

GILBERTO DOMINGUES JUNIOR

**POLIBILIDADE DE AÇOS PARA MOLDES DE
PLÁSTICOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2009

GILBERTO DOMINGUES JUNIOR

POLIBILIDADE DE AÇOS PARA MOLDES DE PLÁSTICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva.

UBERLÂNDIA – MG

2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

D671p Domingues Junior, Gilberto, 1981-
Polibibilidade de aços para moldes de plásticos / Gilberto Domin-
gues Júnior. - 2009.
126 f. : il.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Usinagem - Teses. 2. Metais - Usinabilidade - Teses. I. Silva,
Márcio Bacci da, 1964- . II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.9

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço muito aos meus pais que sempre me apoiaram e torceram por mim.

Ao professor Márcio Bacci da Silva pela orientação, paciência e confiança depositada neste trabalho.

À minha companheira Carolina por todo o apoio para a realização deste trabalho.

Aos professores que me ajudaram durante a realização das disciplinas.

À Universidade Federal de Uberlândia e ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica.

A todos os meus colegas do LEPU e de outros laboratórios, pela amizade e pelo auxílio na realização dos testes.

Aos técnicos de todos os laboratórios que colaboraram na realização dos testes.

Ao aluno de graduação de Engenharia Mecânica Gabriel Miranda.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

À empresa Villares Metals pelo apoio no fornecimento de materiais.

À empresa Taylor Hobson pelo apoio nas medições realizadas.

Enfim, a todos que ajudaram de forma direta e indiretamente a realização deste trabalho. Muito Obrigado!

DOMINGUES JUNIOR, G. **Polibilidade de Aços para Moldes de Plásticos**. 2009. 126 fls. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

Resumo

A polibilidade é uma característica fundamental para seleção do material para fabricação de moldes e matrizes para plásticos. Esta característica está associada, principalmente à necessidade do acabamento superficial final da peça fabricada, como por exemplo lente de óculos ou faróis de carros. Este trabalho tem o objetivo de caracterizar a polibilidade de materiais e comparar o resultado para três diferentes tipos de aços utilizados na fabricação de moldes de injeção de plásticos. A caracterização da polibilidade foi feita através da avaliação da rugosidade da superfície medida através de diferentes procedimentos. Os materiais avaliados foram os aços VP20 ISO, VP80 e 304 UF, produzidos pela Villares Metals. Foram preparadas 45 amostras para cada um dos três aços. As amostras foram submetidas a diferentes níveis de acabamento utilizando lixamento e polimento. Medidas de rugosidade foram realizadas utilizando interferômetro a laser, rugosímetro com apalpador mecânico e medidas de refletividade pela técnica de fotoluminescência. Diante dos resultados fez-se uma comparação e avaliação dos três métodos de medição do acabamento superficial. Nesta comparação, tentou-se mostrar a relação entre a rugosidade e refletividade da técnica de fotoluminescência. Os resultados obtidos na comparação dos métodos demonstraram uma boa correlação para o aço VP80. Quanto maior a rugosidade medida pelo rugosímetro e interferômetro, menor foi o índice de refletividade alcançado. Os aços VP20 ISO e 304 UF não demonstraram uma boa relação. Foi realizado também testes para avaliação da rugosidade em função do tempo de polimento. Os resultados mostram que, novamente o aço VP80 demonstrou ter a rugosidade mais baixa em comparação aos demais aços analisados.

Palavras-chave: Aços para Moldes de Plástico, Polimento, Medição de Refletividade. Rugosidade.

DOMINGUES JUNIOR, G. **Polishing steel for Plastic Molds**. 2009. 126 fls. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

Abstract

The polishing is a key feature for selection of material for the manufacture of molds and dies for plastics. This feature is associated mainly to the need of the roughness of the finish manufactured part, such as lens glasses or car headlights. This work aims to characterize the polishing materials and compare the result for three different types of steel used in the manufacture of injection molds for plastics. The characterization of polishing was made by evaluating the surface roughness measured by different procedures. The materials were evaluated steels VP20, VP80 and 304 UF, produced by Villares Metals. Were prepared 45 samples for each of the three steels. The samples were subjected to different levels of finishing using grinding and polishing. Measurements of roughness were performed using a laser interferometry, mechanical profilometer to probe reflectivity measurements and the technique of photoluminescence. Considering the results made a comparison and evaluation of three methods of measuring surface finish. In this comparison, we tried to show the relationship between the roughness and reflectivity of the technique of photoluminescence. The results obtained in the comparison of methods showed a good correlation for steel VP80. The higher the roughness measured by profilometer and interferometry, the lower the index of reflectivity achieved. Steels VP20 ISO 304 and UF did not show a good relationship. Was also carried out tests for evaluation of roughness according to the time of polishing. The results show that the steel VP80 again demonstrated its roughness lower than the other steels studied.

Keywords: *Steel for Plastic Molds. Polishing. Reflectivity Measurements. Roughness.*

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Fluxograma de informações e etapas de processo na fabricação de matrizes (Fallbohmer et al., 1996).....	07
Figura 2.2 – Representação da formação do cavaco durante o processo de polimento, onde V_c é a velocidade de corte (Klocke et al, 2005).....	11
Figura 2.3 – Percentual de utilização do processo de polimento manual, automático e combinação entre ambos (Fallbohmer et al., 2000).....	12
Figura 2.4 – Classificação dos processos de usinagem (adaptado de Machado et al, 2009).....	14
Figura 2.5 – Apresentação da rugosidade durante um processo de polimento com a ocorrência de <i>overpolishing</i> (Lucchinisidermeccanica).....	16
Figura 2.6 – Características de uma superfície com a ocorrência de pitting (Lucchini sidermeccanica e Zanola - catálogo).....	17
Figura 2.7 – Perfil da rugosidade (A), ondulação (B) e de forma (C). Adaptado de (Hutchings, 1992).....	18
Figura 2.8 – Esquema exemplificando a linha média ou linha de referência e a definição do R_a (Gadelmawla et al., 2002).....	19
Figura 2.9 – Definição dos dez pontos na medição do R_z (NBR ISO 4287: 2002).....	20
Figura 2.10 – Padrão para comparação visual e tátil para determinação da rugosidade (Euitiz, 2003).....	21
Figura 2.11 – Padrão para comparação visual e tátil para determinação da rugosidade (Taylor Robson, 2003).....	21

Figura 2.12 – Imagem do rugosímetro mecânico Talysurf 1 de 1941 (Xiang, 2009).....	22
Figura 2.13 – Rugosímetro digital da fabricante Taylor Hobson.....	22
Figura 2.14 – Rugosímetro digital da fabricante Mututoyo.....	23
Figura 2.15 – Esquema de um interferômetro de digitalização vertical.....	24
Figura 2.16 – Ilustração do esquema de medida de reflexão por raios de luz (Shimizu e Fujii, 2003).....	24
Figura 2.17 – Relação da dureza do aço com a polibilidade (Bengtsson, 1983).....	30
Figura 3.1 – Micrografia do aço VP 20 ISO atacada com vilella's.....	32
Figura 3.2 – Micrografia do aço VP 80 atacada com vilella's.....	32
Figura 3.3 – Micrografia do aço 304 UF atacada com uma solução composta por 10ml de ácido nítrico, 10ml de ácido acético, 15ml de ácido clorídrico, 5ml de glicerol.....	33
Figura 3.4: Cortadeira Discoton 6 da Struers utilizada no corte das amostras.....	34
Figura 3.5 – Equipamento utilizado para o embutimento das amostras.....	35
Figura 3.6: Equipamento utilizado no Lixamento de marca aropol S da empresa arotec.....	35
Figura 3.7: Equipamento utilizado no polimento de marca labopol-2 da empresa Struers...	36
Figura 3.8. Rugosímetro <i>Form Talysurf Intra</i> da marca <i>Taylor Hobson</i>	36
Figura 3.9 – Interferômetro utilizado nos testes de medição de acabamento superficial.....	37
Figura 3.10 – Laser Stability 2017-0,65 da marca Spectra-Physics utilizado nos ensaios de refletividade.....	38

Figura 3.11 – Caminho óptico percorrido pelo laser nos ensaios.....	38
Figura 3.12 – Câmera CCD utilizada nos experimentos de refletividade.....	39
Figura 3.13 – Vista de todos os equipamentos utilizados nos ensaios de refletividade.....	39
Figura 3.14 – Esquematização do funcionamento do sistema para captar a luz refletida pelos materiais.....	40
Figura 3.15 – Durômetro da marca WOLPERT.....	41
Figura 3.16 – Microdurômetro da marca HVM e computador para tratamento de imagens.	42
Figura – 3.17. Sistema de aquisição de imagens (45X).....	43
Figura 4.1 – Rugosidade do aço VP80 para amostras com diferentes granulometrias obtidas no interferômetro a laser.....	46
Figura 4.2 – Rugosidade do aço VP80 para amostras com diferentes granulometrias obtidas no rugosímetro.....	47
Figura 4.3 – Rugosidade (R_z) do aço VP80 para amostras com diferentes granulometrias obtidas no rugosímetro.....	48
Figura 4.4 – Intensidade de refletividade (%) do aço VP80 para amostras com diferentes granulometrias obtidas pela técnica de fotoluminescência.....	48
Figura 4.5 – Reflexão de raios incidentes em uma superfície com rugosidade (Lucchini Sidermeccanica e Zanola – catálogo).....	49
Figura 4.6 – Gráfico de tendência da intensidade (%) de refletividade do material VP80 e a rugosidade (R_a) obtida pelo rugosímetro.....	50
Figura 4.7 – Gráfico de tendência da intensidade (%) de refletividade do material VP80 e a rugosidade obtida pelo interferômetro a laser.....	50

