

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ANA LETÍCIA BODANESE

CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAS DE AÇO CA-50 PRODUZIDAS NO BRASIL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2018

ANA LETÍCIA BODANESE

CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAS DE AÇO CA-50 PRODUZIDAS NO BRASIL

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Câmpus* Pato Branco.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marina Rocha Pinto Portela Nunes

PATO BRANCO

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAS DE AÇO CA 50 PRODUZIDAS NO BRASIL

ANA LETICIA BODANESE

No dia 22 de novembro de 2018, às 16h30min, na SALA DE TREINAMENTO da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após argüição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº57-TCC/2018.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. MARINA ROCHA P. P. NUNES (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof^ª. Dr^ª. CAROLINE LUZ ANGULSKI (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof^ª. Dr^ª. PAÔLA REGINA DALCANAL (DACOC/UTFPR-PB)

Ao meu porto seguro,
meus pais,
por todo apoio e encorajamento.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer inicialmente a Deus pela saúde, pelas oportunidades ao longo da vida e pelas pessoas especiais que permitiu que cruzassem meu caminho.

Aos meus pais, Claudir e Nilse, e meu irmão Gabriel Antônio, pelo apoio em todas as minhas escolhas, pela dedicação, suporte e incentivo ao longo da graduação e pelo imenso amor.

Aos meus familiares, em especial minha amada avó Cilia, pelo encorajamento e carinho.

Ao João Henrique pelo apoio, dedicação e companherismo em todos os momentos.

Aos amigos que fizeram parte da minha vida e trajetória acadêmica, em especial minha amiga Heloisa e minha colega Amanda, pelo afeto e pelas contribuições pessoais e profissionais ao longo dos anos.

Ao Paulo Neves, pelos ensinamentos e pela obtenção de parte das barras que viabilizaram a realização desse trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Metalografia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Vitor Baldin e à técnica do Laboratório de Materiais e Estruturas, Claudia Baldin, por todo o suporte e auxílio na realização dos ensaios.

Aos técnicos do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela ajuda e esclarecimentos na realização dos ensaios.

À minha orientadora, Prof. Dr^a Marina Rocha, por todos os auxílios, direcionamentos e ensinamentos ao longo da elaboração desse trabalho.

RESUMO

BODANESE, Ana Letícia. **Caracterização das barras de aço CA-50 produzidas no Brasil**. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2018.

Estruturas em concreto armado, como pontes por exemplo, podem estar sujeitas à fadiga. As barras de aço são determinantes na resistência à fadiga de elementos de concreto armado. Essa resistência pode ser influenciada por aspectos microestruturais como tamanho e tipo dos grãos, assim como pela geometria da superfície. Esses aspectos são resultantes do processo de fabricação das barras. Há poucos estudos na literatura brasileira acerca das características microestruturais e nenhum sobre a rugosidade da superfície das barras de aço CA-50. Este trabalho investiga então a microestrutura das barras de aços de diferentes fabricantes no Brasil, por meio de estudos metalográficos, relacionando-a aos processos de fabricação. Também são realizados ensaios para medição da microdureza Vickers e ensaios de tração. A rugosidade da superfície das barras de aço é analisada utilizando duas técnicas: o microscópio eletrônico de varredura (MEV) seguido da estéreo fotometria para reconstrução em 3D da rugosidade e o rugosímetro. A partir de ambas as técnicas a rugosidade é quantificada por meio do fator de concentração de tensão, parâmetro este comumente utilizado em estudos de previsão da vida à fadiga de componentes metálicos. As análises de metalografia permitiram verificar que dentre as barras de aço produzidas atualmente, algumas passam pelo processo de têmpera e revenimento e outras apenas pela laminação à quente. Os valores de microdureza Vickers apresentaram-se condizentes com a microestrutura identificada nas barras. Na análise da resistência à tração, os maiores valores de tensão de escoamento e ruptura são obtidos nas amostras com maior quantidade de perlita. Algumas barras de aço não atingiram os valores mínimos de tensão de escoamento conforme estabelecido nas normas brasileiras. Em relação à rugosidade, as duas técnicas apresentam valores muito diferentes para fator de concentração de tensão.

Palavras chaves: Microestrutura, microdureza, rugosidade, fator de concentração de tensão.

ABSTRACT

BODANESE, Ana L.. **Characterization of CA50 steel reinforcement bars produced in Brazil**. Conclusion of the Civil Engineering Undergraduate Program – Academic Department of Civil Construction, Technological Federal University of Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2018.

Reinforced concrete (RC) structures, as for example bridges, can be subjected to fatigue. Reinforcement steel bars (rebars) are determinant in the fatigue strength of reinforced concrete elements. This strength can be influenced by its microstructural aspects as grains type and size as well as surface geometry. These aspects depends on the rebar fabrication process. Few studies can be found in the Brazilian literature regarding the rebar microstructural characteristics and none reference are found on the surface roughness. This works aims to investigate the microstructure of CA-50 rebars of different Brazilian manufacturers by metallographic analyses and it relates to the fabrication process. Microhardness Vickers and tensile strength are measured. Surface roughness is investigated using two techniques: Scanning Electron Microscopy followed by photo stereometry for 3D surface roughness reconstruction and roughness meter. With both techniques the roughness is quantified through a stress concentration factor, parameter commonly used for fatigue life prediction of metallic components. The analysis of metallography allowed to verify that of the bars of steel produced today, some undergoes the process of tempering and tempering and others only by the hot rolling. The Vickers microhardness values were consistent with the microstructure identified in the bars. In the analysis of the tensile strength, the higher values of yield stress and rupture are obtained in the samples with higher amount of perlite. Some steel bars did not reach the minimum values of flow voltage as established in the Brazilian standards. In relation to roughness, the two techniques present very different values for stress concentration factor.

Keywords: microstructure, microhardness, roughness, stress concentration factor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cronologia das principais realizações e eventos de pesquisa sobre falha por fadiga	6
Figura 2: Etapas do processo de fabricação	10
Figura 3: Diagrama de fases Fe-C	13
Figura 4: Perlita e ferrita em aço resfriado lentamente	14
Figura 5: Estrutura martensítica presente em aço carbono temperado e revenido ...	15
Figura 6: Microestrutura obtida em barras fabricadas na Europa.....	16
Figura 7: Propriedades mecânicas exigíveis de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado	19
Figura 8: Curva TensãoxDeformação.....	20
Figura 9: Componentes da superfície de uma amostra	21
Figura 10: Cálculo do parâmetro Ra	22
Figura 11: Cálculo do parâmetro Ry.....	22
Figura 12: Cálculo do parâmetro Rz.....	22
Figura 13: Exemplo de configuração geométrica com nervuras transversais oblíquas em dois lados da barra e nervuras longitudinais	25
Figura 14: Diagrama da pesquisa	26
Figura 15: Barras de aço analisadas.....	28
Figura 16: Amostras de barras A e B utilizadas para metalografia.....	29
Figura 17: Prensa de embutimento metalográfico.....	30
Figura 18: Lixadeira e Politriz	31
Figura 19: Soluções para polimento: a) Alumina 1 μm ; b) Lubrificante azul; c) Diamante 1 μm e 3 μm	31
Figura 20: Microscópio ótico.....	32
Figura 21: Círculos do método de Abrams Three-Circle	32
Figura 22: Tabela para obtenção do tamanho do grão	33
Figura 23: Ensaio de dureza Vickers.....	34
Figura 24: Durômetro	35
Figura 25: Amostras para ensaio de tração.....	36
Figura 26: EMIC	36
Figura 27: Amostras para verificação de rugosidade	37
Figura 28: Rugosidade reconstruída de uma das amostras	37

Figura 29: MEV	38
Figura 30: Imagens para estéreo fotometria- Amostra 01 com ampliação de 100 X.	39
Figura 31: Imagens para estéreo fotometria normalizadas- Amostra 01 com ampliação de 100 X.....	40
Figura 32: Rugosidade reconstruída de uma das amostras	41
Figura 33: Parâmetros de rugosidade para uma das amostras analisadas.....	42
Figura 34: Rugosímetro.....	43
Figura 35: Posicionamento adequado do sensor do rugosímetro	43
Figura 36: Amostra 1: a) Região externa b) Região interna- Ampliação de 200 X....	45
Figura 37: Amostra 2: a) Região externa b) Região interna- Ampliação de 200 X....	45
Figura 38: Amostra 3: a) Região externa b) Região interna- Ampliação de 200 X....	46
Figura 39: Amostra 4: a) Região externa b) Região interna- Ampliação de 200 X....	46
Figura 40: Amostra 5: a) Região externa b) Região interna- Ampliação de 200 X....	46
Figura 41: Amostra 6: a) Região externa b) Região interna- Ampliação de 200 X....	47
Figura 42: Amostras A, B e C atacadas quimicamente	47
Figura 43: Poros na microestrutura a) Região interna amostra 2 b) Região externa amostra 3- Ampliação de 200 X	48
Figura 44: Círculos para quantificação dos grãos	49
Figura 45: Indentações obtidas na amostra 01	51
Figura 46: Perfis de microdureza Vickers- Amostra 1, 4 e 6	53
Figura 47: Estricção das amostras	55
Figura 48: Gráfico Tensão Deformação-Amostra 1	57
Figura 49: Gráfico Tensão Deformação-Amostra 4	57
Figura 50: Gráfico Tensão Deformação-Amostra 6	57
Figura 51: Parâmetros de rugosidade- Amostra 04 com ampliação de 150 X	59
Figura 52: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 100 X- Amostra 01 a) Região interna b) Região externa.....	74
Figura 53: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 200 X- Amostra 01 a) Região interna b) Região externa	74
Figura 54: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 100 X- Amostra 02 a) Região interna b) Região externa.....	75
Figura 55: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 200 X- Amostra 02 a) Região interna b) Região externa.....	75

Figura 56: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 100 X- Amostra 03 a) Região interna b) Região externa.....	76
Figura 57: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 200 X- Amostra 03 a) Região interna b) Região externa.....	76
Figura 58: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 100 X- Amostra 04 a) Região interna b) Região externa.....	77
Figura 59: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 200 X- Amostra 04 a) Região interna b) Região externa.....	77
Figura 60: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 100 X- Amostra 05 a) Região interna b) Região externa.....	78
Figura 61: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 200 X- Amostra 05 a) Região interna b) Região externa.....	78
Figura 62: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 100 X- Amostra 06 a) Região interna b) Região externa.....	79
Figura 63: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 200 X- Amostra 06 a) Região interna b) Região externa.....	79
Figura 64: Relatório de Ensaio de Tração - Amostra 01.....	84
Figura 65: Relatório de Ensaio de Tração - Amostra 02.....	85
Figura 66: Relatório de Ensaio de Tração - Amostra 03.....	86
Figura 67: Relatório de Ensaio de Tração- Amostra 04	87
Figura 68: Relatório de Ensaio de Tração - Amostra 05.....	88
Figura 69: Relatório de Ensaio de Tração - Amostra 06.....	89
Figura 70: Relatório de Ensaio de Tração - Amostra 01.....	90
Figura 71: Relatório de Ensaio de Tração - Amostra 03.....	91
Figura 72: Relatório de Ensaio de Tração - Amostra 05.....	92
Figura 73: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 100 X- Amostra 01.	93
Figura 74: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 01 com ampliação de 100 X.....	93
Figura 75: Parâmetros de rugosidade- Amostra 01 com ampliação do 100 X	94
Figura 76: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 150 X- Amostra 01.	94
Figura 77: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 100 X- Amostra 02.	95
Figura 78: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 02 com ampliação de 100 X.....	95
Figura 79: Parâmetros de rugosidade- Amostra 02 com ampliação de 100 X	96

Figura 80: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 150 X- Amostra 02.	97
Figura 81: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 02 com ampliação de 150 X.....	97
Figura 82: Parâmetros de rugosidade- Amostra 02 com ampliação de 150 X	98
Figura 83: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 100 X- Amostra 03.	99
Figura 84: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 03 com ampliação de 100 X.....	99
Figura 85: Parâmetros de rugosidade- Amostra 03 com ampliação de 100 X	100
Figura 86: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 150 X- Amostra 03	101
Figura 87: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 03 com ampliação de 150 X.....	101
Figura 88: Parâmetros de rugosidade- Amostra 03 com ampliação de 150 X	102
Figura 89: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 100 X- Amostra 04	103
Figura 90: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 04 com ampliação de 100 X.....	103
Figura 91: Parâmetros de rugosidade- Amostra 04 com ampliação de 100 X	104
Figura 92: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 150 X- Amostra 04	105
Figura 93: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 04 com ampliação de 150 X.....	105
Figura 94: Parâmetros de rugosidade- Amostra 04 com ampliação de 150 X	106
Figura 95: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 100 X- Amostra 05	107
Figura 96: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 05 com ampliação de 100 X.....	107
Figura 97: Parâmetros de rugosidade- Amostra 05 com ampliação de 100 X	108
Figura 98: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 150 X- Amostra 05	109
Figura 99: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 05 com ampliação de 150 X.....	109
Figura 100: Parâmetros de rugosidade- Amostra 05 com ampliação de 150 X	110

Figura 101: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 100 X- Amostra 06	111
Figura 102: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 06 com ampliação de 100 X.....	111
Figura 103: Parâmetros de rugosidade- Amostra 06 com ampliação de 100 X	112
Figura 104: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 150 X- Amostra 06	113
Figura 105: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 06 com ampliação de 150 X.....	113
Figura 106: Parâmetros de rugosidade- Amostra 06 com ampliação de 150 X	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores máximos dos elementos.....	13
Tabela 2: Resumo da numeração das amostras.....	27
Tabela 3: Número de intercepções por amostra	49
Tabela 4: Tamanho médio do grão ASTM.....	50
Tabela 5: Resumo dos resultados do ensaio de tração com extensômetro	55
Tabela 6: Parâmetros de rugosidade para estéreo fotometria	60
Tabela 7: Parâmetros de rugosidade para o rugosímetro	61
Tabela 8: Comparativo Kt rugosímetro e estéreo fotometria.....	62
Tabela 9: Grãos contabilizados- Amostra 01.....	80
Tabela 10: Grãos contabilizados- Amostra 02.....	80
Tabela 11: Grãos contabilizados- Amostra 03.....	80
Tabela 12: Grãos contabilizados- Amostra 04.....	80
Tabela 13: Grãos Contabilizados- Amostra 05.....	81
Tabela 14: Grãos Contabilizados- Amostra 06.....	81
Tabela 15: Valores de microdureza ao longo da seção transversal	83

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo Geral	2
1.1.2	Objetivos Específicos	3
1.2	Justificativa.....	3
2	Referencial Teórico	5
2.1	Fadiga	5
2.1.1	Histórico	5
2.1.2	Resistência À Fadiga Das Barras De Aço.....	7
2.2	Tipos De Barras De Aço.....	8
2.2.1	Processo De Fabricação	9
2.2.2	Laminação.....	10
2.3	Caracterização	12
2.3.1	Composição Química	12
2.3.2	Microestrutura	13
2.3.3	Microdureza.....	17
2.3.4	Resistência À Tração	18
2.3.5	Rugosidade	20
2.3.6	Geometria Das Barras (Nervuras) E Marcas Do Fabricante	23
3	Metodologia.....	26
3.1	Materiais.....	26
3.2	Métodos	28
3.2.1	Microestrutura	29
3.2.2	Microdureza.....	33
3.2.3	Resistência À Tração	35
3.2.4	Rugosidade	37
4	Resultados	45

4.1	Microestrutura	45
4.1.1	Tipo De Grão.....	45
4.1.2	Tamanho Médio Do Grão.....	49
4.2	Microdureza.....	51
4.3	Resistência À Tração	54
4.4	Rugosidade E Imperfeições	58
4.4.1	Estéreo Fotometria.....	58
4.4.2	Rugosímetro.....	60
5	Conclusões.....	63
	Referências Bibliográficas	65
	Anexos.....	74

1 INTRODUÇÃO

Devido a características como sua excelente relação resistência-peso, sua versatilidade, homogeneidade, durabilidade e ductilidade, o aço possui diversas vantagens sobre outros materiais de construção e tem ampla utilização na nossa civilização moderna (SIVAKUGAN et. al., 2018).

Além da aplicação do aço como material isolado, estruturas de concreto normalmente são reforçadas através da utilização de barras de aço para suportar as tensões de tração ao qual o elemento é submetido.

Segundo dados da Instituição Aço Brasil (2018), no Brasil cerca de 40% do aço é utilizado no setor da construção civil, em estruturas metálicas e de concreto armado. As estruturas de concreto armado são a solução escolhida em 83% das estruturas civis, desde pequenas residências até obras especiais. (CBCA, 2009 apud BARRETO et. al.,2009).

Segundo Salvadori (2015), o concreto armado foi inventado na França em meados do século XIX e passou a ter uma larga utilização em todo o mundo, devido a características como a possibilidade de tomar diferentes formas, a disponibilidade e seu custo.

Algumas estruturas em concreto armado como, por exemplo, pontes são sujeitas à fadiga. Fadiga, segundo Pipinato (2016), consiste nas repetições alternadas localizadas de ciclos concentrados de tensão em uma estrutura induzida pela aplicação externa de carga, como veículos, ventos, ondas e temperatura. Essas aplicações, quando abaixo da capacidade estrutural dos elementos, poderiam induzir a fratura e quando submetidos a repetições por um longo período, podem eventualmente causar o colapso total da estrutura.

Em estruturas de concreto armado as barras de aço são os elementos determinantes na resistência à fadiga, considerando que o concreto esteja em bom estado.

Há dois tipos de barras de aço CA-50 que podem ser encontrados em pontes de concreto armado: laminadas a quente e as laminadas a quente seguidas pela têmpera e revenimento. Segundo Simon et. al. (1984), a utilização de tratamentos térmicos como a têmpera e o revenimento em barras retas iniciou-se com estudos na Bélgica em 1975 e passou a ser difundida e utilizada em processos produtivos em todo o mundo.

Esse tratamento térmico (têmpera e revenimento) é mais viável que o processo de apenas laminação a quente por levar à formação da martensita, microestrutura presente na superfície e subsuperfície das barras que possui maior dureza e maior resistência à abrasão comparada à microestrutura do núcleo ferrítico-perlítico. Como resultado, em geral, as barras temperadas e revenidas apresentam propriedades mecânicas como limite de escoamento e resistência à tração e resistência à fadiga superiores às demais barras de aço.

O processo de laminação das barras de aço gera irregularidades na superfície, que são imperfeições, e descontinuidades geométricas, como as marcas do fabricante e as nervuras, estas últimas necessárias para garantir a boa aderência entre as barras e o concreto. Segundo Abrahão (2008), essas irregularidades e descontinuidades geométricas são zonas de concentração de tensão que podem reduzir consideravelmente a resistência à fadiga das barras de aço: as trincas por fadiga tendem a iniciar-se e propagar-se nessas zonas.

Como há poucos estudos na literatura brasileira relacionados aos aspectos microestruturais das barras de aço e nenhum estudo com respeito à rugosidade da superfície, este trabalho tem como objetivos a) caracterizar a microestrutura das barras de aço CA-50, elementos determinantes na resistência à fadiga das barras em tabuleiros de pontes de concreto armado, e b) quantificar a rugosidade por meio do fator concentração de tensão, parâmetro comumente utilizado na previsão da vida à fadiga das barras de aço.

Para tal, este trabalho está organizado da seguinte forma: (i) Revisão bibliográfica; (ii) Estudo dos fatores que influenciam na resistência à fadiga (iii) Caracterização da microestrutura das barras de aço (iv) Análise da rugosidade (v) Comparativo com a literatura.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Caracterizar o material e os aspectos geométricos das barras de aço retas laminadas, temperadas e revenidas, fabricadas no Brasil, e comparar com os resultados disponíveis na literatura.

1.1.2 Objetivos específicos

- Apresentar as diretrizes para caracterização do material das barras de aço recomendadas pelas normas técnicas específicas;
- Relacionar a microestrutura e microdureza ao processo de fabricação das barras de aço;
- Investigar as propriedades mecânicas das barras de aço e compará-las aos valores exigidos nas normas técnicas brasileiras;
- Quantificar a severidade da rugosidade da superfície.

1.2 JUSTIFICATIVA

Estruturas civis, como o caso de pontes de concreto armado, estão sujeitas a carregamentos cíclicos, causando modificações acumulativas na estrutura interna do material. Este processo é conhecido como fadiga. Segundo Castro (2009) a falha por fadiga ocorre por uma propagação irreversível de uma trinca que não tende a gerar avisos prévios da falha.

A consideração da fadiga no dimensionamento de estruturas de concreto armado é tratada em norma desde 1967, por meio dos procedimentos de cálculo descritos na norma de especificação EB3 (1967)- Barras e fios destinados a armaduras de concreto armado, e segue até a última atualização da Norma Brasileira Regulamentadora NBR 6118 (2014)- Projeto de Estruturas de Concreto Armado. (ABNT, 2014)

As barras de aço são elementos determinantes na resistência à fadiga das estruturas de concreto armado. Segundo Simon et.al. (1984) apud Barreto et al. (2009) a partir da década de 70 passaram a serem implantados tratamentos térmicos nas barras de aço retas, que são resultantes do processo de laminação a quente, seguido de têmpera e revenimento. Esse processo de fabricação influencia na microestrutura das mesmas, em suas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, podem influenciar na resistência à fadiga dos elementos em concreto armado.

Além disso, as imperfeições da superfície e a zona de transição entre a superfície livre da barra e a nervura, assim como as marcas do fabricante, são zonas que apresentam uma distribuição não homogênea de tensão, caracterizando-se por

uma concentração de tensões nessas regiões. Segundo Abrahão (2008), trincas por fadigas tendem a iniciar-se a partir dessas zonas de concentração de tensão, e a propagar-se podendo reduzir significativamente a resistência à fadiga das barras.

Há poucos estudos sobre a caracterização material e da geometria de barras fabricadas no Brasil e poucos na literatura que tratam da rugosidade da superfície das barras.

Neste trabalho serão analisados os aspectos materiais, como a microestrutura e microdureza, e os geométricos, como a rugosidade. Para a caracterização do material serão utilizados os seguintes equipamentos de ensaio disponíveis na Universidade Tecnológica Federal do Paraná: microscópio ótico, microscópio eletrônico de varredura (MEV), rugosímetro, máquina universal para ensaios mecânicos e durômetro.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FADIGA

Estruturas civis podem estar sujeitas a ações dinâmicas como ventos, sismos, atuações de equipamentos e cargas móveis providas do tráfego de veículos. De acordo com Mello (2009), ações dinâmicas podem ser definidas como carregamentos em que a magnitude, a direção e a posição podem sofrer variação ao longo do tempo, fazendo com que as respostas da estrutura, como seus deslocamentos, também variem.

Pontes e viadutos estão sujeitas a cargas que variam com o tempo devido à passagem de veículos. O tráfego de veículos leva a um dano progressivo dos elementos estruturais e a uma eventual falha destes, ou da estrutura como um todo, a cargas menores que a resistência estática do elemento. Essas cargas são chamadas de cargas de fadiga, cargas cíclicas não necessariamente do mesmo tamanho.

2.1.1 Histórico

De acordo com Suresh (2003), a palavra Fadiga tem origem latina e significa “se cansar”. Dentro do vocabulário da engenharia, o termo fadiga se tornou amplamente utilizado para referir-se a danos e falhas de materiais sob carregamentos cíclicos.

A partir de estudos publicados, a pesquisa sobre a fadiga do material pode ser direcionada até a primeira metade do século XIX. Acredita-se que o primeiro estudo de fadiga de metal tenha sido conduzido pelo engenheiro alemão W.A.J. Albert, por volta de 1829, onde realizou repetidos testes de prova de carga em correntes de içar de minas feitas de ferro (SURESH, 2003).

Segundo Norton (2013) o termo “fadiga”, como é utilizado atualmente, foi aplicado pela primeira vez por Poncelet em 1839.

A primeira pesquisa detalhada sobre fadiga em metal iniciou em 1842, após um acidente ferroviário na França. Segundo Suresh (2003), a causa deste acidente foi atribuída à falha por fadiga originada no eixo dianteiro da locomotiva, reconhecida

por W.J.M Rankine. Rankine também observou e relatou em suas pesquisas o perigo da concentração de tensão em componentes.

Wöhler conduziu pesquisas experimentais sobre as falhas por fadiga durante o período de 1852-1869, e suas pesquisas levaram à caracterização do comportamento de fadiga em termos de Curvas S-N, que representam a amplitude de tensão em função do número de ciclos associados à falha, e o conceito de limite de resistência à fadiga, sendo os equipamentos utilizados atualmente para testes de fadiga conceitualmente iguais aos projetados por Wöhler. (SURESH, 2003)

Durante esse período de estudos, alguns acidentes tiveram suas causas relacionadas à falha por fadiga, como é o caso dos aviões ingleses Comet, onde as falhas se deram por trincas nas pontas das janelas, que até então possuíam cantos quadrados (ABRAHÃO, 2008).

Nos anos seguintes os estudos trouxeram novos resultados, como a abordagem de Peterson em 1953 considerando os entalhes e fatores de concentração de tensão relacionados a eles. (NORTON, 2013)

A Figura 1 relaciona de maneira cronológica os principais eventos na pesquisa de falhas por fadiga e seus respectivos pesquisadores.

Ano	Pesquisador	Evento ou realização
1829	Albert	Primeiro a documentar uma falha devido a cargas repetidas.
1839	Poncelet	Primeiro a utilizar o termo fadiga.
1837	Rankine	Discutiu a teoria da cristalização da fadiga.
1849	Stephenson	Discutiu a responsabilidade do produto associada às falhas por fadiga em eixos ferroviários.
1850	Braithwaite	Primeiro a utilizar o termo fadiga em publicação de língua inglesa e também discutiu a teoria da cristalização da fadiga.
1864	Fairbairn	Relatou os primeiros experimentos com cargas repetidas.
1871	Wöhler	Publicou os resultados de 20 anos de pesquisas sobre falhas em eixos, desenvolveu os ensaios de flexão rotativa e o diagrama S-N e definiu o limite de fadiga.
1871	Bauschinger	Desenvolveu um extensômetro com espelho com uma sensibilidade igual a 10^{-6} e estudou a tensão-deformação inelástica.
1886	Bauschinger	Propôs um "limite elástico natural" cíclico abaixo do qual nunca iria ocorrer fadiga.
1903	Ewing/Humfrey	Descobriram linhas de deslizamento, trincas de fadiga e o crescimento da trinca até a falha, mostrando os erros da teoria da cristalização da fadiga.
1910	Bairstow	Verificou a teoria do limite elástico natural de Bauschinger e o limite de fadiga de Wöhler.
1910	Basquin	Desenvolveu a lei exponencial para testes de fadiga (a equação de Basquin).
1915	Smith/Wedgewood	Separaram a componente cíclica de deformação plástica da deformação plástica total.
1921	Griffith	Desenvolveu um critério de falha e relacionou a fadiga ao crescimento da trinca.
1927	Moore/Kommers	Quantificaram os dados de fadiga de alto-ciclo para diversos materiais em "A Fadiga dos Metais".
1930	Goodman/Soderberg	Determinaram, de forma independente, a influência das tensões médias na fadiga.
1937	Neuber	Publicou a equação de Neuber sobre concentração de tensão em entalhes (tradução inglesa em 1946).
1953	Peterson	Publicou "Fatores da Concentração de Tensão para Projeto", fornecendo uma abordagem para considerar os entalhes.
1955	Coffin/Manson	Publicaram, de forma independente, a lei de fadiga de baixo-ciclo baseada na deformação específica (lei de Coffin-Manson).
1961	Paris	Publicou a lei da mecânica da fratura de Paris para o crescimento de trincas na fadiga.

Figura 1: Cronologia das principais realizações e eventos de pesquisa sobre falha por fadiga
Fonte: Union College apud Norton, 2013.

2.1.2 Resistência à fadiga das barras de aço

Depois de muitos anos, as falhas por fadiga continuam sendo objeto de estudo, buscando-se compreender como características intrínsecas do material, como sua microestrutura e suas propriedades de resistência à tração, por exemplo, podem influenciar na sua resistência à fadiga.

A NBR 6118 (2014) define fadiga como um processo de modificação da estrutura interna do material, que acontece de maneira gradual e acumulativa, causado pelas oscilações de tensões decorrentes dos carregamentos cíclicos aplicados à estrutura. (ABNT, 2014)

Seguindo critérios de dimensionamento da NBR 6118 (2014), estruturas de concreto armado submetidas a ações cíclicas devem apresentar, nas considerações de estado limite de serviço, a verificação da microfissuração do concreto, que aumenta devido aos carregamentos cíclicos. Além disso, também é necessária a verificação quanto ao estado limite último de fadiga dos elementos estruturais. (ABNT, 2014)

Devido ao aumento do volume e cargas de tráfego, as pontes de concreto armado são elementos cada vez mais solicitados por fadiga e as cargas cíclicas podem levar ao dano progressivo do concreto e das barras de aço, e a subsequente falha da estrutura.

De acordo com Dantas (2010) cada material, concreto e aço, têm um comportamento próprio à fadiga, necessitando uma análise individual do comportamento de cada um dos materiais.

Para materiais ferrosos, como o aço, o material apresenta um limite de tensão ao qual abaixo do limite não sofrerá ruptura por fadiga. Esse limite é conhecido como limite de resistência à fadiga, e segundo Garcia et.al. (2012) na prática a razão entre o limite de resistência à fadiga e o limite de resistência à tração pode ser adotado como aproximadamente 0,5.

Em pontes de concreto armado, a resistência à fadiga das barras de aço é determinante na análise da segurança estrutural. Como é inviável uma investigação visual das barras de aço em tais elementos e como as barras podem falhar por fadiga enquanto apenas uma fissuração local externa no concreto possa ser observada, fatores que influenciam na resistência à fadiga das barras de aço serão tratados neste trabalho.

De acordo com Abrahão (2008), a fadiga em materiais metálicos é a principal causa de falha de componentes ou estruturas, sendo responsável por aproximadamente 90% de todas as falhas nesses materiais.

Segundo Shigley (2005) apud Abrahão (2008), existem três estágios na falha por fadiga: o início da fissura, a propagação da mesma e a ruptura repentina. No primeiro estágio surgem microfissuras, normalmente não visíveis a olho nu. No estágio dois ocorre com a progressão de micro a microfissuras; e o terceiro estágio corresponde ao momento em que o material não consegue mais suportar as cargas.

Segundo Bannantine et.al. (1990) apud Oliveira (2010), a falha por fadiga é fortemente influenciada pelas condições metalúrgicas do material como sua microestrutura e microdureza, e pelas descontinuidades na superfície como rugosidade e geometria do elemento que geram concentração de tensões.

Segundo Abrahão (2008), além dos citados acima, fatores como tensões residuais de tração decorrentes do processo de fabricação ou de processos de soldagem, e meios corrosivos, podem ser aceleradores do início das fissuras.

Neste trabalho serão analisadas a microestrutura e as irregularidades na superfície das barras de aço e apresentada a influência desses fatores na resistência à fadiga das barras.

2.2 TIPOS DE BARRAS DE AÇO

Os vergalhões produzidos ou comercializados no Brasil devem atender as características especificadas pela norma brasileira NBR 7480 (2007)- “Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação”. Esta norma regulamenta características geométricas, como ângulos e espaçamentos das nervuras, massa linear, comprimento, propriedades mecânicas e de soldabilidade. (ABNT, 2007)

A NBR 7480 (2007)- “Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado” classifica como barras os produtos de diâmetro nominal de 6,3 mm ou superior, obtidos exclusivamente por laminação a quente sem processo posterior de deformação mecânica. Os produtos obtidos por trefilação ou processos equivalentes com diâmetro nominal de 10mm ou inferior são definidos como fios. (ABNT, 2007)

Quanto à resistência de escoamento, as barras de aço são classificadas nas categorias CA-25 e CA-50, e os fios de aço na categoria CA-60.

Ainda de acordo com a ABNT (2007) na NBR 7480 (2007) as barras destinadas a armadura devem apresentar homogeneidade quanto às características geométricas, nervuras para facilitar a aderência com o concreto, marcas do fabricante, categoria do material e diâmetro nominal.

2.2.1 Processo de fabricação

O processo de fabricação das barras de aço pode ser realizado de diferentes maneiras, o que altera suas características intrínsecas, como por exemplo, suas propriedades físicas e microestrutura, influenciando a resistência à fadiga do material.

De acordo com Askeland et.al. (2008) o aço pode ser obtido através da redução do minério de ferro ou pela reciclagem da sucata de aço.

Segundo Arcelormittal (2018), o processo mais utilizado é a reciclagem da sucata do aço, por possuir um menor custo, maior disponibilidade e por ser reciclável, fornecendo sustentabilidade para a produção. A sucata é rigorosamente selecionada e gera um produto que possui melhor desempenho para a construção civil, pois, os resíduos que existem, como níquel, estanho e cromo, auxiliam no aumento das características mecânicas do aço.

Segundo Nunes (2009) apud Araújo (2010) o processo produtivo mais utilizado inicia na aciaria, com a fusão da carga metálica e correção de alguns elementos químicos, seguido do processo de refino e ajuste final da composição química.

De acordo com a Arcelormittal (2018), conforme citado no Manual do processo de fabricação, após a transformação da matéria prima em aço líquido, o lingotamento transforma-o em lingotes, que serão encaminhados para o processo de laminação para obtenção das barras destinadas a construção civil.

Segundo Nunes (2009) o processo de lingotamento finaliza a etapa de produção do aço, partindo em seguida para o processo de laminação. A Figura 2 apresenta as etapas de produção do aço até a laminação.

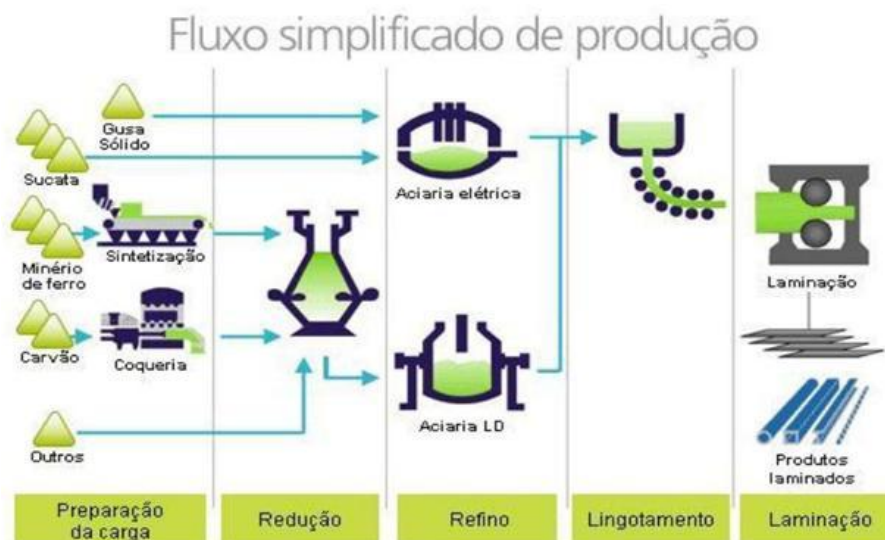


Figura 2: Etapas do processo de fabricação
 Fonte: Felício, 2012 apud Imlanowsky, 2017.

2.2.2 Laminação

De acordo com Schaeffer (2004), a laminação é um processo de conformação mecânica que busca a produção de chapas, barras e perfis, realizado a altas velocidades com boas tolerâncias dimensionais e melhoria de propriedades como ductilidade, resistência mecânica e estrutura superficial dos materiais.

O processo de laminação a quente, como ocorre no aço CA-50, consiste no aquecimento de 1000 a 1200 °C do lingote obtido da matéria prima, por meio do forno de aquecimento de laminação, a temperaturas acima da temperatura de recristalização do metal da peça. Segundo Bresciani Filho et.al.(1991) esse aquecimento é realizado a fim de reduzir a resistência à deformação plástica e permitir a recuperação da estrutura do aço, evitando o encruamento.

De acordo com a Arcelormittal (2018), após o aquecimento, os materiais passam por três etapas: desbaste, preparação e acabamento, onde irão obter o perfil, bitola e dimensões desejadas.

No desbaste o lingote será conformado por cilindros, tendo uma diminuição do seu diâmetro e aumento do comprimento. No preparador, adquire o formato de barra laminada, e no acabador recebe as marcações das nervuras, gravações de bitola e marcas, como especificadas nas normas técnicas.

1.1.1.1 Têmpera e Revenimento

Nesse processo de fabricação, conhecido como Tempcore ou Thermex, a barra passa por um sistema de resfriamento brusco com jatos d'água, levando a superfície da barra de 1000 a 200°C em segundos, segundo Alves Filho (2004). Dessa maneira, a superfície e o núcleo são resfriados a diferentes velocidades, sendo um resfriamento rápido da superfície e um resfriamento mais lento do núcleo.

Segundo Simon et.al.(1984) apud Barreto et.al. (2009) o resfriamento repentino causa a têmpera da camada superficial das barras, transformando a austenita, microestrutura primária do aço, em martensita.

Ao ser retirado o resfriamento pelos jatos d'água a superfície da barra passa a ser reaquecida pelo calor ainda existente no núcleo até que toda a seção fique praticamente na mesma temperatura, o que é conhecido como auto-revenimento. (ALVES FILHO, 2007).

De acordo com Alves Filho (2007), o processo do auto-revenimento transforma a martensita criada na camada superficial em martensita revenida. O aquecimento da martensita produz reajustes internos que aliviam as tensões e geram uma microestrutura que atinge altos limites de alongamento e de resistência, sem possuir a fragilidade da martensita.

Segundo Queiroz Neto (2011), o objetivo ao se realizar a têmpera é a obtenção da estrutura da martensita na camada superficial, que possibilita um aumento de dureza e a criação de uma superfície com grande resistência ao desgaste e à abrasão. Além disso, esse processo gera uma redução da ductilidade e da tenacidade, que podem ser atenuados com o revenimento. O revenimento é responsável pelo alívio das tensões internas, aumento da ductilidade e da resistência ao choque.

Como resultado desse processo, segundo Alves Filho (2004), o vergalhão possui uma camada superficial com alto limite de escoamento e núcleo com alta ductilidade e as barras que passam por tratamento térmico possuem um aumento na resistência à tração do material e uma redução nos valores de alongamento.

