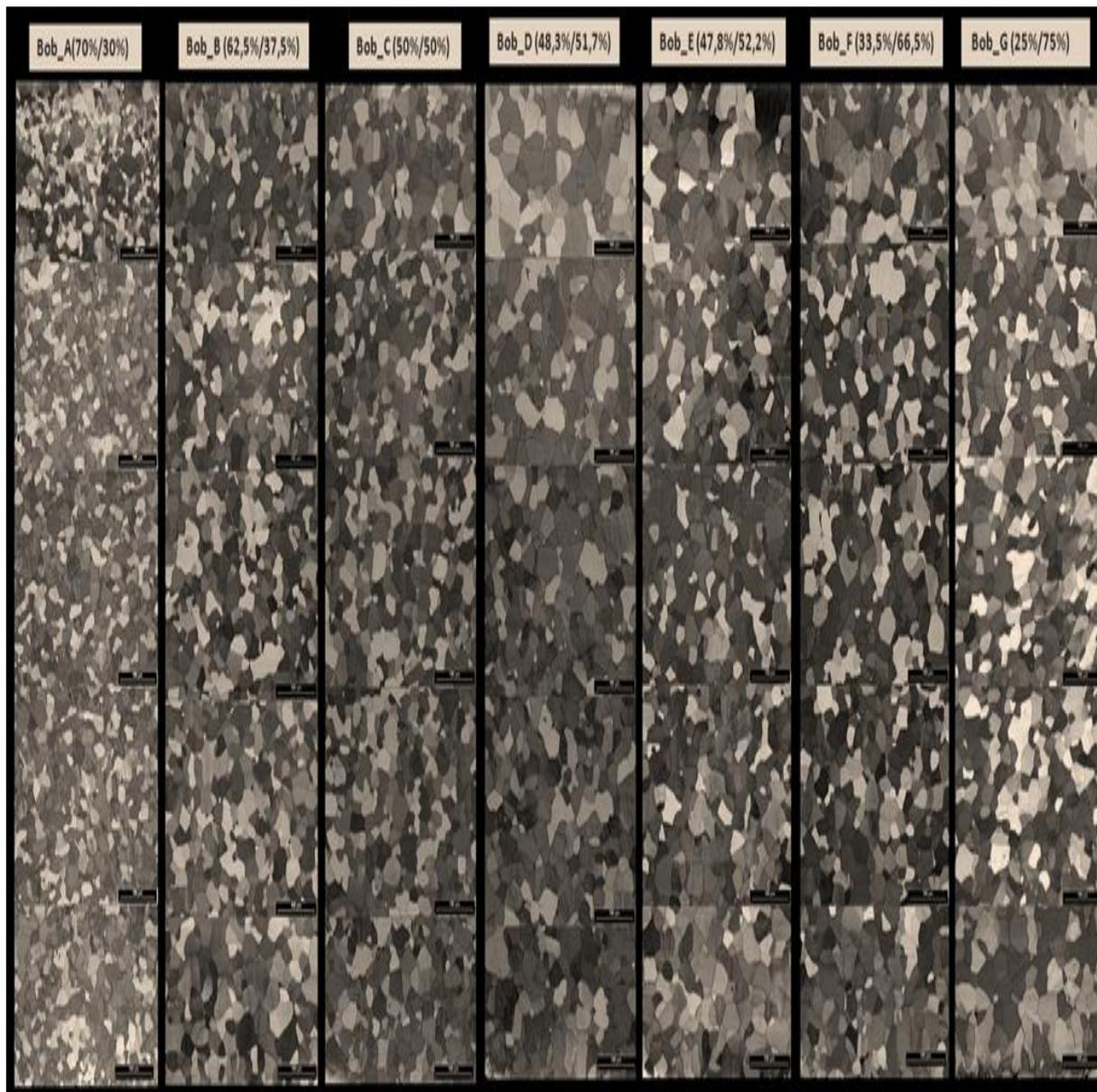


Figura 29 – Micrografia das 7 Bobinas de Aço IF (Espessura: 3.33 mm) (Fonte: CSN)

4.3.1.1.2 Tamanho de Grão

Para o Aço IF, o Perfil do Tamanho de Grão ao longo da Espessura estabeleceu as seguintes os resultados (Figura 30):

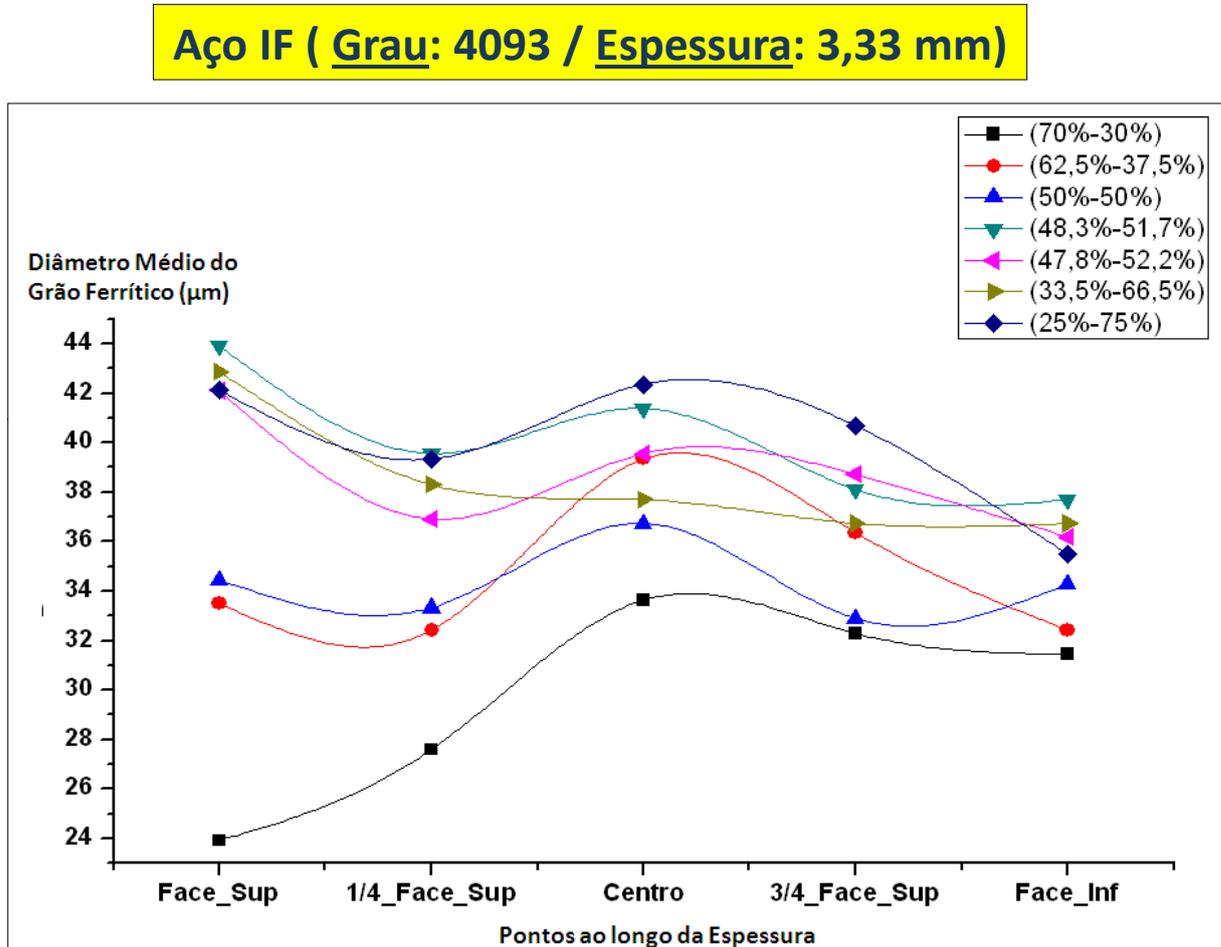


Figura 30 – Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico (em μm) ao longo da espessura para as 7 Bobinas de Aço IF (Fonte: OriginPro 8)

4.3.1.1.3 Discussões dos Resultados

Para a discussão dos resultados, procurou-se simplificar a análise com base em um quadro comparativo (Figura 31) apenas para as Bobinas com as Distribuições de Vazões extremas (Bobinas A e G) e com a Distribuição de Vazão intermediária (Bobina C), assim tem-se:

- Bobina A (70% / 30%)
- Bobina C (50% / 50%)
- Bobina G (25% / 75%)

Aço IF (Grau: 4093 / Espessura: 3,33 mm)

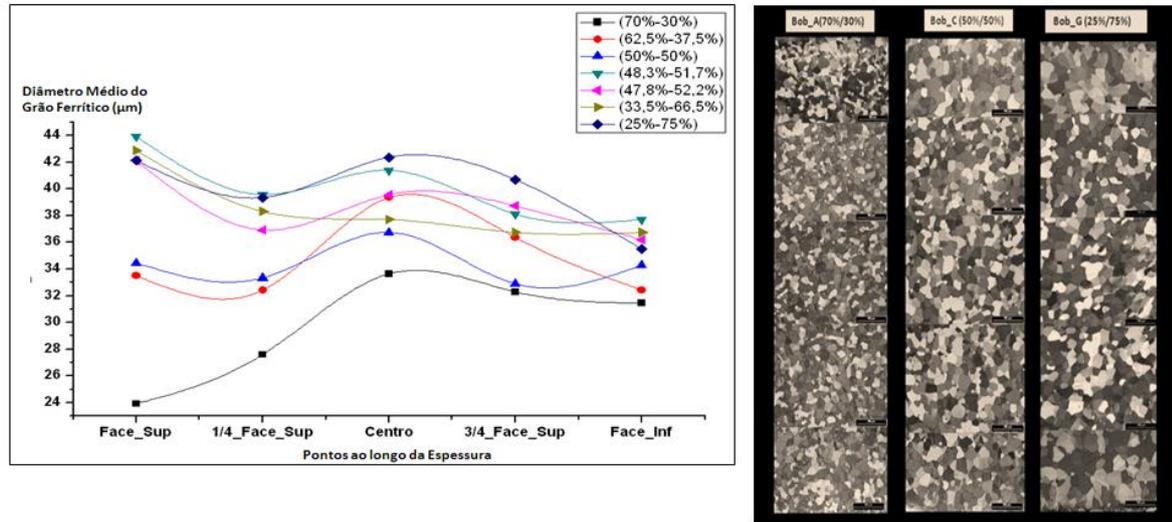


Figura 31 – Quadro Comparativo (Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico em função da Microestrutura) para o Aço IF (Fonte: CSN)

Para a Bobina A, o seu Perfil de Tamanho de Grão apresenta valores baixos de TGM logo na face superior (onde a distribuição de água é a máxima, 70%), seguida de um aumento brusco até atingir um valor máximo no centro da espessura(região onde apresenta os maiores níveis de temperatura), por fim ocorre uma suave queda do TGM até atingir a face inferior da Bobina(região onde a distribuição de água é menor do que a face superior, 30%).

Para a Bobina C, o seu Perfil de Tamanho de Grão apresenta valores baixos de TGM logo na face superior(onde a distribuição de água é 50%), seguida de uma oscilação com uma tendência predominante de aumento suave até atingir um valor máximo no centro da espessura(região onde apresenta os maiores níveis de temperatura), por fim ocorre uma suave queda do TGM até atingir a face inferior da Bobina(região onde a distribuição de água é 50%), onde este valor é bem próximo do valor de TGM na face superior.

Para a Bobina G, o seu Perfil de Tamanho de Grão apresenta valores altos de TGM logo na face superior (onde a distribuição de água é a mínima, 25%), seguida de um aumento até atingir um valor máximo no centro da espessura(região onde apresenta os maiores níveis de temperatura), por fim ocorre uma suave e posterior brusca queda do TGM até atingir a face inferior da Bobina(região onde a distribuição de água é maior do que a face superior, 75%).

Esses resultados nos mostram que de acordo com o resfriamento atual (Distribuição: 70% / 30%) estabelecido ao Aço IF pelo processo da empresa, o Perfil do TGM é não-simétrico, o que nos revela que há um crescimento de grão diferenciado entre as faces superior e inferior(possível causa para ocorrências de desvios de planicidade). O Perfil de TGM simétrico foi obtido com uma distribuição de 50% / 50%, isto é, com esse Padrão de Resfriamento obteve-se uma melhor homogeneidade granulométrica, o que pode nos direcionar esse Padrão de Resfriamento como um forte indicativo visando a melhoria de homogeneidade, e possivelmente de planicidade das Bobinas.

4.3.1.2 Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4,03 mm)

4.3.1.2.1 Micrografia ao longo da Espessura

Para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4,03 mm), foi obtido a Micrografia representativa da evolução microestrutural ao longo da espessura das 3 Bobinas submetidas aos testes realizados (Figura 32). No caso, os resultados foram bem condizentes como se esperava, isto é, visualmente observa-se um aumento no TGM na face Superior (acompanhado de uma diminuição do TGM na face inferior) a medida que diminuía a vazão de água na parte superior (Consequentemente aumentava-se a vazão de água na parte inferior) do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow*.

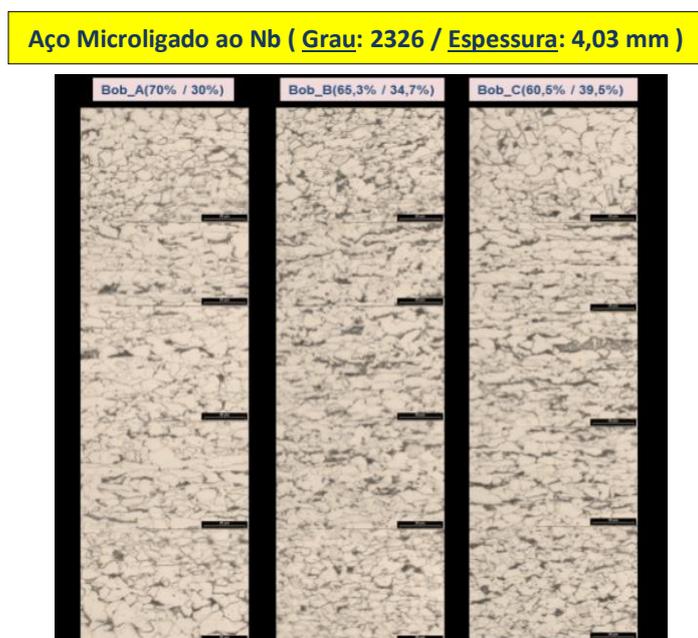


Figura 32 – Micrografia das 3 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4.03 mm) (Fonte: CSN)

Deve-se destacar também um aumento e uma boa distribuição ao longo da espessura de fase perlítica, devido ao equilíbrio um pouco aproximado das vazões entre as faces superior e inferior (observado na Bobina C com Distribuição de água: 60,5% / 39,5%). Não conseguiu-se obter distribuições de água próxima de 50% / 50%, uma vez que as Bobinas seguintes estavam começando a não atender a Temperatura de Bobinamento (CT), e portanto os testes foram interrompidos.

4.3.1.2.2 Tamanho de Grão

Para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4.03 mm), o Perfil do Tamanho de Grão ao longo da espessura estabeleceu os seguintes resultados (Figura 33):

Aço Microligado ao Nb (Grau: 2326 / Espessura: 4,03 mm)

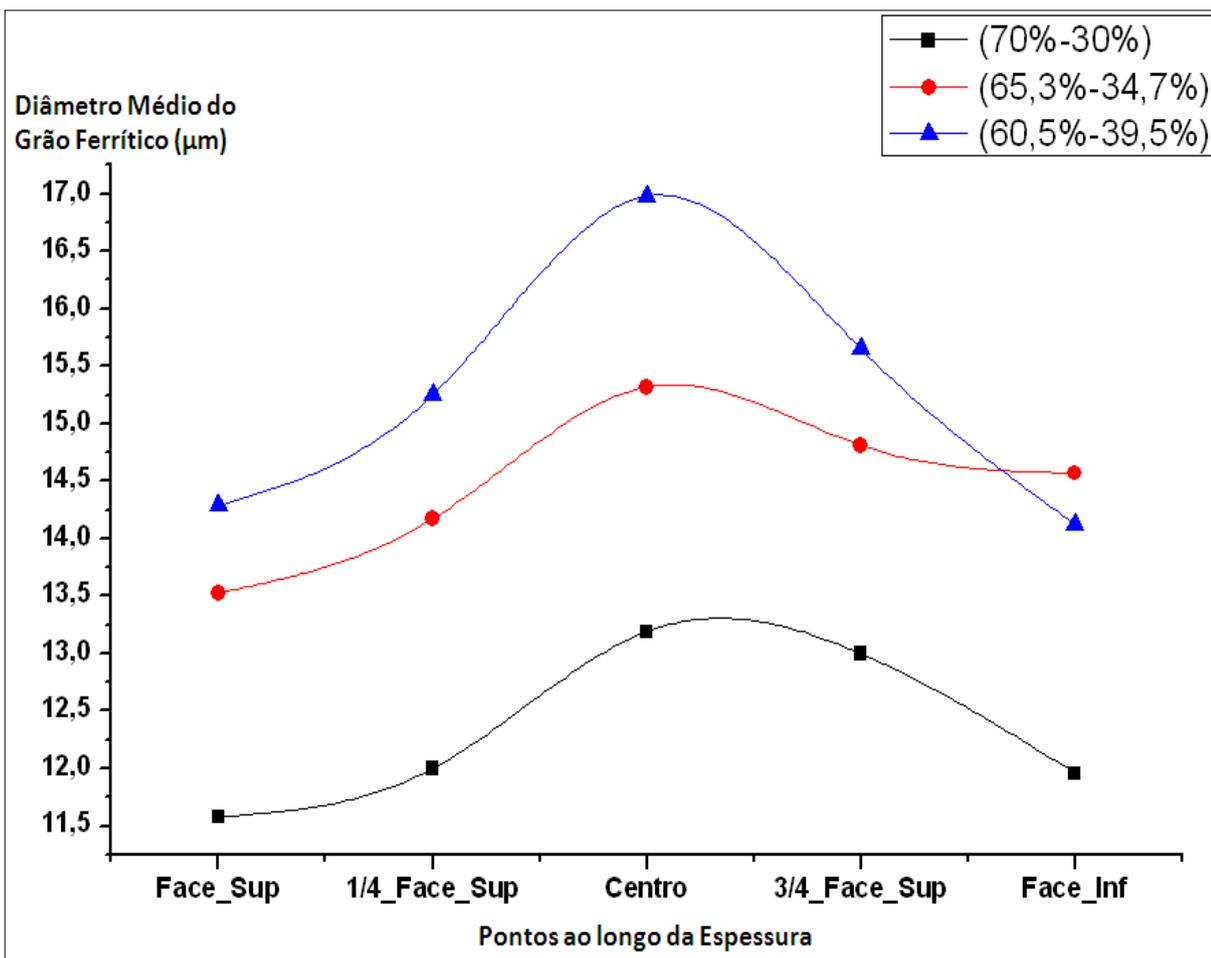


Figura 33 – Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico (em μm) ao longo da espessura para as 3 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Fonte: OriginPro 8)

4.3.1.2.3 Discussões dos Resultados

Para a discussão dos resultados, foi determinado o Perfil de TGM para as 3 Bobinas submetidas aos testes, obtendo a seguinte situação (Figura 34):

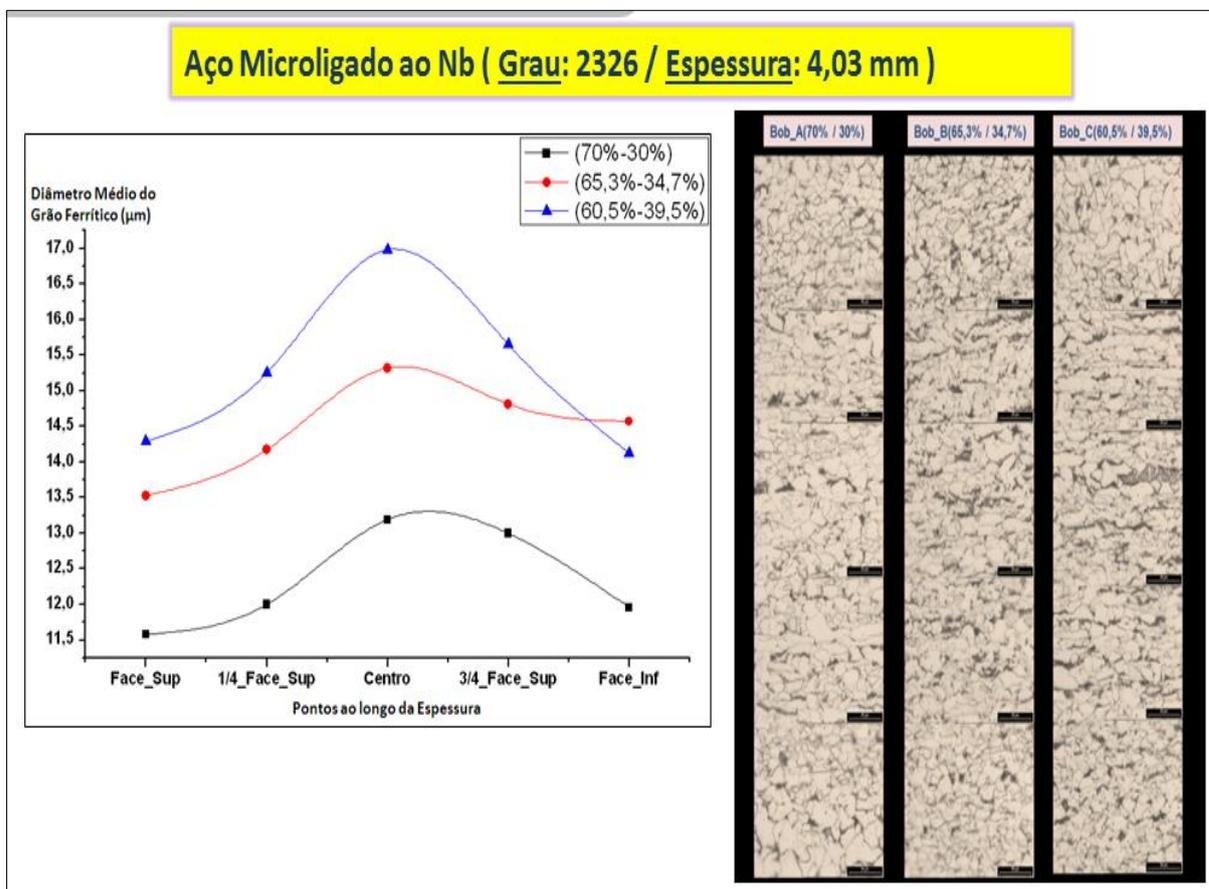


Figura 34 – Quadro Comparativo (Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico em função da Microestrutura) para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4.03 mm) (Fonte: CSN)

Para a Bobina A, o seu Perfil de Tamanho de Grão apresenta valores baixos de TGM logo na face superior (onde a distribuição de água é a máxima, 70%), seguida de um aumento brusco até atingir um valor máximo no centro da espessura(região onde apresenta os maiores níveis de temperatura), por fim ocorre uma suave e posterior queda brusca do TGM até atingir a face inferior da Bobina(região onde a distribuição de água é menor do que a face superior, 30%).