Figura 4.8 – Rugosidade (Ra) do aço VP20 ISO para amostras com diferentes granulometrias obtidas no interferômetro.....	51
Figura 4.9 – Rugosidade (Ra) do aço VP20 ISO para amostras com diferentes granulometrias obtidas no rugosímetro.....	52
Figura 4.10 – Rugosidade (Rz) do aço VP20 ISO para amostras com diferentes granulometrias obtidas no rugosímetro.....	52
Figura 4.11 – Intensidade (%) de refletividade do aço VP20 ISO para amostras com diferentes granulometrias obtidas pela técnica de fotoluminescência.....	53
Figura 4.12 – Gráfico de tendência da intensidade (%) de refletividade do material VP20 ISO e a rugosidade obtida pelo rugosímetro.....	54
Figura 4.13 – Gráfico de tendência da intensidade (%) de refletividade do material VP20 ISO e a rugosidade obtida pelo interferômetro a laser.....	54
Figura 4.14 – Rugosidade (Ra) do aço 304 UF para amostras com diferentes granulometrias obtidas no interferômetro.....	55
Figura 4.15 – Rugosidade (Ra) do aço 304 UF para amostras com diferentes granulometrias obtidas no rugosímetro.....	55
Figura 4.16 – Rugosidade (Rz) do aço 304 UF para amostras com diferentes granulometrias obtidas no rugosímetro.....	56
Figura 4.17 – Intensidade (%) de refletividade do aço 304 UF para amostras com diferentes granulometrias obtidas pela técnica de fotoluminescência.....	57
Figura 4.18 – Gráfico de tendência da intensidade (%) de refletividade do material 304 UF pela rugosidade (Ra) obtida através rugosímetro.....	57
Figura 4.19 – Gráfico de tendência da intensidade (%) de refletividade do material 304 UF pela rugosidade (Ra) obtida através do interferômetro a laser.....	58

Figura 4.20 – Rugosidade (Ra) dos materiais lixados com granulometrias #400.....	59
Figura 4.21 – Rugosidade (Rz) dos materiais lixados com granulometrias #400.....	59
Figura 4.22 – Rugosidade (Ra) dos materiais lixados com granulometrias #600.....	60
Figura 4.23 – Rugosidade (Rz) dos materiais lixados com granulometrias #600.....	60
Figura 4.24 – Rugosidade (Ra) dos materiais lixados com granulometrias #1000.....	61
Figura 4.25 – Rugosidade (Rz) dos materiais lixados com granulometrias #1000.....	61
Figura 4.26 – Rugosidade (Ra) dos materiais polidos com granulometria de 3 μ m.....	62
Figura 4.27 – Rugosidade (Rz) dos materiais polidos com granulometria de 3 μ m.....	63
Figura 4.28 – Rugosidade (Ra) dos materiais polidos com granulometria de 1 μ m.....	64
Figura 4.29 – Rugosidade (Rz) dos materiais polidos com granulometria de 1 μ m.....	64
Figura 4.30 – Rugosidade (Ra) dos materiais para amostras de 3 μ m em relação à dureza do material.....	65
Figura 4.31 – Rugosidade (Ra) dos materiais para amostras de 1 μ m pela dureza.....	65
Figura 4.32 – Rugosidade (Rz) dos materiais para amostras de 3 μ m pela dureza.....	66
Figura 4.33 – Rugosidade (Rz) dos materiais para amostras de 1 μ m pela dureza.....	66
Figura 4.34 – Menor rugosidade (Ra) obtida dos materiais para amostras de 3 μ m e 1 μ m pela dureza.....	67
Figura 4.35 – Menor rugosidade (Rz) obtida dos materiais para amostras de 3 μ m e 1 μ m pela dureza.....	68

Figura 4.36 – Medida de rugosidade para cada material com acabamento de 1 μ m com variação de tempo.....	69
Figura 4.37 – Medida de rugosidade para cada material com acabamento de 1 μ m com variação de tempo.....	70
Figura 4.38 – Microestrutura do aço 304 UF atacada com nital (3%).....	71
Figura 4.39 – Imagens de amostras obtidas para o aço VP80.....	72
Figura 4.40 – Imagens de amostras obtidas para o aço VP20 ISO.....	72
Figura 4.41 – Imagens de amostras obtidas para o aço 304 UF.....	73

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Tolerâncias requeridas para moldes e matrizes (Fallbohmer et al., 2000).....	11
Tabela 2.2 - Valores típicos de rugosidade média para superfícies de engenharia fabricadas por diferentes processos (Hutchings, 1992).....	13
Tabela 2.3 – Composição química dos aços VP20 ISO, VP 80 e V304 UF (Mesquita et al. (2005) e Gennari et al. (2001) e Ramos, 2004 (modificado pelo autor).....	27
Tabela 2.4 – Descrição das características desejáveis aos moldes quanto ao uso e a fabricação (Barbosa, 2001).....	27
Tabela 2.5 – Habilidade dos elementos de liga em conferir certas características aos aços para ferramentas e matrizes (Chiaverini, 2002).....	28
Tabela 3.1 – Resultados da medição de dureza das amostras.....	41
Tabela 3.2 – Valores da microdureza dos materiais analisados.....	42
Tabela 3.3 – Distribuição das amostras por material e acabamento.....	43

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – Introdução.....	1
1.1. Objetivo e Justificativa.....	3
1.1.1 Objetivo.....	3
1.1.2. Justificativa.....	3
CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica.....	4
2.1. Usinagem de Moldes e Matrizes.....	6
2.1.1. <i>Etapas do processo de fabricação de moldes e matrizes.....</i>	<i>6</i>
2.1.2. <i>Operação de Fresamento.....</i>	<i>8</i>
2.1.4. <i>Usinagem por Descargas Elétricas.....</i>	<i>9</i>
2.1.5. <i>Usinagem sem Geometria Definida.....</i>	<i>10</i>
2.1.6. <i>Qualidade Superficial de Moldes e Matrizes.....</i>	<i>11</i>
2.2 Polimento.....	13
2.3. Métodos de Caracterização de Superfícies polidas.....	17
2.3.1. <i>Rugosidade.....</i>	<i>17</i>
2.3.2 <i>Medidas Ópticas de Superfícies Polidas.....</i>	<i>23</i>
2.4. Características dos Aços para Moldes e Matrizes.....	25
2.5. Características de Usinabilidade e Polibilidade.....	28
CAPÍTULO III – Procedimentos Experimentais.....	31
3.1. Materiais Investigados.....	32
3.1.1. <i>Preparação dos corpos de prova.....</i>	<i>33</i>
3.1.2. <i>Materiais consumíveis utilizados.....</i>	<i>34</i>
3.2. Equipamentos Utilizados.....	34
3.2.1. <i>Equipamentos de metalografia.....</i>	<i>34</i>
3.2.2. <i>Equipamentos de caracterização de superfícies.....</i>	<i>36</i>
3.2.2.1. <i>Rugosímetro.....</i>	<i>36</i>

3.2.2.2. Interferômetro.....	37
3.2.2.3 Fotoluminescência.....	37
3.2.3. <i>Caracterização dos materiais</i>	40
3.2.3.1 Medição de dureza.....	40
3.2.3.2 Medidas de microdureza.....	41
3.2.3.3 Microscópio para a análise de superfície.....	42
3.3. Metodologia.....	43
CAPÍTULO IV – Revisão Bibliográfica.....	45
4.1 Comparação entre os métodos utilizados.....	45
4.1.1. <i>Resultados para o aço VP80</i>	45
4.1.2. <i>Análise utilizando o aço VP20 ISO</i>	50
4.1.3. <i>Análise utilizando o aço 304 UF</i>	54
4.2. Comparação das rugosidades obtidas para os materiais utilizados.....	58
4.2.1. <i>Comparação da rugosidade dos materiais lixados com granulometrias de 400, 600 e 1000</i>	58
4.2.2. <i>Comparação da rugosidade dos materiais após o polimento com pasta de diamante</i>	62
4.3. Relação entre rugosidade e dureza dos materiais.....	64
4.4. Evolução do acabamento com o tempo de polimento para os materiais.....	68
4.4.1. <i>Polimento com pasta de diamante de 3μm</i>	68
4.4.2. <i>Materiais com polimento de 1μm</i>	69
4.5. Análise das imagens dos materiais com a variação da granulometria do abrasivo utilizado.....	71
CAPÍTULO V – Conclusões.....	74
CAPÍTULO VI – Proposta para Trabalhos Futuros.....	75
CAPÍTULO VII – Referências Bibliográficas.....	76
CAPÍTULO VIII – Anexos.....	81

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Os plásticos estão sendo cada vez mais empregados no setor industrial. Neste caso, os diversificados produtos de plásticos demandam uma grande variedade de tipos específicos de moldes e matrizes. Desta forma, a variedade dos moldes, suas geometrias complexas, a alta dureza do material utilizado na sua fabricação, bem como o seu desenho, demanda grande dificuldade na engenharia de fabricação. Mas este setor vem sendo impulsionados por um forte desenvolvimento nos últimos anos. Sofisticadas máquinas-operatrizes e ferramentas de corte alcançam, a cada dia, melhores desempenhos.