Segundo resultados obtidos por Barreto (2009) a retirada da camada que possui a martensita, microestrutura de maior dureza proveniente do tratamento térmico, resultou em um decréscimo significativo dos resultados de resistência a tração das barras.

Além disso, de acordo com Arcelormittal (2018), a barra que passa pelo processo de têmpera e revenimento apresenta também a característica de

soldabilidade, podendo ser soldado sem necessidade de pré ou pós aquecimento da barra e apresenta alta capacidade de dobramento.

2.3 CARACTERIZAÇÃO

2.3.1 Composição química

A NBR 6215 (1996) – “Produtos siderúrgicos- terminologia” define o aço como sendo uma liga ferrosa passível de deformação plástica que apresenta, em geral, teor de carbono entre 0,008% e 2%. (ABNT, 1996)

Segundo Chiaverini (1982) apud Imianowsky et al. (2017), o acréscimo de carbono em valor de mercado não ultrapassa 1% a fim de evitar alta dureza, resultando em uma liga Ferro-Carbono, onde pode ser encontrado também níquel, volfrâmio, manganês, cromo, fósforo, enxofre entre outros elementos e resíduos resultantes do processo de fabricação.

Segundo Teobaldo (2004) apud Imianowsky et al. (2017), a composição química determina muitas características dos aços, permitindo sua obtenção com qualidades mecânicas e propriedades diferenciadas a partir de pequenas variações dos elementos componentes deste material. Alguns elementos podem ser adicionados a fim de alterar alguma característica da liga, como o cromo, adicionado para aumentar a resistência à corrosão.

A variação da composição química pode permitir que uma barra sem tratamento térmico atinja desempenhos semelhantes ou maiores que barras que passaram pela têmpera e revenimento. Segundo Costa (2014), a adição de boro, por exemplo, pode gerar a estrutura da martensita e aumentar a resistência à tração e a resistência ao impacto. Além disso, o aumento de alguns elementos como o carbono, pode melhorar características de dureza e de resistência à tração do material, mas altera negativamente a ductilidade e soldabilidade.

Os valores máximos dos elementos carbono, silício, manganês, fósforo, enxofre e Carbono equivalente (Ce) admitidos pela ABNT (1985) na NBR 8965 - “Barras de aço CA 42 - S com características de soldabilidade destinadas a armaduras para concreto armado – Especificação para as barras de aço soldáveis” estão especificados na Tabela 1.

Elementos	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Ce
Especificação (máximo valor admitido)	0,35	0,50	1,50	0,050	0,050	0,55

Tabela 1: Valores máximos dos elementos
Fonte: ABN, 1985- NBR 8965 (adaptado).

O carbono equivalente (Ce) é determinado, segundo a ABNT (1985), por meio da Equação (1) presente na norma NBR 8965 (1985). Segundo Nunes (2009), o carbono equivalente é uma medida que avalia a composição química da liga de acordo com a influência de cada elemento.

$$Ce = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + V + Mo}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (1)$$

2.3.2 Microestrutura

Segundo Colpaert (1974), as propriedades mecânicas de um metal dependem da sua composição química e de seu arranjo microestrutural.

O arranjo microestrutural de um material resulta da composição química e dos processos mecânicos e térmicos na fabricação. A partir do diagrama de fases do sistema Fe-C que relaciona % teor de carbono e temperatura, é possível conhecer a microestrutura dos materiais metálicos conforme apresentado na Figura 3.

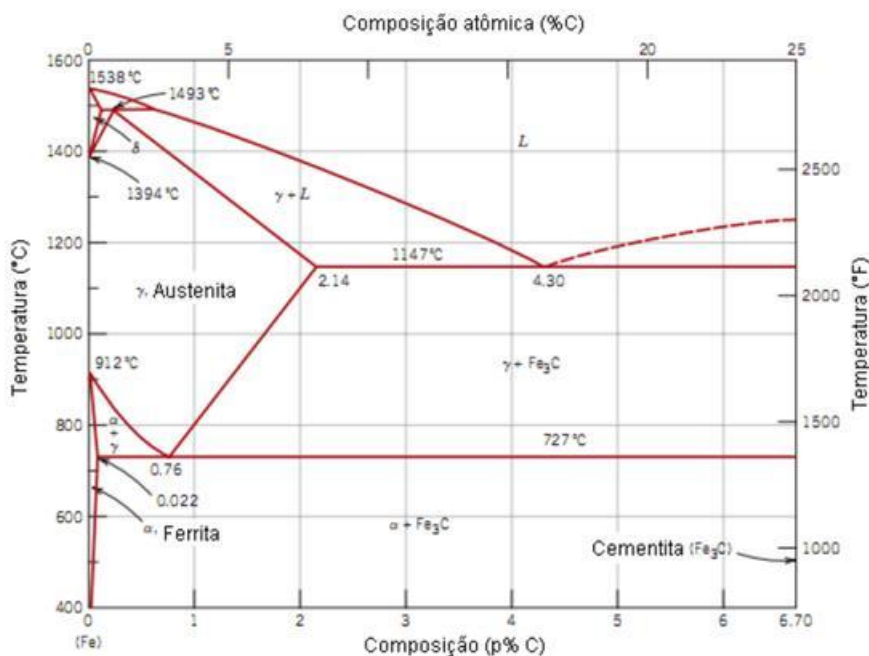


Figura 3: Diagrama de fases Fe-C
Fonte: Queiroz Neto, 2011.

Segundo Colpaert (1974), a estrutura primária do aço é a austenita, existente a temperaturas entre 912 °C e 1495°C.

O resfriamento lento do aço à temperatura ambiente pode levar à transformação da austenita em ferrita, cementita e/ou perlita (ferrita e cementita). Segundo Araújo (2010), quando o resfriamento acontece à velocidade moderada, forma-se a bainita. Já quando o resfriamento é brusco, a austenita dar-se origem à martensita.

As barras de aço CA-50 resultantes apenas do processo de laminação a quente sofrem um resfriamento lento até a temperatura ambiente; conseqüentemente, ferrita e perlita são encontradas ao longo da seção transversal dessas barras. A Figura 4 ilustra a microestrutura de perlita e ferrita visualizada em aços resfriados lentamente.

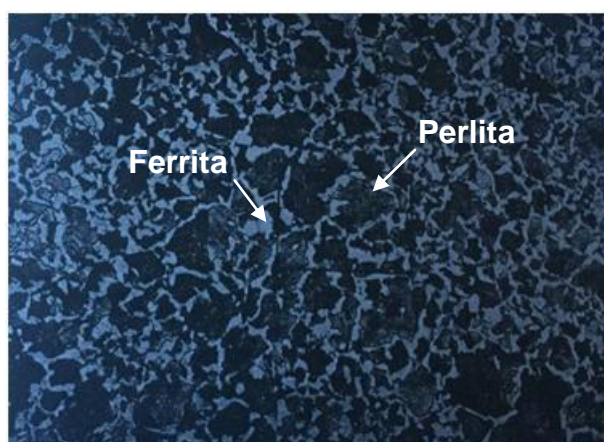


Figura 4: Perlita e ferrita em aço resfriado lentamente
Fonte: Colpaert, 1974.

A ferrita, estrutura de pouca dureza e resistência e alta ductilidade é a forma mais estável à temperatura ambiente. A perlita é uma estrutura que possui dureza intermediária quando comparada com as demais estruturas, sendo composta de finas lamelas justapostas de ferrita e cementita, que podem ser planas, curvas ou onduladas. A cementita é uma estrutura que se apresenta em grandes massas e não mostra subdivisões em grãos, possuindo grande dureza e sendo muito quebradiça. Segundo Callister et al. (2006) a cementita é uma estrutura muito dura e frágil, aumentando a resistência dos aços.

As barras de aço CA-50 também podem ser produzidas a partir da laminação a quente seguida da têmpera e revenimento. Esse processo de têmpera e revenimento pode ser dividido em três estágios. Na têmpera as barras laminadas a quente, com microestrutura austenítica, são resfriadas bruscamente com jatos d'água dando origem a uma camada superficial e subsuperficial martensítica e o núcleo, ainda a temperaturas superiores a 1000°C, permanecendo austenítico Simon et.al. apud Barreto et.al. (2009). Segundo Callister et.al. (2008) a

transformação martensítica ocorre quando a taxa de resfriamento é rápida o suficiente para impedir a difusão do carbono, acontecendo quase instantaneamente, no qual a austenita sofre uma transformação polimórfica, distorcendo a rede cristalina, com seus grãos assumindo formas de placas ou agulhas.

O segundo estágio, de acordo com Alves Filho (2004), ocorre quando o calor presente no núcleo da barra aquece as camadas mais externas levando a um processo de auto-revenimento, transformando a microestrutura dessas camadas em martensita revenida, visualizada na Figura 5.



Figura 5: Estrutura martensítica presente em aço carbono temperado e revenido
Fonte: Colpaert, 1974.

O terceiro estágio acontece quando o núcleo da barra resfria-se então lentamente, conduzindo para uma transformação da austenita remanescente nas estruturas ferrita, perlita e, em alguns casos, bainita (SIMON et al., 1984).

A formação da bainita segundo Araújo (2010) ocorre quando a decomposição da austenita em ferrita e cementita ocorre em temperaturas acima da temperatura de formação da martensita, mas abaixo da temperatura de formação de perlita. A microestrutura da bainita consiste em ripas finas de ferrita ou ripas finas de ferrita com cementita no interior das ripas.

As barras de aço temperadas e revenidas são constituídas principalmente de três zonas (Figura 6a): as camadas mais externas formadas por martensita temperada (Figura 6b); a zona intermediária, composta por ferrita e perlita na forma de grãos mais alongados (Figura 6c); e o núcleo, composto de ferrita e perlita na forma de colônias maiores e equiaxiais, com dimensões semelhantes nas três direções (Figura 6d). (Rocha, 2014).

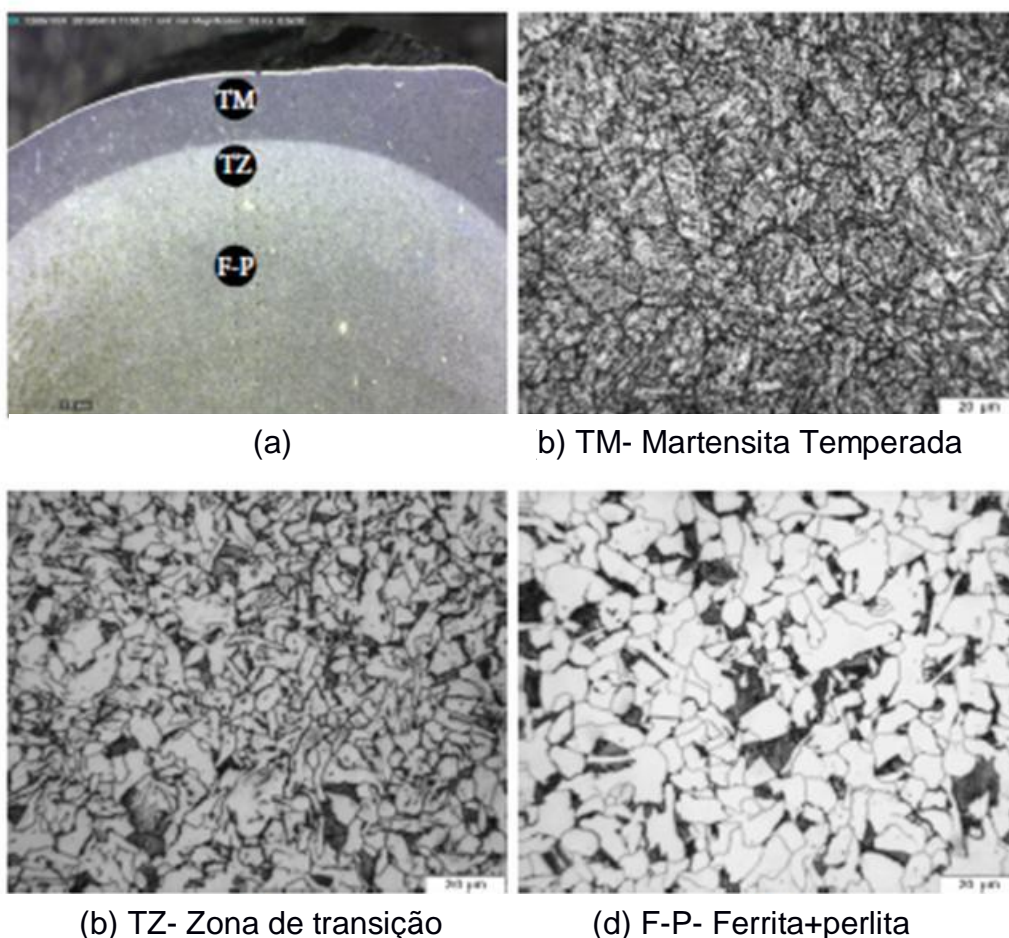


Figura 6: Microestrutura obtida em barras fabricadas na Europa
Fonte: Rocha, 2014.

Segundo Askeland et.al. (2008), a importância do conhecimento da microestrutura das barras de aço está intimamente ligada com o comportamento do material à fadiga. Segundo Totten (2006) apud Rebech (2011), tamanho, forma, distribuição, composição e estrutura cristalina das fases componentes do aço controlam suas propriedades mecânicas finais.

Cada fase apresenta suas próprias características mecânicas, dentre elas dureza, resistência e ductilidade, gerando uma diversidade de combinações de características. A existência de maiores quantidades de uma microestrutura, quando comparadas às demais, aproxima o comportamento do elemento ao comportamento da microestrutura, influenciando diretamente o desempenho mecânico do material e, conseqüentemente, seu desempenho em relação à fadiga.

Segundo Pacheco (2013), existe influência direta da microestrutura no desenvolvimento de danos no elemento, uma vez que alguns materiais são mais resistentes à propagação de trincas que outros.

Para o caso do aço, a existência de uma maior quantidade de ferrita, por exemplo, pode acarretar em uma diminuição da resistência do material pelo fato da microestrutura apresentar dureza menor que as demais. A martensita, por sua vez, traz ganhos de resistência mecânica ao elemento, por possuir alto valor de dureza comparada à ferrita.

Além dos diferentes tipos de microestruturas, o tamanho do grão também influencia da resistência à fadiga do aço. De acordo com Queiroz Neto (2011) o contorno de grão se apresenta como uma barreira durante a transferência de tensões. Para que uma trinca se dissipe é necessário que ultrapasse o contorno dos grãos, atingindo o próximo grão e se dissipando através dele também. Dessa maneira, para percorrer uma mesma distância é necessário que a trinca ultrapasse um número maior de contornos em microestruturas de grãos menores, necessitando de mais energia.

Além disso, segundo Zepter (2007), o tamanho do grão pode influenciar o limite de escoamento, sendo maior esse limite para grãos menores. Além disso, segundo Rocha (2004) microestruturas com grão menores tendem a apresentar uma melhor resistência à fadiga comparadas a estruturas de grãos maiores.

2.3.3 Microdureza

De acordo com Souza (1982), dureza é uma propriedade mecânica com diferentes especificações. Dureza pode ser relacionada aos seguintes parâmetros:

- Resistência à deformação plástica permanente;
- Resistência à penetração de um material duro no outro;
- Resistência ao desgaste;
- Resistência ao corte do metal;
- Resistência ao risco.

Para abranger todas as especificações, pode-se dividir o ensaio de dureza em três tipos principais: por penetração, por choque e por risco, sendo o de penetração o mais utilizado (SOUZA, 1982).

Segundo Rattichieri (2004) as dificuldades de determinação da dureza de constituintes individuais de uma microestrutura de materiais frágeis, de peças pequenas ou extremamente finas, induziram ao uso da microdureza, que é aplicada

como método de classificação de materiais e para o estudo comparativo de mudanças nas suas propriedades.

A diferença entre a dureza e a microdureza, é que o segundo caso, de acordo com a ASTM E 385(2017)- *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, é utilizado para avaliar e quantificar variações de dureza em pequenas distâncias, permitindo conhecer valores de dureza em faces, constituintes ou regiões específicas, que pode ser de extrema importância para peças que sofrem tratamentos térmicos e possuem diferentes microestruturas em sua composição.

Logo, o conhecimento dos valores de microdureza de uma estrutura é adequado para materiais que sofreram o processo de endurecimento superficial, como é o caso das barras de aço temperadas e revenidas, por possuir regiões de dureza distintas (ASKELAND et. al., 2008).

Nas barras temperadas e revenidas, é comum a obtenção de valores de microdureza maiores para a camada superficial/subsuperficial, devido às propriedades da martensita, presente nessas regiões.

Segundo Queiroz Neto (2011), a dureza é influenciada pelo teor de carbono no material. Segundo Rodrigues (2014), o carbono é um elemento químico endurecedor do material: quanto maior a taxa de carbono maior a dureza e resistência dos materiais. Outros elementos são também capazes de alterar a dureza da amostra, em especial o manganês, que é capaz de aumentar a dureza do aço.

2.3.4 Resistência à tração

De acordo com Callister et.al. (2006), para realização de projetos é preciso conhecer as características dos materiais e projetar a estrutura de modo que qualquer deformação não seja excessiva e não ocorra uma fratura do material. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada, como acontece no caso de aplicação de forças de tração.

No ensaio mecânico de tração, a amostra é deformada devido a uma carga de tração aplicada gradativamente de maneira uniaxial no corpo de prova, normalmente até sua fratura.

Segundo a ABNT(1992) na NBR 6152 (1992)- “Materiais metálicos- Ensaio de tração à temperatura ambiente”, o ensaio pode gerar vários parâmetros, como f_m , f_u e f_y . O parâmetro f_m corresponde à força máxima obtida no ensaio. Já o parâmetro f_u , segundo a ABNT(2008) na NBR 8800 (2008)- “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios” corresponde à resistência à ruptura do aço a tração. O parâmetro f_y corresponde à resistência ao escoamento do aço.

A NBR 7480 (2007)- “Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado- Especificações” apresenta no seu Anexo B valores referentes às propriedades mecânicas exigíveis de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado, incluindo valores mínimos de tração, que são apresentados na Figura 7. (ABNT, 2007)

Categoria	Valores mínimos de tração				Ensaio de dobramento a 180°		Aderência	
	Resistência característica de escoamento ^a f_{yk} MPa ^e	Limite de resistência ^b f_{st} MPa ^f	Alongamento após ruptura em 10 ϕ ^c A %	Alongamento total na força máxima ^d A_{gt} %	Diâmetro do pino mm		Coeficiente de conformação superficial mínimo η	
					$\phi < 20$	$\phi \geq 20$	$\phi < 10$ mm	$\phi \geq 10$ mm
CA-25	250	1,20 f_y	18	-	2 ϕ	4 ϕ	1,0	1,0
CA-50	500	1,08 f_y	8	5	3 ϕ	6 ϕ	1,0	1,5
CA-60	600	1,05 f_y ^c	5	-	5 ϕ	-	1,0	1,5

Figura 7: Propriedades mecânicas exigíveis de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado
Fonte:ABNT, 2007- NBR 7480 (2007)

A partir desse ensaio também é possível conhecer o comportamento mecânico do material pelo gráfico de tensão x deformação.

Souza (1982) define a tensão como a resistência interna de um corpo a uma força externa aplicada sobre ele, por unidade de área. A deformação por sua vez, é a variação de uma dimensão, por unidade da mesma dimensão, quando submetido a um esforço qualquer.

A deformação do material pode ser elástica ou plástica. Segundo Askeland et.al.(2008), a deformação elástica é tida como uma deformação reversível, que estará presente no corpo enquanto a tensão for aplicada, deixando de existir ao ser retirada a carga. A deformação plástica é tida como uma deformação permanente, que se mantém no material mesmo após a retirada da aplicação da força.

A curva tensão x deformação do aço apresenta as duas regiões: a primeira (i) com uma deformação reversível variando de maneira aproximadamente linear, e a segunda (ii) onde a deformação não é mais linear e passa a ser irreversível, como ilustra a Figura 8.

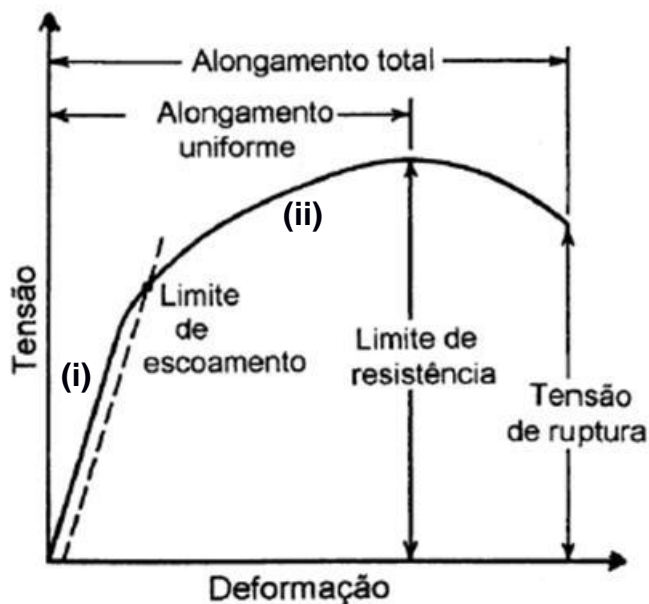


Figura 8: Curva Tensão x Deformação
Fonte: Queiroz Neto, 2011.

A curva tensão x deformação permite também o conhecimento da ductilidade do material. A ductilidade é a propriedade que fornece o grau de deformação plástica suportado pelo material até a fratura. Um material é frágil quando apresenta uma deformação plástica muito pequena, com deformação de fratura inferior a 5%, de acordo com Callister et.al. (2006).

2.3.5 Rugosidade

Segundo Fernandes et.al. (2017), a superfície de uma amostra é originada por três componentes: a forma da amostra, as ondulações e a rugosidade da amostra, como ilustrado na Figura 9.

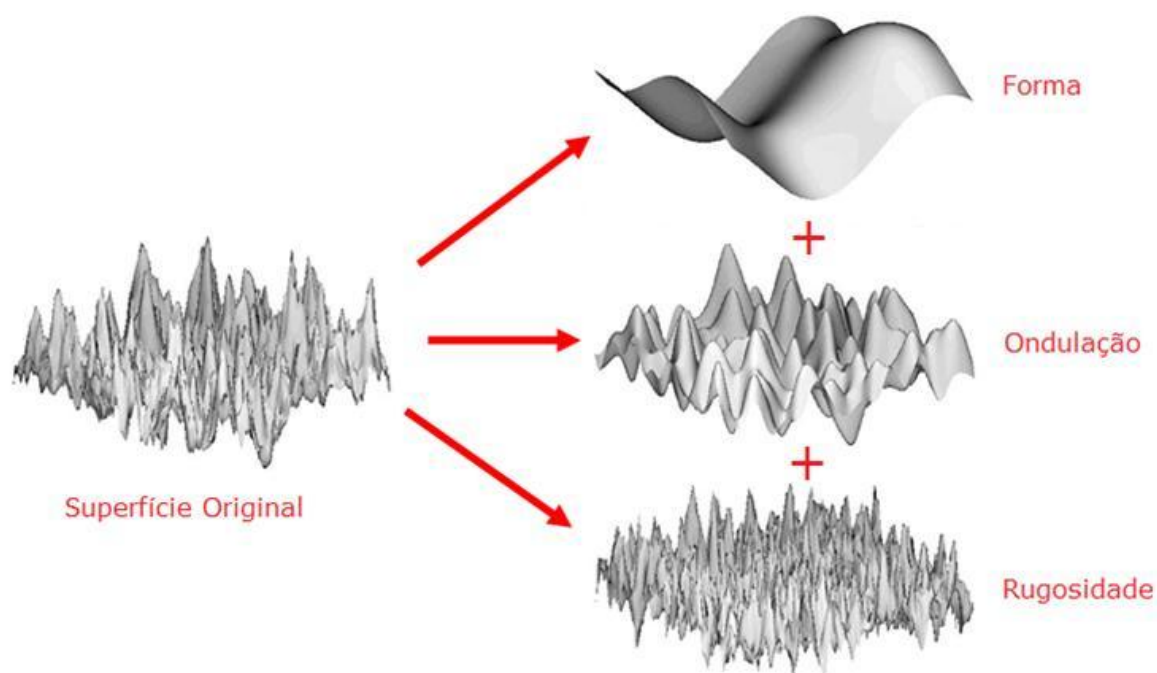


Figura 9: Componentes da superfície de uma amostra
Fonte: Josso et.al. (2002) apud Fernandes et.al, 2017.

A componente mais visual é a forma, responsável pelo formato tridimensional da amostra, assumindo um formato circular para as barras de aço. Além desse componente, as superfícies são compostas de ondulações que por sua vez são compostas pela rugosidade da peça.

Segundo Zahavi e Torbilo (1996) apud Oliveira (2010), o conjunto de irregularidades superficiais formados por picos e vales pode ser chamado de rugosidade superficial, sendo os tamanhos e a distribuição espacial destas irregularidades importantes para o desempenho dos materiais.

O estudo da rugosidade é de fundamental importância nas análises de resistência à fadiga de componentes metálicos, pois, de acordo com Boniatti et.al.(2003), a fratura por fadiga tende a iniciar-se na superfície devido à existência de irregularidades; estas são microentalhes e, portanto, zonas de concentração de tensão, o que significa que a tensão nessas regiões é superior à tensão aplicada ao componente (ZAHAVI et al., 1996 apud AROLA et al., 2002).

A rugosidade pode ser analisada por meio de parâmetros como R_a , R_z , R_y . Esses parâmetros são fornecidos por equipamentos de detecção bidimensional da superfície, como o rugosímetro, ou podem ser obtidos por meio de equações disponíveis na literatura (AROLA et al., 2002).

A rugosidade média (R_a) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos dos pontos de perfil de rugosidade, em relação à linha

média dentro do comprimento de amostragem L_m . A Figura 10 ilustra o processo de obtenção do valor de R_a , onde se projeta a superfície que se encontra abaixo da linha média para cima da linha média e se calcula a média dos novos valores.

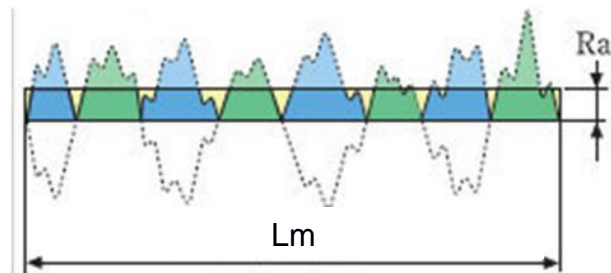


Figura 10: Cálculo do parâmetro R_a
Fonte: Fernandes et.al., 2017.

O parâmetro R_y é a máxima distância pico-vale, dentro do comprimento de avaliação L_m , como pode ser visualizado na Figura 11.

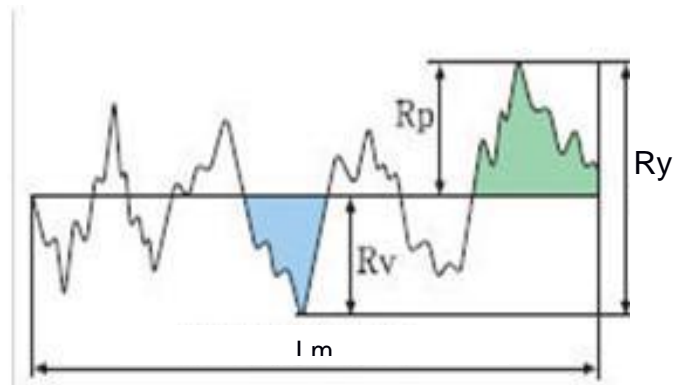


Figura 11: Cálculo do parâmetro R_y
Fonte: Fernandes et.al., 2017.

O parâmetro R_z é a média aritmética dos 5 valores de rugosidade parcial Z_i , que é a soma dos valores absolutos das ordenadas nos pontos de maior afastamento existentes dentro do comprimento de amostragem L_e ; que corresponde a um quinto do comprimento L_m . A Figura 12 ilustra graficamente a obtenção dos valores de R_z a partir do perfil de rugosidade.

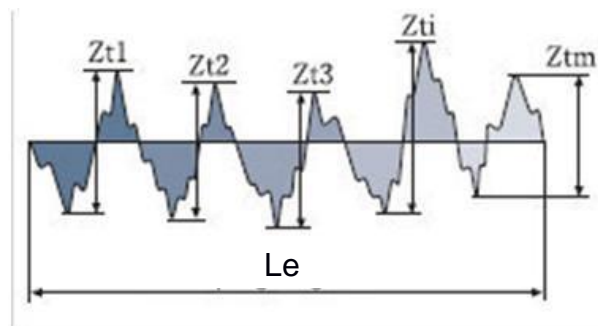


Figura 12: Cálculo do parâmetro R_z
Fonte: Fernandes et.al., 2017.

Arola et.al (2002) indica as equações (2), (3) e (4) para cálculo dos parâmetros R_a , R_y e R_z respectivamente. Esses parâmetros obtidos por meio da distribuição de altura z ao longo do comprimento de avaliação L_m .

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^l |z| dx \quad (2)$$

$$R_y = |z_{max} - z_{min}| \quad (3)$$

$$R_z = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^5 (z_i)_{max} + \sum_{j=1}^5 |(z_j)_{min}| \right] \quad (4)$$

2.3.6 Geometria das barras (nervuras) e marcas do fabricante

Segundo Ashby et.al. (2007), qualquer descontinuidade na seção de um componente carregado faz com que a tensão local aumente acima da tensão aplicada.

As descontinuidades em barras de aço ocorrem devido a fatores relacionados com a geometria e composição do material, como:

- Mudanças bruscas da seção transversal, como a descontinuidade da superfície livre da barra e a nervura;
- Marcas de identificação do fabricante;
- Descontinuidades microscópicas, como a rugosidade e inclusões.

A concentração de tensão decorrente destas descontinuidades pode ser quantificada através do fator de concentração de tensão, K_t , que relaciona a tensão nominal com a tensão existente na descontinuidade. Segundo Budynas et al. (2011), o fator é a razão entre a máxima tensão que atua numa seção e a tensão nominal que estaria atuando caso não houvesse a descontinuidade. K_t pode ser obtido por meio da Equação (5).

$$K_t = \frac{\sigma}{\sigma_{nom}} \quad (5)$$

Onde σ refere-se à tensão máxima na descontinuidade e σ_{nom} à tensão nominal.

De acordo com Branco et al.(1999), o fator K_t está associado à geometria do entalhe e ao modo de aplicação da carga. É considerada ainda a hipótese de que o material é perfeitamente homogêneo, isotrópico e elástico.

Segundo Hibbler (2010) os concentradores de tensão são responsáveis por diversas falhas de elementos estruturais ou mecânicos sujeitos a carregamentos de fadiga. O material localizado na ponta da trinca permanece em estado frágil e, com a manutenção da aplicação do carregamento, a trinca pode continuar a crescer e levar à ruptura.

Acidentes devido a falhas por fadiga em componentes metálicos são facilmente encontrados na literatura. Um exemplo clássico é a falha ocorrida nos aviões Comet na década de 50: uma trinca por fadiga de poucos milímetros propagou-se nos cantos quadrados das janelas, zonas de concentração de tensão, levando à desintegração dos aviões durante o vôo. Desde então as janelas dos aviões passaram a ter cantos arredondados de forma a suavizar a geometria e permitir a redução da concentração de tensão local.

Nas barras de aço retas utilizadas em estruturas de concreto armado, os pontos de concentração de tensão são o raio de transição entre a superfície livre e as nervuras transversais e as marcas do fabricante. Segundo a ABNT(2007) na NBR 7480 (2007), as barras da categoria CA-50 são obrigatoriamente providas de nervuras transversais oblíquas, sendo necessário que os eixos das nervuras transversais oblíquas formem, com a direção do eixo da barra, um ângulo entre 45° e 75° . Esse ângulo é denominado β e pode ser visualizado na Figura 13.

O espaçamento médio das nervuras transversais, expresso pela letra e , que pode ser visualizado na Figura 13, deve estar entre 50% e 80% do diâmetro nominal, medidas ao longo de uma mesma geratriz.

Além das nervuras transversais oblíquas, as barras devem ter pelo menos duas nervuras longitudinais, contínuas e diametralmente opostas, com o intuito de impedir o giro da barra dentro do concreto, como pode ser visualizado no exemplo de configuração geométrica indicado na Figura 13.

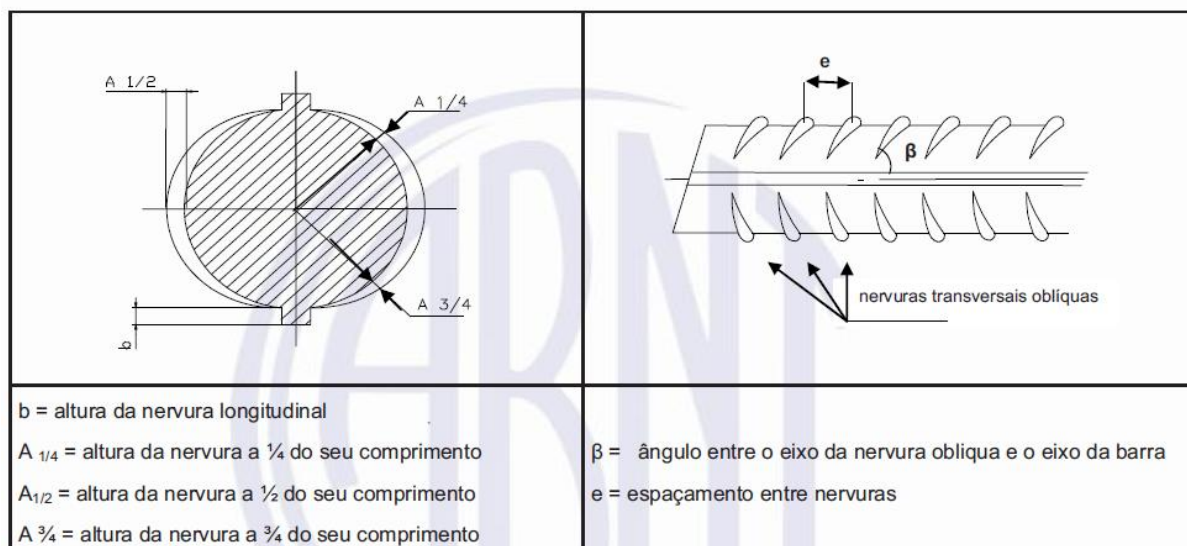


Figura 13: Exemplo de configuração geométrica com nervuras transversais oblíquas em dois lados da barra e nervuras longitudinais
Fonte: ABNT, 2007- NBR 7480 (2007)

Por recomendações da ABNT (2007) na NBR 7480 (2007), as barras nervuradas devem ser identificadas através de laminação em relevo, indicando de forma legível o nome e/ou marca do produtor, a categoria do material e o respectivo diâmetro nominal.

Segundo recomendações da NBR 6118 (2014), os pontos onde existem as marcas de identificação do fabricante devem apresentar os valores de resistência à fadiga considerando a eventual concentração de tensões provocadas pelo formato do relevo da marca na barra. (ABNT, 2014)

3 METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo caracterizar as barras de aço CA-50 analisando sua microestrutura, microdureza, resistência à tração e rugosidade. Além disso, a rugosidade é quantificada por meio da determinação do fator de concentração de tensão, K_t , que expressa a severidade das irregularidades e constitui um parâmetro comumente utilizado em estudos de previsão da vida à fadiga de componentes metálicos.

A pesquisa pode ser classificada como quantitativa, pois é quantificado o tamanho médio dos grãos, a dureza da microestrutura, as propriedades mecânicas e as irregularidades da superfície das barras de aço. A pesquisa pode também ser classificada como explicativa por buscar relacionar as características da microestrutura às propriedades mecânicas das barras. Quanto aos procedimentos técnicos adotados utilizaram-se referências bibliográficas constituídas principalmente por normas e artigos científicos.

Este trabalho inicia-se com pesquisa bibliográfica, seguida da realização dos ensaios de caracterização, análise e discussão dos resultados. As etapas dos ensaios estão ilustradas na Figura 14.

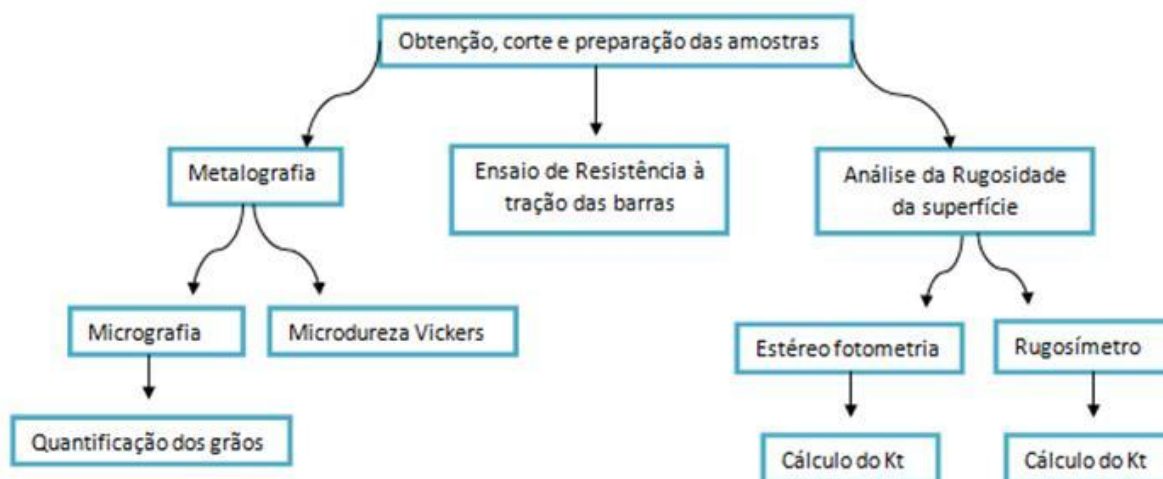


Figura 14: Diagrama da pesquisa
Fonte: Própria, 2018.