Para a Bobina B, o seu Perfil de Tamanho de Grão apresenta valores baixos de TGM logo na face superior(onde a distribuição de água é 65,3%), seguido de aumento até atingir um valor máximo no centro da espessura(região onde apresenta os maiores níveis de temperatura), por fim ocorre uma pequena e suave

queda do TGM até atingir a face inferior da Bobina(região onde a distribuição de água é 34,7%).

Para a Bobina C, o seu Perfil de Tamanho de Grão apresenta valores baixos de TGM logo na face superior (onde a distribuição de água é a mínima, 25%), seguida de um aumento até atingir um valor máximo no centro da espessura(região onde apresenta os maiores níveis de temperatura), por fim ocorre uma queda do TGM até atingir a face inferior da Bobina(região onde a distribuição de água é maior do que a face superior, 75%) obtendo valor de TGM próximo do valor do TGM na face superior, proporcionando um Perfil do Tamanho de Grão Simétrico.

Esses resultados nos mostram que de acordo com o resfriamento atual (Distribuição: 70% / 30%) estabelecido ao Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4,03 mm) pelo processo da empresa, o Perfil do TGM é não-simétrico, o que nos revela que há um crescimento de grão diferenciado entre as faces superior e inferior(possível causa para ocorrências de desvios de planicidade). O Perfil de TGM simétrico foi obtido com uma distribuição de 60,5% / 39,5%, isto é, com esse Padrão de Resfriamento obteve-se uma melhor homogeneidade granulométrica, o que pode nos direcionar esse Padrão de Resfriamento como um forte indicativo visando a melhoria de homogeneidade, e possivelmente de planicidade das Bobinas.

4.3.1.3 Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6,40 mm)

4.3.1.3.1 Micrografia ao longo da Espessura

Para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6,40 mm), foi obtido a Micrografia representativa da evolução microestrutural ao longo da espessura das 7 Bobinas submetidas aos testes realizados (Figura 35). No caso, os resultados foram bem condizentes como se esperava, isto é, visualmente observa-se um aumento no TGM na face Superior (acompanhado de uma diminuição do TGM na face inferior) a medida que diminuía a vazão de água na parte superior (Consequentemente aumentava-se a vazão de água na parte inferior) do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow*. Deve-se destacar também um aumento e uma boa distribuição ao longo da espessura de fase perlítica (principalmente no centro da espessura), devido a alcance contínuo no equilíbrio das vazões entres as faces superior e inferior.

Aço Microligado ao Nb (Grau: 5466 / Espessura: 6,40 mm)

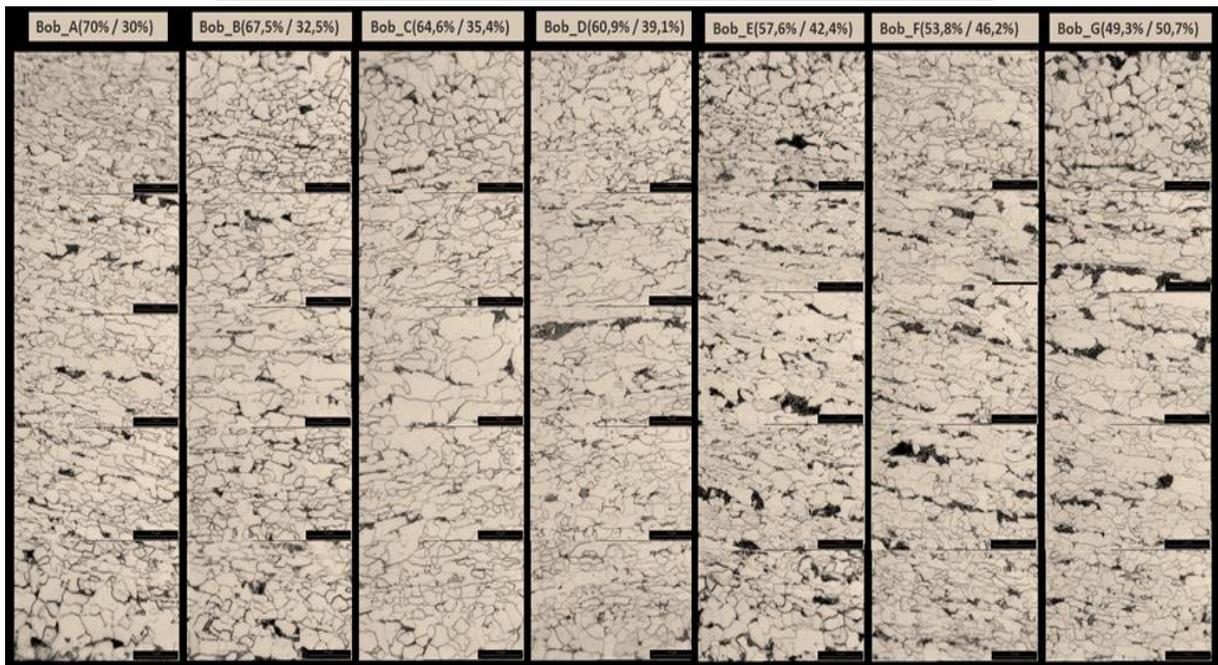


Figura 35 – Micrografia das 7 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm) (Fonte: CSN)

4.3.1.3.2 Tamanho de Grão

Para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6,40 mm), o Perfil do Tamanho de Grão ao longo da Espessura estabeleceu os seguintes resultados (Figura 36):

Aço Microligado ao Nb (Grau: 5466 / Espessura: 6,40 mm)

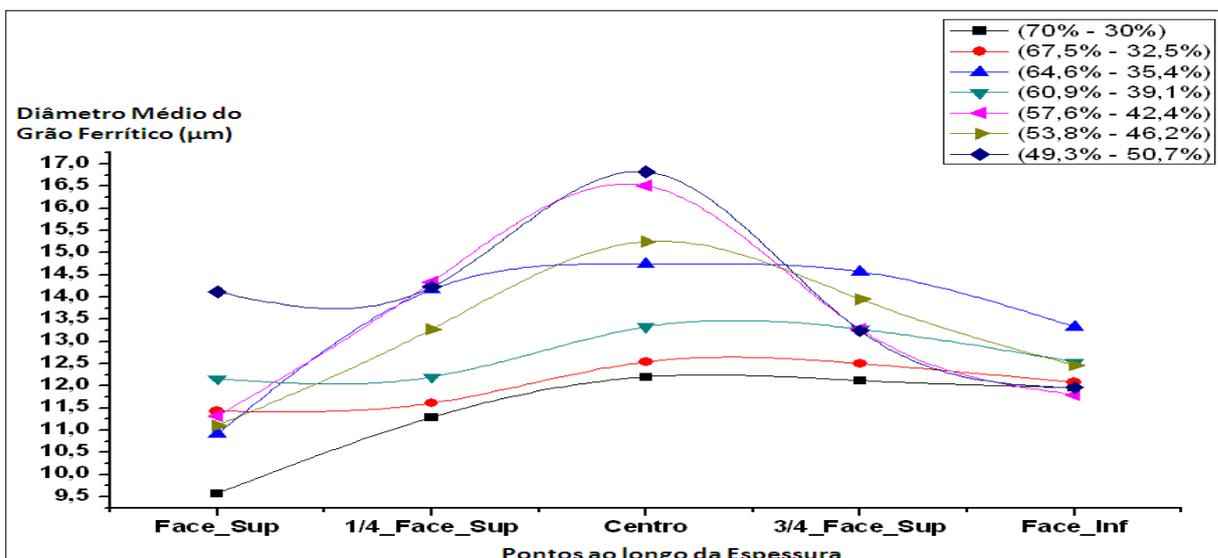


Figura 36 – Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico (em µm) ao longo da espessura para as 7 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm) (Fonte: OriginPro 8)

4.3.1.3.3 Discussões dos Resultados

Para a discussão dos resultados, procurou-se simplificar a análise com base em um quadro comparativo (Figura 37) apenas para as Bobinas com as Distribuições de Vazões extremas (Bobinas A e G) e com a Distribuição de Vazão intermediária (Bobina D), assim tem-se:

- Bobina A (70% / 30%)
- Bobina D (60,9% / 39,1%)
- Bobina G (49,3% / 50,7%)

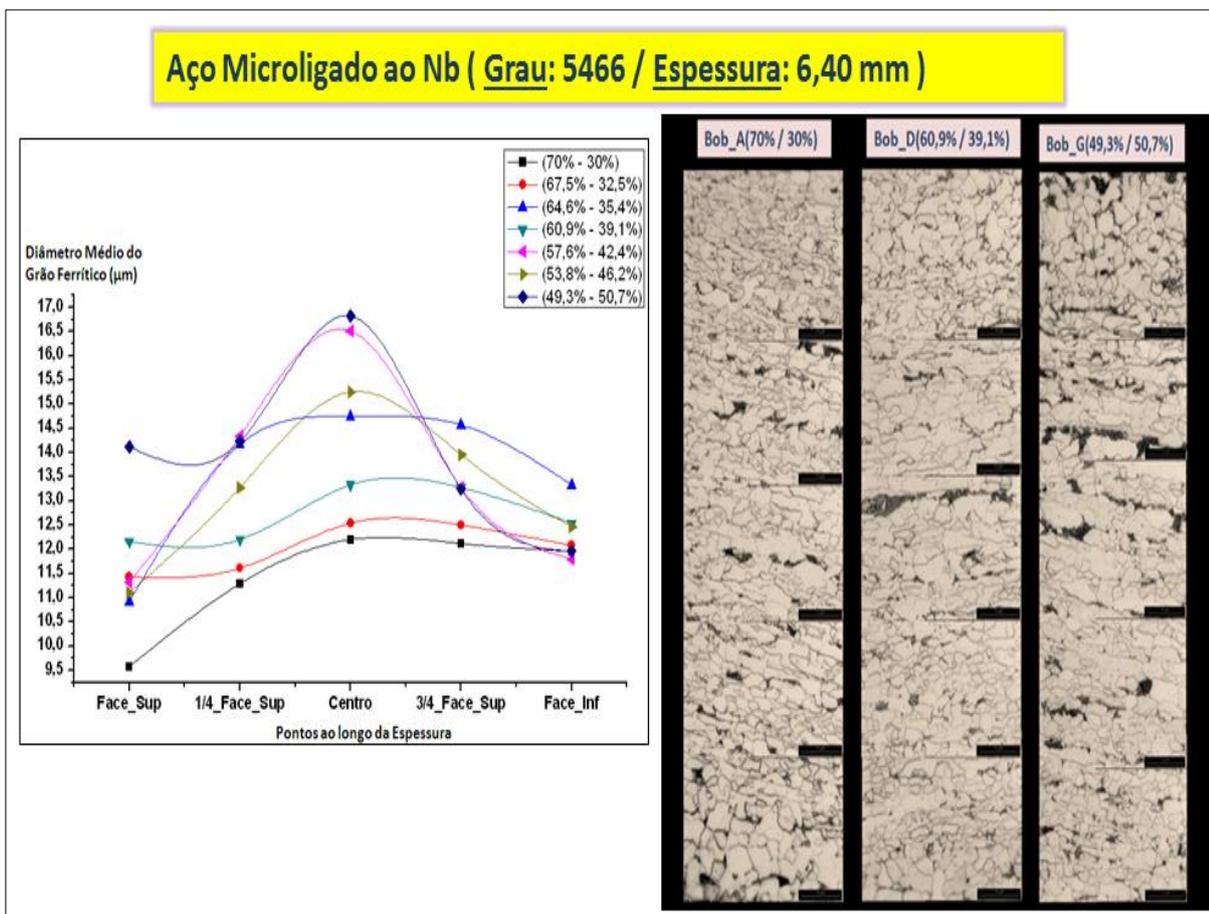


Figura 37 – Quadro Comparativo (Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico em função da Microestrutura) para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm)

(Fonte: CSN)

Para a Bobina A, o seu Perfil de Tamanho de Grão apresenta valores baixos de TGM logo na face superior (onde a distribuição de água é a máxima, 70%), seguida de um aumento brusco até atingir um valor máximo no centro da espessura (região onde apresenta os maiores níveis de temperatura), por fim ocorre

uma permanência do valor de TGM até atingir a face inferior da Bobina(região onde a distribuição de água é menor do que a face superior, 30%), resultado este não condizente com o que se esperava.

Para a Bobina D, o seu Perfil de Tamanho de Grão apresenta valores baixos de TGM nas 2 primeiras regiões da espessura, seguido de aumento até atingir um valor máximo no centro da espessura(região onde apresenta os maiores níveis de temperatura), por fim ocorre uma pequena e suave queda do TGM até atingir a face inferior da Bobina. O Perfil dessa Bobina apresentou oscilações coerentes com o que se esperava.

Para a Bobina G, o seu Perfil de Tamanho de Grão apresenta uma tendência de aumento de TGM até atingir um valor máximo no centro da espessura (região onde apresenta os maiores níveis de temperatura), por fim ocorre uma queda muito brusca do TGM até atingir a face inferior da Bobina, o que nos mostra que com a Distribuição de água 49,3% / 50,7% estabelecido sobre essa Bobina, a mesma teve um grande aumento de TGM na sua face superior, em contrapartida que sua face inferior obteve uma grande redução de TGM, gerando um perfil não-simétrico, talvez não sendo interessante este resultado.

Esses resultados nos mostram que de acordo com o resfriamento atual (Distribuição: 70% / 30%) estabelecido ao Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6,40 mm) pelo processo da empresa, o Perfil do TGM é não-simétrico, o que nos revela que há um crescimento de grão diferenciado entre as faces superior e inferior(possível causa para ocorrências de desvios de planicidade). Observa-se também que ocorreu muitas oscilações de valores de TGM ao se fazer uma comparação entre as 7 Bobinas, e que, o Perfil de TGM simétrico foi obtido em duas Bobinas (Bobina E com uma distribuição de 57,6% / 42,4% e Bobina F com uma distribuição de 53,8% / 46,2%), isto é, com esses Padrões de Resfriamento obtiveram-se uma melhor homogeneidade granulométrica, o que pode nos direcionar estes Padrões de Resfriamento como um forte indicativo visando a melhoria de homogeneidade, e possivelmente de planicidade das Bobinas.

4.3.1.4 Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9,44 mm)

4.3.1.4.1 Micrografia ao longo da Espessura

Para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9,44 mm), foi obtido a Micrografia representativa da evolução microestrutural ao longo da espessura das 4 Bobinas submetidas aos testes realizados (Figura 38). No caso, os resultados foram bem condizentes como se esperava, isto é, visualmente observa-se um aumento no TGM na face Superior (acompanhado de uma diminuição do TGM na face inferior) a medida que diminuía a vazão de água na parte superior (Conseqüentemente aumentava-se a vazão de água na parte inferior) do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow*.

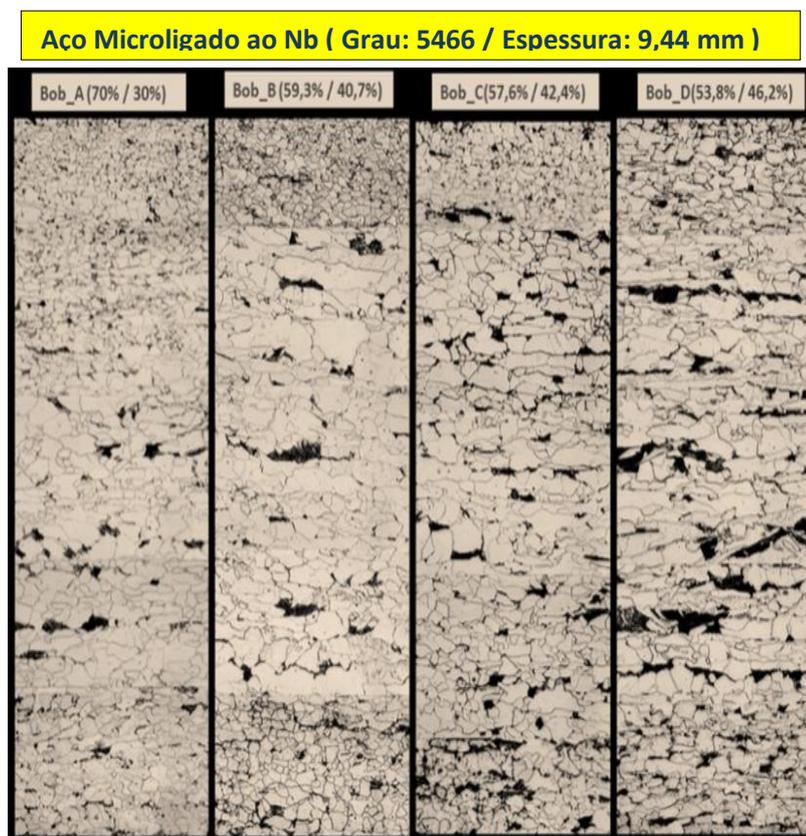


Figura 38 – Micrografia das 4 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9.44 mm) (Fonte: CSN)

Deve-se destacar também um aumento e uma boa distribuição ao longo da espessura de fase perlítica (principalmente no centro da espessura), devido a alcance contínuo no equilíbrio das vazões entres as faces superior e inferior.

