

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

**DESENVOLVIMENTO DE ACABAMENTO
ROLLED-ON EM AÇO INOXIDÁVEL**

Autor: Paulo Ernesto Freiheit Côrtes

Orientador: Prof. Dr. José Maria Ramón Caccioppoli

Junho de 2009.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Paulo Ernesto Freiheit Côrtes
paulo-ernesto.cortes@hotmail.com

**DESENVOLVIMENTO DE ACABAMENTO *ROLLED-ON*
EM AÇO INOXIDÁVEL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia de Transformação
Orientador: Prof. Dr. José Maria Ramón Caccioppoli

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2009

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e em especial às pesquisadoras Berenice Gonzalez Mendonça e Margareth Spangler Andrade que em 1998 me iniciaram na pesquisa de tecnologias metalúrgicas. Agradeço também a José Laurindo de Souza pelo desenvolvimento dos processos de retífica de cilindro, a Ronildison Geraldo Monteiro por todos os ensaios realizados nesta dissertação e pelas discussões em metodologias de caracterização de superfícies, a Rodney Santandrea pela implantação em laboratório da metodologia “*Open Circuit Potenciostat - OCP*” para caracterização da resistência a corrosão e à ArcelorMittal Inox Brasil pelo financiamento destes estudos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	5
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SUPERFÍCIE	6
3.1.1	<i>RUGOSIDADE</i>	6
3.1.2	<i>O BRILHO</i>	17
3.1.3	<i>FORMA</i>	18
3.2	O PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE PLANOS	19
3.2.1	<i>BANDA DE LÜDERS</i>	19
3.2.2	<i>TRANSFERÊNCIA DE RUGOSIDADE NA LAMINAÇÃO</i>	21
3.3	AÇOS INOXIDÁVEIS	24
3.4	LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO (LE)	26
3.4.1	<i>O BRILHO</i>	28
3.4.2	<i>A FORMA DA TIRA</i>	28
3.4.3	<i>MODELAMENTO MATEMÁTICO DA LE</i>	29
3.5	ACABAMENTO ROLLED-ON	33
4	PRODUTO ALVO	42
5	FASE 1 - SIMULAÇÃO DO PROCESSO INDUSTRIAL EM LABORATÓRIO	45
5.1	METODOLOGIA	46
5.2	O EQUIPAMENTO	48
5.3	CARACTERIZAÇÃO DOS CILINDROS DE LAMINAÇÃO	48
5.4	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS A SEREM LAMINADAS	52
5.5	RESULTADOS	55
5.6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	65

5.6.1	<i>TRANSFERÊNCIA DE RUGOSIDADE VERSUS CARGA DE LAMINAÇÃO</i>	65
5.6.2	<i>TRANSFERÊNCIA DE RUGOSIDADE DURANTE LAMINAÇÃO EM LABORATÓRIO</i>	67
5.6.3	<i>CONDIÇÃO IDEAL DO CILINDRO DE LAMINAÇÃO</i>	71
5.7	CONCLUSÕES	74
6	FASE 2 - EXPERIÊNCIA INDUSTRIAL	75
6.1	METODOLOGIA	75
6.2	EQUIPAMENTO	77
6.3	CARACTERIZAÇÃO DOS CILINDROS DE LAMINAÇÃO	78
6.4	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS A SEREM LAMINADAS	79
6.5	RESULTADOS	80
6.6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	80
6.7	CONCLUSÕES	86
7	FASE 3 - AVALIAÇÃO DO PRODUTO OBTIDO	87
7.1	METODOLOGIA	87
7.2	RESULTADOS	89
7.2.1	<i>CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE</i>	89
7.2.2	<i>OXIDAÇÃO CONTÍNUA EM BAIXAS TEMPERATURAS</i>	91
7.2.3	<i>OXIDAÇÃO CÍCLICA EM BAIXAS TEMPERATURAS</i>	93
7.2.4	<i>RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM CÉLULA ELETROQUÍMICA</i>	95
7.2.5	<i>RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA</i>	96
7.2.6	<i>RESISTÊNCIA À CORROSÃO POR EXPOSIÇÃO ATMOSFÉRICA</i>	97
7.2.7	<i>ESTAMPABILIDADE</i>	99
7.3	ANÁLISE, DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	99
8	CONCLUSÕES FINAIS	102
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
10	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
11	APÊNDICE	108

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - SEQÜÊNCIA DE PROCESSAMENTO PARA OBTENÇÃO ACABAMENTOS	1
FIGURA 3.1 - COMPRIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DE RUGOSIDADE. ^[2]	7
FIGURA 3.2 - (A) ANÁLISE TOPOGRÁFICA, (B). REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PERFIL MEDIDO.	8
FIGURA 3.3 – (A) SUBDIVISÃO ESQUEMÁTICA DO PERFIL COM VÁRIAS FREQUÊNCIAS ESPACIAIS (P,W,R) E (B) COMPOSIÇÃO DE TODAS ELAS.	9
FIGURA 3.4 - VALOR ABSOLUTO DA ORDENADA DE AFASTAMENTO Y_I . ^[2]	10
FIGURA 3.5 - RUGOSIDADE PARCIAL Z_I . ^[2]	10
FIGURA 3.6 - RUGOSIDADE MÉDIA R_A . ^[2]	11
FIGURA 3.7 - DETERMINAÇÃO DE R_Y . ^[2]	12
FIGURA 3.8 - DIVERSAS CONDIÇÕES COM O MESMO VALOR DE R_Y . ^[2]	12
FIGURA 3.9 - RUGOSIDADE R_T : DISTÂNCIA ENTRE O PICO MAIS ALTO E O VALE MAIS PROFUNDO. ^[2]	12
FIGURA 3.10 - RUGOSIDADE R_Z . ^[2]	13
FIGURA 3.11 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM PERFIL E SUA CURVA “ <i>MATERIALS RATE</i> ”, PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DENSIDADE DE MATERIAL MR_1 E MR_2 . ^[2]	14
FIGURA 3.12 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM PERFIL E SUA CURVA “ <i>MATERIAL RATE (MR)</i> ”, NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS R_{PK} E R_{VK} . ^[2]	15
FIGURA 3.13 - ESQUEMA DE UMA IMAGEM TRIDIMENSIONAL GERADA APÓS VÁRIAS MEDIDAS BIDIMENSIONAIS. ^[2]	15
FIGURA 3.14 - ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (θ_i) É IGUAL AO ÂNGULO DE REFLEXÃO (θ_r).	17
FIGURA 3.15 – DIFUSÃO DA LUZ.....	18
FIGURA 3.16 – (A) GRÁFICO CARGA X ALONGAMENTO APRESENTANDO PATAMAR DE ESCOAMENTO ^[3] , (B) IMAGEM DA SUPERFÍCIE DO MATERIAL DEFORMADO APRESENTANDO AS BANDAS DE LÜDERS. ^[4]	19
FIGURA 3.17 - GRÁFICO DO PATAMAR DE ESCOAMENTO PELA TEMPERATURA DE RECOZIMENTO. ^[3]	20
FIGURA 3.18 - GRÁFICOS DA TRANSFERÊNCIA DE RUGOSIDADE DO CILINDRO PARA A TIRA ^[4] (A) DOIS AÇOS DIFERENTES E DOIS DIÂMETROS DE CILINDRO E (B) DIFERENTES ESPESSURAS.	22
FIGURA 3.19 - GRÁFICO DE TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE RUGOSIDADE, PARA DIFERENTES RUGOSIDADES INICIAIS EM DUAS DIFERENTES VELOCIDADES DE LAMINAÇÃO. ^[4]	22
FIGURA 3.20 - EVOLUÇÃO DA SUPERFÍCIE APÓS MÚLTIPLOS PASSES DE LAMINAÇÃO COM CILINDROS PREPARADOS POR EDT. ^[6]	23
FIGURA 3.21 - GRÁFICO DA TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE RUGOSIDADE X PRESSÃO MÉDIA RELATIVA PARA CILINDROS PREPARADOS COM REBOLO GROSSO. ^[4]	24
FIGURA 3.22 – LAMINADOR DE ENCRUAMENTO CONVENCIONAL “DUO” ^[3]	26
FIGURA 3.23 - LAMINADOR DE ENCRUAMENTO “QUADRUO” ^[11]	27
FIGURA 3.24 - LAMINADOR DE ENCRUAMENTO COM “ <i>WORK ROLL BENDING</i> ” ^[3]	27
FIGURA 3.25 – EVOLUÇÃO DO BRILHO DO MATERIAL (A) COM A FORÇA DE LAMINAÇÃO.....	28

FIGURA 3.26 - VISÃO DE ZONAS DE DEFORMAÇÃO DURANTE LAMINAÇÃO. ^[11]	30
FIGURA 3.27 - RESULTADO DO MODELAMENTO POR ELEMENTOS FINITOS DA LAMINAÇÃO COM CILINDROS PREPARADOS POR EBT. À ESQUERDA EM AZUL, SUPERFÍCIE DO CILINDRO E A DIREITA EM VERDE O RESULTADO DA TIRA APÓS LAMINAÇÃO. ^[11]	32
FIGURA 3.28 – TÉCNICAS DE TEXTURIZAÇÃO DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO ^[11] :	33
FIGURA 3.29 - TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE APÓS LAMINAÇÃO NO LAMINADOR SENDZIMIR. ^[6]	34
FIGURA 3.30 - TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DA TIRA APÓS LAMINAÇÃO NO LAMINADOR DE ENCRUAMENTO. ^[6]	35
FIGURA 3.31 – MICROESTRUTURA DAS DUAS FACES DA SUPERFÍCIE DA TIRA LAMINADA COM CILINDRO TEXTURIZADO POR SBT. ^[26]	36
FIGURA 3.32 - MICROESTRUTURA DA SUPERFÍCIE DA TIRA LAMINADA COM CILINDRO TEXTURIZADO POR LBT EM DUAS AMPLIAÇÕES. ^[30]	37
FIGURA 3.33 - MODELO DA MICRO-CAVIDADE FORMADA PELO FEIXE DE LASER NO CILINDRO, DEPOIS LAMINADO NA TIRA. ^[30]	37
FIGURA 3.34 - MICROESTRUTURA DA SUPERFÍCIE DAS DUAS FACES DA TIRA LAMINADA COM CILINDRO TEXTURIZADO POR EDT. ^[26]	38
FIGURA 3.35 - MICROESTRUTURA DA SUPERFÍCIE DO CILINDRO TEXTURIZADO POR EBT. ^[11]	39
FIGURA 3.36 - MICROESTRUTURA DA SUPERFÍCIE DAS DUAS FACES DA TIRA LAMINADA COM CILINDRO TEXTURIZADO POR TOPOCROM. ^[26]	40
FIGURA 4.1 – IMAGEM DE MICROSCOPIA DO AÇO 304 LIXADO	42
FIGURA 4.2 – CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO AÇO 304 LIXADO	42
FIGURA 5.1 – LAMINADOR FENN, LABORATÓRIO DE SIMULAÇÃO TERMOMECAÂNICA.	48
FIGURA 5.2 – COMPORTAMENTO DE ALGUNS PARÂMETROS DE SUPERFÍCIE EM	66
FIGURA 5.3 – RUGOSIDADE DA AMOSTRA LAMINADA “ST” X CARGA DE LAMINAÇÃO (T).....	67
FIGURA 5.4 – CORRELAÇÃO DE RAF X ALONGAMENTO, ESPESSURA E RCIL.....	69
FIGURA 5.5 - CORRELAÇÕES DA RUGOSIDADE FINAL OBTIDA NA TIRA VERSUS PARÂMETROS DE LAMINAÇÃO COM ALONGAMENTO IGUAL A 1,5%.	70
FIGURA 6.1 – LAMINADOR DE ENCRUAMENTO, ÁREA INDUSTRIAL DA ARCELORMITTAL INOX BRASIL.	77
FIGURA 6.2 – TAXA DE TRANSFERÊNCIA DO BRILHO E DA RUGOSIDADE (RA E RY) EM FUNÇÃO DA CARGA DE LAMINAÇÃO.	80
FIGURA 6.3 – RELAÇÃO DE RUGOSIDADE E BRILHO MATERIAL LAMINADO.	81
FIGURA 6.4 – TAXA DE TRANSFERÊNCIA DO BRILHO E DA RUGOSIDADE RA EM FUNÇÃO DO ALONGAMENTO SOFRIDO DURANTE LAMINAÇÃO.	82
FIGURA 6.5 – CORRELAÇÃO DE RAF X ALONGAMENTO, ESPESSURA E RCIL.....	84
FIGURA 6.6 –CORRELAÇÕES DOS PARÂMETROS DE LAMINAÇÃO COM CARGA DE LAMINAÇÃO IGUAL A 240,95T.....	85
FIGURA 7.1 – EQUIPAMENTO DIP DRY E SUAS QUATRO CÉLULAS DE AQUECIMENTO, RESFRIAMENTO, REPOUSO E DE SOLUÇÃO AQUOSA.....	88

FIGURA 7.2 – CARACTERIZAÇÃO SUPERFICIAL ACABAMENTO RO DO AÇO 430A, MICROSCOPIA ÓPTICA, ELETRÔNICA DE VARREDURA E PERFILOMETRIA.....	90
FIGURA 7.3 – ANÁLISE SUPERFÍCIE AÇO 430/LIXADO LINHA SUPERIOR E 430/RO LINHA INFERIOR.	90
FIGURA 7.4 – ÍNDICE DE AMARELAMENTO X TEMPERATURA, PARA TRATAMENTO DE 3 HORAS.	91
FIGURA 7.5 – ÍNDICE DE AMARELAMENTO X TEMPERATURA, PARA TRATAMENTO DE 24 HORAS.	91
FIGURA 7.6 – AMOSTRAS PROCESSADAS PARA LEVANTAMENTO DA TEMPERATURA DE AMARELAMENTO..	92
FIGURA 7.7 – AMOSTRAS PROCESSADAS PARA LEVANTAMENTO DA CINÉTICA DE OXIDAÇÃO CÍCLICA.	93
FIGURA 7.8 – ÍNDICE DE AMARELAMENTO X TEMPO, PARA TEMPERATURA IGUAL A 180°C.....	94
FIGURA 7.9 – ÍNDICE DE AMARELAMENTO X TEMPO, PARA TEMPERATURA IGUAL A 240°C.....	94
FIGURA 7.10 – APRESENTA AS CURVAS POTENCIAL VS. TEMPO OBTIDAS NESTE TRABALHO PARA OS AÇOS INOXIDÁVEIS 304 E 430, COMPARANDO OS ACABAMENTOS ENCRUADO 2B (AZUL), LIXADO (VERDE, MARROM) E RO (VERMELHO).....	95
FIGURA 7.11 – AMOSTRAS DE 430 RO (ESQUERDA) E LIXADO (DIREITA) APÓS 1000HS DE TRATAMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA, SOLUÇÃO DE CLORETO DE SÓDIO 5%.....	96
FIGURA 7.12 – AMOSTRAS DE 439 RO (DIREITA) E LIXADO (ESQUERDA) APÓS 1000HS DE EXPOSIÇÃO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA.	97
FIGURA 7.13 – GRÁFICO DO BRILHO VS TEMPO (DIAS) DE EXPOSIÇÃO <i>INDOOR</i> E <i>OUTDOOR</i> DA AMOSTRA DE 430/RO.	98
FIGURA 7.14 – GRÁFICO DO ÍNDICE DE AMARELAMENTO VS TEMPO(DIAS) DE EXPOSIÇÃO <i>INDOOR</i> E <i>OUTDOOR</i> DA AMOSTRA DE 430/RO.	98
FIGURA 7.15 – COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS RESULTADOS DOS PARÂMETROS DE AMARELAMENTO E TEMPO DE AMARELAMENTO. PARA TESTE DE OXIDAÇÃO CÍCLICA A 180°C.....	100
FIGURA 7.16 – COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS RESULTADOS DOS PARÂMETROS DE AMARELAMENTO E TEMPO DE AMARELAMENTO. PARA TESTE DE OXIDAÇÃO CÍCLICA A 240°C.....	100

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA AÇO BIESTABILIZADO 439	25
TABELA 3.2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E TAMANHO DE GRÃO AÇO BIESTABILIZADO 439.	25
TABELA 3.3 - RESULTADO DA MEDIDA DE RUGOSIDADE (RA) E DENSIDADE DE PICOS (<i>PEAK COUNTS-PC</i>) NA TIRA LAMINADA COM CILINDRO TEXTURIZADO POR SBT (RUGOSIDADE DO CILINDRO IGUAL A 2 MM RA E 128 PC).	36
TABELA 3.4 - RUGOSIDADE RA MEDIDA EM VÁRIAS POSIÇÕES AO LONGO DO COMPRIMENTO DOS CILINDROS TEXTURIZADOS POR EDT ANTES E APÓS A LAMINAÇÃO DE 1750T DE AÇO ^[26]	38
TABELA 3.5 - RESULTADO MEDIDA DE RUGOSIDADE (RA) E DENSIDADE DE PICOS (<i>PEAK COUNTS-PC</i>) TIRA LAMINADA COM CILINDRO TEXTURIZADO POR TOPOCROM, E APÓS 12 BOBINAS ^[26]	41
TABELA 5.1 – AMOSTRAS UTILIZADAS PARA SIMULAÇÃO LABORATÓRIO.	46
TABELA 5.2 - VARIÁVEIS DE PROCESSAMENTO RUGOSIDADE DO CILINDRO (RA) E TIPO DE REBOLO.	47
TABELA 5.3 – CARACTERIZAÇÃO SUPERFÍCIE DO CILINDRO.	49
TABELA 5.4 – RESPESSURA DA AMOSTRA, RUGOSIDADE E BRILHO(20°) DA SUPERFÍCIE.	52
TABELA 5.5 – TOPOGRAFIA DAS AMOSTRAS ANTES DE SEREM LAMINADAS.	53
TABELA 5.6 – CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS 439/0,5MM, DIFERENTES RUGOSIDADE DE CILINDRO. ...	56
TABELA 5.7 – COMPARAÇÃO TOPOGRAFIA E PERFIL DE ALGUNS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE. (RA = 1,5; 2,21; 1,82; 1,5; 0,93; 1,5 μm) RESPECTIVAMENTE.	61
TABELA 5.8 – VARIAÇÃO PARÂMETROS CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE COM A CARGA APLICADA.	63
TABELA 5.9 – TOPOGRAFIA SUPERFÍCIE 439/0,5MM LAMINADA $RA_{CIL} = 1,5$ EM DIFERENTES CARGAS DE LAMINAÇÃO.	64
TABELA 5.10 – REGRESSÃO DA RUGOSIDADE FINAL DA TIRA EM FUNÇÃO DO ALONGAMENTO, RUGOSIDADE DO CILINDRO E DA ESPESURA DO MATERIAL LAMINADO.	68
TABELA 5.11 – PERFIL DE RUGOSIDADE PARA TRÊS CONDIÇÕES DE RUGOSIDADE DE CILINDRO.	71
TABELA 5.12 – TOPOGRAFIA COM RESULTADOS MAIS PRÓXIMOS DO ACABAMENTO LIXADO.	72
TABELA 5.13 – COMPARAÇÃO TOPOGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES MATERIAL LIXADO E MATERIAL RO LAMINADO EM LABORATÓRIO.	73
TABELA 6.1 – PARÂMETROS DA EXPERIÊNCIA INDUSTRIAL REALIZADA LAMINADOR DE ENCRUAMENTO. ...	76
TABELA 6.2 – VALORES MÁXIMOS DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO DO LAMINADOR DE ENCRUAMENTO.	77
TABELA 6.3 - CARACTERIZAÇÃO SUPERFÍCIE DO CILINDRO.	78
TABELA 6.4 – CARACTERIZAÇÃO SUPERFICIAL DA AMOSTRA ORIGINAL	79
TABELA 6.5 – ANÁLISE DA REGRESSÃO DA TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE RUGOSIDADE EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE LAMINAÇÃO COM CILINDRO RUGOSO IGUAL A 2MM RA.	83
TABELA 7.1 – CARACTERIZAÇÃO SUPERFÍCIE.	89
TABELA 7.2 – TEMPERATURAS DE AMARELAMENTO (°C) POR PRODUTO.	92

TABELA 7.3 – VALORES ENSAIOS SWIFT E ERICHSEN AÇOS 430 E 439 COM ACABAMENTOS LIXADO, 2B, RO.	99
TABELA 11.1 – RESULTADO CARACTERIZAÇÃO DA FACE SUPERIOR DAS AMOSTRAS APÓS LAMINADAS EM LABORATÓRIO COM VÁRIAS RUGOSIDADES DE CILINDRO.	109
TABELA 11.2 – RESULTADO CARACTERIZAÇÃO DA FACE INFERIOR DAS AMOSTRAS APÓS LAMINADAS EM LABORATÓRIOS COM VÁRIAS RUGOSIDADES DE CILINDRO.	110

LISTA DE NOTAÇÕES

2B – Acabamento do material com um passe final de encruamento com cilindro liso;

2D – Acabamento do material sem passe final de encruamento;

ABNT – Associação Brasileira Normas Técnicas;

ASTM – “*American Society for Testing and Materials*”;

B_f – Brilho final da amostra;

B_i – Brilho inicial da amostra;

DDQ – “*Deep Drawing Quality*”, denominação de material apropriado para estampagem profunda como em pias e cubas;

DIN – “*Deutsches Institut für Normung*”;

DOE – “*Design of Experiments*”: metodologia sistemática de investigação das influências das variáveis de processo ou do produto na sua qualidade final.

Dur.(HRB) – Dureza medida em Rockel B descrito pela norma ASTM E93;

E – Relação de estabilização da liga do aço;

EBT – “*Electron Beam Texturing*”, técnica para preparação de cilindros texturizados;

EDT – “*Electrical Discharge Texturing*”, técnica para preparação de cilindros texturizados;

Esp.(mm) – Espessura;

GU – “Gloss Unit”, unidade de medição do brilho;

I8 – Sigla que designa acabamento lixado produzido pela ArcelorMittal Inox Brasil;

IL – Sigla que designa um tipo de RO produzido pela ArcelorMittal Inox Brasil;

INJ – “*Ink Jet Texturing*”, técnica para preparação de cilindros texturizados;

LBT – “*Laser Beam Texturing*”, técnica para preparação de cilindros texturizados;

LD_r – Parâmetro de Limite da Razão da Estampagem, obtido por ensaio de estiramento;

l_e – Comprimento efetivo de leitura para avaliar rugosidade de uma superfície;

LE – Laminador de encruamento;

LE(MPa) – Limite de escoamento do material em 0,2%, descrito pela norma ASTM A370;

l_m – Comprimento considerado do percurso de leitura para avaliar rugosidade de uma superfície;

- l_n** – Comprimento final do percurso de leitura para avaliar rugosidade de uma superfície;
- LR(MPa)** – Limite de resistência, descrito pela norma ASTM A370;
- l_t** – Comprimento da leitura para medidas de rugosidade da superfície;
- l_v** – Comprimento inicial do percurso de leitura para avaliar rugosidade de uma superfície;
- MEV** – Microscópio Eletrônico de Varredura;
- OCP** – “*Open Circuit Potenciostat*”, técnica para caracterização resistência a corrosão em meio líquido qualquer;
- PC** – “*Peak Count*”, densidade de picos medida;
- PVC** – Sigla do plástico Policloreto de Vinila utilizado para proteção de superfícies e lubrificação em processos de estampagem;
- R_a** – Rugosidade média de um perfil, descrito pela norma ABNT . NBR 6405, 1988;
- $R_{a_{cil}}$** – Rugosidade superficial inicial do cilindro de laminação;
- R_{a_r}** – Rugosidade R_a do cilindro;
- R_{a_s}** – Rugosidade R_a da tira;
- $R_{a_{tf}}$** – Rugosidade superficial final da amostra;
- $R_{a_{ti}}$** – Rugosidade superficial inicial da amostra;
- RO** – Sigla acabamento conhecido como “*Rolled-On*”;
- R_{pk}** – Rugosidade média de picos de um perfil, descrito pela norma ABNT . NBR 6405, 1988;
- R_t** – Rugosidade total de um perfil, descrito pela norma ABNT . NBR 6405, 1988;
- R_{vk}** – Rugosidade média de vales de um perfil, descrito pela norma ABNT . NBR 6405, 1988;
- R_y** – Rugosidade máxima de um perfil, descrito pela norma ABNT . NBR 6405, 1988;
- R_z** – Rugosidade média máxima de um perfil, descrito pela norma ABNT . NBR 6405, 1988;
- S_a** – Rugosidade média de uma área, descrita pela norma ABNT . NBR 6405, 1988;
- SBT** – “*Shot Blast Texturing*”, técnica para preparação de cilindros texturizados;
- S_p** – Rugosidade média de picos de uma área, descrita pela norma ABNT . NBR 6405, 1988;
- S_t** – Rugosidade total de uma área, descrita pela norma ABNT . NBR 6405, 1988;

- S_v** – Rugosidade média de vales de uma área, descrita pela norma ABNT . NBR 6405, 1988;
- S_y** – Rugosidade máxima de uma área, descrita pela norma ABNT . NBR 6405, 1988;
- S_z** – Rugosidade média máxima de uma área, descrita pela norma ABNT . NBR 6405, 1988;
- TG(ASTM)** – Tamanho de grão medido descrito pela norma ASTM E112;
- T_{Ra}** – Taxa de transferência de rugosidade do cilindro para amostra;
- Ye** – Índice de Amarelamento, parâmetro descrito pela norma ASTM E113;
- Y_i** – Valor absoluto da ordenada de afastamento do ponto mais alto da i-ésima saliência;
- Z_i** – Valor da rugosidade parcial de uma superfície; **η_{si}** – Parâmetro de rugosidade que mede os picos mais altos de uma área, descrito pela norma ABNT . NBR 6405, 1988;
- η_{vi}** – Parâmetro de rugosidade que mede os vales mais profundos de uma área, descrito pela norma ABNT . NBR 6405, 1988;
- θ_i** – ângulo de incidência da luz;
- θ_r** – ângulo de reflexão da luz;
- ξ²** – Parâmetro que indica precisão do ajuste de uma função a um conjunto de pontos.
- .

RESUMO

Existem tipos diferenciados de acabamentos de aços inoxidáveis para as mais variadas aplicações. O acabamento conhecido como “Rolled-On”(RO), apresenta várias texturas superficiais com padrões de rugosidade e brilho escolhidas pelo cliente. Neste trabalho o acabamento RO foi desenvolvido no aço 439 com 1,5mm de espessura para substituir o acabamento lixado.

O RO é obtido utilizando cilindro texturizado durante laminação de encruamento, transferindo simultaneamente para as duas faces da tira seu aspecto rugoso, por isso apresenta menor custo de produção que seu similar. Resultados de laboratório mostraram que o RO apresenta resistência à oxidação até 300°C, resistência à corrosão a imersão em meio salino com 0,15% NaCl e índice de estiramento em ensaios de estampagem superiores ao acabamento lixado.

O RO foi desenvolvido em escala industrial na ArcelorMittal Inox Brasil. Por apresentar menor “*lead time*” que o acabamento similar possibilitou aumento da oferta deste produto, inibindo importações e protegendo o “*marketshare*” da empresa que é a única produtora de aços inoxidáveis na América latina.

A desenvolvimento do “*know-how*” do acabamento Rolled-On permitiu aumentar competitividade no mercado, pois além de ser um produto moderno com menor custo que outros similares, abre espaço para desenvolver uma nova família de acabamentos diferenciados utilizando esta tecnologia.

ABSTRACT

Different kinds of finishes exist for steels, a new one known “Rolled-On” (RO) could show with different surface’s patterns, with different roughness and gloss. This work presents the development of the RO finishes in 439 stainless steel with 1,5mm thick. This new finishes will be produced to substitute the grindings finishes.

A RO finishes is obtained using a textured roll in temper rolling process. A rolling process transfer roughness aspect in same time, for twice side of the strip. Laboratory results indicate that RO finishes show 45% superior oxidation resistance, greater salt spray corrosion resistance with 0,15% NaCl as your similar (grinding finishes) and better drawability in stretching test.

RO was development in ArcelorMittal Inox Brasil industrial plant. It has minor *lead time* as other similar finishes. This difference allowed increase of market’s offers, protecting company’s *marketshare*. This new *know-how* improves the ArcelorMittal’s *portfolio* and made possible develop others compatibles finishes.

1 INTRODUÇÃO

O acabamento conhecido como “Rolled-On” (RO) é comercializado no mercado como alternativa mais barata a outros produtos similares. O processo de sua fabricação acontece durante a laminação de encruamento, substituindo os cilindros lisos por cilindros texturizados (padronizados), transferindo desta maneira ao mesmo tempo para ambas as faces da tira o “aspecto visual” desejado.

O acabamento lixado é solicitado pelos clientes por causa da sua bela aparência visual e homogeneidade superficial. Ele é utilizado principalmente para aplicações cosméticas as quais o bom aspecto visual é pré-requisito para aprovação do produto final.

O acabamento RO pode apresentar aspecto visual de lixado, porém com custo de produção menor. A redução do custo é devida à exclusão da etapa de esmerilhamento de bobinas, como mostrado na Figura 1.1.

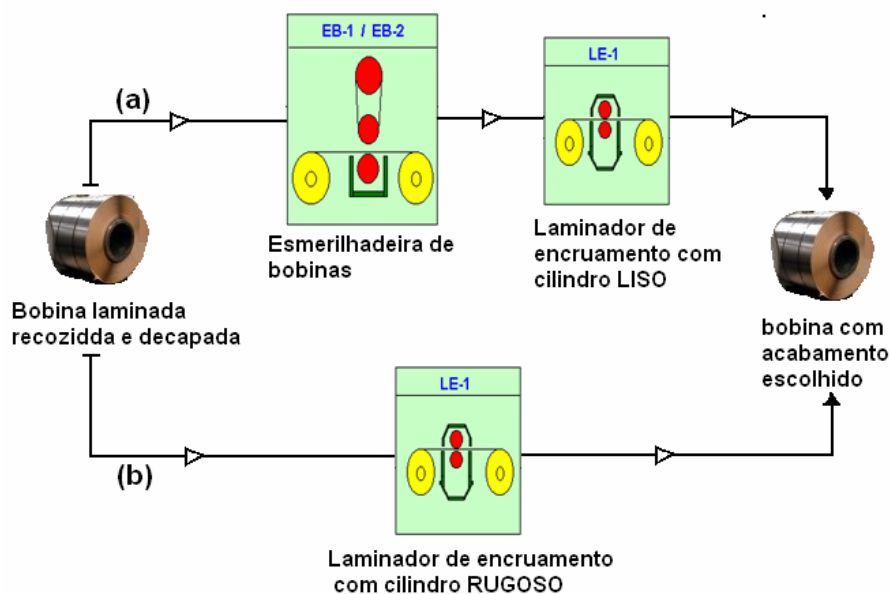


Figura 1.1 - Sequência de processamento para obtenção acabamentos (a) lixada e (b) RO.

Segundo GONÇALVES^[1], o processo de lixamento degrada a superfície do material deixando-a fragilizada. O atrito entre a lixa e a superfície da tira de aço provoca um aquecimento “pontual” da ordem de 600°C que promove a difusão do átomo de ferro do metal base para camada passiva do aço inoxidável formando óxido (Fe_2O_3 - amarelado), empobrecendo-a e deixando-a mais susceptível a corrosão. Devido a não ocorrência de abrasão durante processamento do acabamento RO, ele apresenta resistência corrosão superior ao lixado.

Além de proporcionar menor custo e maior resistência à corrosão é possível listar outras vantagens do RO em relação ao lixado:

- Diminuição do “*Lead Time*”, que é o tempo gasto para processamento de um produto;
- Melhor resistência à oxidação a baixas temperaturas;
- Melhor estampabilidade;
- Material apresenta mesma textura em ambas as faces da tira ou “*Back Pass*”, atendendo exigências de alguns clientes;
- É possível produzi-lo com espessuras inferiores as ofertadas com acabamento lixado.

O aspecto visual do acabamento RO depende principalmente da qualidade do padrão de textura obtido na superfície do cilindro do laminador de encruamento, bem como das práticas de laminação e da homogeneidade da superfície do material a ser encruado.

Existem varias maneiras de preparar o cilindro para se obter o acabamento texturizado, são citadas: utilização de rebole grosso (“*grinding wheels*”) durante retífica, jateamento do cilindro com granalha, eletro-remoção química, (EDT – “*Electrical Discharge Texturing*”) e a texturização com raio laser (LBT – “*Laser Beam Texturing*”).

A ArcelorMittal Inox Brasil não possui o “*Know-how*” para produção deste acabamento, portanto, são necessários realizar estudos da preparação do cilindro, dos seus defeitos, da produtividade e do comportamento deste acabamento em aços inoxidáveis ferríticos.

Assim, o desenvolvimento de novos acabamentos “Rolled-On” está inserido na atualização constante do “portifólio” de produtos e acabamentos da ArcelorMittal Inox Brasil, mantendo assim, a sua competitividade frente aos sucedâneos. Este novo acabamento cria nova alternativa no mercado nacional e supre importantes clientes estratégicos no cenário mundial.

O presente trabalho objetivou desenvolvimento de um novo produto em aço inox 439, 1,5mm de espessura com “aspecto visual” do aço inox 304 lixado produzido pela ArcelorMittal Inox Brasil, aplicando a tecnologia “**Rolled-On**”. O conhecimento adquirido neste trabalho possibilitará aplicação deste acabamento em outros aços inoxidáveis ferríticos com outras espessuras.

A homogeneidade e o padrão de textura do cilindro é um pré-requisito importante. Neste trabalho é utilizado rebolo grosso na retífica para preparação dos cilindros de laminação.

Para avaliação do aspecto visual e aparência das amostras, serão aplicadas técnicas de caracterização da topografia, de medição do brilho e da cor. Estudos utilizando microscopia óptica e eletrônica de varredura foram empregados para registrar padrão superficial do material. Para a caracterização superficial dos cilindros de laminação foi utilizado a técnica de réplica com resina.

Para verificar os benefícios auferidos com a utilização do novo acabamento, foi realizado um estudo comparativo entre acabamento RO e lixado. Este estudo é composto por análise das propriedades mecânicas e de estampagem, da resistência à corrosão em exposição atmosférica e em meio salino, e em condições contínuas e cíclicas de oxidação a temperaturas até 300°C.

Além deste capítulo inicial, o presente texto está dividido em dez capítulos, descritos a seguir:

- **CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS**

- **CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:**

Este capítulo apresenta **uma** pequena revisão dos conceitos de propriedades geométricas e de caracterização de superfícies, dos processos de laminação de planos, de aços inoxidáveis (principalmente do 439 que foi aço utilizado nesta dissertação), e é mostrada também uma revisão dos fundamentos básicos da laminação de encruamento. Finalmente é apresentada a descrição geral do acabamento Rolled-On.

- **CAPÍTULO 4 – PRODUTO ALVO:**

Neste capítulo é mostrada a caracterização do produto alvo (aço 304 com acabamento lixado) que seria o padrão superficial desejado para o novo produto a ser desenvolvido o 439/RO.

- **CAPÍTULO 5 – SIMULAÇÃO DA LAMINAÇÃO EM LABORATÓRIO:**

Aqui são descritas as simulações de laminação de encruamento em laboratório a fim de identificar qual a rugosidade do cilindro necessária para se obter acabamento superficial da tira com aspecto mais próximo do acabamento lixado.

- **CAPÍTULO 6 – EXPERIÊNCIA INDUSTRIAL:**

Utilizando a rugosidade de cilindro identificado pela simulação em laboratório, são realizados ensaios industriais para avaliar a relação dos vários parâmetros de laminação de encruamento com a transferência de rugosidade do cilindro para a tira. Neste capítulo também é definida a prática de laminação do novo produto 439 com acabamento RO.

- **CAPÍTULO 7 – AVALIAÇÃO DO PRODUTO OBTIDO:**

Por último, o novo produto 439 com acabamento RO, padronizado pelos parâmetros de laminação definidos no capítulo anterior, é caracterizado. As propriedades finais do RO aplicado em diferentes aços são comparadas as do acabamento lixado. São apresentados estudos comparativos avaliando a resistência à corrosão e oxidação, propriedades mecânicas e estampabilidade.

- **CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES FINAIS**

- **CAPÍTULO 9 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- **CAPÍTULO 10 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- **CAPÍTULO 11 – APÊNDICE**

2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver para ArcelorMittal Inox Brasil o “*know-how*” de fabricação de acabamento “*Rolled-On*” em chapas de aços inoxidáveis de diversas espessuras. Para isto, têm-se os seguintes objetivos derivados:

- a) Desenvolver industrialmente novo acabamento superficial “*Rolled-On - RO*” em aços inoxidáveis ferríticos 439 de 1,5 mm de espessura, que apresentem “aspecto” visual similar a do acabamento lixado obtido no aço 304, produzido pela ArcelorMittal Inox Brasil.
- b) Avaliar o processo de transferência da rugosidade do cilindro para a tira durante a laminação de encruamento, relacionando o efeito de cada parâmetro do processo com a aparência final do produto laminado.
- c) Após conceber o novo produto 439/RO, avaliar as propriedades obtidas durante sua aplicação e compará-las ao mesmo aço com acabamento lixado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica em cinco seções: propriedades geométricas da superfície, processo de laminação de planos, aços inoxidáveis, laminação de encruamento e acabamento Rolled-On.

3.1 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SUPERFÍCIE

É importante obter noção básica dos princípios e modelos utilizados neste trabalho para um bom entendimento dos resultados apresentados. Boa parte deles decorre da caracterização da superfície, por isso, nesta seção é apresentado o conceito utilizado para caracterização da rugosidade, do brilho e da forma do material produzido.

3.1.1 RUGOSIDADE

Rugosidade é o conjunto de irregularidades, ou seja, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Uma superfície de uma peça qualquer, por exemplo, um cilindro, quando observada a olho nu, em geral, parece perfeita. Uma análise mais detalhada da mesma mostra que existe uma série de imperfeições, possíveis de serem medidas com auxílio de instrumentos especiais. Estas imperfeições micro-geométricas são conhecidas como rugosidade.

A rugosidade influencia as propriedades ópticas, mecânicas, elétricas ou magnéticas dos materiais. Entretanto, não existe uma teoria generalizada que explica a influência da rugosidade superficial sobre os fenômenos físicos. Os equipamentos utilizados na indústria para verificar a rugosidade dos materiais são: rugosímetros (análise bidimensional) e perfilômetros (análise tridimensional).

Existem normas que regulamentam a metodologia para medição de rugosidades superficiais. Uma regra importante que deverá ser sempre aplicada à medição da rugosidade é a correlação de três parâmetros que trabalham em conjunto: “*cut-off*”, comprimento da leitura e rugosidade do material. A descrição destes parâmetros assim como a regra que os correlaciona será apresentada em seguida.

3.1.1.1 Amostragem (“Cut-Off”)

Para ser possível comparar materiais em diferentes faixas de rugosidade faz-se necessário seguir uma regra de amostragem durante sua medição. Ela especifica que a amostragem pelas quantidades de picos e vales presentes durante a leitura deve ser equivalente independentemente da faixa de rugosidade presente, por isso o comprimento da leitura (l_t) deve variar com a rugosidade.