3.1 MATERIAIS

Para a caracterização das barras de aço CA-50 foram utilizadas seis barras com diâmetro nominal de 16 mm. Duas barras foram fornecidas pela empresa A e suas amostras analisadas são referenciadas neste trabalho como 1 e 2. As barras da empresa B foram retiradas de um canteiro de obras e suas amostras são referidas como 3 e 4. As barras C foram retiradas de uma construção da década de 80 que estava em processo de demolição. As amostras dessas barras são referidas como 5 e 6.

A Tabela 2 apresenta um resumo da numeração utilizada no trabalho e correlação com o local de obtenção de cada amostra.

Barras	Numeração das amostras	Local de obtenção
Barras Empresa A	1 e 2	Revendedor
Barras Empresa B	3 e 4	Canteiro de obras - construção em andamento
Barras Antigas- C	5 e 6	Obra da década de 80 em demolição

Tabela 2: Resumo da numeração das amostras
Fonte: Própria, 2018.

Como o processo de laminação seguido da têmpera e revenimento passou a ser implantado a nível mundial a partir da década de setenta, é esperado que as barras analisadas produzidas na década de oitenta não apresentem o tratamento térmico, diferentemente do que é esperado para as barras atuais.

A análise de barras produzidas na década de oitenta e de barras produzidas atualmente busca apresentar as diferenças existentes no processo de fabricação das mesmas. Além disso, a utilização de amostras de diferentes empresas, por sua vez, busca comparar os resultados obtidos em diferentes fabricantes do país.

Na Figura 15 são apresentadas as barras de cada grupo A, B e C analisadas. A barra da empresa A apresenta a superfície em excelente estado de conservação; a barra da empresa B encontra-se com sinais de corrosão superficial gerados pelo armazenamento inadequado, comum em obras de construção civil; e a barra C, produzida na década de oitenta, apresenta uma camada externa semelhante a uma casca originada do período de utilização ao longo dos anos.



Figura 15: Barras de aço analisadas
Fonte: Própria, 2018.

Para a caracterização das barras de aço foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Prensa de Embutimento Metalográfico Arotec PRE-30S;
- Lixadeira e poltriz modelo PLF;
- Microscópio ótico MEIJE TECHNO CK3800;
- Durômetro OLYMPUS BX60;
- Microscópio eletrônico de varredura EVO MA15;
- Rugosímetro TR220;
- Máquina universal para ensaios mecânicos modelo EMIC DL30000N.

Todos os equipamentos utilizados pertencem aos laboratórios de Metalografia e Laboratórios de Materiais e Estruturas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná no Câmpus de Pato Branco e ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná no Câmpus Curitiba- Sede Centro.

3.2 MÉTODOS

Os ensaios de caracterização realizados buscam investigar a microestrutura, propriedades mecânicas (microdureza e resistência à tração) e a rugosidade da superfície por serem características que influenciam a resistência à fadiga.

Para realização dos ensaios foram utilizadas normas regulamentadoras a fim de obedecer a padrões que se assemelhem com as condições reais e obter resultados dentro dos padrões estabelecidos. As normas utilizadas foram: Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT e International American Society for Testing and Materials- ASTM. A metodologia utilizada para a realização de cada ensaio encontra-se nos itens a seguir.

3.2.1 Microestrutura

3.2.1.1 Metalografia

Para a identificação da microestrutura das barras A, B e C foi utilizado o procedimento de metalografia. As amostras analisadas das barras A e B estão exemplificadas na Figura 16; as amostras da barra C são semelhantes às demais. Todas as amostras seccionadas de cada barra possuem uma altura de aproximadamente um centímetro.

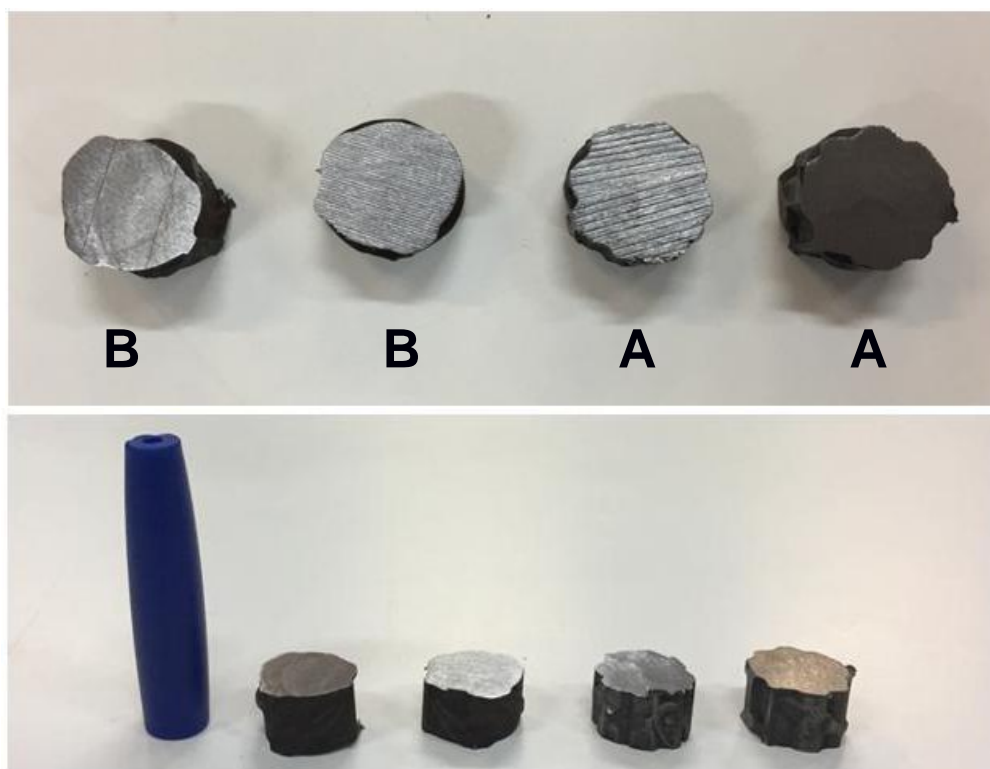


Figura 16: Amostras de barras A e B utilizadas para metalografia
Fonte: Própria, 2018.

As etapas para preparação de cada amostra atendem à seguinte sequência: corte da seção, embutimento, polimento e ataque químico da superfície.

O corte das seções foi realizado através de uma serra de corte. Após esta etapa, cada seção foi embutida em baquelite de modo a facilitar o manuseio durante o polimento. O equipamento utilizado para o embutimento foi a prensa de embutimento metalografico Arotec PRE-30S (Figura 17).



Figura 17: Prensa de embutimento metalográfico
Fonte: Própria, 2018.

Em seguida, o polimento foi realizado, inicialmente, utilizando lixas d' água. Iniciou-se pela lixa n° 220, em direção normal aos riscos do corte, até o desaparecimento das linhas, seguida pela n°320, com o sentido de polimento perpendicular ao anterior. O processo é continuado com as lixas n° 400, 600 e 1200.

Seguiu-se o polimento utilizando lixadeira politriz modelo PLF (Figura 18) seguindo as seguintes etapas: 1) polimento com pano para polimento metalográfico de poliéster e alumina $1\mu m$ e 2) polimento com pano para polimento metalográfico de veludo flocado com solução de diamante $3\mu m$ e lubrificante concentrado para polimento azul, destinado a metais ferrosos e 3) polimento pano para polimento metalográfico de veludo flocado com solução de diamante $1\mu m$ e lubrificante concentrado para polimento azul para finalizar a regularização da seção. A Figura 19 apresenta as soluções utilizadas para polimento.



Figura 18: Lixadeira e Politriz
Fonte: Própria, 2018.



Figura 19: Soluções para polimento: a) Alumina 1 μm ; b) Lubrificante azul; c) Diamante 1 μm e 3 μm
Fonte: Própria, 2018.

Após o polimento foi realizado o ataque químico por imersão. O ataque químico faz-se necessário para possibilitar a identificação da microestrutura no microscópio ótico.

As amostras foram mergulhadas em uma solução de Nital 2% por aproximadamente 7 segundos. Segundo Anazawa (2007), o Nital é comumente utilizado por permitir a visualização da microestrutura em aço carbono.

Após o ataque químico, cada amostra foi analisada no microscópio ótico modelo MEIJI TECHNO CK3800 (Figura 20). As imagens obtidas da microestrutura permitiram a identificação e quantificação dos grãos seguindo norma ASTM E112-96 (2004)- *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size* conforme apresentado na seção 3.2.1.2.



Figura 20: Microscópio ótico
Fonte: Própria, 2018.

3.2.1.2 Quantificação do grão

Para determinação do tamanho médio do grão foram utilizadas as recomendações da ASTM E112-96 (2004)- *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. O método *Abrams Three-Circle* utilizado na quantificação da microestrutura consiste na contagem dos contornos dos grãos interceptados por três círculos concêntricos igualmente espaçados, como apresentado na Figura 21. A soma das medidas da circunferência dos três círculos é igual a 500 mm.

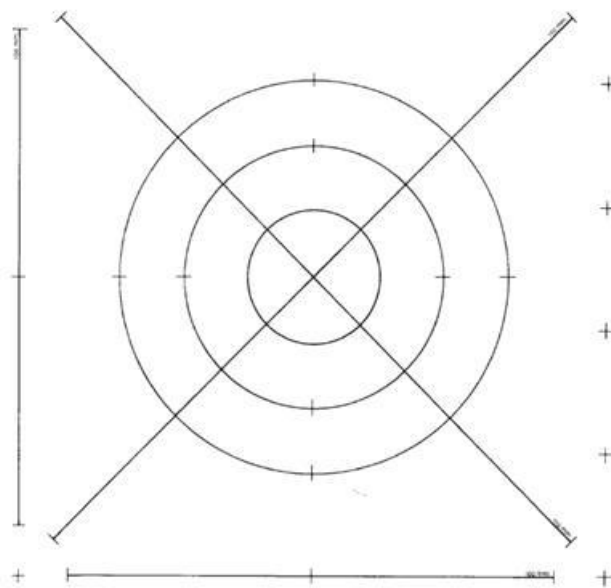


Figura 21: Círculos do método de Abrams Three-Circle
Fonte: ASTM E112, 2004.

Após a contagem da quantidade de interseções foi calculado \bar{N}_L por meio da Equação (6). Esse fator representa o número de intercepções por unidade de comprimento da linha de teste

$$\bar{N}_L = \frac{N_i}{L/M} \quad (6)$$

Onde N_i é o número de contornos interceptados, L é o comprimento total da linha de teste (500 mm) e M é a ampliação da imagem analisada.

O comprimento médio de intercepção linear, \bar{l} para cada campo pode ser calculado pela Equação(7).

$$\bar{l} = \frac{1}{\bar{N}_L} \quad (7)$$

A partir dos valores de \bar{N}_L e \bar{l} foi possível determinar o tamanho médio dos grãos em cada amostra com base na tabela fornecida pela norma ASTM E112-96 (2004). A Figura 22 relaciona o tamanho médio do grão ASTM em função do valor de \bar{l} e de \bar{N}_L .

TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{D} Average Diameter		\bar{T} Mean Intercept		\bar{N}_L No./mm
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

Figura 22: Tabela para obtenção do tamanho do grão
Fonte: ASTM E112, 2004.

3.2.2 Microdureza

A microdureza Vickers das amostras 1, 4 e 6, obtidas das barras A, B e C, respectivamente, foi medida conforme recomendações da norma ASTM E92 (2003)- *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*. Essa microdureza é obtida relacionando-se a força aplicada na amostra à área de impressão permanente. Essa área de impressão é feita por meio de um penetrador de diamante piramidal de base quadrada com ângulos de face de 136° conforme apresentado na Figura 23.

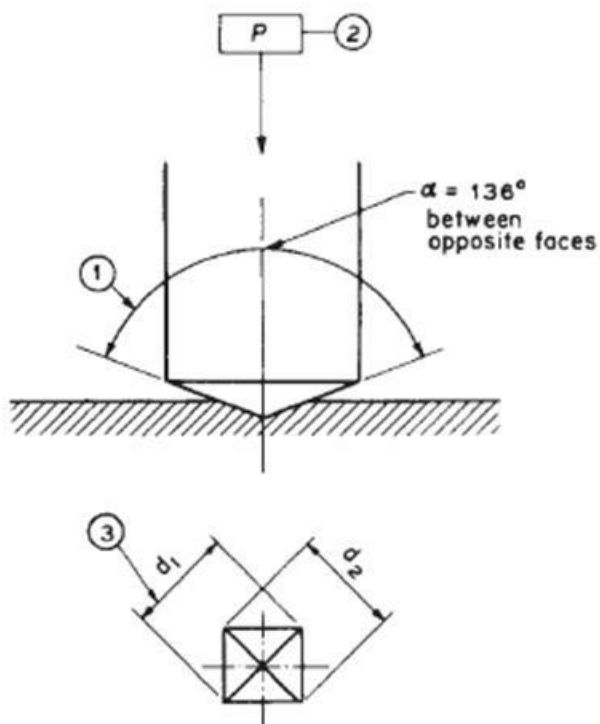


Figura 23: Ensaio de dureza Vickers
Fonte: ASTM E92, 2003.

As impressões foram realizadas aplicando-se uma força na amostra de 9,81 N, correspondente a 1kgf, por um período de 15 segundos. O procedimento foi realizado utilizando-se o durômetro *OLYMPUS BX60* apresentado na Figura 24. Iniciaram-se as medições pela borda da amostra seguindo-se em direção ao núcleo, adotando uma distância padrão entre cada impressão.

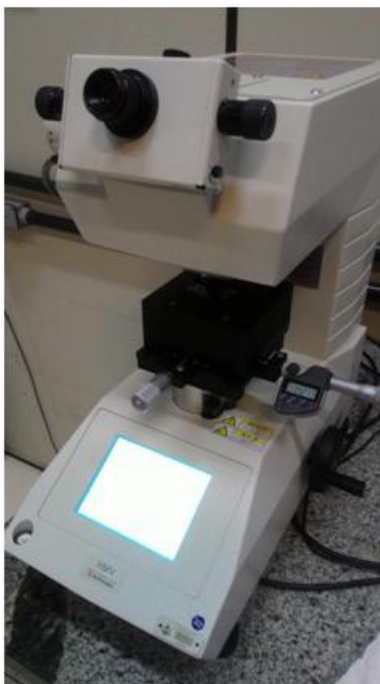


Figura 24: Durômetro
Fonte: Própria, 2018.

A partir das medições, os valores das diagonais d_1 e d_2 da área de impressão foram utilizados para cálculo da microdureza conforme equações (8) e (9). Seguindo recomendações presentes da norma ASTM E92 (2003), as diagonais foram medidas com auxílio de microscópio ótico.

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (8)$$

$$HV = \frac{1,8544 \cdot F}{d^2} \quad (9)$$

Onde d corresponde ao valor médio das diagonais, HV é o valor de microdureza Vickers expresso em kgf/mm^2 e F corresponde a força aplicada de 9,81 kgf .

3.2.3 Resistência à tração

A resistência à tração das barras A, B e C foi medida por meio de ensaio de tração axial. O comprimento total das barras utilizadas no ensaio (Figura 25) foi de aproximadamente 35 cm sendo o comprimento livre, entre as prensas, igual a 16 cm. Esse comprimento foi adotado segundo a norma NBR 7480 (2007)- “Aço

destinado a armaduras para estruturas de concreto armado- Especificação” que recomenda-o igual a dez vezes o diâmetro nominal da barra. (ABNT,2007)



Figura 25: Amostras para ensaio de tração
Fonte: Própria, 2018.

O equipamento EMIC utilizado para ensaio é apresentado na Figura 26.



Figura 26: EMIC
Fonte: Própria, 2018.

Para determinação do módulo de elasticidade das amostras foi utilizado extensômetro, sensor capaz de medir a deformação localizada da amostra mediante a aplicação do carregamento.

A realização de ensaios com extensômetro exige que, ao se atingir uma força padrão limite, o ensaio seja interrompido para retirada do extensômetro antes da ruptura da peça, buscando evitar danos ao sensor. Essa retirada causa uma interrupção no gráfico tensão x deformação fornecido pelo equipamento durante o ensaio. Em seguida, o ensaio é refeito sem a utilização do extensômetro, nas três barras A, B e C testadas.

A partir deste ensaio determinou-se as tensões de escoamento e máximas, os módulos de elasticidade, alongamento na ruptura e resiliência das amostras.

3.2.4 Rugosidade

Para o estudo da rugosidade das barras A, B e C foram utilizadas duas técnicas: o microscópio eletrônico de varredura (MEV) acompanhado da estéreo fotometria e o rugosímetro. As amostras analisadas são seções de 1,5 cm de comprimento incluindo as nervuras e marcas do fabricante (Figura 27).



Figura 27: Amostras para verificação de rugosidade
Fonte: Própria, 2018.

A rugosidade foi investigada nas superfícies livres próximas às nervuras e marcas. Nessas regiões as trincas por fadiga em barras de aço frequentemente iniciam-se e propagam-se podendo levar à ruptura. Essas são zonas de concentração de tensão devido à presença de maiores irregularidades na superfície e as descontinuidade geométrica na transição da superfície livre da barra com as nervuras e as marcas do fabricante (ROCHA, 2014).

3.2.4.1 MEV e estéreo fotometria

A técnica do MEV acompanhado da estéreo fotometria consiste na obtenção de 4 imagens de uma mesma região pelo microscópio, pós-processadas por estéreo fotometria para a reconstrução 3D da rugosidade (Figura 28). A partir dessa técnica é possível determinar os parâmetros para o cálculo do K_t .

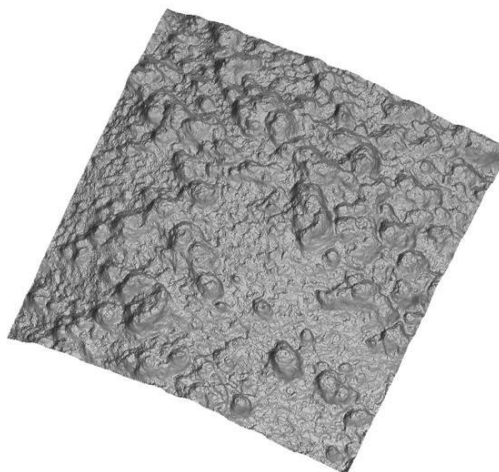


Figura 28: Rugosidade reconstruída de uma das amostras
Fonte: Própria, 2018.

O MEV EVO MA15 utilizado (Figura 29) possui quatro feixes de elétrons, um em cada quadrante, que podem ser utilizados de maneira simultânea ou alternados. Como a estéreo fotometria é um método de identificação da aparência de uma superfície através dos efeitos de iluminação e refletância, foram obtidas as 4 imagens alternando o feixe de elétrons. A primeira imagem foi gerada utilizando apenas o feixe de elétrons localizado no primeiro quadrante. Para as demais imagens, o feixe do primeiro quadrante é desligado e é ligado o feixe do 2º, 3º e 4º quadrante, para compor a 2ª, 3ª e 4ª imagem, respectivamente, estando apenas um feixe funcionando em cada uma das imagens.

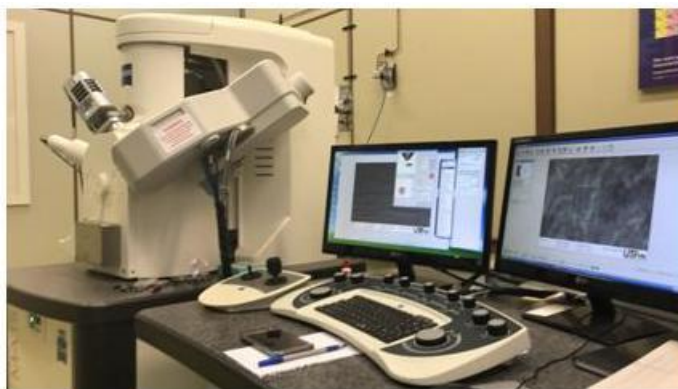


Figura 29: MEV
Fonte: Própria, 2018.

A Figura 30, referente à amostra 1, exemplifica o funcionamento do processo nas diferentes magnitudes de ampliação de 100 vezes, onde é possível a verificação da diferença de iluminação e refletância das barras. As flechas adicionadas as figuras são referentes ao posicionamento do feixe de elétrons no momento da captura da imagem. O processo foi repetido para todas as seis amostras.

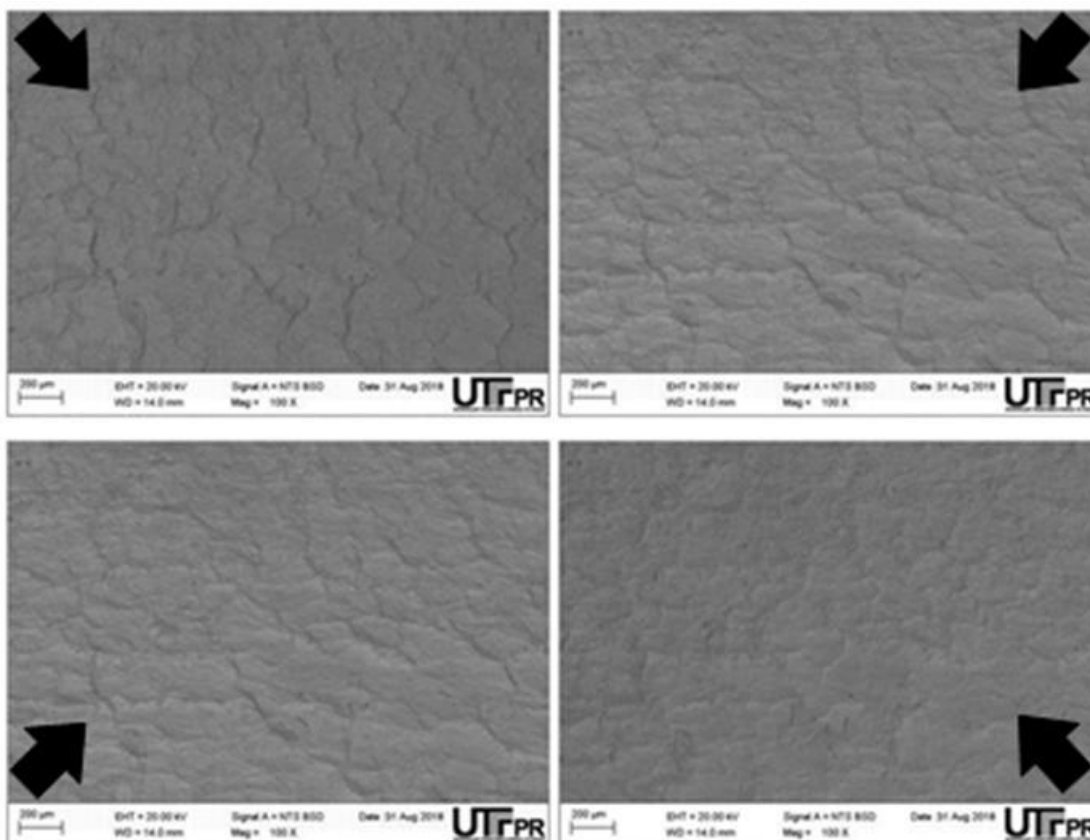


Figura 30: Imagens para estéreo fotometria- Amostra 01 com ampliação de 100 X
Fonte: Própria, 2018.

O feixe de elétrons incide sobre a amostra e parte dele é defletido e emitido para fora da amostra sendo captada por detectores nos microscópio e utilizadas para gerar as imagens denominadas de imagens de elétrons retroespalhados- IER. Essas imagens são utilizadas quando se deseja contraste de relevo ou topografia, já que os topos se mostram mais claros e os vales mais escuros. Essa técnica não permite grandes ampliações.

Após a obtenção das quatro imagens, foi realizado o pós processamento das mesmas por estéreo fotometria utilizando algoritmo desenvolvido em Python pela orientadora deste trabalho.

As análises por fotometria seguem as seguintes etapas:

- 1- Corta-se um quadrado de 600 x 600 pixels das imagens originais do MEV;
- 2- Normaliza-se as cores cinzas nas 4 imagens de cada amostra para uniformizar os gradientes da cor cinza (Figura 31);

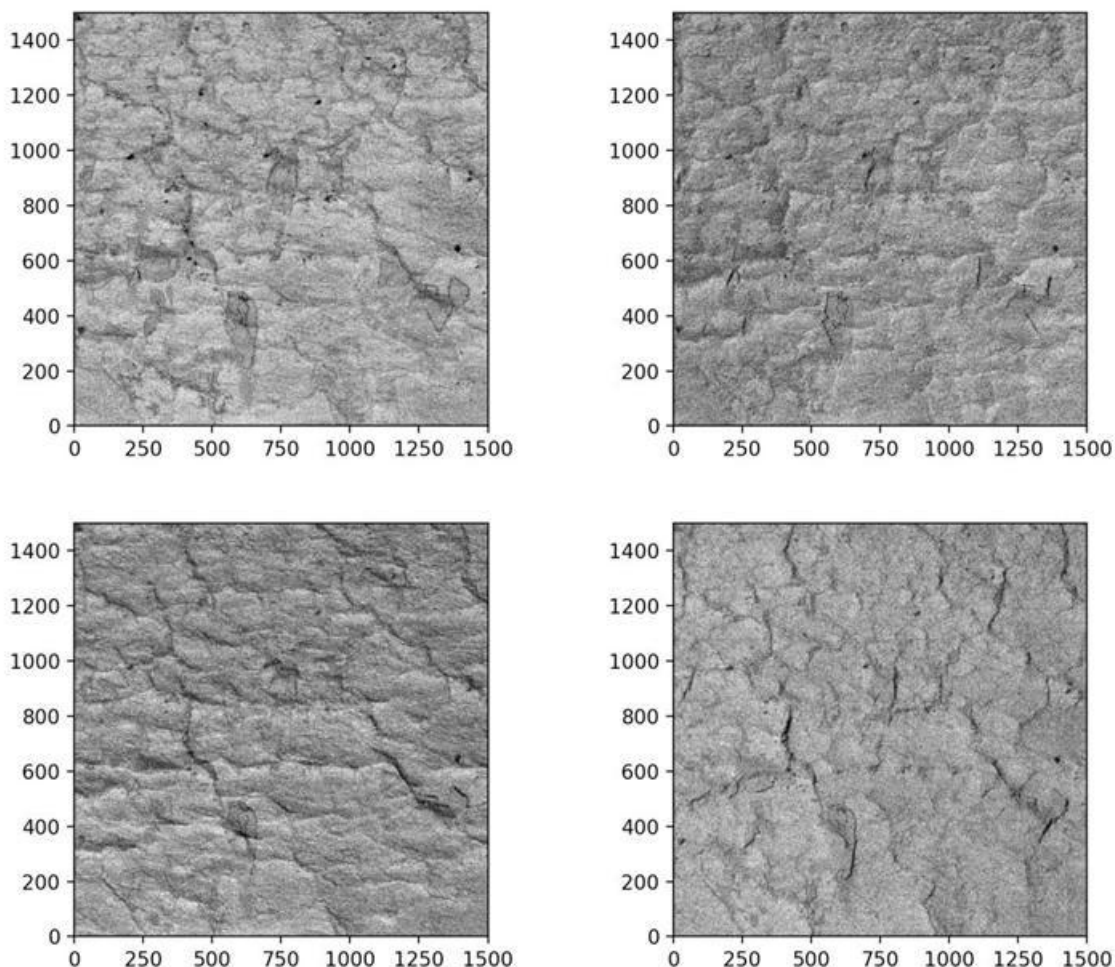


Figura 31: Imagens para estéreo fotometria normalizadas- Amostra 01 com ampliação de 100 X
Fonte: Própria, 2018.

3- Utiliza-se o algoritmo de estéreo fotometria para reconstruir a superfície. Ao final desta etapa obtém-se uma superfície em 3D de 600 x 600 pontos. A Figura 32 representa uma das seções aleatoriamente analisadas dessa superfície; ao todo são analisadas 1000 seções em cada superfície. O gráfico superior da Figura 32 representa a seção bruta e o inferior representa a rugosidade dessa seção. Para obter a rugosidade foi utilizada transformada de Fourier na seção bruta para tirar as baixas frequências. Esse procedimento é necessário para tirar a forma (geometria circular da barra) e as maiores irregularidades. Apenas uma parte do perfil bruto (parte central entre as linhas pontilhadas) é utilizada nas análises para evitar erros presentes nas extremidades devido ao processo de filtragem por transformada de Fourier.

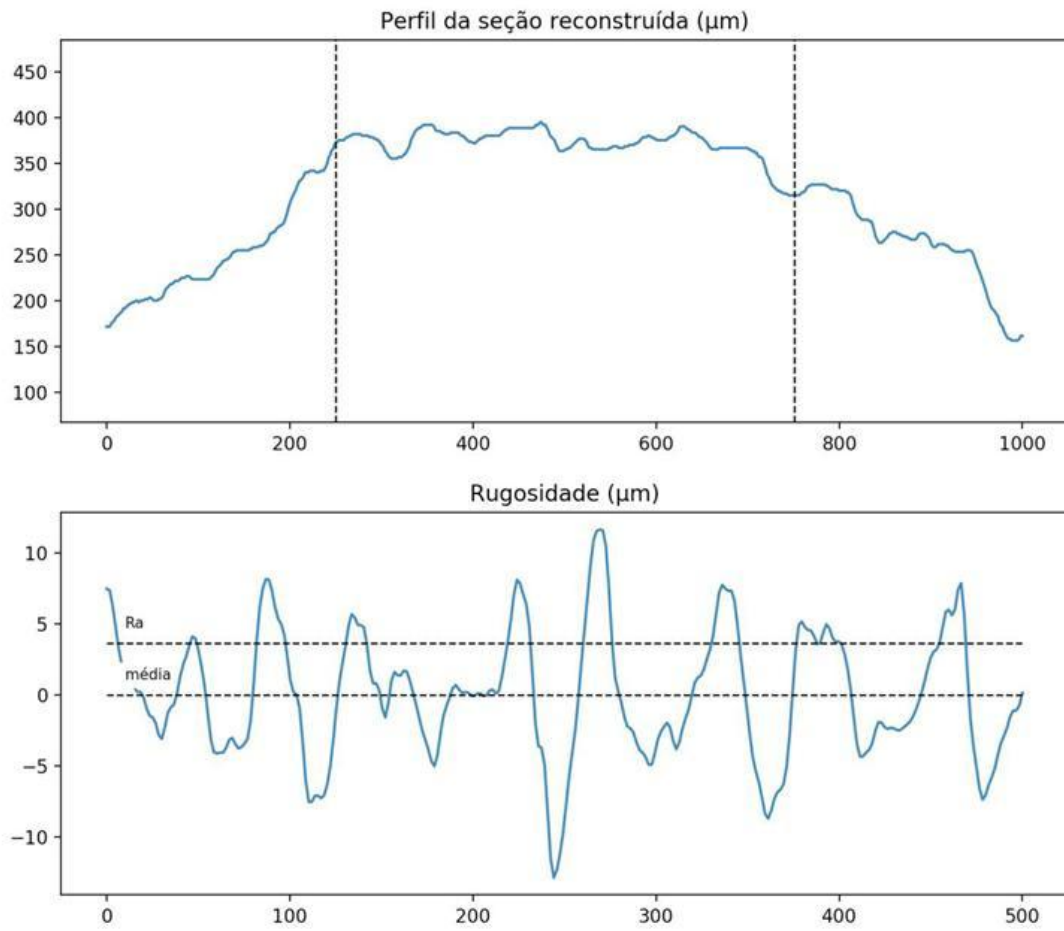


Figura 32: Rugosidade reconstruída de uma das amostras
Fonte: Própria, 2018.

4- A partir do perfil filtrado é possível calcular os parâmetros R_a , R_y , R_z e ρ para este perfil e, em seguinte, o K_t . A Figura 33 representa as distribuições desses quatro parâmetros e as linhas pontilhadas presentes na figura correspondem ao valor médio obtido para cada parâmetro. Cada histograma apresentado na Figura 33 tem como:

- Abscissa: os valores de R_a , R_y , R_z e ρ obtidos para as 1000 linhas (seções) analisadas;
- Ordenada: indica a frequência das medidas (representa a quantidade de valores encontrados para cada valor de R_a , R_y , R_z e ρ).

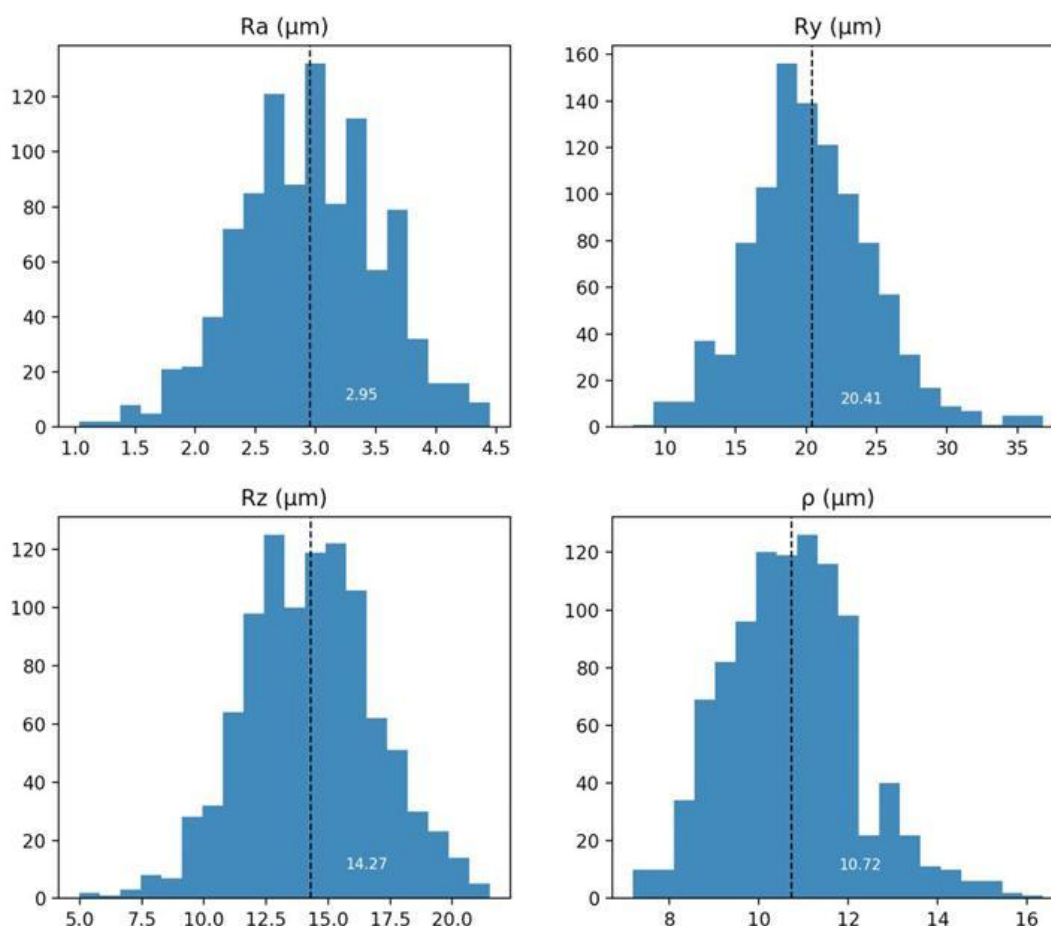


Figura 33: Parâmetros de rugosidade para uma das amostras analisadas
Fonte: Própria, 2018.

O processamento das imagens gera o perfil da seção reconstruída para mil linhas no sentido horizontal e mil linhas no sentido vertical. A filtragem do perfil da seção reconstruída gera o perfil de rugosidade, que permite o cálculo dos parâmetros R_a , R_y e R_z utilizando-se as equações (2), (3) e (4) apresentadas no item 2.3.5.

3.2.4.2 Rugosímetro

Além da técnica do MEV com estéreo fotometria foi também utilizado o rugosímetro para determinação da rugosidade da superfície das barras de aço. O rugosímetro TR220 é o equipamento utilizado neste trabalho (Figura 34).



Figura 34: Rugosímetro
Fonte: Própria, 2018.

O rugosímetro é um equipamento que mede as irregularidades da superfície da amostra registrando e informando o nível das imperfeições presentes. O funcionamento do rugosímetro se dá por contato: um percurso é traçado pelo sensor a uma velocidade constante. A medição é feita pelo sensor por meio de um apalpador.

Segundo Caetano et.al.(2016), durante esse processo, a agulha acoplada ao apalpador recebe a carga da variação de movimentos, transforma-a em impulsos elétricos traduzidos pelo amplificador, permitindo o conhecimento do perfil da superfície. Torna-se então possível a obtenção de diversos parâmetros dependendo do modelo do rugosímetro.

Seguindo recomendações do fabricante é de extrema importância que o aparelho esteja perpendicular à superfície, como indicado na Figura 35. Diferentes inclinações do sensor podem induzir a erros de medição do ensaio e para garantir o posicionamento foi necessária a adição de pequenas chapas de aço cuja altura possibilitasse a leitura do apalpador ao longo da superfície sem inclinar o aparelho. Além disso, o posicionamento do sensor também é perpendicular à direção da linha de rugosidade a ser medida.

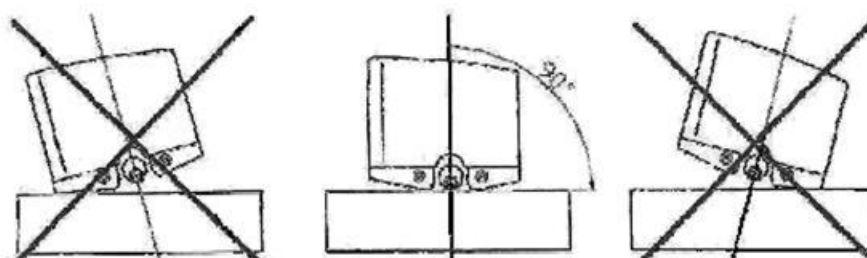


Figura 35: Posicionamento adequado do sensor do rugosímetro
Fonte: Manual TR200, 2018.