Os moldes e matrizes utilizados precisam ter um acabamento superficial que não prejudique a qualidade final dos produtos e neste ponto, a importância do polimento é um fator cada vez mais importante no processo de fabricação de moldes. Além do aspecto final da peça ele ainda pode colaborar na diminuição da corrosão (em peças de PVC, por exemplo), facilitar a extração de peças, reduzindo o risco de quebra das mesmas. Em geral, o polimento é avaliado a olho nu, sendo que as superfícies analisadas devem estar totalmente livres de riscos e porosidades.

Em polimentos espelhados, a avaliação final poderá ser realizada através da utilização de instrumentos ópticos, muitas vezes um polimento, visto através destes instrumentos, mostrará riscos que, entretanto poderão ser aceitáveis a olho nu. Na verdade uma análise final da quantidade do polimento dependerá muito da experiência do polidor.

O acabamento superficial é bastante rigoroso em moldes e matrizes (Ra normalmente menor que $0,1 \mu\text{m}$) e bastante crítico principalmente no molde para injeção. A qualidade do acabamento requerida nas superfícies de moldes para injeção é maior que aquelas requeridas nas matrizes de forjamento e estampagem, além disso, sua geometria complexa impede a aplicação do polimento automático. Somente a geração de superfícies

convexas e ligeiramente curvas, além de furos na matriz, permite o uso de equipamento automático de polimento (Ramos & Machado, 2002).

Existem poucos trabalhos relacionados com o processo de polimento para moldes e matrizes. Em um levantamento realizado pela empresa Sandvik (2002), mostrou-se que o principal processo de fabricação é a usinagem. Caracterizando-se pela remoção de material, este processo é responsável por aproximadamente 65% do custo de um molde.

Segundo Fallbohmer et al (1996) as combinações do polimento manual com o polimento automático têm sido muito utilizadas, chegando a 70% das oficinas de moldes e matrizes dos Estados Unidos e Japão. Com isso, verifica-se a importância econômica do polimento na fabricação de moldes e matrizes, ainda sem considerar o acabamento. Segundo Machado et al (2003), o acabamento pode influenciar no desempenho de um componente, como por exemplo, alterar a resistência à fadiga. A rugosidade pode ocasionar mudanças micro estruturais e por consequência, a existência de tensões residuais vão se relacionar à fadiga.

Este trabalho tem o objetivo de testar o método de fotoluminescência e relacionar o resultado de refletividade (%) disponibilizado por este equipamento com a medição de rugosidade. Para isso, foi escolhido três materiais utilizados em moldes e matrizes de plástico: o aço 304 UF, aço VP80 e aço VP20 ISO. Além disso, será realizado um estudo de caracterização dos materiais, como: dureza, microdureza e micrografias.

Este trabalho será subdividido da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** Introdução.
- **Capítulo 2:** Revisão Bibliográfica – Neste capítulo são estudados os fundamentos polimento e aços para moldes de injeção para plásticos. Além de métodos de medição de rugosidade e refletividade.
- **Capítulo 3:** Procedimentos Experimentais – Neste capítulo são descritos os equipamentos, as ferramentas e a metodologia empregados na parte experimental deste trabalho.
- **Capítulo 4:** Resultados e Discussões – Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos através dos procedimentos experimentais realizados.
- **Capítulo 5:** Conclusões – Neste capítulo são apresentadas as conclusões oriundas do presente trabalho.
- **Capítulo 6:** Sugestões para Trabalhos Futuros – Neste capítulo são apresentadas sugestões para trabalhos futuros a serem realizados nesta área de estudo.
- **Capítulo 7:** Anexos – Neste capítulo são dispostos os resultados de medição realizados no rugosímetro.

1.1 Objetivos e Justificativa

1.1.1 Objetivos

Avaliar a rugosidade obtida em diferentes materiais e relacionar medidas de refletividade dos materiais polidos pelo método de fotoluminescência com medidas de rugosidade a fim de obter uma relação entre os métodos utilizados.

1.1.2 Justificativa

A tendência mundial é produzir peças cada vez mais sofisticadas, com elevado grau de tolerância geométrica, dimensional e acabamento superficial, com baixo custo e sem poluir o meio ambiente (Naves, 2009). Diante disso, estudos do processo de acabamento superficial de moldes e matrizes para injeção a plásticos têm grande importância, pois existe um grande volume de empresas que utilizam o polimento para o acabamento destes moldes e matrizes, seja ele manual, automático ou ambos. Por isso, pesquisas relacionadas a este tema são de grande importância, principalmente para moldes de injeção de plásticos, onde a qualidade da superfície do molde pode impactar na vida do produto fabricado, tais como: aspecto final da peça, diminuição da corrosão (em peças de PVC, por exemplo), facilitar a extração de peças, reduzindo o risco de quebra das mesmas.

Atualmente, no setor industrial, os plásticos estão sendo amplamente empregados, sendo assim, a substituição dos moldes não se dá pela vida útil do mesmo e sim pela demanda.

Os principais constituintes do custo de fabricação de um molde são a usinagem e o acabamento (Mesquita e Barbosa, 2005) e qualquer diminuição de custo nestes processos são de grande importância para que as empresas se tornem competitivas e que possam assim, diminuir o tempo de retorno sobre os investimentos e como consequência, investir mais em pesquisa e desenvolvimento e atender a demanda cada vez maior por produtos inovadores.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O fornecimento de ferramental para fundição, forjamento, modelagem por injeção e para aplicações na conformação de chapas de metais se dá através da fabricação de moldes e matrizes. Estas ferramentas são utilizadas na fabricação de peças acabadas e/ou próximas à forma final, antes da usinagem de acabamento para adquirir as tolerâncias finais. Atualmente, no setor industrial, os plásticos estão sendo amplamente empregados. Neste caso, os diversificados produtos de plásticos demandam uma grande variedade de tipos específicos de moldes e matrizes. Desta forma, a variedade dos moldes, suas geometrias complexas, a alta dureza do material utilizado na sua fabricação, bem como o seu desenho, demanda grande dificuldade na engenharia de fabricação (Machado e Ramos, 2002).

A maior parte do custo de um molde tange os aspectos de sua manufatura. Por exemplo, são extremamente importantes os valores agregados durante o processo da construção do molde, especialmente nas etapas de usinagem e polimento. A vida útil dos moldes, em geral, é elevada, e sua substituição ocorre devido principalmente à mudança do projeto e, mais raramente, ao desgaste do molde. Portanto, as propriedades de desempenho do aço empregado devem ser consideradas como apenas suficientes para aplicação. As propriedades de manufatura, ao contrário, devem possuir papel de destaque, de modo a reduzir o custo total do molde produzido. E, principalmente, devem ser consideradas as interações entre o aço e o processo empregado para manufatura. Em muitos casos, o investimento maior no aço empregado pode ser convertido em ganhos futuros, em termos de redução dos custos totais da manufatura ou reparo do molde (Mesquita e Barbosa, 2007).

A superfície do molde é fundamental para o acabamento da peça produzida, sendo o grau de polimento dependente da aplicação. Superfícies perfeitamente polidas podem ser necessárias para muitas aplicações, como injeção de óculos, faróis de carros, ou mesmo em CDs. No caso de conformação de plásticos com textura, a superfície do molde necessita igualmente de adequado polimento antes da aplicação da textura de projeto (Mesquita e Barbosa, 2005).

O setor de fabricação de moldes e matrizes vem sendo impulsionado por um forte desenvolvimento nos últimos anos. Sofisticadas máquinas-operatrizes e ferramentas de corte alcançam, a cada dia, melhores desempenhos de acabamento. Tais avanços prometem também aumentar a taxa de remoção de material. Estas técnicas possibilitam a redução do tempo de espera na fabricação de moldes, bem como o aumento da qualidade dimensional, superficial e de forma.

Uma técnica muito interessante para o setor de fabricação de moldes e matrizes é a usinagem a altíssimas velocidades de corte (*HSM – high speed cutting*). No entanto, Dewes et al (1997) citam que vários obstáculos tem sido identificados na aplicação da técnica HSM e na usinagem de materiais endurecidos, tais como, o alto desgaste da ferramenta, a necessidade de usar ferramentas caras, rígido balanceamento da ferramenta, suporte da ferramenta preciso, bem como máquinas-ferramentas e sistemas de controle dispendiosos. Além disso, conforme pesquisa realizada por Fallbohmer et al (2000), na fabricação de moldes e matrizes uma significativa porção do *lead-time* é despendida nas operações de polimento (até 32 % do tempo total de fabricação). Em termos de custo total de produção, a maior parcela é representada pela usinagem, cerca de 65% do custo total (Sandvik, 2000).

Dentro da cadeia produtiva, desde o desenho até a inspeção final, o polimento tem grande importância na fabricação de moldes e matrizes, com isso a necessidade de quantificar o polimento se tornar de grande valia, pois assim, será possível uma padronização dos resultados gerando subsídios para uma melhoria futura e diminuição dos custos de fabricação.