O comprimento de amostragem é conhecido como *cut-off* e equivale a 1/7 do comprimento de leitura. Trata-se de um comprimento da amostra, capaz de caracterizar a amostra quanto a sua rugosidade. Se o valor de *cut-off* selecionado for maior que o necessário, incluirá valores do perfil de ondulação que influenciariam os resultados da medição de rugosidade.

Quanto maior a rugosidade da amostra, menores serão os comprimentos de amostragem, isto é, menores os *cut-offs*. Para o cálculo da rugosidade, a amostra é dividida em 5 *cut-offs*, de comprimento l_e , sendo que o percurso inicial, l_v , e o percurso final, l_n (com comprimento da metade do *cut-off*), serão descartados da medida, pois são comprimentos percorridos para atingir a velocidade de medição e para a parada do apalpador, respectivamente. (Figura 3.1)

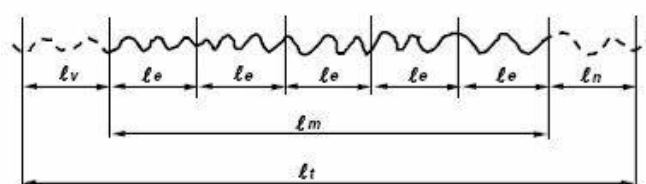


Figura 3.1 - Comprimentos para avaliação de rugosidade. [2]

3.1.1.2 Frequência Espacial

Frequência espacial é o número de ocorrências de picos (cristas) na superfície analisada pela unidade de distância observada. A frequência espacial é obtida na topografia da superfície e é tratada da mesma maneira como se fosse uma onda.

Para proceder à coleta de dados de um perfil de topografia, é necessário realizar a amostragem deste perfil. A amostragem ocorre com uma frequência de medições em um intervalo do espaço (frequência espacial). Cada medição identifica qual o nível (altura) da leitura. A quantidade de níveis (n) durante a medição e a frequência de amostragem caracterizam a precisão do resultado.

A Figura 3.2 (a) ilustra caso real do perfil coletado em uma superfície. Na Figura 3.2 (b) pode ser visto a representação gráfica do perfil traçado em (a). Na abscissa deste mesmo gráfico é lido a amostragem realizada em unidade de comprimento, seu intervalo indica a frequência da leitura da superfície. Na ordenada é mostrada a altura obtida da topografia naquele ponto do espaço, o gráfico foi dividido em sete níveis, os pontos em verde indicam as coordenadas armazenadas da leitura.

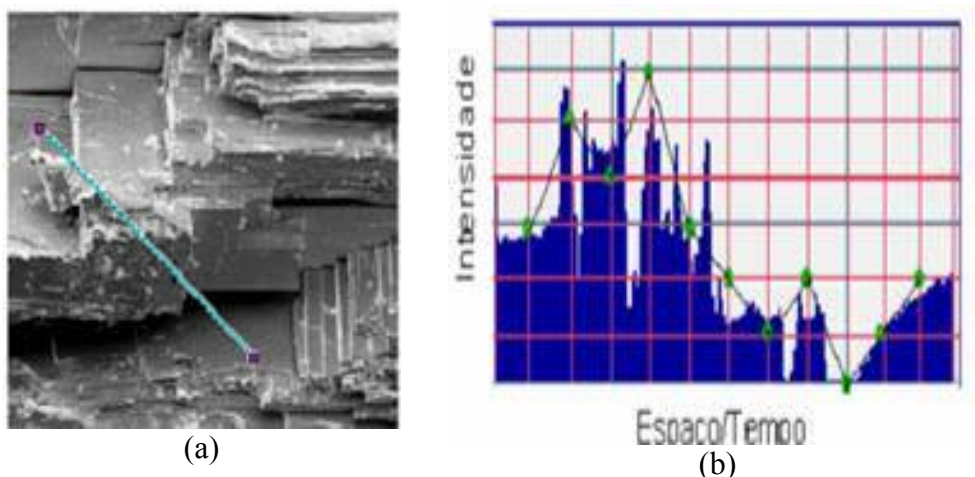


Figura 3.2 - (a) Análise topográfica , (b). representação gráfica do perfil medido.

A frequência de amostragem pode não ser suficiente para possibilitar reconstrução da topografia da superfície para análise. Existe um teorema conhecido como o teorema de Nyquist que descreve “para uma amostragem ser representativa a sua frequência deverá ser no mínimo duas vezes a frequência do signal a ser coletado”. Ou seja, o intervalo de amostragem é calculado dividindo a maior frequência espacial encontrada por 2.

Durante a realização de qualquer análise topométrica, primeiramente é necessário fazer pré-processamento dos dados, a fim de remover ruídos, ondulações e imperfeições indesejadas. Esta remoção é obtida aplicando diferentes filtros que suprimem da

topografia coletada os pontos correspondentes aquela frequência espacial desejada. A ondulação ou a inclinação da superfície são componentes de baixa frequência indesejados na análise.

O perfil coletado da amostra corresponde a uma combinação de faixas de frequência no espaço que o compõe. Como pode ser visto na Figura 3.3, o perfil coletado é uma combinação das outras três frequências espaciais encontradas nos gráficos superiores para a mesma figura, são eles respectivamente: inclinação (P - amarelo), ondulação (W - rosa) e rugosidade (R - azul) em si.

$$\text{Perfil} = \text{inclinação(P)} + \text{Ondulação(W)} + \text{Rugosidade Equação(R)} \quad (3-1)$$

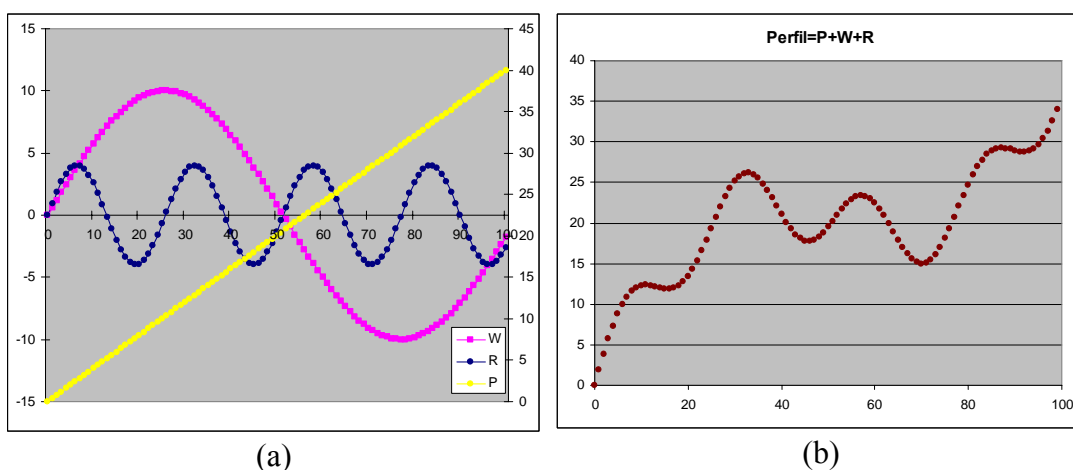


Figura 3.3 – (a) Subdivisão esquemática do perfil com várias frequências espaciais (P,W,R) e (b) composição de todas elas.

3.1.1.3 Parâmetros de Rugosidade

Vários parâmetros são utilizados para medição de rugosidade superficial. Alguns dos parâmetros de avaliação medem a variação vertical (amplitude do perfil) ou a variação horizontal (espaçamento). Porém o conceito de *cut-off* é sempre aplicado para seu cálculo.

Se duas superfícies com características de rugosidade diferentes são medidas, os resultados devem permitir uma diferenciação de seus parâmetros. Se estes valores não mostram diferença entre si, então o resultado não é significativo e deverá ser escolhido

outro parâmetro para a avaliação da superfície. A escolha de um parâmetro para avaliação de diferentes superfícies está relacionada com a sua sensibilidade para distinguir as características destas superfícies.

Algumas das diferentes definições associadas à rugosidade de uma superfície partem dos seguintes parâmetros:

- Y_i : valor absoluto da ordenada de afastamento do ponto mais alto da i -ésima saliência (ou mais baixo da i -ésima reentrância) medida em relação à linha média, conforme a Figura 3.4.

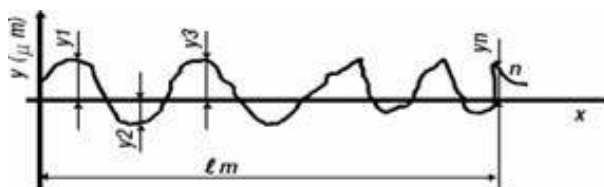


Figura 3.4 - Valor absoluto da ordenada de afastamento Y_i .^[2]

- Z_i : valor da rugosidade parcial. É a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no i -ésimo “cut-off”. Na representação gráfica do perfil, esse valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, no i -ésimo comprimento de amostragem, conforme a Figura 3.5.

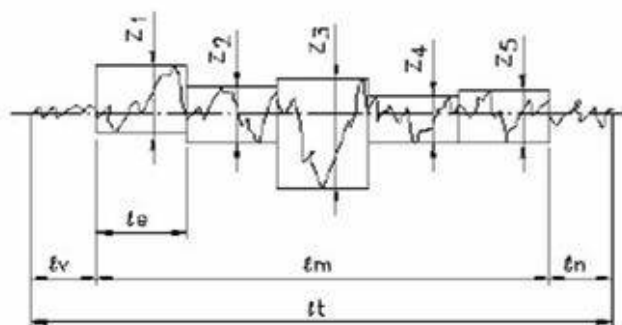


Figura 3.5 - Rugosidade parcial Z_i .^[2]

Existem vários parâmetros de rugosidade, mas os principais e mais utilizados são: R_a , R_z , R_{vk} e R_{pk} , apresentados a seguir.

▪Ra: RUGOSIDADE MÉDIA

É a média aritmética dos n valores absolutos dos desvios do perfil (Y_i) dentro do percurso de medição, l_m , sendo o seu valor expresso em micrometro (ABNT NBR 6405, 1988).

$$Ra = \frac{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n}{n} \quad (3-2)$$

Uma outra maneira de se medir Ra é considerando o perfil dentro do percurso de medição l_m . Ra, neste caso, corresponde aproximadamente à altura de um retângulo cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média do percurso l_m (ABNT . NBR 6405, 1988). A Figura 3.6 ilustra esta situação.

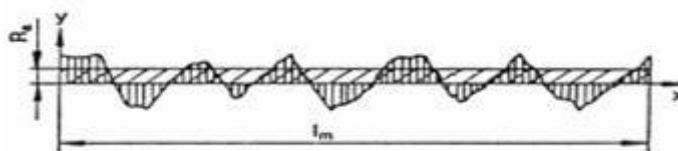


Figura 3.6 - Rugosidade média Ra. [2]

O parâmetro Ra é o parâmetro de medição mais comumente utilizado e aplicável à maioria dos processos de fabricação. Os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram substancialmente o seu valor. Por outro lado, o valor de Ra não define a forma das irregularidades do perfil, dessa forma pode-se ter um mesmo valor de Ra para superfícies originadas por processos diferentes.

▪Ry ou Rmáx: RUGOSIDADE MÁXIMA

Está definido como o maior valor das rugosidades parciais, Z_i , que se apresenta no percurso de medição, l_m . Observando a Figura 3.7, o valor de Z_3 , que está localizado no 3º cut-off, corresponde à rugosidade máxima Ry ou Rmáx.

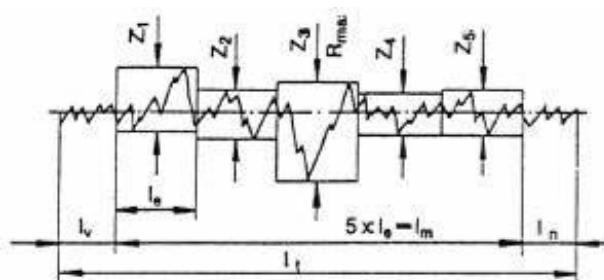


Figura 3.7 - Determinação de R_y .^[2]

O parâmetro R_y fornece informações complementares ao parâmetro R_a (que dilui o valor dos picos e vales). Entretanto, uma desvantagem deste parâmetro é que, individualmente, não apresenta informações suficientes a respeito da superfície, ou seja, não informa sobre a forma da superfície. Esta idéia está ilustrada na Figura 3.8, onde diversas formas de rugosidade podem ter o mesmo valor para R_y ou $R_{máx}$.



Figura 3.8 - Diversas condições com o mesmo valor de R_y .^[2]

•Rt: RUGOSIDADE TOTAL

É a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento l_m , independente dos valores da rugosidade parcial (Z_i). Na Figura 3.9 observa-se que o pico mais alto está no retângulo Z_1 , e que o vale mais profundo está no retângulo Z_3 . A distância entre estes dois pontos fornece o valor de R_t .

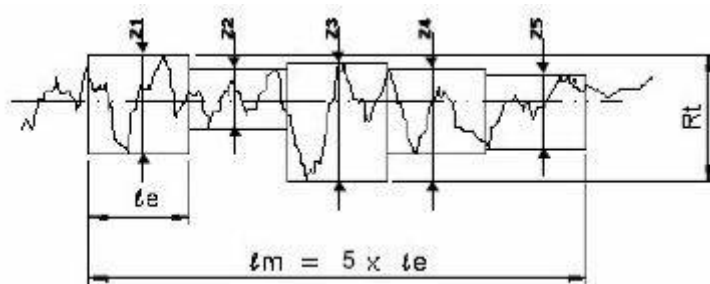


Figura 3.9 - Rugosidade R_t : distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo.^[2]

O parâmetro R_t é mais rígido na avaliação que R_y ou $R_{máx}$, pois considera todo o percurso de avaliação e não apenas o percurso de amostragem.

▪R_Z: RUGOSIDADE MÉDIA MÁXIMA

Corresponde à média aritmética dos 5 valores de rugosidade parcial, sendo que se define rugosidade parcial (Z_i) a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes dentro de um percurso de amostragem, cut-off. (Figura 3.10)

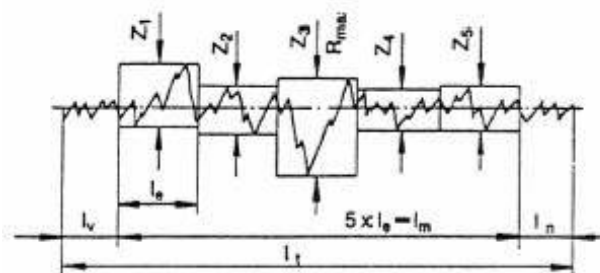


Figura 3.10 - Rugosidade R_Z.^[2]

Em algumas aplicações, essa consideração parcial dos pontos isolados não é aconselhável, pois um ponto isolado acentuado será considerado somente em 20% mediante a divisão de 1/5. Assim como R_{máx}, não possibilita informação alguma sobre a forma do perfil, bem como da distância entre as ranhuras.

$$R_Z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (3-3)$$

▪R_{pk} - ALTURA DOS PICOS e R_{vk} - PROFUNDIDADE DOS VALES.

Os parâmetros R_{pk} e R_{vk} são definidos com base no gráfico da função de densidades de picos e vales, também conhecido de “*Materials Rate Curve*” ou curva de fração de contato (também conhecida como curva de ABBOTT), indica a quantidade de material Mr em relação ao nível de corte, profundidade de perfil. Esta curva é apresentada na Figura 3.11.

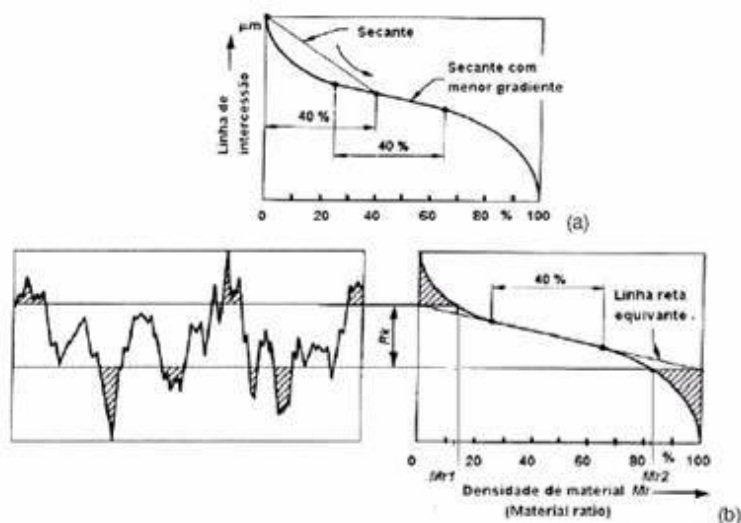


Figura 3.11 - Desenho esquemático de um perfil e sua curva “Materials Rate”, para determinação dos parâmetros de densidade de material Mr_1 e Mr_2 . [2]

Para se obter os índices R_{pk} e R_{vk} são necessários, determinar primeiramente o índice R_k . Isto se dá construindo uma reta na região central do *curva densidade de material* que contém 40% do perfil medido (Figura 3.11). Esta região é definida quando a linha secante da reta tem o menor gradiente. Isto é determinado movimentando a linha secante no intervalo $\Delta Mr = 40\%$ ao longo da curva, começando em $Mr = 0\%$.

Quando a linha apresenta o menor gradiente, estabelece-se então uma região central da curva de onde se desenha uma reta. Esta reta equivalente apresenta menor desvio a curva dada. O índice central R_k é obtido medindo a distância entre os pontos de interseção com a ordenada conforme apresentado na (Figura 3.11-b).

Os índices R_{pk} e R_{vk} (Figura 3.11-a), respectivamente, são as cotas verticais dos picos e vales presentes calculados como a altura do cateto vertical do triângulo-retângulo construído e possuindo a mesma área de picos ou de vales. Uma outra forma de se evitar picos e vales maiores que não são muito representativos do perfil é descartar do gráfico do perfil da superfície, de 0 a 2% e 98 a 100%.

A área A_1 medida do triângulo retângulo formado conforme desenho da Figura 3.12-b equivale o valor Mr_1 , e respectivamente para outra extremidade de A_2 se obtém Mr_2 como demonstrado na Figura 3.12-b. Mr é o parâmetro que descreve a densidade de

material em percentual. É dividido então em três partes distintas, descrevendo os picos (R_{pk}), os vales (R_{vk}) e a parte central do perfil de rugosidade (R_k).

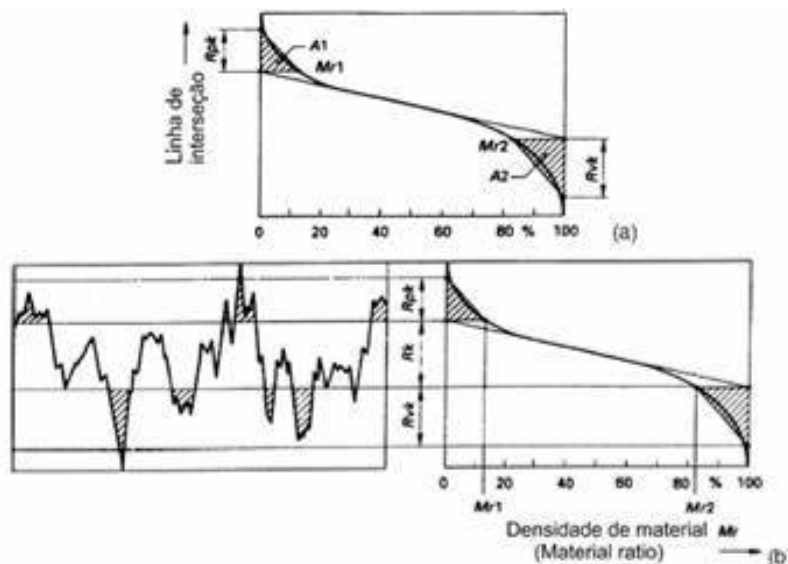


Figura 3.12 - Desenho esquemático de um perfil e sua curva “Material Rate (Mr)”, na determinação dos parâmetros R_{pk} e R_{vk} . [2]

3.1.1.4 Topografia

Topografia é uma função que possibilita a representação de uma superfície em 3D. A topografia fornece informações sobre a área da superfície. Características como picos topográficos ou quando a área é fechada em todas as direções espaciais, não podem ser descritas por seções verticais separadas (análise bidimensional).

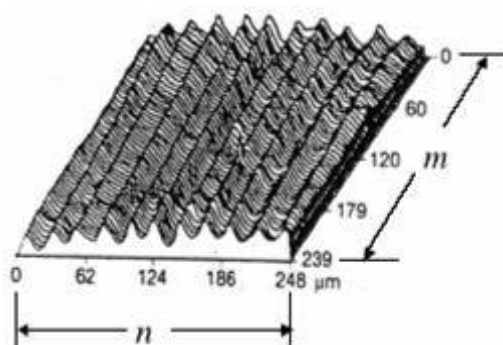


Figura 3.13 - Esquema de uma imagem tridimensional gerada após várias medidas bidimensionais. [2]

Neste caso, medidas 3D são mais apropriadas; elas são obtidas fazendo-se um grande número de medidas transversais na amostra e colocando uma próxima à outra, para gerar o perfil tridimensional, como mostra a Figura 3.13.

Portanto, a topografia permite a representação física de forma mais completa da superfície, pois, em seu estado natural, esta se apresenta em três dimensões.

3.1.1.5 Parâmetros de Topografia

Alguns parâmetros topográficos são equivalentes com a rugosidade. A diferença entre eles está no fato dos parâmetros de rugosidade medir dados referentes a um perfil, enquanto os parâmetros de topografia resultam da avaliação de uma área inteira ou de um conjunto de perfis interpolados. Dentre os principais parâmetros estão:

▪Sa: Topografia média

É um parâmetro de rugosidade universalmente reconhecido, e o mais utilizado. Corresponde à média aritmética dos valores absolutos do perfil. Para medições 2D ele é definido segundo DIN 4768, DIN EN ISO 4287, como citado anteriormente.

Para medições 3D o valor do parâmetro Ra por si só não tem significado, se não for especificado o cut-off. No seu cálculo não há distinção entre picos e vales, pois se utilizam valores absolutos do perfil. Assim, picos ou vales não típicos têm pouca influência no valor deste parâmetro. Finalmente este parâmetro não fornece informações sobre a forma das irregularidades ou do perfil.

▪St: Topografia total

Derivado de Rt, este parâmetro é utilizado para determinar a distância ou altura extrema entre o pico mais alto e o vale mais profundo da superfície. É um parâmetro que não fornece uma informação precisa e confiável a respeito do perfil da superfície, pois leva em conta apenas o vale mais profundo e o pico mais alto, ignorando os demais picos e vales.

▪Sp: Topografia de picos

O parâmetro Sp corresponde à distância da linha média ao extremo do pico mais alto.

▪Sv: Topografia de vales

É a distância da linha média da área ao extremo do vale mais profundo.

▪Sz: Topografia média

Este parâmetro é calculado para revelar os valores de altura extrema da superfície e é dado pela equação abaixo na qual, η_{si} e η_{vi} ($i = 1, 2, \dots, 5$) são os cinco picos mais altos e os cinco vales mais fundos, respectivamente.

$$s_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |\eta_{si}| + \sum_{i=1}^5 |\eta_{vi}| \right) \quad (3-4)$$

Como um único pico máximo e um único vale mais fundo não tem significado funcional em termos de desgaste superficial e de muitas outras aplicações funcionais, uma média dos cinco ápices maiores e dos cinco vales mais fundos é usada para descrever as propriedades extremas da topografia superficial.

3.1.2 O BRILHO

O brilho é uma propriedade intrínseca da superfície do material, representada pela quantidade de luz refletida diretamente da superfície do material. A demanda pela quantidade do brilho depende da aplicação do produto final, normalmente para aços inoxidáveis procura-se obter valores de alto brilho.

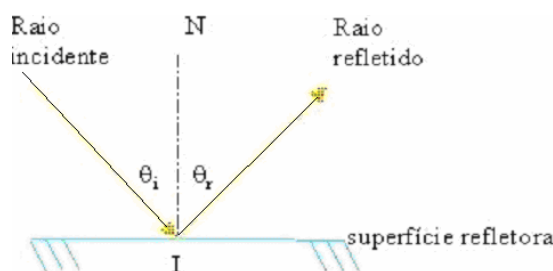


Figura 3.14 - Ângulo de incidência (θ_i) é igual ao ângulo de reflexão (θ_r).

O Alto brilho é obtido quando se têm superfícies lisas e altamente polidas; nesta situação toda a luz incidente reflete diretamente sobre a superfície refletora apresentando um ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão, ver Figura 3.14.

Para situação de superfície irregular como é apresentado na Figura 3.15, a regra descrita acima continua verdadeira ($\theta_i = \theta_r$), porém devido a variações da topografia o ângulo incidente não será o mesmo para todos os raios do feixe de luz, ocorrendo desta maneira um espalhamento da luz refletida, este espalhamento é conhecido como difusão ou dispersão da luz.



Figura 3.15 – Difusão da luz

Para caracterizar o brilho podem ser utilizadas três escalas distintas de intensidade de luz. Sua unidade de medida é conhecida como GU (“*Gloss Unit*”) e para cada faixa de intensidade de luz utiliza-se diferentes ângulos (θ_i) de medição (85° - baixo brilho, 60° - médio brilho e 20° - alto brilho).

3.1.3 FORMA

O termo da forma aplicado à tira laminada é um pouco ambíguo, ela pode se referir à geometria de seção transversal da tira ou a capacidade da tira se manter plana em uma superfície horizontal, ou planicidade. O primeiro caso é conhecido como “coroamento” e representa a diferença de espessura do centro a borda da tira. No segundo caso ela expressa à ausência de defeitos ou irregularidades superficiais que distanciam a superfície do material a de um plano perfeito.

O material pode apresentar irregularidades superficiais, como: abaulamentos, amassamentos, empenamentos, quebras das superfícies e até empenos. Todas estas irregularidades afetam qualidade do produto final. Os defeitos da forma podem conduzir a peça produzida a esforços indesejáveis e à distorções subsequentes de seus componentes.

3.2 O PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE PLANOS

Os processos de redução por laminação são críticos para produção de aços na siderurgia. Com a evolução contínua da tecnologia, automação/controle e sistemas de modelamento “*online*”, dentre outros, adquirem-se ferramentas vitais para fabricação de produtos de alta qualidade, possibilitando atendimento a demandas com critérios de produção cada vez mais rigorosos, com menor ocorrência de desvio de qualidade de produto.

Nesta seção serão apresentados dois temas que fazem parte do conteúdo desta dissertação: descrição do defeito das bandas de Lüders e estudo de transferência de rugosidade em processo de laminação de planos.

3.2.1 BANDA DE LÜDERS

Muitos metais quando deformados, entre eles os aços inox ferríticos, apresentam uma transição heterogênea do regime elástico para o plástico. Neste caso, ao atingir o limite de escoamento durante sua deformação é observada uma queda repentina da carga seguida de sua oscilação em torno de um valor aproximadamente constante, até que finalmente esta carga de deformação retorna ao seu crescimento normal, como apresentado na Figura 3.16-a.

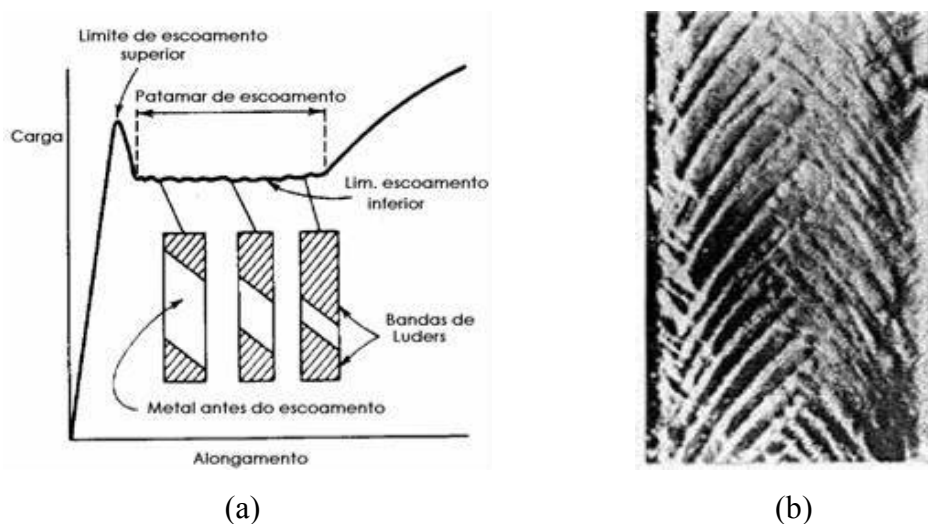


Figura 3.16 – (a) Gráfico carga x alongamento apresentando patamar de escoamento ^[3], (b) imagem da superfície do material deformado apresentando as bandas de Lüders. ^[4]

A deformação correspondente à esse intervalo de carga aproximadamente constante é denominada “patamar de escoamento”. Esta deformação é heterogênea e caracteriza-se pela propagação de bandas ao longo do metal, normalmente inclinadas 45° em relação à direção de aplicação da carga. (Figura 3.16-b)

A ocorrência destas bandas, denominadas “Bandas de Luders”, ou linhas de distensão, esta associada à presença de intersticiais, como átomos de carbono e nitrogênio, e pequenas impurezas que reunidos em torno das deslocações agem no sentido de imobilizá-las, sendo necessário um aumento de tensão para liberá-las^[4].

Este aumento de tensão localizado faz com que a deformação seja diferente em diferentes regiões do metal, provocando as bandas. Estas bandas são irregularidades na superfície que dá ao material uma aparência “fosca”.

O comprimento do patamar de escoamento é função do tipo de aço e das condições de tratamento térmico ao qual o metal foi submetido, na Figura 3.17 apresenta um exemplo para o aço tipo AISI 430^[3]. Aços austeníticos, cujas deslocações estão dissociadas e aços ferríticos estabilizados como aço 439, onde não ocorre C e N em solução sólida intersticial e sim na forma de carbo-nitretos, não apresentam bandas de Lüders.

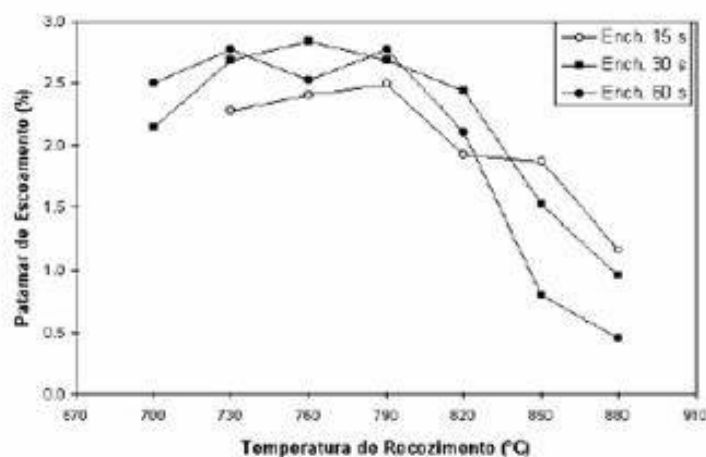


Figura 3.17 - Gráfico do patamar de escoamento pela temperatura de recozimento.^[3]

Para evitar tais irregularidades é necessário aplicar ao material uma deformação equivalente a metade do patamar de escoamento^[4], causando desta maneira formação

das milhares de bandas de Lüders sob os cilindros, as quais, mesmo crescendo em processos de deformação posterior, não serão visíveis.

3.2.2 TRANSFERÊNCIA DE RUGOSIDADE NA LAMINAÇÃO

Vários autores estudaram a importância da rugosidade superficial da tira para as diferentes aplicações.

KASPER^[5] por exemplo, descreve em seu trabalho que a influencia da rugosidade da superfície do metal base diminui com aumento da espessura da camada de tinta aplicada em partes automotivas. Afirma que o brilho aparente da superfície dos painéis automotivos pintados melhoram com o aumento da quantidade de picos na superfície e sugere faixa ideal de rugosidade para esta aplicação de 0,5 a 2,4 μ m Ra.

Assim, cada aplicação exige uma diferente condição de rugosidade superficial. Para atingir os melhores resultados é então necessário dominar processo de transferência de rugosidade do cilindro para tira, necessários à confecção do produto solicitado. Neste contexto são apresentados alguns estudos de transferência de rugosidade durante a laminação.

BUSCH^[4] estudou a transferência de rugosidade durante a laminação utilizando aço baixo carbono microligado e aço baixo carbono em cilindros texturizados de duas diferentes maneiras: retificado por rebolo grosso e jateados (SBT).

Avaliando a Figura 3.18-a, constata-se que a transferência de rugosidade equivale a mecanismo de indentação, materiais com limite de resistência (R_e – na Figura 3.18-a) maior (mais duros), como material M, para mesma carga e velocidade de laminação, apresentaram menor taxa de transferência da rugosidade (R_{a_s}/R_{a_r}) do cilindro para tira, onde Ra é a rugosidade média.

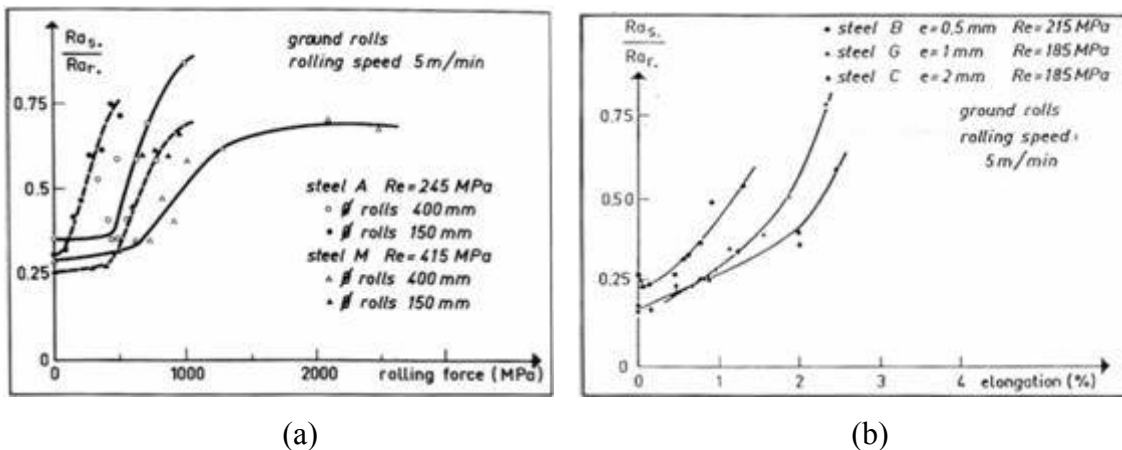


Figura 3.18 - Gráficos da transferência de rugosidade do cilindro para a tira^[4] (a) dois aços diferentes e dois diâmetros de cilindro e (b) diferentes espessuras.

Também é possível constatar analisando gráfico da Figura 3.18-a, que para manter a taxa de transferência de rugosidade, utilizando cilindros de maior diâmetro (400mm) é necessário aumentar a carga de laminação. Já na Figura 3.18-b são comparados os resultados da taxa de transferência da rugosidade com a espessura do material. Pode-se dizer que a taxa de transferência de rugosidade aumenta quando a espessura da tira diminui.

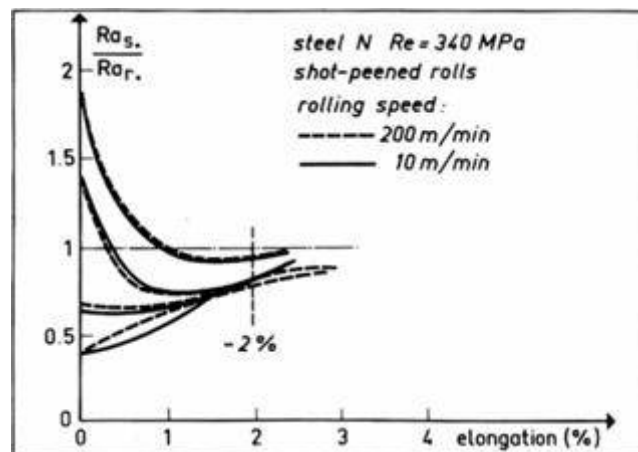


Figura 3.19 - Gráfico de taxa de transferência de rugosidade, para diferentes rugosidades iniciais em duas diferentes velocidades de laminação.^[4]

A rugosidade inicial também influencia muito na taxa de transferência da rugosidade, a Figura 3.19 esclarece este fenômeno. Ela mostra que independente da rugosidade inicial existe um dado valor de alongamento com o qual a rugosidade do cilindro é completamente transferida para a tira, isto é taxa de transferência igual a 1.

Para rugosidades iniciais superiores a do próprio cilindro, antes de atingir o patamar de alongamento citado onde a taxa de transferência é igual a 1, a laminação apaga a rugosidade inicial alcançando marcas de rugosidade menores até que a do próprio cilindro. Outra correlação mostrada é que a velocidade de laminação não interferiu na taxa de transferência de rugosidade para cilindros preparados por SBT.

É evidente que a deformação mais forçada (alongamento maior) apaga a memória da topografia da superfície anterior, porém como é mostrado na Figura 3.20, do trabalho de POIRE^[6], a laminação com vários passes utilizando o mesmo cilindro e alongamento inferior ao alongamento supra citado, reforça a textura do material. Isto é, aumenta sua rugosidade, ou segundo Poiré, diminui a área dos platôs (brancos na topografia).

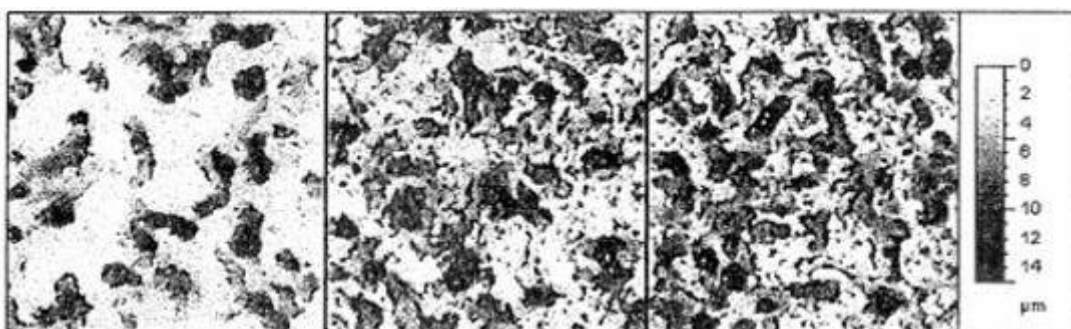


Figura 3.20 - Evolução da superfície após múltiplos passes de laminação com cilindros preparados por EDT.^[6]

Também é observado que é preciso fazer menos força para transferir textura de cilindro preparado por rebolo do que preparado por SBT, que apresenta textura isotrópica. De alguma forma a textura anisotrópica alinhada no sentido de laminação facilita sua transferência para a tira.

Os resultados de BUSCH^[4] comprovam que a transferência de rugosidade depende da carga de laminação e da tensão vertical na “mordida do cilindro”. Logo, pequeno diâmetro de cilindro para uma mesma carga de laminação implica em menor comprimento de contato e tensão vertical na mordida muito maior. Da mesma maneira, a diminuição das trações de laminação para um mesmo alongamento implica em aumento da carga.