3.2.4.3 Fator de concentração de tensão

A equação 10 é utilizada para a determinação do fator de concentração de tensão proveniente da rugosidade segundo Arola et al. (2002).

$$K_t = 1 + n \left(\frac{R_a}{\bar{\rho}} \right) \left(\frac{R_y}{R_z} \right) \quad (10)$$

Os parâmetros de rugosidade R_a , R_y e R_z representam respectivamente a rugosidade média, a altura do vale-pico e a rugosidade de cinco pontos da topografia da superfície. O parâmetro n é adotado como 2 para tensões uniformes seguindo recomendações de Arola et al. (2002). O parâmetro $\bar{\rho}$ representa o raio médio dos vales, determinado a partir do perfil dominante. Para ambos os casos o valor de $\bar{\rho}$ adotado foi obtido através de cálculos computacionais oriundos do processo da estéreo fotometria.

4 RESULTADOS

4.1 MICROESTRUTURA

A partir das análises de metalografia foi possível identificar os tipos de grãos nas barras A, B e C e determinar o tamanho médio dos grãos. Essas análises são discutidas na seção 4.1.1 e 4.1.2.

4.1.1 Tipo de grão

Nas Figura 36 a Figura 41 são apresentadas a microestrutura das seis amostras analisadas.

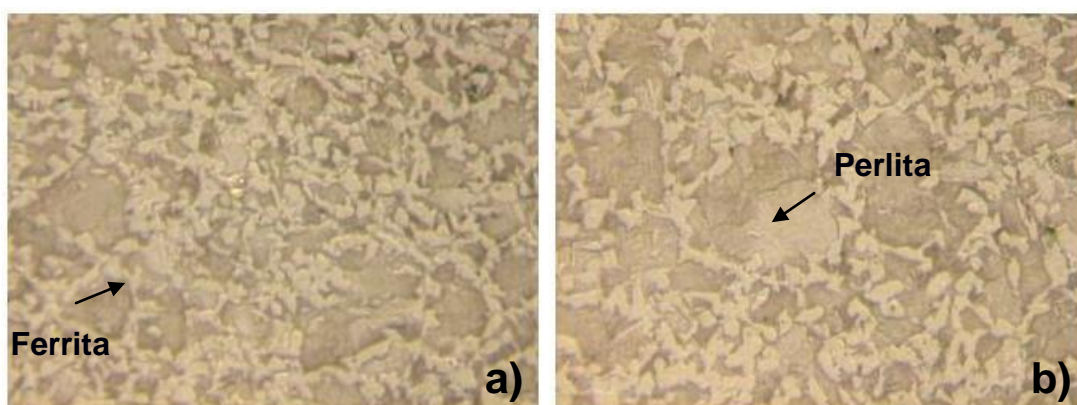


Figura 36: Amostra 1: a) Região externa b) Região interna- Ampliação de 200 X
Fonte: Própria, 2018.

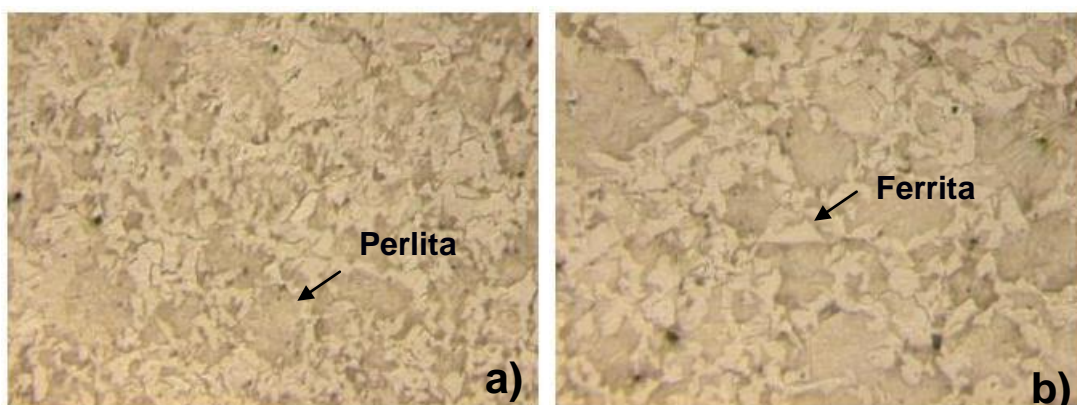


Figura 37: Amostra 2: a) Região externa b) Região interna- Ampliação de 200 X
Fonte: Própria, 2018.

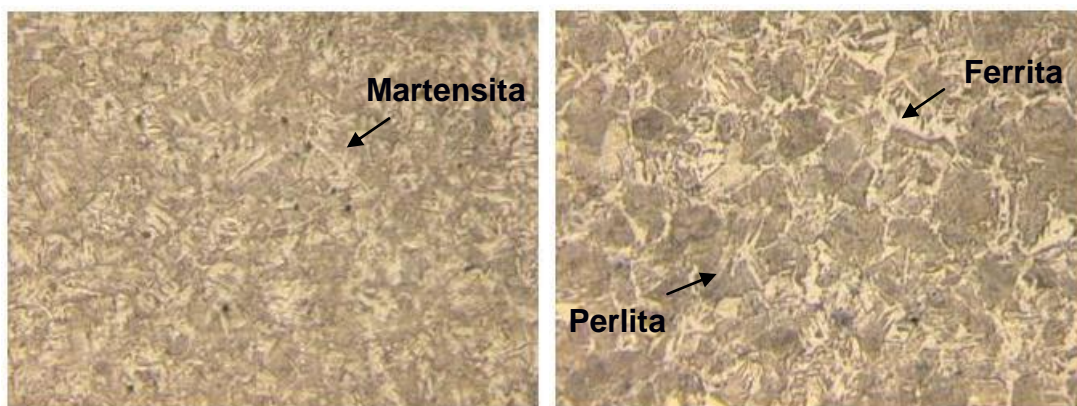


Figura 38: Amostra 3: a) Região externa b) Região interna- Ampliação de 200 X
Fonte: Própria, 2018.

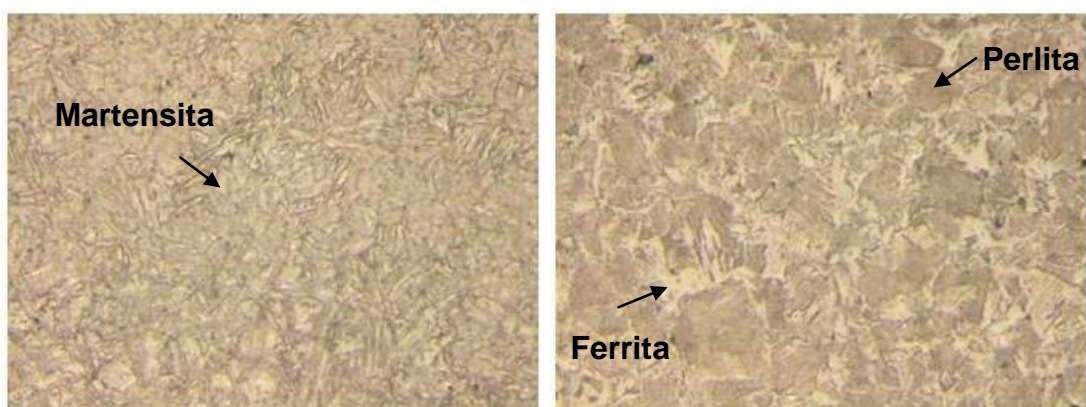


Figura 39: Amostra 4: a) Região externa b) Região interna- Ampliação de 200 X
Fonte: Própria, 2018.

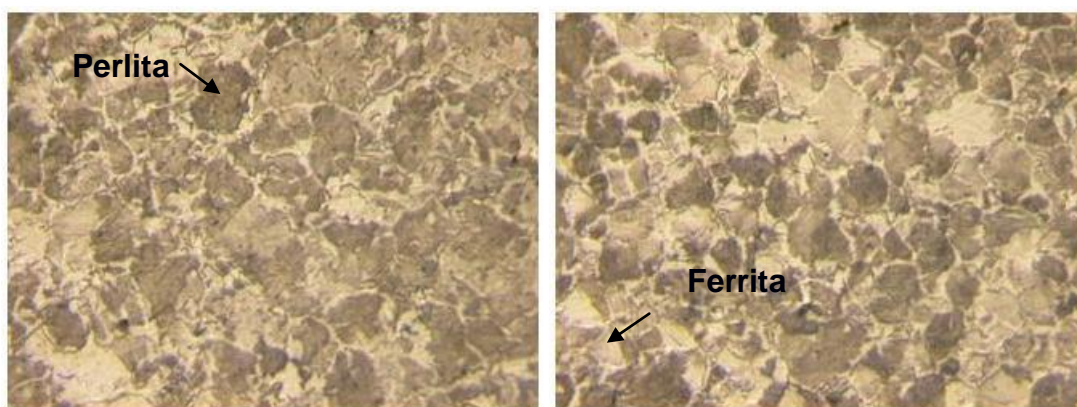


Figura 40: Amostra 5: a) Região externa b) Região interna- Ampliação de 200 X
Fonte: Própria, 2018.

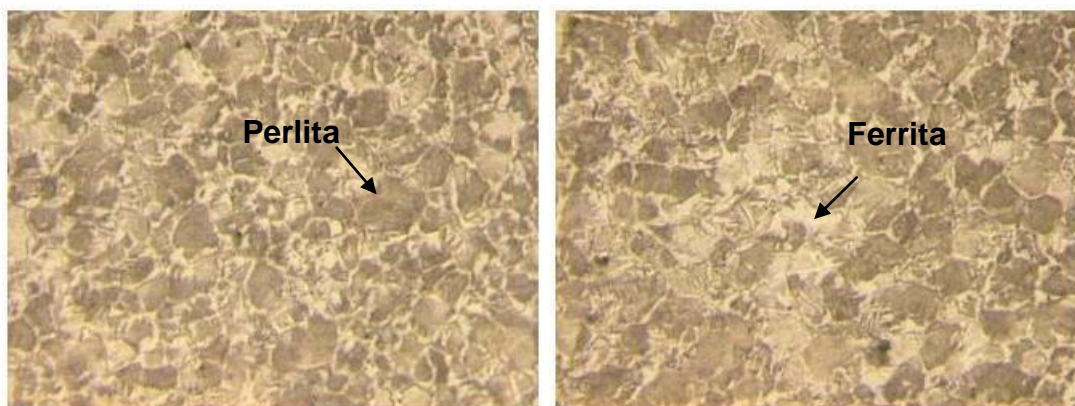


Figura 41: Amostra 6: a) Região externa b) Região interna- Ampliação de 200 X
Fonte: Própria, 2018.

As Figura 36 e Figura 37 apresentam a microestrutura das amostras 1 e 2 fabricadas pela empresa A. Analisando a microestrutura foram identificadas ferrita e perlita ao longo da seção transversal de cada amostra. A presença apenas de ferrita-perlita indica que a barra da empresa A não passa pelo processo de têmpera e revenimento.

Na Figura 42 são apresentadas as amostras A, B e C com ataque químico. Nas amostras da empresa B é possível identificar três zonas com diferentes colorações, não observadas nas amostras A e C.

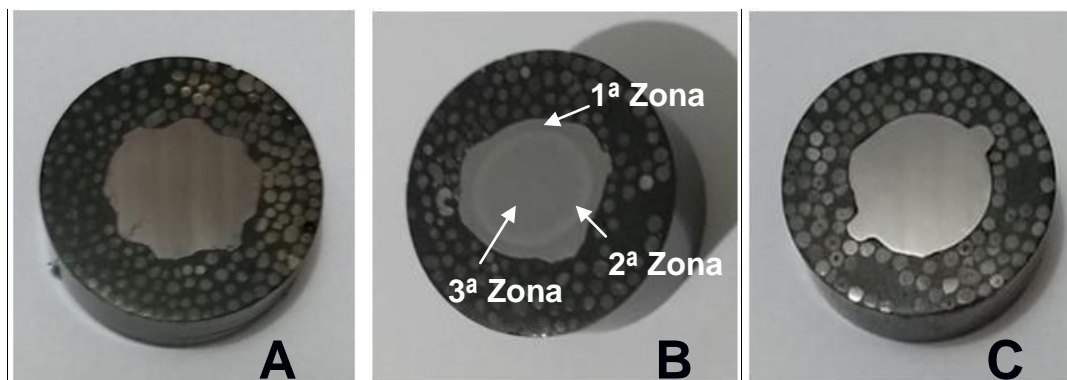
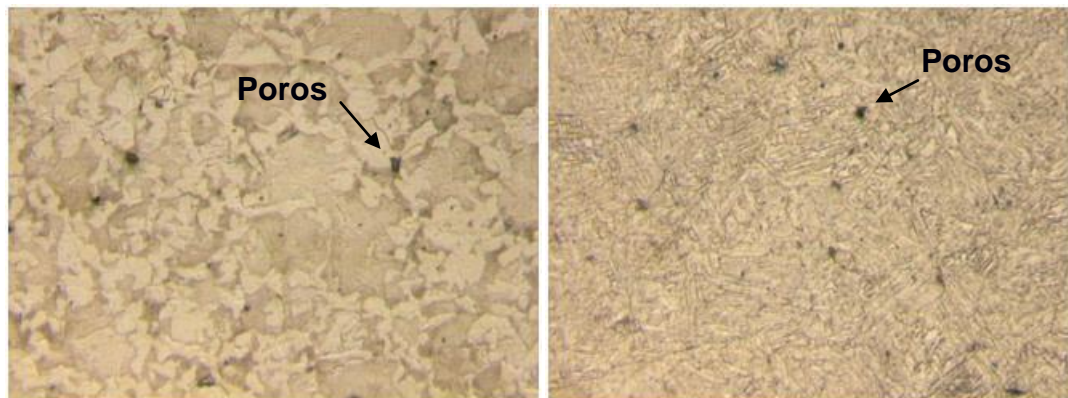


Figura 42: Amostras A, B e C atacadas quimicamente
Fonte: Própria, 2018.

Analisando cada uma dessas zonas da amostra B no microscópio ótico (Figura 38 e Figura 39) identificou-se: a) perlita e ferrita no núcleo e b) martensita na superfície e subsuperfície. Na zona intermediária identificou-se ferrita e perlita. De acordo com Barreto (2009) e Araújo (2010) espera-se a presença de bainita com traços de martensita, no entanto através da microscopia ótica é impreciso determinar as microestruturas presentes na região intermediária, como pode ser visualizado na Figura 38 e Figura 39.

Poros também foram visualizados em todas as amostras, sendo identificados pelos pontos pretos presentes nas imagens. A Figura 43 corresponde a região central da amostra 2 (Empresa A) e região externa da amostra 3 (Empresa B) e os pontos pretos sinalizados são os poros presentes em ambas as amostras.



**Figura 43: Poros na microestrutura a) Região interna amostra 2 b) Região externa amostra 3- Ampliação de 200 X
Fonte: Própria, 2018.**

A martensita, microestrutura com grãos mais alongados que se assemelham a agulhas, foi encontrada na camada externa das barras e pode ser visualizada na Figura 38b e Figura 39b. A presença de martensita indica que a barra da empresa B passa pelo processo de têmpera e revenimento.

As amostras 5 e 6 apresentam apenas ferrita e perlita ao longo da seção transversal, como visualizado na Figura 40 e Figura 41. A estrutura predominante é a perlita aparecendo em maior quantidade comparada às demais amostras. Isto sugere que a barra C, da década de oitenta, possui um maior % teor de carbono que as barras A e B, característico de aços mais perlíticos. Devido à presença apenas de ferrita-perlita, a barra C, assim como a barra da empresa A, também não passa pelo processo de têmpera e revenimento.

Como a barra A possui uma maior quantidade de ferrita que a barra C, e ambas passam por semelhante processo de fabricação (laminação à quente com resfriamento em temperatura ambiente), espera-se que a barra A apresente propriedades mecânicas (tensão de escoamento e resistência à tração) inferiores a barra C. Segundo Araújo (2010), a existência de maior quantidade de ferrita acarreta em um produto mais mole e com menor ductilidade.

4.1.2 TAMANHO MÉDIO DO GRÃO

Com as imagens geradas através do microscópio ótico foi possível determinar do tamanho médio dos grãos utilizando o método Abrahms Three-Circle. O diâmetro dos círculos é de 7,958 mm, 53,05 mm e 26,53 mm, conforme apresentado na Figura 44 totalizando um comprimento total de 500mm.

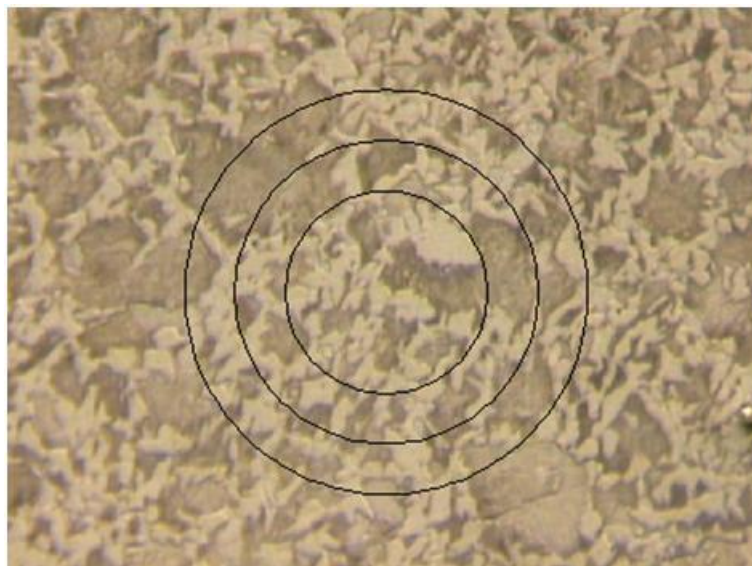


Figura 44: Círculos para quantificação dos grãos
Fonte: Própria, 2018.

A recomendação presente na norma ASTM E112-96 (2004) é que a quantidade de interseções chegue a valores próximos ou acima de quinhentos para gerar uma precisão aceitável. As interseções são contadas para cada círculo e a soma de interseções dos cinco campos de contagem de cada amostra está presente na Tabela 3.

Amostra	Número de Interseções para região central	Número de interseções para região externa
1	524	634
2	533	537
3	600	515
4	628	511
5	499	461
6	519	530

Tabela 3: Número de interseções por amostra
Fonte: Própria, 2018.

A partir das intercepções obtidas em cada campo de contagem, para a amplitude de 200 X como a utilizada, foi possível calcular o parâmetro \overline{N}_L e determinar o tamanho médio do grão em cada amostra. A quantidade de grãos contabilizados em cada campo de contagem e os respectivos valores de \overline{N}_L se encontram no ANEXO 2. Na Tabela 4 estão presentes os valores de \overline{N}_L e o tamanho médio ASTM do grão, com seu respectivo diâmetro correspondente.

Amostras	\overline{N}_L Região central	\overline{N}_L Região externa	Tamanho médio ASTM Região central	Tamanho médio ASTM Região externa
1	41,92	50,72	7,5 (26,7 μ m)	8(22,5 μ m)
2	42,64	42,96	7,5 (26,7 μ m)	7,5 (26,7 μ m)
3	48,00	41,20	8(22,5 μ m)	7,5(26,7 μ m)
4	50,24	40,88	8(22,5 μ m)	7,5(26,7 μ m)
5	39,92	36,88	7,5(26,7 μ m)	7(31,8 μ m)
6	42,70	42,40	7,5(26,7 μ m)	7,5(26,7 μ m)

Tabela 4: Tamanho médio do grão ASTM
Fonte: Própria, 2018.

De maneira geral, o tamanho do grão obtido nas barras fabricadas no Brasil não apresentou grandes variações entre as barras A, B e C. O tamanho do grão variou entre os números ASTM 7 e 8 cujo diâmetro médio do grão é de 31,8 μ m e de 22,5 μ m respectivamente.

As amostras também apresentaram semelhantes tamanhos médios dos grãos nas regiões externas e internas, havendo casos onde o grão se apresentou maior na região externa (amostra 3, 4 e 5), casos onde o grão possui grãos menores na região externa (amostra 1) e casos onde o tamanho do grão se manteve dentro da mesma faixa (amostra 2 e 6).

Em seus estudos, Rocha (2004) obteve para barras de aço de diâmetro de 16 mm, produzidas na Suíça, valores de tamanho médio ASTM dos grãos 11, de diâmetro médio de 7,9 μ m. Esse tamanho pode ter influência nas propriedades mecânicas e na resistência à fadiga das barras; quanto menor o tamanho do grão maior tendem a ser a tensão de escoamento e a vida à fadiga das barras, por exemplo. Trincas por fadiga tendem a iniciar-se em grãos maiores e a se propagarem a uma maior velocidade que em aços com grãos menores. Isso por que

os contornos dos grãos funcionam como barreiras microestruturais reduzindo a taxa de propagação das trincas por ciclo de tensão (Rocha, 2014).

4.2 MICRODUREZA

Para realização do ensaio de microdureza Vickers foram realizadas 20, 17 e 18 indentações nas amostras 1, 4 e 6, respectivamente, da subsuperfície ao núcleo. A forma da impressão após a aplicação da força de 1kgf por 15 segundos é um losango cujas diagonais são medidas com auxílio de microscópio, como pode ser visualizado na Figura 45.

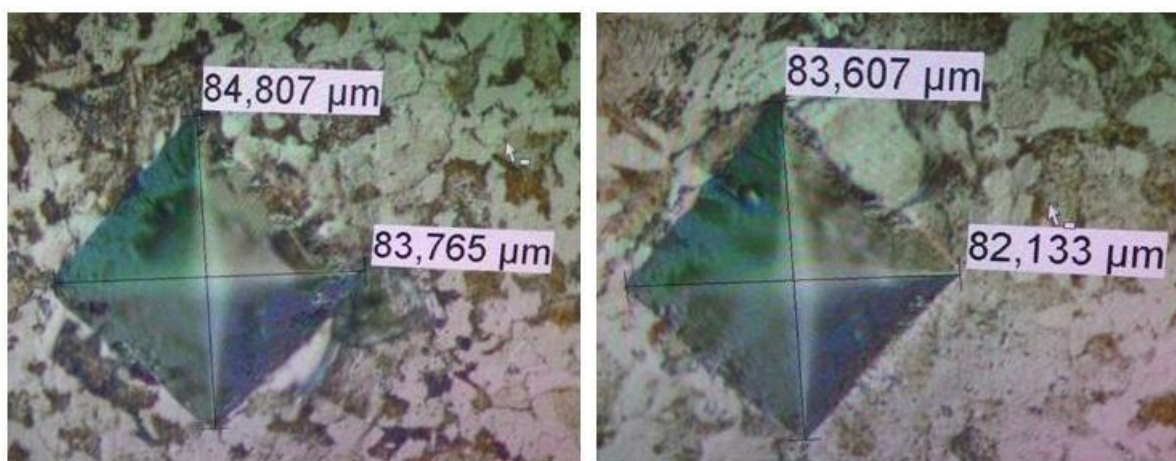


Figura 45: Indentações obtidas na amostra 01
Fonte: Própria, 2018.

A partir da obtenção das medidas d_1 e d_2 é possível o cálculo dos valores de microdureza para cada indentação. Para a amostra 1, pertencente à empresa A, os valores de microdureza variam entre 240 e 300 kgf/mm², existindo apenas um pico isolado de microdureza de aproximadamente 360kgf/mm², possivelmente proveniente de um erro de medição. O comportamento sem grandes variações da amostra permite a confirmação da existência de uma microestrutura constante ao longo da seção transversal, formada de ferrita e perlita. A Figura 46 apresenta o perfil de microdureza da amostra.

Para a amostra 4, fabricada pela empresa B, os maiores valores de microdureza obtidos estão nas três primeiras indentações, localizadas na superfície. A seguir, o valor de microdureza ao longo da seção transversal reduz, variando entre 200 e 240 kgf/mm².

Segundo Queiroz Neto (2011) a microdureza de maior valor obtida na superfície da amostra 4 se deve a presença da microestrutura da martensita, que possui grãos menores. O contorno de grão se apresenta como um empecilho para o penetrador do microdurômetro, exigindo um maior esforço para a penetração. Além disso, a queda de microdureza obtida desde a primeira indentação se deve a mudança de microestrutura ao modo que as marcas vão se distanciando da borda.

A Figura 46 ilustra as maiores variações entre a terceira e quarta indentação, demonstrando que nessa região existe uma variação de uma microestrutura de maior dureza (martensita) para uma microestrutura de menor dureza (ferrita+perlita).

Para a amostra 6, referente às barras da década de oitenta, não são visualizados grandes variações no perfil de microdureza (Figura 46) como os obtidos nas amostras 1 e 4, se mantendo aproximadamente uniforme. Isso se deve pelo fato das amostras possuírem uma microestrutura constante em toda a seção transversal, composta por uma camada única de ferrita e perlita.

O ANEXO 3 indica as dimensões d1 e d2 das indentações ao longo da seção transversal e os valores de microdureza correspondentes de todas as indentações para as três amostras.

A Figura 46 apresenta os perfis de dureza das três amostras juntas, permitindo um comparativo entre elas. A amostra 4, da empresa B, possui os maiores e menores valores de microdureza, uma vez que na superfície existem os maiores valores obtidos e em seguida a amostra apresenta uma queda nos valores no restante da seção transversal. Esse padrão de perfil de microdureza obtido na amostra 4 é característico das barras temperadas e revenidas e apresenta o objetivo do processo de têmpera e revenimento: gerar uma camada superficial de maior dureza para alcançar resultados satisfatórios de resistência à tração mesmo contendo um núcleo com valores de microdureza inferiores.

Com exceção dos valores referentes à camada externa da amostra 4 (barra fabricada pela empresa B) e o pico isolado da amostra 1 (barra fabricada pela empresa A), os valores de microdureza obtidos na amostra 6 (barra fabricada na década de oitenta) são maiores se comparados aos obtidos nas amostras 1 e 4. Isso se deve a maior quantidade de perlita, microestrutura de dureza intermediária, existente nessa amostra quando comparada às demais.

Além disso, o teor de carbono existente nas amostras pode influenciar os valores de microdureza obtidos, uma vez que o carbono gera o aumento da dureza do aço.

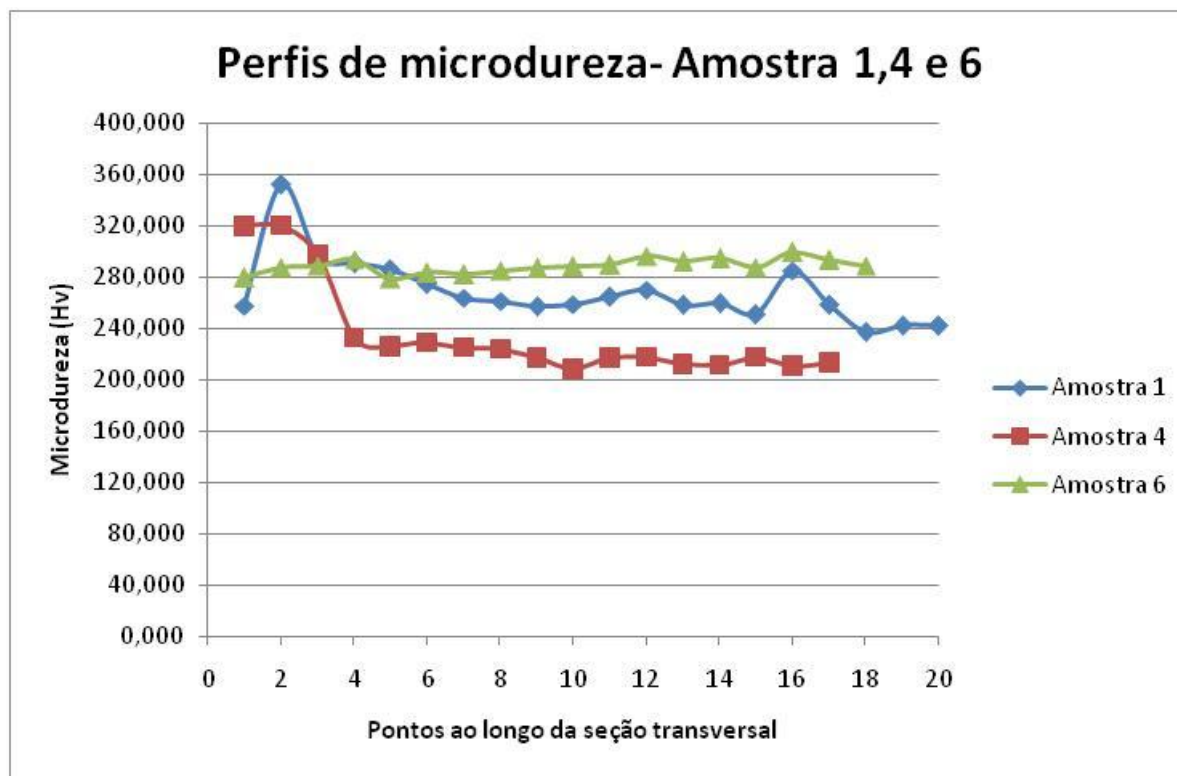


Figura 46: Perfis de microdureza Vickers- Amostra 1, 4 e 6
Fonte: Própria, 2018.

No estudo realizado os valores de microdureza variaram entre 200 e 360 kgf/mm² sendo compatível com resultados obtidos na literatura para as barras de aço produzidas no Brasil.

Para o caso das barras produzidas no Brasil, nos estudos realizados por Alves Filho (2004) os valores de microdureza Vickers obtidos em barras de aço CA50 variaram entre 275 e 310 HV para a camada superficial, e decaíram para valores em torno de 200 HV na região central, evidenciando o endurecimento superficial gerado pelo tratamento térmico de têmpera e revenimento. Araújo (2010) obteve em seus estudos valores de microdureza para barras de diâmetro de 16 mm variando entre 330 e 210 HV, apresentando valores altos nas identificações próximas a superfície, que decaem à medida que se aproxima do núcleo da amostra.

Para alguns casos, como os resultados obtidos por Barreto (2009), existe de uma tendência à homogeneidade de microdureza nas amostras de 16 mm, variando de 225 HV a 255 HV. Nesse caso, apesar de existir o processo de têmpera e revenimento das barras o conhecimento da microdureza da amostra evidenciou que

o tratamento sofrido pelas barras nesse caso não proporcionou o auto-revenimento das amostras.

Para as barras de aço fabricadas na Suíça, Rocha (2014) também obteve valores maiores de microdureza na região externa da barra e maiores menores na região central. A microdureza obtida para as amostras analisadas ficaram entre 160 e 290 HV, valores menores quando comparados aos obtidos nesse estudo.

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Em um gráfico tensão x deformação gerado durante um ensaio de tração axial em um componente mecânico é esperada a visualização de 4 zonas distintas: elástica, escoamento, encruamento e estrição. A primeira corresponde à zona elástica, onde a tensão e a deformação se relacionam de maneira aproximadamente linear e ao ser retirado o carregamento os efeitos de deformação desaparecem. A partir dessa zona é possível a obtenção dos valores de módulo de elasticidade. A segunda zona é a de escoamento, onde segundo Dalcin (2007) são visualizadas grandes deformações apesar de uma pequena variação de tensão. A partir dessa zona são obtidos os valores de tensão de escoamento. Em seguida é visualizado o fenômeno do encruamento (aumento de resistência em função da deformação permanente que ocorre no aço) onde são atingidas as maiores tensões, seguida da estrição da amostra, onde os valores de tensão decaem até a ruptura.

Com a realização do ensaio é possível visualizar a redução da seção transversal e alongamento da amostra. A redução da seção transversal da amostra, conhecida como estrição, pode ser visualizada na Figura 47. Para o caso das amostras onde a marca do fabricante estava presente no comprimento livre, entre as prensas, durante o ensaio, a ruptura ocorreu na região dessa marca. Isso demonstra a existência de uma concentração de tensão nessa zona gerada pela descontinuidade oriunda do formato do relevo da marca na barra de aço.



Figura 47: Estricção das amostras
Fonte: Própria, 2018.

A partir dos ensaios de tração foram determinadas as propriedades mecânicas como tensão de escoamento, f_y , tensão máxima, f_u e módulo de elasticidades das barras A, B e C conforme apresentadas na Tabela 5.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios realizados com extensômetro. O relatório de ensaio completo se encontra no ANEXO 4.

Barras/Amostras	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)
1	457,18	757,82	165709
2	392,69	757,23	138478
3	520,85	710,63	142880
4	422,32	715,00	200156
5	508,72	865,40	155600
6	515,28	867,96	174514

Tabela 5: Resumo dos resultados do ensaio de tração com extensômetro
Fonte: Própria, 2018.

Segundo a ABNT (2007) na NBR 7480 (2007) o valor mínimo de f_y para as barras de aço é de 500 MPa. Apenas três barras, B -3, C -5 e C -6 atingiram esse valor. Era esperado que as barras C, da década de oitenta, tendessem a apresentar valores de tensões de escoamento superiores às da barra da empresa A. Isso porque essas barras apresentam uma maior quantidade de perlita que as barras A e B. A perlita é uma microestrutura com maior dureza do que a microestrutura da ferrita, trazendo melhores resultados de resistência à tração nas amostras.

As barras da empresa B são aquelas que passam por processo de têmpera e revenimento com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas do aço com a presença da martensita temperada. O baixo valor da f_y da barra B -4 pode ser proveniente das impurezas como inclusões e poros, observados durante as análises no microscópio ótico.

Os valores de alongamento mínimos a tração, 8% em barras de aço CA-50, foram atendidos em todas as barras, com valores entre 8,80 e 17,21%.

Segundo a ABNT (2014) na NBR 6118 (2014), o módulo de elasticidade do aço pode ser adotado para efeitos de cálculo como 210 000 MPa. Para as amostras ensaiadas, o módulo de elasticidade apresentou em todos os casos valores abaixo do esperado (Tabela 5).

Com a continuação dos ensaios de tração após a retirada do extensômetro, foi possível acompanhar a evolução do gráfico tensão x deformação, que indica as regiões de comportamento elástico e plástico das amostras.

Na região de comportamento elástico, o gráfico se aproxima de uma reta, já que a deformação é diretamente proporcional à tensão aplicada. Segundo Dalcin (2007), a partir do limite de escoamento, o material deixa de se comportar de maneira elástica para assumir um comportamento plástico, sendo o escoamento visível no gráfico por se tratar de uma região onde ocorre grande aumento da deformação acompanhado de uma pequena variação na tensão.

Em seguida, assumindo comportamento plástico, o material alcança seu valor máximo durante o ensaio, o limite de resistência à tração, e chega à ruptura do material, fornecendo o limite de ruptura.

Na Figura 48, Figura 49 e Figura 50 é apresentado a relação tensão x deformação para a amostra 1, 4 e 6 respectivamente. A amostra 1 (empresa A) é a que possui a menor região de deformação elástica, apresentando deformações permanentes à tensões menores que as demais barras. No caso da amostra 4 (empresa B), que recebe tratamento térmico, é possível a visualização de um patamar de escoamento mais definido, onde grandes deformações ocorrem para pequenas variações de tensão. Para a amostra 6 (fabricada na década de oitenta), que possui maiores quantidades de perlita quando comparadas as demais, são apresentados maiores valores de tensão de escoamento, o que permite a correlação do aumento da quantidade de perlita e de teor de carbono e o aumento nos valores de tensão de escoamento.

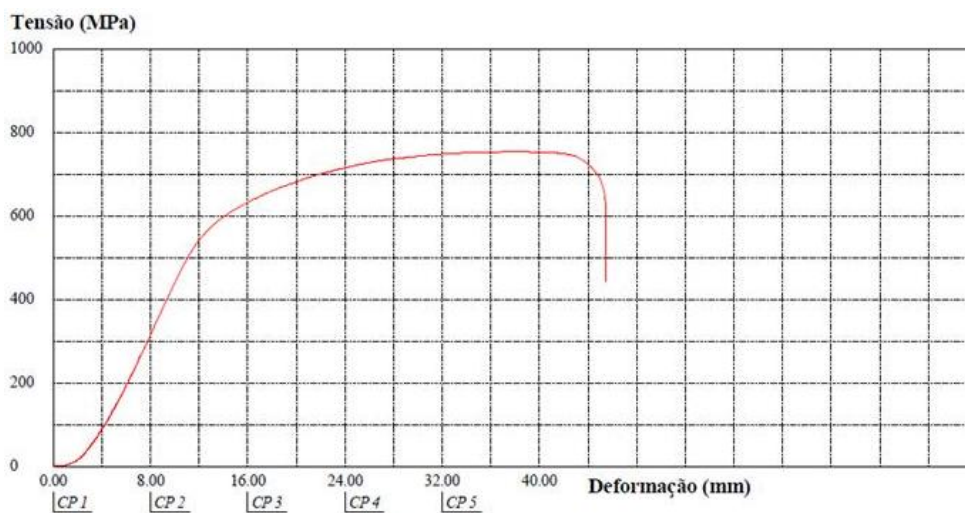


Figura 48: Gráfico Tensão x Deformação-Amostra 1
Fonte: Própria, 2018.

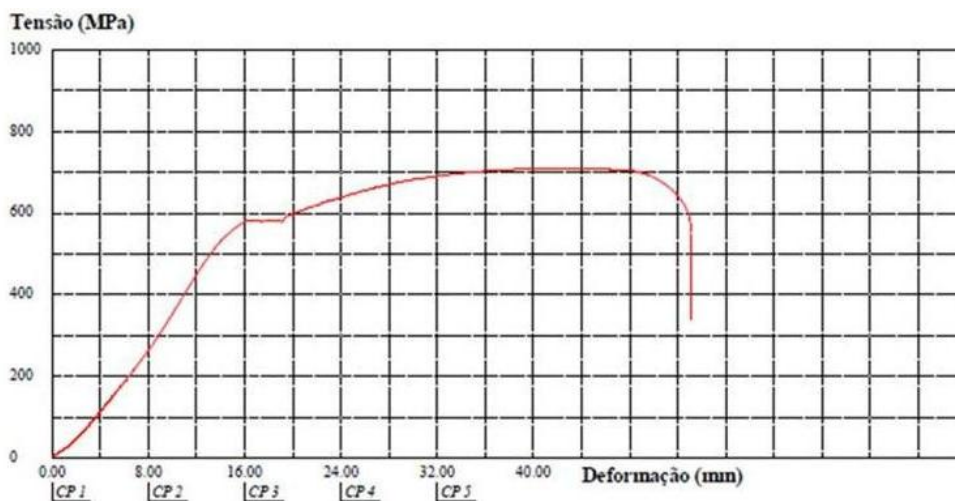


Figura 49: Gráfico Tensão x Deformação-Amostra 4
Fonte: Própria, 2018.