2.1. Usinagem de Moldes e Matrizes

Na fabricação de moldes e matrizes os processos de usinagem por fresamento, retificação, e usinagem por descargas elétricas ou eletroerosão (ou EDM de *Electrical Discharge Machining*) são os mais utilizados. As ferramentas utilizadas para conformação de chapas metálicas planas tem a usinagem de acabamento executada principalmente por retificação ou a combinação de fresamento e retificação. Já as matrizes para forjamento são usinadas na fase de acabamento, por fresamento ou combinação de fresamento e EDM. Sendo que este último processo é usado quase que somente no polimento. Matrizes de fundição são também usinadas, no acabamento, por fresamento e fresamento-EDM (Ramos, 2004).

As matrizes de aços endurecidos estão sendo amplamente usadas para forjamento, fundição e modelagem por injeção. O material destas matrizes tem sido tradicionalmente usinado na sua condição mole, ou seja, recozido, seguida de tratamento térmico, para alcançar a dureza necessária, e usinagem de acabamento. Este acabamento pode ser realizado pela usinagem por eletroerosão e/ou retificação. Um polimento final manual é utilizado na maioria das superfícies de perfis complexos, aumentando ainda mais o tempo de entrega e onerando os custos de produção (Ramos, 2004).

2.1.1. Etapas do processo de fabricação de moldes e matrizes

A fabricação de moldes e matrizes deve ser considerada como um sistema completo. As etapas do processo podem ser assim descritas de forma resumida: projeto e desenho da peça, planejamento do processo de fabricação, geração do programa da máquina de usinagem, usinagem, acabamento e polimento manual, conforme fig. 2.1.

Neste caso, como pode ser visto, as etapas são:

- i) desenho da peça para fabricação;
- ii) produção de protótipos para visualização, teste e avaliação;
- iii) processo de modelagem para otimizar o projeto do molde;
- iv) usinagem CNC (se requerida);
- v) fabricação de eletrodos de EDM (se requerida);
- vi) EDM (se requerido);
- vii) polimento e acabamento manual;
- viii) controle dimensional dos eletrodos, matriz e o produto formado.

Para assegurar a produção de peças de alta qualidade e baixo custo em um pequeno período de tempo, a peça, o processo e o desenho da matriz têm de ser compatíveis em cada etapa, e estas etapas devem ser consideradas simultaneamente.

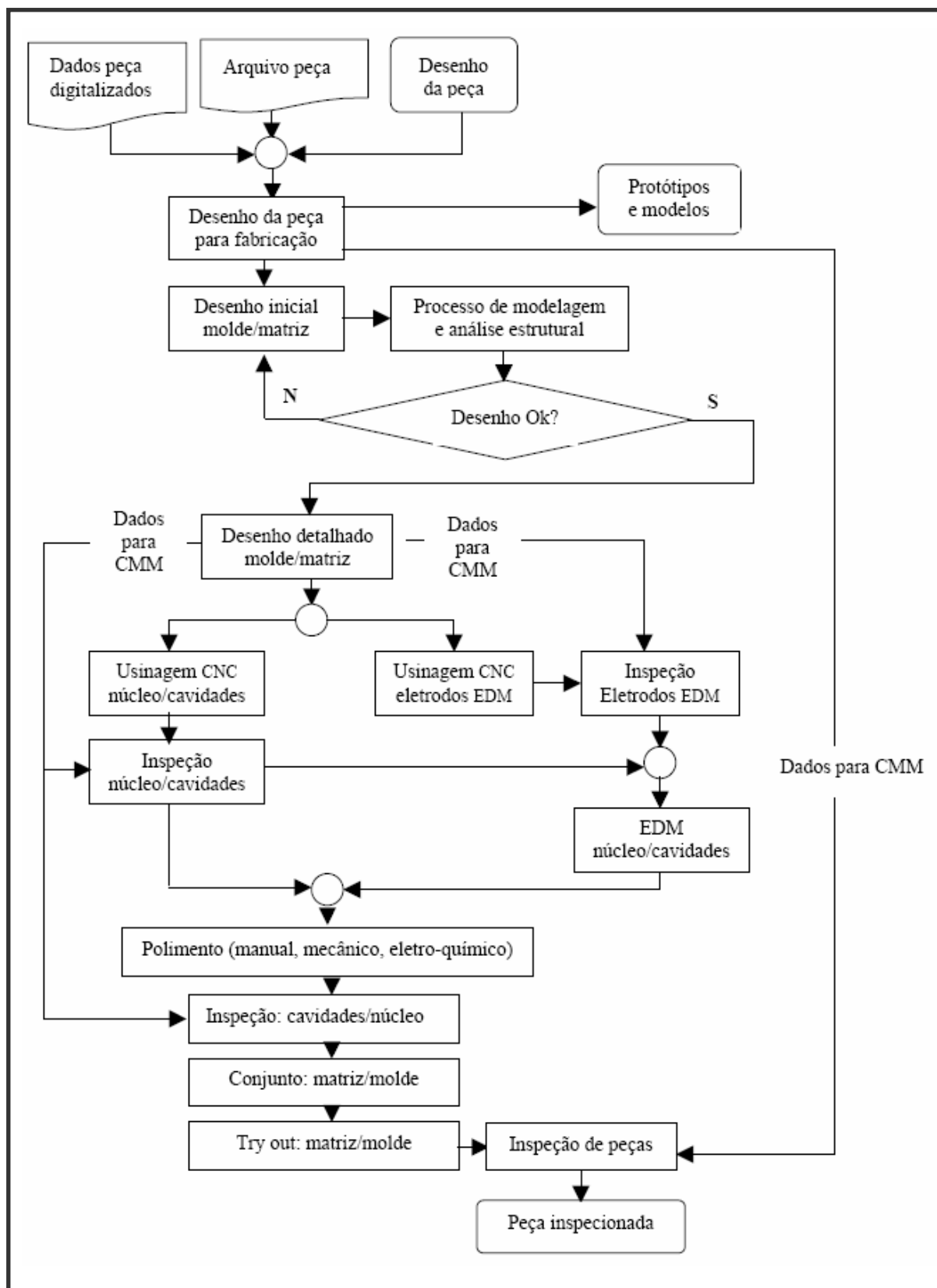


Figura 2.1 – Fluxograma de informações e etapas de processo na fabricação de matrizes (Fallbohmer et al., 1996).

2.1.2. Operação de Fresamento

O fresamento se caracteriza por ser uma operação, onde a ferramenta cortante é denominada de fresa e é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo, onde um movimento de corte é proporcionado pela rotação em torno deste eixo. Já o movimento de avanço geralmente é feito pela peça em usinagem, que está fixada na mesa da máquina e obriga a peça a passar sobre a ferramenta em rotação, que lhe confere as formas e dimensões desejadas (Metals Handbook, 1989). Além disso, o fresamento se caracteriza por ser um processo de usinagem no qual a remoção de material da peça se realiza de forma intermitente, pelo movimento rotativo da ferramenta geralmente multicortante, gerando superfícies das mais variadas formas (Stemmer, 2005). Este tipo de usinagem é predominante na maioria dos moldes em função de sua abrangência e características de forma dos produtos a ser injetados.

A usinagem de alta velocidade (HSM) no processo de fresamento na produção de moldes e matrizes está expandindo e o HSM oferece a possibilidade reduzir o tempo de do esforço nas operações de acabamento e polimento. Segundo Fallbohmer (2000), as vantagens da usinagem à alta velocidade (HSM) são: alta taxa de remoção de material, a redução do tempo espera baixa força de corte, dissipação de calor com a remoção do cavaco resultando em uma redução nas distorções e aumento na precisão da peça e no acabamento superficial. Os problemas relacionados com sua aplicação depende do material de trabalho e a geometria desejada do produto e a maior desvantagem é o desgaste excessivo da ferramenta.

Segundo Ramos (2004) entre as máquinas utilizadas na operação de corte os centros de usinagem verticais são mais utilizadas, pois são mais baratos que os centros usinagem horizontais. O fresamento através da fresadora copiadora, apesar de bastante popular no mercado, esta sendo substituída pela CNC 3-eixos. O mercado de máquinas já dispõe de fresadoras CNC-4-eixos que oferece a possibilidade de melhor posicionar-se no corte, e de máquinas CNC 5-eixos que oferece vantagens na usinagem de superfícies convexas e em perfurações.

As técnicas de usinagem com 5 eixos têm sido muito utilizadas em áreas como geração de energia e aeroespacial. Isto talvez pela complexidade das geometrias encontradas em turbinas automotivas e peças critica para aviões (Watanabe, 2008).

As peças produzidas com uma usinagem cinco eixos reduzem o número de etapas na fabricação, além de evitar possíveis “montagens” para obter o produto final. Em relação ao custo de usinagem atual, a usinagem cinco eixos reduz o tempo de fabricação e, conseqüentemente, o custo final do produto. Tradicionalmente, usinagem cinco eixos oferece alguns dos benefícios a seguir (Watanabe, 2008):

- Reduz etapas na usinagem e aumenta a qualidade da superfície;
- Consegue usinar geometrias complexas;
- Permite o uso de ferramentas curtas ou cônicas que podem ser inclinadas longe das superfícies íngremes.