Para finalizar, o autor sugere o parâmetro da pressão de laminação média relativa (PMR) que é a pressão média dividida pelo limite de escoamento, para comparar taxas de transferência de rugosidade obtidas em diferentes materiais, quando o cilindro for texturizado por retífica. (Figura 3.21)

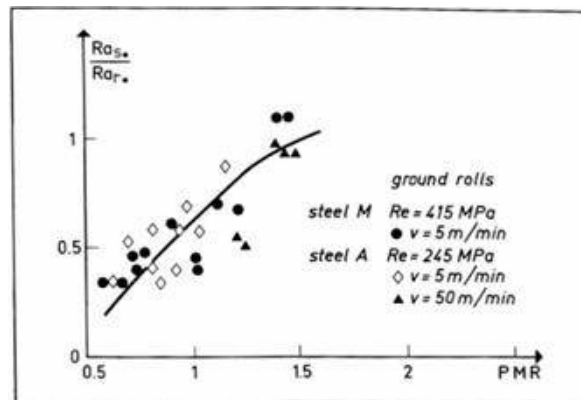


Figura 3.21 - Gráfico da taxa de transferência de rugosidade x pressão média relativa para cilindros preparados com rebolo grosso. ^[4]

3.3 AÇOS INOXIDÁVEIS

Em 1912 o inglês Harry Brearly ao realizar algumas análises metalográficas quando estudava um liga Fe-Cr (13%), observou que ela resistia ao ataque químico de vários reagentes utilizados em metalografia. Por este motivo ele identificou esta liga, chamando-a de “*stainless steel*” que significa “aço que não mancha”.

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas de ferro e cromo, com teor de cromo de 11% a 27%, e muito baixo teores de carbono e nitrogênio^[7]. Geralmente possui teor de carbono menor que 0,08% e cromo entre 13% e 18%, podendo ter pequenas adições de nióbio, titânio, níquel e molibdênio^[8]. Existem outros grupos de aços inoxidáveis como os austeníticos, martensíticos e duplex, porém estes não serão tratados neste trabalho.

Por causa da crescente demanda por aços inoxidáveis ferríticos, especificamente dos aços estabilizados, definiu-se utilizar o aço UNS43932 descrito na norma ASTM também conhecido simplesmente como 439. Este aço é estabilizado ao titânio e ao nióbio, e por consequência não apresenta elementos como carbono e nitrogênio dissolvidos em solução sólida.

Elementos de liga fortemente formadores de carbonetos ou carbo-nitretos são adicionados aos aços inoxidáveis para restringir a formação de $Cr_{23}(C,N)_6$ nos contornos de grão, que resultaria em corrosão intergranular ou sensitização. Este processo é chamado de estabilização^[9] e oferece ganhos na soldabilidade do material, capacidade de conformação a frio, bem como maior resistência à corrosão e à oxidação principalmente a altas temperaturas^[10].

Para se conseguir obter estabilização da liga e auferir os ganhos propostos algumas regras devem ser obedecidas, uma delas é a relação de estabilização (E) apresentada na equação abaixo que é calculada a partir das concentrações dos elementos:

$$E = \left[\frac{(2.\%Titânio + \%Niôbio)}{(\%Carbono + \%Nitrogênio)} \right] > 10 \quad (3-5)^{[10]}$$

Na Tabela 3.1 está representada a composição química deste aço, e é possível verificar a relação de estabilização. Em seguida, na Tabela 3.2 são mostrados valores típicos de algumas propriedades mecânicas e de microestrutura para a liga em questão.

Tabela 3.1 - Composição química aço biestabilizado 439

C(ppm)	Mn(%)	Si(%)	Cr(%)	Ni(%)	N(ppm)	Ti(%)	Nb(%)
200	0,3	0,3	17,0	0,25	200	0,13	0,17

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas e tamanho de grão aço biestabilizado 439.

Esp.(mm)	LE(MPa)	LR(MPa)	LE/LR	Along(%)	Dur.(HRb)	TG(ASTM)
1,5	247	440	0,56	30	72	6 a 8

A aplicação deste aço está voltada para sistema de exaustão de automóveis e tubos para usinas de açúcar, porém são também aplicados em tanques de lavar roupa, forno de microondas. Pode-se dizer que o aço ferrítico 439 é bastante versátil, apresenta propriedades finais em nível intermediário entre os austeníticos 304 e os ferríticos 430.

3.4 LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO (LE)

A laminação de encruamento (“*Temper Rolling*” ou “*Skin Pass*”) caracteriza-se por uma pequena redução a frio (inferior a 3%) que promove um encruamento superficial do metal. Ela acontece em estágio final de fabricação de produtos planos laminados, e é responsável pelo acabamento final, aspecto superficial e pela forma do material processado.

Esta etapa pode ser condicionada para atender às exigências de brilho e rugosidade solicitada pelo cliente e visa também melhorar a qualidade final do material. Apresenta os seguintes benefícios principais^[10,3]:

- 1) Eliminação do patamar de escoamento e defeito conhecido como as bandas de Lüders;
- 2) Acerto da forma;
- 3) Acerto do brilho;
- 4) Impressão da rugosidade desejada;
- 5) Aumento da resistência mecânica do material.

Existem variações de modelos de laminadores de encruamento, porém são mais utilizados os laminadores reversíveis contendo um par de cilindros (*duos*), com diâmetro superior a 600mm, não lubrificadas (a seco) como o apresentado na Figura 3.22.

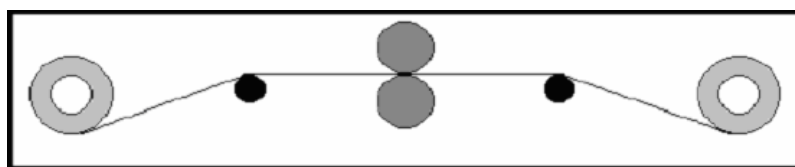


Figura 3.22 – Laminador de encruamento convencional “duo”^[3]

Para materiais ultra-finos é empregado laminadores com dois pares de cilindros (*quadruos*), com diâmetro em torno de 450mm, que podem utilizar óleo para lubrificação dos mesmos durante laminação. (Figura 3.23)

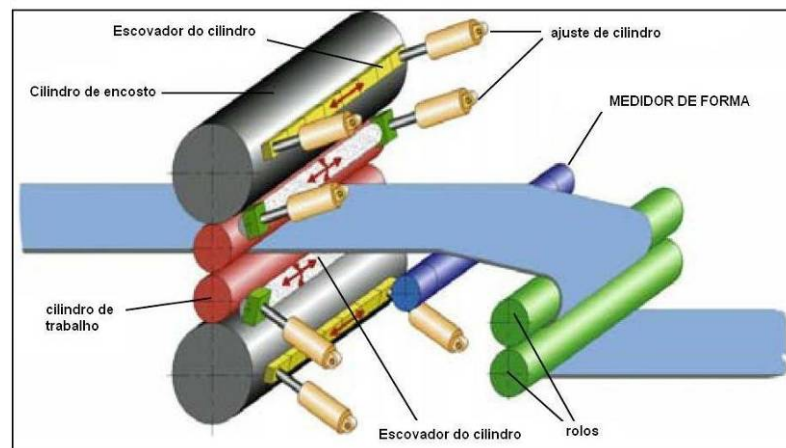


Figura 3.23 - Laminador de encruamento “quadruo”^[11].

Existem outras configurações tais como laminadores “tandem” com duas cadeiras, ou ligados em linha ao processo final de recozimento e decapagem dos metais (*inline*). Bem como sistemas mais modernos de laminação que oferecem possibilidade de aplicar alta tração na tira (“*High-Tension*”) e ou realizar a leitura e acerto automático da forma do material, conhecidos como (“*Shapemeter*”) e (“*work roll bending*”) respectivamente.

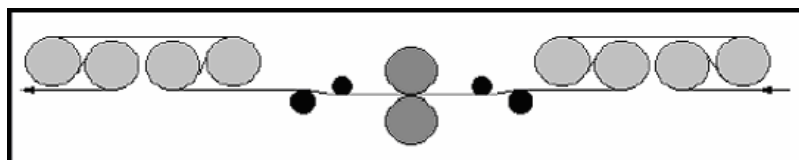


Figura 3.24 - Laminador de encruamento com “*work roll bending*”^[3]

O sistema de “*work roll bending*” é mostrado na Figura 3.24, composto de dois pares de cilindros posicionados anterior e posterior a cadeia de laminação. Este conjunto possibilita, além de alcançar maiores forças de tração, acertar a forma final da tira e colocar o laminador integrado direto no fluxo de produção (*inline*).

A seguir, serão abordados as relações da laminação de encruamento com o brilho e a forma da tira, serão apresentados também alguns conceitos sobre modelamento matemático da LE e ,finalmente, sobre a aplicação prática do seu modelamento por elementos finitos.

3.4.1 O BRILHO

É possível controlar o brilho final do produto ajustando parâmetros de laminação como carga de laminação e rugosidade do cilindro. Na laminação de encruamento a seco, quanto maior o diâmetro dos cilindros, melhor é o brilho do material produzido [3]. Isto está de acordo com o fato de que com cilindros maiores se obtém maiores forças de laminação promovendo melhor “transferência de rugosidade” (Figura 3.25-a).

O gráfico da Figura 3.25-b mostra claramente a forte dependência do acabamento final do cilindro de laminação com o brilho. Utilizando rebolo com tamanho de grão abrasivo menor (#1000), é possível atingir valores de brilho até 30% maiores. Também neste mesmo gráfico fica claro o efeito de um segundo passe de laminação no brilho.

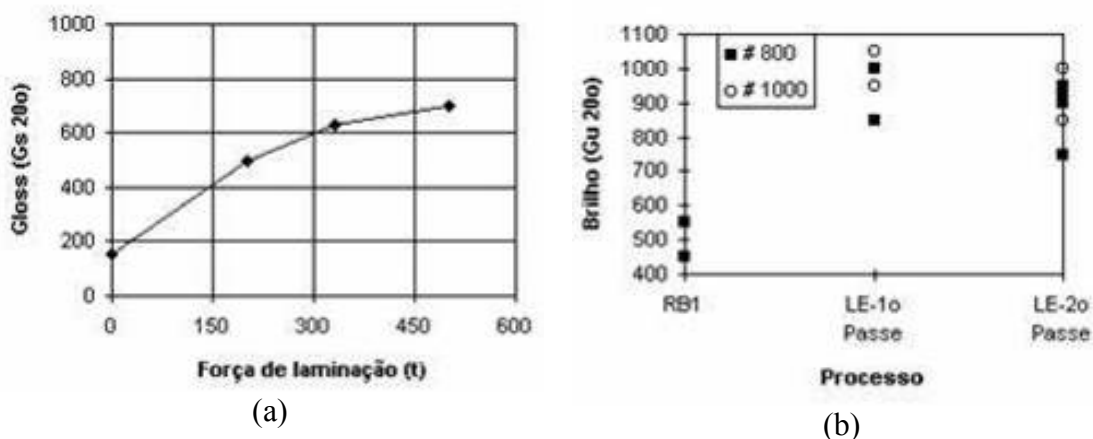


Figura 3.25 – Evolução do brilho do material (a) com a força de laminação (b) com quantidade de passes de LE e do acabamento do cilindro.[3]

Ao contrário da laminação a seco, na laminação a úmido, quanto maior o cilindro de trabalho pior o brilho da tira, pois quanto maior o cilindro, maior o filme de óleo formado sob o arco de contato dificultando a transferência do acabamento dos cilindros para a tira.

3.4.2 A FORMA DA TIRA

Nos laminadores convencionais existem alguns recursos para realizar o controle e correção da forma da tira são eles: o coroamento dos cilindros, balanceamento dos cilindros e a força de laminação. O coroamento é previamente determinado através da

experiência operacional acumulada, podendo ser tanto positivo como negativo e irá depender da espessura do material laminado. Durante a laminação, o operador ajusta os cilindros aplicando maior ou menor carga nos lados de operação e acionamento.

O operador também ajusta a força de laminação de modo se obter a planicidade desejada. Neste modo de operação o alongamento obtido é uma consequência e não um objetivo. Portanto a obtenção de forma é conflitante à obtenção de alongamento. No laminador convencional são necessários dois passes, um para garantir o alongamento e outro para acertar a forma.

Outros recursos para melhoria da forma que podem ser utilizados são: o aumento das trações e “*work roll bending*”. O aumento das trações provoca efeito semelhante a uma desempenadeira por tração. Já o uso de “*work roll bending*” permite o acerto da forma sem alterar a força de laminação. O sistema “*shapemeter*” possibilita verificar a forma “*online*”, isto é instantaneamente no processo.

3.4.3 MODELAMENTO MATEMÁTICO DA LE

A laminação de encruamento é a etapa final do processo de fabricação dos aços, seu mal resultado compromete todas as outras etapas anteriores. Para garantir qualidade final, faz-se necessário um controle preciso de alongamento da tira. O cálculo deste alongamento está baseado em modelo matemático para predição da força de laminação, torques, velocidade da linha e trações, e comportamento do cilindro de laminação.

Os modelos matemáticos de laminação atuais^[4,10,11,12] mais precisos, consideram mecanismos de laminação com deformação dos cilindros. Nestes modelos está previsto a existência de uma terceira zona elástica interna (azul) onde ocorre a deformação do cilindro, entre as zonas de compressão e recuperação elásticas (lilás), mostrado na Figura 3.26.

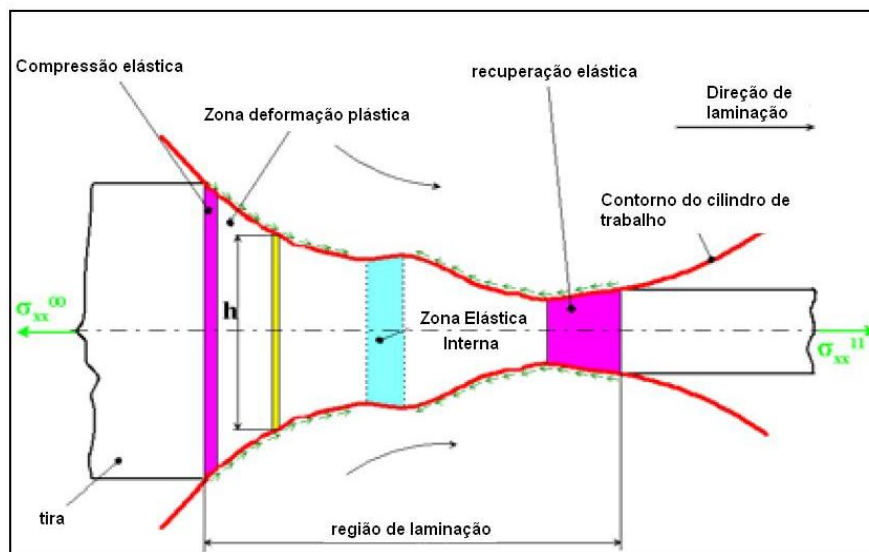


Figura 3.26 - Visão de zonas de deformação durante laminação. ^[11]

Devida à alta relação arco de contato/espessura, à baixa redução, ao alto valor do coeficiente de atrito, ao alto achatamento elástico do cilindro da laminação de encruamento, não é possível utilizar os modelos de laminação convencionais para cálculos da carga e torque na laminação de encruamento ^[13, 14].

Ou seja, para processos de laminação de encruamento as condições mecânicas de distribuição de força e cargas aplicadas sobre os cilindros são significativamente diferentes das condições usuais para as demais laminações.

Também, modelos simplistas como em ROBERTS ^[10], baseados em arcos circulares dos rolos sem consideração da sua deformação, não mostram bons resultados. Os trabalhos de KRIMPELSTÄTER ^[15] e JORTNER ^[16] apresentam significativo avanço pois descrevem melhor as influências e funções das deformações radiais do cilindro de trabalho. Ou como FLECK and JOHNSON ^[17] que publicaram teoria mais apropriada para laminação de tiras finas e folhas ^[18,19] que desconsidera tais simplificações.

Para a laminação plana, o modelo proposto por GRECO ^[20] elimina as deficiências dos modelos clássicos anteriores. Ele propõe fator de correção para cálculo da carga de laminação (Q), que é determinado a partir da análise de dois tipos de deformação. Este fator corrige as deficiências que ocorrem nas condições extremas de laminação como na

laminação de chapas grossas ou de folhas finas, onde a razão arco de contato pela espessura da tira excede a 1.

O estudo sistemático de parâmetros e métodos de regressão permite obter curvas características para laminação que servem como entrada de controle e automação do processo. Modelos matemáticos tanto “*online*” quanto “*offline*” quando ajustados e calibrados adequadamente com dados reais, são essenciais para ajuste do laminador, e aumento do patamar de qualidade do material laminado.

Os sistemas de modelamento analítico linear, como o de Robert ou Greco, atendem muito bem as macro-correlações dos parâmetros de laminação. Porém, para compreensão de sistemas não lineares, avaliação de detalhes do processo ou para verificar e ajustar modelos semi-analíticos, são necessárias aproximações numéricas sofisticadas baseadas em modelamento de elementos finitos.

No processo de laminação de encruamento^[21,22] o efeito da transferência de rugosidade superficial do cilindro para a tira é utilizado para conseguir ajustes com sua aplicação final. O trabalho de KAINZ^[11] apresenta os resultados de uma aplicação real da transferência de topografia superficial do cilindro para tira.

Este autor avalia duas condições de laminação de encruamento: a seco e com óleo, utilizando cilindro texturizado por “*Electron Beam Texture (EBT)*” e realizando simulação em software comercial ABAQUS EXPLICIT^[23]. É apresentado como vantagem do modelamento por elementos finitos o conhecimento dos detalhes da laminação como avaliação dos volumes e comportamento mecânico passo a passo das cavidades da textura EBT (explicadas na seção 3.5) preenchidas pelo lubrificante.

Tal investigação fornece importantes informações a respeito das tensões, velocidades e campos de deslocamentos internos à “mordida” do cilindro, durante laminação. Da mesma forma, o contorno do arco não circular do cilindro é calculado^[14,15] assim como as pressões de contato, atrito, distribuição de carga e avaliação do escoamento plástico

da tira. As zonas de deformação internas na “mordida” são também identificadas automaticamente no modelo.

O resultado da simulação por elementos finitos (Figura 3.27) apresenta o mecanismo básico dos processos de conformação elasto-plastico-3D, como uma combinação de mecanismos de indentação e fenômenos de extrusão inversa. No mesmo ponto, o resultado ilustra e esclarece o processo de transferência de rugosidade e sua dependência com as propriedades do material e as condições de laminação.

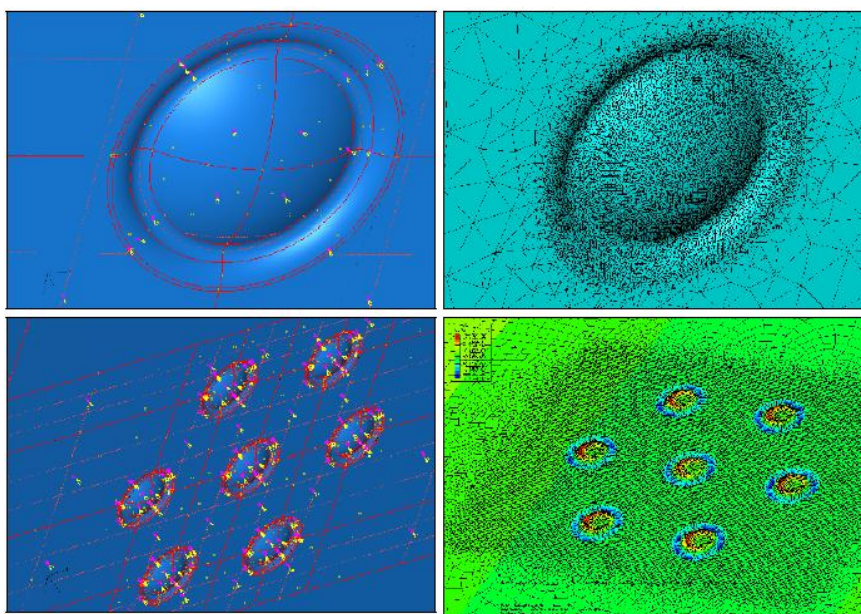


Figura 3.27 - Resultado do modelamento por elementos finitos da laminação com cilindros preparados por EBT. À esquerda em azul, superfície do cilindro e a direita em verde o resultado da tira após laminação. ^[11]

O trabalho confirma a possibilidade de modelamento por elementos finitos para estudo da transferência de rugosidade do cilindro preparado por EBT para a tira de aço. Extrapolas as condições de laminação como na utilização de lubrificantes e apresenta detalhes de resultados importantes que não poderiam ser obtidos por modelamento convencional.

3.5 ACABAMENTO ROLLED-ON

No processo de laminação utilizando cilindro “texturizado”, conhecido como *Rolled-On* (RO), o cilindro transfere para a tira sua textura superficial e rugosidade pré-definidas. Já que a textura do material é obtida durante a laminação, o produto final apresenta “*backside*”, isto é, mesma textura superficial em ambos os lados da tira.

Utilizando cilindros com rugosidades diferentes pode-se transferir uma “textura superficial” diferenciada para a tira. Por exemplo, texturas com vales ou microcavidades podem ser impressas na tira para reter o lubrificante, diminuindo conseqüentemente o atrito entre a peça e a ferramenta durante a estampagem, possibilitando assim uma estampagem mais profunda.

Existem várias técnicas para texturização de cilindros de laminação^[11], cada uma com sua particularidade, apresentando diferentes resultados: distribuições de cavidades ou vales, faixas de rugosidade, densidades de picos, homogeneidade da tira e reprodutibilidade; elas foram comparadas em vários artigos^[24,25,26]. Serão mostradas na Figura 3.28 algumas técnicas para texturização de cilindros de laminação.

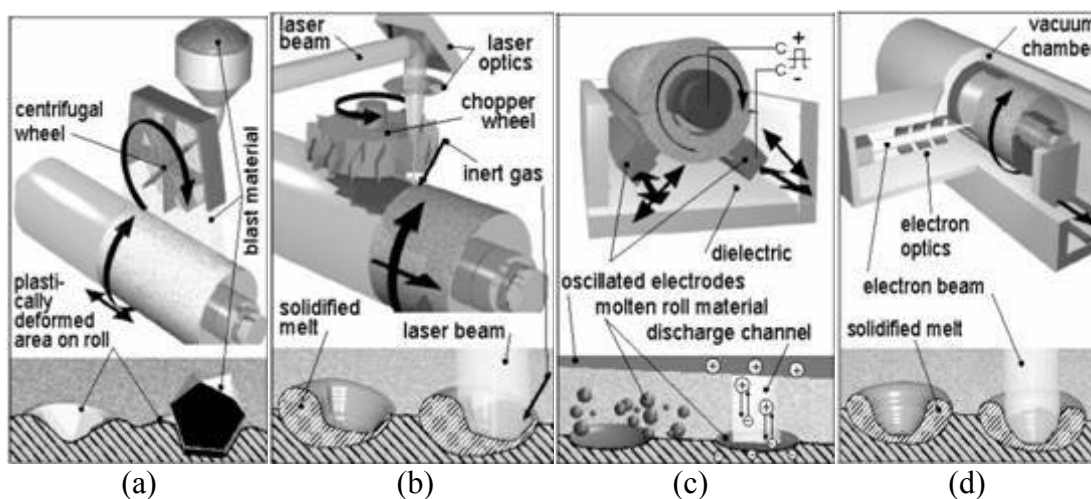


Figura 3.28 – Técnicas de texturização de cilindros de laminação^[11]:
(a) SBT, (b) Laser, (c) EDT e (d) EBT.

PORET E PONTET^[6] produziram acabamento RO utilizando preparação de cilindro por EDT e laminando tanto em laminadores do tipo Sendzimir quanto em laminadores de encruamento.

Resultados dos autores mostraram que utilizando Sendzimir foi possível em um único passe de laminação transferir até 80% da rugosidade do cilindro em aços inoxidáveis ferríticos, enquanto que com laminador de encruamento, a taxa de transferência de rugosidade caía para 40 a 50%.

As Figura 3.29 e Figura 3.30 mostram topografias da superfícies de materiais laminados nos laminadores Sendzimir e de encruamento respectivamente. Na topografia resultante da laminação de encruamento (Figura 3.30) pode-se observar a formação de um platô médio, que é responsável pelo aumento do brilho da superfície do material.

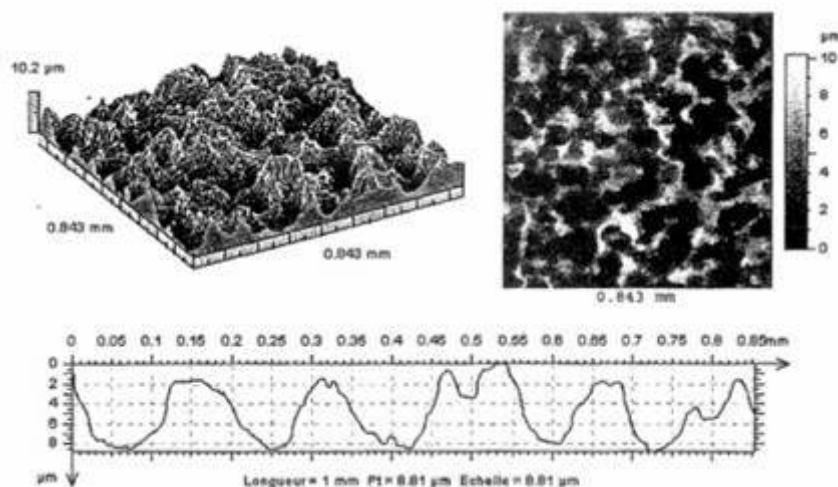


Figura 3.29 - Topografia da superfície após laminação no laminador Sendzimir.^[6]

O modelamento de transferência de rugosidade da superfície do cilindro para tira durante a laminação de encruamento é avaliado^[10,12,15] e apresenta boa aproximação ao caso real. Existem programas comerciais como “FE-PACKAGE ABAQUS”^[23] que simulam com precisão o comportamento de transferência de rugosidade em cilindros texturizados por EBT.

BÜNTEN^[21] realizou o modelamento por elementos finitos da laminação de encruamento avaliando a transferência da rugosidade. A simulação da laminação foi feita para aço galvanizado utilizando ou não lubrificação durante processo. O resultado demonstra claramente o mecanismo básico de transferência elasto-plástico 3D, conhecido como combinação de processos de penetração e fenômenos de extrusão reversa.

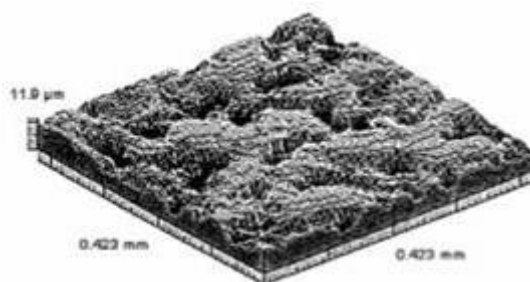


Figura 3.30 - Topografia da superfície da tira após laminação no laminador de encruamento. ^[6]

O segredo para uma boa aplicação do passe de encruamento durante a laminação é a promoção de uma boa transferência da topografia e rugosidade da superfície do cilindro para a tira do material. A sua superfície interfere diretamente na aplicação fim como: estampagem, soldagem, pintura ou aplicação de revestimento. Os artigos^[4,11,21] discutem o efeito de transferência de topografia durante a laminação, utilizando cilindros texturizados.

WEIDERMAN^[27] e ZEIGER^[28] ponderam que a superfície que apresenta topografia com baixa área de rolamento (“*bearing*”) e alta densidade de picos contribui para uma boa estampabilidade. BUTLER and POPE^[29] afirmam que superfícies ideais para processos de estampagem possuem rugosidades de 1,4 a 2 μm Ra e densidade de picos de 55 a 80 picos/micropolegadas.

- *Shot Blast Texturing* (SBT)^[25]: Esferas de granalha são atiradas por uma roda centrifugadora contra a superfície do cilindro de laminação. O impacto destas esferas inflige uma deformação local, provocando aparecimento de microcavidades. Controlando a força, o diâmetro e a quantidade das esferas atiradas, pode-se conseguir a rugosidade final objetivada (Figura 3.28-a).

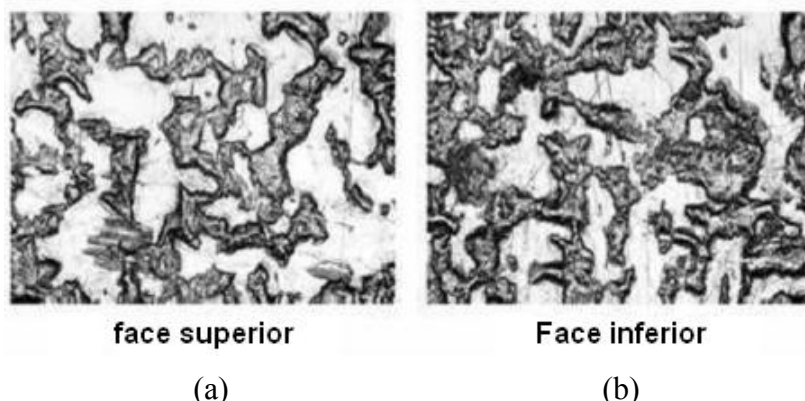


Figura 3.31 – Microestrutura das duas faces da superfície da tira laminada com cilindro texturizado por SBT. [26]

O resultado da textura superficial da tira é mostrado na Figura 3.31 e os valores de rugosidade obtidos são apresentados na Tabela 3.3. Avaliando os valores de rugosidade pode-se afirmar que apresentaram grande variação, a distribuição de textura na superfície da tira foi esparsa e desigual e a transferência de rugosidade foi menor que 70%. [26]

Tabela 3.3 - Resultado da medida de rugosidade (Ra) e densidade de picos (*peak counts*-PC) na tira laminada com cilindro texturizado por SBT (rugosidade do cilindro igual a 2 μm Ra e 128 PC).

Número da bobina	Superfície superior		Superfície inferior	
	Ra (μm)	PC	Ra (μm)	PC
Nº2	0,782	58	1,104	63
Nº7	0,938	58	1,089	49

- Laser Bean Texturing (LBT) [25,30]: Um feixe de laser é focado na superfície do cilindro, este feixe passa por uma roda inversora que interrompe sua passagem intermitentemente. Em cada ponto iluminado ocorre o derretimento localizado da superfície do material formando microcavidades. A velocidade da roda inversora e o diâmetro do feixe a laser é que definem a rugosidade final da superfície do cilindro. (Figura 3.28-b).

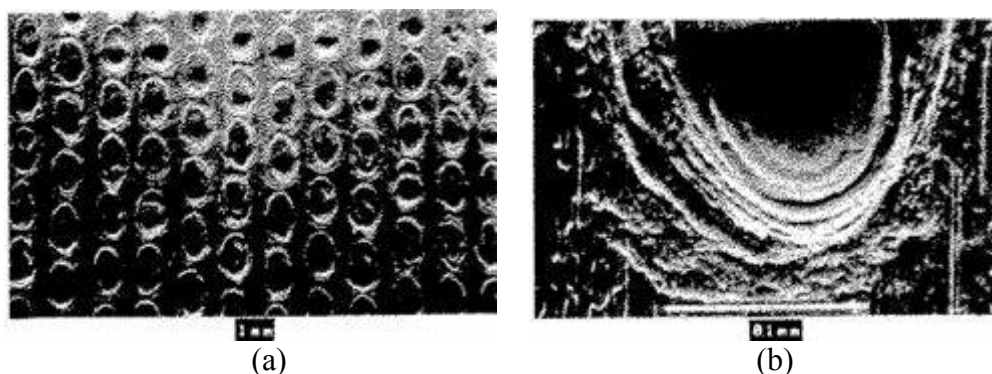


Figura 3.32 - Microestrutura da superfície da tira laminada com cilindro texturizado por LBT em duas ampliações. ^[30]

O resultado da textura superficial da tira laminada com cilindro texturizado por LBT é mostrado na Figura 3.32 à direita, a ampliação da cratera formada. Avaliando a transferência de rugosidade neste processo é observado modelo da cratera na Figura 3.33. Pode-se constatar que a taxa de transferência de rugosidade é baixa, em torno de 50% e só é possível transferir 25% da altura do pico formado, ficando achatado na sua extremidade superior.

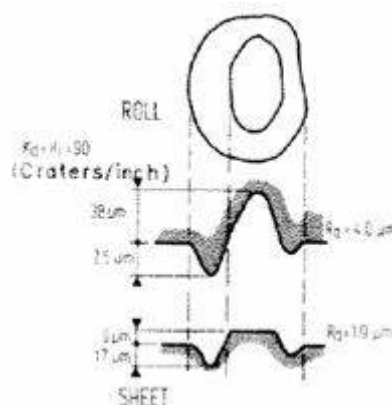


Figura 3.33 - Modelo da micro-cavidade formada pelo feixe de laser no cilindro, depois laminado na tira. ^[30]

A vantagem deste processo é sua elevada homogeneidade superficial. Fazendo programações em um sistema microprocessado é possível obter qualquer padrão de textura, inclusive desenhos. Novos sistemas de laser conseguem alterar formatos e dimensões das crateras formadas melhorando a taxa de transferência da rugosidade do cilindro.

- Electrical Discharge Texturing (EDT)^[6,24]: Eletrodos são posicionados axialmente a superfície do cilindro, que fica imerso em um meio dielétrico. Descargas elétricas são induzidas entre o eletrodo (ânodo) e cilindro (catodo), provocando eletro-erosão em sua superfície. A combinação da corrente, tensão, frequência de oscilação definem a condição final do cilindro texturizado (Figura 3.28-c).

Tabela 3.4 - Rugosidade Ra medida em várias posições ao longo do comprimento dos cilindros texturizados por EDT antes e após a laminação de 1750t de aço^[26].

Número bobina	Status online	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5	Valor médio	Fator perda
Cilindro laminação superior	pré	2,031	2,128	2,238	2,224	2	2,12	
	pós	1,76	1,74	1,85	1,71	1,65	1,74	18%
Cilindro laminação inferior	pré	2,036	2,195	2,205	2,186	2,056	2,14	
	pós	1,66	1,97	1,79	1,82	1,76	1,80	15,7%

O resultado da textura superficial da tira laminada com cilindro texturizado por EDT é mostrado na Figura 3.34. Verifica-se que a taxa de transferência de rugosidade é alta, em torno de 80% e a textura é bem homogênea e repetitiva. De acordo com a Tabela 3.4, após laminação de 1750 toneladas de material, ocorreu somente uma perda de rugosidade do cilindro em torno de 18%.

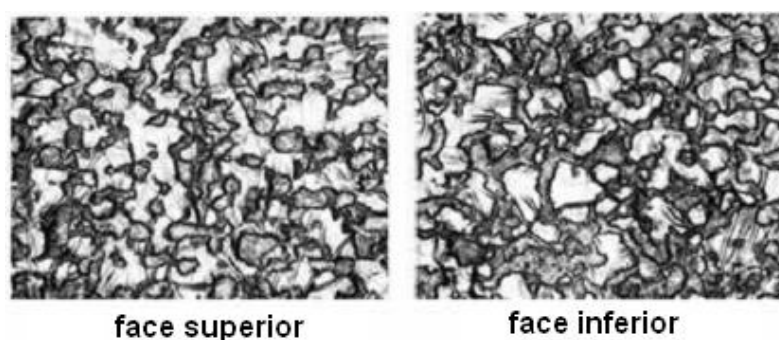


Figura 3.34 - Microestrutura da superfície das duas faces da tira laminada com cilindro texturizado por EDT.^[26]

O sistema apresenta maior homogeneidade quando aplicado em grandes áreas e boa repetibilidade se comparado com processo SBT. É possível alterar parâmetros de processamento como corrente/tensão dos eletrodos, ou até mesmo alterar o tipo de

material do eletrodo para se obter a combinação rugosidade e densidade de picos desejados.

- Electron Beam Texturing (EBT)^[22]: Um feixe de elétrons de alta energia é utilizado para derreter a superfície do cilindro, formando microcavidades. A frequência de pulsação, a intensidade do feixe de elétrons, o deslocamento e rotação do cilindro são parâmetros utilizados para definição da rugosidade final do mesmo. (Figura 3.28-d).

A Figura 3.35 apresenta o padrão da textura EBT sobre cilindro de laminação. Seu padrão parece com a cavidade formada pelo processo LBT, porém mais irregular. É possível com este sistema obter padrões de cavidades seqüenciadas, semi - aleatórios ou completamente aleatórios^[31,32].



Figura 3.35 - Microestrutura da superfície do cilindro texturizado por EBT.^[11]

- Ink Jet Texturing (IJT)^[33]: Um microprocessador ligado a um cabeçote de uma impressora de jato de tinta é utilizado para imprimir na superfície do cilindro uma máscara de tinta com a textura escolhida. Posteriormente este cilindro é submetido ao ataque químico que desgasta a superfície que não foi protegida pela tinta.

A vantagem deste processo é o menor custo do equipamento. Assim como no processo a laser, se o sistema de jateamento estiver acoplado em uma unidade de movimentação micro-processada, é possível obter qualquer padrão de textura desejada.

- **Topocrom**^[34]: É a tecnologia de texturização de cilindro que utiliza campo elétrico entre o eletrodo de trabalho e a superfície do cilindro de laminação, tal qual como no processo EDT. Porém neste caso os íons do eletrólito de cromo são depositados por redução eletrolítica na superfície do cilindro de laminação. Ajustando os parâmetros de eletro deposição é possível controlar o tamanho e a quantidade de material depositado.

A faixa da rugosidade da textura obtida pelo método Topocrom vai de 0,2 a 20 μ m Ra, apresenta uma excelente uniformidade e repetibilidade. A precisão da rugosidade controlada é de $\pm 0.1\mu$ m e a taxa de transferência máxima é elevada. É uma técnica que oferece textura fina, que esta sendo muito demandada pela industria automobilística^[34,35].

Na Figura 3.36 é possível observar a estrutura superficial da tira laminada com cilindro texturizado por Topocrom. A textura apresentada é isotrópica e bem homogênea, com distribuição contínua das cavidades, porém aleatórias. A tabela 7 apresenta valores de Ra/PC são sempre os mesmos tanto na superfície superior quanto inferior, valores de Ra mostraram-se dentro da faixa de 0,9 a 1,2 μ m Ra e PC equivalente a 90.

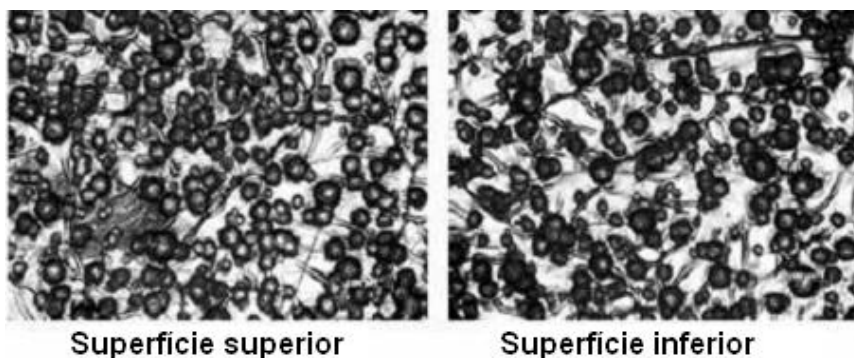


Figura 3.36 - Microestrutura da superfície das duas faces da tira laminada com cilindro texturizado por TOPOCROM.^[26]

A vantagem principal desta técnica é a alta vida dos cilindros. A Tabela 3.5 apresenta variação da rugosidade após 12 laminações (12 “*schedules*”) total de 1.081t laminadas, um ínfimo decréscimo no valor da rugosidade final foi observado. O revestimento do cilindro com cromo afere maior dureza a sua superfície, o que diminui a formação de defeitos superficiais.