Figura 50: Gráfico Tensão x Deformação-Amostra 6
Fonte: Própria, 2018.

Ao ensaiar uma nova amostra da barra A-1 sem a utilização do extensômetro o valor obtido para tensão de escoamento foi superior ao valor mínimo estabelecido em norma, diferentemente do que ocorreu durante a realização do ensaio com extensômetro. É possível que tenha ocorrido uma falha na leitura da tensão de escoamento com a utilização do extensômetro. Para assegurar a veracidade dos resultados é necessário realizar ensaios utilizando um maior número de amostras.

Os valores de alongamento obtidos nas amostras com utilização do extensômetro se aproximaram mais do limite estabelecido em norma de 8%. As amostras apresentaram valores de alongamento entre, aproximadamente, 9,0 e 10,0%, sendo a barra B -4 a que apresentou maior valor, diferentemente do que era esperado, uma vez que a literatura indica que a martensita é capaz de reduzir os valores de alongamento.

4.4 RUGOSIDADE E IMPERFEIÇÕES

4.4.1 Estéreo fotometria

As imagens obtidas com o microscópio eletrônico de varredura permitem a visualização da superfície com aumento de 100 e 150 vezes. Para todas as amostras foram obtidas quatro imagens, alternando o ponto do qual o feixe de elétrons é emitido. A partir da reconstrução das imagens e considerando as mil linhas de todas as amostras nos dois sentidos, os valores de R_a , R_y , R_z e $\bar{\rho}$ foram obtidos e variaram aproximadamente entre 1 e 8 μm , de 2 a 130 μm , de 2 a 50 μm e de 5 a 30 μm , respectivamente. A Figura 51 demonstra a variação dos parâmetros de rugosidade para uma amostra.

Todos os gráficos referentes aos parâmetros de rugosidade, bem como os perfis da seção reconstruída e perfis de rugosidade das amostras se encontram no ANEXO 6.

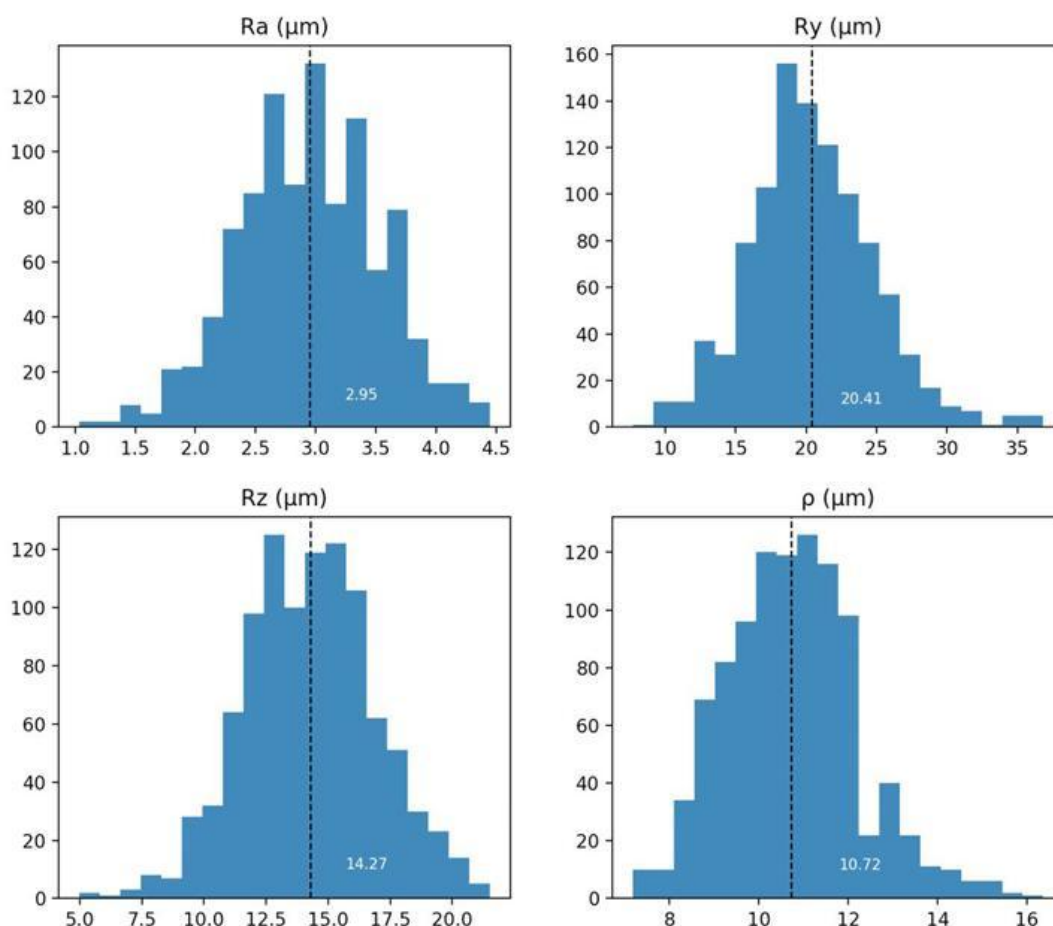


Figura 51: Parâmetros de rugosidade- Amostra 04 com ampliação de 150 X
Fonte: Própria, 2018.

Os valores de K_t obtidos para o método da estereo fotometria variam entre 1,96 e 1,42, não havendo variações significativas entre as amostras. As amostras 3, 5 e 6 ao serem reconstituídas com as duas ampliações, apresentaram valores de K_t muito próximos nas duas situações. Já as amostras 2 e 4 apresentaram valores distintos para a ampliação de 100 e 150 X, não permitindo estabelecer um padrão para ambos os casos. A análise de um maior número de superfícies faz-se necessária para se avaliar de forma mais precisa a topografia das barras.

A Tabela 6 indica os valores de R_a , R_y e R_x e $\bar{\rho}$ para todas as amostras reconstituídas e o valor de K_t , obtido a partir da Equação (7), para cada caso.

Amostra	$R_a(\mu m)$	$R_y(\mu m)$	$R_z(\mu m)$	$\bar{\rho}(\mu m)$	Kt
1-100 X	4,51	40,65	23,05	17,76	1,89
2-100 X	3,91	31,04	19,38	17,74	1,71
2-150 X	3,17	28,03	16,75	11,02	1,96
3-100 X	3,07	18,13	13,29	18,86	1,44
3-150 X	2,00	11,60	8,63	12,71	1,42
4- 100 X	2,60	18,31	12,79	16,17	1,46
4-150 X	2,95	20,41	14,27	10,72	1,79
5-100 X	3,85	25,23	18,26	16,88	1,79
5-150 X	2,83	18,83	13,27	11,28	1,71
6-100 X	3,17	19,47	13,93	18,75	1,47
6-150 X	1,89	11,49	8,33	12,28	1,42

Tabela 6: Parâmetros de rugosidade para estêreo fotometria
Fonte: Própria, 2018.

4.4.2 Rugosímetro

A primeira medição foi realizada na amostra 6 e o valor de R_a obtido foi de $4,3 \mu m$. A NBR 8404 (1984) - Indicação do Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos, indica que para valores de R_a maiores do que 2 até 10 o mínimo comprimento de amostragem L (Cut off) seja de 2,5 mm. (ABNT, 1984)

A pequena dimensão do apalpador do rugosímetro e a curvatura das sessões dificultaram o escaneamento da peça com os Cut off recomendados em norma, sendo necessário a diminuição do mesmo de 2,5mm para o comprimento anterior, cujo valor é de 0,8mm e quantidade de Cut-off de 5 para 2.

A utilização do tamanho e das quantidades de Cut-off recomendadas impossibilitava o ensaio devido as características geométricas da barra, que ao percorrer as distâncias do Cut-off tinha variações geométricas que ultrapassavam a capacidade de medição do instrumento. Para adequação do ensaio é necessário à utilização de sensor específico para superfícies curvadas, inexistente na universidade.

Foi realizada uma linha de medição em cada amostra das 6 barras, disponibilizando os valores de R_a , R_q , R_z , R_t , R_v , R_z , R_{max} , R_p , R_y , R_s , R_{sm} , R_{sk} para cada ponto. Os parâmetros seguem a nomenclatura especificada na NBR 4287(2002)- “Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade”. (ABNT, 2002)

Para cálculo de Kt os parâmetros utilizados são R_a , R_y e R_z . O parâmetro R_a , referente à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos, ficaram entre 3,281 e $4,938 \mu m$. Para o parâmetro R_y , maior distância entre pico e

vale, os valores ficaram entre 13,71 e 36,76 μm . O parâmetro R_z , referente a média aritmética de 5 valores de rugosidade parcial Z_i , os valores ficaram entre 7,929 e 24,62 μm .

Além dos valores de R_a , R_y e R_z é necessária a obtenção do parâmetro $\bar{\rho}$, não fornecido pelo rugosímetro. Como o parâmetro é calculado anteriormente através dos dados de estéreo fotometria o valor de $\bar{\rho}$ utilizado um valor médio de $\bar{\rho}$ a partir dos valores presentes na Tabela 6.

Através da equação (7) são obtidos os valores de K_t para cada uma das amostras. Os resultados encontram-se na Tabela 7.

Amostra	$R_a(\mu m)$	$R_y(\mu m)$	$R_z(\mu m)$	$\bar{\rho}(\mu m)$	K_t
1	5,884	35,93	11,71	14,92	3,419
1	4,413	26,99	20,01	14,92	1,798
2	2,120	16,93	9,24	14,92	1,521
2	3,200	21,09	16,58	14,92	1,545
3	5,534	36,13	32,87	14,92	1,815
4	3,934	16,71	12,85	14,92	1,686
4	4,401	31,64	22,77	14,92	1,820
5	4,938	36,76	24,62	14,92	1,988
6	3,181	13,71	7,93	14,92	1,737
6	4,339	20,85	10,87	14,92	2,115

Tabela 7: Parâmetros de rugosidade para o rugosímetro
Fonte: Própria, 2018.

O fator de concentração de tensão K_t obtido para as amostras variou entre 3,419 e 1,521. De maneira geral os valores variam entre 1,540 e 2,115 existindo um valor que se sobressai aos demais, 3,419 pertencentes à barra 1. A barra que apresentou menor valor de fator de concentração de tensão é a barra 2, onde o valor de K_t calculado foi de 1,521.

Ao comparar os resultados obtidos para o fator de concentração de tensão através do método da estéreo fotometria e do rugosímetro é verificada variações entre 2 e 80 %. A Tabela 8 apresenta o maior valor para cada amostra obtido através dos dois métodos.

Amostra	Kt obtido com o rugosímetro	Kt obtido com a estéreo fotometria	Variações entre métodos (%)
1	3,42	1,90	80
2	1,55	1,96	21
3	1,82	1,44	6
4	1,82	1,79	2
5	1,99	1,71	16
6	2,12	1,47	44

Tabela 8: Comparativo Kt rugosímetro e estéreo fotometria
Fonte: Própria, 2018.

Com exceção da amostra 2, os valores obtidos com o rugosímetro são superiores aos valores obtidos por meio do processo da estéreo fotometria.

De maneira geral a variação se deve ao método do rugosímetro utilizar apenas uma linha de medição, enquanto que o método da estéreo fotometria utiliza mil linhas no sentido vertical e mil linhas no sentido horizontal. Outro fator influenciador é a área utilizada no ensaio: apesar da utilização das mesmas amostras para os dois processos, as áreas utilizadas não são as mesmas, uma vez que a superfície de análise não é exatamente a mesma em ambos os casos.

Além disso, os ensaios com o rugosímetro não puderam ser realizados seguindo as recomendações de norma 8404 (1984) para os valores de cut-off devido ao formato circular da amostra não permitir a leitura dentro dos padrões estabelecidos. Para realizar análises mais precisas que permitam desconsiderar esses parâmetros é preciso adotar sensores especiais para superfícies circulares, como as barras de aço, a fim de minimizar os impactos da forma sobre os valores de rugosidade obtidos.

5 CONCLUSÕES

A partir dos estudos realizados é possível chegar às seguintes conclusões sobre as características das barras de aço CA-50 produzidas no Brasil:

O processo de fabricação tem influência sobre as características microestruturais das barras. Devido à introdução da têmpera e revenimento em algumas barras atuais, pôde-se identificar nas camadas mais externas da seção transversal 1) a presença de martensita e 2) tamanho médio de grãos menores que os das barras que passam apenas pela laminação à quente.

Nas barras da década de 80, e também em barras atuais, foram identificadas ao longo de toda a seção transversal apenas ferrita-perlita indicando que estas passam apenas pelo processo de laminação a quente.

O processo de fabricação influenciou de maneira direta nos valores de microdureza, uma vez que na barra submetida à têmpera e revenimento foi observado maiores valores de microdureza na camada externa (formada de martensita) e menores valores na região central (formada de ferrita+perlita). Esse resultado reafirma as informações contidas na literatura, que apresentam a microestrutura da martensita como responsável por maiores valores de microdureza na camada externa. Nas amostras que não receberam tratamento térmico foram visualizados perfis de microdureza sem grandes variações ao longo da estrutura, resultado da camada única de ferrita e perlita presente nas amostras. De forma geral, a presença da martensita nas barras temperadas e revenidas resultou em valores de microdureza superiores nas camadas mais externas comparada às demais barras de aço.

O processo de têmpera e revenimento, utilizado nas barras atuais, não levou a propriedades mecânicas melhoradas (tensão de escoamento e tensão máxima) comparadas às barras apenas laminadas, conforme frequentemente reportado na literatura. É possível que a quantidade de poros e impurezas nas barras atuais tenham influenciado nos resultados. Além disso, é possível que as barras possuam diferentes composições químicas e diferentes valores de teor de carbono, o que altera as propriedades mecânicas do material. A realização de mais ensaios de tração, análise da composição química das barras e teor de carbono e um estudo para análise dos poros e impurezas nas barras de aço fazem-se necessários.

Aproximadamente 35% das barras de aço não apresentaram os valores mínimos de tensão de escoamento estabelecidos em norma. No entanto, é necessária a realização de mais ensaios para obter resultados com maior confiabilidade.

Além disso, a presença de martensita proveniente do tratamento térmico não garantiu menores valores de alongamento para as amostras, diferentemente do que é sugerido na literatura.

A rugosidade nas barras determinada pelo MEV acompanhado da estereofotometria e pelo rugosímetro apresentaram valores de fator de concentração de tensão com diferenças de até 80% em alguns casos. Isso pode ser explicado pela impossibilidade de se analisar exatamente a mesma região em ambos os métodos e pelas limitações de cada técnica. Mais análises são necessárias para se obter resultados mais precisos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287(2002)- Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** Rio de Janeiro, 2002.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 (2014) Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6152 (2002) Produtos Siderúrgicos- Terminologia.** Rio de Janeiro, 2002.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6215 (1968)- Rugosidade das superfícies.** Rio de Janeiro, 1968.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6405 (1998)- Rugosidade das superfícies.** Rio de Janeiro, 1988.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480 (1996) Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado.** Rio de Janeiro, 1996.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8404 (1984) Indicação do Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos.** Rio de Janeiro, 1984.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800 (2008) Projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** Rio de Janeiro, 2008.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8965 (1985) Barras de aço CA 42S com características de soldabilidade destinadas a armaduras para concreto armado- Especificações.** Rio de Janeiro, 1985.

ABRAHÃO, Rodrigo R. R. **Fadiga de materiais- Uma revisão bibliográfica**. XII Seminário de Iniciação Científica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2008.

ALVES FILHO, Cláudio H.M. **Análise da Influência da Taxa de Resfriamento no gradiente Microestrutural de barras laminadas a quente tratadas termicamente**. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba, 2004.

ALVES FILHO, Cláudio . **Analysis of tempcore process: microstructural gradient formation and their influence on the final mechanical properties**. 19th International Congress of Mechanical Engineering. Brasília, 2007.

ANAZAWA, Roberto Masato. **Caracterização mecânica e Microestrutural de um aço 300 M com Microestrutura multifásica**. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia do Câmpus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá,2007.

ARAUJO, Vitor Torquato. **Caracterização e quantificação microestrutural de barras de aço produzidas via processo thermex**. Trabalho de conclusão de curso Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2010.

ARCELORMITTAL. **Manual do Processo de Fabricação de CA50S, CA25 e CA Nervurado**. Disponível em: <<http://longos.arcelormittal.com/pdf/produtos/construcao-civil/outros/manual-fabricacao-ca-50-ca-60.pdf>> Acesso em: 14 mai.2018

AROLA, Dwayne; WILLIAMS, C. **Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces**. University of Maryland Baltimore County. Disponível em: International Journal of Fatigue, v.24, p. 923-930. USA,2002.

ASHBY, Michael F.; JONES, David R.H.**Engenharia de Materiais**. 1^a Ed. Editora Elsevier. 2007.

ASKELEAND, Donald R e PHULÉ, Pradeep P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo, Cengage Learning, 2008.

ASM Handbook Committee. **Metallography and Microstructures**. Vol 9, EUA, ASM International, 1992.

ASTM E 92-82 (2003). **Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials**. United States: ASTM international.

ASTM E 112-10 (2010). **Standard Test Method for Determining Average Grain Size Materials**. United States: ASTM international.

ASTM E 385-99 (2002). **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. United States: ASTM international.

BANNANTINE, J. A.; COMER, J.J.; HANDROCK, J.L. **Fundamentals of metal fatigue analysis**. Prentice Hall, New Jersey, 1990.

BARRETO, Oliveira e FARIA, Matheus de. **Características de vergalhões de aço auto-revenido**. Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de mestrado. Belo Horizonte, 2009.

BARRETO, Matheus F.O. **Avaliação do comportamento mecânico de vergalhões de aço auto-revenido**. 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais Universidade Federal de Minas Gerais. Cuiabá, 2014.

BONDUELLE, Arnaud. **Caractérisation du panneau de particules surface mélaminé par son aptitude a l'usinabilité**. Tese de Doutorado. Université de Nancy I. Nancy, 1994.

BONIATTI, D. L., ITURRIOZ, I. **Análise do Comportamento de Fadiga para Estruturas Submetidas a Temperaturas Elevadas Aliadas a Esforços Cíclicos**. Brasil: UFRGS, 2003.

BRANCO, C., Fernandes, A., CASTRO, P., **Fadiga de Estruturas Soldadas**, Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa, 1999.

BRESCIANI Filho, Ettore (coord.); ZAVAGLIA, Cecília Amélia Carvalho; BUTTON, Sérgio Tonini; GOMES, Edson; NERY Fernando Antonio da Costa. **Conformação Plástica dos Metais**. 5ª Ed. Editora da Unicamp. Campinas, 1997.

BRESCIANI FILHO, Ettore. **Conformação plástica dos metais**. 4ª ed. Campinas, SP: UNICAMP, 1991.

BUDYNAS, Richaes G. NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**. Editora AMGH. 2011.

CAETANO, E. L.; ALMEIDA, F. T.; MORETTI, J.; DROSZCZAK, J.C; OLIVEIRA, M.N. **Rugosidade Rugosímetro**. Universidade Tuiuti do Paraná. Curitiba, 2016.

CALLISTER, William D.; SOARES, Sérgio Murilo Stamile. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008.

CASTRO, J. T. P., MEGGIOLARO, M. A. **Fadiga - Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço**. Vol. I e II. 2009.

CHIAVERINI, Vicente. Aço e Ferros Fundidos. **São Paulo: ABM–Associação Brasileira de Metais**, p. 321-358, 1982.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**, 3ª ed. São Paulo, Editora Edgard Blüncher, 1974.

CONFEDERAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, CBCA. **Estáticas do Uso de Sistemas Estruturais na Construção Civil**. Disponível em <[HTTP://www.cbca-ibs.org.br/nsite/site/estatisticas.asp](http://www.cbca-ibs.org.br/nsite/site/estatisticas.asp)> Acesso em 27 mar 2009.

CORRÊA, Dirley C. **Usinabilidade mancais bimetálicos: Influência do avanço no desgaste e na formação de rebarbas**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gérias. Belo Horizonte, 2002.

COSTA, João Paulo Gomes Antunes. **Produção e caracterização de barras laminadas de aço DIN 39MnCrB6-2**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena. Lorena, 2014.

DALCIN, Gabriela Bortoli. **Ensaio dos materiais**. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. Santo Ângelo, 2007.

DANTAS, João P. R. **Investigação experimental da fadiga em lajes de pontes armadas com barras ou telas soldadas**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010

FACHIN, Odília. **Fundamentos da metodologia**. Editora Saraiva. 6ªed.

FERNANDES, Viviane Kettermann; MARTENDAL, Caroline Pereira. **Rugosidade de uma superfície**. Disponível em <http://engenheirodemateriais.com.br/2017/02/08/rugosidade-de-uma-superficie/>. > Acesso em: 11 set 2018

FILHO, Rubens Bernardes; ASSIS, Odilio B.B; Pessoa, José D. C. **Relação entre parâmetros de rugosidade obtidos por microscopia de força atômica e por microscopia eletrônica de varredura**. Instituto de Química de São Carlos. São Carlos, 1996.

GARCIA, Amauri. **Ensaio dos materiais**. 2ª Ed. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2012.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo, Atlas, 2002.

GINDRO, Rafael Rakauskas; LUCATO, Marcio. **Correlações entre tensões de fadiga de corpos com superfícies polidas e corpos com rugosidade**. Escola de Engenharia de Mauá. São Paulo, 2017.

HIBBLER, R.C. **Resistência dos materiais**. 7ªed. Editora Pearson. 2010.

IMIANOWSKY, Guilherme W.; WALENDOWSKY, Marcus A. **Os principais aços carbono utilizados na construção civil**. Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE. Brusque, 2017.

INSTITUIÇÃO AÇO BRASIL. **Aplicações do aço**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/aplicacoes.asp>> Acesso em 30 mai 2018.

INTERMÁQUINAS COM. DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS LTDA. **Manual de instruções- Rugosímetro Digital Portátil Modelo T200R**. Disponível em: <<http://www.cosa.com.br/manuais/tr200.pdf>> Acesso em: 26 set 2018

JOSSO, Bruno; BURTON, David R.; LALOR, Michael J. **Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and characterisation**. *Wear*, v. 252, n. 5, 2002.

LOPES, Karina Stefania Souza. **Influência dos parâmetros de usinagem na resistência à fadiga de aços AISI 4140**. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC – MG). Belo Horizonte, 2006.

MELLO, Antônio Vicente de Almeida. **Análise do Efeito da Interação Aço-Concreto sobre a Resposta Dinâmica de Pisos Mistos**. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

QUEIROZ NETO, Mozart. **Caracterização microestrutural de diferentes bitolas do aço CA-50 com composição química definida**. Trabalho final de curso. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas - Uma Abordagem Integrada**. 4ª ed. Massachusetts, Editora Bookman, 2013.

NUNES, L. M. **Desenvolvimento de aço microligado para a produção de vergalhão nervurado**. Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro, 2009.

OLIVEIRA, Claudinei José de. **Interação dinâmica entre irregularidades dimensionais em componentes mecânicos que trabalham em movimento de rotação**. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

PACHECO, Adriana da Silva. **Avaliação do fator de concentração de tensão presente em um reparo de tubulação de aço AISI 316L**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Carcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2013.

PEREIRA, Carolina A.; LUCATO, Márcio. **Correlação entre tensões de fadiga de corpos com superfícies polidas e corpos com rugosidade**. Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT), 2017.

PINHEIRO, Libânio M., MUZARDO, Cassiane D., SANTOS, Sandro P. **Estruturas de Concreto Armado- Aços para armadura**. Capítulo 03. USP–EESC– Departamento de Engenharia de Estruturas. São Carlos, 2003.

PIPINATO, Alessio. **Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation, and Maintenance**. 1ª ed. Kidlington, Elsevier, 2016.

RATTICHERI, Franco. **Avaliação da microdureza superficial do esmalte dentário irradiado com laser de diodo 960 nm**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

REBECHI, João Guilherme. **Correlações numéricas entre taxas de resfriamento, microestruturas e propriedades mecânicas para o tratamento térmico do aço AISI/SAE 4140**. Dissertação de Pós Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

RIVA, P. FRANCHI, A. TABENI, D. **Welded Tempcore Reinforcement Behaviour for Seismic Applications**. Materials and Structures/Matériaux et Constructions. Italy, 2001.

ROCHA, Marina. Fatigue Behaviour of Steel Reinforcement Bars at Very High Number of Cycles. Thèse. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Suisse, 2014.

RODRIGUES, L.M.. SANTOS, C.H.R.; VELOSO, R.R.; LEMOS, M.R.; SANTOS, C.; CABRAL, R.F. **Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060**. Caderno UniFoa, 2014.

SALVADORI, Mario. **Por que os edifícios ficam de pé**, 2ª ed. São Paulo, Editora WMF Martins Fontes, 2015.

SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas**. Imprensa Livre Editora, Porto Alegre, 2004.

SHIGLEY, J. E. **Projeto de Engenharia Mecânica**, Bookman, Michigan – USA, 2005.

SIMON, P.; ECONOMOPOULOS, M.; NILLES, P. **Tempcore: A New Process for the Production of High-Quality Reinforcing Bars**. *Iron and Steel Engineering*, 1984.

SIMON, P.; ECONOMOPOULOS, M.; NILLES, P. **Tempcore, an Economical Process for the Production of High Quality Rebars**. *Metallurgical Plant and Technology*, 1984.

SIVAKUGAN, Nagaratnam; GNANENDRAN, Carthigesu T.; TULADHAR, Radin; KANNAN, M. Bobby. **Civil Engineering Material**. 1ª ed. Boston, Cengage Learning, 2018.

SOUZA, Sérgio Augusto. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5ª ed. São Paulo, Edgard Bluncher, 1982.

SURESH, S. **Fatigue of Materials**. 2^a ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2003.

TEOBALDO, Izabela Naves Coelho. **Estudo do aço como objeto de reforço estrutural em edificações antigas**. 2004. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

TOTTEN, G. **Steel Heat Treatment Handbook**. 2^a ed. Taylor & Francis Group, 2006.

ZAHAVI, Eliahu; TORBILO, Vladimir. **Fatigue Design: life expectancy of machine parts**. Boca Raton. CRC, 1996.

ZEPTER, Paulo Gilberto. **Influência da microestrutura nas propriedades mecânicas do aço ABNT 5160 em condições de carregamento monotônico e cíclico**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

YI, J.J. et al. Role of Retained Austenite on the Deformation of an Fe-0.07C-1.8Mn-1.4Si Dual-Phase Steel. **Metallurgical Transactions A**, v. 14A, 1983.

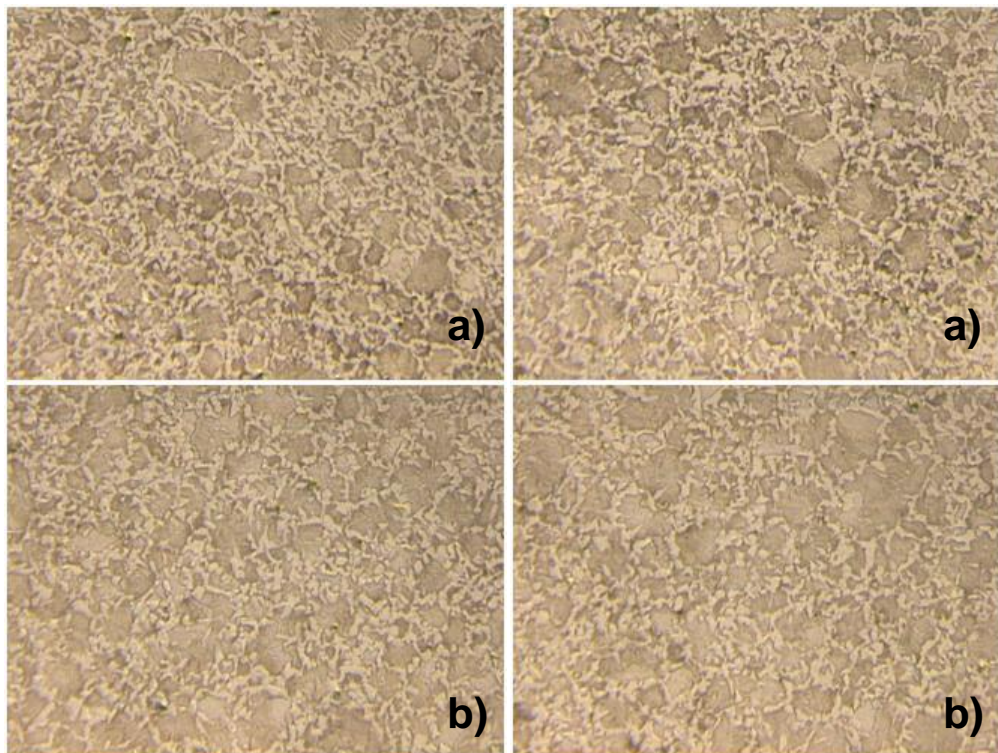
ANEXOS**ANEXO 1- IMAGENS MICROSCOPIA**

Figura 52: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 100 X- Amostra 01 a) Região interna b) Região externa

Fonte: Própria, 2018.

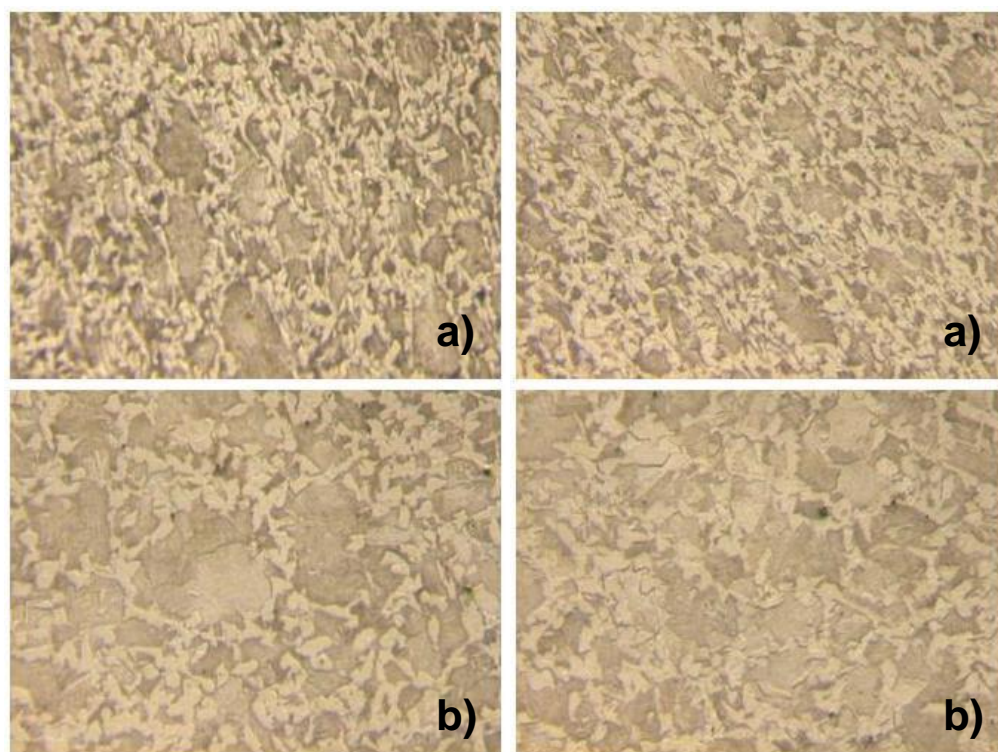


Figura 53: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 200 X- Amostra 01 a) Região interna b) Região externa

Fonte: Própria, 2018.

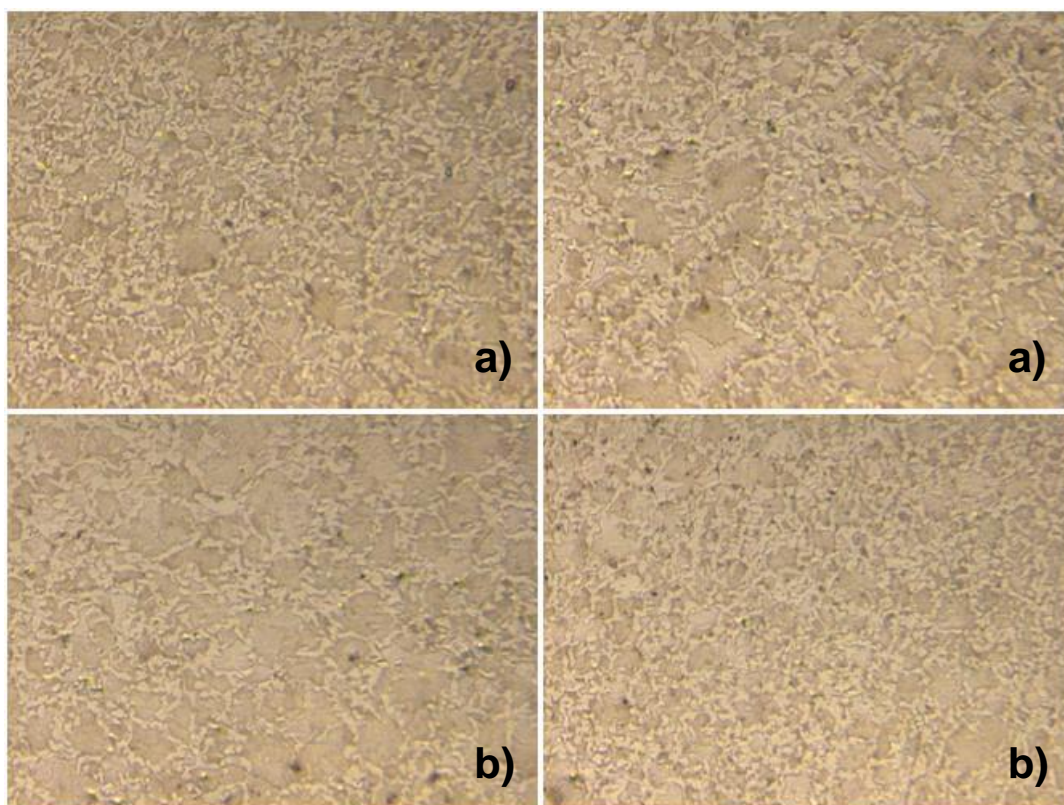


Figura 54: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 100 X- Amostra 02 a) Região interna b) Região externa
Fonte: Própria, 2018.

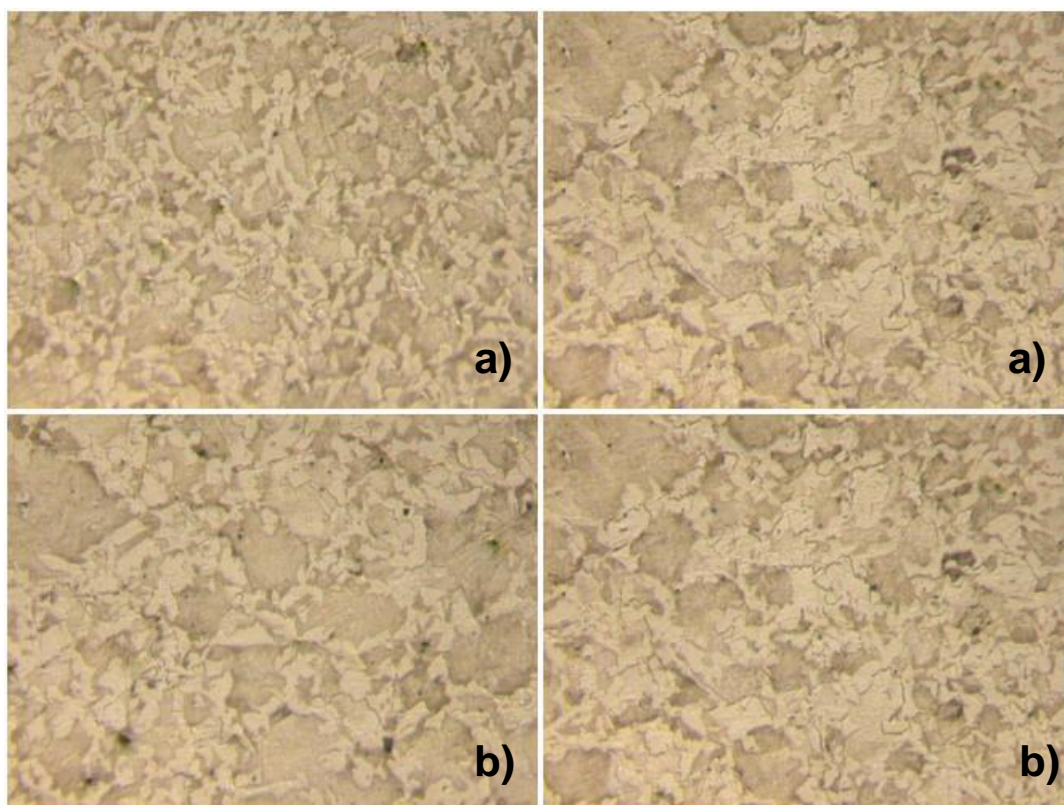


Figura 55: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 200 X- Amostra 02 a) Região interna b) Região externa
Fonte: Própria, 2018.