2.1.4. Usinagem por Descargas Elétricas

A usinagem por eletroerosão, *electro discharge machining* (EDM), se caracteriza por ser um processo não convencional de usinagem, onde milhares de descargas elétricas são produzidas em uma fração de segundos para retirar certo volume de metal. Este processo é utilizado em situações onde geometrias complexas têm que ser usinadas em materiais de elevada dureza. No entanto, ele gera uma superfície pobre em propriedades mecânicas com altas tensões residuais, alta rugosidade, presença de micro-trincas e trincas. Estas propriedades podem variar de acordo com os parâmetros de processo (Oliveira, 2006).

Mesmo sendo um processo não convencional de usinagem, a eletroerosão é amplamente usada por indústrias de moldes e matrizes. Desde que o material da peça conduza eletricidade ele pode ser usinado através do processo de EDM, não importando a sua dureza. EDM é um processo onde o metal é removido pela ação de descargas elétricas entre o eletrodo (cátodo) e a peça (ânodo). Cada descarga elétrica produz uma pequena cratera pela fusão e vaporização do material, reproduzindo desta forma, a geometria do eletrodo na peça. Um fluido dielétrico retira o cavaco e limita a descarga elétrica. Quando o espaço entre a peça e a ferramenta é diminuído até uma distância determinada, o dielétrico passa a atuar como condutor, formando uma “ponte” de íons entre o eletrodo e a peça. Produz-se, então, uma centelha que superaquece a superfície do material dentro do campo de descarga, fundindo-a. Estima-se que, dependendo da intensidade da corrente aplicada, a temperatura na região da centelha possa variar entre 2.500°C e 50.000°C. Uma pequena quantidade de material, mais de 15% é expelida violentamente da superfície fundida e o restante resolidifica. A estrutura refundida é tipicamente de grãos muito finos e duros e podem estar ligadas com carbono (Ramasawmy e Blunt, 2004).

O processo de erosão ocorre simultaneamente na peça e no eletrodo. Com ajustes convenientes da máquina, é possível controlar a erosão, de modo que se obtenha até 99,5% de erosão na peça e 0,5% no eletrodo. A distância mínima entre a peça e a ferramenta, na qual é produzida a centelha, é chamada GAP (gap = folga) e depende da intensidade da corrente aplicada. O GAP é o comprimento da centelha. O tamanho do GAP pode determinar a rugosidade da superfície da peça. Com um GAP alto, o tempo de usinagem é

menor, mas a rugosidade é maior. Já um GAP mais baixo implica maior tempo de usinagem e menor rugosidade de superfície (Oliveira, 2006).

2.1.5. Usinagem sem Geometria Definida

Os processos de lixamento e polimento na indústria de moldes e matrizes são tratados da mesma forma, sendo chamados apenas de polimento. No entanto, o processo de lixamento trata de uma usinagem com grãos abrasivos sem geometria definida, porém fixos com algum adesivo a um substrato. Já o polimento se caracteriza por uma usinagem onde os grãos abrasivos estão envoltos a uma pasta (Oliveira, 2006).

O lixamento tem o objetivo de baixar a rugosidade das superfícies, no caso de moldes, através de desbastes em etapas definidas, com a utilização de abrasivos e acessórios de movimentação de diferentes durezas aplicadas em condições controladas de pressão e tempo. A diferença entre uma superfície de baixa rugosidade espelhada e uma opaca é o arredondamento dos picos que refletem a luz em linhas paralelas na espelhada, enquanto que na opaca as linhas são dispersas devido aos picos serem pontiagudos (Steiner et al, 2005).

Pode-se afirmar que no mecanismo de lixamento, em materiais metálicos, ocorre a remoção de material por meio de abrasão, com isso, pode-se dividi-lo em três etapas:

a) o grão abrasivo entra em contato com a superfície do material, o qual sofrerá deformação elástica. Devido ao movimento relativo de fricção entre o abrasivo e a peça surge, por um lado, o estresse de cisalhamento na superfície da peça, por outro lado, é gerado um estresse de compressão devido a pressão aplicada pelo abrasivo sobre a superfície.

b) tão logo quando o limite de escoamento plástico é excedido, este é plasticamente deformado. Isto induz o material a acumular-se nas laterais dos riscos da superfície

c) durante a penetração do abrasivo na superfície, a força elástica é excedida, no local, formando o cavaco. Após isto, uma sub-superfície deformada plasticamente continua existindo, logo abaixo da linha da superfície (Klocke et al, 2005).

As três etapas citadas podem ser observadas na fig. 2.2, onde está representada a superfície externa (1), sub-superfície deformada (2) e o material base (3). Ainda pode-se observar a ferramenta que provoca tal situação indicada na figura que seria a representação de um grão abrasivo da pedra ou lixa de lixamento. No processo de lixamento também ocorrem deformações na sub-superfície, como se pode observar. Estas deformações são causadoras de modificações na integridade superficial, com geração de tensões residuais, deformação dos grãos entre outros fatores.

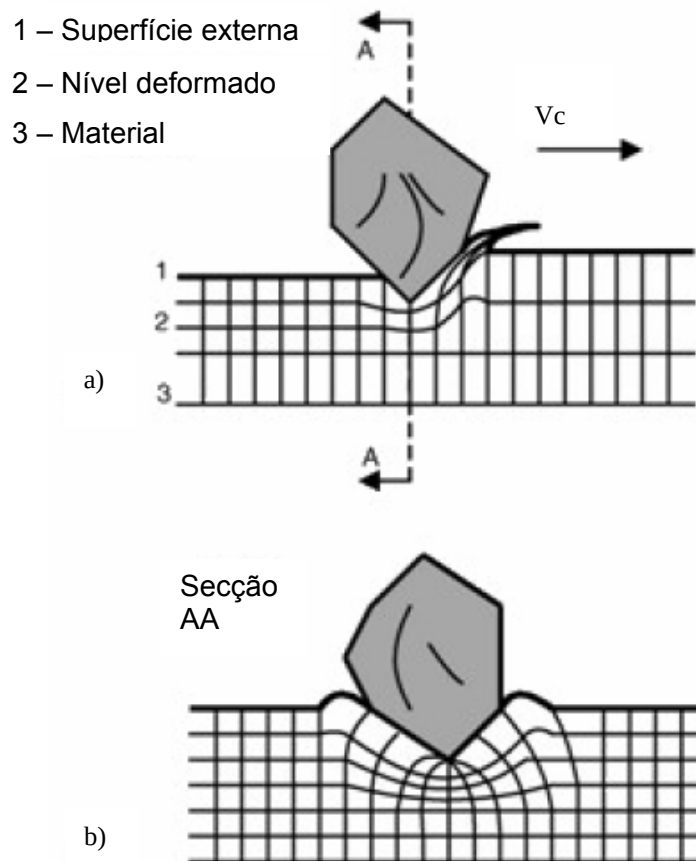


Figura 2.2 – Representação da formação do cavaco durante o processo de polimento, onde v_c é a velocidade de corte (Klocke et al, 2005).

2.1.6. Qualidade Superficial de Moldes e Matrizes

O acabamento superficial é bastante rigoroso em moldes e matrizes (Ra normalmente menor que $0,1 \mu\text{m}$) e bastante crítico principalmente no molde para injeção de plástico. A qualidade do acabamento requerida nas superfícies de moldes para injeção é maior que aquelas requeridas nas matrizes de forjamento e estampagem, além disso, sua geometria complexa dificulta ou até mesmo impede a aplicação do polimento automático. Somente a geração de superfícies convexas e ligeiramente curvas, além de furos na matriz, permite o uso de equipamento automático de polimento. Segundo Fallbohmer *et al.* (2000), os valores médios dos erros dimensionais e de forma de moldes são dados pela tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tolerâncias requeridas para moldes e matrizes (Fallbohmer *et al.*, 2000).

	Erro dimensional médio (mm)	Erro médio de forma (mm)
Moldes para injeção	0,020	0,015
Matrizes para fundição	0,046	0,041
Matrizes para estamparia	0,061	0,043
Matrizes para forjaria	0,028	0,023

As combinações do polimento manual com o polimento automático têm sido muito utilizadas. Segundo Fallbohmer et al (1996), 70% das oficinas de moldes e matrizes dos Estados Unidos e Japão fazem polimento. Quanto ao polimento automático, a preferência é o método de usinagem elétrica, principalmente por descargas elétricas (EDM), seguidas pelo método de usinagem mecânica como polimento com fluxo abrasivo, polimento assistido com robô e polimento assistido por máquina de fresamento.

O polimento manual é o mais utilizado nas indústrias de países como Estados Unidos, Japão e Alemanha. A figura 2.3 abaixo mostra que praticamente 70% do polimento nestes países são realizados de forma manual, o que onera em tempo a fabricação dos moldes e matrizes, além de depender da experiência do funcionário no acabamento final.