Tabela 3.5 - Resultado medida de rugosidade (Ra) e densidade de picos (*peak counts*-PC) tira laminada com cilindro texturizado por Topocrom, e após 12 bobinas^[26].

Status	Superfície de cima		Superfície de baixo	
	Ra (μm)	PC	Ra (μm)	PC
Após 1 bobina	1,013	89	1,009	88
Após 12 bobinas	1,010	93	0,985	94

Foram apresentadas acima diferentes técnicas para preparar à superfície do cilindro afim de se obter o acabamento final desejado. No presente trabalho, os cilindros serão texturizados por retífica utilizando rebolo grosso A36.

Durante a revisão bibliográfica foi encontrada uma patente de SAMBUCO^[36] que utilizou esta mesma metodologia para texturização de tiras de alumínio durante a laminação de encruamento. Seu trabalho utilizou rebolo grosso A36 e parâmetros de retífica de cilindros definidos para obtenção de altos valores de rugosidade em torno de: 1,7 a 2,3 μm Ra, 11 a 14 μm Rz e 14 a 18 μm Rt. É também apresentado, no mesmo trabalho, um segundo acabamento fino obtido por jateamento de areia sobre superfície do cilindro preparada com rugosidade inferior ($\sim 0,3\mu\text{m}$ Ra).

Para o caso de alta rugosidade a patente sugere dois passes finais, um de semi-acabamento: 35rpm para rotação do cilindro, 400 a 500rpm para rotação do rebolo e velocidade de deslocamento da mesa igual a 1,32 m/min; e passe final de acabamento com: 100rpm para rotação do cilindro, 50rpm para rotação do rebolo e velocidade de deslocamento da mesa igual a 1,32m/min e amperagem do motor de rotação cilindro de 30 a 40 A.

4 PRODUTO ALVO

Neste capítulo é apresentado a caracterização do acabamento lixado (produto alvo).

O acabamento RO a ser desenvolvido para o aço 439, na espessura de 1,5mm deverá apresentar aspecto visual próximo, ou seja, similar ao acabamento lixado do aço 304 com 0,8mm de espessura, também produzido pela ArcelorMittal Inox Brasil e utilizado principalmente para revestimento interno de elevadores.

Para caracterização superficial utilizaram-se equipamentos de perfilometria (Hommel Werke - Modelo T8000), microscopia óptica (Leica - DMRM) e eletrônica de varredura (FEI - XL30), bem como utilização de medidores de brilho (Byk Gardner - Mirror-Tri-Gloss) e de cor (Byk Gardner - Spectro-Guide). Todos os parâmetros de cor e brilho estão descritos em norma específica ASTM E313. Para caracterização da intensidade de amarelamento da superfície utilizou-se o índice de amarelamento (YE) fornecido pelo colorímetro.

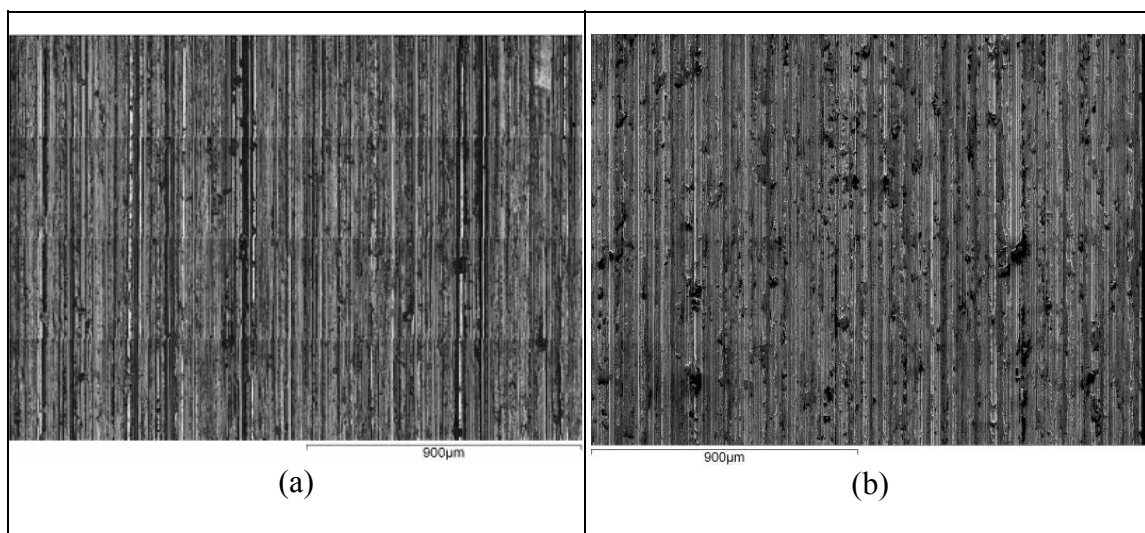


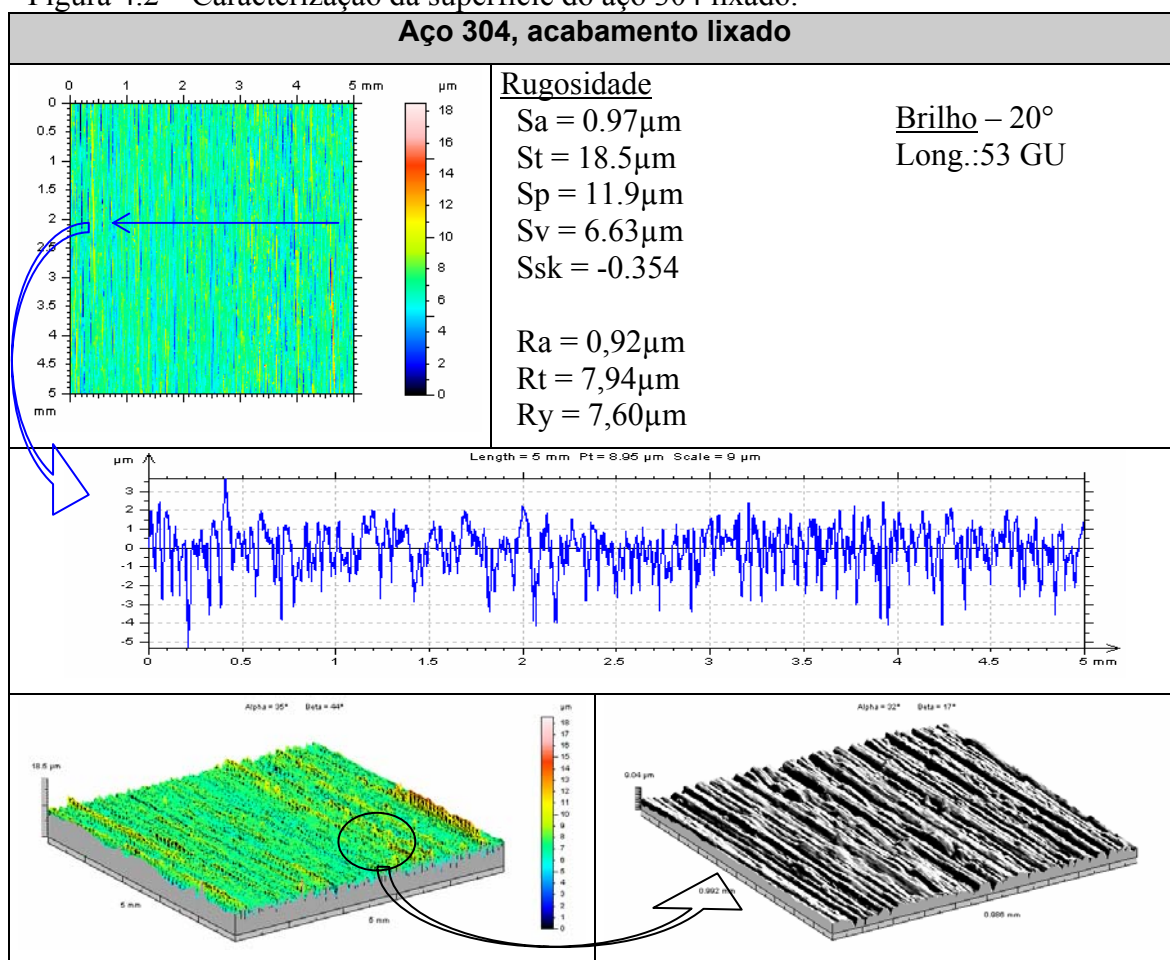
Figura 4.1 – Imagem de microscopia do aço 304 lixado
(a) microscopia óptica (b) microscopia eletrônica.

As Figura 4.1 (a) e (b) mostram respectivamente imagens de microscopia óptica e eletrônica de varredura da amostra com acabamento lixado. Na Figura 4. é possível observar caracterização detalhada da superfície do mesmo material. Importante

ressaltar, que os parâmetros de rugosidade Ra e brilho serão mais utilizados para comparar superfícies.

Na figura 4.2 é possível observar padrão de rugosidade da superfície bem homogênea, com valores de St próximos de Sp, valores de Ra equivalentes de Sa e valores de Rt próximos ao de Ry. No gráfico da topografia superficial é apresentado um perfil de linhas bem distribuídas sem presença de picos ou sobressaltos.

Figura 4.2 – Caracterização da superfície do aço 304 lixado.



Na Figura 4. é mostrado resultado da caracterização superficial da amostra, a direita superior são apresentados os valores de diferentes parâmetros de rugosidade, topografias e brilho da amostra analisada, a descrição destes parâmetros está no capítulo 3.1.

Podem ser vistos nesta mesma tabela três mapas da topografia da superfície. Do lado esquerdo superior é apresentado o mapa topográfico com vista de topo de uma área de amostragem de 5 x 5mm, a escala em cores indica a altura dos picos e a profundidade dos vales. Do lado direito inferior, é visto em escala ampliada parte da superfície analisada. Ilustrativamente, o gráfico central da tabela apresenta um perfil bidimensional de uma linha aleatória extraída do mapa da superfície.

O material apresenta em sua superfície planicidade elevada, bem homogênea, presença de vales profundos e poucos picos. O parâmetro de rugosidade Ra foi escolhido para representar a rugosidade da superfície por ele ser mais conhecido e utilizado.

Define-se então:

A rugosidade objetivada para o novo acabamento RO deverá ser igual a 1,0 μ m de Ra e brilho medido com ângulo de incidência da luz em 20° igual a 50GU.

5 FASE 1 - SIMULAÇÃO DO PROCESSO INDUSTRIAL EM LABORATÓRIO

O trabalho experimental foi dividido em três fases principais de desenvolvimento e cada uma identifica condições ideais de processamento aplicado à fase seguinte.

A primeira fase visa realizar simulações de laminação de encruamento em laboratório a fim de identificar qual a rugosidade do cilindro é necessária para se obter acabamento superficial da tira com aspecto mais próximo do acabamento lixado, conforme apresentado no capítulo anterior.

A segunda fase do trabalho apresenta os resultados da experiência industrial de laminação com cilindro rugoso, utilizando valores de rugosidade indicados na fase anterior. Os parâmetros de laminação como carga e trações são combinados para verificação das condições de transferência de rugosidade do cilindro para tira. É definida nesta fase a melhor condição para processamento do material 439/RO em escala industrial.

O novo produto 439/RO “padrão” identificado na fase anterior é utilizado na terceira fase para avaliação do seu comportamento às diferentes aplicações que ele poderá ser submetido e seu resultado é comparado a de seu antecessor (acabamento lixado). São avaliadas as propriedades de resistência à corrosão, à oxidação e de estampabilidade.

Nesta seção será apresentada a primeira fase e para entendimento adequado da simulação da laminação em laboratório, este capítulo foi dividido nos seguintes tópicos:

- Metodologia;
- O equipamento;
- Caracterização dos cilindros de laminação;
- Caracterização das amostras a serem laminadas;
- Resultados;
- Análise e discussão dos resultados;
- Conclusões.

5.1 METODOLOGIA

As simulações de LE para o estudo preliminar de transferência de rugosidade e brilho do cilindro para tira foram realizadas no laminador FENN do Centro de Pesquisa da ArcelorMittal Inox Brasil e tem como objetivo identificar qual a rugosidade do cilindro que confere a tira aspecto superficial mais próximo do acabamento lixado.

A simulação em laboratório foi programada com intuito de se obter a relação da rugosidade final da amostra com a espessura do material laminado e com a rugosidade inicial do cilindro, aplicando pequenas deformações (~3%). O conhecimento do processo de transferência de rugosidade do cilindro para tira irá permitir definir a rugosidade ideal do cilindro a fim de se obter aspecto visual do produto lixado.

As amostras de aço 439 padrão utilizadas, foram recolhidas da linha industrial antes da etapa de encruamento do material, acabamento (2D). O aço 439 é um aço inoxidável ferrítico com teor de cromo de 17% e biestabilizado com titânio e nióbio (%Ti +%Nb ~ 0,4). A Tabela 5.1 descreve as amostras com diferentes espessuras utilizadas para simulação em laboratório, elas possuíam a dimensão de 100x250mm.

Tabela 5.1 – Amostras de aço 439 com acabamento 2D utilizadas para simulação laboratório.

ID	Espessura(mm)
1	0,50
2	1,00
3	1,50
4	2,25

O rebolo é identificado por sua sigla; a letra identifica o tipo de abrasivo utilizado (A- alumina e C – carbetto de silício) e o número a quantidade de partículas de abrasivo por milímetro quadrado. Logo, quanto maior o número presente na sigla do rebolo menor o particulado abrasivo. Desta maneira o cilindro retificado com AC36 apresentaria rugosidade maior do que o cilindro retificado com C80.

A necessidade de explorar a transferência de rugosidade em uma faixa mais abrangente da rugosidade do cilindro (0,5 a 3,5 μ m Ra) e a impossibilidade de utilizar um só rebolo para atender toda faixa, serviu como justificativa para utilizar três rebolos descritos (AC36, A46 e C80). Cada rebolo possui um tamanho de grão abrasivo distinto, outras variações geradas, que não a rugosidade do cilindro, serão desconsideradas.

Na tabela 5.2 é apresentado o número da identificação da experiência com respectivas rugosidade de cada cilindro de laminação, a faixa de rugosidade do cilindro explorada foi de 0,24 a 3,46 μ m Ra.

Tabela 5.2 - Variáveis de processamento rugosidade do cilindro (Ra) e tipo de rebolo.

EXP.	CILINDRO		
		Rugosidade Objetivada (μ m Ra)	Rebolo da retífica
1 ^a	SUPERIOR	1,50	A46
	INFERIOR	1,50	A46
2 ^a	SUPERIOR	2,20	A46
	INFERIOR	1,80	A46
3 ^a	SUPERIOR	1,50	A46
	INFERIOR	0,90	A46
4 ^a	SUPERIOR	2,50	AC36
	INFERIOR	2,50	AC36
5 ^a	SUPERIOR	1,00	C80
	INFERIOR	1,50	C80
6 ^a	SUPERIOR	2,80	AC36
	INFERIOR	3,50	A46
7 ^a	SUPERIOR	0,50	C80
	INFERIOR	0,25	C80
8 ^a	SUPERIOR	3,00	A46
	INFERIOR	3,50	A46

Para avaliar a retífica do cilindro e conhecer sua textura inicial, foram moldadas réplicas das várias condições e posteriormente caracterizadas, o resultado é apresentado na seção 5.3. As amostras depois de laminadas foram enviadas ao laboratório para caracterização de sua superfície, o resultado pode ser visto na seção 5.5.

5.2 O EQUIPAMENTO

O trabalho foi realizado no laminador da marca FENN modelo 4-085, conforme mostrado na Figura 5.1, este possui configurações tanto *duo/quadruplo*, reversíveis preparado com sistema elétrico de controle de velocidade. Controle do laminador é realizado através de software supervisor e sistemas PLC.



Figura 5.1 – Laminador FENN, laboratório de simulação termomecânica.

Para a simulação em laboratório, o laminador foi montado com a configuração *duo* utilizando cilindros com diâmetro de 255mm. A laminação foi realizada a seco em um passe imprimindo deformações no material de até 3%.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CILINDROS DE LAMINAÇÃO

Os cilindros utilizados foram caracterizados pela sua rugosidade e topografia superficial. Devido à limitação do equipamento de medição de brilho permitir medidas somente em superfícies planas, não foi possível avaliar o brilho dos cilindros.

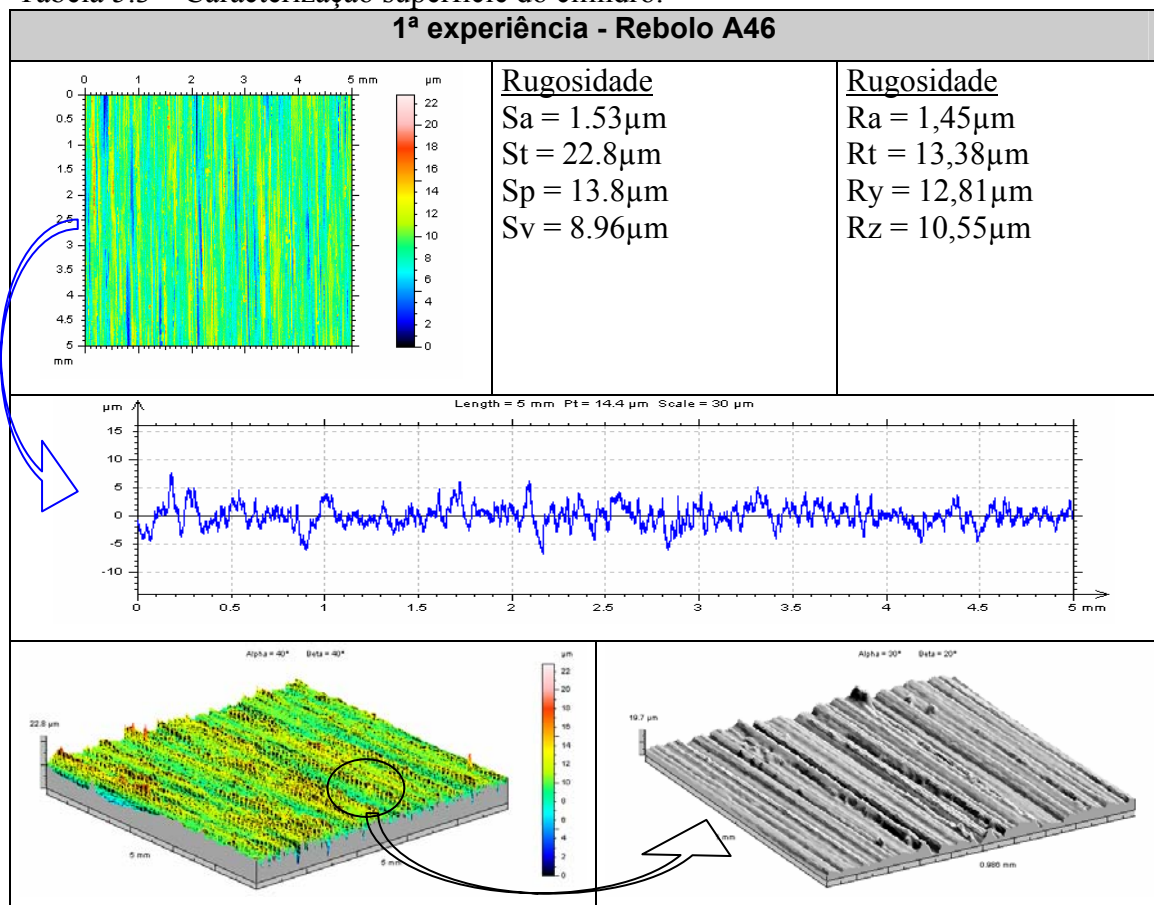
Nesta seção na Tabela 5.3 é apresentado o resultado da caracterização superficial de alguns dos cilindros preparados para esta experiência e a descrição das rugosidades utilizadas é encontrada na Tabela 5.2. É observado que tanto na primeira quanto na terceira experiência o cilindro inferior apresentou padrões de homogeneidade superior

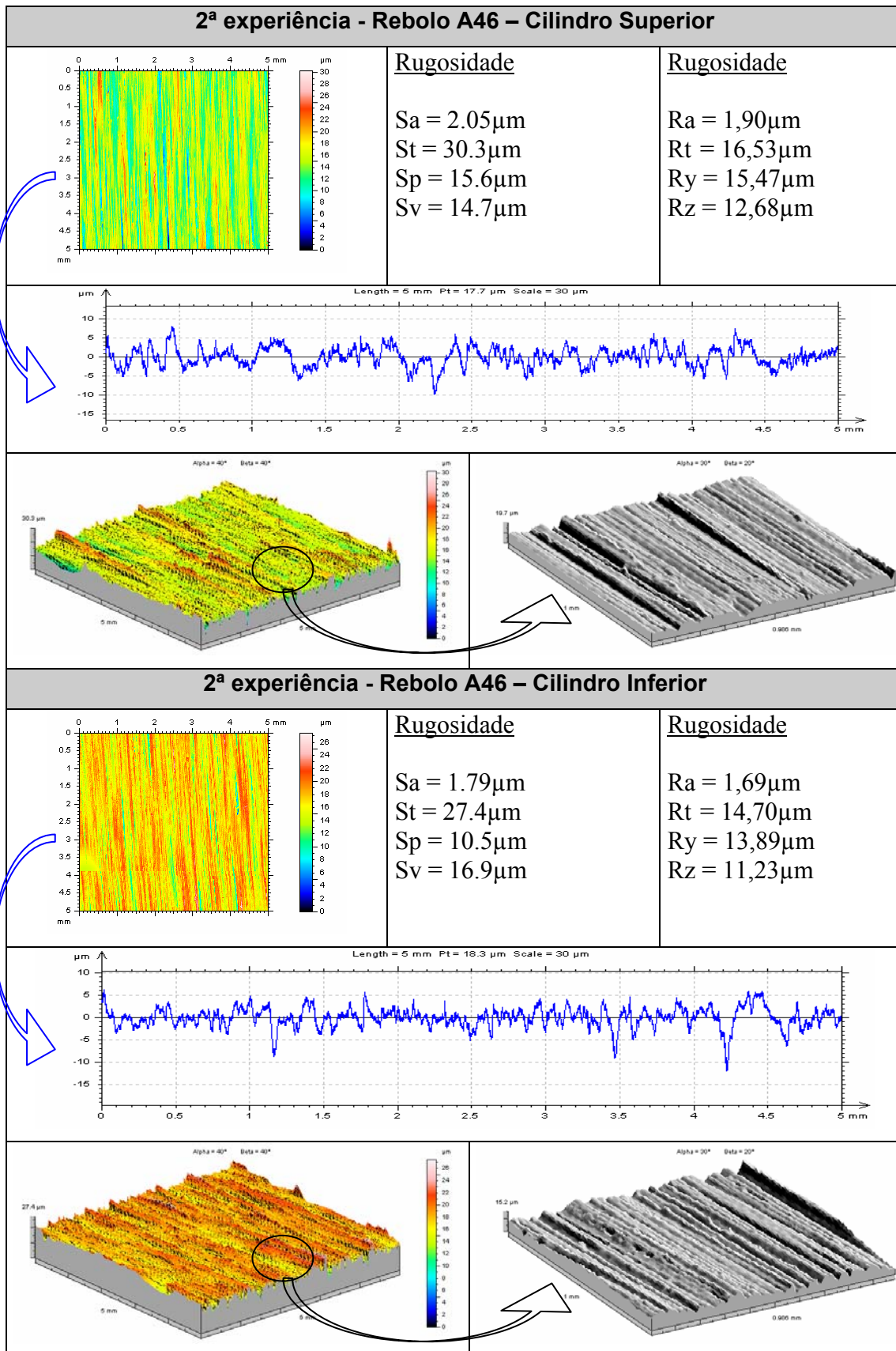
aos demais, na terceira experiência a face superior apresentou maior heterogeneidade dentre os materiais laminados.

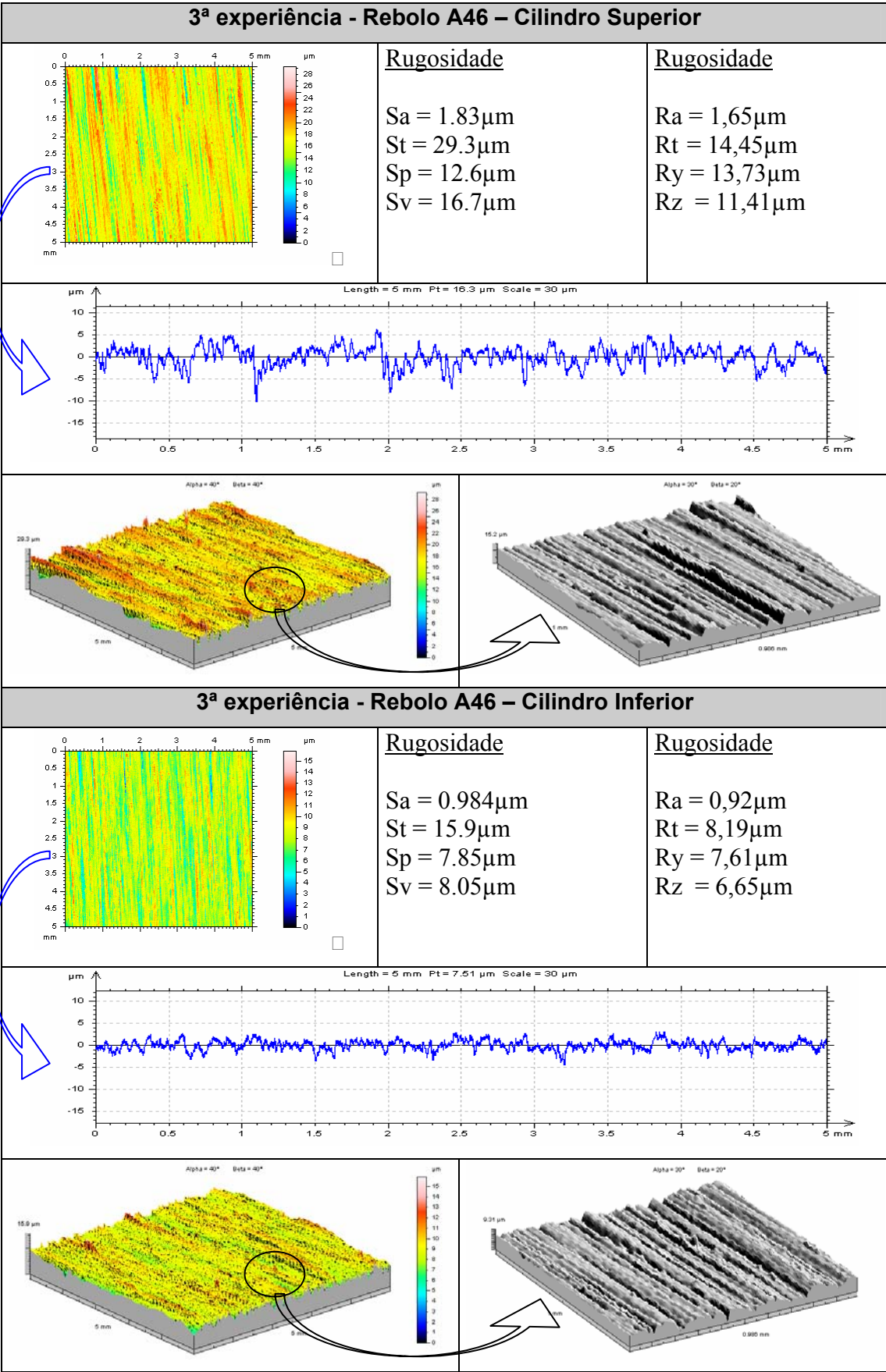
Ao mesmo tempo em que se avaliavam os resultados de laminação utilizando cilindros rugosos, foi necessário desenvolver nova metodologia para retificar cilindros com alta rugosidade. Novos conceitos em retífica de cilindros foram desenvolvidos, porém seus resultados não serão apresentados neste trabalho.

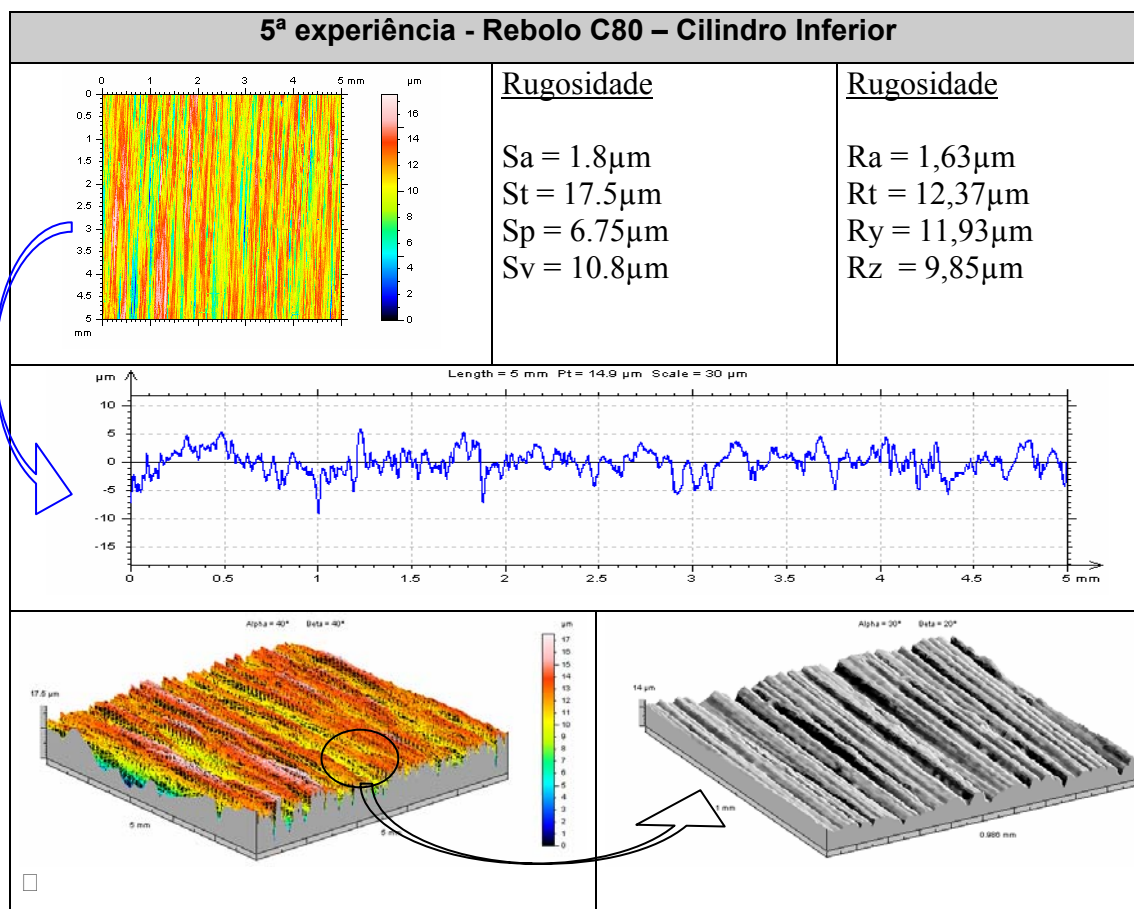
A seguir serão apresentadas às caracterizações das superfícies dos cilindros utilizados. Na próxima seção será mostrada a caracterização das amostras a serem ensaiadas.

Tabela 5.3 – Caracterização superfície do cilindro.









5.4 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS A SEREM LAMINADAS

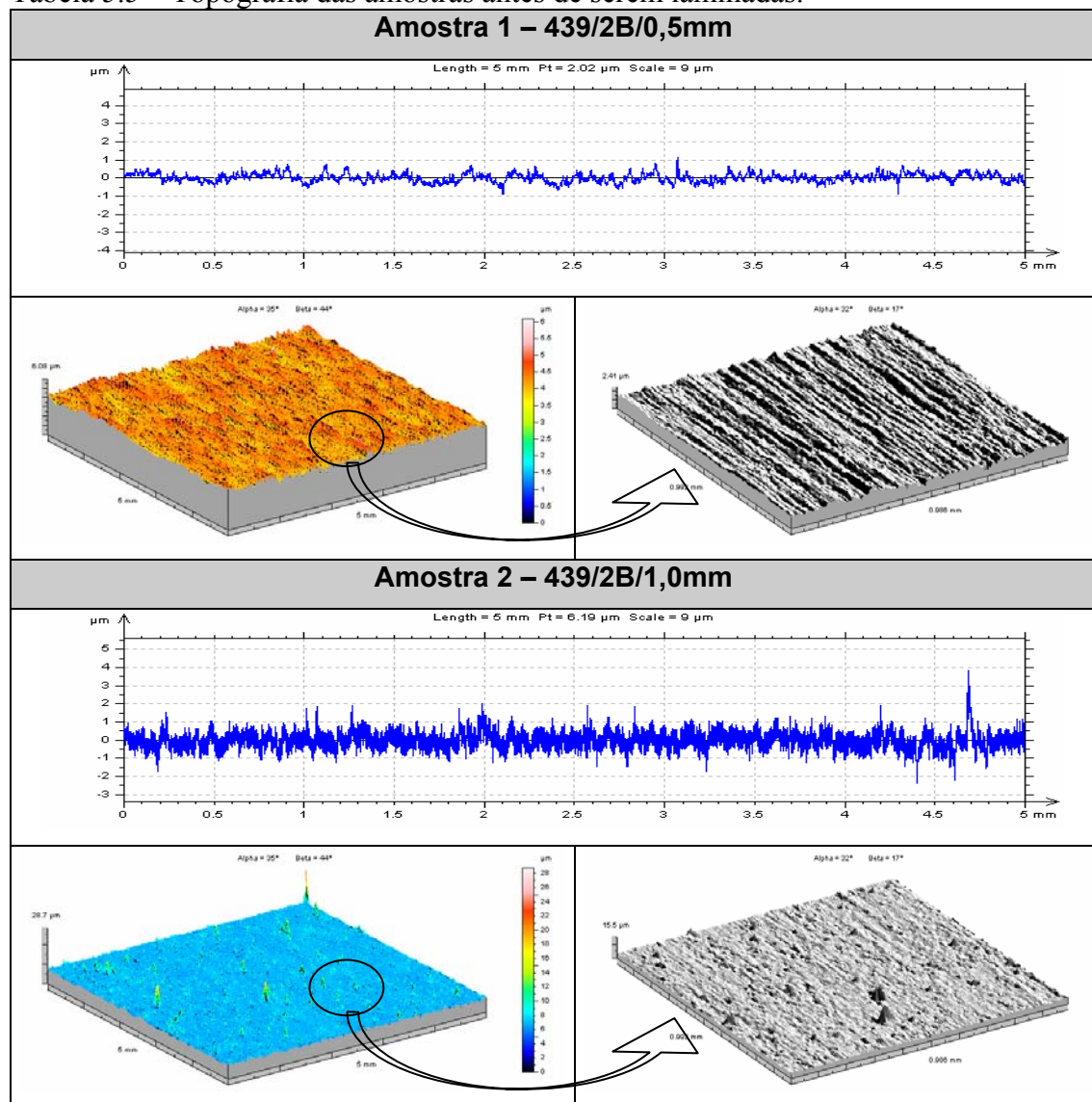
As amostras antes de laminadas foram caracterizadas quanto sua rugosidade, brilho e topografia e são apresentadas na Tabela 5.4, abaixo. Cada amostra possui aspecto superficial particular como será tratado adiante. Porém o processo de lixamento “desbasta” a sua superfície original revelando um outro visual.

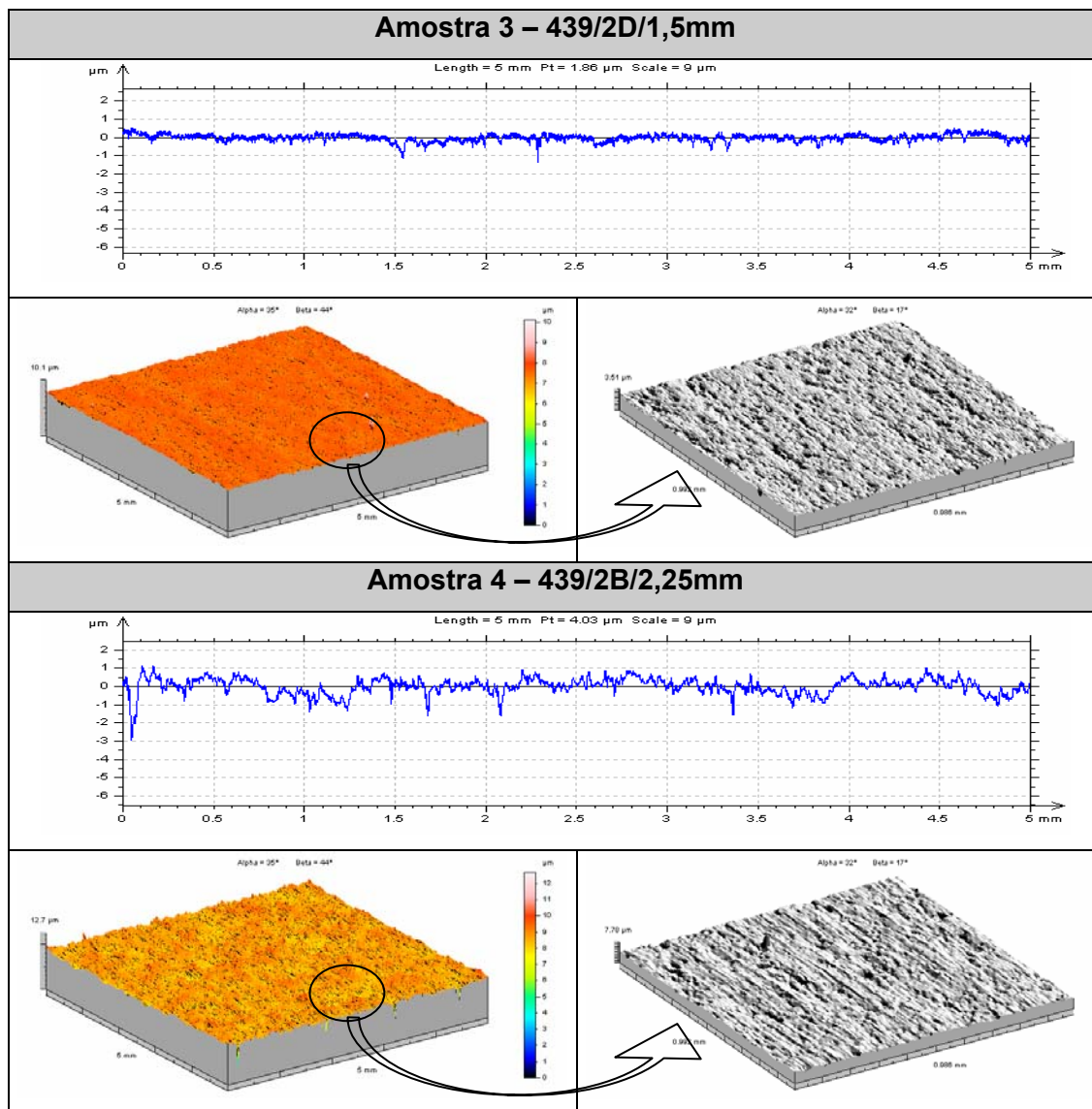
Tabela 5.4 – Espessura da amostra, rugosidade e brilho(20°) da superfície.