4.3.1.4.2 Tamanho de Grão

Para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9,44 mm), o Perfil do Tamanho de Grão ao longo da Espessura estabeleceu os seguintes resultados (Figura 39):

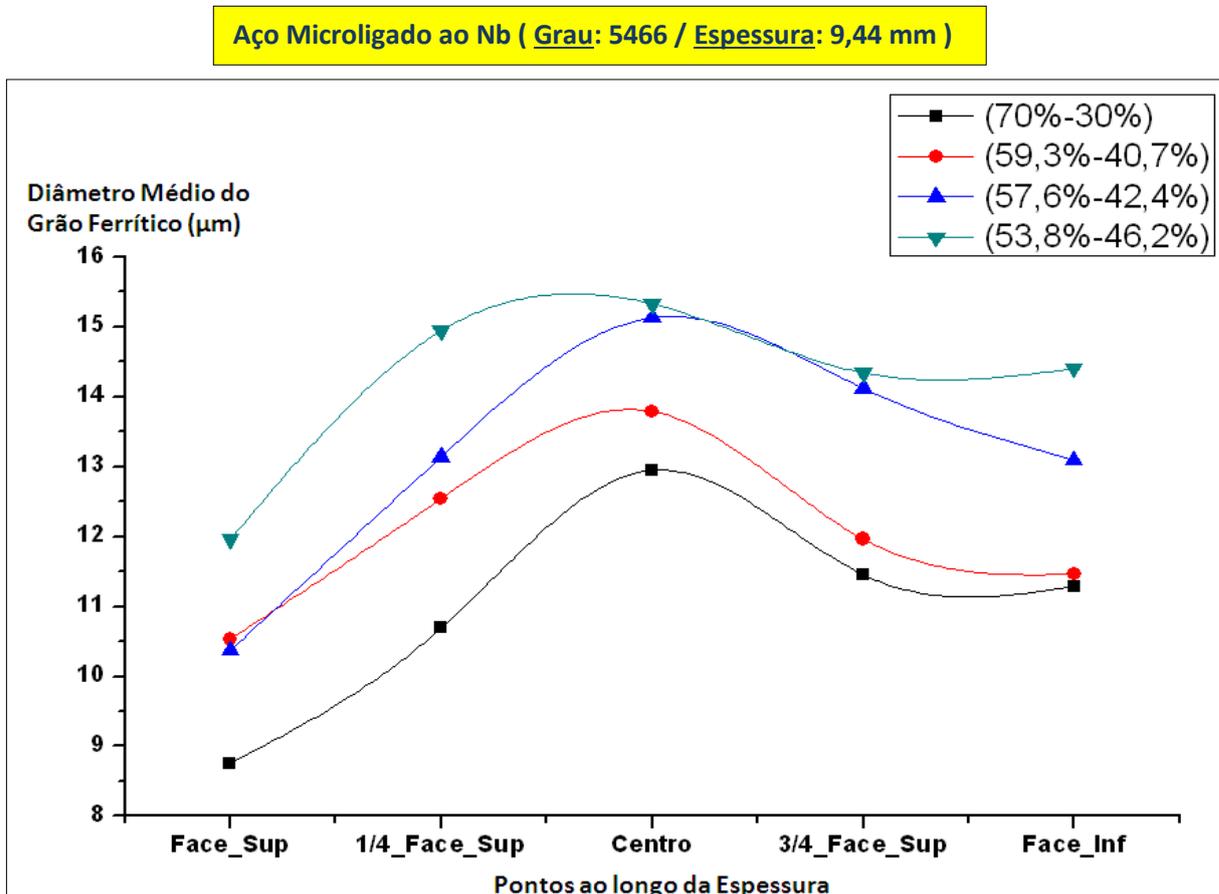


Figura 39 – Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico (em μm) ao longo da espessura para as 4 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9.44 mm) (Fonte: OriginPro 8)

4.3.1.4.3 Discussões dos Resultados

Para a discussão dos resultados, procurou-se simplificar a análise com base em um quadro comparativo (Figura 40) apenas para as Bobinas com as Distribuições de Vazões extremas (Bobinas A e D) e com a Distribuição de Vazão intermediária (Bobina B), assim tem-se:

- Bobina A (70% / 30%)
- Bobina B (59,3% / 40,7%)
- Bobina D (53,8% / 46,2%)

Aço Microligado ao Nb (Grau: 5466 / Espessura: 9,44 mm)

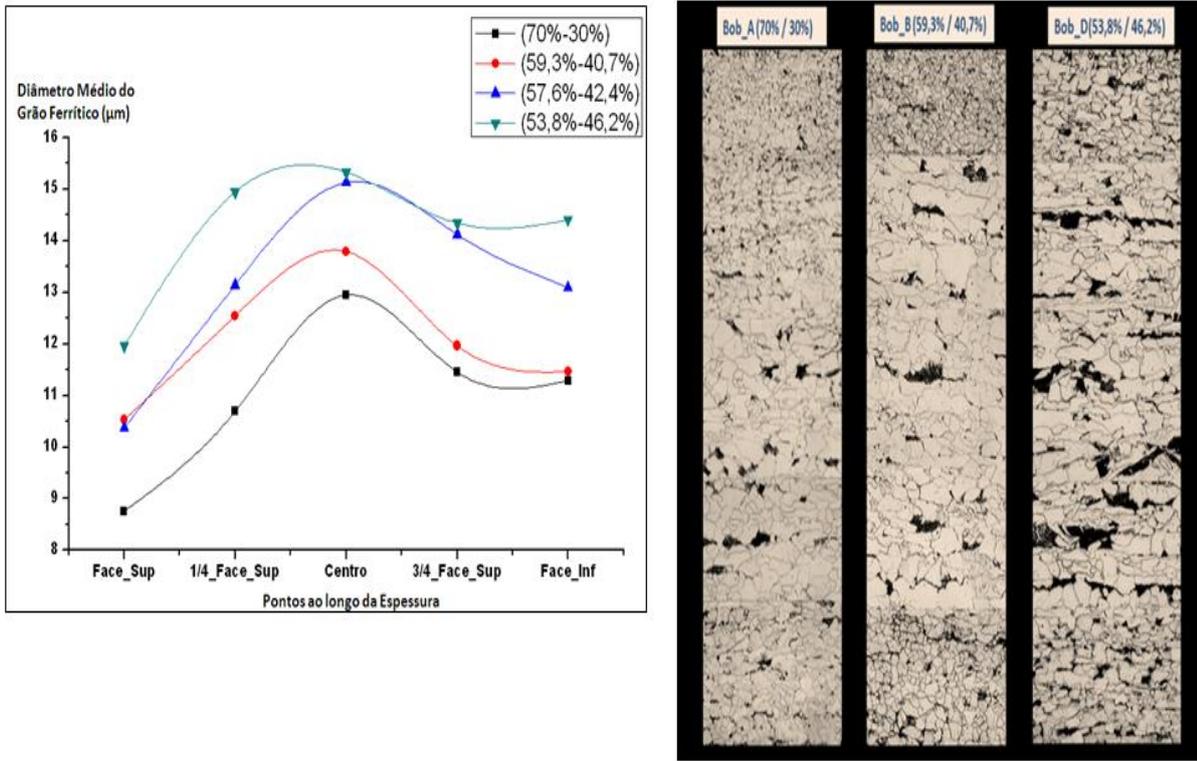


Figura 40 – Quadro Comparativo (Perfil do Tamanho de Grão Ferrítico em função da Microestrutura) para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9.44 mm)
(Fonte: CSN)

Para a Bobina A, o seu Perfil de Tamanho de Grão apresenta valores baixos de TGM logo na face superior (onde a distribuição de água é a máxima, 70%), seguida de um aumento brusco até atingir um valor máximo no centro da espessura (região onde apresenta os maiores níveis de temperatura), por fim ocorre uma queda brusca e consequente suavidade do valor de TGM até atingir a face inferior da Bobina (região onde a distribuição de água é menor do que a face superior, 30%), resultando em um Perfil de TGM não-simétrico conforme se esperava.

Para a Bobina B, o seu Perfil de Tamanho de Grão apresenta valores baixos de TGM logo na face superior, seguido de aumento brusco até atingir um valor máximo no centro da espessura (região onde apresenta os maiores níveis de temperatura), por fim ocorre uma queda brusca do TGM até atingir a face inferior da Bobina. O Perfil dessa Bobina apresentou uma condição simétrica aproximadamente desejável.

Para a Bobina D, o seu Perfil de Tamanho de Grão apresenta uma tendência de aumento de TGM até atingir um valor máximo no centro da espessura (região onde apresenta os maiores níveis de temperatura), por fim ocorre uma queda suave do TGM até atingir a face inferior da Bobina, resultando em um Perfil de TGM também não-simétrico.

Esses resultados nos mostram que de acordo com o resfriamento atual (Distribuição: 70% / 30%) estabelecido ao Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9,44 mm) pelo processo da empresa, o Perfil do TGM é não-simétrico, o que nos revela que há um crescimento de grão diferenciado entre as faces superior e inferior(possível causa para ocorrências de desvios de planicidade). Não se obteve nenhum Perfil de TGM aproximadamente uniforme, porém o melhor resultado foi um perfil simétrico para a Bobina B (Distribuição de água 59,3% / 40,7%), o que pode nos direcionar este Padrão de Resfriamento como um forte indicativo visando a melhoria de homogeneidade, e possivelmente de planicidade das Bobinas.

4.3.1.5 Discussões dos Resultados em comparação com os testes para espessuras diferentes

Fazendo-se uma análise comparativa (Figura 41) entre as condições de homogeneidade granulométrica (Variação do Diâmetro Médio do Grão Ferrítico) entre as faces superior e inferior para o Aço IF de espessura de 3.33 mm, observa-se que a melhor condição é obtida para uma Distribuição de água de 50% / 50%, resultado este satisfatório e esperado. Para o Aço Microligado ao Nb (com espessuras de 4.03, 6.40 e 9.44 mm), observa-se uma tendência de melhor obtenção de uniformidade granulométrica entre as faces para as Bobinas submetidas a Distribuição de água da ordem de 60% / 40%, isto é:

- Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4.03 mm) → Melhor Distribuição de Água: 60,5% / 39,5%
- Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm) → Melhor Distribuição de Água: 60,9% / 39,1%
- Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9.44 mm) → Melhor Distribuição de Água: 59,3% / 40,7%

Esses resultados para o Aço Microligado ao Nb nos levam ao indicativo de que a homogeneidade granulométrica entre as faces superior e inferior é obtida para um Padrão de Resfriamento da ordem de 60% / 40%, e que este padrão pode ser um modo de resfriamento eficiente quando eventualmente necessitar resolver problemas de produto/Aço envolvendo homogeneidade granulométrica.

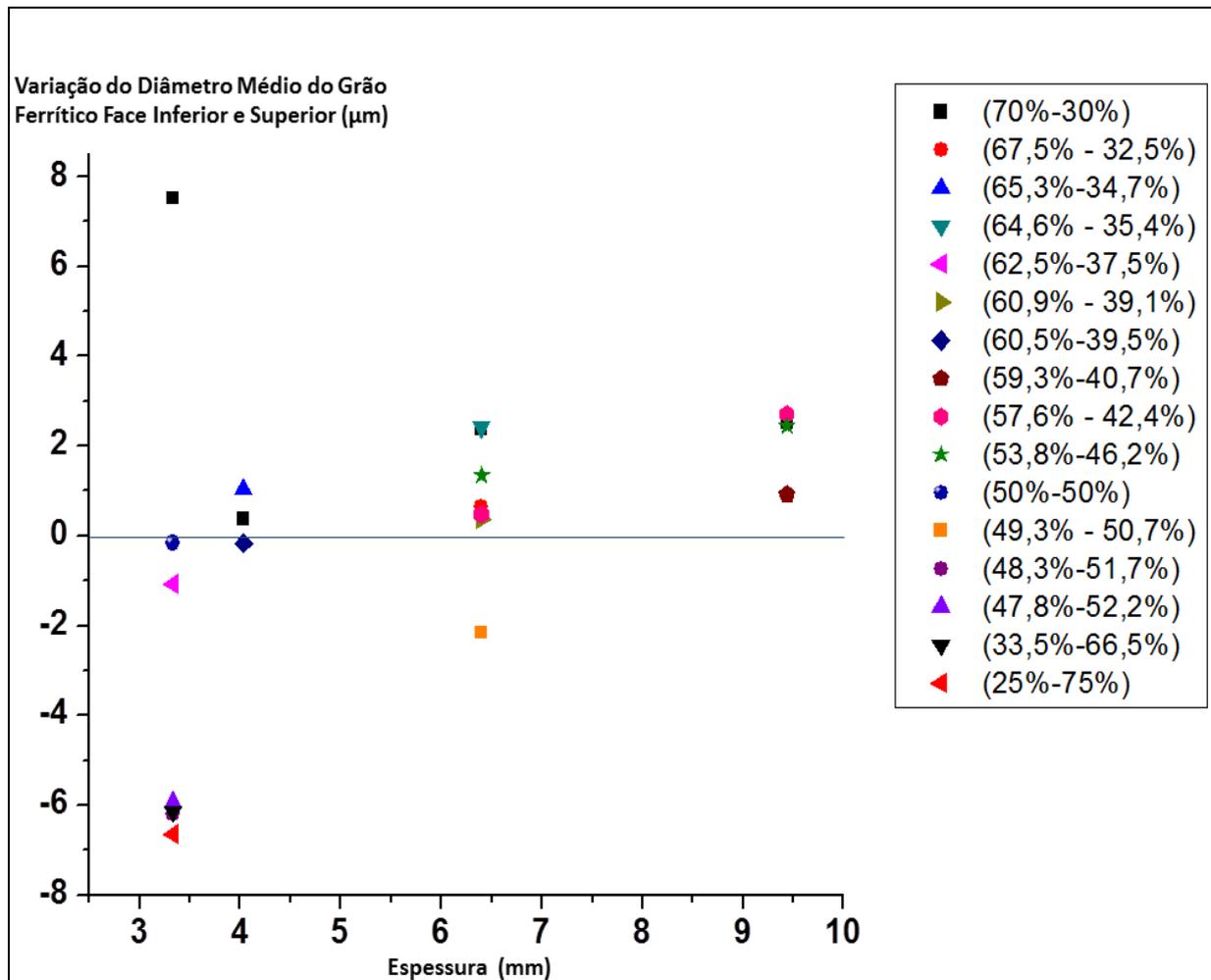


Figura 41 - Variação do Diâmetro Médio do Grão (Face Inferior e Superior) para diferentes Espessuras da Tira a Quente, considerando todas as Estratégias de Resfriamento estabelecidas (Fonte: OriginPro 8)

Uma vez concluído que o Padrão de Resfriamento aproximadamente 60% /40% foi o que proporcionou melhores condições de homogeneidade granulométrica, então é feita uma análise comparativa com o Padrão de Resfriamento adotado pela empresa (70% / 30%) para verificar o quanto se reduziu de heterogeneidade granulométrica com os testes realizados (Figura 42).

Segundo observa-se, no Aço Microligado ao Nb para as 3 espessuras (4.03, 6.40 e 9.44 mm), foi obtido as seguintes melhorias em termos de Heterogeneidade Granulométrica (Variação do Diâmetro Médio do Grão entre as faces inferior e superior):

- Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4.03 mm) → Redução de (0.38 mm) para (-0.17 mm)
- Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm) → Redução de (2.39 mm) para (0.38 mm)
- Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9.44 mm) → Redução de (2.53 mm) para (0.93 mm)

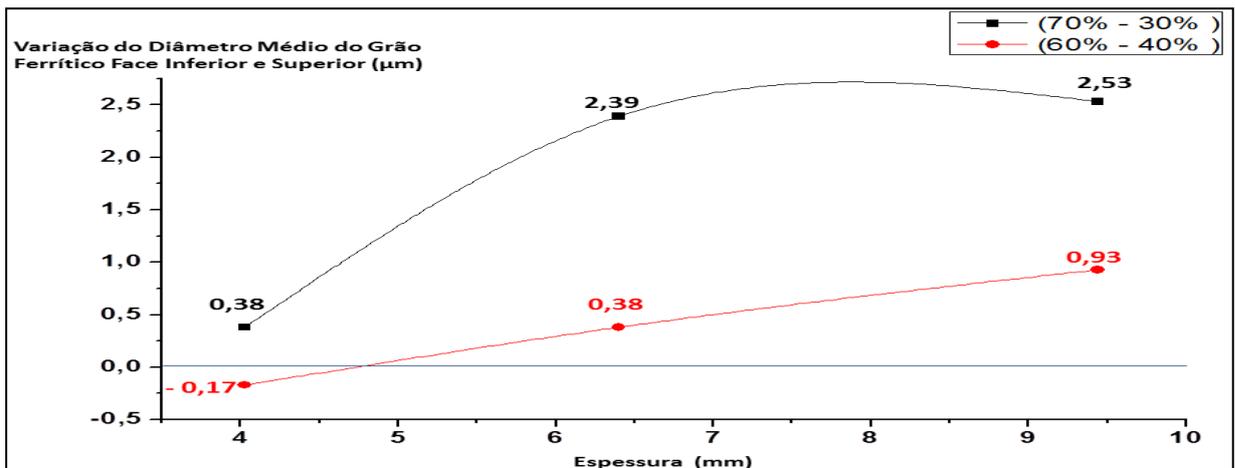


Figura 42 - Variação do Diâmetro Médio do Grão (Face Inferior e Superior) para diferentes Espessuras da Tira a Quente de Aço Microligado ao Nb, considerando apenas as Estratégias de Resfriamento de 70% - 30% e 60% - 40% (Fonte: OriginPro 8)

Esses resultados de melhoria nos mostram que é possível, de fato, melhorar as condições de homogeneidade granulométrica ao Aço, a partir de modificações no Padrão de Resfriamento do Sistema *Laminar Flow*.

Além disso, deve-se destacar, a observação no gráfico em relação a tendência de aumento de heterogeneidade granulométrica (Variação do Diâmetro Médio do Grão entre as faces inferior e superior) com o aumento da espessura da Bobina, resultado este satisfatório e esperado, uma vez que sabe-se, quanto maior a espessura do material, maior o gradiente térmico e, conseqüentemente maior a tendência de resfriamento diferenciado entre as faces, proporcionando uma maior tendência de formação de granulometria heterogênea ao longo da espessura [1].

- Padrão 70%/30%: **0.38 mm**(Esp. 4,03 mm) → **2.39 mm**(Esp. 6,40 mm) → **2.53 mm**(Esp. 9,44 mm)
- Padrão 60%/40%: **-0.17 mm**(Esp. 4,03 mm) → **0.38 mm**(Esp. 6,40 mm) → **0.93 mm**(Esp. 9,44 mm)

4.3.2 Análise de Planicidade

4.3.2.1 Planicidade do Aço IF

A Planicidade (Flecha Média) foi medida para as 7 Bobinas de Aço IF que foram submetidas a diferentes estratégias de resfriamento, obtendo o seguinte resultado (Figura 43):

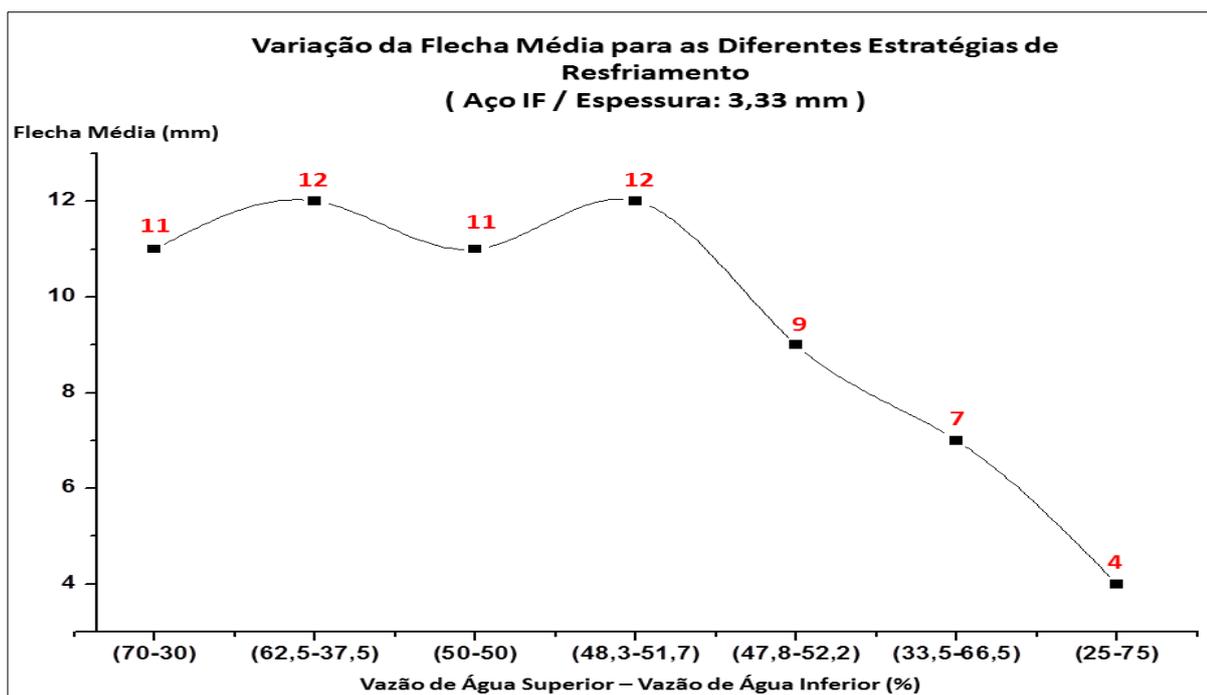


Figura 43 – Variação da Flecha Média para as Diferentes Estratégias de Resfriamento para o Aço IF (Espessura: 3.33 mm) (Fonte: OriginPro 8)

4.3.2.2 Discussões dos Resultados

Conforme os resultados obtidos pelo Perfil de TGM, procurou-se calcular a variação do TGM entre as faces superior e inferior das Bobinas. O valor dessa variação nos indica as condições de homogeneidade granulométrica entre estas faces. A partir deste parâmetro (variação do TGM entre as faces superior e inferior) buscou-se correlacionar com os valores de planicidade (flecha média) medidos para cada Bobina, de modo que se possa estabelecer alguma correlação/influência entre esses fatores (Homogeneidade Granulométrica entre as faces e Planicidade) (Figura 44).