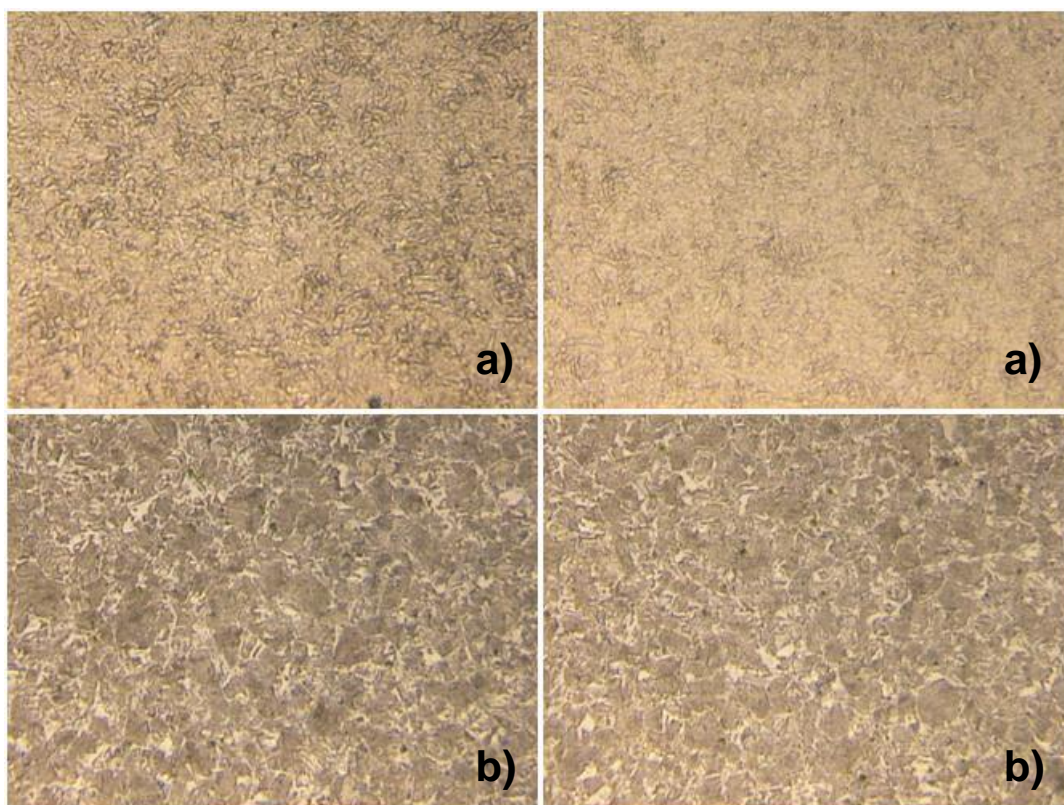


Figura 56: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 100 X- Amostra 03 a) Região interna b) Região externa
Fonte: Própria, 2018.

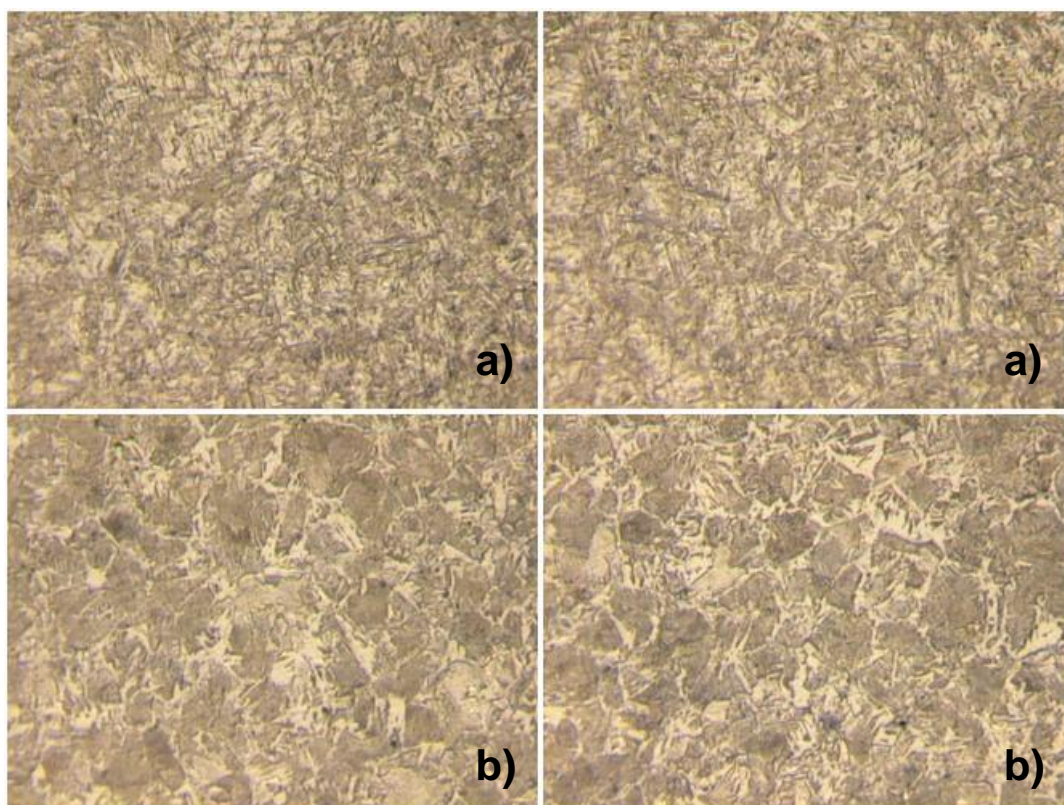


Figura 57: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 200 X- Amostra 03 a) Região interna b) Região externa
Fonte: Própria, 2018.

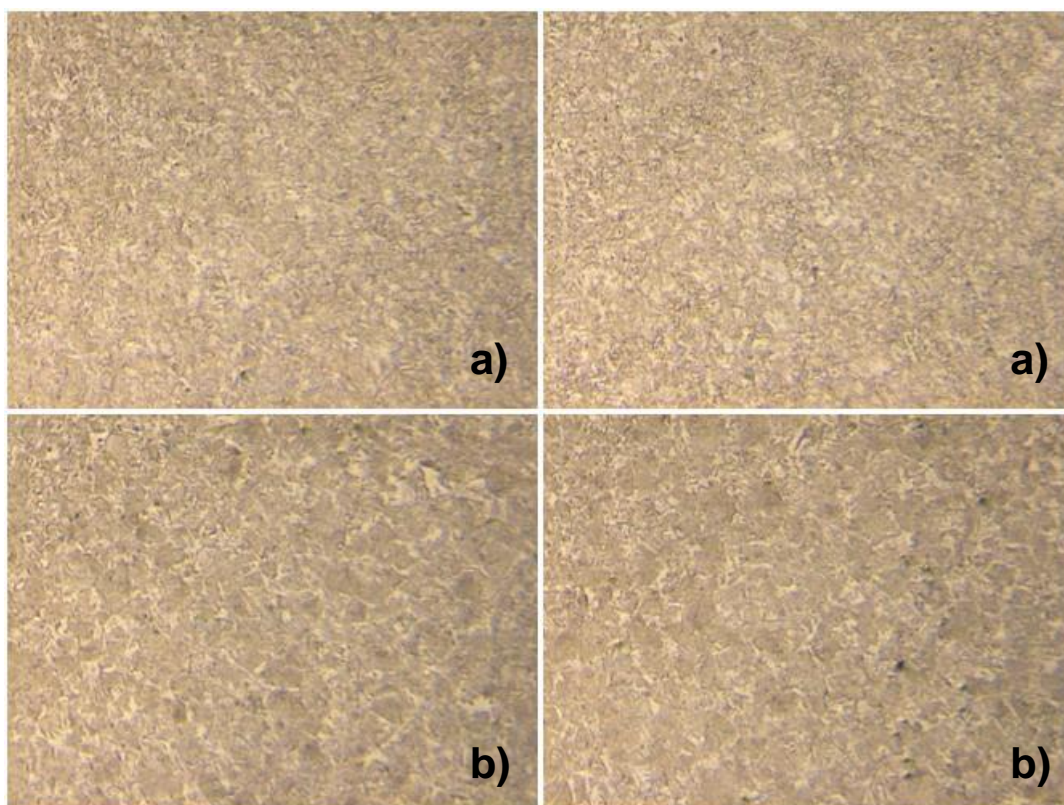


Figura 58: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 100 X- Amostra 04 a) Região interna b) Região externa
Fonte: Própria, 2018.

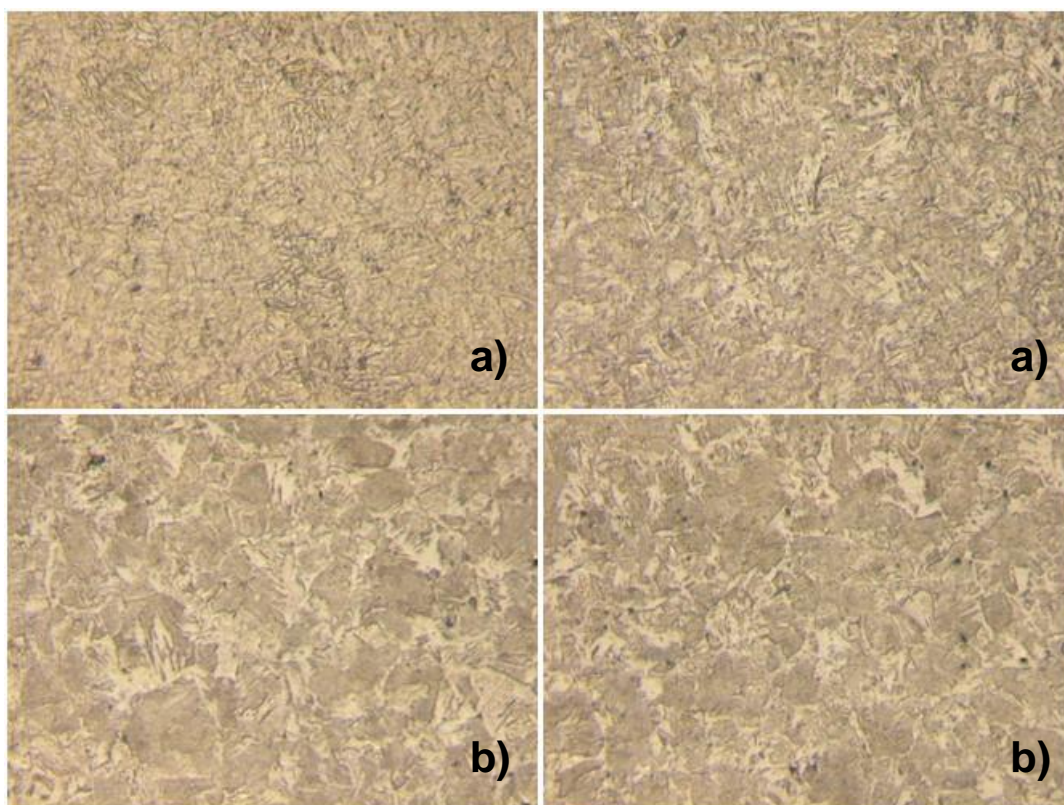


Figura 59: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 200 X- Amostra 04 a) Região interna b) Região externa
Fonte: Própria, 2018.

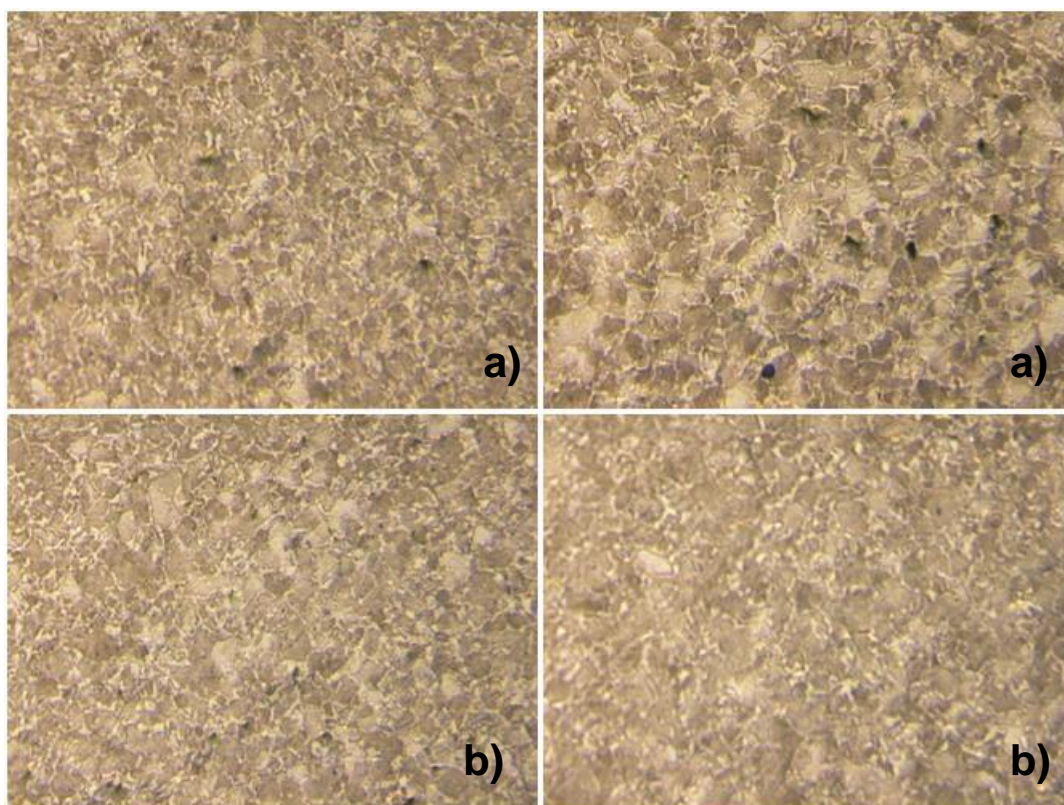


Figura 60: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 100 X- Amostra 05 a) Região interna b) Região externa
Fonte: Própria, 2018.

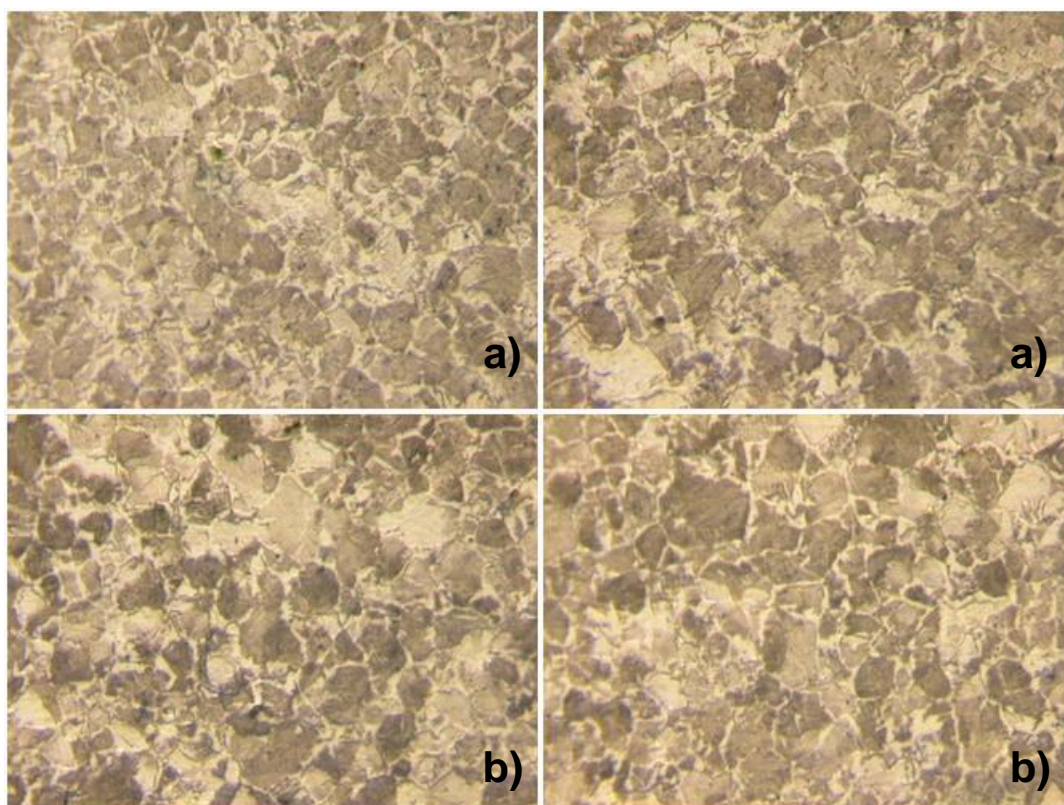


Figura 61: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 200 X- Amostra 05 a) Região interna b) Região externa
Fonte: Própria, 2018.

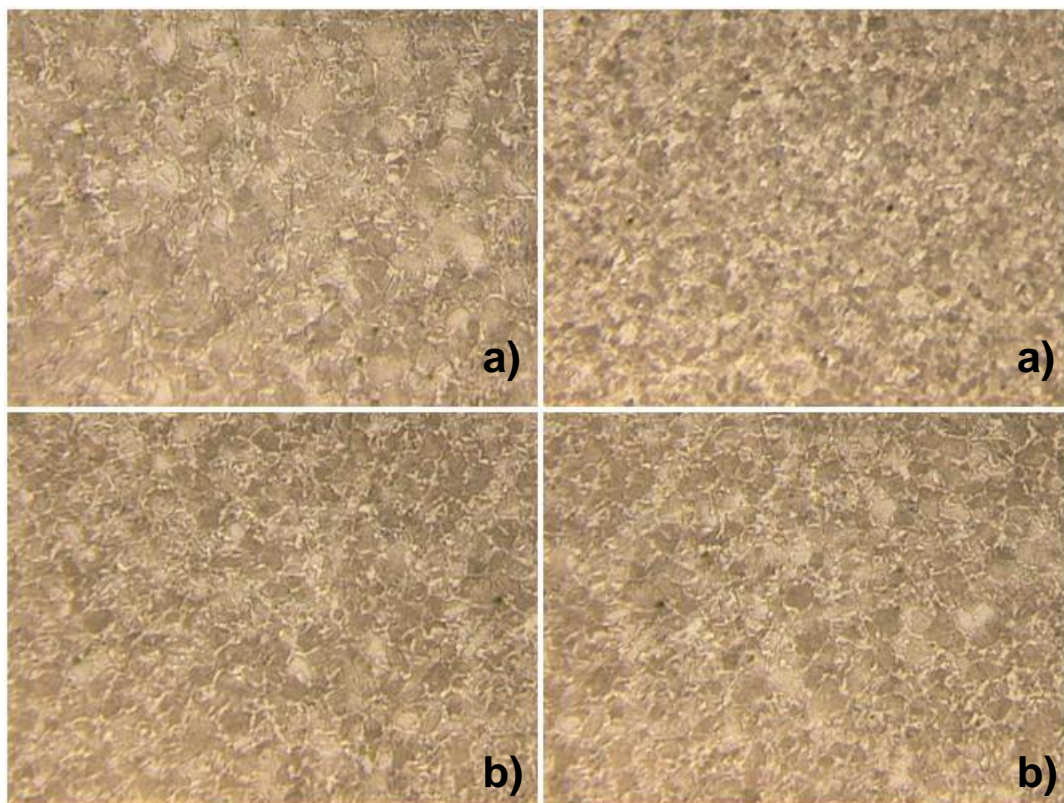


Figura 62: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 100 X- Amostra 06 a) Região interna b) Região externa
Fonte: Própria, 2018.

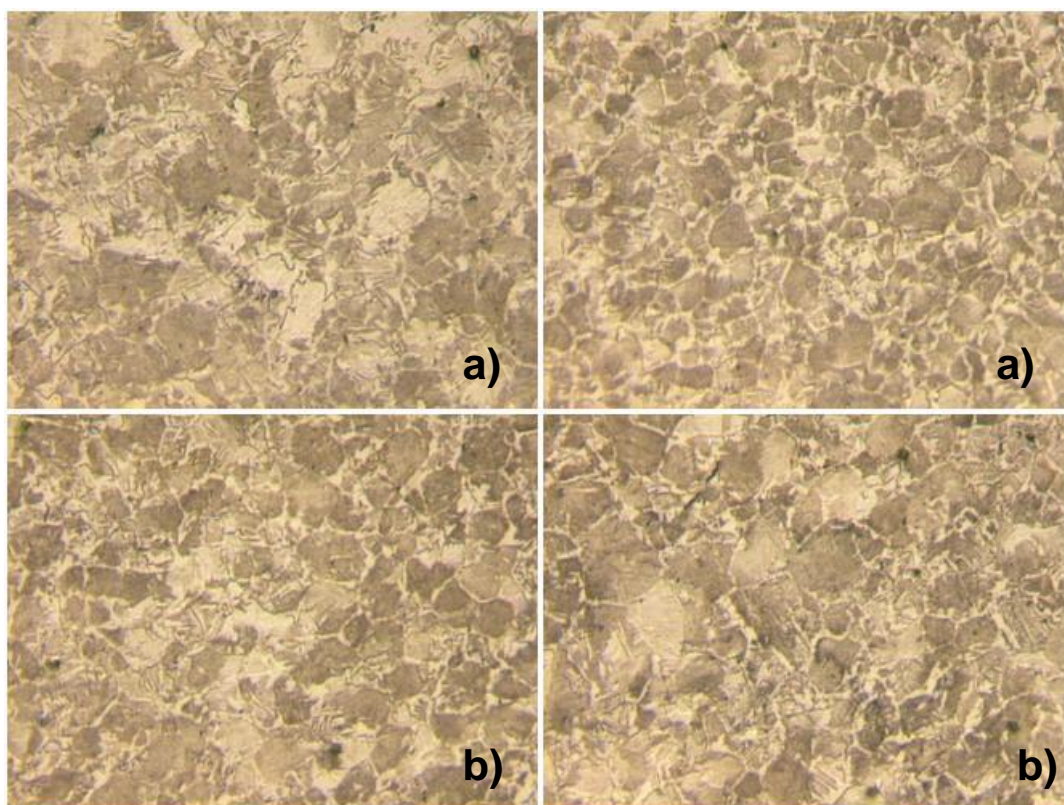


Figura 63: Imagens Microscopia ótica com ampliação de 200 X- Amostra 06 a) Região interna b) Região externa
Fonte: Própria, 2018.

ANEXO 2- QUANTIFICAÇÃO DO GRÃO

NL interno		Grãos contabilizados		NL Externo	
		Interno	Externo		
50,72	64,4	161	99	39,6	41,92
	56	140	117	46,8	
	49,6	124	114	45,6	
	32,8	82	93	37,2	
	50,8	127	101	40,4	

Tabela 9: Grãos contabilizados- Amostra 01
Fonte: Própria, 2018.

NL interno		Grãos contabilizados		NL Externo	
		Interno	Externo		
42,96	36,4	91	102	40,8	42,64
	52,4	131	116	46,4	
	41,2	103	114	45,6	
	37,2	93	100	40	
	47,6	119	101	40,4	

Tabela 10: Grãos contabilizados- Amostra 02
Fonte: Própria, 2018.

NL interno		Grãos contabilizados		NL Externo	
		Interno	Externo		
41,2	38	95	107	42,8	48
	38	95	123	49,2	
	43,2	108	130	52	
	41,2	103	115	46	
	45,6	114	125	50	

Tabela 11: Grãos contabilizados- Amostra 03
Fonte: Própria, 2018.

NL interno		Grãos contabilizados		NL Externo	
		Interno	Externo		
40,88	47,2	118	128	51,2	50,24
	48,8	122	145	58	
	40,8	102	130	52	
	31,6	79	107	42,8	
	36	90	118	47,2	

Tabela 12: Grãos contabilizados- Amostra 04
Fonte: Própria, 2018.

NL interno		Grãos contabilizados		NL Externo	
		Interno	Externo		
36,88	41,2	103	104	41,6	39,92
	37,6	94	105	42	
	33,2	83	91	36,4	
	36,4	91	104	41,6	
	36	90	95	38	

Tabela 13: Grãos Contabilizados- Amostra 05
Fonte: Própria, 2018.

NL interno		Grãos contabilizados		NL Externo	
		Interno	Externo		
42,4	42,8	107	113	45,2	42,7
	42,8	107	102	40,8	
	42	105	103	41,2	
	45,2	113	109	43,6	
	39,2	98	92	36,8	

Tabela 14: Grãos Contabilizados- Amostra 06
Fonte: Própria, 2018.

ANEXO 3- RESULTADOS ENSAIO MICRODUREZA VICKERS

Pontos ao longo da seção transversal	Amostra 1		Amostra 4		Amostra 6		
	Dimensões	HV (kgf/mm ²)	Dim.	HV (kgf/mm ²)	Dim.	HV (kgf/mm ²)	
1	d1	83,17	257,594	77,059	319,705	80,925	279,670
	d2	86,523		75,261		81,933	
2	d1	73,104	352,046	77,034	319,852	80,177	287,514
	d2	72,051		75,251		80,444	
3	d1	79,298	295,771	80,159	297,230	80,775	288,584
	d2	79,065		77,815		79,548	
4	d1	80,102	290,327	89,855	232,292	79,16	293,720
	d2	79,739		88,841		79,755	
5	d1	82,016	285,569	91,619	225,993	81,933	278,635
	d2	79,151		89,55		81,227	
6	d1	83,172	274,241	90,467	228,895	81,117	283,490
	d2	81,29		89,55		80,64	
7	d1	84,173	263,681	91,674	224,912	80,524	282,100
	d2	83,55		89,93		81,631	
8	d1	84,807	261,031	90,276	223,917	81,345	285,109
	d2	83,765		91,731		79,952	
9	d1	85,444	257,245	93,285	216,552	80,743	286,664
	d2	84,364		91,791		80,116	
10	d1	85,003	258,733	95,299	207,979	80,609	288,271
	d2	84,316		93,553		79,801	
11	d1	83,067	264,677	92,882	216,454	80,617	289,641
	d2	84,34		92,236		79,413	
12	d1	83,607	270,028	92,997	217,503	79,158	296,254
	d2	82,133		91,674		79,076	
13	d1	84,889	258,220	94,146	211,723	79,642	291,972
	d2	84,598		93,029		79,748	

14	d1	85,15	259,296	94,287	211,296	79,621	294,528
	d2	83,985		93,077		79,076	
15	d1	85,715	250,934	92,939	217,301	80,489	287,560
	d2	86,215		91,818		80,119	
16	d1	81,705	285,151	94,976	210,596	78,773	299,158
	d2	79,58		92,699		78,691	
17	d1	84,499	258,065	94,287	213,361	79,451	293,207
	d2	85,039		92,168		79,603	
18	d1	89,58	236,759			81,647	288,630
	d2	87,422				78,663	
19	d1	89,137	242,180				
	d2	85,873					
20	d1	88,245	241,660				
	d2	86,953					

Tabela 15: Valores de microdureza ao longo da seção transversal
Fonte: Própria, 2018.

ANEXO 6- IMAGENS ÉSTÉREO FOTOMETRIA E PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

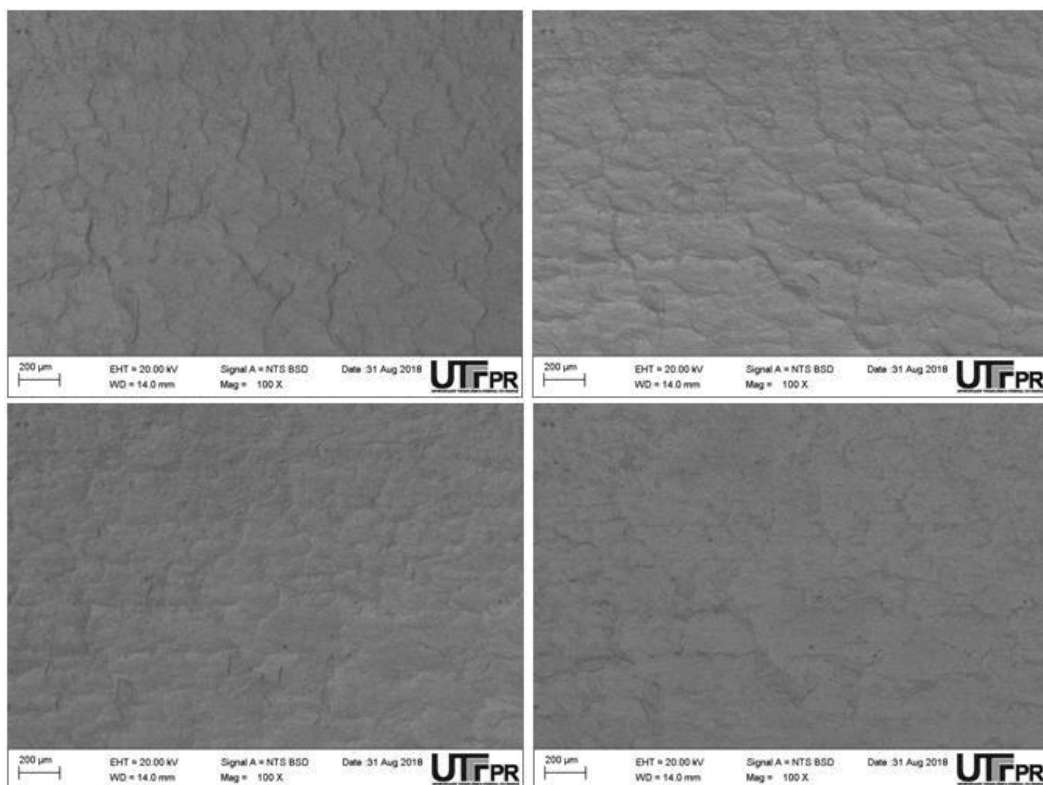


Figura 73: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 100 X- Amostra 01
Fonte: Própria, 2018.

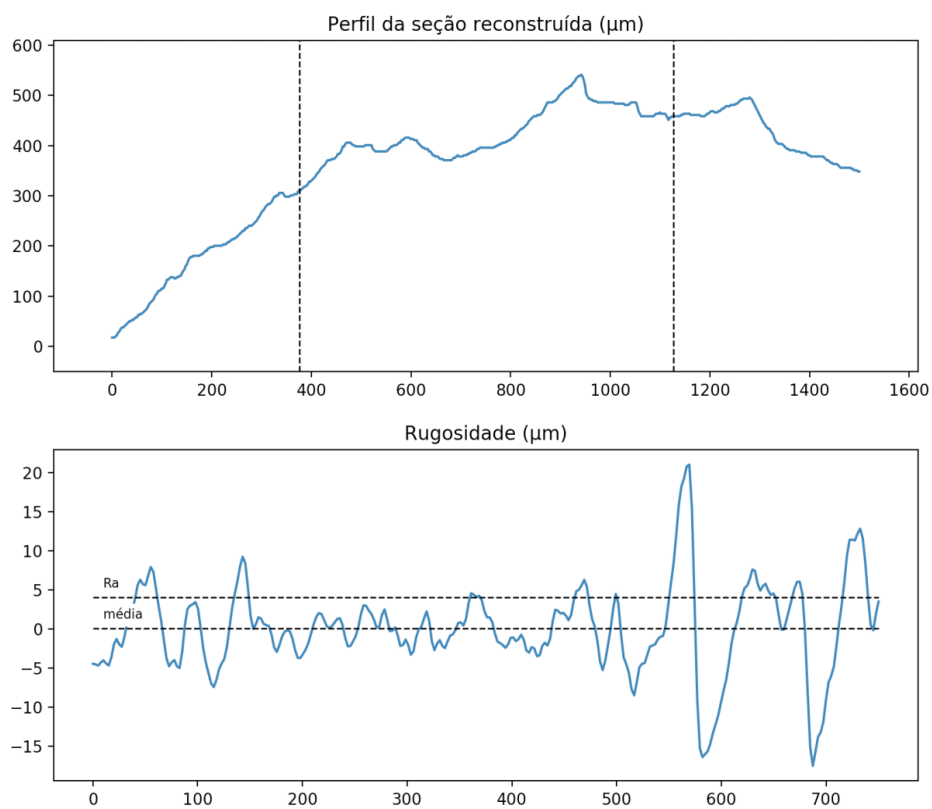


Figura 74: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 01 com ampliação de 100 X
Fonte: Própria, 2018.

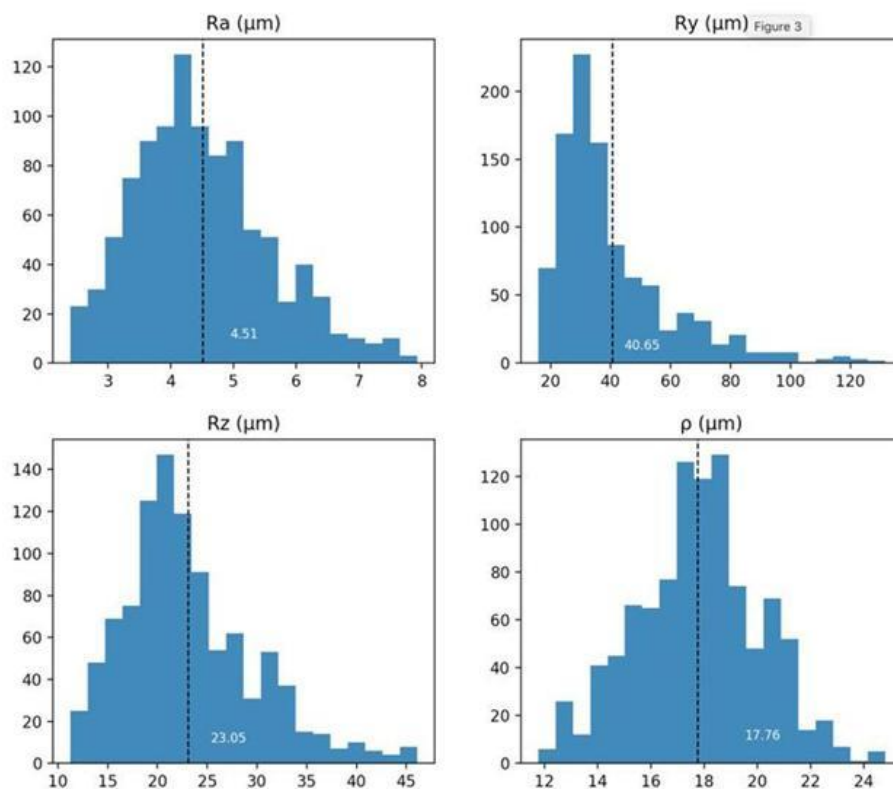


Figura 75: Parâmetros de rugosidade- Amostra 01 com ampliação do 100 X
Fonte: Própria, 2018.

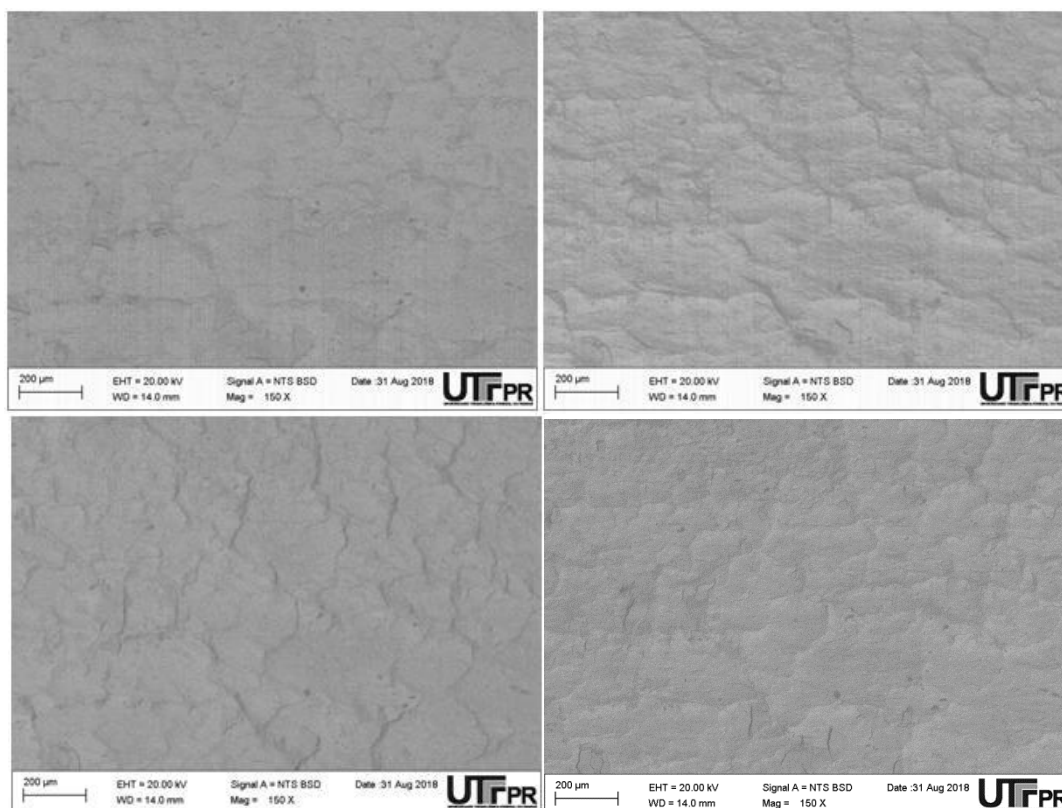


Figura 76: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 150 X- Amostra 01
Fonte: Própria, 2018.

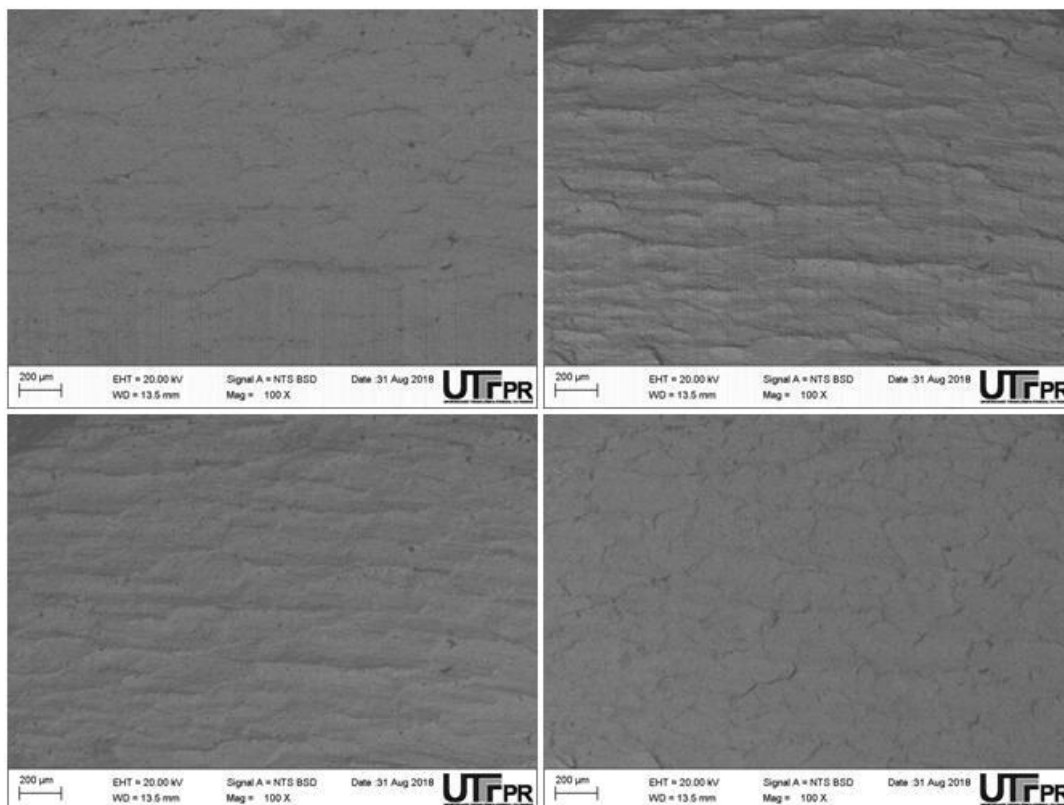


Figura 77: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 100 X- Amostra 02
Fonte: Própria, 2018.