ID	esp (mm)	Rugosidade (μ m)								Brilho (GU 20°)
		Ra	Rt	Ry	Sa	St	Sp	Sv	Ssk	
1	0,5	0,17	1,89	1,79	0,194	6,08	1,97	4,11	-0,127	110
2	1,0	0,33	4,38	4,14	0,141	15,70	3,80	6,95	-1,37	73
3	1,5	0,13	2,24	2,14	0,141	10,10	2,56	7,55	-2,97	343
4	2,25	0,27	3,80	3,64	0,328	12,70	4,07	8,59	-1,99	64

Nas topografias e perfis apresentados na Tabela 5.5 é possível observar com mais detalhes as diferenças superficiais de cada amostra. As amostras 1 e 3 apresentaram menor valor de rugosidade conseqüentemente maior brilho. A amostra 2 com 1mm de espessura foi a que mais apresentou imperfeições em sua superfície. Apesar das análises mostrarem variações, visualmente todas as amostras apresentavam aspecto parecido.

Tabela 5.5 – Topografia das amostras antes de serem laminadas.





Estes materiais foram obtidos antes do encruamento na linha de produção da ArcelorMittal Inox Brasil, porém existem variações no processamento do material devido as diferentes espessuras utilizadas. Estas variações geraram diferentes condições superficiais para cada amostra. Serão desconsideradas para este estudo as pequenas variações apresentadas.

Na seção seguinte serão mostrados os resultados das amostras após serem laminadas em laboratório e na seqüência a análise e discussão destes resultados.

5.5 RESULTADOS

As rugosidades das amostras finais (Ra_{tf}) e iniciais (Ra_{ti}) e dos cilindros (Ra_{cil}) foram medidas, bem como o brilho das amostras antes (B_i) e depois (B_f) de laminadas. As Tabela 11.1 e Tabela 11.2 no apêndice apresentam em valores todos os resultados obtidos da caracterização superficial em ambas as faces das amostras laminadas em laboratório.

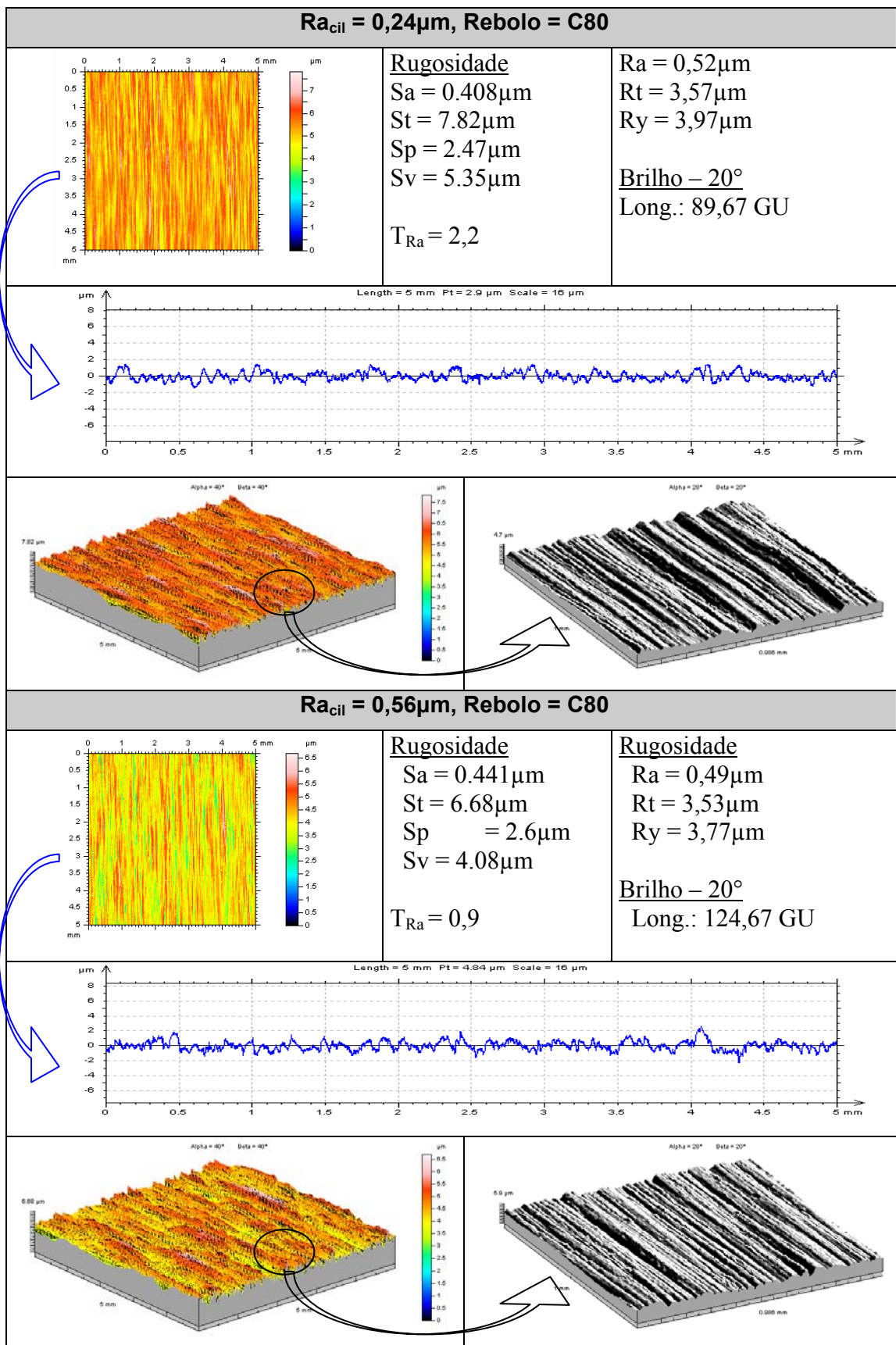
As tabelas apresentam primeiramente a condição das amostras [espessura, largura, brilho inicial e rugosidade (Ra , Ry , Rt) inicial], as condições de processo (carga de laminação, alongamento sofrido, rugosidade do cilindro), o resultado da amostra após laminação [brilho final e rugosidade (Ra , Ry , Rt) finais] e finalmente a equação que descreve a taxa de transferência de rugosidade (T_{Ra}) que é dada por:

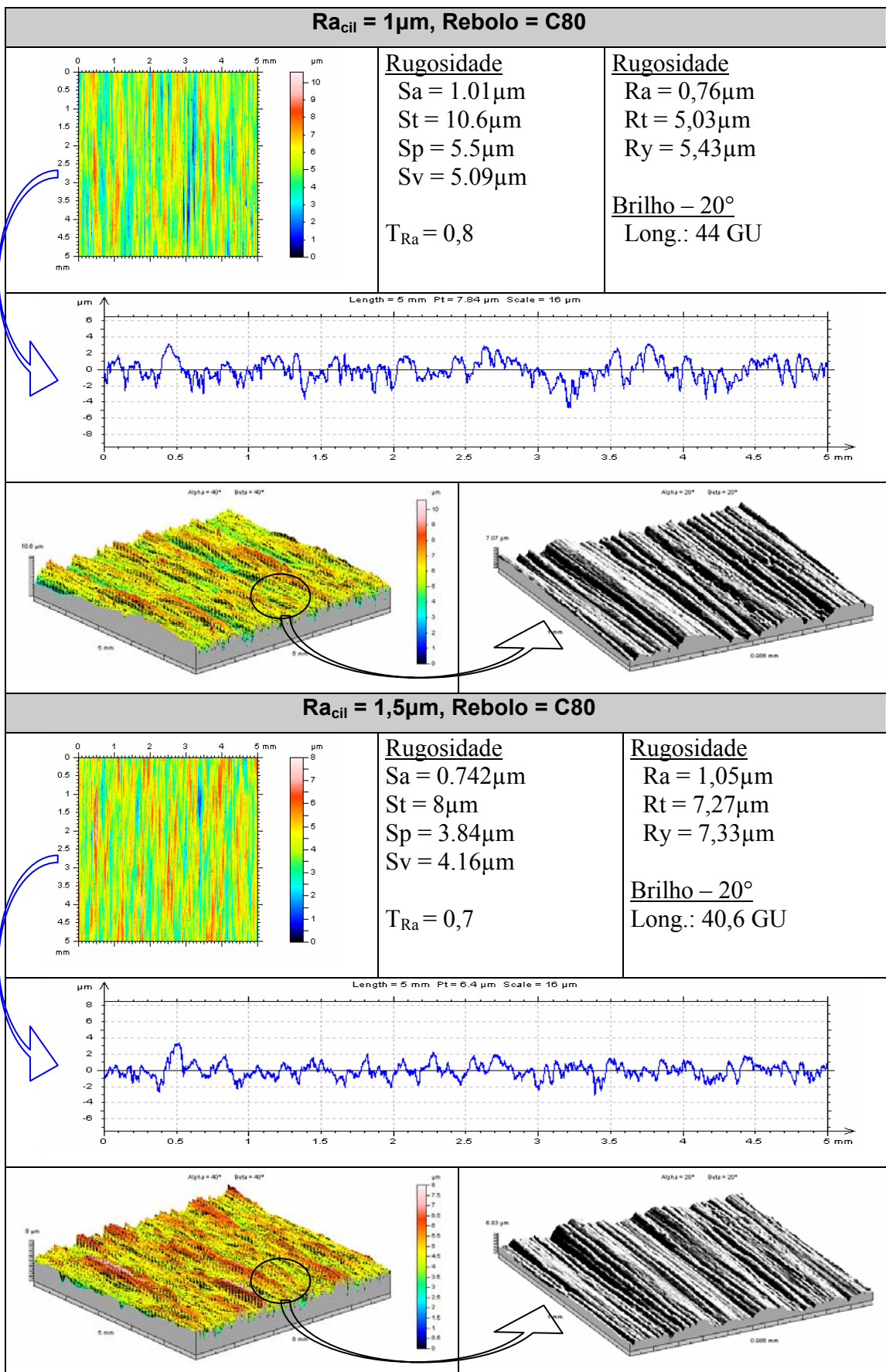
$$T_{Ra} = \frac{Ra_{tf}}{Ra_{cil}} \quad (5-1)$$

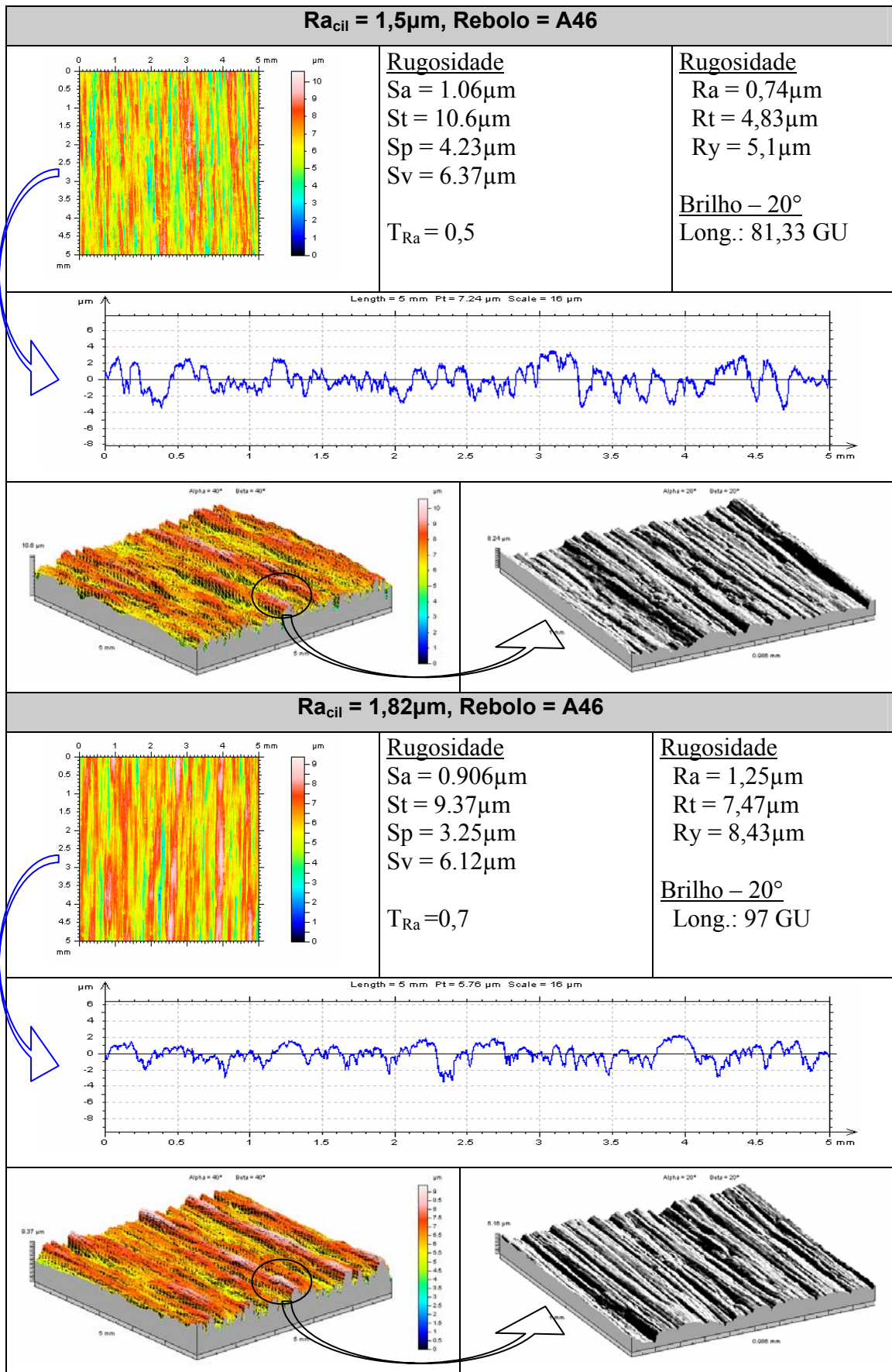
Para facilitar a avaliação dos resultados obtidos, estes últimos foram agrupados em duas condições diferentes, o que permitirá avaliar com mais detalhe as relações de carga e rugosidade inicial do cilindro com a rugosidade final da amostra obtida após laminação. O primeiro grupo do estudo da rugosidade inicial do cilindro é mostrado nas Tabela 5.6 e Tabela 5.7.

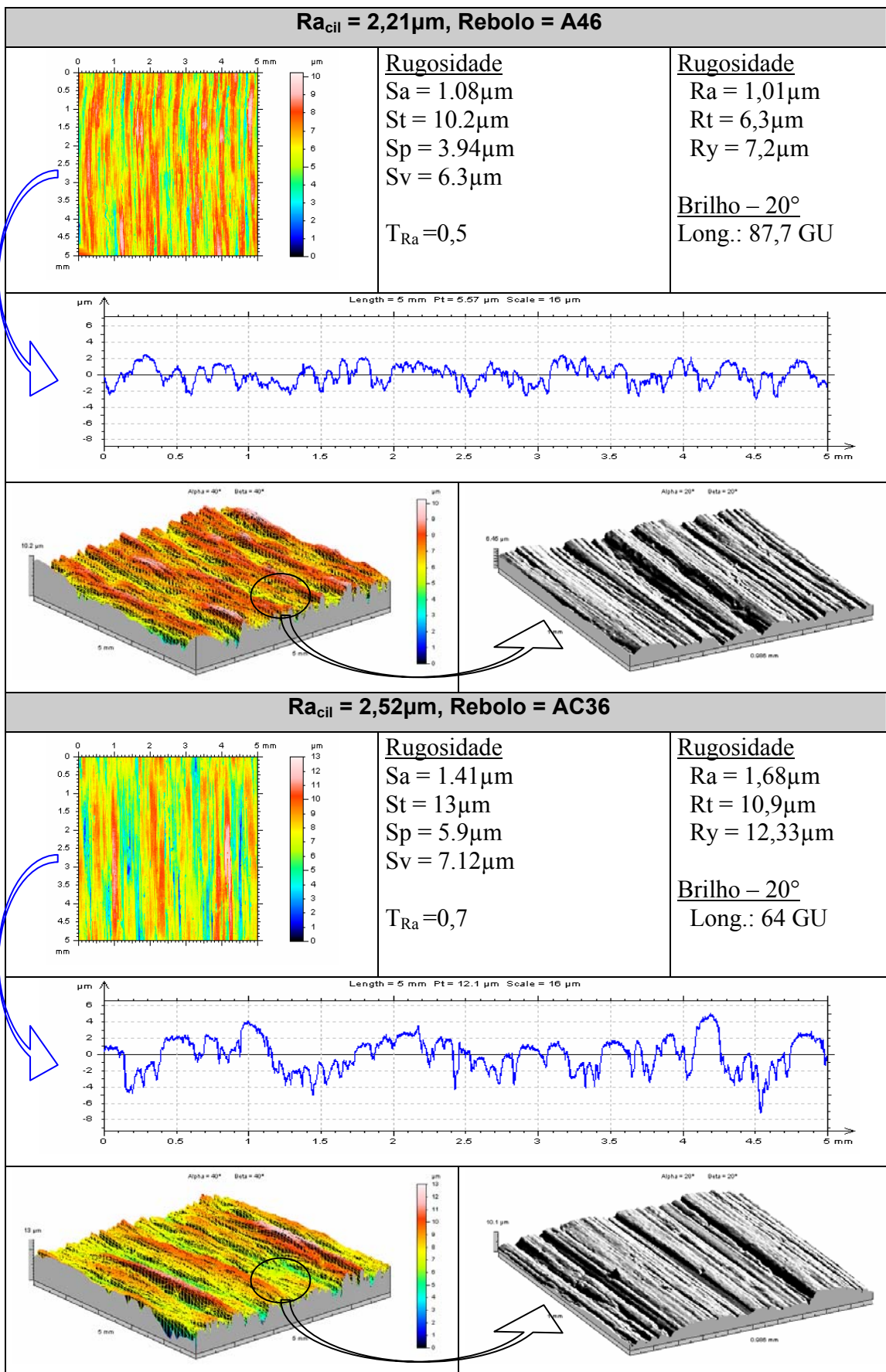
Na Tabela 5.6 são apresentados os resultados da caracterização superficial para aço 439 com 0,5mm de espessura em função da rugosidade do cilindro utilizado.

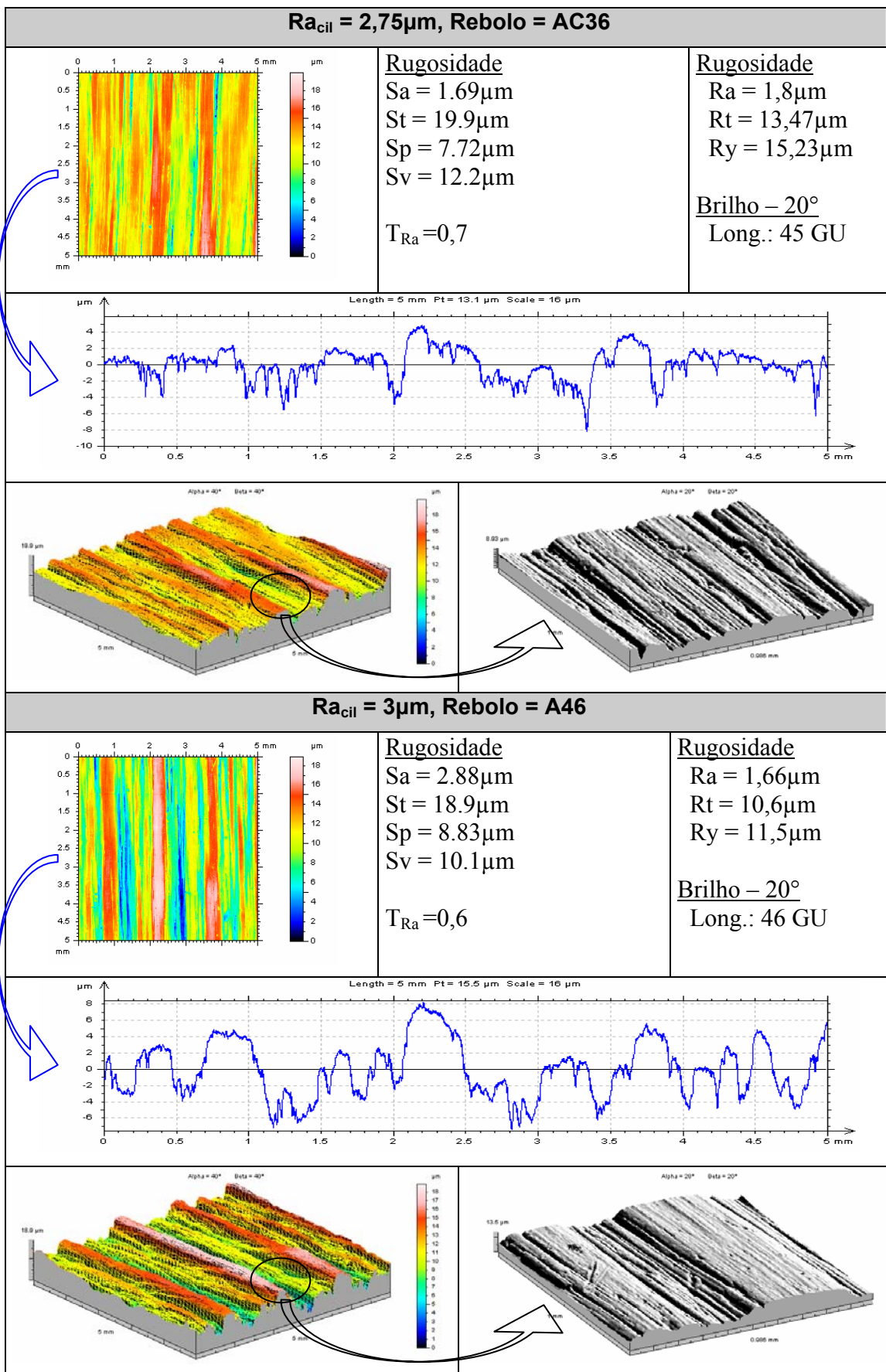
Tabela 5.6 – Caracterização das amostras 439/0,5mm, diferentes rugosidade de cilindro.

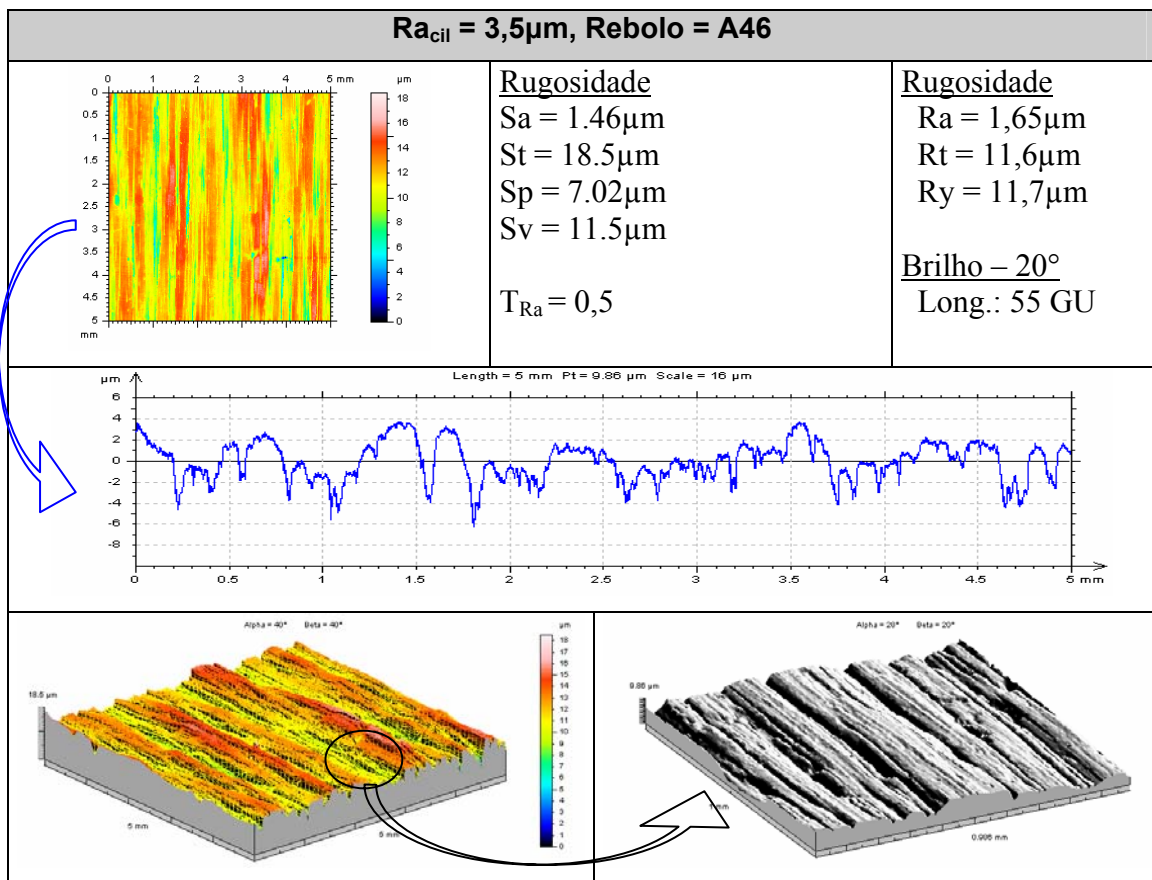






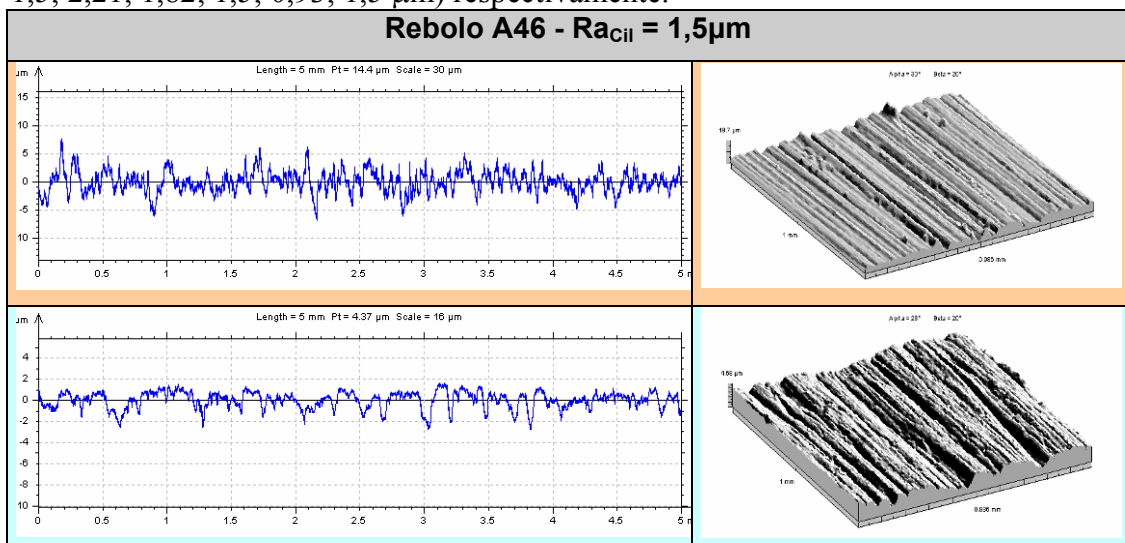




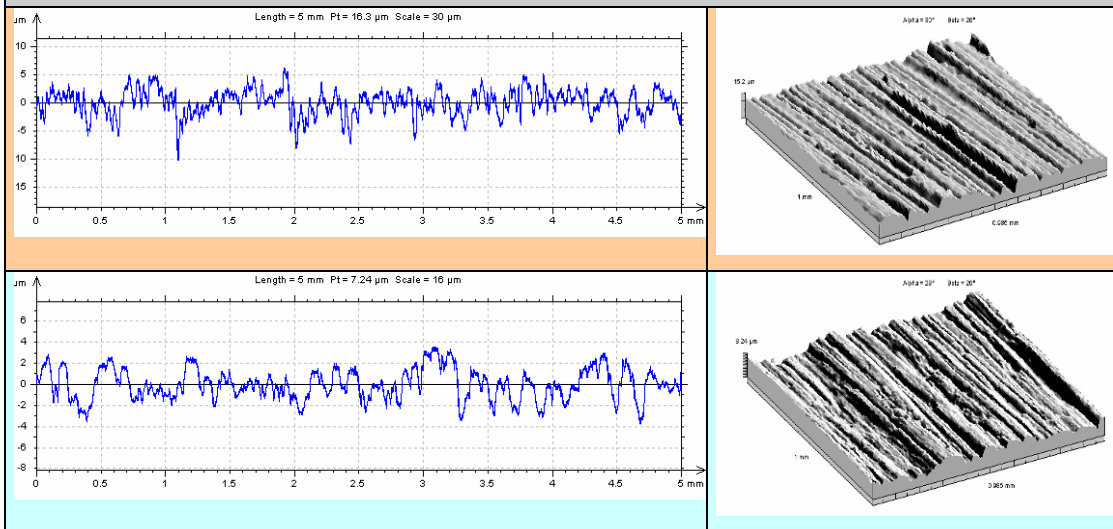


A Tabela 5.7 apresenta a comparação das topografias medidas nas amostras de aço 439, 0,5mm de espessura depois de laminado (fundo azul) e a superfície do cilindro da qual elas foram geradas(fundo marrom).

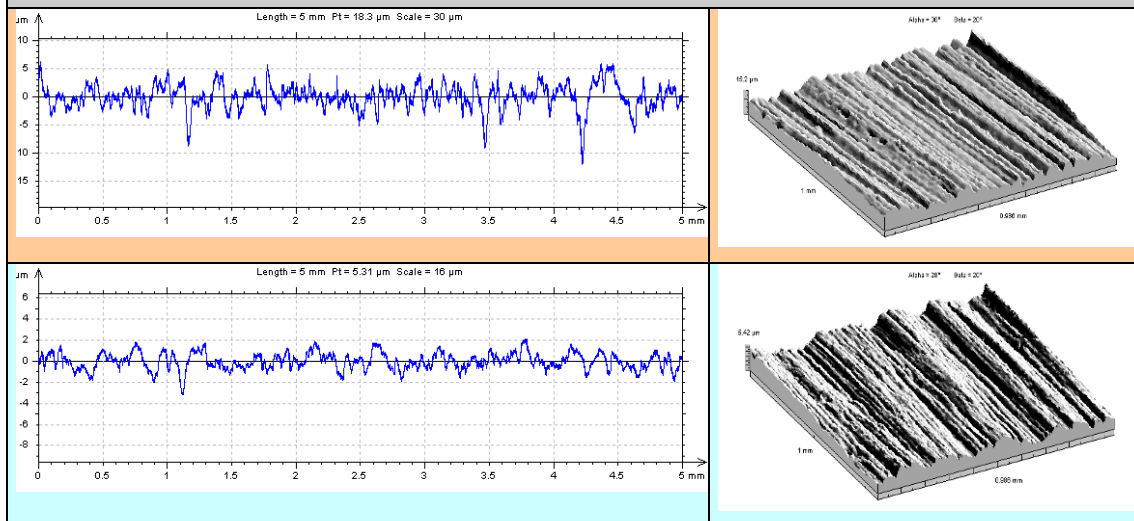
Tabela 5.7 – Comparação topografia e perfil de alguns parâmetros de rugosidade. (Ra = 1,5; 2,21; 1,82; 1,5; 0,93; 1,5 µm) respectivamente.



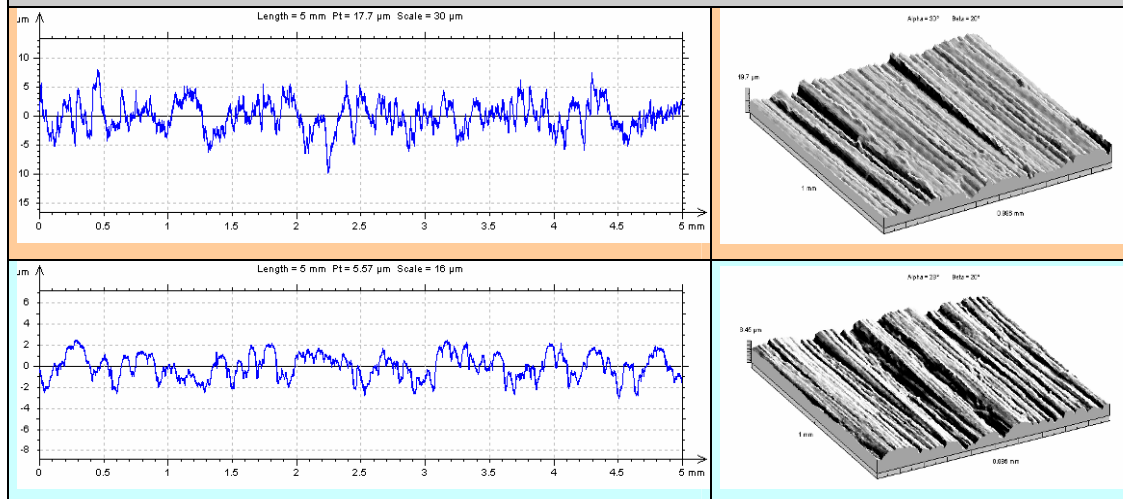
Rebolo A46 – $Ra_{cil} = 1,5\mu m$

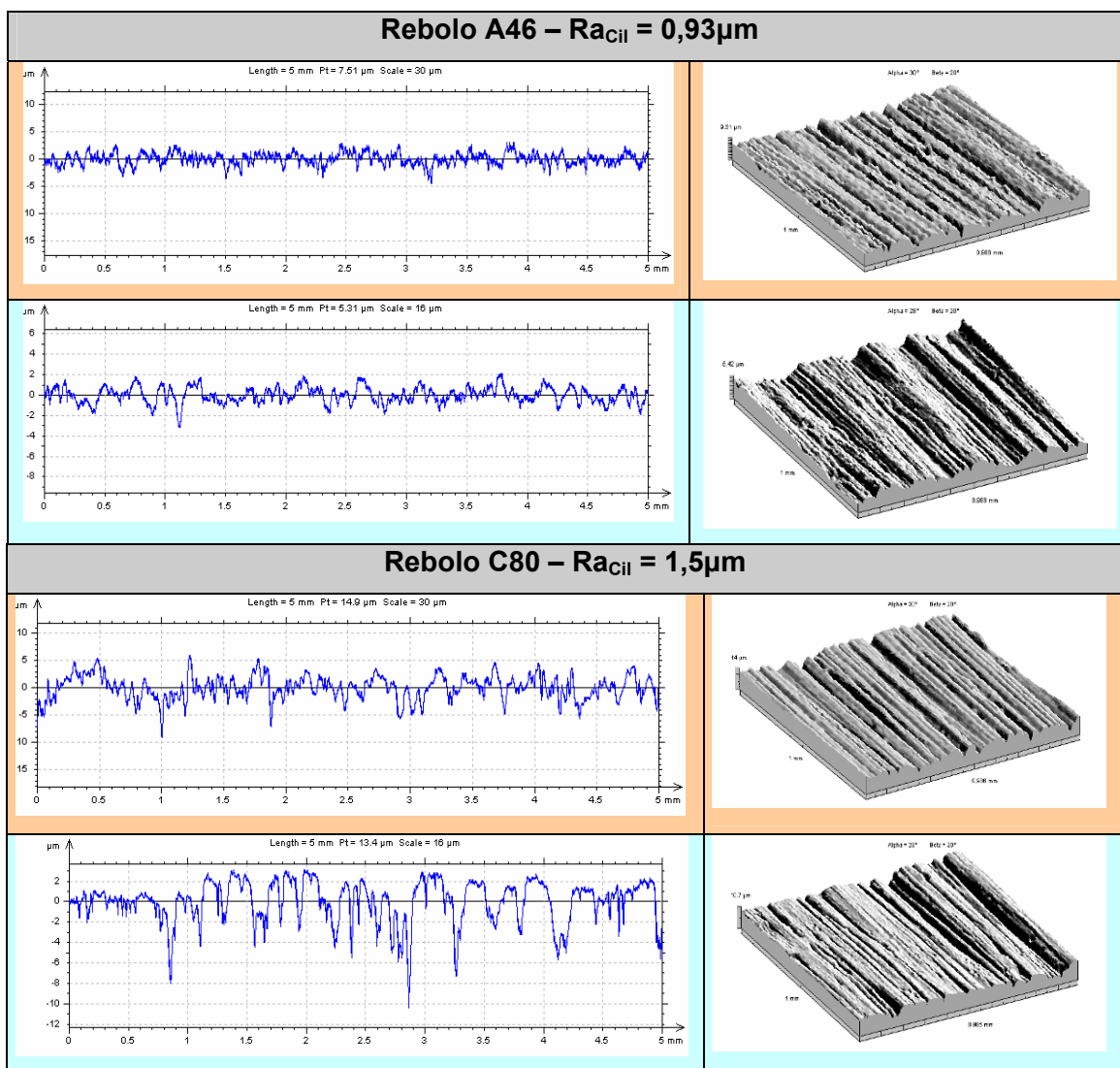


Rebolo A46 – $Ra_{cil} = 1,82\mu m$



Rebolo A46 – $Ra_{cil} = 2,21\mu m$



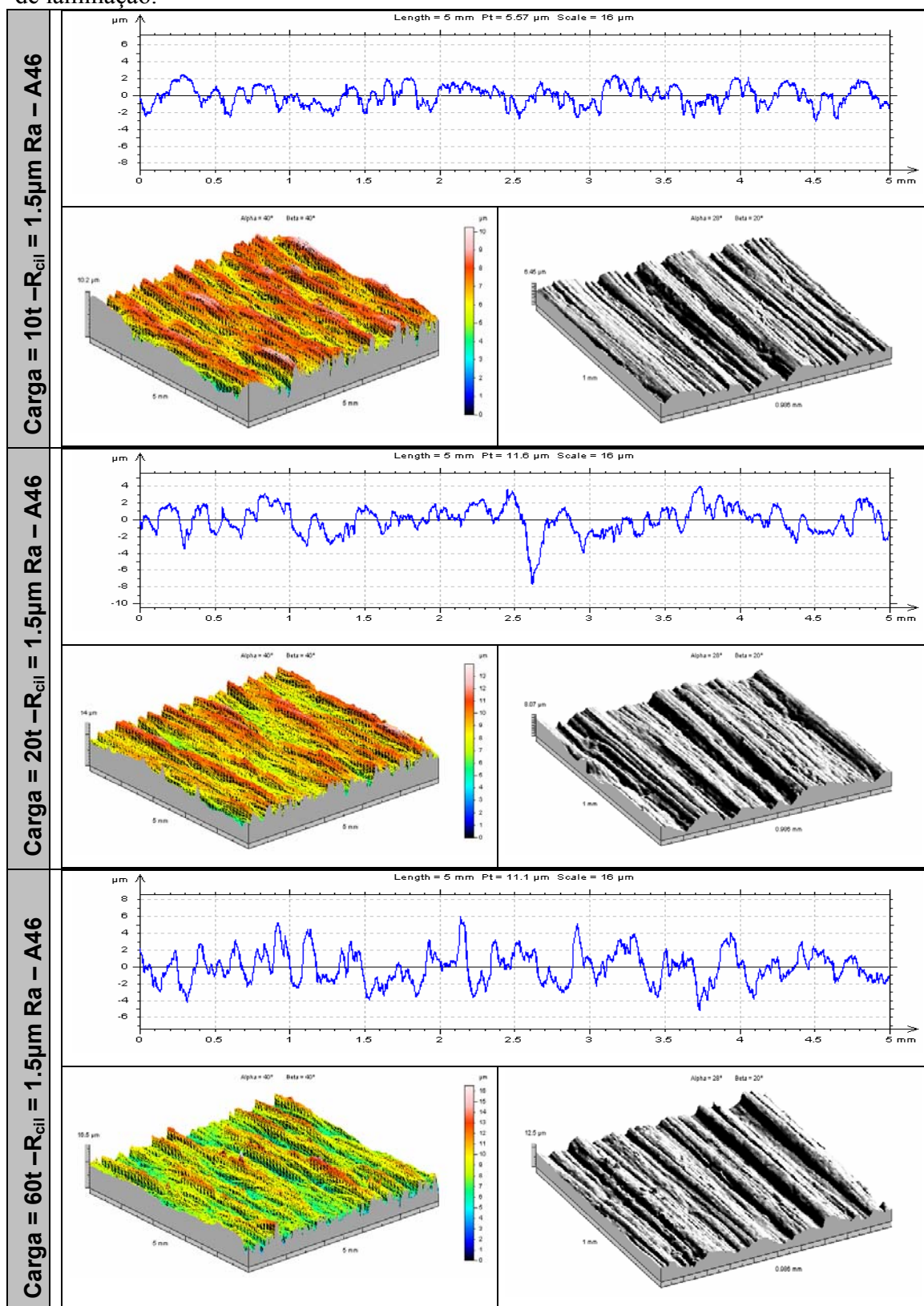


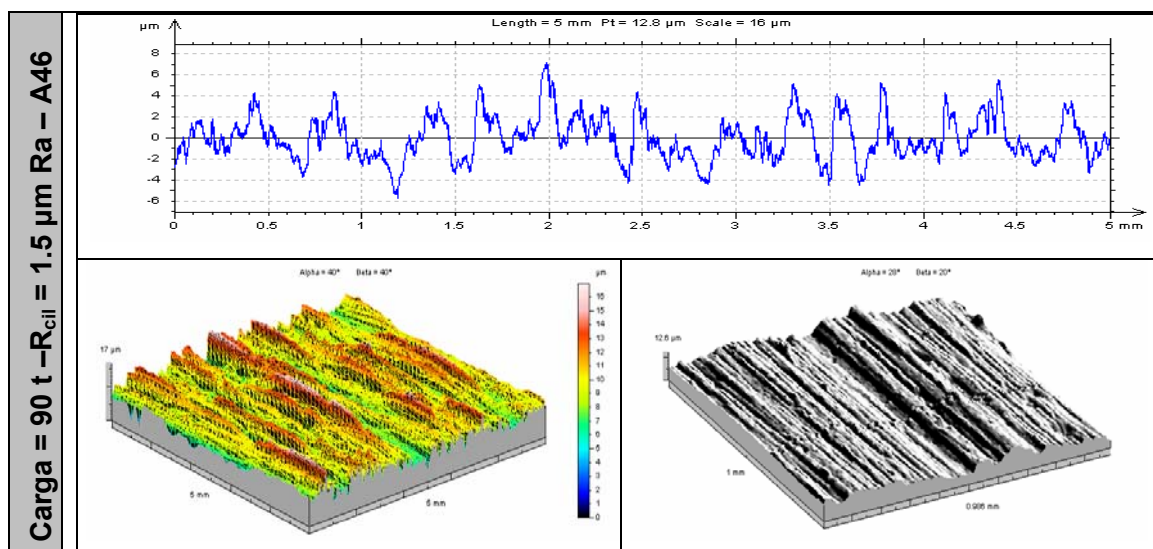
As Tabela 5.8 e Tabela 5.9 mostram os resultados para avaliação da transferência de textura em função da carga de laminação do aço 439 de 0,5mm de espessura e laminado com cilindro retificado a 1,5 µm Ra (experiência 1).