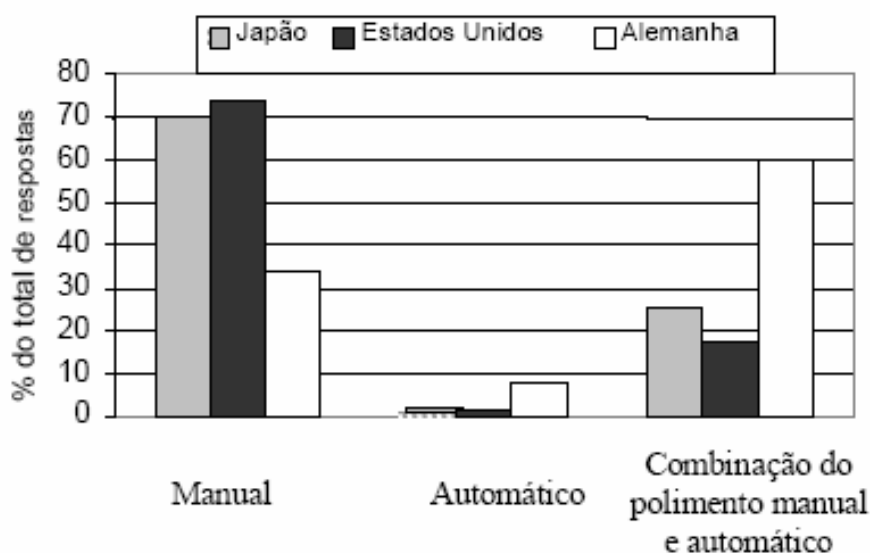


Figura 2.3 – Percentual de utilização do processo de polimento manual, automático e combinação entre ambos (Fallbohmer et al., 2000).

A diferença de rugosidade do processo de polimento com outros processos de usinagem fica evidente na comparação realizada na tab. 2.2 abaixo, demonstrando dessa forma a necessidade de equipamentos de medição com alto grau de precisão.

Tabela 2.2 - Valores típicos de rugosidade média para superfícies de engenharia fabricadas por diferentes processos (Hutchings, 1992).

Processo	R _a (μm)
aplainamento, perfilamento	1 – 25
fresamento	1 – 6
trefilação, extrusão	1 – 3
torneamento, furação	0,4 – 6
retífica	0,1 – 2
brunimento	0,1 – 1
polimento	0,1 – 0,4
polimento com disco	0,05 – 0,04

Segundo Mesquita (1992) no monitoramento do processo, a rugosidade média R_a representa, de forma efetiva, a estabilidade. Assim, compreende-se porque este parâmetro é largamente usado nas indústrias. Entretanto, medindo-se somente o R_a , não são detectadas ocasionais elevações ou reentrâncias, importantes em uma superfície moldante. É importante, portanto, conhecer e compreender os diversos parâmetros utilizados para avaliar a rugosidade de superfícies. Além de um valor indicativo a altura de picos e vales, pode ser necessário um valor representativo da distribuição relativa entre picos e vales por exemplo. No item 2.3 será abordado este assunto com detalhes dos parâmetros utilizados para medição de rugosidade de superfícies.

2.2. Polimento

O polimento também pode ser classificado como um processo de usinagem, pois consiste na remoção de material na forma de cavaco. Segundo Machado et al (2009) usinagem é o termo dado aos processos empregados na fabricação de componentes, a partir da remoção progressiva de material na forma de cavacos. A fig. 2.4 mostra a classificação dos processos de usinagem em convencionais (com as subdivisões em geometria definida e não definida) e não convencionais.

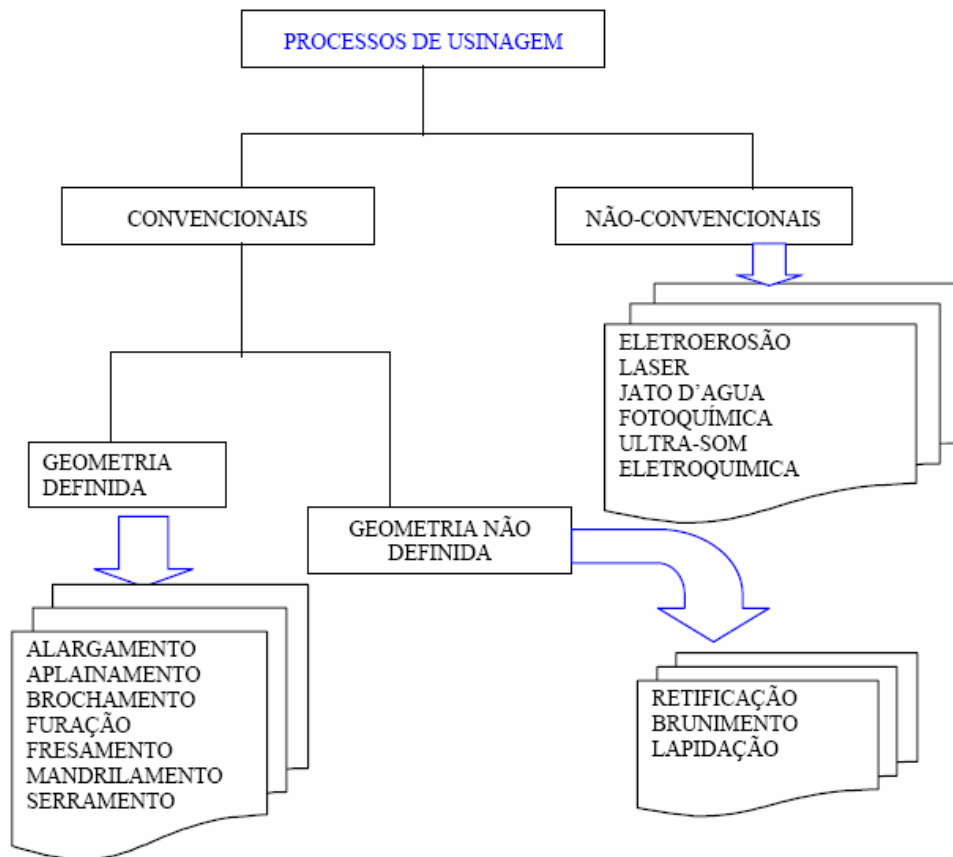


Figura 2.4 – Classificação dos processos de usinagem (adaptado de Machado et all, 2009).

O polimento está classificado como convencional, pois é um processo de usinagem a abrasão. Além disso, é um processo que utiliza geometria não definida.

Em processos de fabricação de moldes, o polimento é um fator cada vez mais importante, pois além do aspecto final da peça, ele ainda pode colaborar na diminuição da corrosão (na injeção de peças de PVC, por exemplo), facilitar a extração de peças, reduzindo o risco de quebra das mesmas. Em geral, o polimento é avaliado a olho nu, sendo que as superfícies analisadas devem estar totalmente livres de riscos e porosidades.

Em polimentos que se deseja ter superfícies espelhadas, a avaliação final poderá ser realizada através da utilização de instrumentos ópticos. Muitas vezes, uma superfície polida, vista através destes instrumentos, mostrará riscos que, entretanto poderão ser aceitáveis a olho nu. Na verdade uma análise final da quantidade do polimento dependerá muito da experiência do polidor.

Para a obtenção de um correto polimento deve-se atentar a quatro principais fatores que tem interferência direta no polimento, sendo: técnica de polimento; características do aço; tratamento térmico; áreas com soldas (Bengtsson, 1983).

Técnicas de polimento: As técnicas manuais de polimento ainda são as melhores formas de conseguir um bom acabamento, pois durante o processo manual é possível variar a pressão utilizada e identificar o momento correto de parar o polimento, logicamente isso será possível dependendo exclusivamente da experiência do polidor.

Características do aço: Para se obter uma superfície sem manchas ou pontos escuros - é preciso verificar primeiro a limpeza e a homogeneidade do aço.

Tratamento térmico: Se o aço tiver sido tratado com um processo de endurecimento incorretos, com excessiva carburação, pequenas partículas óxido podem se desenvolver sob a superfície, o que dificilmente poderá ser retirado durante o polimento.

Áreas com solda: Áreas soldadas podem causar problemas durante o polimento, porque produzem variações na estrutura em função de variações na composição química e dureza do material. A fim de obter melhores resultados, é de fundamental importância que a peça seja pré-aquecida antes da solda, que os eletrodos recomendados pelas siderúrgicas sejam utilizados e uma pós-soldagem de tensionamento seja realizada em função do tipo de aço.

Alguns problemas podem ser encontrados durante o polimento, um excessivo polimento, por exemplo, causa o chamado *overpolishing*, sendo notado quando a superfície começa a ter um aumento na rugosidade durante o polimento, ou seja, a superfície piora com o aumento do tempo de polimento. Basicamente dois são os fenômenos que aparecem: *orange peel* e *pitting*. A fig. 2.5 abaixo ilustra a consequência problema de *overpolishing*.

Em estudos realizados na detecção do *overpolishing*, mostrou-se que este problema ocorre para tempos diferentes quando se tem diferentes durezas de materiais.

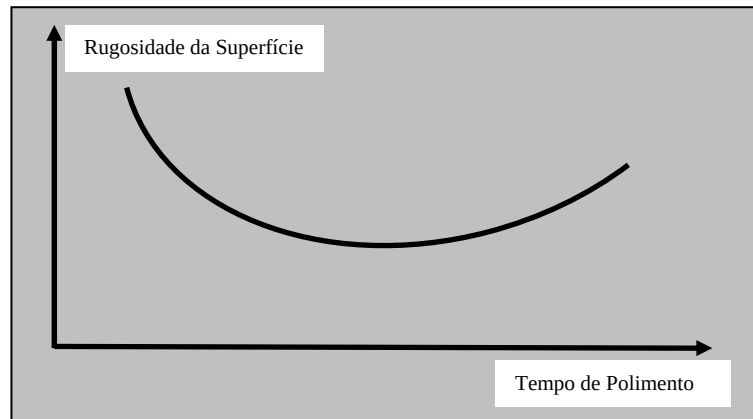


Figura 2.5 – Apresentação da rugosidade durante um processo de polimento com a ocorrência de *overpolishing* (Bengtsson, 1983 – modificado pelo autor).