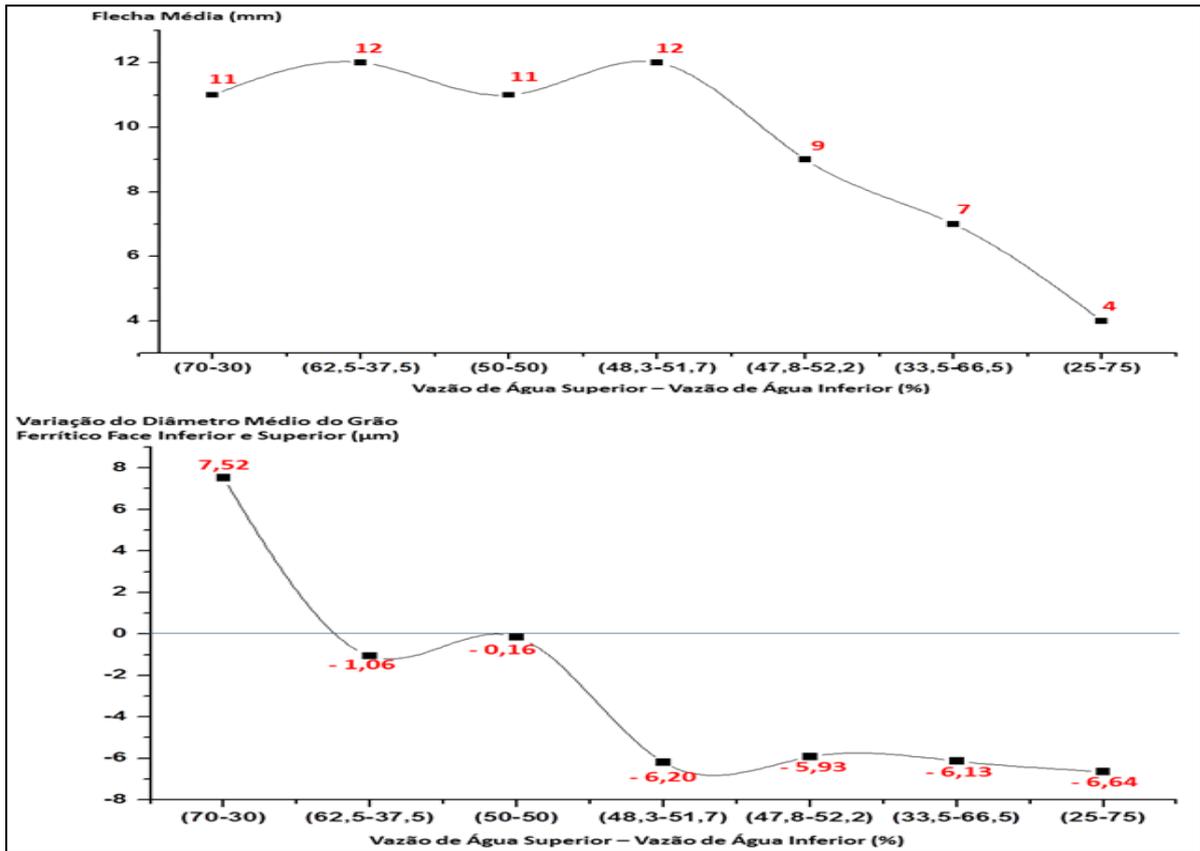


Figura 44 - Diferentes Estratégias de Resfriamento estabelecidas ao Aço IF em função da Flecha Média e Variação do Diâmetro Médio do Grão Ferrítico (Face Inferior e Face Superior) (Fonte: CSN)

Analisando os resultados, observa-se que a Bobina que obteve a menor variação do TGM (\varnothing face inferior - \varnothing face superior = - 0,16 mm), isto é, a que teve a melhor condição de homogeneidade granulométrica entre as faces superior e inferior (Bobina com Distribuição de água: 50% / 50%), não é a Bobina que teve a melhor condição de planicidade (Bobina com Distribuição de água de 50% / 50% com Flecha Média de 11 mm). Por outro lado, a Bobina que obteve a melhor condição de planicidade (Bobina com Distribuição de água de 25% / 75% com Flecha Média de 4 mm), ao mesmo tempo, não é a Bobina com melhor condição de homogeneidade granulométrica (\varnothing face inferior - \varnothing face superior = - 6,64 mm).

Logo, verifica-se que não há uma relação direta entre planicidade e homogeneidade granulométrica, uma vez que esperava-se que, a Bobina com melhores condições de planicidade seria a que tivesse as melhores condições de homogeneidade granulométrica entre as faces superior e inferior. Por tanto, possivelmente pode haver uma certa influência da homogeneidade granulométrica na planicidade, porém, existem outros fatores que influenciam ao mesmo tempo, o que resulta em uma conclusão não explícita com base nesses resultados.

4.3.3 Análise da Microdureza

4.3.3.1 Aço IF (Espessura: 3,33 mm)

4.3.3.1.1 Perfil de Microdureza

Para o Aço IF, o Perfil da Microdureza ao longo da Espessura estabeleceu os seguintes resultados (Figura 45):

Aço IF (Grau: 4093 / Espessura: 3,33 mm)

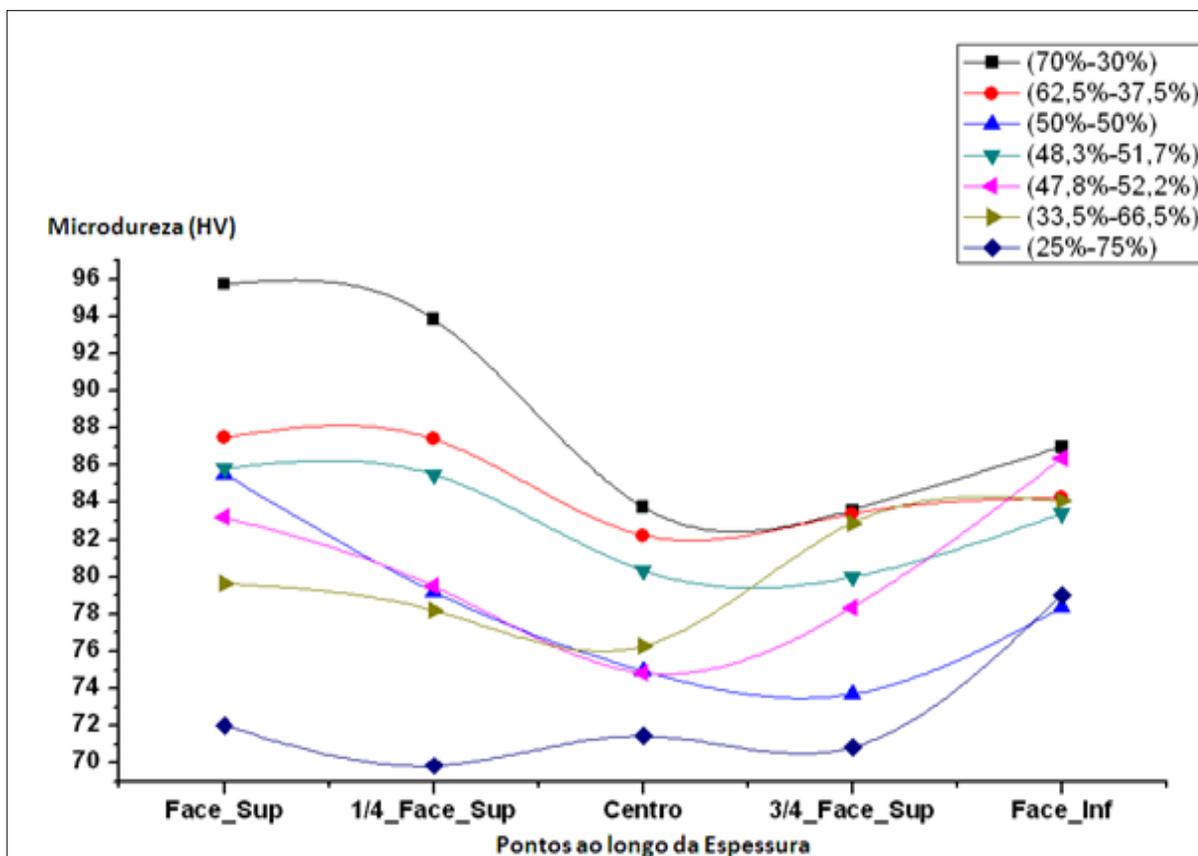


Figura 45 – Perfil de Microdureza ao longo da espessura para as 7 Bobinas de Aço IF

(Fonte: OriginPro 8)

4.3.3.1.2 Discussões dos Resultados

Para a discussão dos resultados, procurou-se simplificar a análise com base em um quadro comparativo (Figura 46) apenas para as Bobinas com as Distribuições de Vazões extremas (Bobinas A e G) e com a Distribuição de Vazão intermediária (Bobina C), assim tem-se:

- Bobina A (70% / 30%)
- Bobina C (50% / 50%)
- Bobina G (25% / 75%)

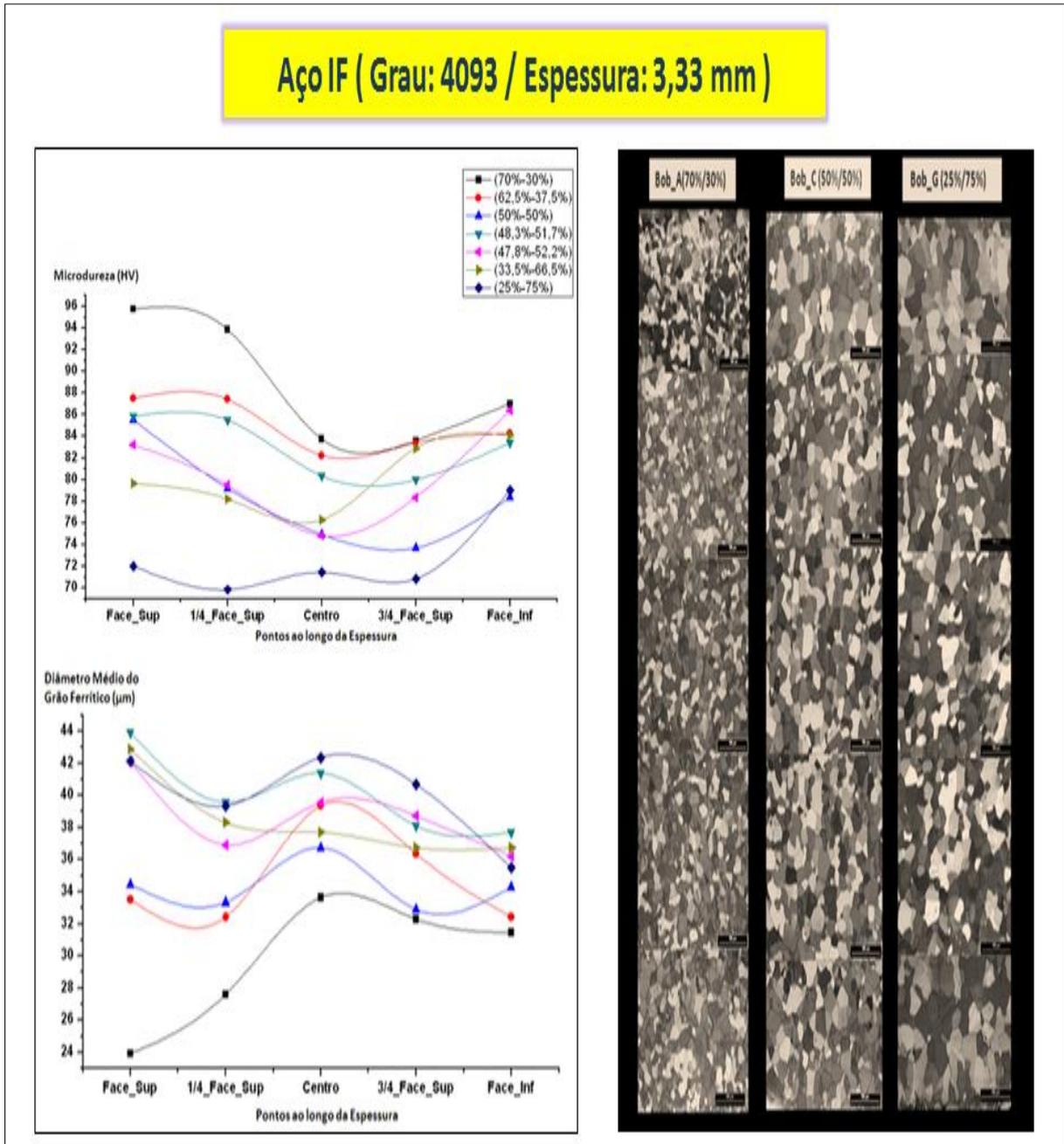


Figura 46 – Quadro Comparativo (Perfil da Microdureza em função do Tamanho de Grão) para o Aço IF (Fonte: CSN)

Para a Bobina A, o seu Perfil de Microdureza apresenta valores elevados de Microdureza logo na face superior (onde o TGM é menor devido a distribuição de água ser a máxima, 70%), seguida de uma queda suave e posterior queda brusca

até atingir um valor mínimo de Microdureza no centro da espessura(região onde o TGM é maior devido apresentar maiores níveis de temperatura), por fim ocorre um pequeno aumento de Microdureza até atingir a face inferior da Bobina(devido que do centro até a face inferior ocorre um diminuição do TGM,uma vez que a vazão na face inferior é 30%).

Para a Bobina C, o seu Perfil de Microdureza apresenta valores altos de Microdureza logo na face superior (onde a distribuição de água é 50%), seguida de uma queda até atingir um valor mínimo a $\frac{3}{4}$ da face superior(região onde o TGM é bem próximo tanto da face superior como da face inferior), por fim ocorre um aumento de Microdureza na face inferior (região onde o TGM diminuiu pelo aumento na vazão de água para 50%).

Para a Bobina G, o seu Perfil de Microdureza apresenta pequenas oscilações, proporcionando uma condição de Microdureza distribuída de forma homogênea ao longo da espessura. O resultado é um Perfil simétrico, e bem interessante para utilizá-lo como um eventual indicativo de correlação entre Microdureza e Planicidade das Bobinas.

Esses resultados nos mostram que, para o Aço IF, o Perfil de Microdureza é influenciado diretamente pelo Tamanho de Grão nas 5 regiões ao longo da espessura(Quanto maior o Tamanho de Grão, menor a Microdureza e vice-versa). Além disso, quanto menos água é fornecida na face superior e mais água é fornecida na face inferior (Distribuição: 25% / 75%) da Bobina, como ocorreu na Bobina G, observa-se uma tendência de diminuição de Microdureza ao longo de toda a espessura, o que resulta em um Aço mais maço. Logo, é desejável acompanhar a determinação das propriedades mecânicas via ensaio em laboratório desta Bobina, com intuito de verificar se a mesma não ficou comprometida (fora das especificações desejadas de propriedades) com o teste realizado.

4.3.3.2 Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4,03 mm)

4.3.3.2.1 Perfil de Microdureza

Para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4,03 mm), o Perfil da Microdureza ao longo da Espessura estabeleceu os seguintes resultados (Figura 47):

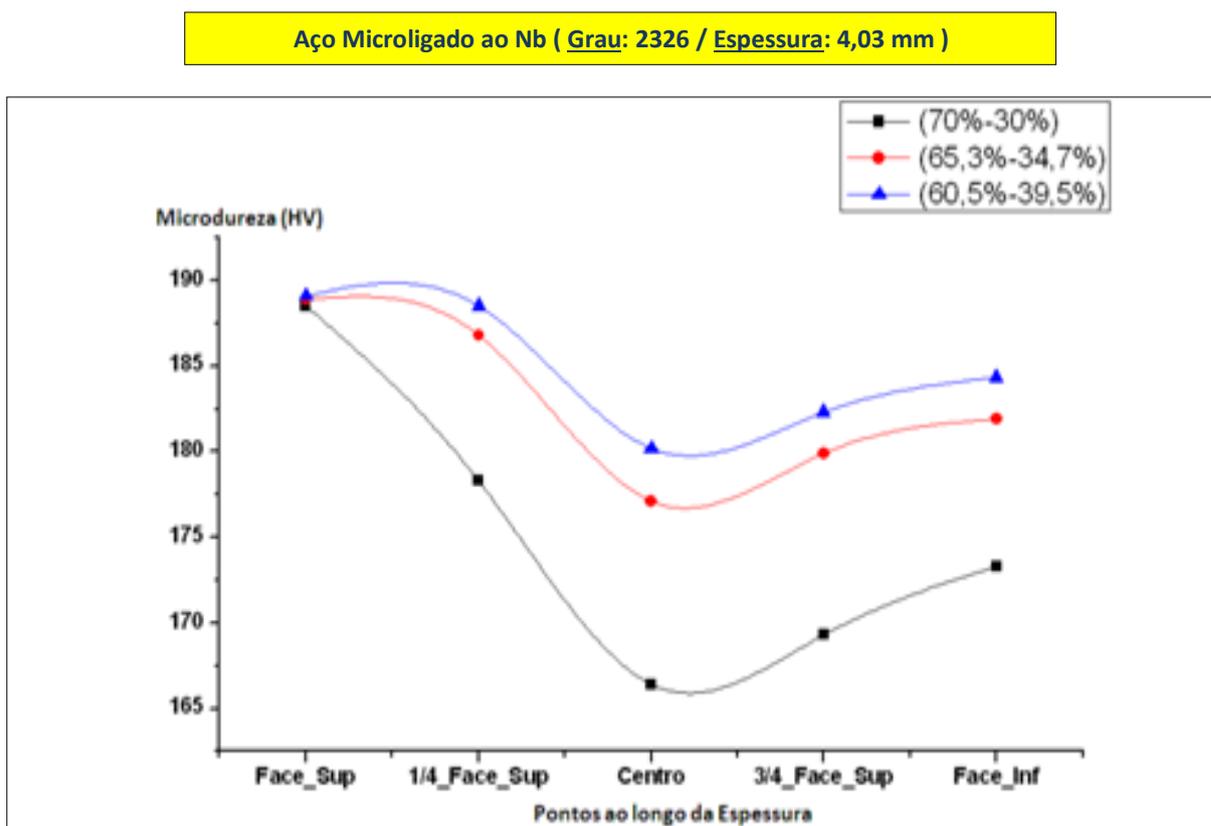


Figura 47 – Perfil de Microdureza ao longo da espessura para as 3 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4.03 mm) (Fonte: OriginPro 8)

4.3.3.2.2 Discussões dos Resultados

Para a discussão dos resultados de Microdureza, procurou-se fazer análise com base em um quadro comparativo (Figura 48) em termos de Microdureza, Tamanho de Grão e Fração Volumétrica de Perlita, assim tem-se:

- Bobina A (70% / 30%)
- Bobina B (65,3% / 34,7%)
- Bobina C (60,5% / 39,5%)

Aço Microligado ao Nb (Grau: 2326 / Espessura: 4,03 mm)