Tabela 5.8 – Variação dos parâmetros caracterização de superfície com a carga aplicada.

Carga Real (t)	Along. (%)	Rugosidade (µm)							Brilho (GU 20°)
		Ra	Rt	Ry	Sa	St	Sp	Sv	
6,92	1,19	1,25	7,5	8,4	1,08	10,2	3,94	6,3	97
16,01	1,04	1,44	9,4	10,3	1,25	14,2	5,88	8,1	117
44,00	7,81	2,03	13,3	13,9	1,50	16,5	9,35	7,2	42
86,59	9,35	2,15	17,7	17,3	1,50	17,0	8,45	8,5	39

Tabela 5.9 – Topografia superfície 439/0,5mm laminada $R_{a_{cil}} = 1,5$ em diferentes cargas de laminação.





5.6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção é mostrada a análise e a discussão dos resultados que foram divididas em três partes, a saber: relações de transferência de rugosidade com a carga, a avaliação da transferência de rugosidade, discussão sobre a condição ideal de rugosidade para cilindro de laminação.

5.6.1 TRANSFERÊNCIA DE RUGOSIDADE VERSUS CARGA DE LAMINAÇÃO

Para o estudo da correlação de transferência de rugosidade com a carga de laminação são laminadas com diferentes reduções amostras de aço 439 com 0,5mm de espessura utilizando cilindro com rugosidade superficial igual a 1,5 μm preparados com rebolo A36.

É curioso observar Tabela 5.8 que apesar da rugosidade do cilindro ser igual a 1,5 μm Ra, aplicando maiores cargas foi possível obter rugosidade com valores até 2,15 μm Ra. Os parâmetros de rugosidade R_y e R_t se mostraram fortemente dependentes da carga de laminação, apresentando valores de ajuste ξ^2 superior a 0,97.

Os valores do gráfico Figura 5.2 mostram a dependência da carga real aplicada com alguns parâmetros de rugosidade e com o alongamento. O parâmetro de rugosidade “ R_y ” apresentou melhor ajuste.

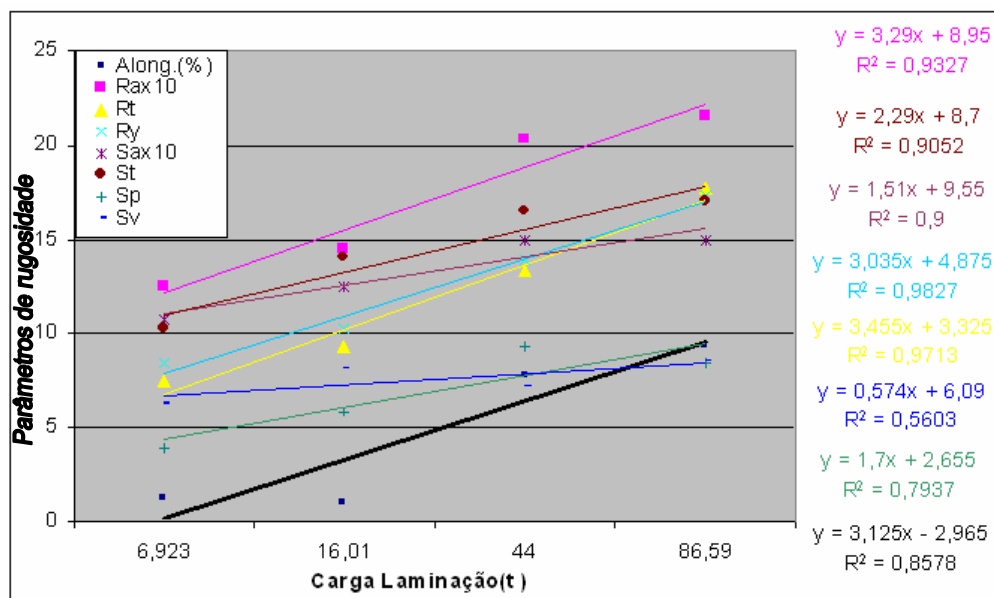


Figura 5.2 – Comportamento de alguns parâmetros de superfície em função da carga de laminação (toneladas).

Foi extraída deste gráfico a relação carga versus alongamento dado pela equação (5.3).

$$\text{Alongamento}(\%) = 3,125 \times \text{carga laminação}(t) - 2,965 \quad (5-2)$$

Analisando a Tabela 5.8 é observável que o valor de brilho apresenta um máximo para um dado valor de carga em torno de 16t. Ao contrário da rugosidade o valor de brilho não cresce continuamente com a carga de laminação. Valores de rugosidade chegam a dobrar enquanto que o brilho máximo equivale a aproximadamente 15% do valor inicial.

O gráfico da Figura 5.3, apresenta o comportamento assintótico da variação da rugosidade superficial com incremento da carga de laminação. É visível que no início da faixa pequena variação da carga promove grandes variações de transferência de rugosidade, como o que ocorre em 20t.

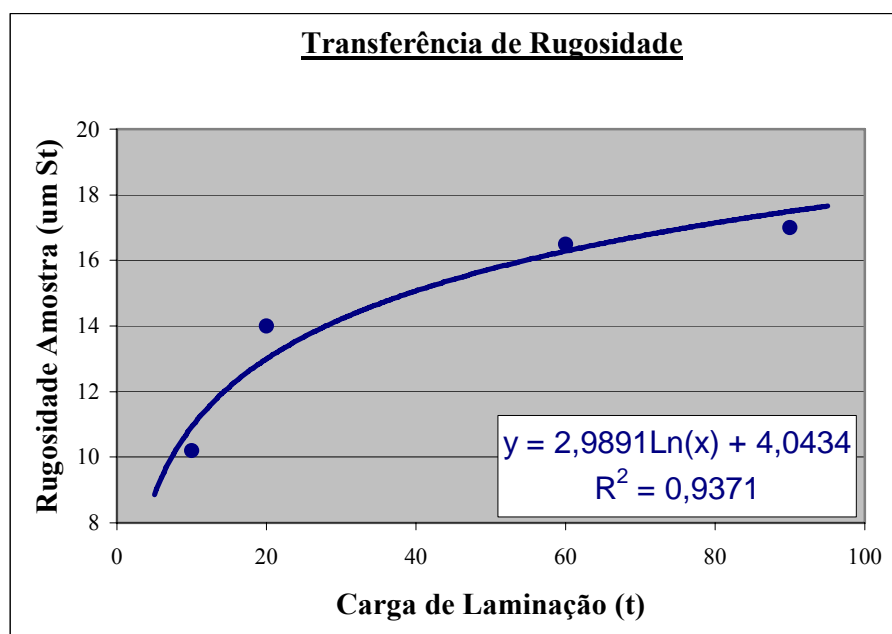


Figura 5.3 – Rugosidade da amostra laminada “St” x carga de laminação (t)

O parâmetro da superfície que melhor representou a rugosidade em função da variação de carga de laminação foi “St” e ele é expresso pela função logarítmica apresentada no gráfico da figura 5.3.

5.6.2 TRANSFERÊNCIA DE RUGOSIDADE DURANTE LAMINAÇÃO EM LABORATÓRIO

Conhecer o comportamento da transferência de rugosidade passa pelo entendimento da sua relação com a espessura do material laminado e com a rugosidade inicial do cilindro utilizado. Para o caso prático é necessário saber se existe necessidade de ajustar os parâmetros de laminação como rugosidade do cilindro para cada espessura utilizada.

É avaliada a dependência da rugosidade final da tira (Raf) com três variáveis selecionadas: espessura, alongamento (along) e rugosidade do cilindro (Rcil). Para verificar a interação entre as variáveis e o peso de cada uma delas na transferência de rugosidade, é aplicado a metodologia de análise de resposta de superfície descrita por BOX^[36], com auxílio do software de estatística MINITAB v13.32, cujo resultado é apresentado na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Regressão da rugosidade final da tira em função do alongamento, rugosidade do cilindro e da espessura do material laminado.

MINITAB STATISTICAL SOFTWARE						
Response Surface Regression: Raf versus along; Rcil; espessura						
The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for Raf						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	1,0240	0,12846	7,971	0,000		
along	0,5237	0,15880	3,298	0,002		
Rcil	0,6912	0,09700	7,126	0,000		
espessura	-0,1693	0,07726	-2,191	0,034		
along*along	0,2962	0,25416	1,165	0,250		
Rcil*Rcil	-0,0567	0,14283	-0,397	0,693		
espessura*espessura	0,1622	0,14079	1,152	0,256		
along*Rcil	0,0120	0,22251	0,054	0,957		
along*espessura	-0,0775	0,19324	-0,401	0,690		
Rcil*espessura	-0,1411	0,11077	-1,274	0,209		
S = 0,3630 R-Sq = 76,5% <u>R-Sq(adj) = 71,8%</u>						
Analysis of Variance for Raf						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	19,2760	19,2760	2,14178	16,25	0,000
Linear	3	18,5585	14,3394	4,77980	36,27	0,000
Square	3	0,4404	0,4353	0,14510	1,10	0,359
Interaction	3	0,2772	0,2772	0,09239	0,70	0,556
Residual Error	45	5,9306	5,9306	0,13179		
Lack-of-Fit	39	5,8816	5,8816	0,15081	18,45	0,001
Pure Error	6	0,0491	0,0491	0,00818		
Total	54	25,2066				
Unusual Observations for Raf						
Observation	Raf	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
13	1,799	1,792	0,290	0,007	0,03	X
14	3,030	2,425	0,243	0,605	2,24	R
26	2,400	1,669	0,109	0,731	2,11	R
27	2,190	1,481	0,110	0,709	2,05	R
34	0,796	1,519	0,137	-0,724	-2,15	R
36	1,225	1,911	0,132	-0,686	-2,03	R
45	2,310	1,547	0,133	0,763	2,26	R
R denotes an observation with a large standardized residual.						
X denotes an observation whose X value gives it large influence.						
Estimated Regression Coefficients for Raf using data in uncoded units						
<u>Termos</u>	<u>Coeficiente</u>					
Constante	-0,370156					
along	-0,115727					
Rcil	0,851051					
espessura	-0,387143					
along*along	0,296207					
Rcil*Rcil	-0,0343617					
espessura*espessura	0,211789					
along*Rcil	0,00934147					
along*espessura	-0,0885408					
Rcil*espessura	-0,125524					

Na Tabela 5.10 é apresentada a regressão linear da rugosidade final da tira (Raf) em função do alongamento, espessura da amostra e rugosidade de cilindro. Esta função pode ser escrita como somatória dos termos multiplicada pelo seu coeficiente correspondente. Os coeficientes dos termos desta função são apresentados em negrito na parte final da mesma tabela. O fator de ajuste da função aos pontos foi igual a 71,8% (em azul sublinhado, na mesma tabela).

Para compreender a importância de cada parâmetro da função é apresentado a Figura 5.4. Nesta figura são representados três gráficos que descrevem a rugosidade final da tira (ordenada) em função do alongamento, da rugosidade de cilindro (Rcil) e da espessura (abscissas).

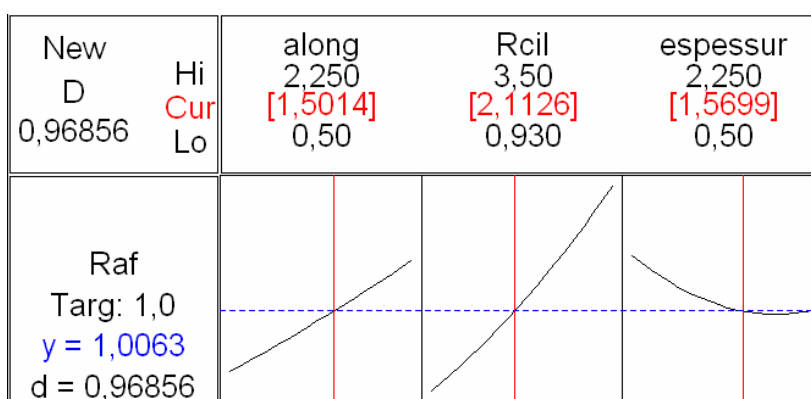


Figura 5.4 – Correlação de Raf x alongamento, espessura e Rcil.

Os valores mínimos e máximos do eixo das abscissas são apresentados acima do gráfico e o valor em vermelho é o valor corrente lido na posição da linha vermelha. A linha pontilhada azul marca o valor de Raf (y) também em azul. Ele é o resultado da função devida da composição dos valores em vermelho. Para cada combinação de valores em vermelho é mostrado novo resultado para a função em azul.

Na Figura 5.4 observa-se o peso de cada variável na função rugosidade final da tira após ter sido laminada. Esta influência é dada pela inclinação da reta, quanto maior a inclinação maior é a variação de Raf. Conclui-se então que na simulação em laboratório a rugosidade do cilindro possui maior influência seguida do alongamento dado no material.

Conclui-se também que a rugosidade final da tira após ser laminada (Raf) aumenta com a rugosidade do cilindro e com o alongamento. Pelo contrário, a rugosidade da tira diminui com o aumento de espessura. Esta dependência inversa já tinha sido observada BUSCH^[4]. (ver Figura 3.18-b)

Fixando o alongamento no material em 1,5%, constrói-se o gráfico 3D (com auxílio do MINITAB) mostrando a dependência da rugosidade final da amostra laminada com sua espessura e rugosidade do cilindro utilizado. (Figura 5.5)

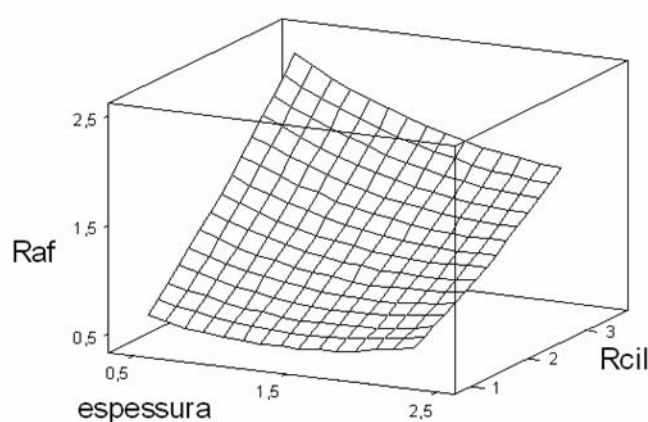


Figura 5.5 - Correlações da rugosidade final obtida na tira versus parâmetros de laminação com alongamento igual a 1,5%.

A variação crescente da rugosidade do cilindro induz o aparecimento de patamares cada vez mais elevados, especialmente as rugosidades 0,56, 1,82 e 3 μm Ra apresentaram aspectos bem regulares. Utilizando rebolo C80 a rugosidade máxima atingida foi de 1,5 μm Ra, com rebolo A46 a rugosidade máxima obtida foi de 3,5 μm Ra, já com rebolo A36 rugosidade máxima obtida foi 2,75 μm Ra.

Analisando os resultados da seção anterior, as condições que mais se aproximaram do aspecto de lixado foram rebolo A46/ $R_{a_{cil}} = 1,9$ a 2,2 μm e rebolo C80/ $R_{a_{cil}} = 1,5 \mu\text{m}$. Não foi analisada a eficácia do rebolo A36. É curioso observar que existe uma condição de retífica que atende o resultado utilizando rebolo fino C80 e $R_{a_{cil}} = 1,9 \mu\text{m}$.

5.6.3 CONDIÇÃO IDEAL DO CILINDRO DE LAMINAÇÃO

Depois de analisado o resultado da simulação, foi possível obter a similaridade com aspecto acabamento lixado em mais de uma condição. Estas condições aprovadas são mostradas em mais detalhes nas Tabela 5.12, Tabela 5.11 e Tabela 5.13. Cada tabela apresenta um aspecto diferente da caracterização da superfície da amostra.

Tabela 5.11 – Perfil de rugosidade para três condições de rugosidade de cilindro.

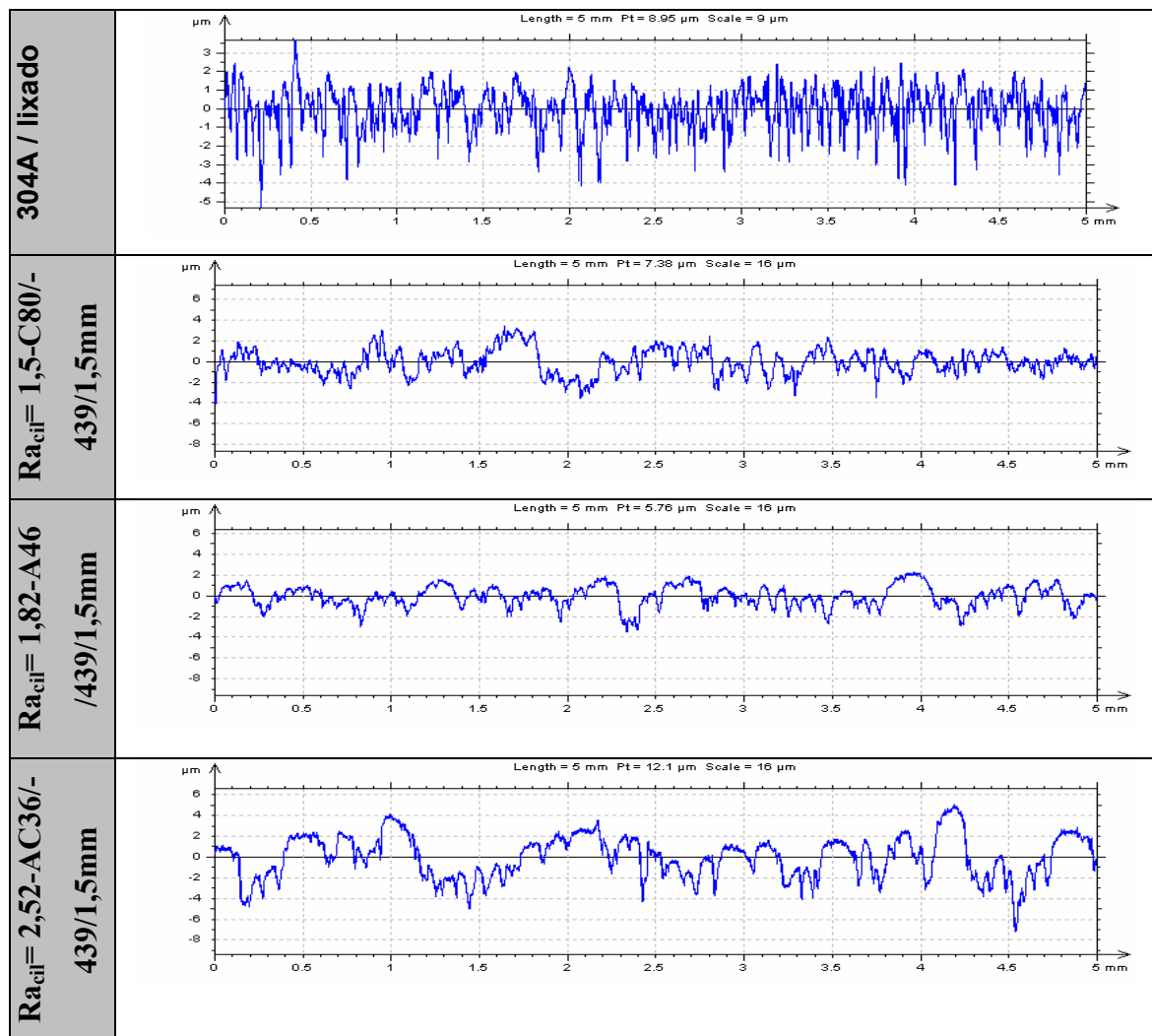


Tabela 5.12 – Topografia com resultados mais próximos do acabamento lixado.

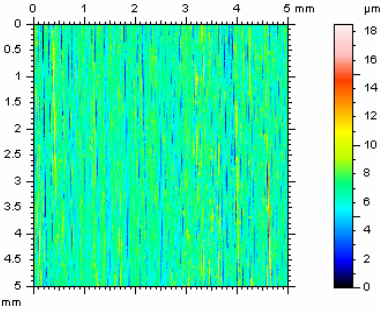
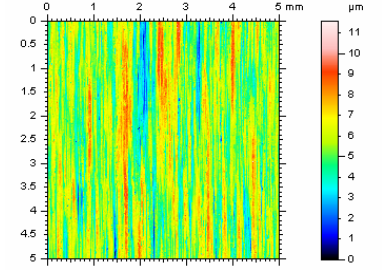
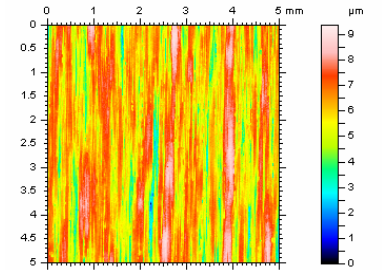
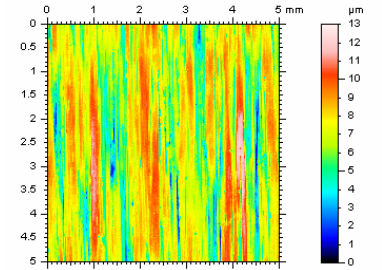
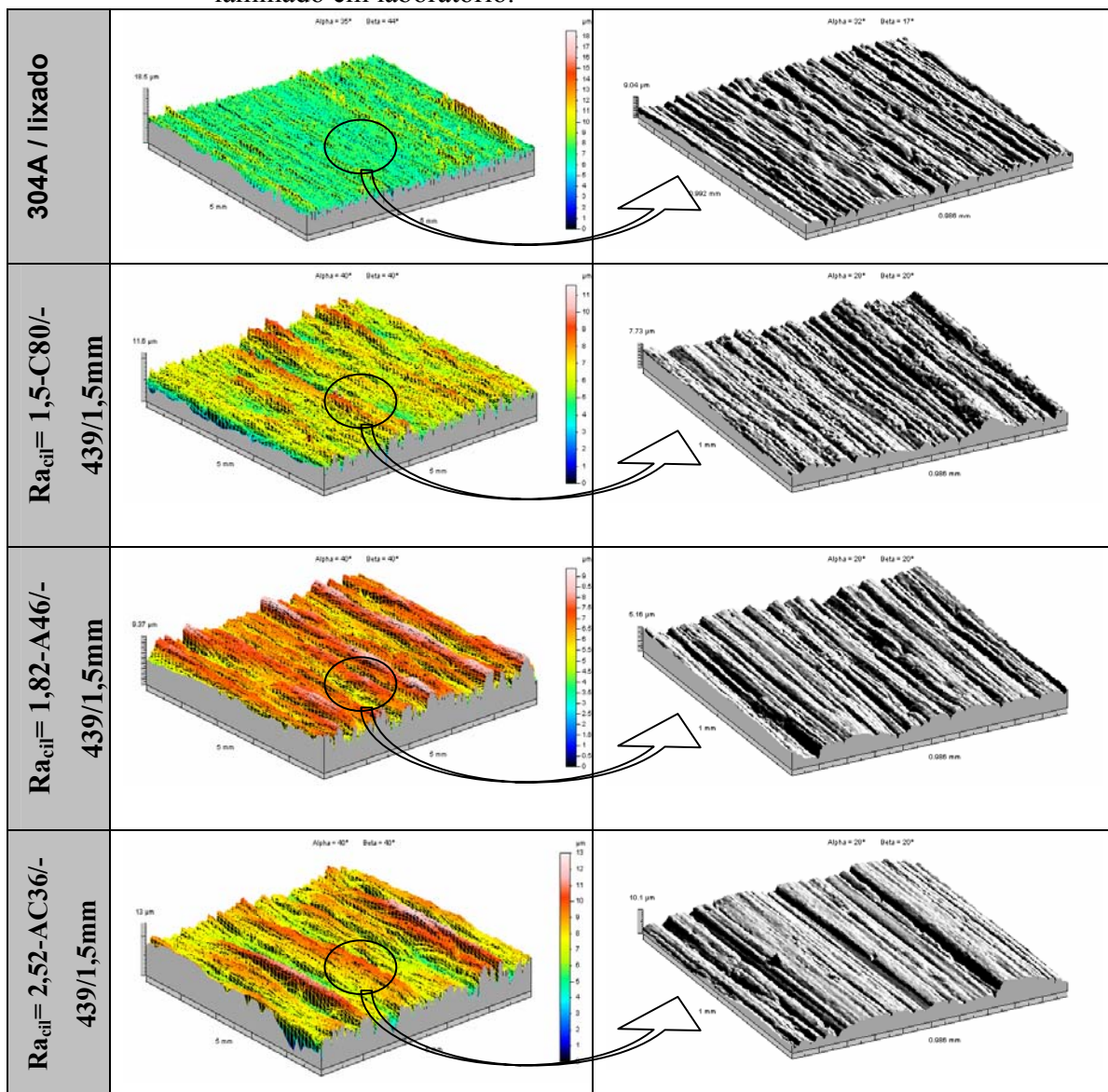
304A /lixado		<p><u>Rugosidade</u> Sa = 0.97μm St = 18.5μm Sp = 11.9μm Sv = 6.63μm</p> <p><u>Rugosidade</u> Ra = 0,92μm Rt = 7,94μm Ry = 7,60μm</p> <p><u>Brilho – 20°</u> Long.:54 GU</p>
Ra_{cil}= 1,5-C80/- 439/1,5mm		<p><u>Rugosidade</u> Sa = 1.01μm St = 11.6μm Sp = 6.02μm Sv = 5.55μm</p> <p><u>Rugosidade</u> Ra = 1,1μm Rt = 6,9μm Ry = 7,5μm</p> <p><u>Brilho – 20°</u> Long.:41 GU</p>
Ra_{cil}= 1,82-A46/- 439/1,5mm		<p><u>Rugosidade</u> Sa = 0.906μm St = 9.37μm Sp = 3.25μm Sv = 6.12μm</p> <p><u>Rugosidade</u> Ra = 1,01μm Rt = 6,3μm Ry = 7,2μm</p> <p><u>Brilho – 20°</u> Long.:88 GU</p>
Ra_{cil}= 2,52-AC36/- 439/1,5mm		<p><u>Rugosidade</u> Sa = 1.41μm St = 13μm Sp = 5.9μm Sv = 7.12μm</p> <p><u>Rugosidade</u> Ra = 1,33μm Rt = 10,2μm Ry = 11,8μm</p> <p><u>Brilho – 20°</u> Long.:57 GU</p>

Tabela 5.13 – Comparação topografias das superfícies material lixado e material RO laminado em laboratório.



5.7 CONCLUSÕES

O parâmetro da superfície que melhor representou a rugosidade em função da variação de carga de laminação foi “St” (topográfico) ou “Rt” (perfil).

O aumento da rugosidade do cilindro e o alongamento promovem aumento na rugosidade final da tira (relação direta) e pelo contrário a espessura apresenta comportamento de uma relação inversa, onde seu aumento promove diminuição de Raf. A rugosidade do cilindro possui maior influência para variação da rugosidade final da tira.

A simulação em laboratório permitiu identificar que várias condições atenderam a especificação inicial, porém a situação que mais se aproximou da resposta desejada, utilizou rebolo C80, rugosidade de cilindro 1,5 μ m Ra.

Entretanto,

Devido a facilidade de processamento do cilindro, custo e homogeneidade da superfície, **definiu-se utilizar rebolo AC36 e rugosidade superficial do cilindro de 2 μ m Ra.**

6 FASE 2 - EXPERIÊNCIA INDUSTRIAL

Neste capítulo é feita a descrição da segunda fase do trabalho apresentando os resultados da experiência industrial de laminação com cilindro rugoso. A rugosidade do cilindro utilizada por sugestão da simulação realizada em laboratório é a de $2\mu\text{m Ra}$, que é igual ao dobro da rugosidade objetivada na tira.

O objetivo da experiência é de identificar quais os parâmetros de laminação (carga, tração de ré e tração de vante, alongamento) que interferem diretamente com a transferência de rugosidade do cilindro para a tira, e com isso avaliar quais os valores que deveriam ser utilizados para aperfeiçoar a transferência de rugosidade do cilindro de laminação para tira.

Para melhor entendimento da experiência industrial, este capítulo foi dividido nos seguintes tópicos:

- Metodologia;
- Equipamento;
- Caracterização dos cilindros de laminação;
- Caracterização das amostras a serem analisadas;
- Resultados;
- Análise e discussão dos resultados;
- Conclusões.

6.1 METODOLOGIA

Ensaio de laboratório mostraram qual é a rugosidade do cilindro mais adequada para esta experiência e também deram algumas indicações do comportamento de transferência de rugosidade. Aplicando conceitos adquiridos em laboratório, definiu-se utilizar cilindros com rugosidade superficial de $2\mu\text{m}$ de Ra e 794mm de diâmetro.

Para avaliação do comportamento de transferência de rugosidade do cilindro para tira durante laminação, foram identificados como principais parâmetros a carga de laminação, a tração de vante e a tração de ré. O planejamento da experiência é apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetros da experiência industrial realizada laminador de encruamento.

N	Carga(t)	Vante(t)	Ré(t)	Along.(%)
0	400	18	20	2,48
1	100	5	10	0,19
2	100	5	15	0,25
3	100	5	20	0,27
4	100	10	10	0,27
5	100	10	15	0,34
6	100	10	20	0,40
7	105	18	10	0,47
8	105	18	15	0,50
9	105	18	20	0,57
10	130	5	10	0,51
11	130	5	15	0,59
12	130	5	20	0,78
13	130	10	10	0,60
14	130	10	15	0,72
15	130	10	20	0,85
16	130	18	10	0,78
17	130	18	15	0,86
18	130	18	20	1,00
19	174	5	10	0,86
20	174	5	15	1,00
21	174	5	20	1,19
22	174	10	10	1,00
23	174	10	15	1,13
24	174	10	20	1,28
25	174	18	10	1,22
26	174	18	15	1,32
27	174	18	20	1,45
28	350	5	10	1,87
29	350	5	15	2,00
30	350	5	20	2,22
31	350	10	10	2,00
32	350	10	15	2,24
33	350	10	20	2,40
34	350	18	10	2,36
35	350	18	15	2,49
36	350	18	20	2,49
37	400	5	10	2,12
38	400	5	15	2,00
39	400	5	20	2,45
40	400	10	10	2,36
41	400	10	15	2,48
42	400	10	20	2,48
43	400	18	10	2,48
44	400	18	15	2,48
45	400	18	20	2,48
46	170	10	15	1,23

Os valores do alongamento mostrados na última coluna da tabela acima foram anotados durante processamento do material. A primeira linha da Tabela 6.1 apresenta o valor utilizado anteriormente e a última linha o melhor valor encontrado para os parâmetros.

As condições de laminação aplicadas na experiência são as seguintes: aço 439 de 1,5mm de espessura com 1.240mm de largura, laminado a uma velocidade de 20m/min utilizando cilindro texturizado com rebolo grosso e apresentando rugosidade superficial de $\sim 2\mu\text{m Ra}$.

6.2 EQUIPAMENTO

Foram realizadas experiências no laminador de encruamento industrial da ArcelorMittal Inox Brasil, fabricante SECIM (Figura 6.1). A descrição das características do laminador industrial são apresentadas na Tabela 6.2.



Figura 6.1 – Laminador de encruamento, área industrial da ArcelorMittal Inox Brasil.

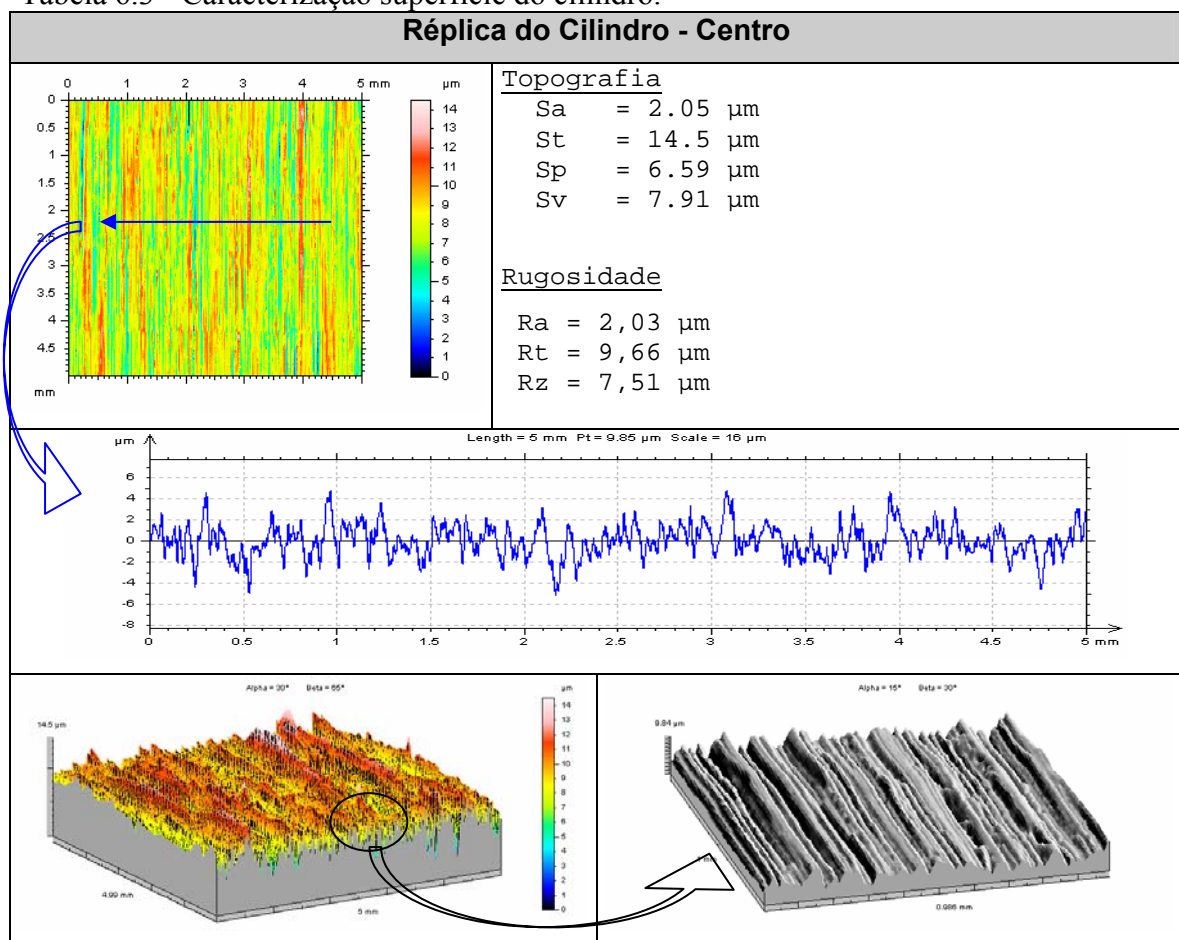
Tabela 6.2 – Valores máximos dos parâmetros de processamento do laminador de encruamento.