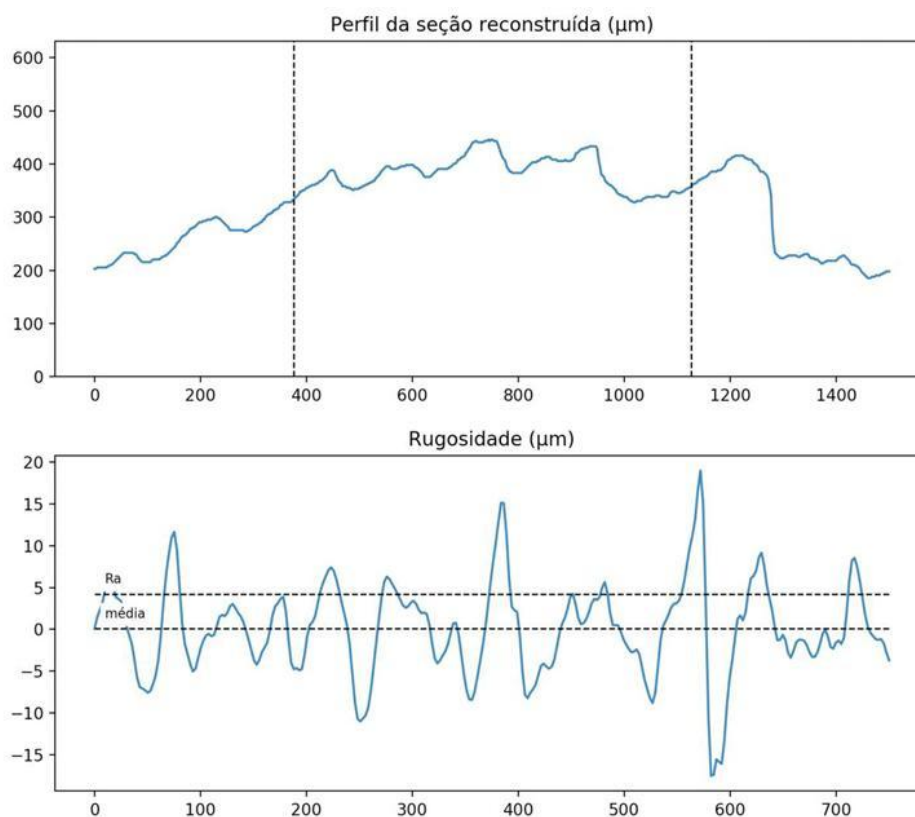


Figura 78: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 02 com ampliação de 100 X
Fonte: Própria, 2018.

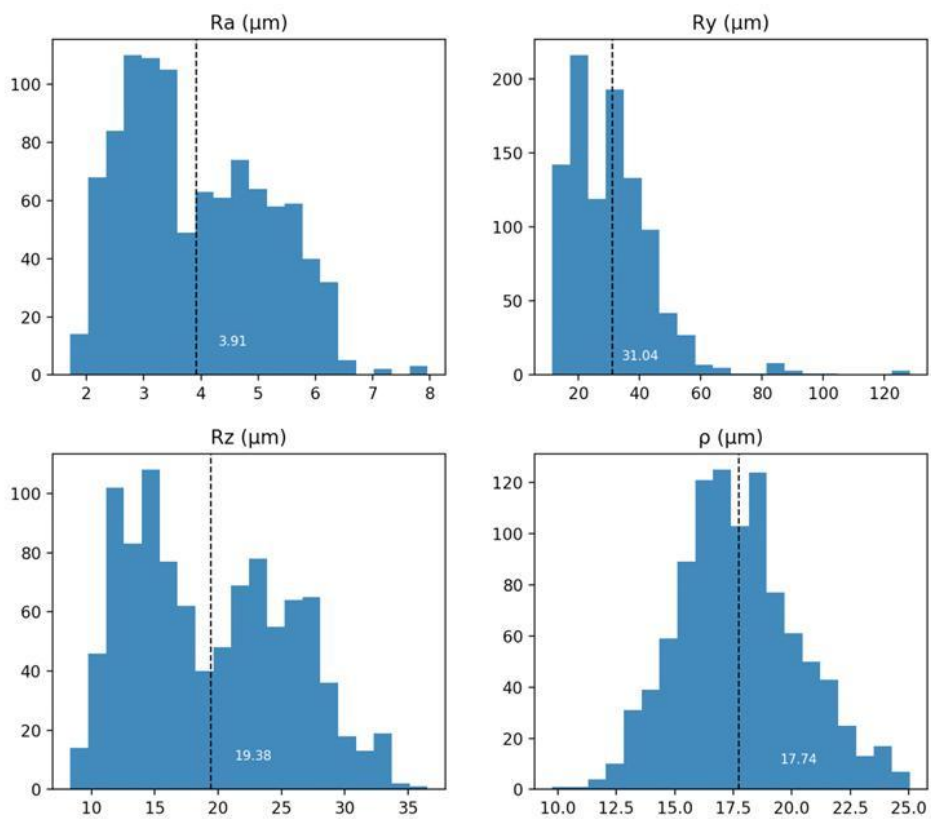


Figura 79: Parâmetros de rugosidade- Amostra 02 com ampliação de 100 X
Fonte: Própria, 2018.

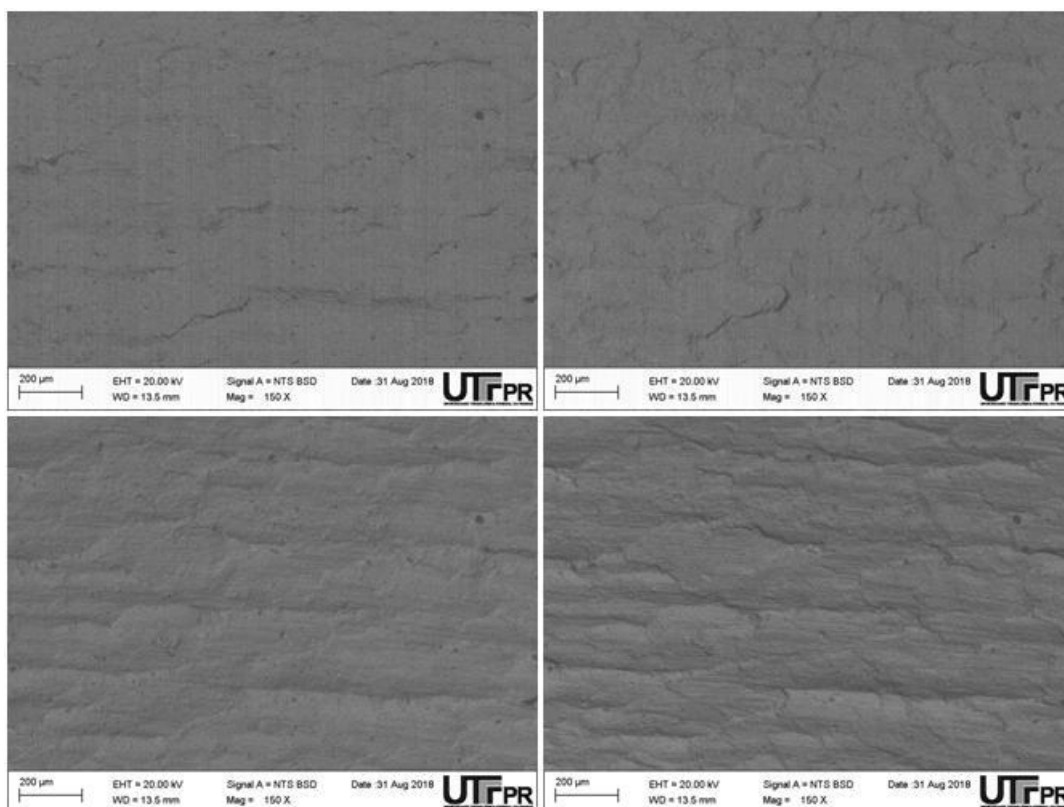


Figura 80: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 150 X- Amostra 02
Fonte: Própria, 2018.

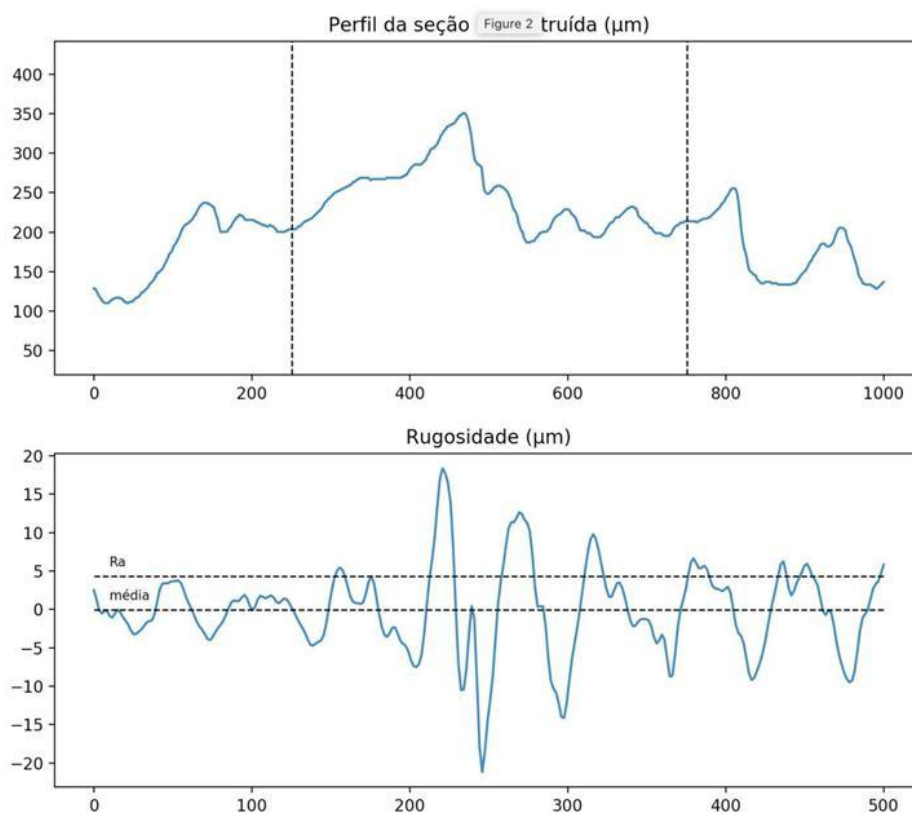


Figura 81: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 02 com ampliação de 150 X
Fonte: Própria, 2018.

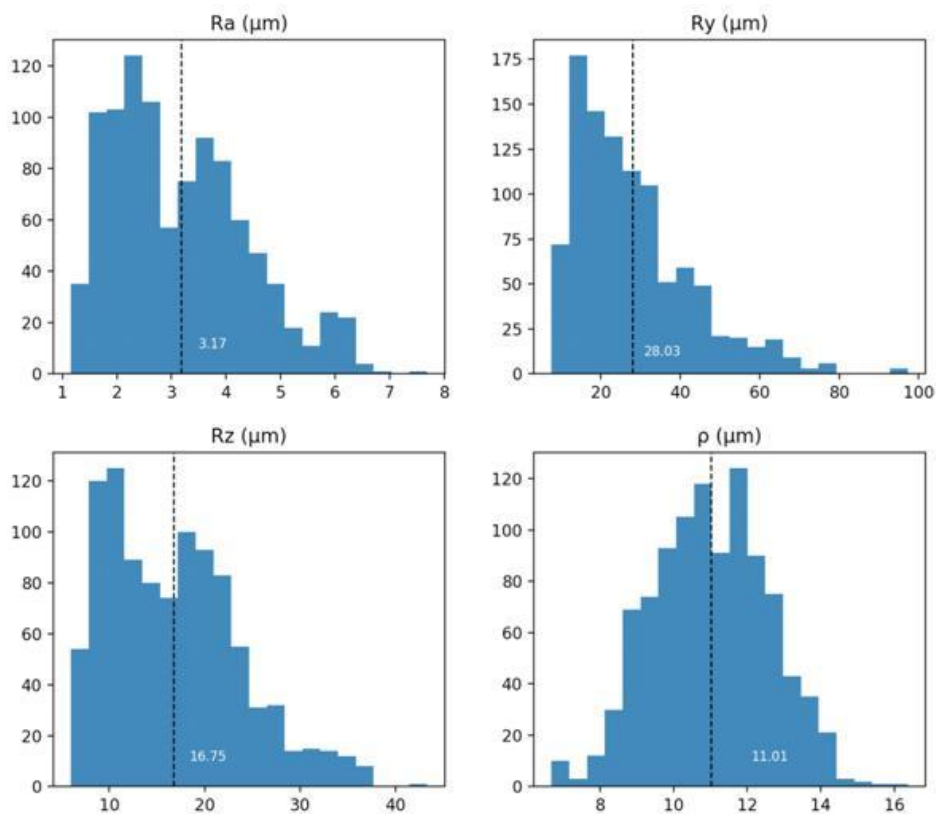


Figura 82: Parâmetros de rugosidade- Amostra 02 com ampliação de 150 X
Fonte: Própria, 2018.

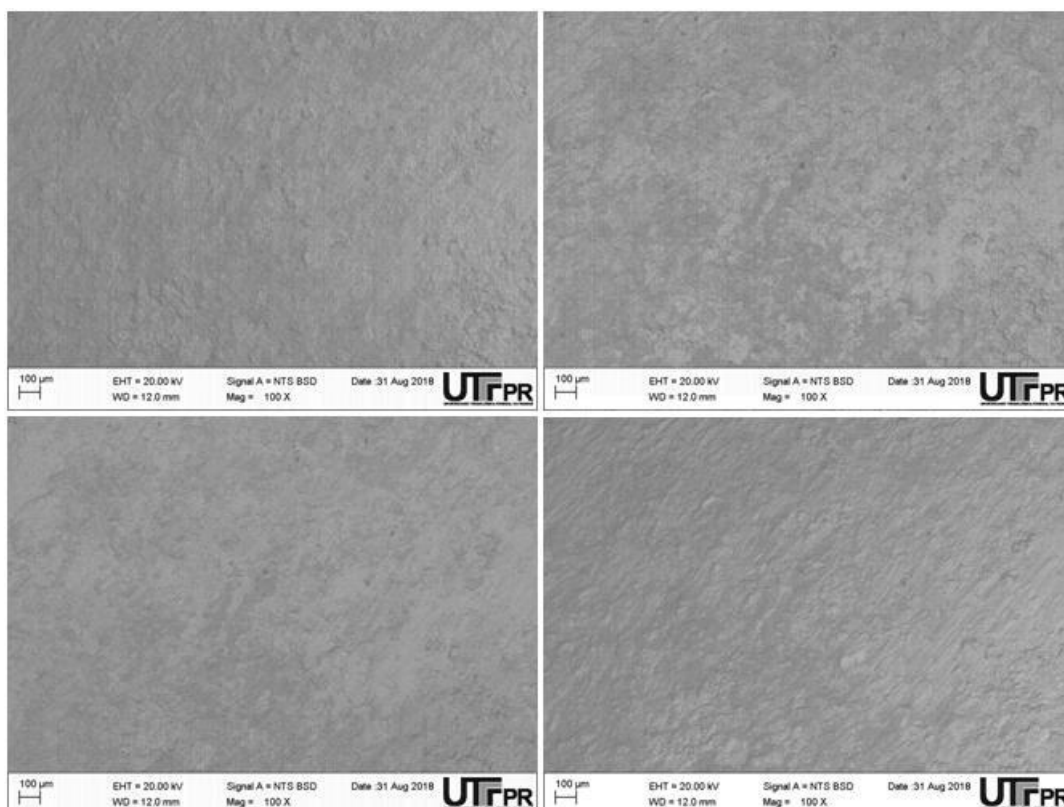


Figura 83: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 100 X- Amostra 03
Fonte: Própria, 2018.

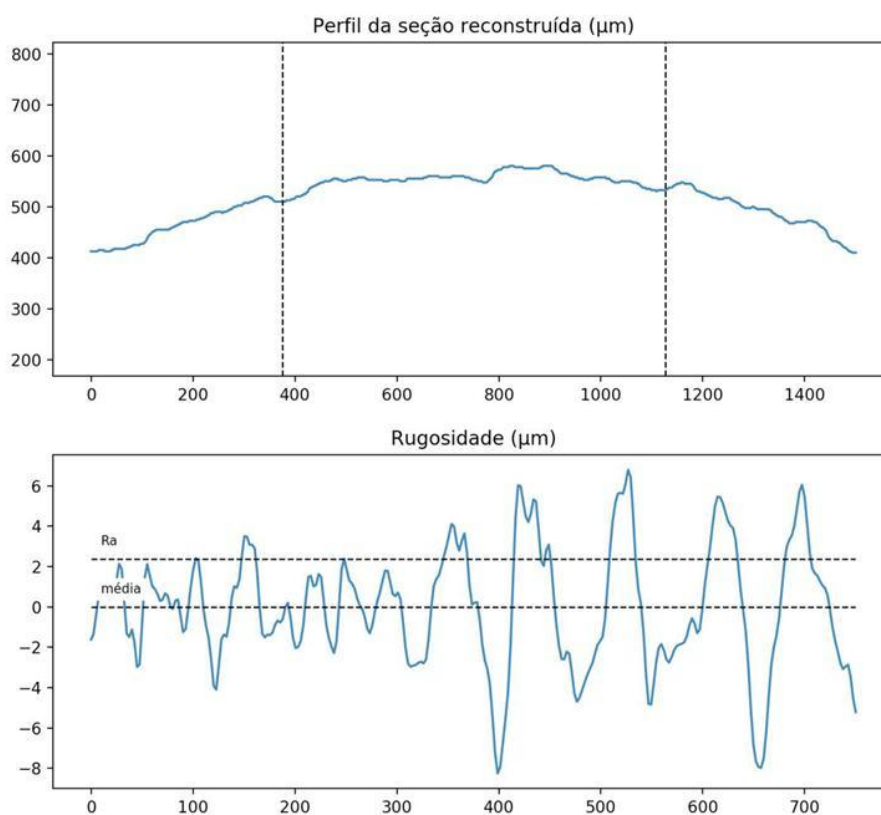


Figura 84: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 03 com ampliação de 100 X
Fonte: Própria, 2018.

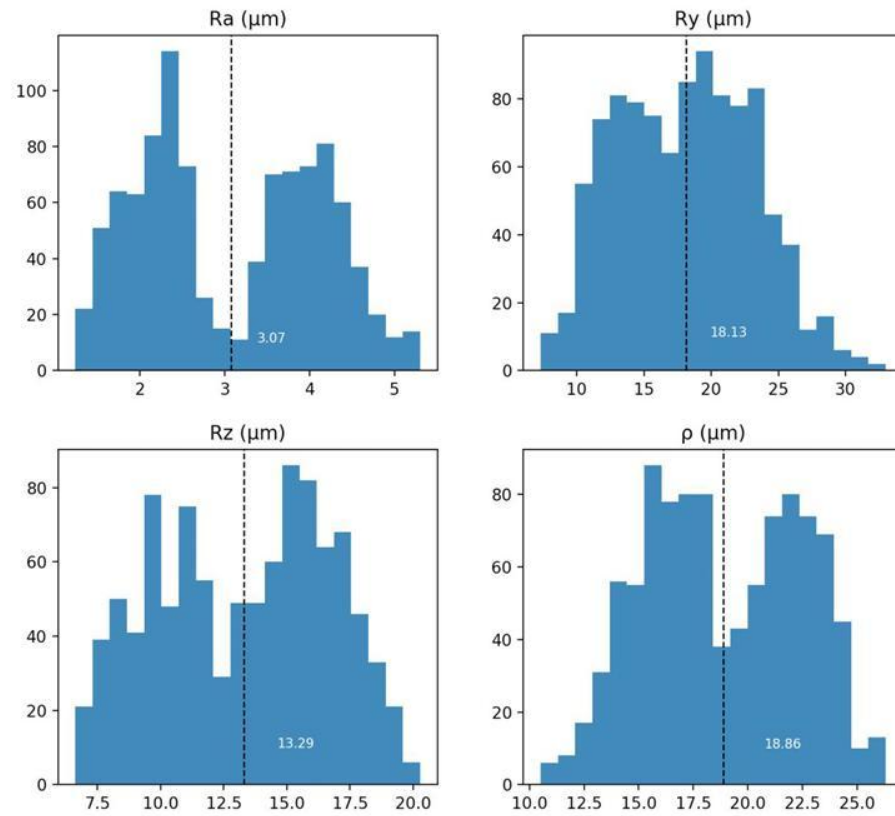


Figura 85: Parâmetros de rugosidade- Amostra 03 com ampliação de 100 X
Fonte: Própria, 2018.

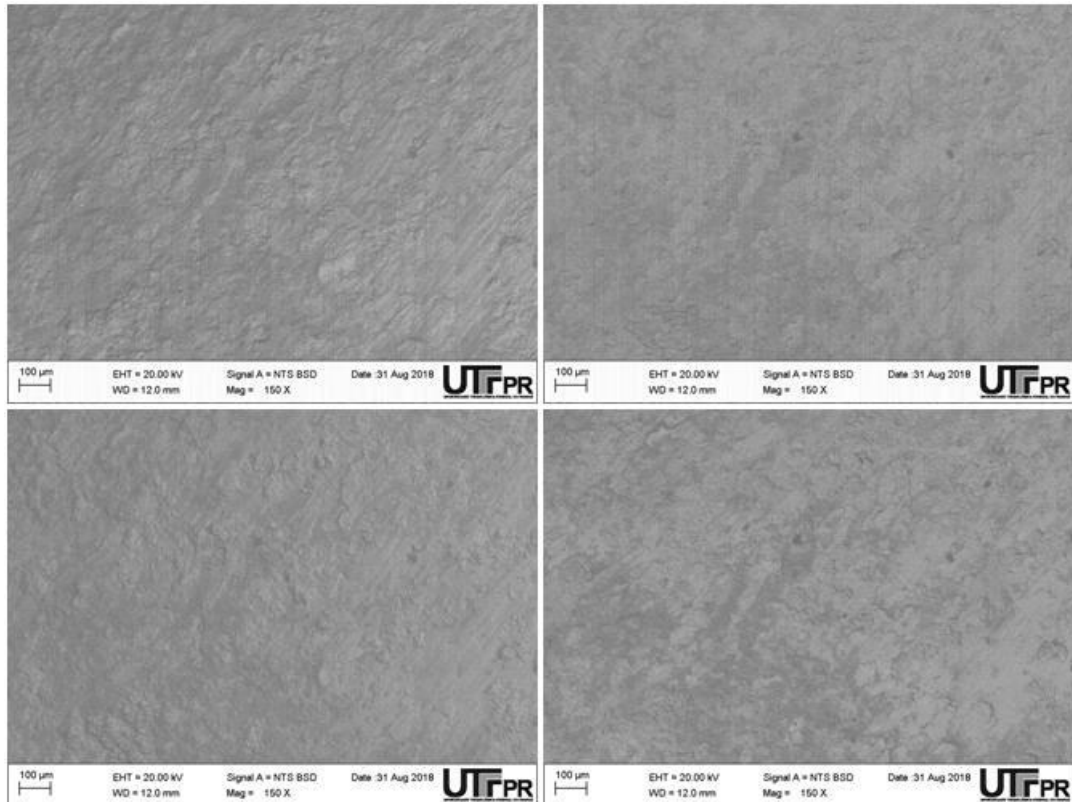


Figura 86: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 150 X- Amostra 03
Fonte: Própria, 2018.

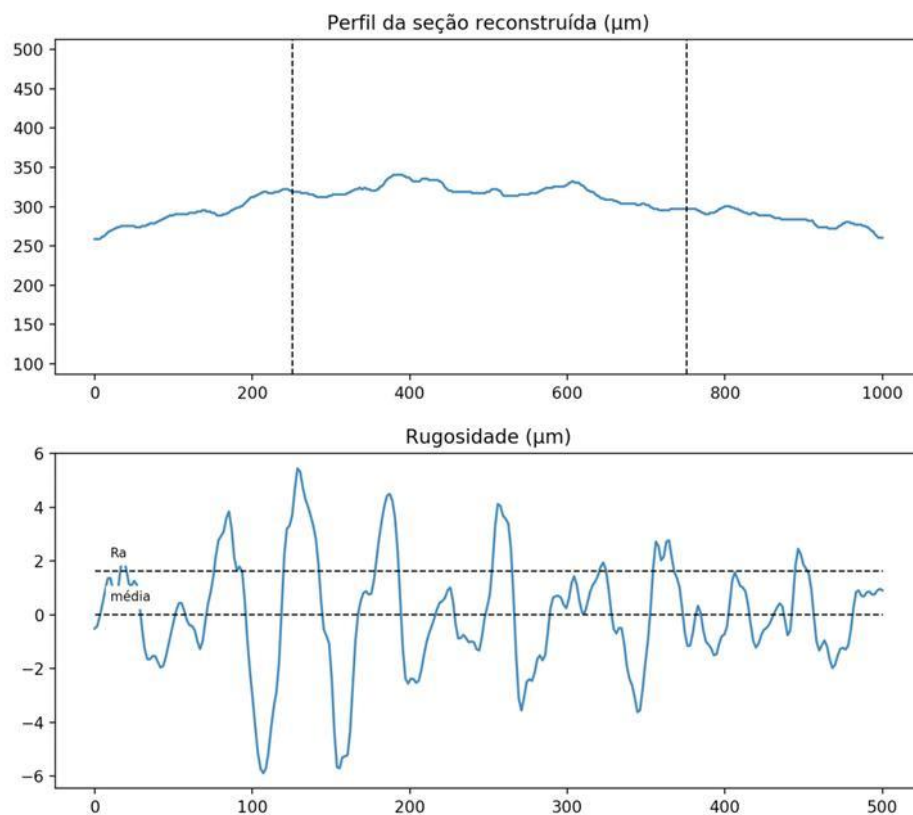


Figura 87: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 03 com ampliação de 150 X
Fonte: Própria, 2018.

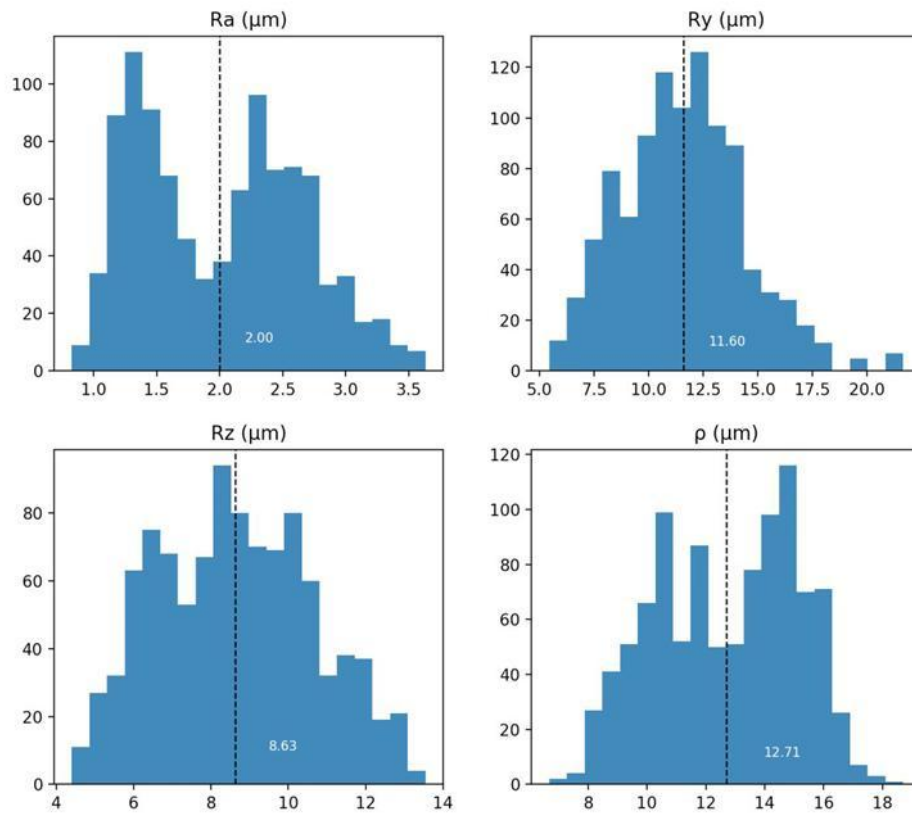


Figura 88: Parâmetros de rugosidade- Amostra 03 com ampliação de 150 X
Fonte: Própria, 2018.

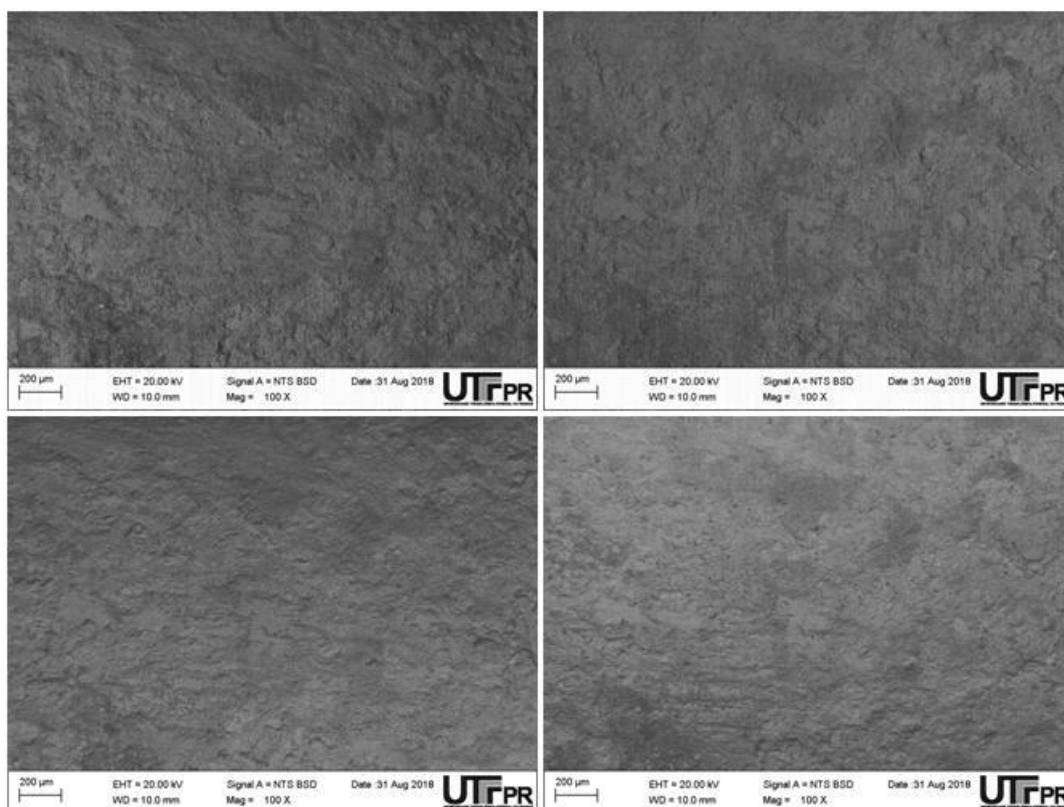


Figura 89: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 100 X- Amostra 04
Fonte: Própria, 2018.

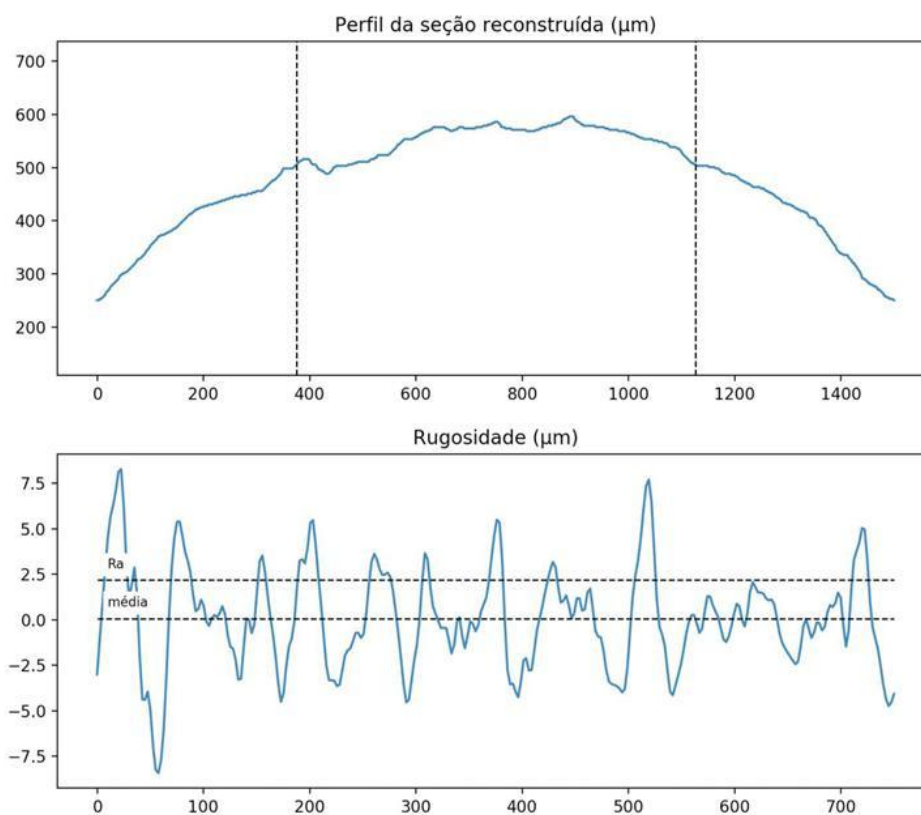


Figura 90: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 04 com ampliação de 100 X
Fonte: Própria, 2018.

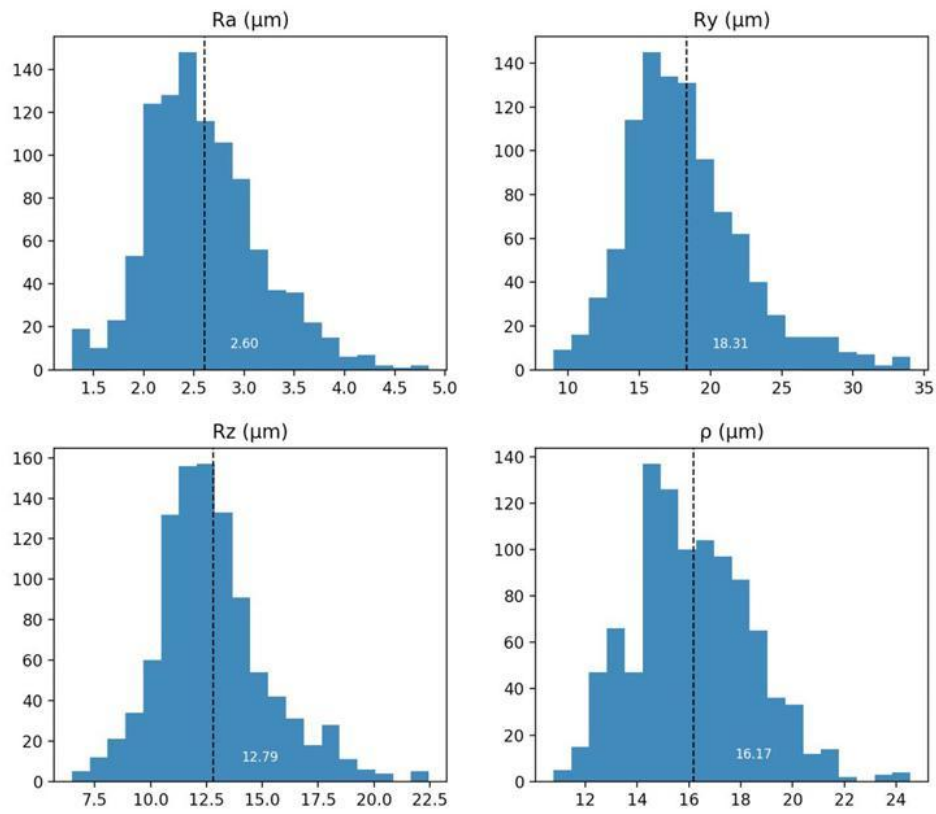


Figura 91: Parâmetros de rugosidade- Amostra 04 com ampliação de 100 X
Fonte: Própria, 2018.