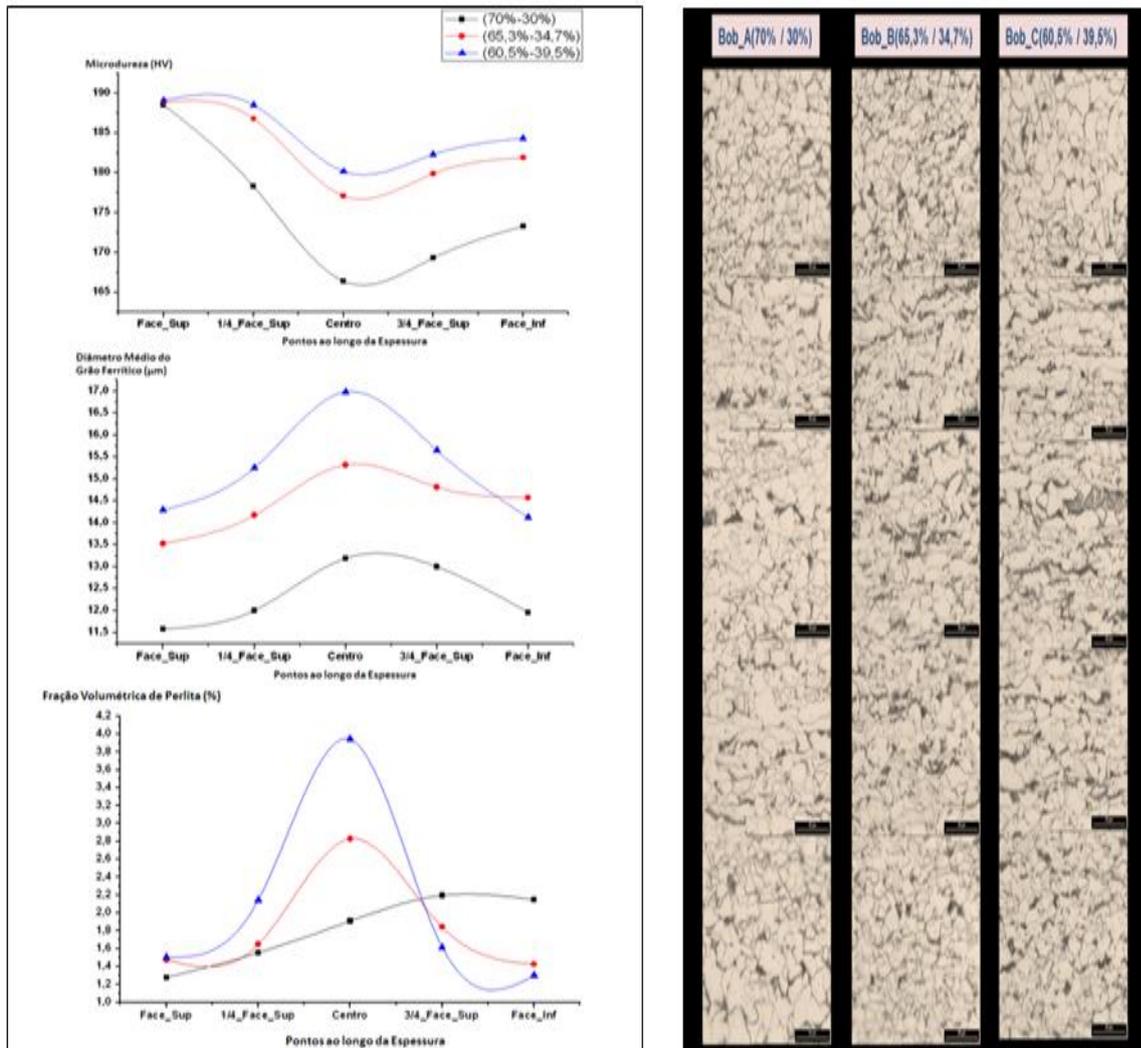


Figura 48 – Quadro Comparativo (Perfil da Microdureza em função do Tamanho de Grão e Fração Perlítica) para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4.03 mm) (Fonte: CSN)

Para a Bobina A, o seu Perfil de Microdureza apresenta valores elevados de Microdureza logo na face superior (onde o TGM devido a distribuição de água ser a máxima, 70%), seguida de uma queda brusca até atingir um valor mínimo de Microdureza no centro da espessura (região onde o TGM é maior devido apresentar maiores níveis de temperatura), por fim ocorre um pequeno aumento de Microdureza até atingir a face inferior da Bobina(devido que do centro até a face inferior ocorre um diminuição do TGM, acompanhado de um aumento de Fração de Perlita, uma vez que a vazão na face inferior é 30%). Deve-se destacar o valor máximo de fração

perlítica obtido na face inferior da Bobina, resultado esse não esperado (esperava-se o valor máximo no centro da Bobina, por concentrar altas temperaturas), porém, acredita-se que a obtenção desse valor está associada a contribuição simultânea da frente de aquecimento centro/face inferior e da baixa vazão de água(30%, menores condições de resfriamento) fornecida a Bobina.

Para a Bobina B, o seu Perfil de Microdureza apresenta valores um pouco altos de Microdureza logo na face superior (contribuição do baixo valor de TGM), seguida de uma queda suave até atingir um valor mínimo no centro da espessura (região onde o TGM apresenta o valor máximo), por fim ocorre um aumento de Microdureza na face inferior (região onde o TGM é baixo, acompanhado de um aumento de Fração de Perlita, uma vez que a vazão na face inferior é 34,7%), atingindo valores bem próximos da face superior, gerando um Perfil de Microdureza bem próximo de uma simetria desejada.

Para a Bobina C, o seu Perfil de Microdureza apresenta valores um pouco altos de Microdureza logo na face superior (contribuição do baixo valor de TGM), seguida de uma queda suave até atingir um valor mínimo no centro da espessura (região onde o TGM apresenta o valor máximo), por fim ocorre um aumento de Microdureza na face inferior (região onde o TGM é baixo, acompanhado de um aumento de Fração de Perlita, uma vez que a vazão na face inferior é 39,5%), atingindo valores bem próximos da face superior, gerando um Perfil de Microdureza bem mais simétrico que o Perfil de Microdureza da Bobina B.

Esses resultados nos mostram que, para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4,03 mm), o Perfil de Microdureza é influenciado diretamente pelo Tamanho de Grão nas 5 regiões ao longo da espessura(Quanto maior o Tamanho de Grão, menor a Microdureza e vice-versa). Além disso, quanto menos água é fornecida na face superior e mais água é fornecida na face inferior da Bobina (dando maiores condições de permanência a altas temperaturas da Bobina), observa-se uma tendência de aumento de Microdureza ao longo de toda a espessura devido o aumento de fase perlítica que endurece o Aço. Logo, é desejável acompanhar a determinação das propriedades mecânicas via ensaio em laboratório da Bobina, com intuito de verificar se as mesmas não ficaram comprometidas (fora das especificações desejadas de propriedades) com os testes realizados.

4.3.3.3 Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6,40 mm)

4.3.3.3.1 Perfil de Microdureza

Para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6,40 mm), o Perfil da Microdureza ao longo da Espessura estabeleceu os seguintes resultados (Figura 49):

Aço Microligado ao Nb (Grau: 5466 / Espessura: 6,40 mm)

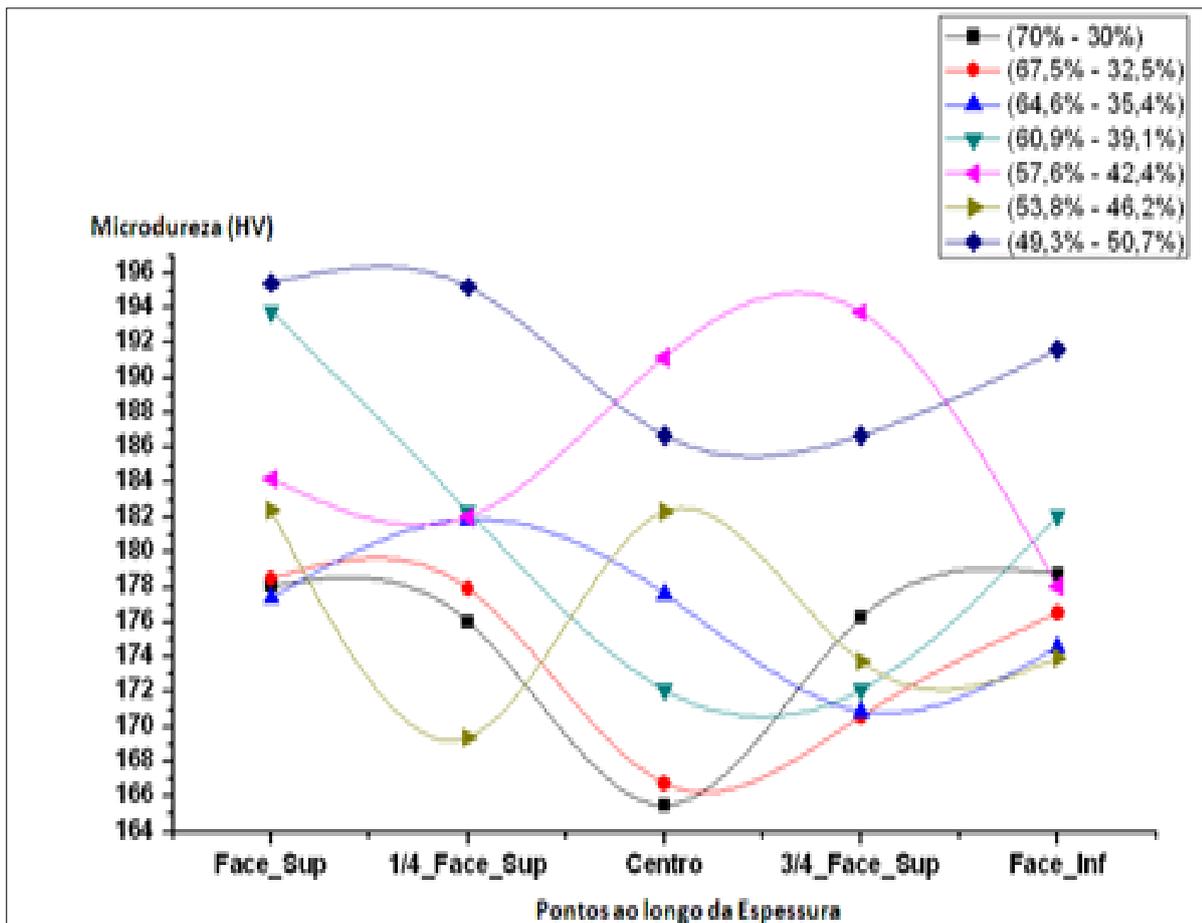


Figura 49 – Perfil de Microdureza ao longo da espessura para as 7 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm) (Fonte: OriginPro 8)

4.3.3.3.2 Discussões dos Resultados

Para a discussão dos resultados, procurou-se simplificar a análise com base em um quadro comparativo (Figura 50) apenas para as Bobinas com as Distribuições de Vazões extremas (Bobinas A e G) e com a Distribuição de Vazão intermediária (Bobina D), assim tem-se:

- Bobina A (70% / 30%)
- Bobina D (60,9% / 39,1%)
- Bobina G (49,3% / 50,7%)

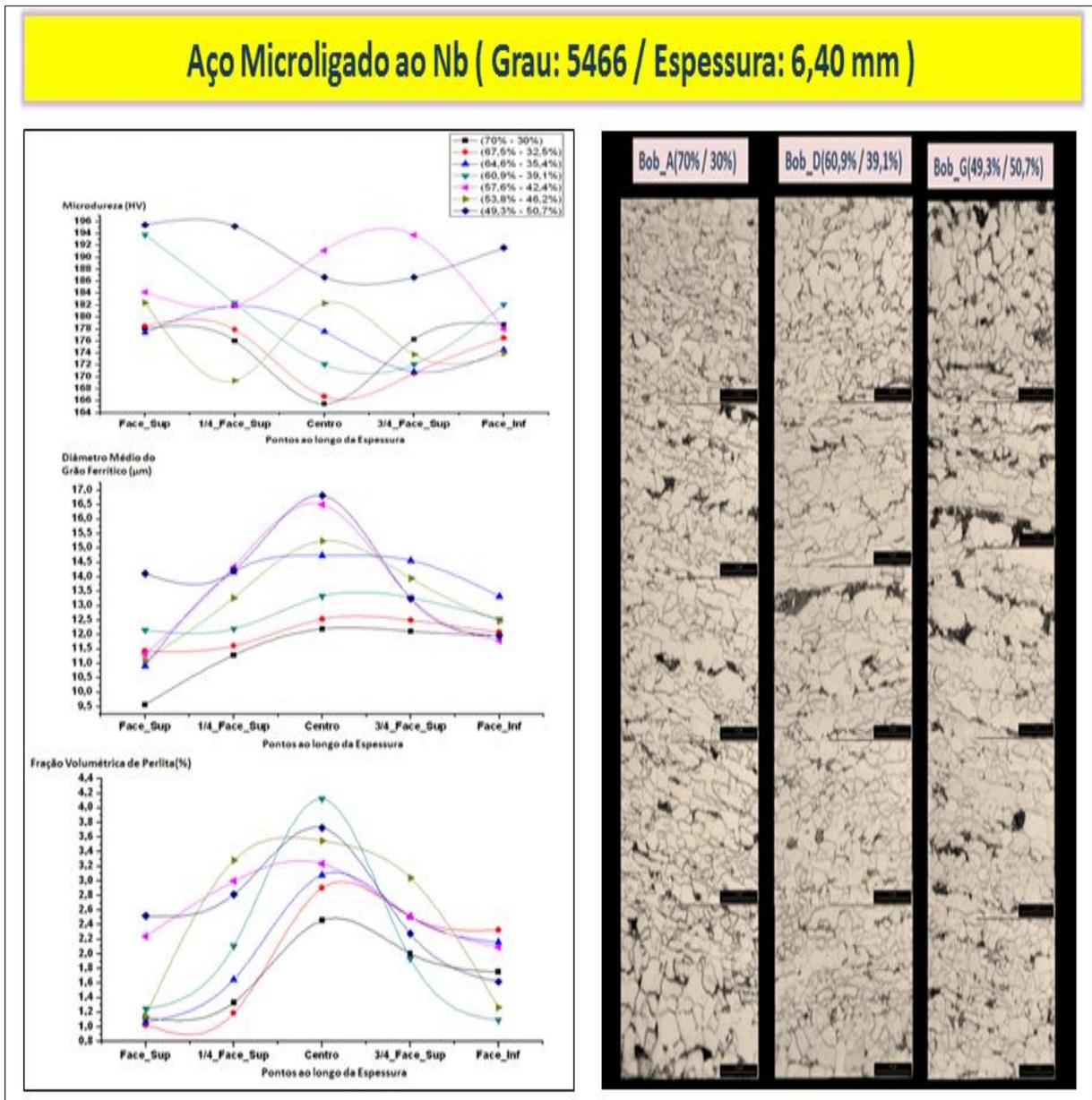


Figura 50 – Quadro Comparativo (Perfil da Microdureza em função do Tamanho de Grão e Fração Perlítica) para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm) (Fonte: CSN)

Para a Bobina A, o seu Perfil de Microdureza apresenta um comportamento simétrico bem interessante. Na face superior, apresenta valores elevados de Microdureza devido a condição de grão refinado (elevado resfriamento, vazão máxima de 30%) enquanto na face inferior também apresenta valores

elevados de Microdureza devido a presença em grande quantidade de fração perlítica decorrente de uma menor condição de resfriamento nessa região (vazão mínima de 30%, dando maiores condições para a formação de Perlita). No centro, embora haja uma quantidade apreciável de Perlita, a microdureza nessa região é influenciada fortemente pelo alto valor de TGM devida as condições de alta temperatura nessa região, resultando em uma Microdureza baixa.

Para a Bobina D, o seu Perfil de Microdureza apresenta valores altos de Microdureza logo na face superior (contribuição do baixo valor de TGM), seguida de uma queda brusca até atingir um valor mínimo no centro da espessura (região onde o TGM apresenta o valor máximo), por fim ocorre um aumento de Microdureza na face inferior (influenciado pelo o aumento de Fração de Perlita), gerando um Perfil de Microdureza não-simétrico.

Para a Bobina G, o seu Perfil de Microdureza apresenta valores altos de Microdureza logo na face superior (contribuição do baixo valor de TGM), seguida de uma queda suave até atingir um valor mínimo no centro da espessura (região onde o TGM apresenta o valor máximo), por fim ocorre um suave aumento de Microdureza na face inferior (influenciado pela quantidade de fração perlítica aproximadamente igual em relação a quantidade na face superior), gerando um Perfil de Microdureza uniforme, resultado este muito bom com o que se esperava.

Esses resultados nos mostram que, para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6,40 mm), o Perfil de Microdureza é influenciado diretamente pelo Tamanho de Grão nas 5 regiões ao longo da espessura (Quanto maior o Tamanho de Grão, menor a Microdureza e vice-versa). Além disso, quanto menos água é fornecida na face superior e mais água é fornecida na face inferior da Bobina (dando maiores condições de permanência a altas temperaturas da Bobina), observa-se uma tendência de aumento de Microdureza ao longo de toda a espessura devido o aumento de fase perlítica que endurece o Aço. Logo, é desejável acompanhar a determinação das propriedades mecânicas via ensaio em laboratório da Bobina, com intuito de verificar se as mesmas não ficaram comprometidas (fora das especificações desejadas de propriedades) com os testes realizados.

4.3.3.4 Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9,44 mm)

4.3.3.4.1 Perfil de Microdureza

Para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9,44 mm), o Perfil de Microdureza ao longo da Espessura estabeleceu os seguintes resultados (Figura 51):

Aço Microligado ao Nb (Grau: 5466 / Espessura: 9,44 mm)

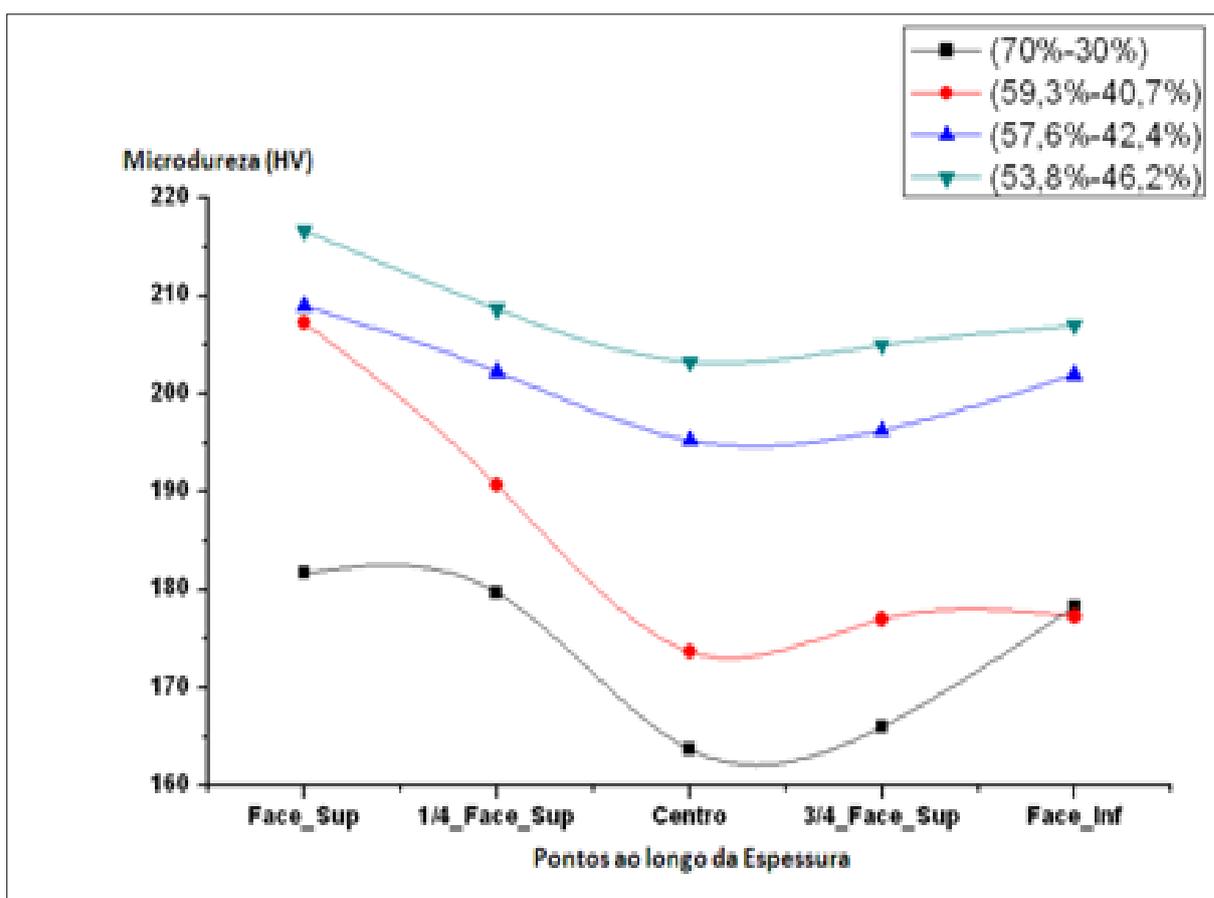


Figura 51 – Perfil de Microdureza ao longo da espessura para as 4 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9.44 mm) (Fonte: OriginPro 8)

4.3.3.4.2 Discussões dos Resultados

Para a discussão dos resultados, procurou-se simplificar a análise com base em um quadro comparativo (Figura 52) apenas para as Bobinas com as Distribuições de Vazões extremas (Bobinas A e D) e com a Distribuição de Vazão intermediária (Bobina B), assim tem-se:

- Bobina A (70% / 30%)
- Bobina B (59,3% / 40,7%)
- Bobina D (53,8% / 46,2%)