Largura máxima	Espessura máxima	Diâmetro cilindros	Velocidade (máx)	Tração máxima	Força de laminação	Motor do laminador
1500mm	3,5mm	800-750mm	150m/min	20t	1200t	515kw

6.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CILINDROS DE LAMINAÇÃO

Nesta seção é apresentado na Tabela 6.3 o resultado da caracterização superficial no centro e borda de um dos cilindros preparado para esta experiência com rebolo A45 objetivando e apresentando rugosidade na faixa de 1,9 a 2,1 μm Ra. Para avaliar a superfície dos cilindros foram modeladas réplicas da suas superfícies em epóxi e posteriormente caracterizadas no perfilômetro.

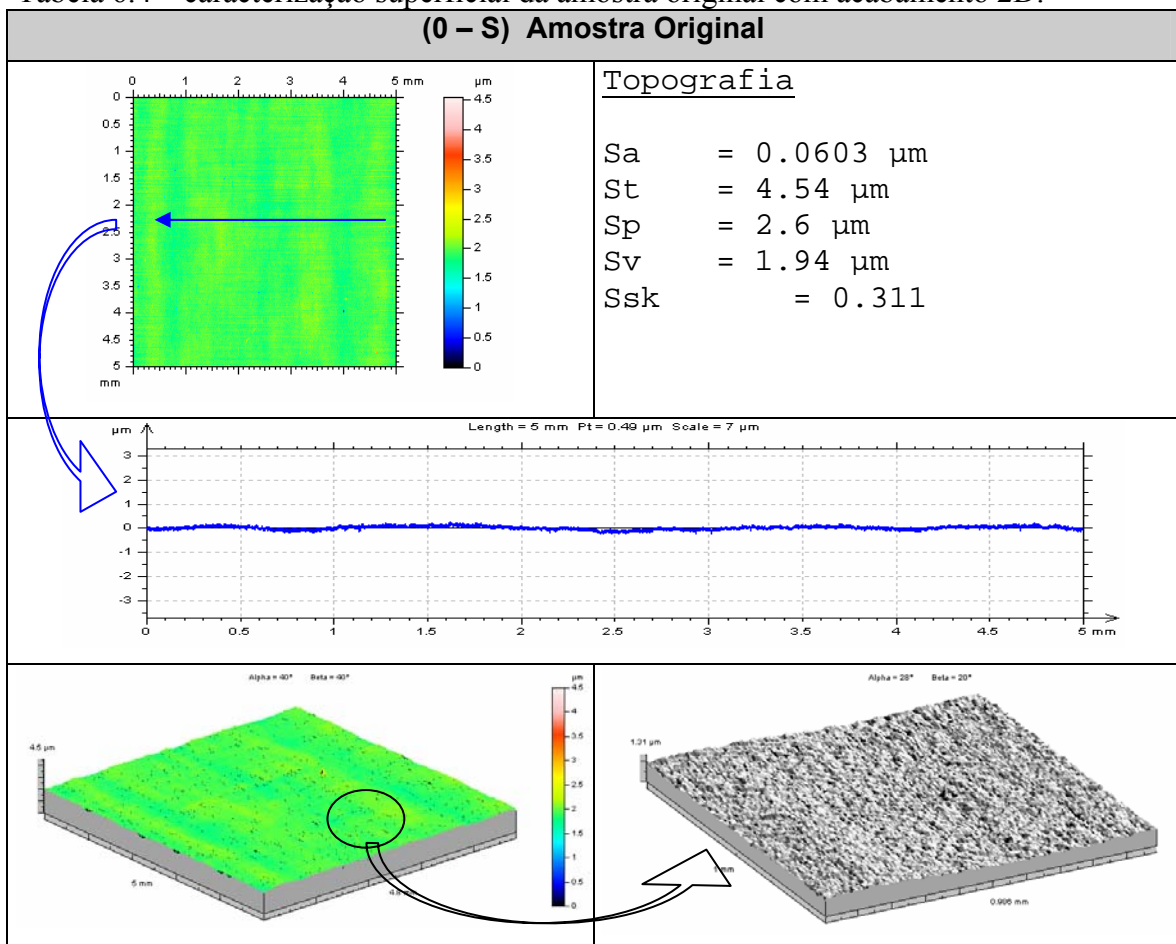
Tabela 6.3 - Caracterização superfície do cilindro.



6.4 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS A SEREM LAMINADAS

Para realização de experiência industrial foi selecionada a bobina de aço inoxidável 439 com 3t de peso, 1,5mm de espessura por 1245mm de largura. A composição química e as propriedades mecânicas do material são apresentadas na Tabela 3.1 e Tabela 3.2, respectivamente. Na Tabela 6.4 é apresentada a caracterização da amostra antes de ser laminada. Pode-se observar praticamente ausência de rugosidade.

Tabela 6.4 – caracterização superficial da amostra original com acabamento 2D.



6.5 RESULTADOS

Após aplicar a variação dos parâmetros apresentados Tabela 6.1, durante laminação com cilindro rugoso, amostras tamanho (A4 - 210 x 297 mm) foram cortadas no centro da largura da tira e caracterizadas quanto seu aspecto visual (rugosidade e brilho).

A tabelas apresenta as condições de processo (carga de laminação, tensão de vante, tensão de ré e alongamento sofrido), o resultado da amostra após laminação (brilho final e rugosidade (Ra, Ry, Rt) finais).

6.6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Figura 6.2 mostra os valores percentuais da taxa de transferência de rugosidade T_{Ra} [calculada segundo equação (5.1)] e da taxa de transferência de brilho (brilho final da tira laminada dividido pelo brilho inicial da tira) em função da carga de laminação. Os pontos nesta figura representam a média aritmética de todas as variações dos parâmetros de laminação, previstas na experiência, para cada uma das cargas de laminação.

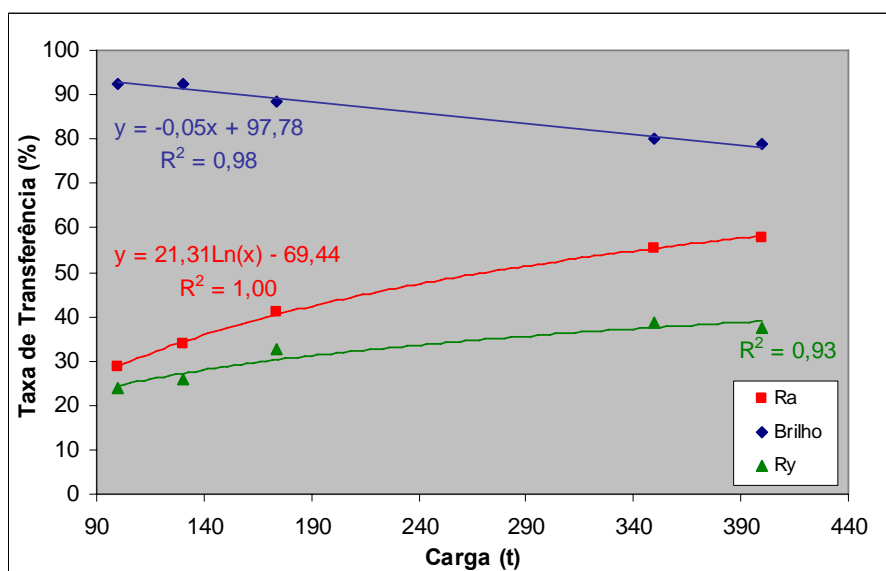


Figura 6.2 – Taxa de transferência do brilho e da rugosidade (Ra e Ry) em função da carga de laminação.

Pode-se observar a partir das equações de ajuste neste gráfico, forte correlação logarítmica da carga de laminação com a taxa de transferência da rugosidade (vermelho) e uma correlação praticamente linear para a taxa de transferência do brilho (azul). É observado maior variação para taxa de transferência de rugosidade Ra do que para os demais parâmetros.

O gráfico da Figura 6.3 apresenta a relação linear existente entre a rugosidade Ra e o brilho medido em cada amostra ensaiada. A relação é inversa, quanto maior a rugosidade obtida na superfície do material, menor é seu brilho e sua equação é mostrada no gráfico:

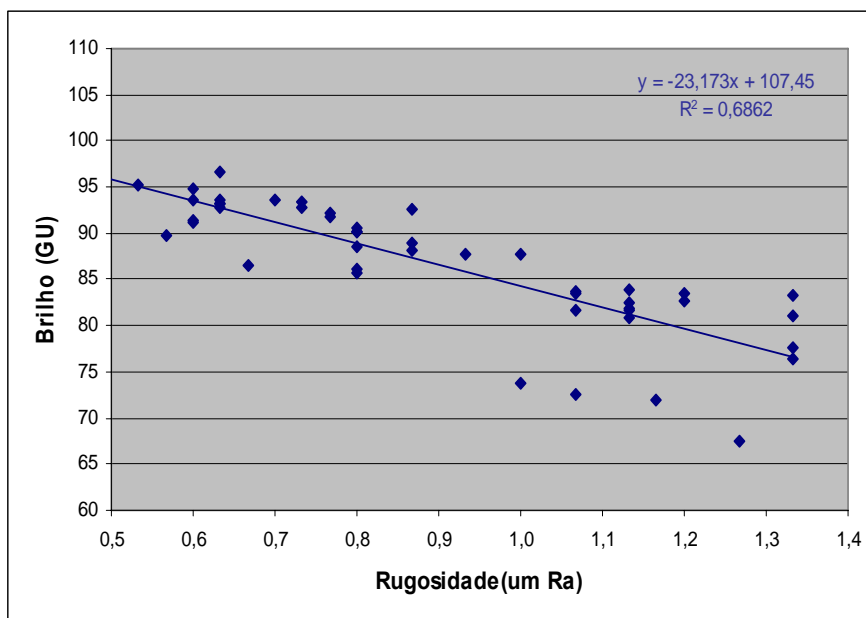


Figura 6.3 – Relação de rugosidade e brilho material laminado.

As diferentes combinações de aplicação da carga e das trações de vante e de ré, durante a laminação de encruamento, irão promover um alongamento de 1 a 3% do material. Para obter resultado desejado no produto final é necessário conciliar a quantidade de alongamento sofrido, a rugosidade e brilho obtido em sua superfície.

O gráfico da Figura 6.4 mostra que a taxa de transferência de rugosidade, dada pela equação (7.1) e brilho variam linearmente com o alongamento sofrido pela amostra e estão representados pelas equações das retas ajustadas no mesmo gráfico.

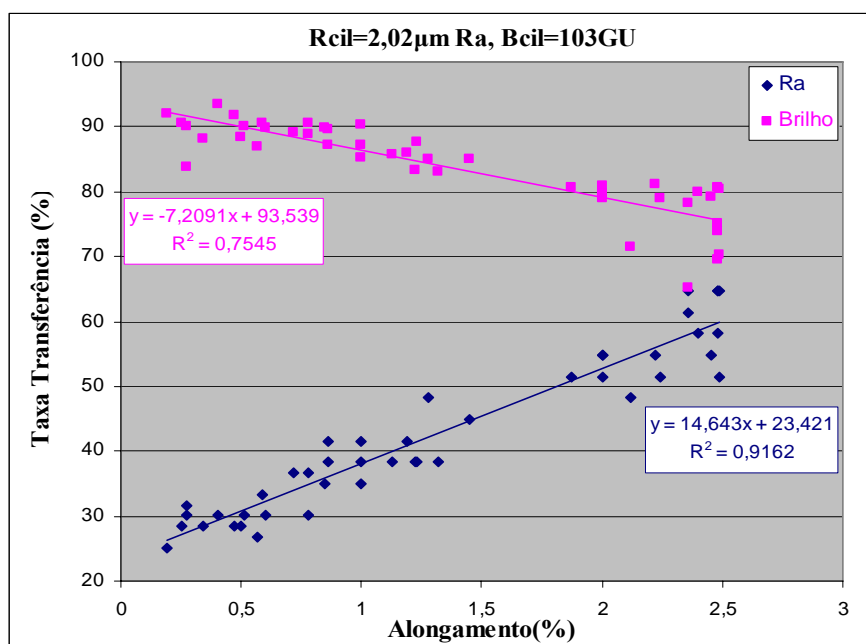


Figura 6.4 –Taxa de transferência do brilho e da rugosidade Ra em função do alongamento sofrido durante laminação.

Para aço 439 com 1,5mm de espessura laminado com cilindro de rugosidade superficial de 2μm Ra a taxa de transferência de rugosidade em função do alongamento do material é dada pela equação:

$$T_{Ra} = 14,643 \cdot \text{Alongamento}(\%) + 23,421 \quad (6-1)$$

Foi visto nas figuras anteriores o efeito da carga de laminação e do alongamento da tira para transferência de rugosidade do cilindro durante a laminação. Para verificar a interação das trações de laminação com o resultado desta transferência foi realizado um estudo estatístico, aplicando metodologia de análise de regressão de resposta de superfície, que será apresentado em seguida.

Considerando os parâmetros de laminação, carga, tração de vante e de ré e a taxa de transferência de rugosidade é realizada a análise de regressão de resposta de superfície com auxílio do software de estatística MINITAB v13.32, cujo resultado é apresentado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Análise da regressão da taxa de transferência de rugosidade em função dos parâmetros de laminação com cilindro rugoso igual a 2 μ m Ra.

MINITAB STATISTICAL SOFTWARE						
Response Surface Regression: Tx. Ra versus Carga; tração “vante”; tração “ré”						
The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for Tx. Ra						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	0,50956	0,016589	30,717	0,000		
Carga	0,14952	0,006724	22,237	0,000		
vante	0,02245	0,006655	3,373	0,002		
ré	0,00796	0,006685	1,191	0,241		
Carga*Carga	-0,05592	0,018163	-3,079	0,004		
vante*vante	-0,02018	0,011904	-1,695	0,099		
ré*ré	-0,00376	0,011170	-0,337	0,738		
Carga*vante	0,01936	0,008118	2,385	0,022		
Carga*ré	-0,00251	0,008170	-0,307	0,760		
vante*ré	-0,00720	0,007985	-0,902	0,373		
S = 0,03602 R-Sq = 93,4% <u>R-Sq(adj) = 91,7%</u>						
Analysis of Variance for Tx. Ra						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0,660616	0,660616	0,073402	56,56	0,000
Linear	3	0,635697	0,656345	0,218782	168,58	0,000
Square	3	0,016355	0,016766	0,005589	4,31	0,011
Interaction	3	0,008564	0,008564	0,002855	2,20	0,105
Residual Error	36	0,046720	0,046720	0,001298		
Total	45	0,707337				
Estimated Regression Coefficients for Tx. Ra using data in uncoded units						
	Termo	Coeficiente				
	Constant	-0,0492802				
	Carga	0,00206121				
	Tração vante	0,0127965				
	Tração ré	0,00949443				
	Carga*Carga	-2,48521E-06				
	vante*vante	-0,000477551				
	ré*ré	-0,000150558				
	Carga*vante	0,0000198585				
	Carga*ré	-3,34674E-06				
	vante*ré	-0,000221588				

Na Tabela 6.5 é apresentada a regressão linear da taxa de transferência de rugosidade em função das trações de vante e de ré e da carga de laminação. Os coeficientes desta função são apresentados em negrito no final da própria tabela, o fator de ajuste aos pontos foi muito bom igual a 91,7%.

A Figura 6.5 apresenta 6 gráficos que descrevem o alongamento, a rugosidade da Tira (Ra) e a taxa de transferência da rugosidade (Tx.Ra) (ordenadas/linhas) em função da carga de laminação e das trações de vante e de ré (abscissas/colunas).

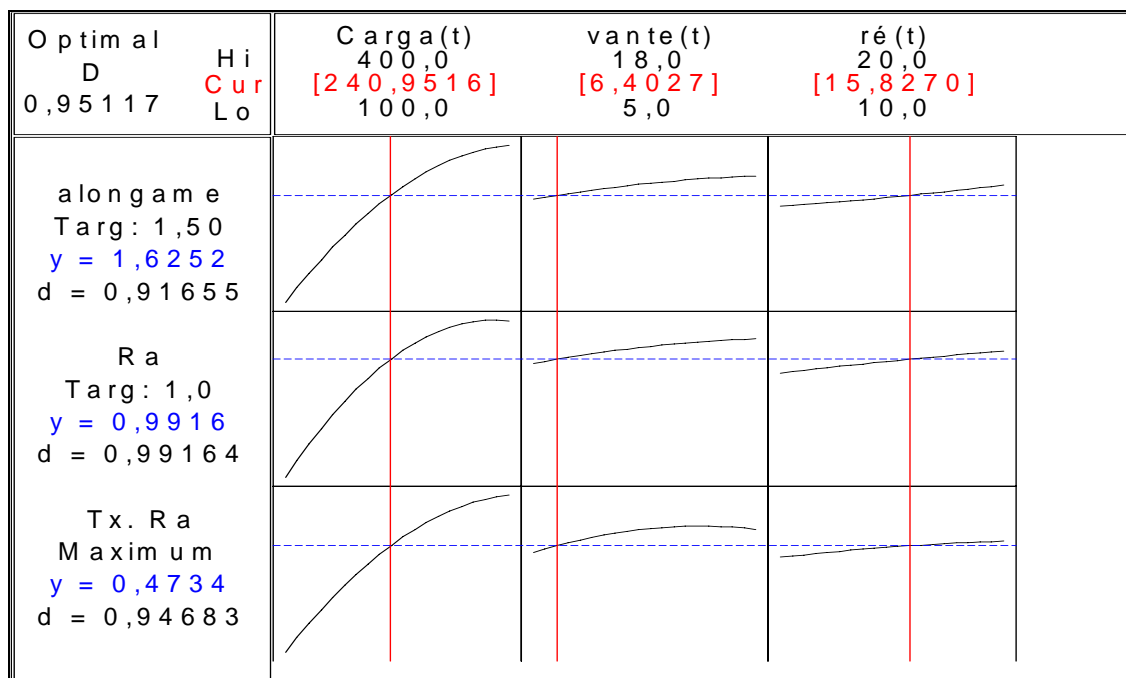


Figura 6.5 – Correlação de Raf x alongamento, espessura e Rcil.

Para análise dos dados e entendimento da correlação entre os parâmetros observados, foi utilizado MINITAB, que ajustou funções para as medições fornecidas. Aplicando três restrições (abaixo) nas funções obtidas foi possível identificar uma das soluções (em azul na figura anterior) para o modelo. Restrições (“*Target*”):

1. Alongamento do material deveria ser 1,5%;
2. Rugosidade da tira Ra deveria ser 1 μm Ra;
3. A taxa de transferência deveria ser máxima.

A solução apontada pelo modelo indicou que a carga de laminação deveria se igual a 240t, tração de vante 6,4t e de ré 16t. Analisando com mais cuidado a Figura 6.5, verifica-se que a carga possui uma influência maior na variação da taxa de transferência de rugosidade, como está comprovado no gráfico da Figura 6.2.

Adotando valor da carga de laminação sugerido pelo modelo, monta-se o gráfico 3D da Figura 6.6 que apresenta a variação da taxa de transferência de rugosidade em função das trações de vante e de ré para carga de laminação 241t.

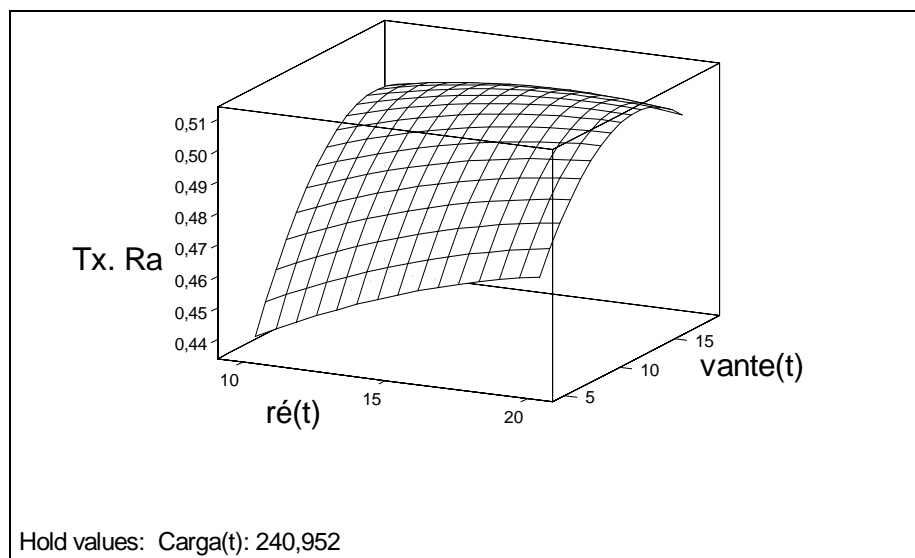


Figura 6.6 –Correlações dos parâmetros de laminação com carga de laminação igual a 240,95t.

Observando o gráfico acima, verifica-se o aumento crescente da taxa de transferência de rugosidade com a tração de ré e a presença de um patamar máximo em 10 t para tração de vante. Este resultado sugere que a tração de ré deve ser definida em valores bem superiores a tração de vante, com intuito de maximizar a transferência de rugosidade.

6.7 CONCLUSÕES

Verificou-se a dependência “linear” decrescente do brilho da superfície do material com a rugosidade superficial da tira laminada.

Para aço 439 com 1,5mm de espessura laminado com cilindro de rugosidade superficial de 2 μ m Ra a taxa de transferência de rugosidade em função do alongamento do material é dada pela equação (6.1):

$$T_{Ra} = 14,643.Alongamento(\%) + 23,421$$

A função representada pela somatória dos termos vezes suas respectivas constantes listados Tabela 6.5 são aplicáveis e podem auxiliar na laminação com cilindros texturizados. A avaliação desta função indica que a carga possui maior influência no aumento da taxa de transferência de rugosidade durante laminação de encruamento.

Os valores dos parâmetros de laminação carga e trações foram definidos para as condições de laminação de encruamento do aço 439 de 1,5mm de espessura, cilindro de laminação com rugosidade superficial 2,0 μ m, são mostradas abaixo.

Defini-se a prática de laminação descrita pelos seguintes parâmetros de laminação:

A solução apontada pelo modelo indicou que a carga de laminação deveria se igual a 240t, tração de vante 6,4t e de ré 16t, alongamento de 1,5%.

7 FASE 3 - AVALIAÇÃO DO PRODUTO OBTIDO

Este capítulo apresenta a avaliação às propriedades superficiais, estampabilidade, resistência à corrosão e oxidação obtidas para produto 439/RO desenvolvido na fase anterior.

Para validar a acabamento RO, será avaliado seu comportamento em comparação ao acabamento lixado, aplicando-o em diferentes aços inoxidáveis ferríticos como AISI 430, com menor espessura e menor rugosidade. Análises de resistência à corrosão, oxidação e estampagem serão utilizadas para verificar comportamento final do produto obtido.

Este capítulo foi dividido nos seguintes tópicos:

- Metodologia;
- Resultados;
- Análise, discussão dos resultados e conclusões.

7.1 METODOLOGIA

O acabamento RO foi desenvolvido na ArcelorMittal Inox Brasil em aço inoxidável ferrítico 430 com espessura igual a 0,4mm e utilizando rebolo grosso na retífica para preparação dos cilindros de laminação. Após sua produção, foi realizada caracterização do seu aspecto superficial e se comparou o seu resultado ao do acabamento lixado.

Além da caracterização da superfície obtida, foram avaliadas outras propriedades como: resistência à oxidação em baixas temperaturas, resistência a corrosão e estampabilidade. RAMANATHAN⁽³⁸⁾ realizou estudo de oxidação em aço austenítico estabilizado com nióbio, baseado em seu trabalho foram planejados dois ensaios em laboratório para avaliar a resistência à oxidação a baixas temperaturas dos acabamentos sugeridos (lixado e RO) em aços 430, 439 e 304.

O primeiro estudo foi realizado para conhecer a temperatura de amarelamento do material, para este estudo utilizou-se forno mufla Vulcan modelo 3-550 em dois tempos de tratamento 3 e 24hs a diferentes temperaturas.

O segundo estudo visou conhecer a cinética de oxidação (amarelamento x tempo) em condição de aquecimento e resfriamentos cíclicos. Para isso, foi utilizado o equipamento Dip Dry (Figura 7.1) da Analógica a temperaturas de aquecimento iguais a 240°C e 180°C, em ciclos de aquecimento e resfriamento com periodicidade de 30 minutos cada.

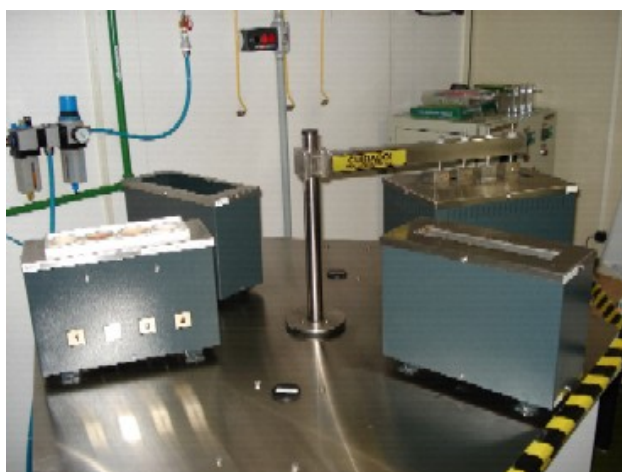


Figura 7.1 – Equipamento Dip Dry e suas quatro células de aquecimento, resfriamento, repouso e de solução aquosa.

Para avaliação da resistência à corrosão, foi aplicada metodologia de ensaio potencioestático em circuito aberto (OCP) descrita por Kolman⁽³⁹⁾ utilizando OCP em solução NaCl 3,5% p/v à temperatura ambiente. Foram feitos testes de exposição atmosférica e resistência ao meio salino utilizando câmara de névoa salina da Equilan, solução de NaCl 5%, pH 6,5 a 7 e temperatura 35°C de acordo com a norma ASTM B117.

Finalmente, para avaliação da estampabilidade (estiramento/ embutimento) foram realizados ensaios em prensa hidráulica (Erichsen modelo 142-40) do tipo: - SWIFT (LDr e Orelhamento) com lubrificação em ambos lados da chapa, força de 5kN no prensa chapas e velocidade de 600mm/min e - ERICHSEN, com cargas de 50kN no

prensa chapas e velocidade do teste 20mm/min. Pasta grafitada Molykote e PVC como lubrificante foram utilizados. Este ensaio está de acordo com com norma DIN 50101.

7.2 RESULTADOS

Neste capítulo será apresentada a caracterização do acabamento RO aplicado em vários diferentes aços. Os resultados estão divididos em sete etapas: caracterização da superfície, resistência à oxidação contínua e cíclica em baixas temperaturas, resistência à corrosão em célula potencioestática, câmara de névoa salina e exposição atmosférica e finalmente estampabilidade dos materiais.

7.2.1 CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Visando comparar o acabamento RO com o acabamento lixado, são apresentados nas Tabela 7.1 e Figura 7.3 alguns parâmetros superficiais de vários aços com diferentes espessuras. Como é possível constatar, os acabamentos apresentaram mesmo brilho superficial.

Tabela 7.1 – caracterização superfície.

Aço	Espessura (mm)	acabamento	Brilho 85°GU	Cor			Rugos. $\mu\text{m Ra}$	YE
				L	C	h°		
430	0,4	LIXADO	113	76,2	5,4	90,2	0,31	12,4
	0,4	RO	115	76,0	1,9	90,3	0,49	4,2
304	0,8	LIXADO	53	55	4	91,7	0,92	11,5
439	1,5	RO	55	52	2,2	92,1	1,02	4,7

A Figura 7.2 apresenta ilustrativamente as análises obtidas por microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e perfilometria, onde são mostrados aspectos superficiais do acabamento RO.

Os parâmetros de cor são equivalentes, mostrando pequena variação no parâmetro saturação (C). Esta variação é retratada no parâmetro de amarelamento (YE) que mostra forte amarelamento da superfície lixada devido a oxidação superficial. O YE mais elevado indica que o acabamento lixado, inicialmente já possui oxidação em sua superfície, com valores três vezes maiores do que o acabamento RO.

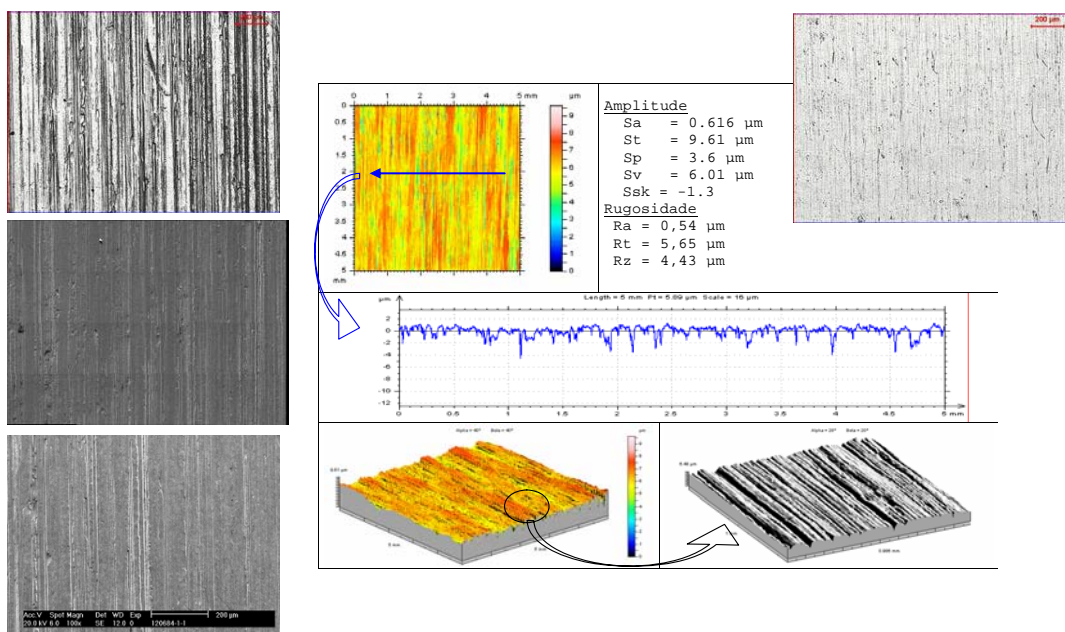


Figura 7.2 – Caracterização superficial acabamento RO do aço 430A, microscopia óptica, eletrônica de varredura e perfilometria.

As imagens da superfície apresentadas na Figura 7.3 mostram que os acabamentos são muito similares, com uma homogeneidade ligeiramente melhor para acabamento lixado. As cotas do parâmetro de rugosidade St obtidos nas topografias são 3,75 e 3,68 μm .

Ye	Microscopia Óptica	Topografia 3D
12,4		
4,2		

Figura 7.3 – Análise superfície aço 430/lixado linha superior e 430/RO linha inferior.

7.2.2 OXIDAÇÃO CONTÍNUA EM BAIXAS TEMPERATURAS

Para esta avaliação são apresentados os gráficos das Figura 7.4 e Figura 7.65, eles mostram a relação da oxidação (amarelamento) versus a temperatura dos aços estudados, para os tempos de 3 e 24hs.

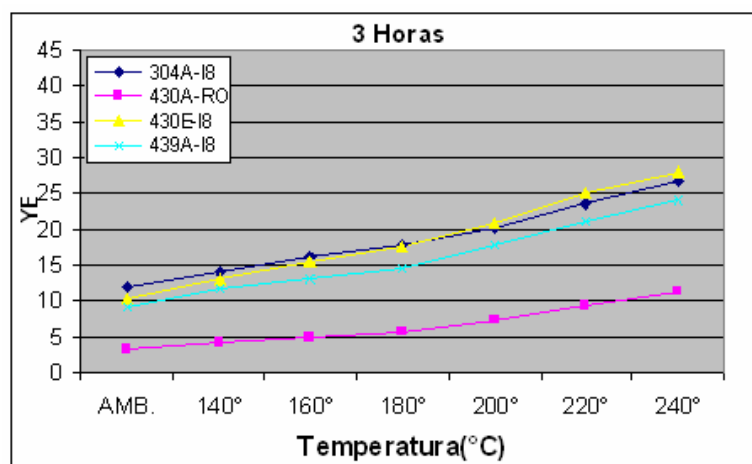


Figura 7.4 – Índice de amarelamento x temperatura, para tratamento de 3 horas.

Verificando o gráfico de YE de três horas (Figura 7.4) é possível constatar que para todas as amostras analisadas existe um limiar na inclinação em 180°C, isto quer dizer que a partir da temperatura 180°C observa-se um aumento da variação de amarelamento, representada pelo aumento da inclinação da reta do gráfico.

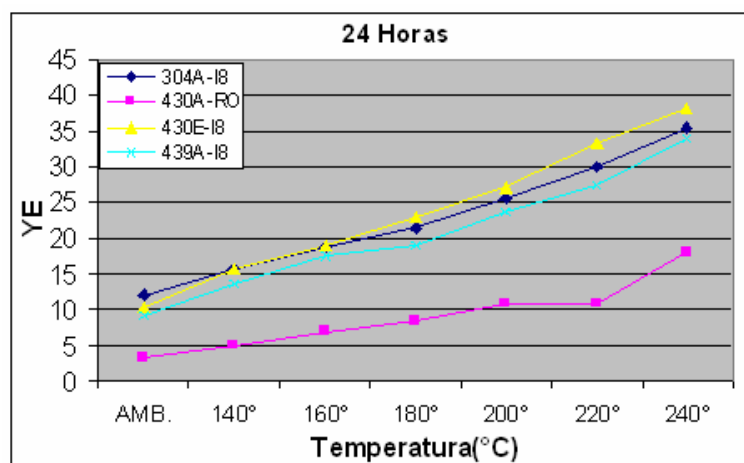


Figura 7.5 – Índice de amarelamento x temperatura, para tratamento de 24 horas.

É definido como valor de início do amarelamento visual YE igual a 20. Extrapolando este valor para os outros aços/acabamento a 3 e 24h calcula-se qual seria a temperatura de oxidação para cada condição, e estas são apresentadas na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Temperaturas de amarelamento (°C) por produto.

Aço	T _{amarelo} (3h)	T _{amarelo} (24h)
P430 (I8)	200°C	180°C
P304 (I8)	200°C	180°C
439 (I8)	220°C	190°C
P430 (RO)	333°C	245°C

Na Figura 7.6 observam-se as amostras tratadas às várias temperaturas nos tempos de 3hs-acima e 24hs-abaixo. Na primeira coluna pode ser vista amostra sem tratamento e nas demais colunas amostras tratadas as temperaturas de (140, 160, 180, 200, 220 e 240°C) respectivamente. As linhas apresentam os aços 304/I8, 430A/IL, 430E/I8 e 439/I8.



Figura 7.6 – Amostras processadas para levantamento da temperatura de amarelamento.

É possível distinguir a diferença de amarelamento entre as várias condições e visualizar claramente a diferença de oxidação das amostras com acabamento RO. É possível concluir que quanto maior a temperatura e maior tempo de tratamento maior será o amarelamento do material, independente do tipo de aço.

7.2.3 OXIDAÇÃO CÍCLICA EM BAIXAS TEMPERATURAS

Após estudo de oxidação anterior indicar temperaturas de amarelamento (180°C e 240°C) para os acabamentos em questão, foi programado um estudo da cinética de oxidação utilizando estas temperaturas.

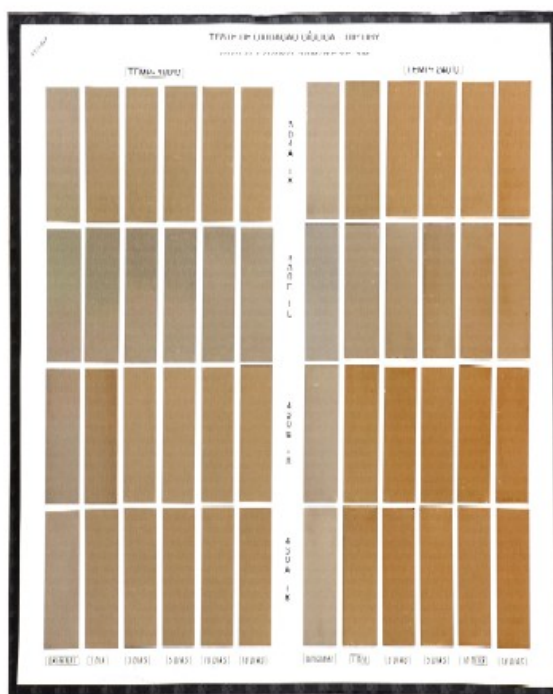


Figura 7.7 – Amostras processadas para levantamento da cinética de oxidação cíclica.

O objetivo de avaliar a cinética de oxidação é conhecer melhor a evolução da oxidação destes acabamentos quando submetidos a temperaturas limites em condições aproximadas a aplicações de aquecimento e resfriamento cíclico, como em mesa de fogões.

A Figura 7.7 apresenta o resultado das amostras tratadas no “Dip Dry”, onde é visível a diferença de oxidação entre as várias amostras. Nesta figura as amostras com acabamento RO (segunda linha) apresentaram menor intensidade de oxidação.

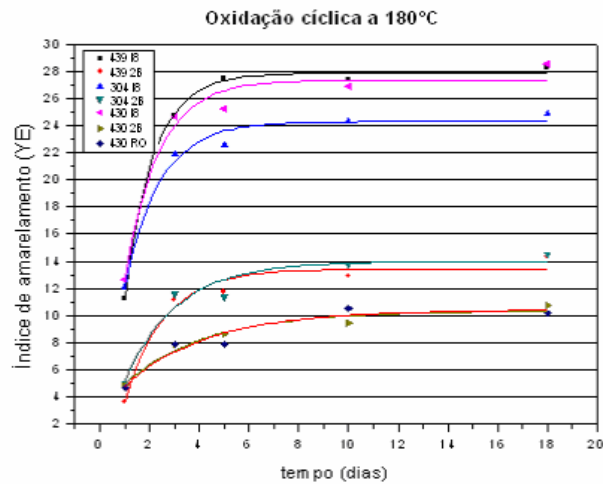


Figura 7.8 – Índice de amarelamento x tempo, para temperatura igual a 180°C.

As Figura 7.8 e Figura 7.9 apresentam os resultados da variação do amarelamento (oxidação) para o diferentes aços e acabamentos com espessura 0,5mm tratadas a temperaturas 180°C e 240°C pelo tempo de 20 dias. Nos pontos medidos foi ajustada função exponencial do tipo:

$$y = y_0 + A_a \cdot \exp\left(-\frac{\text{tempo(dias)}}{t_0}\right) \quad (7-1)$$

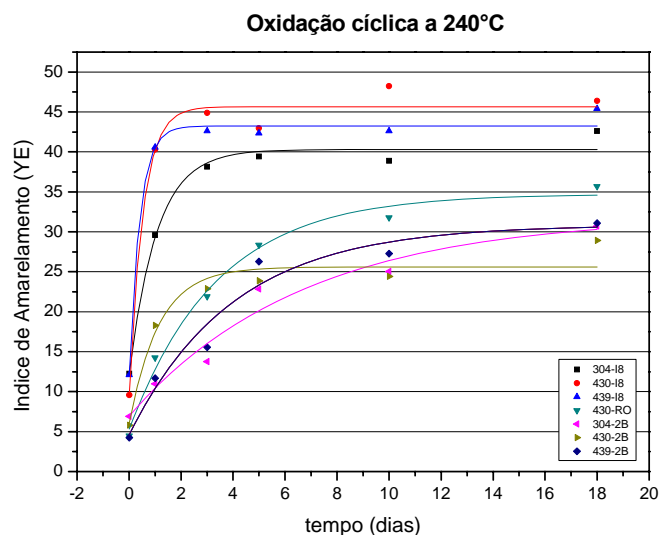


Figura 7.9 – Índice de amarelamento x tempo, para temperatura igual a 240°C.