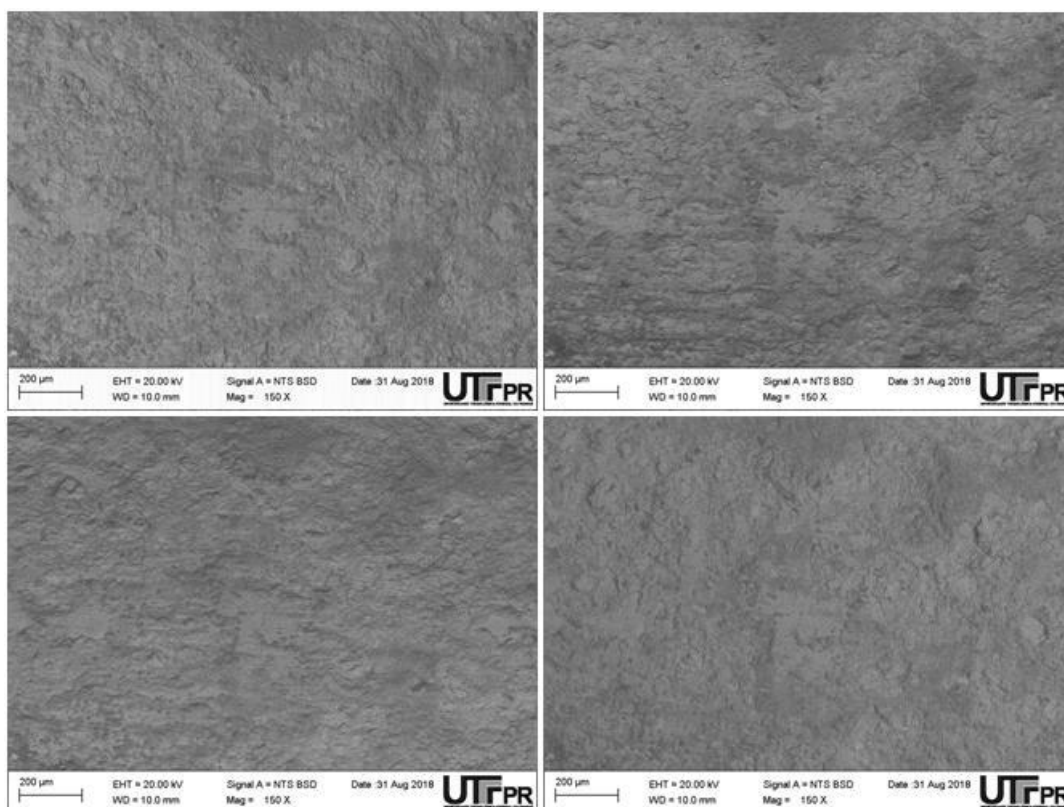


Figura 92: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 150 X- Amostra 04
Fonte: Própria, 2018.

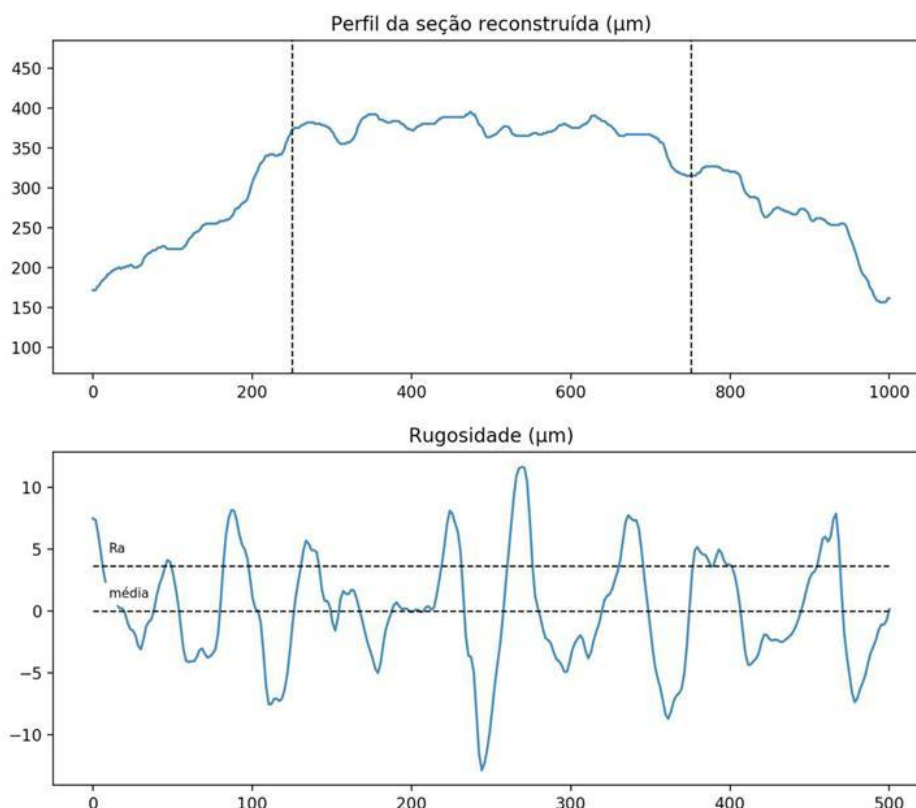


Figura 93: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 04 com ampliação de 150 X
Fonte: Própria, 2018.

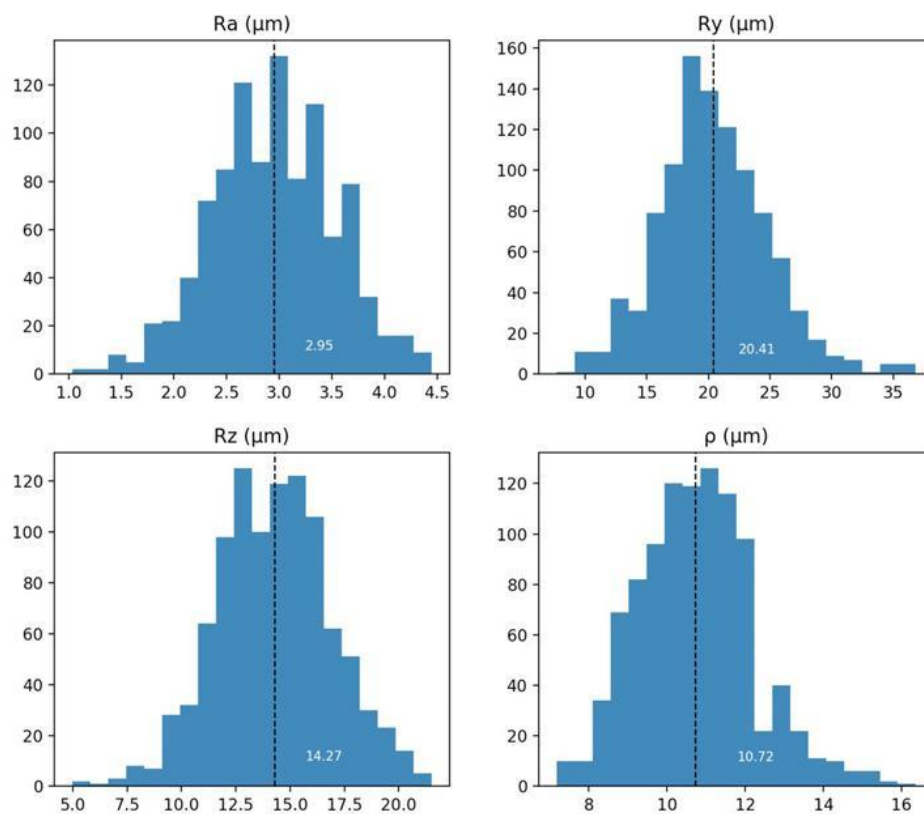


Figura 94: Parâmetros de rugosidade- Amostra 04 com ampliação de 150 X
Fonte: Própria, 2018.

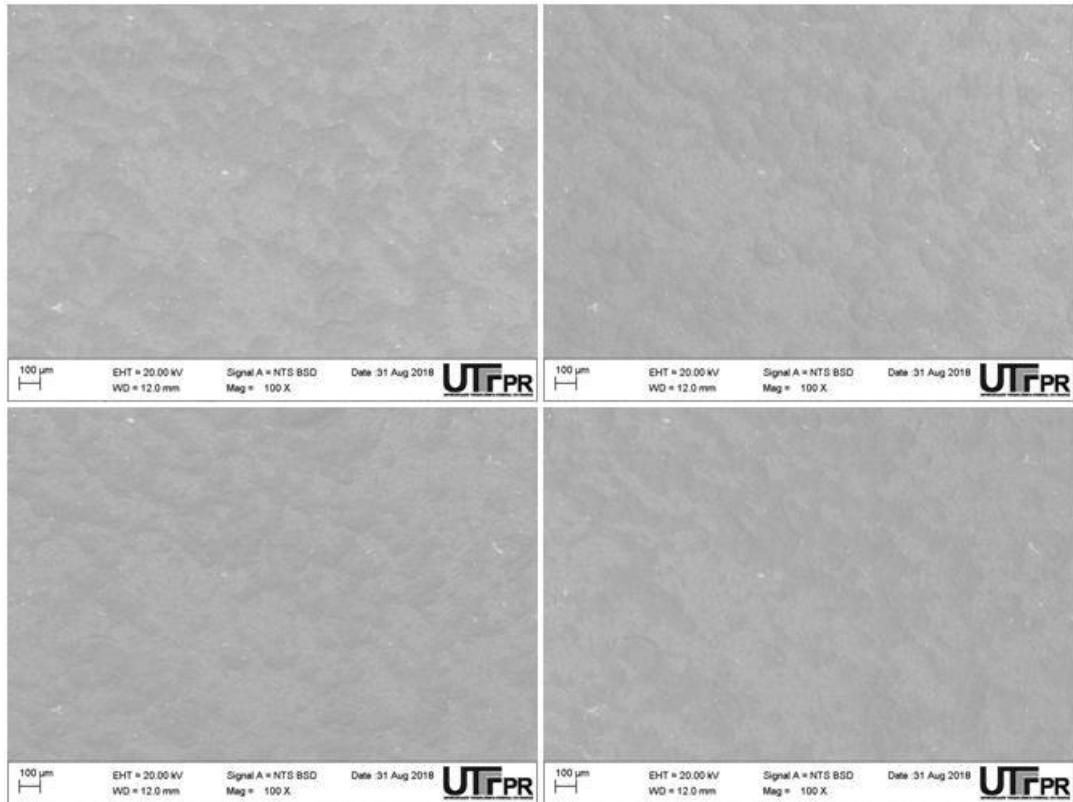


Figura 95: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 100 X- Amostra 05
Fonte: Própria, 2018.

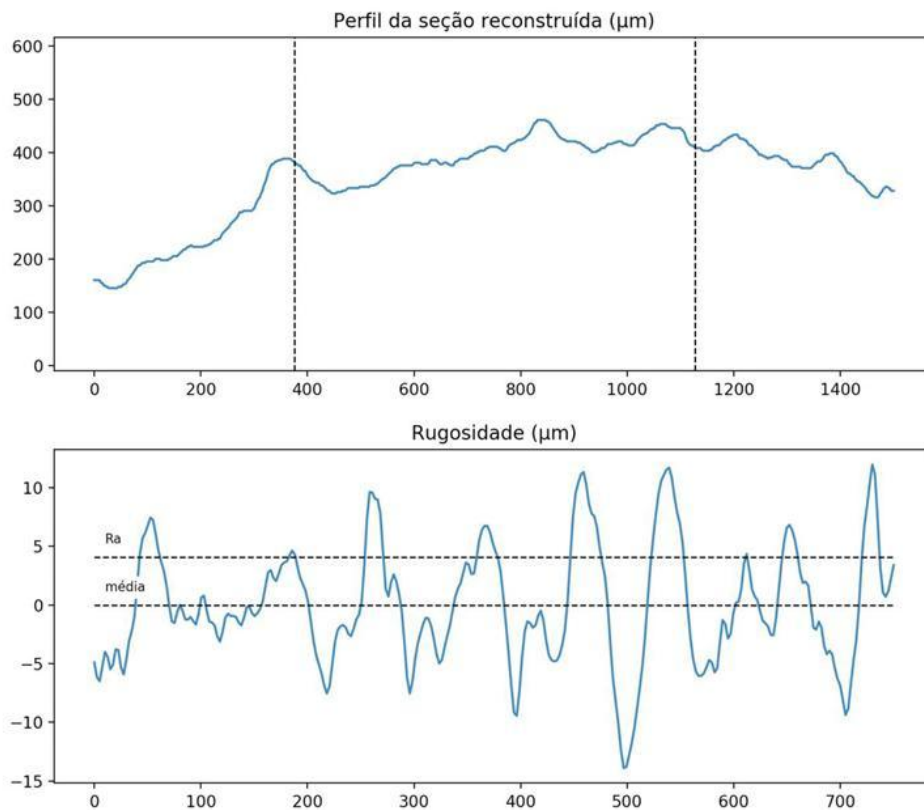


Figura 96: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 05 com ampliação de 100 X
Fonte: Própria, 2018.

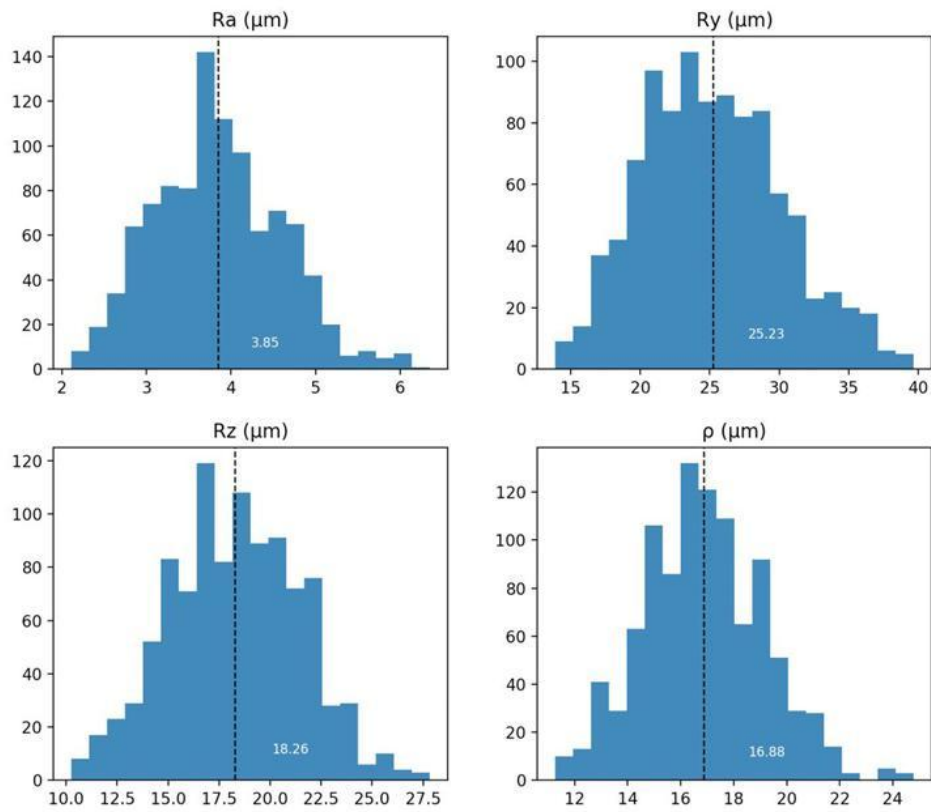


Figura 97: Parâmetros de rugosidade- Amostra 05 com ampliação de 100 X
Fonte: Própria, 2018.

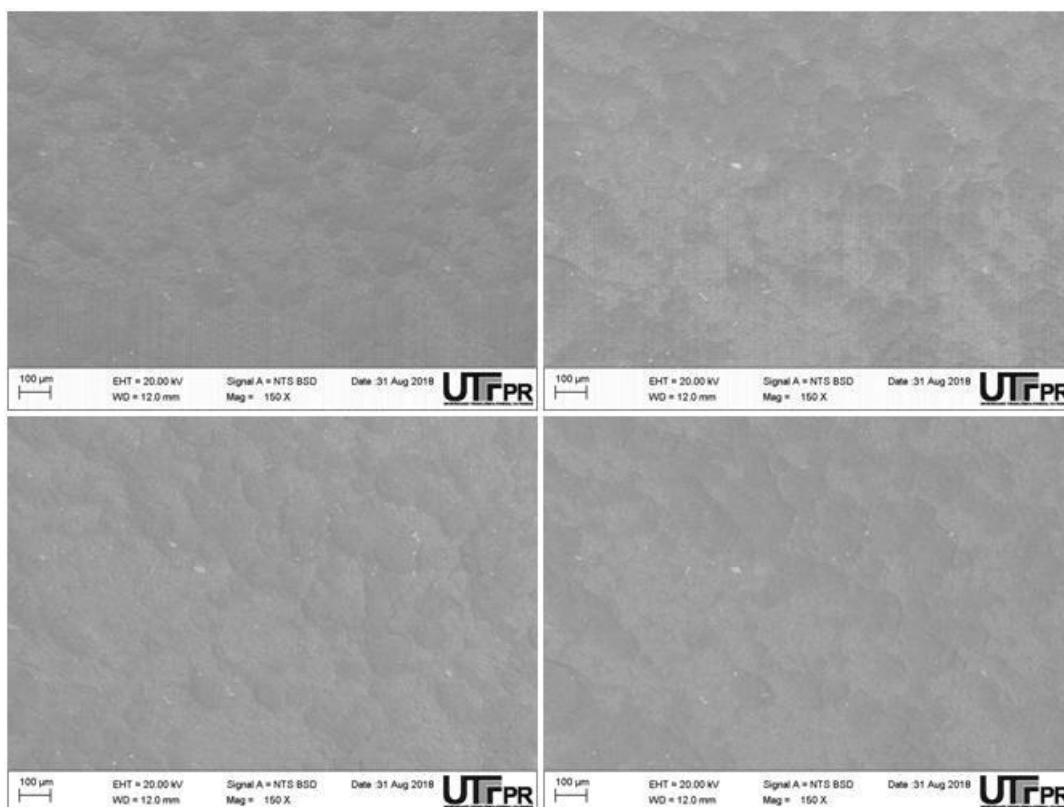


Figura 98: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 150 X- Amostra 05
Fonte: Própria, 2018.

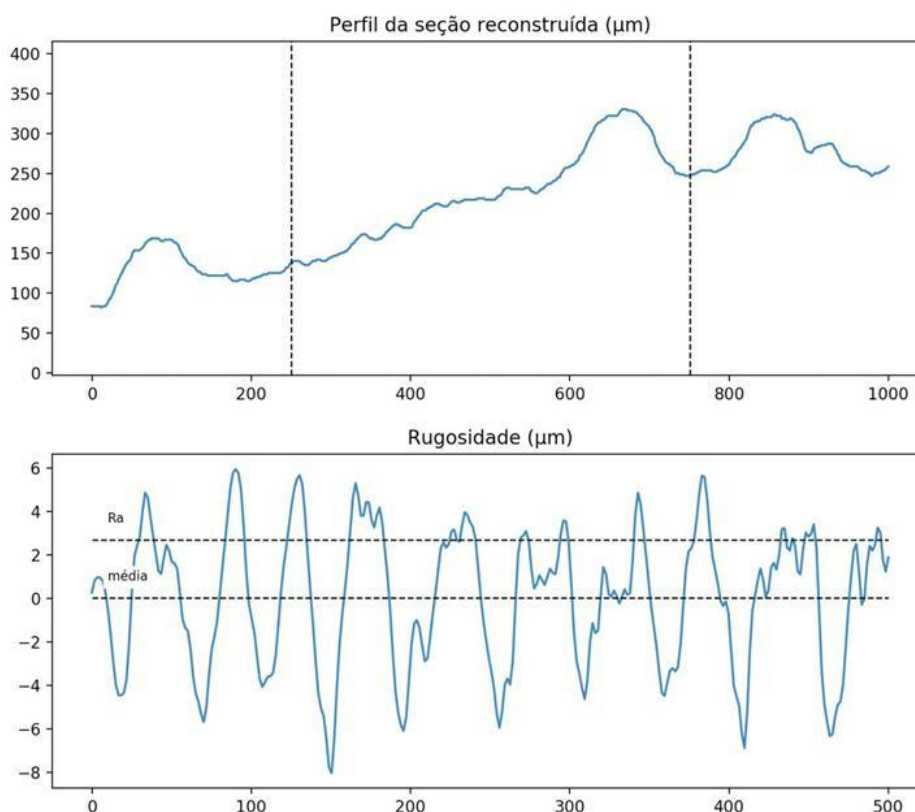


Figura 99: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 05 com ampliação de 150 X
Fonte: Própria, 2018.

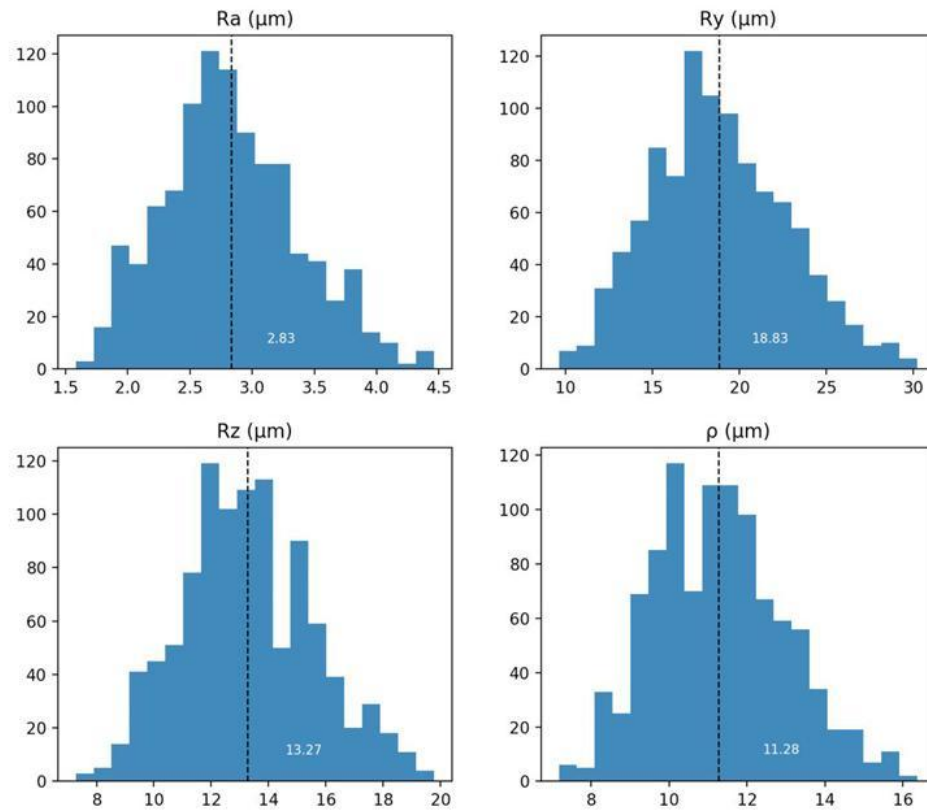


Figura 100: Parâmetros de rugosidade- Amostra 05 com ampliação de 150 X
Fonte: Própria, 2018.

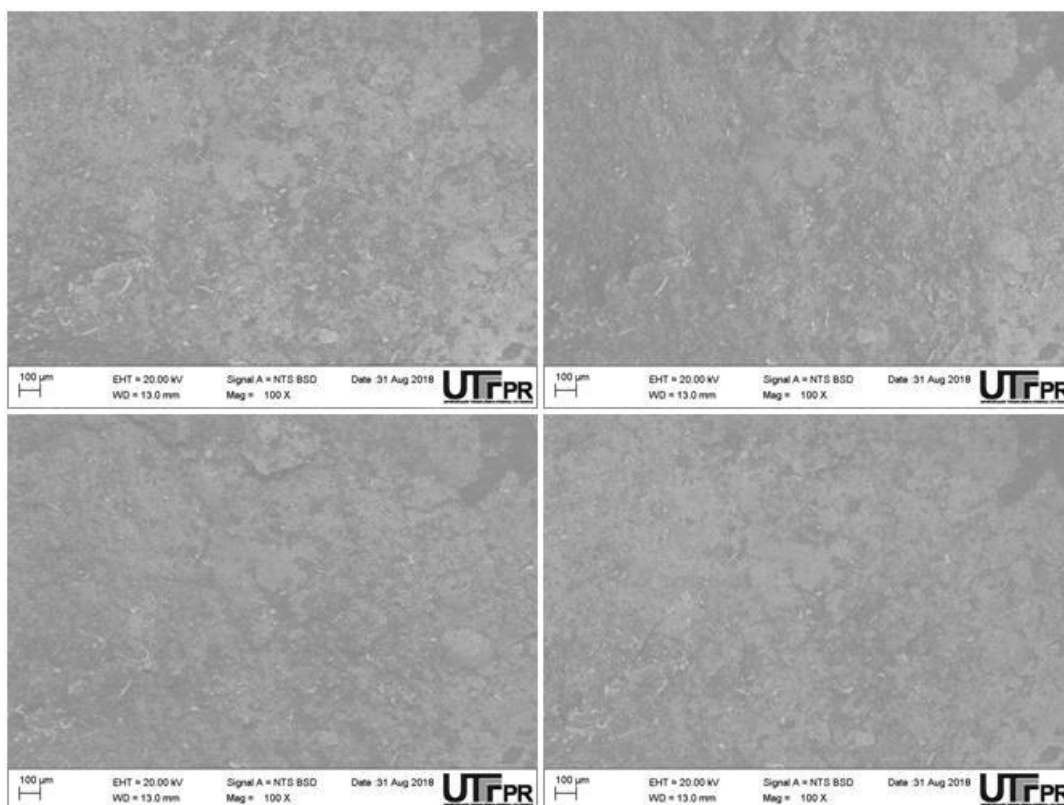


Figura 101: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 100 X- Amostra 06
Fonte: Própria, 2018

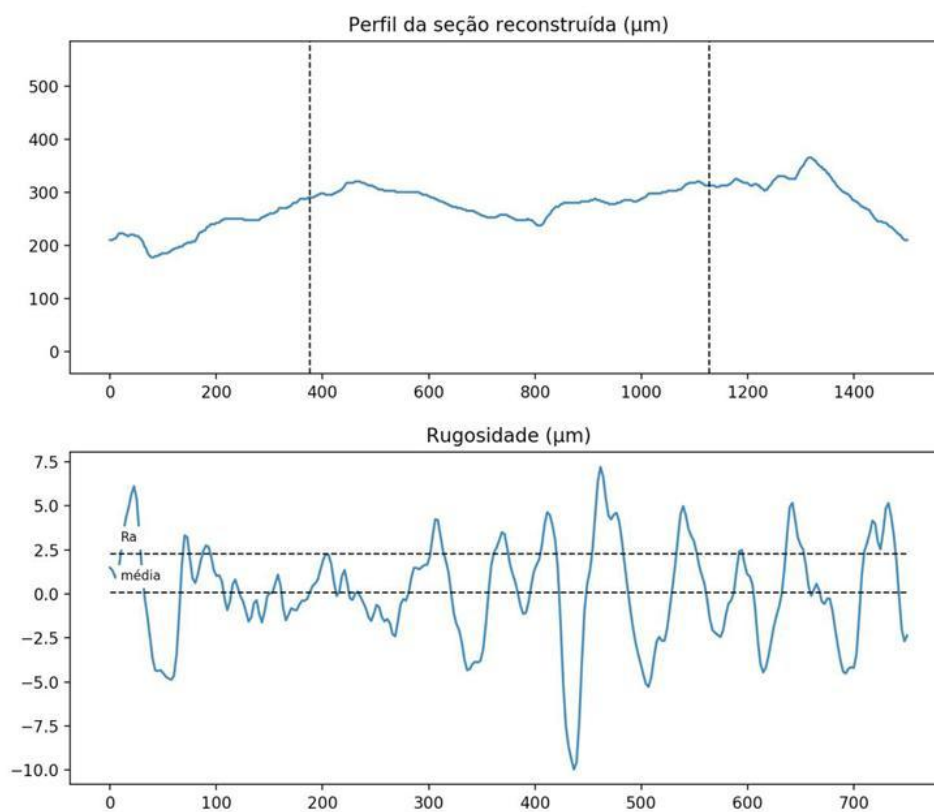


Figura 102: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 06 com ampliação de 100 X
Fonte: Própria, 2018.

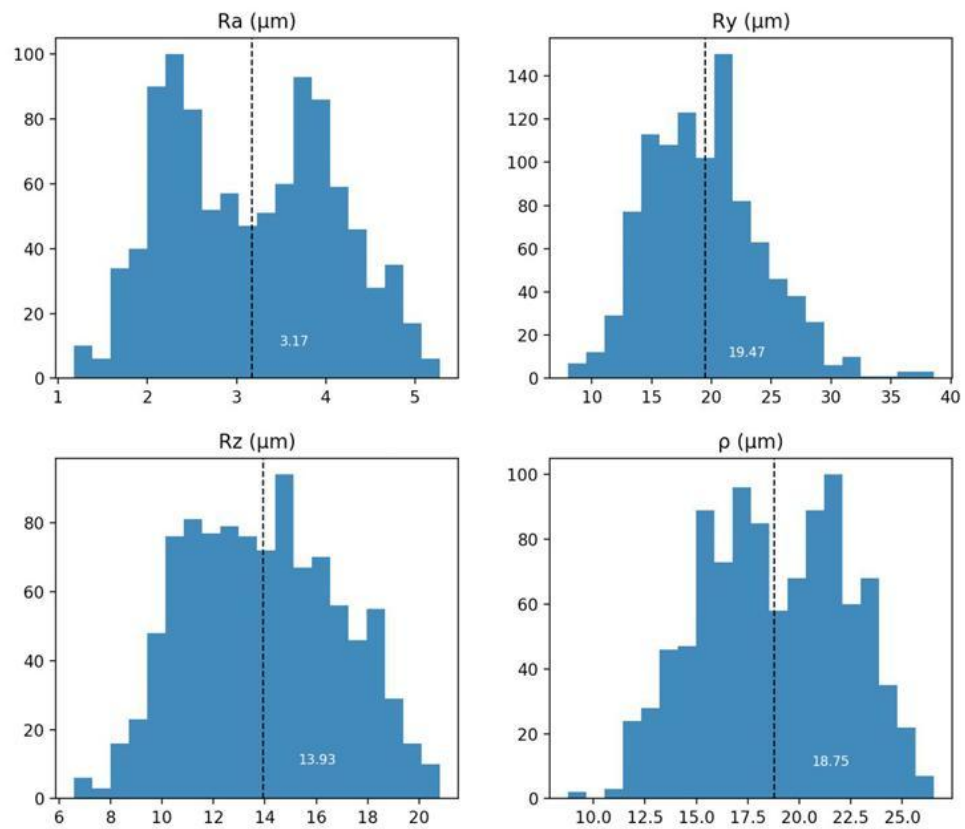


Figura 103: Parâmetros de rugosidade- Amostra 06 com ampliação de 100 X
Fonte: Própria, 2018.

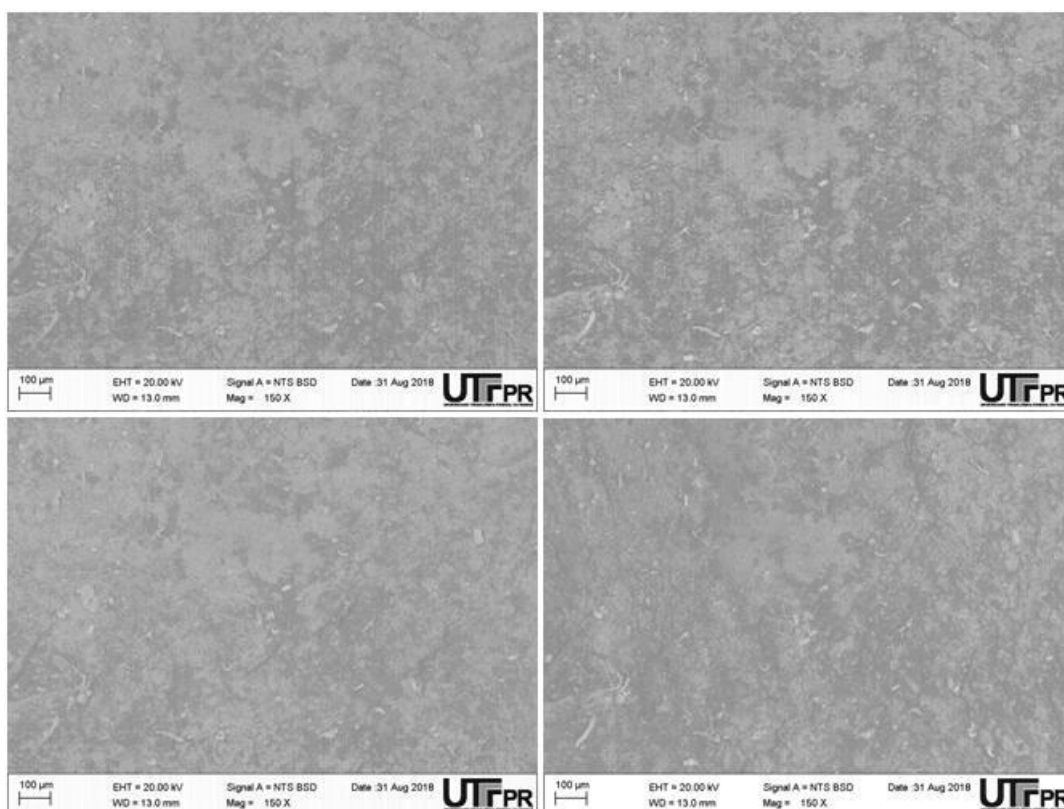


Figura 104: Imagens para estéreo fotometria com ampliação de 150 X- Amostra 06
Fonte: Própria, 2018.

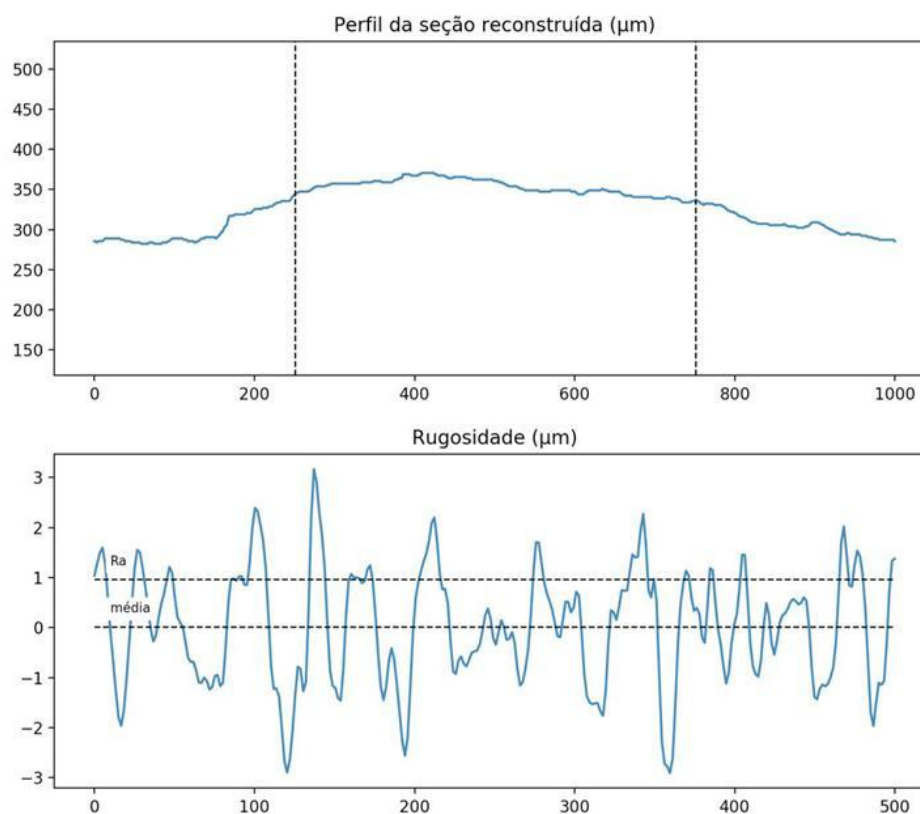


Figura 105: Perfil da seção reconstruída e rugosidade- Amostra 06 com ampliação de 150 X
Fonte: Própria, 2018.

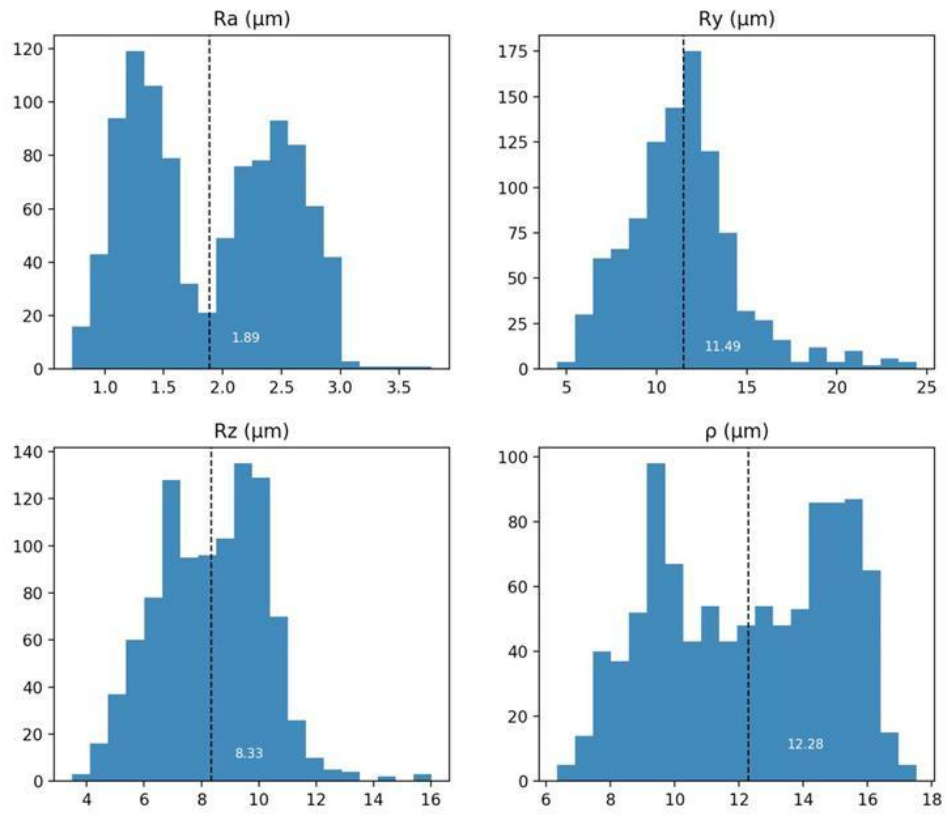


Figura 106: Parâmetros de rugosidade- Amostra 06 com ampliação de 150 X
Fonte: Própria, 2018.