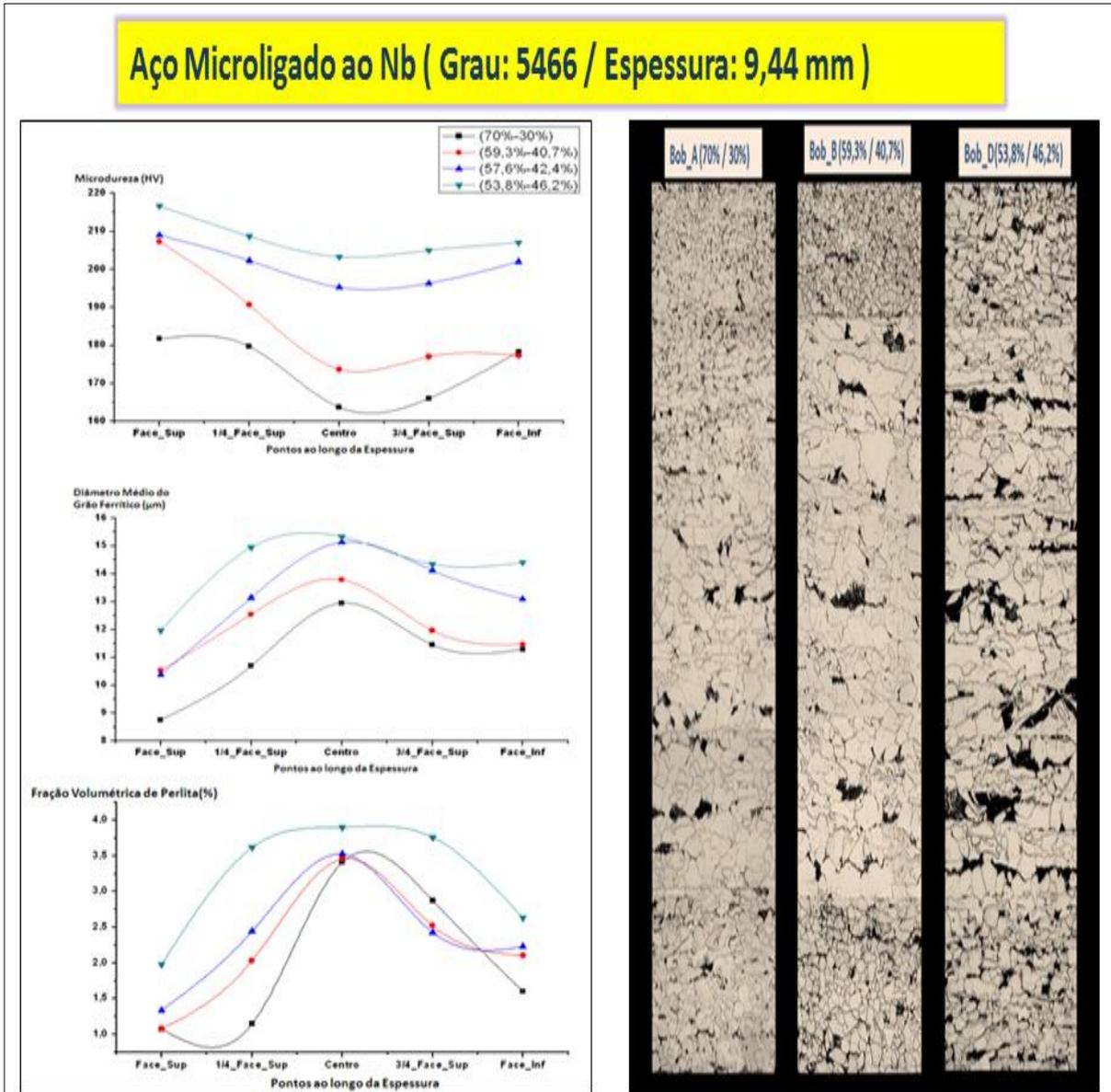


Figura 52 – Quadro Comparativo (Perfil da Microdureza em função do Tamanho de Grão e Fração Perlítica) para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9.44 mm)

(Fonte: CSN)

Para a Bobina A, o seu Perfil de Microdureza apresenta um comportamento um pouco simétrico conforme se esperava. Na face superior, apresenta valores elevados de Microdureza devido a condição de grão refinado (

elevado resfriamento, vazão máxima de 30%) enquanto na face inferior também apresenta valores elevados de Microdureza devido a presença em grande quantidade de fração perlítica decorrente de uma menor condição de resfriamento nessa região (vazão mínima de 30%, dando maiores condições para a formação de Perlita). No centro, embora haja uma quantidade apreciável de Perlita, a microdureza nessa região é influenciada fortemente pelo alto valor de TGM devida as condições de alta temperatura nessa região, resultando em uma Microdureza baixa.

Para a Bobina B, o seu Perfil de Microdureza apresenta valores altos de Microdureza logo na face superior (contribuição do baixo valor de TGM), seguida de uma queda brusca até atingir um valor mínimo no centro da espessura (região onde o TGM apresenta o valor máximo), por fim ocorre um suave aumento de Microdureza na face inferior (influenciado pelo o aumento de Fração de Perlita), gerando um Perfil de Microdureza não-simétrico, e também não muito interessante.

Para a Bobina D, o seu Perfil de Microdureza apresenta um condição de plena uniformidade, resultando na obtenção de uma boa distribuição homogênea de microdureza ao longo da espessura, resultado este excelente.

Esses resultados nos mostram que, para o Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9,44 mm), o Perfil de Microdureza é influenciado diretamente pelo Tamanho de Grão nas 5 regiões ao longo da espessura (Quanto maior o Tamanho de Grão, menor a Microdureza e vice-versa). Além disso, quanto menos água é fornecida na face superior e mais água é fornecida na face inferior da Bobina (dando maiores condições de permanência a altas temperaturas da Bobina), observa-se uma tendência de aumento de Microdureza ao longo de toda a espessura devido o aumento de fase perlítica que endurece o Aço.

Logo, é desejável acompanhar a determinação das propriedades mecânicas via ensaio em laboratório da Bobina, com intuito de verificar se as mesmas não ficaram comprometidas (fora das especificações desejadas de propriedades) com os testes realizados.

4.3.4 Análise das Propriedades Mecânicas

4.3.4.1 Análise da Resistência Mecânica

4.3.4.1.1 Aço IF (Espessura: 3,33 mm)

A Resistência Mecânica das Bobinas foi medida com base no Ensaio de Tração. Analisando os resultados (Figura 53), observa-se que tanto o Limite de Escoamento (LE) como o Limite de Resistência à Tração (LR), para as 7 Bobinas submetidas às diferentes estratégias de resfriamento, não sofreram variações significativas a ponto de comprometer a aplicação posterior delas.

Logo, torna-se viável realizar alterações no Padrão de Resfriamento do processo visando a melhoria na planicidade das Bobinas, uma vez que esta ação ainda consegue manter as propriedades mecânicas das mesmas dentro das especificações conforme se deseja.

Aço IF (Grau: 4093 / Espessura: 3,33 mm)

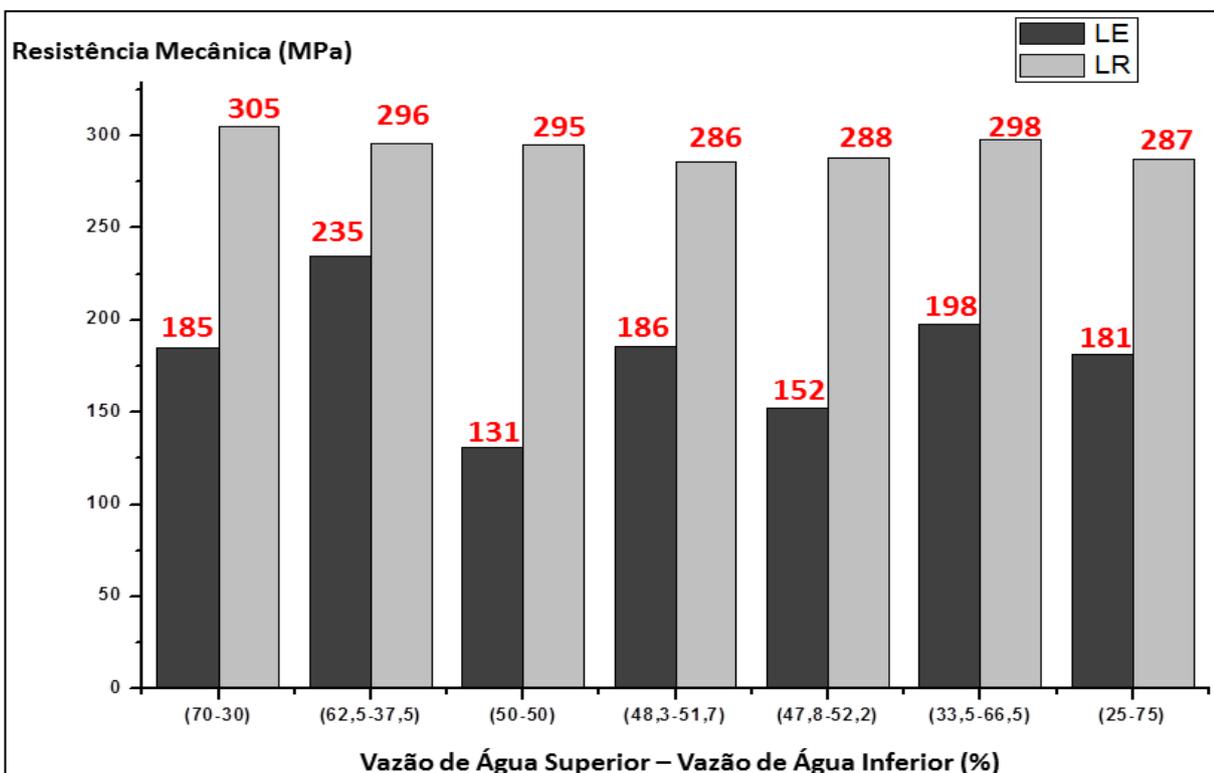


Figura 53 – Resistência Mecânica das 7 Bobinas de Aço IF (Fonte: OriginPro 8)

4.3.4.1.2 Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4,03 mm)

A Resistência Mecânica das Bobinas foi medida com base no Ensaio de Tração. Analisando os resultados (Figura 54), observa-se que tanto o Limite de escoamento (LE) como o Limite de Resistência à Tração (LR), para as 3 Bobinas submetidas às diferentes estratégias de resfriamento, não sofreram variações significativas a ponto de comprometer a aplicação posterior delas.

Logo, torna-se viável realizar alterações no Padrão de Resfriamento do processo visando a melhoria na planicidade das Bobinas, uma vez que esta ação ainda consegue manter as propriedades mecânicas das mesmas dentro das especificações conforme se deseja.

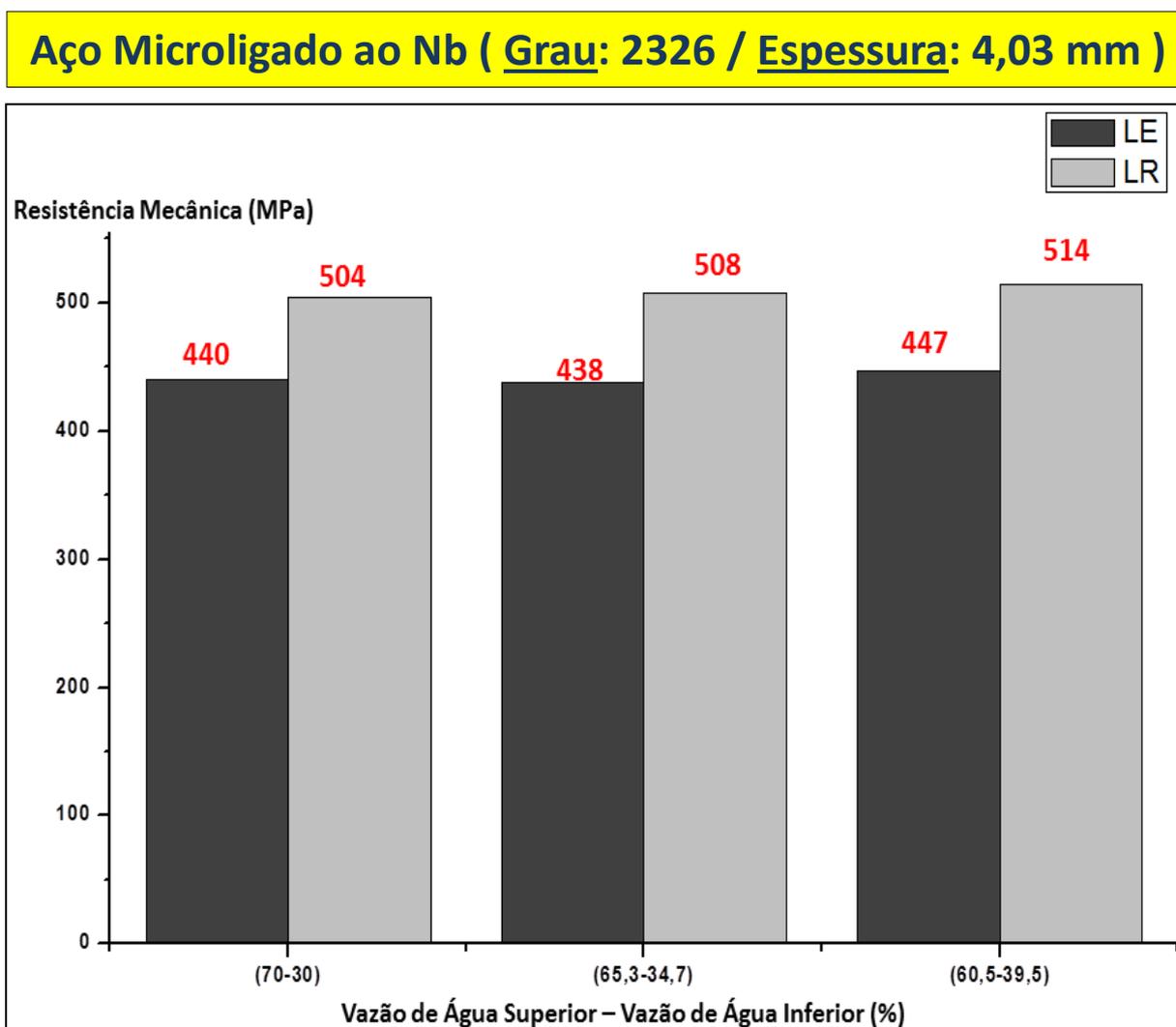


Figura 54 – Resistência Mecânica das 3 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4.03 mm)
(Fonte: OriginPro 8)

4.3.4.1.3 Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6,40 mm)

A Resistência Mecânica das Bobinas foi medida com base no Ensaio de Tração. Analisando os resultados (Figura 55), observa-se que tanto o Limite de escoamento (LE) como o Limite de Resistência à Tração (LR), para as 7 Bobinas submetidas às diferentes estratégias de resfriamento, não sofreram variações significativas a ponto de comprometer a aplicação posterior delas.

Logo, torna-se viável realizar alterações no Padrão de Resfriamento do processo visando a melhoria na planicidade das Bobinas, uma vez que esta ação ainda consegue manter as propriedades mecânicas das mesmas dentro das especificações conforme se deseja.

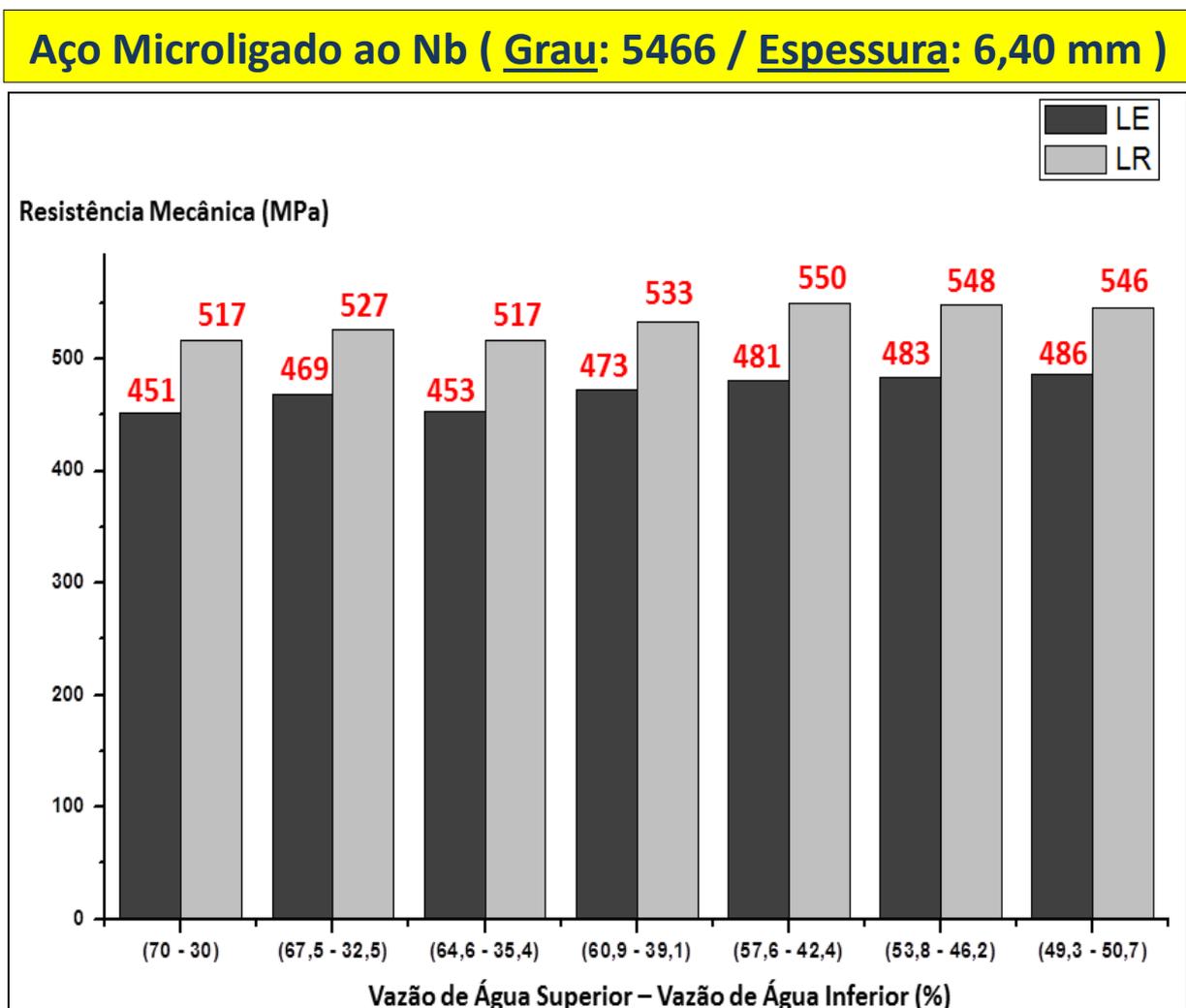


Figura 55 – Resistência Mecânica das 7 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm)
(Fonte: OriginPro 8)

4.3.4.1.4 Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9,44 mm)

A Resistência Mecânica das Bobinas foi medida com base no Ensaio de Tração. Analisando os resultados (Figura 58), observa-se que tanto o Limite de escoamento (LE) como o Limite de Resistência à Tração (LR), para as 4 Bobinas submetidas às diferentes estratégias de resfriamento, não sofreram variações significativas a ponto de comprometer a aplicação posterior delas.

Logo, torna-se viável realizar alterações no Padrão de Resfriamento do processo visando a melhoria na planicidade das Bobinas, uma vez que esta ação ainda consegue manter as propriedades mecânicas das mesmas dentro das especificações conforme se deseja.