A partir do ajuste da curva é possível determinar qual amarelamento máximo alcançado para cada condição e qual foi o tempo decorrido para atingir este patamar.

7.2.4 RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM CÉLULA ELETROQUÍMICA

Esta seção irá apresentar comparação da resistência à corrosão dos aços 304, 430, para os acabamentos lixados e RO. O ensaio utilizado no laboratório para levantar a resistência à corrosão é conhecido como ensaio de polarização eletroquímica (curva potenciodinâmica).

Este ensaio depende da qualidade superficial da amostra a ser analisada. E apesar de ser uma excelente ferramenta para caracterizar resistência à corrosão por pite em metais com diferentes composições químicas e com superfície polida (lisa), o acabamento rugoso produz um ruído elevado que inviabiliza utilização desta técnica.

Referência bibliográfica⁽³⁹⁾ sugeriu que ensaio de potencial de circuito aberto (OCP) permitiria comparar à resistência a corrosão em diferentes aços e acabamentos com superfícies rugosas.

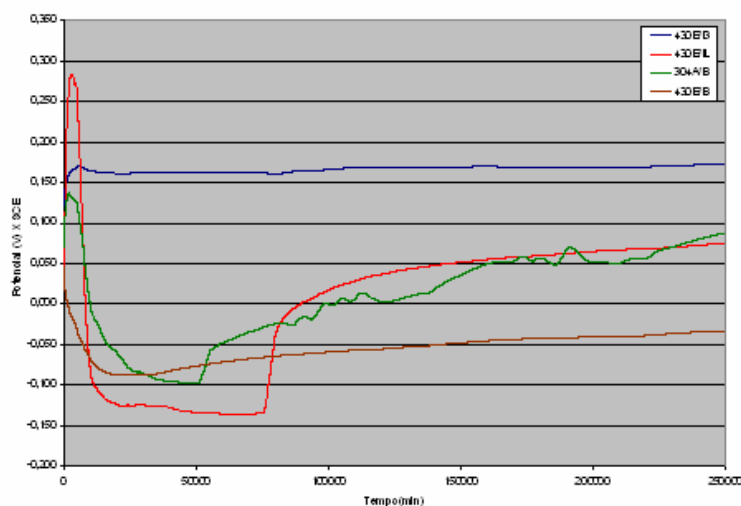


Figura 7.10 – Apresenta as curvas potencial vs. tempo obtidas neste trabalho para os aços inoxidáveis 304 e 430, comparando os acabamentos encruado 2B (azul), lixado (verde, marrom) e RO (vermelho).

Neste ensaio, são realizados os levantamentos das curvas de potencial em circuito aberto versus tempo(s) em meio salino com 0,15% NaCl. A análise das curvas permite saber qual é o tempo necessário para que o potencial se estabilize e o valor do potencial de corrosão de cada material, quanto maior este valor, maior será sua resistência a corrosão em comparação aos demais materiais.

Solução salina foi preparada e as amostras foram ensaiadas em período de 100hs cada. O gráfico da Figura 7.10 apresenta as curvas com o patamar do potencial de corrosão de cada amostra. É possível observar que em “condições de laboratório” o comportamento da amostra 430/RO é similar ao comportamento do 304 lixado e que o material 430/2B apresentou potencial mais estável indicando maior resistência à corrosão.

7.2.5 RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA

Para avaliação da resistência à corrosão em meio salino, as amostras selecionadas (430 e 439), foram submetidas a exposição em câmara de névoa salina a solução de 5% NaCl, durante 1000hs. Resultado qualitativo comparando as diferentes superfícies são apresentados a seguir.

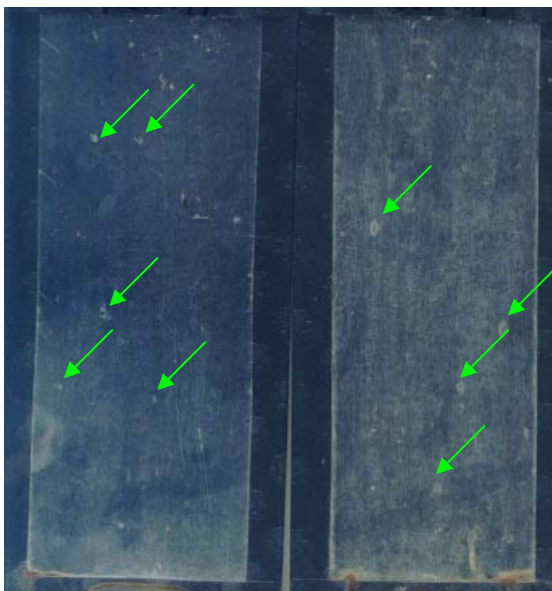


Figura 7.11 – Amostras de 430 RO (esquerda) e lixado (direita) após 1000hs de tratamento em câmara de névoa salina, solução de cloreto de sódio 5%.

As Figura 7.11 e Figura 7.12 mostram resultado das amostras após exposição em câmara de névoa salina. Está visível que o acabamento RO apresentou melhor comportamento à resistência ao meio salino e o material 439/RO dentre as amostras avaliadas apresentou o melhor resultado, observar quantidade e tamanho dos pontos de corrosão formados (setas em verde).

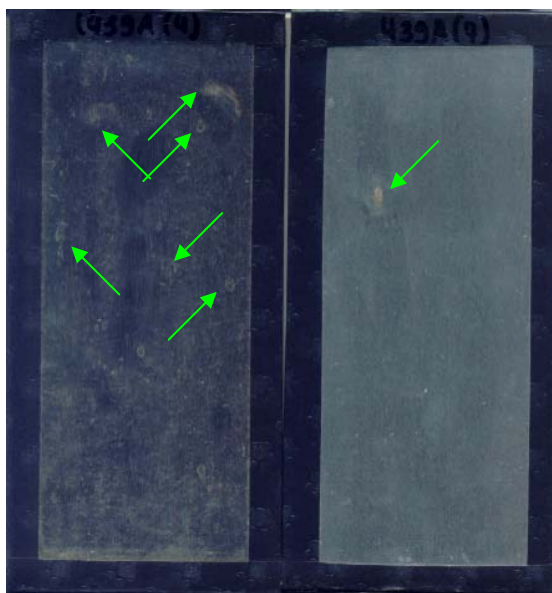


Figura 7.12 – Amostras de 439 RO (direita) e lixado (esquerda) após 1000h de exposição em câmara de névoa salina.

7.2.6 RESISTÊNCIA À CORROSÃO POR EXPOSIÇÃO ATMOSFÉRICA

Para concluir a avaliação da resistência a corrosão do acabamento RO é apresentado o estudo de corrosão por exposição atmosférica em área industrial. As Figura 7.13 e Figura 7.14 apresentam a evolução do brilho e do amarelamento da superfície das amostras analisadas, onde se observa leve amarelamento da amostra exposta *outdoor*.

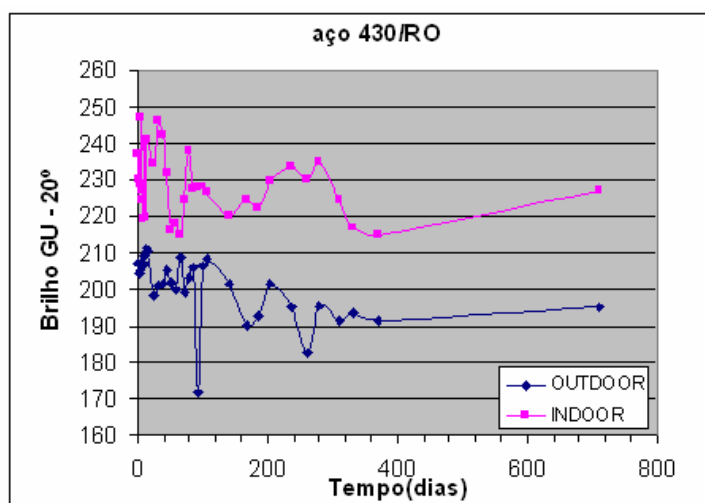


Figura 7.13 – Gráfico do brilho vs tempo (dias) de exposição *indoor* e *outdoor* da amostra de 430/RO.

Vale ressaltar que as caracterizações das amostras expostas em *outdoor* são obtidas da face inferior, aquela que está voltada para baixo. Não foi observada após período de exposição variação do aspecto visual que reprovasse o material. Ocorreu leve amarelamento somente naquela amostra exposta externamente. Lembrando que amarelamentos só são perceptíveis visualmente em valores acima de 20.

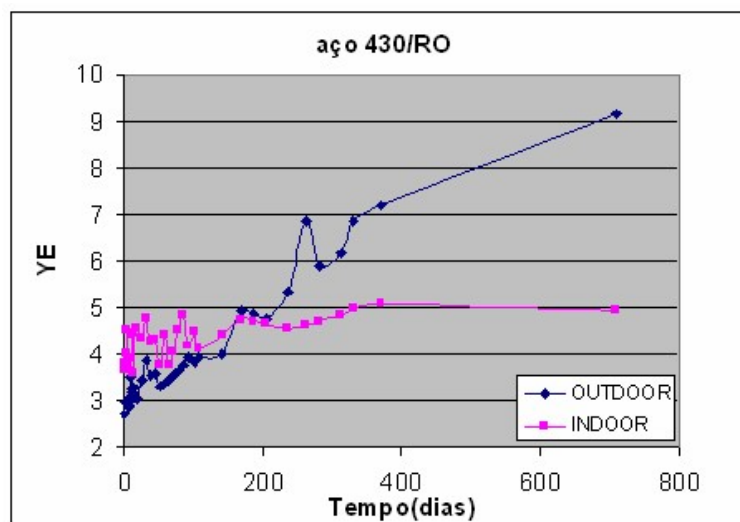


Figura 7.14 – Gráfico do índice de amarelamento vs tempo (dias) de exposição *indoor* e *outdoor* da amostra de 430/RO.

7.2.7 ESTAMPABILIDADE

Para avaliar estampabilidade do novo acabamento foram realizados ensaios de estiramento e embutimento nos aços 430 e 439 nos acabamentos: lixado , Rolled-On (RO) e somente encruado com cilindro liso (2B).

Tabela 7.3 – Valores ensaios Swift e Erichsen aços 430 e 439 com acabamentos lixado, 2B, RO.

Aço Acabamento	430 lixado	430 RO	430 2B	439 lixado	439 RO	Melhor
Espessura(mm)	0,6	0,6	0,6	1,5	1,5	
Estiramento Índice Erichsen (mm)	8,7	9,74	8,67	8,67	9,82	↑
Embutimento Swift LDR	2,1	2,1	1,94	2,18	2,2	↑
Orelhamento (%)	2,6	2,07	4,7	5,8	3,2	↓

É possível observar na Tabela 7.3 que os aços 430 e 439 com acabamento RO apresentaram melhor resultado de estiramento, com IE (índice Erichsen) em torno de 12% superior aos demais. O maior valor de IE favorece a conformação com menor raio de canto o que exige maior deformação na espessura do material.

7.3 ANÁLISE, DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

O acabamento RO desenvolvido na ArcelorMittal Inox Brasil possui aspecto visual do acabamento lixado, diferindo deste último apenas por não apresentar amarelamento em sua superfície. Este amarelamento acontece devido ao aquecimento sofrido pelo material durante seu processo de lixamento que degrada sua superfície.

Os resultados dos estudos de cinética de oxidação das amostras podem ser vistos nos gráficos de barra da Figura 7.15 e da Figura 7.16. Avaliando os gráficos conclui-se que o acabamento RO quando submetido a 180°C possui o mesmo comportamento que o acabamento 2B, oxidando muito pouco.

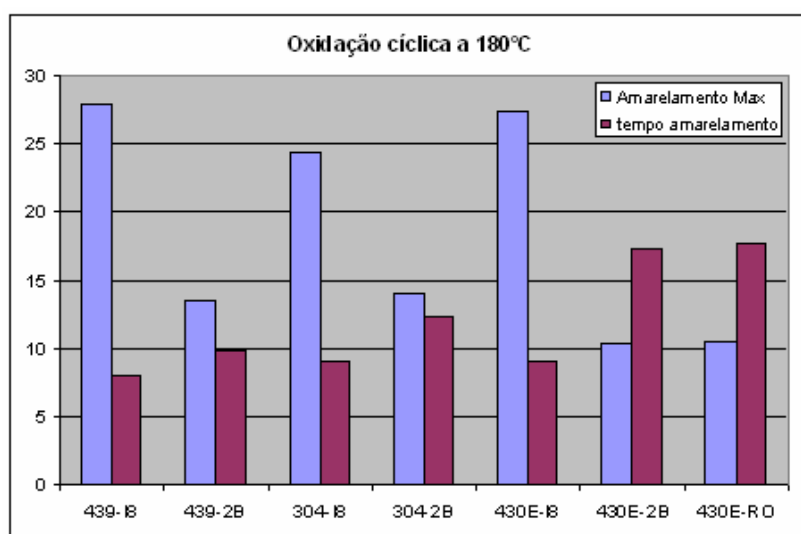


Figura 7.15 – Comparação entre amostras resultados dos parâmetros de amarelamento e tempo de amarelamento. Para teste de oxidação cíclica a 180°C.

Análises de laboratório mostraram que a temperatura de amarelamento do aço 430/RO é até 67% superior ao acabamento lixado.

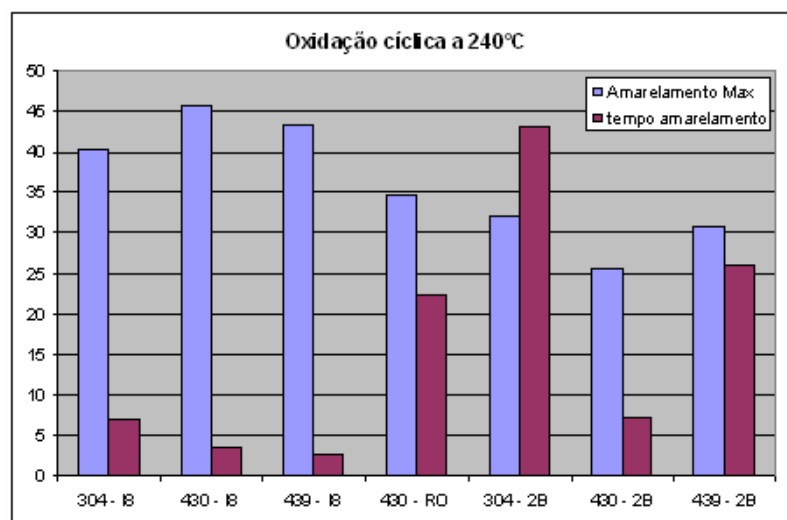


Figura 7.16 – Comparação entre amostras resultados dos parâmetros de amarelamento e tempo de amarelamento. Para teste de oxidação cíclica a 240°C.

O RO inicia o processo de oxidação a temperatura mais elevada como 240°C, porém nas análises o acabamento 2B apresentou melhor resistência a esta oxidação.

Na análise de resistência à corrosão por OCP o patamar final de estabilização representa a capacidade de resistência à corrosão das amostras analisadas e quanto maior for seu valor, maior é a resistente a corrosão do material.

Na Figura 7.10 pode-se observar que o material 430/RO (laranja) apresenta valor de patamar de estabilização maior que 430/lixado (marrom) e possui valor de patamar equivalente ao 304/lixado (verde). O acabamento que suportou melhor a resistência à corrosão foi o acabamento liso 2B.

Todas as vezes que se deseja obter aços de qualidade para estampagem profunda (DDQ-*“Deep Drawing Quality”*), como cubas e pias, deseja-se que o material apresente um alto valor de LDR nos ensaios SWIFT, ou maior facilidade para embutimento. Nos materiais e acabamentos vistos acima o aço 439 mostrou valor de LDR superior aos demais, porém se compararmos somente os acabamentos, o aço 430/RO apresentou melhor capacidade de estiramento que o acabamento lixado.

Resumindo:

O acabamento RO mostrou possuir varias vantagens em relação ao acabamento lixado, apresentando maior grau de estiramento, melhor resistência à corrosão e oxidação a baixas temperaturas e melhor estampabilidade, facilitando estiramento de cantos em peças mais complexas.

8 CONCLUSÕES FINAIS

O acabamento RO do aço 439 com 1,5 mm de espessura foi desenvolvido com sucesso pela equipe da ArcelorMittal Inox Brasil e além de possuir aspecto visual similar a do acabamento lixado, ele apresenta ‘*back side*’.

Foram obtidas taxas de transferência de rugosidade em torno de 50%, com a utilização de cilindros com rugosidade superficial em torno de 2µm Ra retificados com rebolo AC36.

O processo de laminação com cilindro texturizado foi desenvolvido, a carga de laminação definida no processo é de 240t, tração de vante 6,4t e de ré 16t, alongamento de 1,5%.

Para laminação de encruamento do aço 439 com 1,5mm de espessura utilizando cilindro texturizado com rugosidade superficial igual a 2µm Ra, a taxa de transferência de rugosidade em função do alongamento do material é dada pela equação:

$$T_{Ra} = 14,643 \cdot \text{Alongamento}(\%) + 23,42$$

Análises de laboratório mostraram que a temperatura de amarelamento do aço 430/RO com espessura de 0,4mm e rugosidade de 0,5µm Ra é até 40% em média superior ao acabamento lixado.

O material 430/RO apresentou maior resistência à corrosão a imersão em meio salino com 0,15% NaCl do que o 430/lixado aplicando teste OCP. O material 439/RO mostrou possuir propriedade de estiramento **13%** superior ao produto equivalente com acabamento lixado.

O desenvolvimento do “*know-how*” do acabamento Rolled-On permite aumentar competitividade no mercado, pois é um produto moderno com menor custo que outros similares.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GONÇALVES, I.N.; *Influência do acabamento Superficial na Resistência à Oxidação a Baixa Temperatura de Aços Inoxidáveis*; Relatório técnico interno ArcelorMittal Inox Brasil, RT10-170, 2001.
2. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6405; *Rugosidade das superfícies*, 1988.
3. SILVA, R., C. R. ; *Laminação de Encruamento do Aço Inox 430*: Teoria e Prática, Relatório técnico interno ArcelorMittal Inox Brasil, RT10-007,1998.
4. BUSCH, M. L.; BIAUSSER, H.; BIARD, G.; LE BON, A.; GRUMBACH, M.; *Metallurgical and Mechanical Aspects of Temper Rolling Process*;4th International Steel Rolling Conference – the Science and Technology on Flat Rolling V.2, 1987, p E48.1 -7;.
5. KASPER, A.S., *Correlation of Instrumentation with Painted Appearance*, SOC. Of Automotive Engineers, Inc., 1965, p. 22-28.
6. POIRÉ, L.; PONTET, J.; *New Dull Finished Stainless Steel for Building Use*; Relatório Interno Uginé S. A., 1999.
7. LACOMBE, P.; BAROUX, B.; BERANGER, G.; *Stainless Steels*. Les Editions de Physique, 2000, p. 437-462.
8. SILVA, R., C. R. *Aços Inoxidáveis Ferríticos e Martensíticos*, Relatório técnico interno ArcelorMittal Inox Brasil; 1988.
9. DeARDO, A. J. de; Garcia, C.I.; Hua, M.; Tiher, G. and Hulka, K.; *Aço Inox: Ferritic Stainless Steel The Metallurgical Background and benefits of dual stabilization*; *Stainless Steel*; 1996, p.287-298.
10. ROBERTS, L.; *An Approximate Theory of Temper Rolling*, Iron and Steel Enginneer, October, 1972, p 56-68.
11. KAINZ, A.; PAESOLD, D.; RIHA, G. KEINTZEL, G.; KRIMPELSTÄTTER, K.; ZEMAN, K.; *Finite Element Simulation of Skin-Pass and Temper Rolling*

- Processes with Special Emphasis on Roughness Transfer*; Proceedings of the NAFEMS World Congress 2005, St. Julians, Malta, 2005.
12. YUEN, W.Y.D.; NGUYEN, D.N.; MATTHEWS, D.L.; *Mathematical Modelling of the Temper Rolling Processes*, 37th Steel Processing Conference, Ontario 1995.
 13. KRIMPELSTÄTTER, K.; ZEMAN, K.; FINSTERMANN, G. et al, *New Advances in Temper and Skin-Pass Rolling Technology*; Proceedings of the 3rd European Rolling Conference (METEC Conference 2003), Düsseldorf, 2003, p 16-20.
 14. YUEN, W.Y.D.; DIXON, A.; NGUYEN, D.N.; *The Modelling of the Mechanics of Deformation in Flat Rolling*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 60, 1996, pp. 87-94.
 15. K. KRIMPELSTÄTTER, K. ZEMAN AND A. KAINZ, *Non Circular Arc Temper Rolling Model Considering Radial and Circumferential Work Roll Displacements*; Proceedings of the Eighth International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, Numiform 2004 , Columbus, Ohio, USA, June 2004, p. 13-17.
 16. JORTNER, D.; OSTERLE, J. F.; ZOROWSKI, C. F.; *An Analysis of Cold Strip Rolling*, Int. Journal of Mechanical Sciences, Vol.2, 1960, pp. 179-194.
 17. FLECK, N.A.; JOHNSON, K.L.; *Towards a New Theory of Cold Rolling Thin Foil*, Int. J. Mech. Sci., Vol. 29, No. 7, 1987, pp. 507-524.
 18. DOMANTI, S.A.; EDWARDS, W.J.; THOMAS, P.J.; *A Model for Foil and Thin Strip Rolling*; AISE Annual Convention, Cleveland, USA, 1994.
 19. LE, H.R.; SUTCLIFFE, M.P.F.; *A Robust Model for Rolling of Thin Strip and Foil*, Int. Journal of Mechanical Sciences, Vol. 43, 2001, pp. 1405-1419.
 20. TSELIKOV, I; ZYUSIN, V. I.; *Modern Development of Rolling Mills*, Mir Publishers , Moscow, 1975, p342.
 21. BÜNTEN, R.; STEINHOFF, K.; RASP, W.; KOPP, R.; AND PAWELSKI, O.; *Development of a FEM-Model for the Simulation of the Transfer of Surface Structure in Cold-Rolling Processes*, Journal of Material Processing Technology, Vol. 60, , 1996, pp. 369-376.

22. STAEVES, J.; *Beurteilung der Topografie von Blechen in Hinblick auf die Reibung bei der Umformung*, Dissertation, Universität Darmstadt, 1998.
23. ABAQUS STANDARD, Explicit, CAE / V6.5, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Rhode Island, USA, 1993.
24. SIMÃO, J.; ASOINWALL, D.K.; WISE, M.L.H.; EL-MENSHAWY, M.F.; *Mill Roll Texturing Using EDT*; J. Mater. Process. Technol., 45 , 1994, p.204-214,.
25. DEUTSCHER, O.; *Methods for Attaining Particular Roughness on Cold Rolled Strip*, Iron Steel Engineer, may 1997, p.35-40.
26. SUN, D.; YAO, L.; FAN, Q.; ZHANG, J.; *Research on Service Performances between Different Textured Cold Rolls*, AISTech Proceedings, V.2, 2006
27. WEIDERMANN, C., *Influence of Steel Sheet Topography on Deep Drawing Process*, 10th Biennial IDDRG Congress, abril 1978, p.245-251,.
28. ZEIGER, M.; SCHOENENBERGER, mme.; *Relation Between Surface Morfology Characteristics and Gripping*, 120th Biennial IDDRG Congress, may 1982, p.189-200.
29. BUTLER, R.D.; POPE, R.J.; *Surface Roughness and Lubrification in Press Working of Autobody Sheet Steel*, Sheet Metal Industries, 1967, p.579-592.
30. DEFOURNY, J.A.; LEROY, V.M.; NILLES, P.E.; *Update of developments in Lasertex technology*, Iron and Steel Engineer, 1991, p.39 – 45.
31. DOLVES, J.; *Electron Beam Texturing of Rolls*, Iron and Steel Engineer, August 1991, P. 33-38.
32. VERMEULEN, M. *et al.*, *3D Characterization of EBT Steel Sheet Surfaces*, 6th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, 1994.
33. MUHL, J.; ALDER, G.M.; *Direct Printing of Etch Masks under Computer Control*; 6th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, 1994.
34. ZIMNIK, W.; RITTEBACH, B.; MÜLL, K.; *PreTex – a New Process for the Textured Sheet*, MPT-International, n°.6, 1998, p.80-85.

35. MÜLL, K. *et al.*, *TOPOCROM-a Superior Method to Texture Work Rolls*, MS&T Conference Proceedings, 2004, p.553-557.
36. SAMBUCCO, Jr. *et al.*; *Method of Applying a Surface Finish on a Metal Substrate and Method of Preparing Work rolls for Applying the Surface Finish*; United States Patente; US 8807836 B2, 2004.
37. BOX , G.E.P.; BEHNKEN ,D.W.; "Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables," *Technometrics* 2, 1960, pp.455-475.
38. RAMANATHAN, L. V.; POHL, M.; PADILHA, A. F.; *The Effect of Niobium on the Oxidation Behavior of Fully Austenitic Fe-15% Cr-15% Ni Stainless Steels*; *Materials and Corrosion*, Vol. 46, 1995, p.71-75.
39. KOLMAN, D.; *Corrosion of 304 Stainless Steel Exposed to Nitric Acid - Chloride Environments*; *R Corrosion science*, v. 39, n. 12, 1997, p. 2067-2093.

10 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o período da execução deste trabalho o “*Know-how*” do produto Rolled-On foi desenvolvido e o produto está padronizado na empresa, já foram vendidas mais de 780 toneladas de material para mercado externo.

Trabalhos para desenvolvimento de mercado ainda estão sendo realizados. O acabamento RO pode ser utilizado em aplicações de cesto de lavar roupas, frisos de carro, molduras de monitores de computador e televisões de plasma, linha branca, “*grills*”, churrasqueiras, coifas e utensílios de cozinha, balcões e aplicações arquiteturas como revestimentos de fachadas. Diferentes aplicações como revestimento interno de elevadores e mesa de fogões ainda estão sendo testadas e devido às vantagens apresentadas, ele é um sucedâneo natural do acabamento lixado.

Algumas sugestões de continuação destes estudos são citadas:

- Reavaliar retífica do cilindro utilizando rebolo C80 e $Ra_{cil}=1,9\mu m$ Ra;
- Testar aplicação da textura no último passe utilizando o laminador Sendzimir.
- Testar acabamento obtido por jateamento de granalha;
- Reavaliar estampabilidade para as amostras com diferentes condições de alongamento e rugosidade superficial obtidas na experiência industrial;
- Reavaliar resistência à corrosão para as amostras com diferentes condições de alongamento e rugosidade superficial obtidas na experiência industrial;
- Reavaliar resistência à oxidação para as amostras com diferentes condições de alongamento e rugosidade superficial obtidas na experiência industrial;
- Avaliar condição de estampabilidade de material RO obtido com textura superficial isotrópica (cilindro jateado com granalha) e anisotrópica (retificado com rebolo);
- Testar retífica a laser
- Avaliar condição de revestimento do cilindro com cromo (Topcrom).
- Testar outras formas de preparação de cilindro.

11 APÊNDICE I

Tabelas de Resultados das Caracterizações das Amostras após Laminação.

Tabela 11.2 – Resultado caracterização da face inferior das amostras após laminadas em laboratórios com várias rugosidades de cilindro.

Amostas	Aço	(mm)		Largura	GU			Rebobo	Δh	Lado	tipo	Kgf		Ra	PM	Ra/Ra _{cl}		B/B _{cl}	Ra			GU		
		espessura	tipo		Briho Inicial	Ra	Ry					Rt	Carga Max Laminacao			Alongamento	Ra _{cl}		Ry _{cl}	Rt _{cl}	Briho Final 20°			
1º Exp.	1.1A	439	0,5	439-0,5	100	110	0,17	1,79	1,89	A46	0,006	Inferior	439-0,5	7840	1,13	1,5	32,07087199	0,54	0,42	0,618	0,81	5,30	5,67	68,00
	1.1B	439	0,5	439-0,5	100	110	0,17	1,79	1,89	A46	0,007	Inferior	439-0,5	10460	1,47	1,5	39,81439205	0,45	0,34	0,691	0,68	5,10	5,23	76,00
	2.2A	430A	0,5	430A-0,5	100	370	0,12	0,92	1,02	A46	0,007	Inferior	430A-0,5	16290	1,47	1,5	69,26837768	0,51	0,43	0,288	0,76	4,93	5,00	106,67
	2.2B	430A	0,5	430A-0,5	100	370	0,12	0,92	1,02	A46	0,003	Inferior	430A-0,5	14410	0,67	1,5	83,38306698	0,62	0,54	0,312	0,93	5,50	6,13	115,33
	3.3A	439	1,25	439-1,25	140	343	0,13	2,14	2,24	A46	0,014	Inferior	439-1,25	10770	0,96	1,5	20,00126936	0,28	0,19	0,551	0,41	3,50	3,63	189,00
	3.3B	439	1,25	439-1,25	140	343	0,13	2,14	2,24	A46	0,011	Inferior	439-1,25	11130	0,75	1,5	24,018265	0,19	0,10	0,624	0,28	2,60	2,73	214,00
	4.4A	439	2,25	439-2,25	123	64	0,27	3,64	3,8	A46	0,037	Inferior	439-2,25	13090	1,61	1,5	17,53089158	0,43	0,25	0,729	0,65	4,40	4,50	46,67
	4.4B	439	2,25	439-2,25	123	64	0,27	3,64	3,8	A46	0,024	Inferior	439-2,25	12710	1,06	1,5	21,13514098	0,40	0,22	0,880	0,60	4,27	4,83	56,33
2º Exp.	1.2A	439	0,5	439-0,5	100	110	0,17	1,79	1,89	A46	0,002	Inferior	439-0,5	8887	0,5	1,82	62,96663911	0,51	0,42	1,242	0,93	6,83	7,43	136,67
	1.2B	439	0,5	439-0,5	100	110	0,17	1,79	1,89	A46	0,006	Inferior	439-0,5	6923	1,19	1,82	28,31972535	0,56	0,46	0,797	1,01	6,30	7,20	87,67
	2.2A	430A	0,5	430A-0,5	100	370	0,12	0,92	1,02	A46	0,003	Inferior	430A-0,5	12090	0,59	1,82	69,94167105	0,39	0,33	0,206	0,71	5,10	5,37	76,33
	2.2B	430A	0,5	430A-0,5	100	370	0,12	0,92	1,02	A46	-0,004	Inferior	430A-0,5	13508	-0,83	1,82	#NUM!	0,55	0,49	0,197	1,01	7,00	7,43	73,00
	3.2A	439	1,25	439-1,25	140	343	0,13	2,14	2,24	A46	0,018	Inferior	439-1,25	9821	1,24	1,82	16,56768213	0,36	0,28	#DIV/0!	0,65	4,43	4,47	#DIV/0!
	3.2B	439	1,25	439-1,25	140	343	0,13	2,14	2,24	A46	0,01	Inferior	439-1,25	8151	0,69	1,82	18,44816559	0,23	0,16	#DIV/0!	0,42	3,30	3,70	#DIV/0!
	4.2A	439	2,25	439-2,25	123	64	0,27	3,64	3,8	A46	0,031	Inferior	439-2,25	15858	1,35	1,82	23,20239339	0,40	0,25	0,771	0,73	6,20	6,80	49,33
	4.2B	439	2,25	439-2,25	123	64	0,27	3,64	3,8	A46	0,022	Inferior	439-2,25	24130	0,96	1,82	41,90937661	0,39	0,24	0,734	0,71	7,47	7,93	47,00
3º Exp.	1.3A	439	0,5	439-0,5	100	110	0,17	1,79	1,89	A46	0,008	Inferior	439-0,5	10844	1,59	0,93	38,41623914	0,80	0,61	0,739	0,74	4,83	5,10	81,33
	1.3B	439	0,5	439-0,5	100	110	0,17	1,79	1,89	A46	0,005	Inferior	439-0,5	15677	1,02	0,93	70,25031678	0,59	0,41	0,755	0,55	3,83	4,27	83,00
	2.3A	430A	0,5	430A-0,5	100	370	0,12	0,92	1,02	A46	0,004	Inferior	430A-0,5	9185	0,74	0,93	46,01712647	0,76	0,63	0,430	0,71	5,30	5,57	159,00
	2.3B	430A	0,5	430A-0,5	100	370	0,12	0,92	1,02	A46	0,006	Inferior	430A-0,5	12459	1,25	0,93	50,96568802	0,78	0,65	0,315	0,73	4,73	5,03	116,67
	3.3A	439	1,25	439-1,25	140	343	0,13	2,14	2,24	A46	0,011	Inferior	439-1,25	16474	0,72	0,93	35,55044278	0,28	0,14	0,843	0,26	2,60	2,70	289,00
	3.3B	439	1,25	439-1,25	140	343	0,13	2,14	2,24	A46	0,011	Inferior	439-1,25	13117	0,77	0,93	28,30612832	0,30	0,16	0,734	0,28	2,63	2,83	251,67
	4.3A	439	2,25	439-2,25	123	64	0,27	3,64	3,8	A46	0,026	Inferior	439-2,25	15804	1,15	0,93	25,24908047	0,68	0,39	0,953	0,63	9,07	9,07	61,00
	4.3B	439	2,25	439-2,25	123	64	0,27	3,64	3,8	A46	0,024	Inferior	439-2,25	9525	1,04	0,93	15,8388417	0,49	0,20	0,938	0,46	5,87	6,10	60,00
4º Exp.	1.4A	439	0,5	439-0,5	100	110	0,17	1,79	1,89	AC36	0,002	Inferior	439-0,5	15993	0,31	2,51	113,3144435	0,67	0,60	0,539	1,67	13,30	14,13	59,33
	1.4B	439	0,5	439-0,5	100	110	0,17	1,79	1,89	AC36	0,003	Inferior	439-0,5	19434	0,57	2,51	112,4273313	0,67	0,60	0,582	1,68	10,93	12,33	64,00
	2.4A	430A	0,5	430A-0,5	100	370	0,12	0,92	1,02	AC36	0,002	Inferior	430A-0,5	12926	0,45	2,51	91,58397402	0,61	0,56	0,259	1,52	9,97	11,47	96,00
	2.4B	430A	0,5	430A-0,5	100	370	0,12	0,92	1,02	AC36	0,005	Inferior	430A-0,5	14700	0,9	2,51	65,8722751	0,66	0,62	0,113	1,67	12,87	12,60	41,67
	3.4A	439	1,25	439-1,25	140	343	0,13	2,14	2,24	AC36	0,031	Inferior	439-1,25	12134	2,1	2,51	15,95787511	0,53	0,48	0,282	1,33	8,93	9,10	96,67
	3.4B	439	1,25	439-1,25	140	343	0,13	2,14	2,24	AC36	0,021	Inferior	439-1,25	24600	1,41	2,51	38,42091955	0,50	0,44	0,357	1,25	8,07	8,83	122,33
	4.4A	439	2,25	439-2,25	123	64	0,27	3,64	3,8	AC36	0,044	Inferior	439-2,25	13690	1,92	2,51	16,81288836	0,50	0,40	0,599	1,27	9,17	9,67	38,33
	4.4B	439	2,25	439-2,25	123	64	0,27	3,64	3,8	AC36	0,05	Inferior	439-2,25	20701	2,2	2,51	23,84907518	0,69	0,59	0,568	1,74	13,73	14,33	36,33
5º Exp.	5.4A	439	1	439-1	100	43	0,43	6,14	6,68	AC36	0,033	Inferior	439-1	16078	2,99	2,51	28,04435043	0,89	0,72	0,829	2,23	15,20	15,97	35,67
	5.4B	439	1	439-1	100	43	0,43	6,14	6,68	AC36	0,029	Inferior	439-1	16078	2,99	2,51	29,9158684	0,79	0,62	0,876	1,99	12,10	12,93	37,67
	1.5A	439	0,5	439-0,5	100	110	0,17	1,79	1,89	C80	0,013	Inferior	439-0,5	11399	2,7	1,5	33,2483451	0,51	0,39	0,400	0,76	5,03	5,43	44,00
	1.5B	439	0,5	439-0,5	100	110	0,17	1,79	1,89	C80	0,005	Inferior	439-0,5	14439	0,97	1,5	64,70270613	0,40	0,29	0,670	0,61	4,27	4,43	73,67
	2.5A	430A	0,5	430A-0,5	100	370	0,12	0,92	1,02	C80	0,006	Inferior	430A-0,5	12091	1,25	1,5	49,46032056	0,52	0,44	0,330	0,77	5,23	5,80	122,00
	2.5B	430A	0,5	430A-0,5	100	370	0,12	0,92	1,02	C80	0,004	Inferior	430A-0,5	9364	0,9	1,5	46,91392186	0,44	0,36	0,305	0,65	5,07	5,47	113,00
	3.5A	439	1,25	439-1,25	140	343	0,13	2,14	2,24	C80	0,019	Inferior	439-1,25	16732	1,26	1,5	27,47345954	0,28	0,19	0,656	0,41	3,10	3,20	225,00
	3.5B	439	1,25	439-1,25	140	343	0,13	2,14	2,24	C80	0,015	Inferior	439-1,25	8837	1	1,5	16,33057666	0,30	0,22	0,515	0,45	3,93	4,17	176,67
6º Exp.	4.5A	439	2,25	439-2,25	123	64	0,27	3,64	3,8	C80	0,027	Inferior	439-2,25	16149	1,2	1,5	25,3179753	0,33	0,15	0,776	0,49	5,47	5,70	49,67
	4.5B	439	2,25	439-2,25	123	64	0,27	3,64	3,8	C80	0,033	Inferior	439-2,25	19841	1,44	1,5	28,13661231	0,36	0,18	0,797	0,55	4,83	4,90	51,00
	5.5A	439	1	439-1	100	43	0,43	6,14	6,68	C80	0,037	Inferior	439-1	14363	3,36	1,5	23,59939996	0,55	0,26	1,078	0,82	6,13	6,33	46,33
	5.5B	439	1	439-1	100	43	0,43	6,14	6,68	C80	0,015	Inferior	439-1	21526	1,36	1,5	55,69138739	0,50	0,22	1,008	0,75	5,57	5,93	437,33
	1.6A	439	0,5	439-0,5	100	110	0,17	1,79	1,89	A46	0,001	Inferior	439-0,5	10866	0,25	3,46	108,8779741	0,52	0,47	0,409	1,80	13,47	15,23	45,00
	2.6A	430A	0,5	430A-0,5	100	370	0,12	0,92	1,02	A46	0,005	Inferior	430A-0,5	17977	1,04	3,46	80,55686323	0,63	0,59	0,173	2,17	18,47	18,47	64,00
	2.6B	430A	0,5	430A-0,																				



Orlando Abreu Gomes, Margareth Spangler, Berenice Gonzáles e Eu em março 2001.

"O que você deixa para trás não é o que é gravado em monumentos de pedra, mas o que é tecido nas vidas de outros." (Péricles)

Esta dissertação é pra mim um marco importante, uma consolidação de um cilho de 11 anos de pesquisa em metalurgia.