Orange peel – A aparência irregular da superfície, a qual normalmente tem o aspecto de uma casca de laranja (*Orange peel*). A causa mais comum deste acontecimento é um superaquecimento causado por uma alta pressão e excessiva tempo de polimento. (Bengtsson, 1983).

Pitting – São cavidades muito pequenas que podem ser observados em uma superfície plana durante a fase de polimento. São comumente derivadas de inclusões não metálicas que são removidos da superfície durante o processo de polimento. Geralmente as partículas removidas são sulfetos ou óxidos. As principais causas são: tempo de polimento e pressão; pureza do aço; tipo de ferramentas utilizadas e o abrasivo. A fig. 2.6 mostra as características de uma superfície com *pitting*. (Bengtsson, 1983).

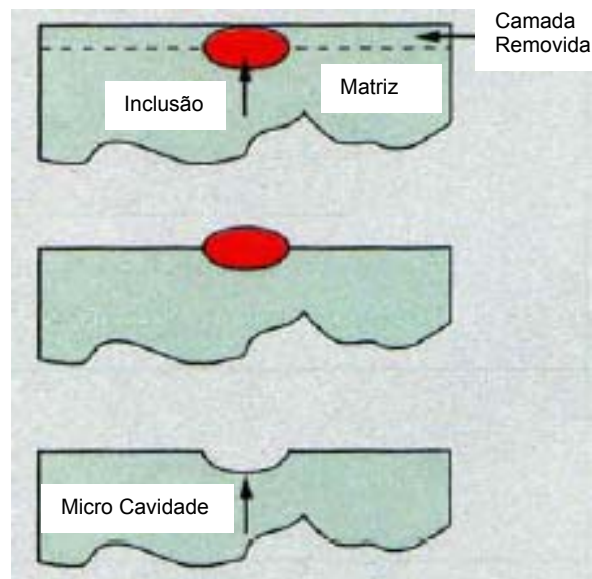


Figura 2.6 – Características de uma superfície com a ocorrência de pitting. (Lucchini sidermeccanica e Zanola - catálogo).

2.3. Métodos de Caracterização de Superfícies polidas

As superfícies polidas são geralmente caracterizadas por medidas de rugosidade, sendo que para moldes de injeção de plástico a rugosidade medida nem sempre traduz a qualidade total do molde. Qualquer deficiência nesta etapa pode ser transmitida ao produto final fabricado. Portanto, atualmente tem-se em estudo, além da medida de rugosidade, uma medida de refletividade da superfície polida. A própria medição de rugosidade deve ser definida pelo parâmetro mais adequado. A seguir têm-se algumas definições de parâmetros utilizados para medição de rugosidade e de refletividade.

2.3.1. Rugosidade

A rugosidade superficial constitui um desvio micro-geométrico ou uma micro-irregularidade, caracterizado por finas irregularidades na textura da superfície. Tem origem durante o processo de formação do cavaco e é influenciada pela vibração da ferramenta, aresta postiça de corte, marcas do avanço durante as operações de acabamento, atrito da superfície de incidência da ferramenta com a peça, etc.

Antes de medir a rugosidade é necessário se ter certeza de como é formada a superfície da peça que esta sendo medida. No caso de fresamento pode-se ter raias e

sulcos a rugosidade no sentido horizontal vai ser diferente do sentido vertical (Mesquita, 1992; Chansel, 2000).

A fig. 2.7 representa um exemplo de um perfil de uma superfície. É interessante observar que o perfil pode ser dividido em rugosidade, que é um erro micro geométrico, ondulação e erro de forma.

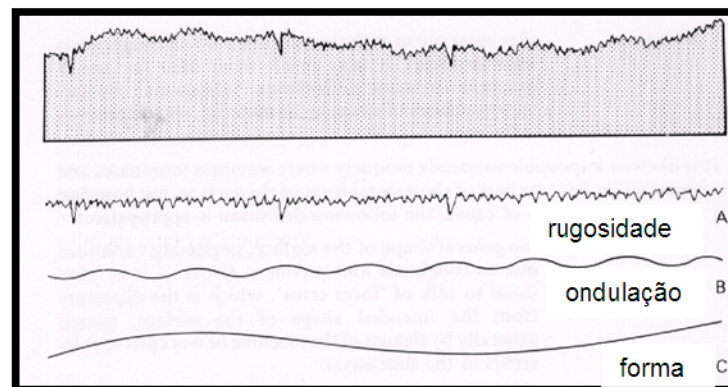


Figura 2.7 – Perfil da rugosidade (A), ondulação (B) e de forma (C). Adaptado de (Hutchings, 1992).

A ABNT utiliza o sistema da linha média, que é também o mais utilizado. Neste sistema da linha média M todos os parâmetros de rugosidade são definidos em relação a uma linha imaginária no comprimento de amostragem paralela à direção do perfil e denominada linha média. Esta linha é posicionada de tal maneira que a soma das áreas do perfil acima e abaixo dela seja a mesma.

Os sistemas de medição de rugosidade, baseados no critério da linha média podem ser agrupados em três classes:

- baseados na medida da profundidade da rugosidade;
- baseados em medidas horizontais;
- baseados em medidas proporcionais.

Dentre os parâmetros da rugosidade, destacam-se:

- R_a , definido como rugosidade média. É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l) (NBR ISO 4287: 2002). Segundo Whitehouse (1999) o parâmetro mais importante para expressar o acabamento superficial é a rugosidade média R_a , que pertence ao grupo dos parâmetros de amplitude.

Na fig. 2.8 observa-se um desenho esquemático de um perfil de rugosidade. Nele estão indicados os parâmetros utilizados para se calcular o Ra.

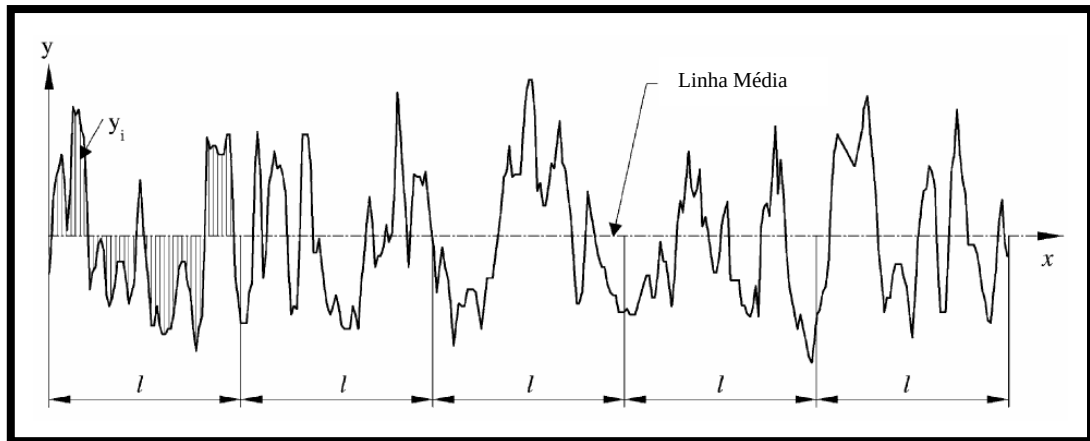


Figura 2.8 – Esquema exemplificando a linha média ou linha de referência e a definição do Ra (Gadelmawla et al., 2002).

A eq. 2.1 mostra como é realizado o calculo para a obtenção do Ra.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (2.1)$$

- Rq, definido como a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas, (y_i), no comprimento de amostragem (l) (NBR ISO 4287: 2002).

A eq. 2.2 mostra como é realizado o calculo para a obtenção do Rq.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \{y(x)\}^2 dx} \quad (2.2)$$

- Rz, é a soma da altura máxima dos picos do perfil (p) e a maior das profundidades dos vales do perfil (v), no comprimento de amostragem (NBR ISO 4287: 2002).

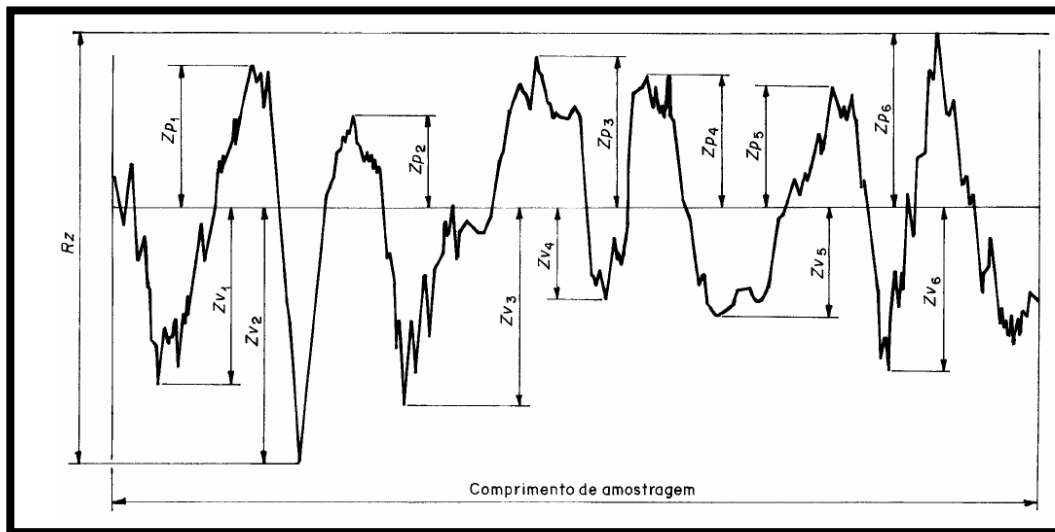


Figura 2.9 – Definição dos dez pontos na medição do Rz (NBR ISO 4287: 2002).