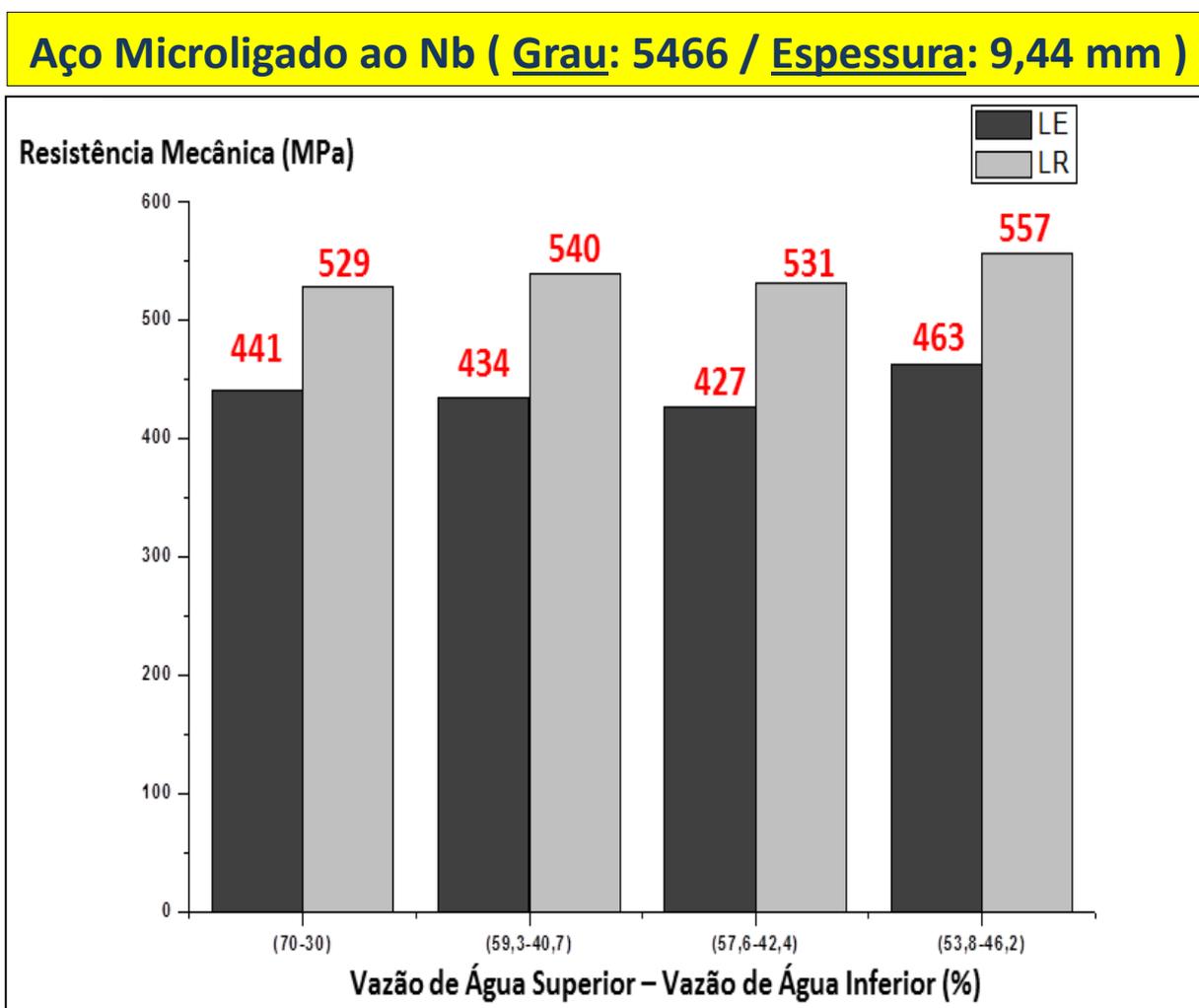


Figura 56 – Resistência Mecânica das 4 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9.44 mm)
(Fonte: OriginPro 8)

4.3.4.2 Análise da Ductilidade

4.3.4.2.1 Aço IF (Espessura: 3,33 mm)

A Ductilidade das Bobinas foi medida com base no Ensaio de Tração. Analisando os resultados (Figura 57), observa-se que a Ductilidade (ou Alongamento), para as 7 Bobinas submetidas às diferentes estratégias de resfriamento, não sofreu variações significativas a ponto de comprometer a aplicação posterior delas.

Logo, torna-se viável realizar alterações no Padrão de Resfriamento do processo visando a melhoria na planicidade das Bobinas, uma vez que esta ação ainda consegue manter as propriedades mecânicas das mesmas dentro das especificações conforme se deseja.

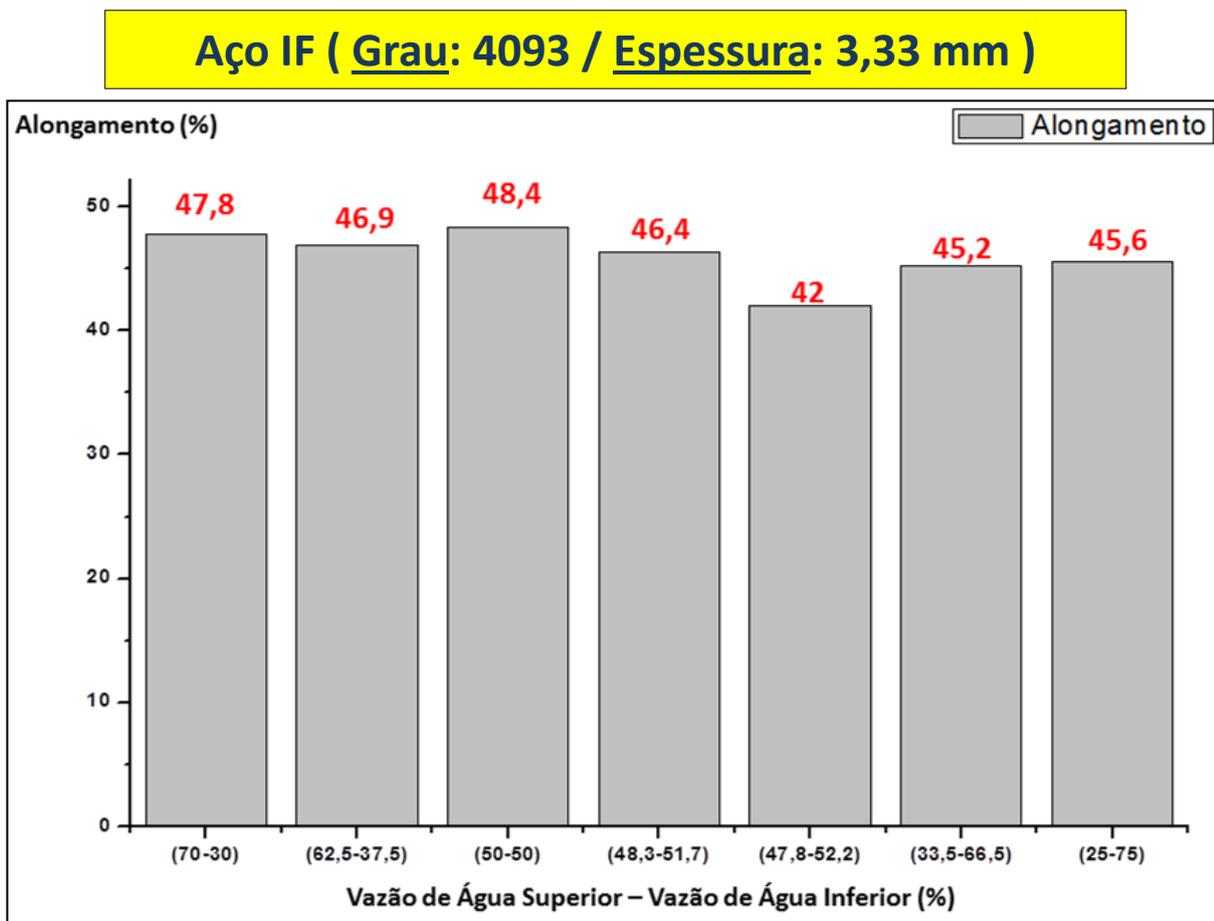


Figura 57 – Ductilidade das 7 Bobinas de Aço IF (Fonte: OriginPro 8)

4.3.4.2.2 Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4,03 mm)

A Ductilidade das Bobinas foi medida com base no Ensaio de Tração. Analisando os resultados (Figura 58), observa-se que a Ductilidade (ou Alongamento), para as 3 Bobinas submetidas às diferentes estratégias de resfriamento, não sofreu variações significativas a ponto de comprometer a aplicação posterior delas.

Logo, torna-se viável realizar alterações no Padrão de Resfriamento do processo visando a melhoria na planicidade das Bobinas, uma vez que esta ação ainda consegue manter as propriedades mecânicas das mesmas dentro das especificações conforme se deseja.

Aço Microligado ao Nb (Grau: 2326 / Espessura: 4,03 mm)

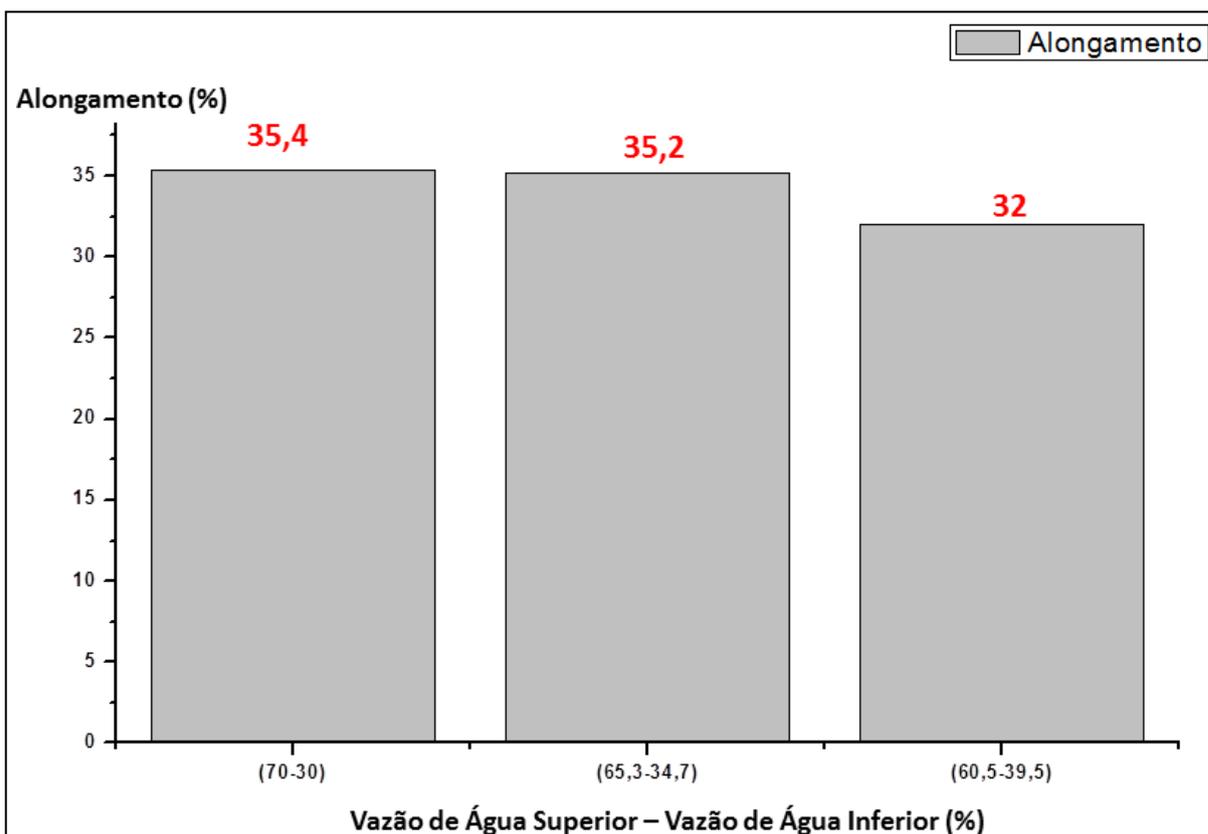


Figura 58 – Ductilidade das 3 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 4.03 mm)

(Fonte: OriginPro 8)

4.3.4.2.3 Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm)

A Ductilidade das Bobinas foi medida com base no Ensaio de Tração. Analisando os resultados (Figura 59), observa-se que a Ductilidade (ou Alongamento), para as 7 Bobinas submetidas às diferentes estratégias de resfriamento, não sofreu variações significativas a ponto de comprometer a aplicação posterior delas.

Logo, torna-se viável realizar alterações no Padrão de Resfriamento do processo visando a melhoria na planicidade das Bobinas, uma vez que esta ação ainda consegue manter as propriedades mecânicas das mesmas dentro das especificações conforme se deseja.

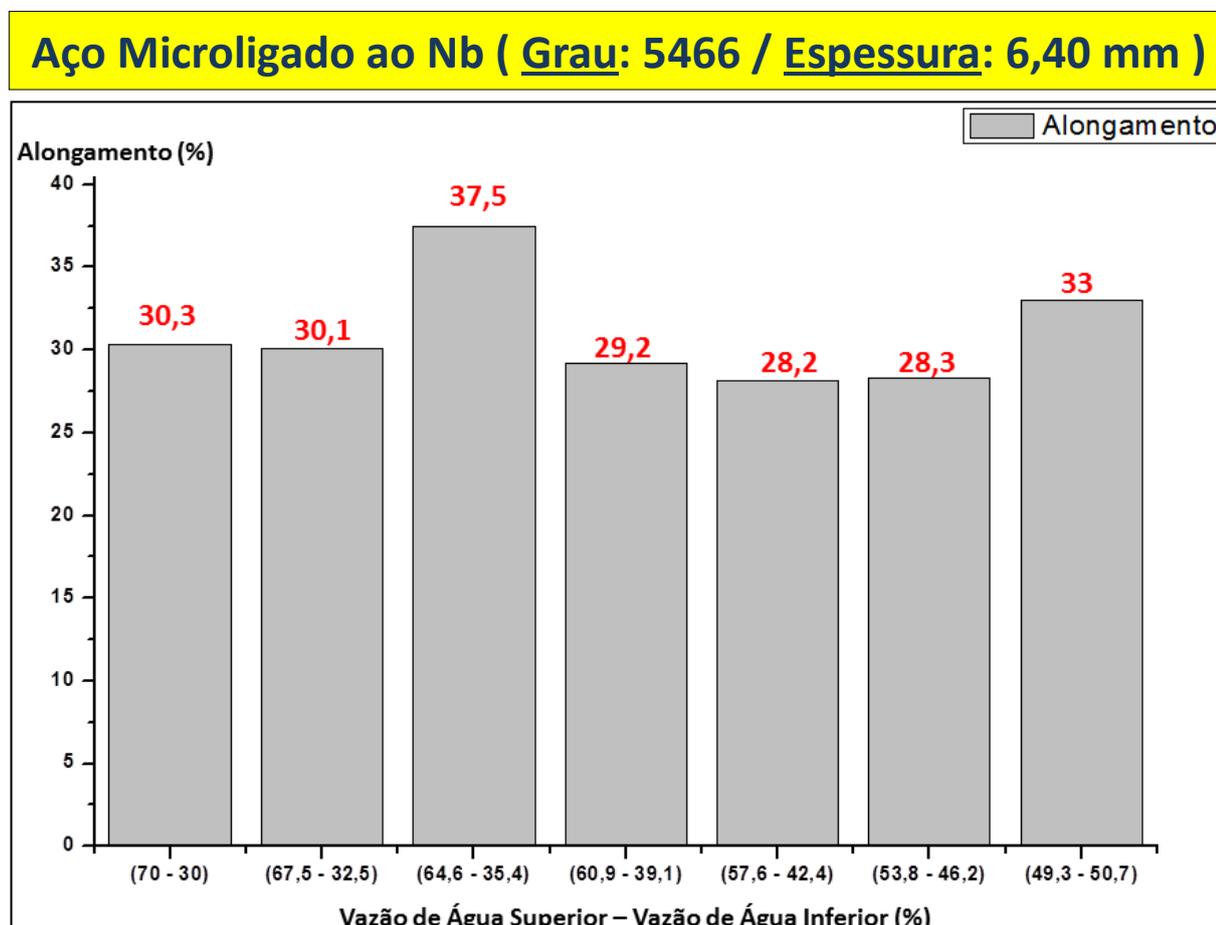


Figura 59 – Ductilidade das 7 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 6.40 mm)

(Fonte: OriginPro 8)

4.3.4.2.4 Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9,44 mm)

A Ductilidade das Bobinas foi medida com base no Ensaio de Tração. Analisando os resultados (Figura 60), observa-se que a Ductilidade (ou Alongamento), para as 4 Bobinas submetidas às diferentes estratégias de resfriamento, não sofreu variações significativas a ponto de comprometer a aplicação posterior delas.

Logo, torna-se viável realizar alterações no Padrão de Resfriamento do processo visando a melhoria na planicidade das Bobinas, uma vez que esta ação ainda consegue manter as propriedades mecânicas das mesmas dentro das especificações conforme se deseja.

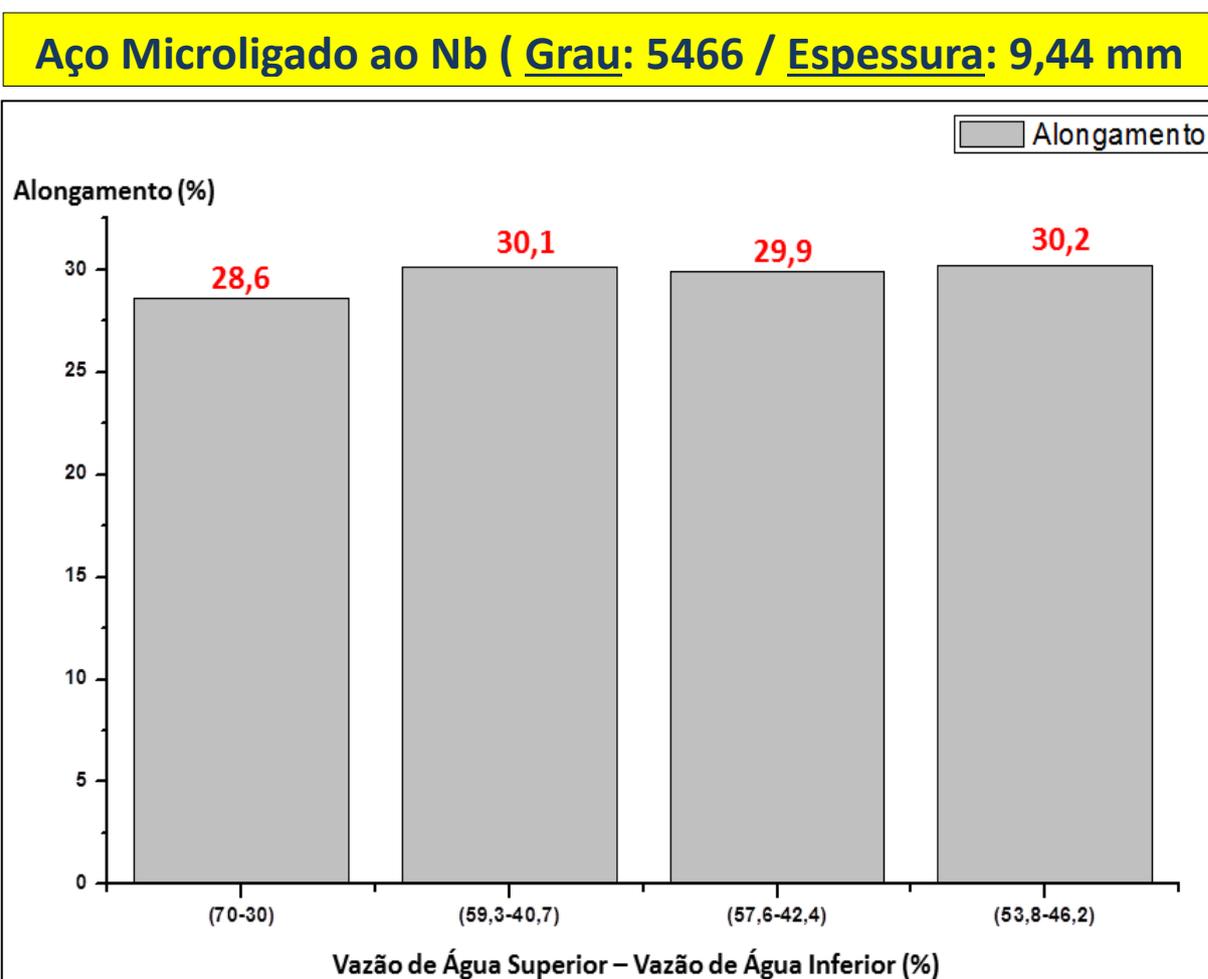


Figura 60 – Ductilidade das 4 Bobinas de Aço Microligado ao Nb (Espessura: 9.44 mm)

(Fonte: OriginPro 8)

4.4 *Improve* (Fase Melhorar)

Nessa fase procurou-se implementar uma medida de melhoria de planicidade em bobinas, com base na análise dos resultados obtidos dos testes realizados. Como foi definido, o Aço IF foi o material de frente de estudo, e nele foram feitas as medidas de planicidade, na qual obteve-se a melhor condição de planicidade (flecha média) para uma Distribuição de água 25% / 75% (Figura 43).

De acordo como foi visto nos resultados de análise, não há uma relação direta e única entre planicidade de bobinas e sua heterogeneidade granulométrica ao longo da espessura (Figura 44), havendo também influência de outros fatores. Logo, para a busca na melhoria da planicidade de bobinas, foi decidido modificar o Padrão de Resfriamento para a distribuição de água que melhor resultou em uma bobina com boa planicidade, isto é, a Bobina de Aço IF com Distribuição de água 25% / 75%.

Para fazer tal modificação, é necessário compreender como foi feito a alteração no Modelo do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow*. O Padrão de Resfriamento 25% / 75% foi obtido com o fechamento dos 7 primeiros Bancos de Resfriamento Comuns da parte superior do Sistema *Laminar Flow*, deixando os demais bancos superiores abertos e todos os bancos inferiores também abertos (Figura 61).

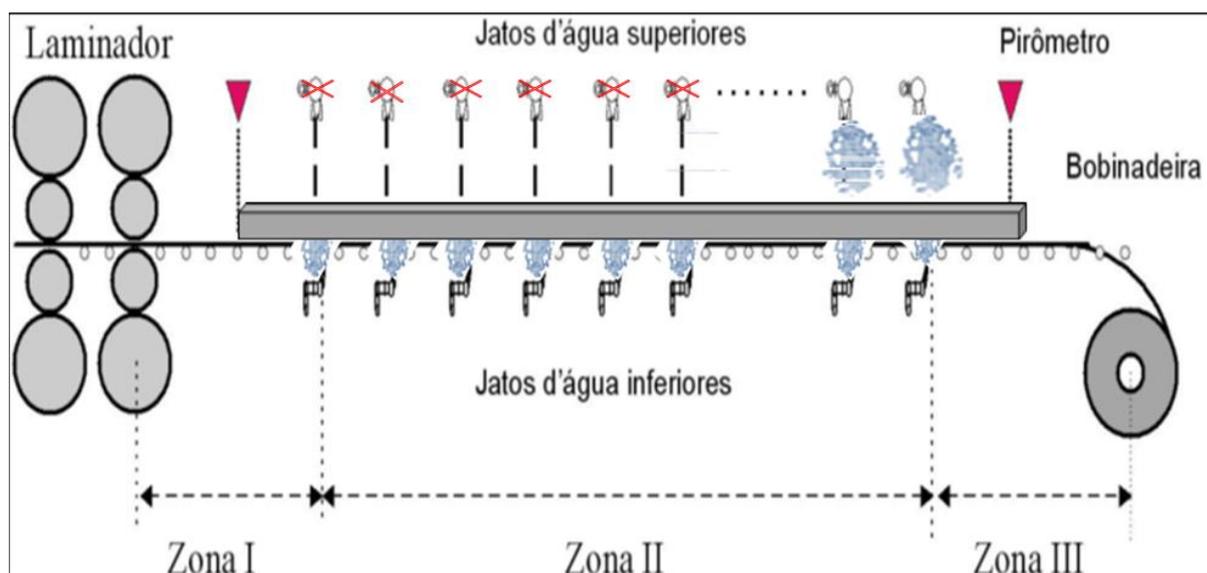


Figura 61 – Desenho Esquemático do Modo de Resfriamento 25% / 75% (Fonte: CSN)

Analisando fisicamente esse Padrão de Resfriamento, nota-se que ocorreu um retardamento no resfriamento na parte superior da bobina (região esta que anteriormente era submetida a fortes condições de resfriamento, vazão de água anterior → 70%) dando condições suficientes para alcance do equilíbrio térmico entre as faces superior e inferior da bobina a medida que esta é transportada sobre a mesa. Acompanhando essa linha de raciocínio, buscou-se melhorar a planicidade de bobinas de Aço IF e de Aço Microligado ao Nb, a partir da aplicação de um retardo no resfriamento das bobinas na parte superior do Sistema *Laminar Flow*.

Por tanto, a medida de melhoria aplicada foi desativar todos os bancos de resfriamento da parte superior, deixando os bancos de resfriamento da parte inferior todos abertos, e que passado um rápido intervalo de tempo os bancos superiores seriam abertos (sentido: Bobinadeira → Laminador) permitindo o resfriamento da bobina nesta região.

Com isso teria-se o retardamento de resfriamento na parte superior, dando condições suficientes de equilíbrio térmico e, conseqüentemente dando condições para se terem bobinas com excelente qualidade em termos de planicidade (Figura 62).

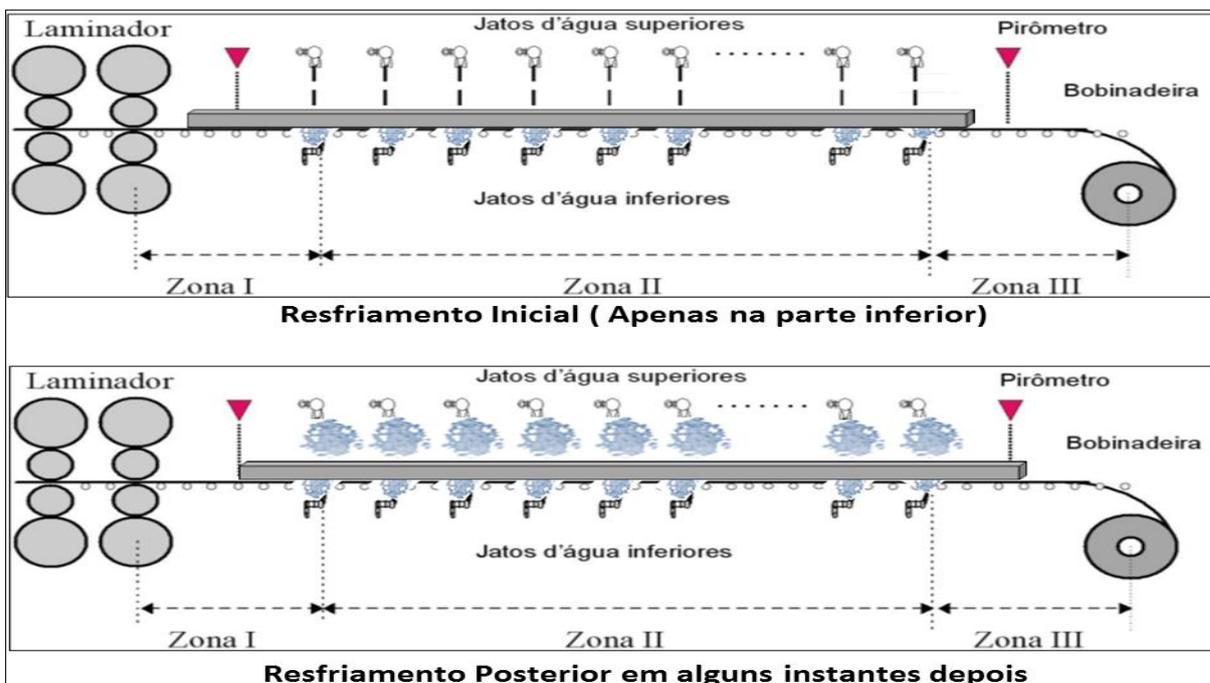


Figura 62 – Novo Padrão de Resfriamento adotado para a melhoria de qualidade na Planicidade das Tiras a Quente (Fonte: CSN)

4.5 Control (Fase Controlar)

Nessa fase do projeto, procurou-se observar se a nova Estratégia de Resfriamento proporcionou melhoria na planicidade das bobinas produzidas pela empresa, e caso tenha-se conseguido, faz-se necessário estabelecer o controle do processo/produto com base nessa melhoria.

A nova Estratégia de Resfriamento foi estabelecida a partir do mês de agosto para os Aços IF e Microligado ao Nb. Segundo observa-se na Figura 63, em que foi avaliado um levantamento de dados a respeito do número de ocorrências de Temperatura de Bobinamento Baixa (TB) por motivos de interferência na medição do CT pelo Pirômetro, ocasionado pela presença de água estagnada sobre a superfície superior das bobinas (Estagnação essa resultante do fenômeno do Acanoamento/Desvio de Planicidade), detectou-se 5 ocorrências de tal fenômeno em Bobinas, sendo que dessas 5 ocorrências nenhuma foi dos Aços submetidos a nova estratégia de resfriamento (Aço IF e Aço Microligado ao Nb), o que mostra que a medida de melhoria adotada em relação ao Padrão de Resfriamento foi eficiente e reduziu as tais ocorrências indesejadas.

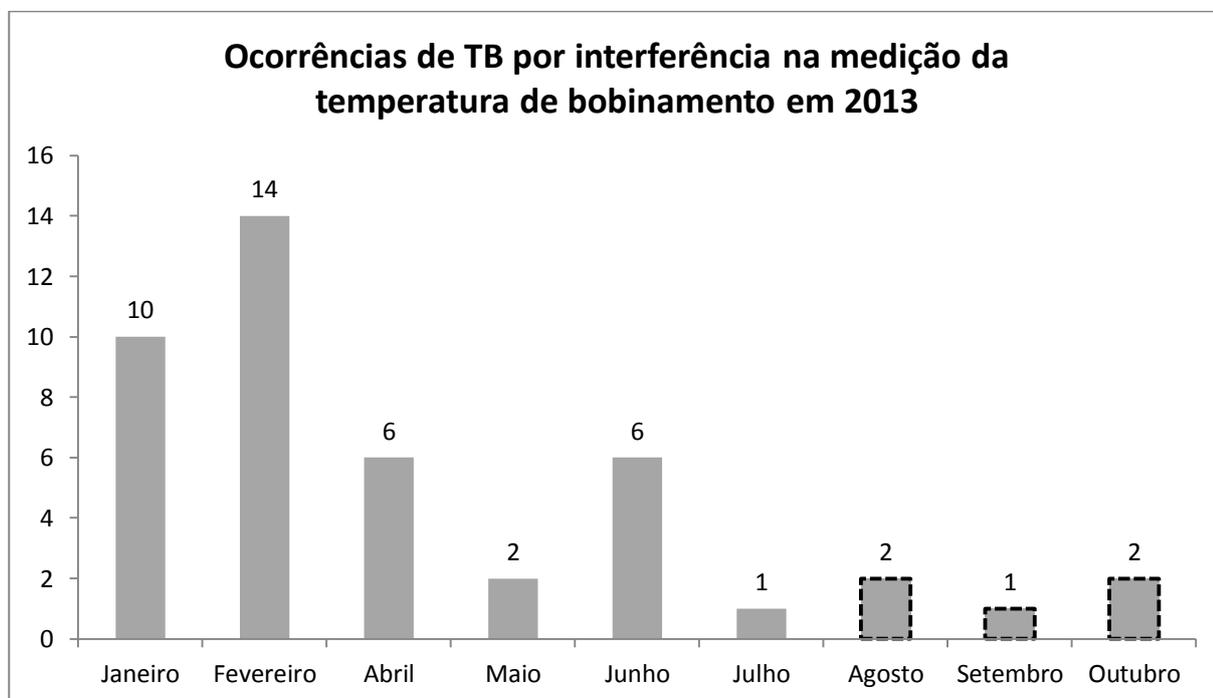


Figura 63 – Ocorrências de TB por Interferência na medição da Temperatura de Bobinamento em 2013 (Fonte: CSN)

Além disso, ao se fazer também um levantamento de dados a respeito do número de reclamações dos clientes em relação à aquisição de bobinas com desvio de planicidade, obteve-se a seguinte situação (Figura 64):

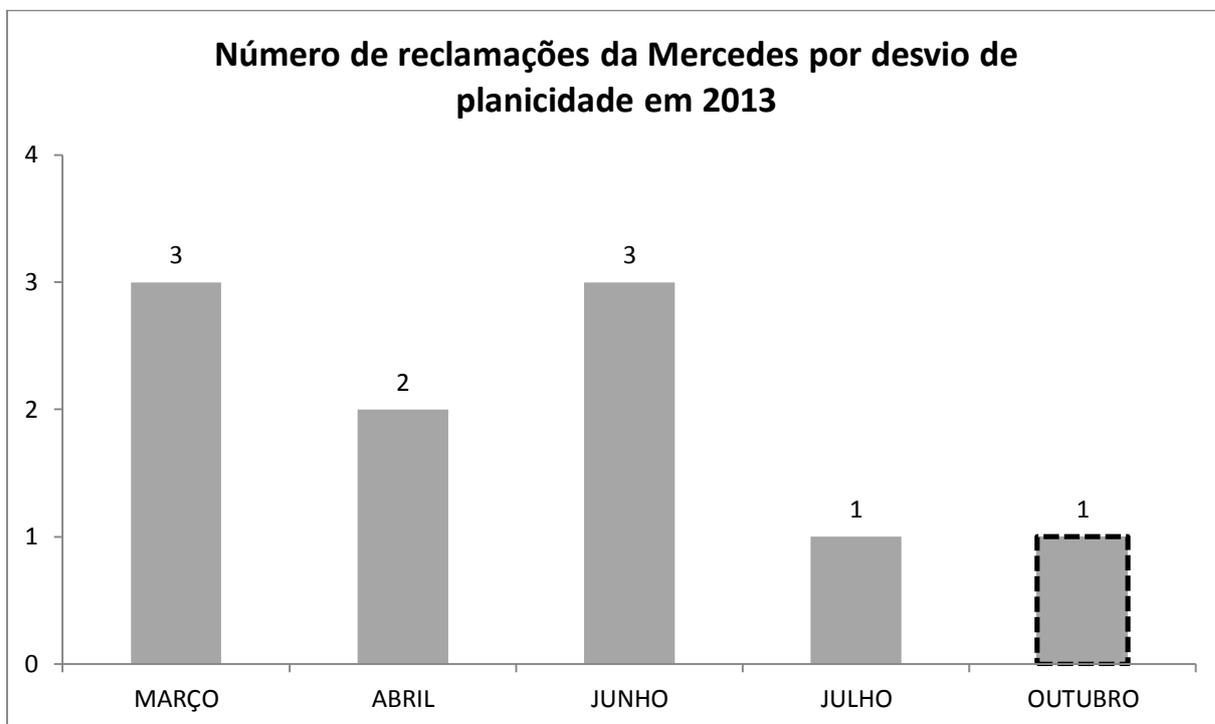


Figura 64 – Número de reclamações da Mercedes por Desvio de Planicidade em 2013 (Fonte: CSN)

Segundo observa-se, ocorreu apenas uma única reclamação (Desvio de Planicidade em bobinas) pelos clientes a partir da data de implementação do novo Padrão de Resfriamento (agosto de 2013). O mais interessante é que essa única ocorrência não é advinda dos Aços cuja Estratégia de Resfriamento foi alterada (Aço IF e Aço Microligado ao Nb), o que nos mostra novamente que a medida de melhoria adota (Nova Estratégia de Resfriamento) foi bastante eficiente nos processos/produtos, reduzindo o número de reclamações dos clientes.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e apresentados no presente projeto cujo estudo visa aplicar a Metodologia 6 σ para melhoria de qualidade na planicidade de Tiras a Quente, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

5.1 O uso da Metodologia 6 Sigma foi eficiente para o bom desenvolvimento do presente projeto;

5.2 Para as Estratégias de Resfriamento estabelecidas no Aço IF:

- 50% - 50% → Melhor Homogeneidade Granulométrica entre as Faces Superior e Inferior / NÃO teve a melhor condição de Planicidade;
- 25% - 75% → NÃO teve a Melhor Homogeneidade Granulométrica entre as Faces Superior e Inferior / Melhor condição de Planicidade;

Não conseguiu-se obter uma relação direta entre Planicidade e Heterogeneidade Granulométrica Face Superior e Inferior, logo a morfologia da microestrutura pode ser um dos fatores que influenciam nas condições de Planicidade das Tiras a quente juntamente com a interação de outros fatores a serem estudados como por exemplo, tensões residuais, formação de Precipitados, etc;

5.3 Para o Aço Microligado ao Nb, a melhor Homogeneidade Granulométrica Face Superior e Inferior foi observada para a Estratégia de Resfriamento de 60% - 40%, coincidentemente para todas as Espessuras testadas (4.03 mm, 6.40 mm e 9.44 mm), e que esta Homogeneidade Granulométrica era melhor obtida quanto MENOR a Espessura da Tira a Quente ;

5.4 O aumento do número de Bancos de Resfriamento Superiores desativados (diminuição da Vazão de Água na parte superior) propiciou um aumento na formação da Fase Perlítica, o que conferiu MAIOR Microdureza aos Aços com estas Condições de Resfriamento;

5.5 Conforme a Literatura, os resultados da Variação de Microdureza ao longo da Espessura da Tira a Quente foram coerentes, isto é:

- Quanto MENOR for o Tamanho de Grão Ferrítico → MAIOR a Microdureza da Fase Ferrita;
- Quanto MAIOR for a Fração Volumétrica de Fase Secundária (Perlita) → MAIOR a Microdureza da Fase Ferrita;

5.6 Para as Diferentes Estratégias de Resfriamento estabelecidas no Trabalho, as Propriedades Mecânicas foram mantidas dentro das condições Padrão, o que abre a possibilidade de explorar novos estudos no Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* sem prejudicar a Qualidade do Produto;

5.7 A nova Estratégia de Resfriamento adotada no Aço IF reduziu o número de Ocorrências de Temperatura de Bobinamento Baixa pela formação do Defeito de Acanoamento (esse fenômeno evidencia o desvio de Planicidade durante a passagem da Tira a Quente no Sistema de Resfriamento *Laminar Flow*), o que direcionou o novo modo de Resfriamento para ser aplicado ao Aço Microligado ao Nb(principal produto adquirido pela principal empresa – Mercedes Benz – que mais reclamava dos Desvios de Planicidade);

5.8 A nova Estratégia de Resfriamento adotada no Aço Microligado ao Nb reduziu o número de Reclamações dos Clientes por Desvio de Planicidade.

6 PROPOSTAS PARA TRABALHO

- Estudar a Influência de Tensões Residuais na Planicidade de Tiras a Quente;
- Estudar sobre tecnologias modernas de medição de Planicidade empregadas na área industrial para instalação de um equipamento medidor na Unidade de Laminação (LTQ#2) da CSN;
- Implementar um estudo de modelagem no Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* no intuito de desenvolver um simulador para estabelecer prévias da evolução microestrutural das Tiras de Aço durante o resfriamento e, assim ter um melhor controle das transformações de fases decorrentes.
- Estudar o efeito do Sistema de Resfriamento *Laminar Flow* para a ocorrência da transformação bainítica, em busca de desenvolver o Aço Bifásico Bainítico que é um material muito requisitado pelo mercado industrial consumidor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]CALLISTER, William D., **Introdução a Ciência e Engenharia de Materiais**; 7ª Edição, John Wiley e Sons, Inc., 2007.
- [2]CHIAVERINI, Vicente, **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração(ABM) , 2008.
- [3]CSN – Companhia Siderúrgica Nacional, **Book de Treinamento dos Engenheiros**.
- [4]CSN – Companhia Siderúrgica Nacional, **Manual Técnico Treinamento e Desenvolvimento do Sistema de Resfriamento (Laminar Flow)**.
- [5]CSN – Companhia Siderúrgica Nacional, **Gestão em Lean Six Sigma com formação de Green Belt (Metodologia para um bom desenvolvimento de Projetos)**.
- [6]DIETER, George E. , **Metalurgica Mecânica**, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1981.
- [7]ECKES, G. , **A Revolução Seis Sigma: O Método que levou o GE e outras empresas a transformar processos em lucro**; 3ª Edição, Rio de Janeiro, 2001.
- [8]FIGUEIREDO, Luiz C. , **Desenvolvimento de um Controlador Auto-Sintonível para Resfriamento de Tiras a Quente**, Dezembro de 1995, Dissertação de Mestrado, UFMG, 146 Páginas.
- [9]GINZBURG, Vladimir D., **Flat Rolling Fundamentals**; New York, Marcel Dekker Inc; 2000.
- [10]GORNI, Antônio A. ; GORNI, Regina Z. , **Uso de Simulações Matemáticas de Processos no Ensino de Engenharia de Materiais**, Março de 2003, 3ª Conferência Internacional de Educação na Engenharia e Computação, 5 Páginas.
- [11]LEOCÁDIO Jr. , Hormando, **Resfriamento de uma Placa de Aço à alta temperatura por meio de um Jato de Água Circular**, Julho de 2008, Dissertação de Mestrado, Florianópolis, UFSC, 119 Páginas.
- [12]MONTGOMERY, D.C., **Estatística Aplicada à Engenharia**; LTC, 2001.
- [13]NISHIOKA, Kiyoshi; ISHIKAWA, Kazutoshi, **Progress in Thermomechanical Control Of Steel Plates and Their Commercialization**, Abril de 2012, Publicado pela IOP Science, 21 Páginas.
- [14]RIZZO, Ernandes M. S., **Processos de Laminação a Quente de Produtos Planos de Aço** ; São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração(ABM) , 2011.
- [15]ROTONDARO, R.G., **Seis Sigma: Estratégia Gerencial para melhoria de processos, produtos e serviços**; 1ª Edição, São Paulo: Atlas ,2002.

[16]SILVA, Caetano .N., **Influência da laminação de encruamento sobre a Planicidade e Propriedades Mecânicas de Tiras de Aço Laminadas a Quente**, Fevereiro de 2007, Dissertação de Mestrado, REDEMAT, UFOP, Brasil, 118 Páginas.

[17]WERKEMA, A.S., **Análise de Regressão: Como entender o relacionamento entre as variáveis de um processo / Série Ferramentas da Qualidade**, Volume 7. Belo Horizonte-MG, Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996, página 31.

[18]WERKEMA, A.S., **Criando Cultura Seis Sigma**; Belo Horizonte-MG, 2010.