Na ISO 4287-1:1984, o símbolo Rz era usado para indicar a altura das irregularidades sobre dez pontos. Em alguns países existem instrumentos para medição da rugosidade de superfícies em uso que medem o parâmetro Rz antigo. Por isso, deve-se tomar cuidado ao usar documentos técnicos e desenhos existentes, porque os resultados obtidos com diferentes tipos de instrumentos apresentam diferenças nem sempre desprezíveis.

Existem vários outros parâmetros para medir rugosidade entre, no entanto, citou-se os mais utilizados na indústria e os que serão usados nesta pesquisa.

2.3.1.1 Equipamentos de medição de rugosidade

Existem alguns métodos de medição de rugosidade. Segue abaixo a descrição dos mais utilizados.

a) Comparação visual e tátil

A medição é realizada através de um padrão pré-estabelecido que é comparado com a amostra que se deseja medir. O operador coloca o dedo sobre a peça e sobre o padrão, em seguida verifica em qual padrão pré-estabelecido a amostra mais se aproxima. As fig. 2.11 e 2.12 mostram como é realizado este tipo de medida de rugosidade.

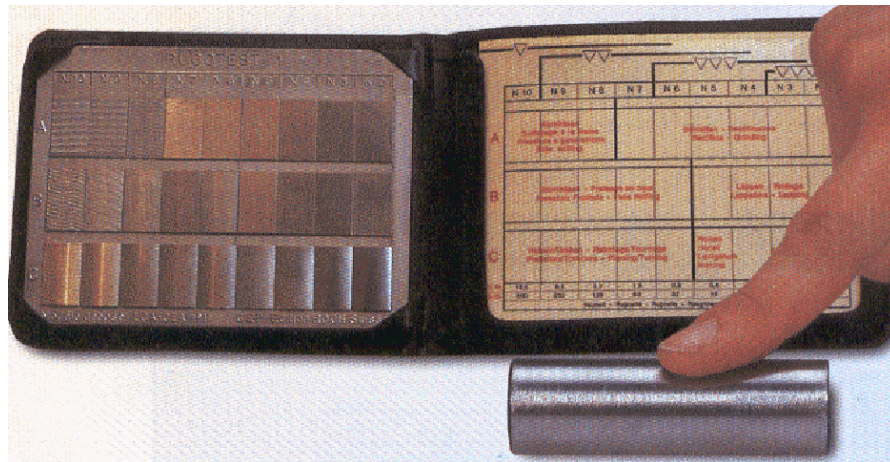


Figura 2.10 – Padrão para comparação visual e tátil para determinação da rugosidade (Euitiz, 2003).

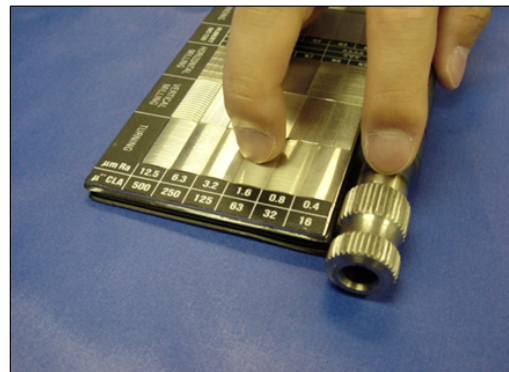
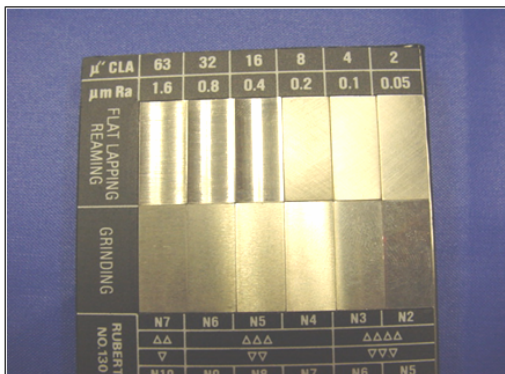


Figura 2.11 – Padrão para comparação visual e tátil para determinação da rugosidade (Taylor Robson, 2003).

b) Rugosímetro mecânico

Segue abaixo a fig. 2.13 que mostra um rugosímetro mecânico. Este rugosímetro foi o primeiro do mundo a medir a textura de superfícies.

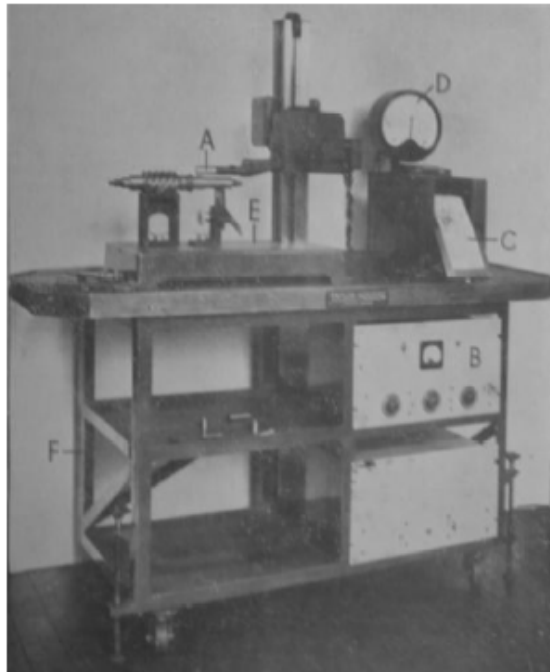


Figura 2.12 – Imagem do rugosímetro mecânico Talysurf 1 de 1941 (Xiang, 2009).

c) Rugosímetros digitais

As fig. 2.13 e 2.14 trazem os Rugosímetros digitais da fabricante Taylor Hobson e da Mututoyo, respectivamente.



Figura 2.13 – Rugosímetro digital da fabricante Taylor Hobson.



Figura 2.14 – Rugosímetro digital da fabricante Mitutoyo.

2.3.2. Medidas Ópticas de Superfícies Polidas

Uma das técnicas mais rudimentares utilizadas na indústria é a inspeção visual por um operador experiente. No Brasil, a grande vantagem desta técnica é o seu baixo custo, porém é um processo lento e está sujeito ao critério de inspeção do operador, sendo difícil manter uma uniformidade de critérios (Barcellos, 2007).

Abaixo são descritos as principais técnicas de análise de superfície de acordo com o *site Surface science techniques* (<http://www.uksaf.org/home.html>).

A Interferometria analisa os padrões de interferência das ondas refletidas em uma ou mais interfaces ópticas. Como os padrões estão relacionados com a diferença de comprimento dos caminhos percorridos por duas ou mais ondas, é possível, através de interferometria, mapear as diferenças de níveis em uma superfície.

A interferometria de varredura vertical (VSI - *Vertical scanning interferometry*) apresentado na fig. 2.15, é uma técnica específica de interferometria realizada sobre o perfil. O VSI é um método de alta capacidade de medição de superfícies rugosas. O VSI permite análise de materiais e dispositivos com refletividade de 1 a 100%. Para alturas verticais de alguns nanômetros até vários milímetros podem ser digitalizados, com medição e análises rápidas de poucos segundos há minutos, dependendo da altura e intervalo.

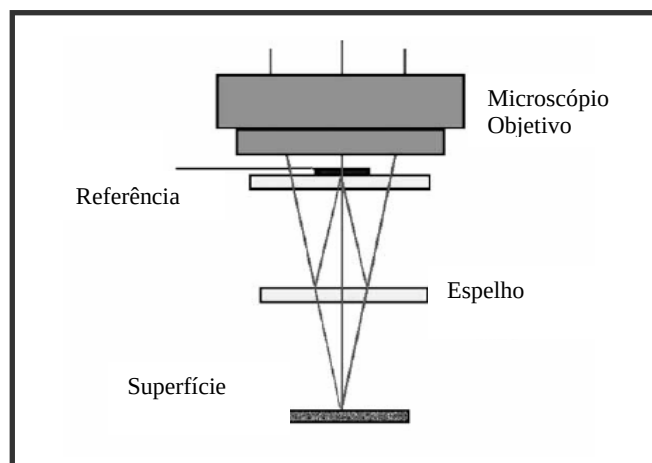


Figura 2.15 – Esquema de um interferômetro de digitalização vertical.

A técnica de fotoluminescência é usada para determinar as propriedades de um material a partir das características da luz refletida por sua superfície. Esta técnica não permite a obtenção da topografia de uma superfície e sim apenas regiões limitadas pelo *spot laser*. Neste esquema a intensidade medida da reflexão de uma superfície é realizada através da comparação de uma superfície padrão, aonde a intensidade I_A e I_B são amostras da superfície em análise e I_S é a intensidade padrão utilizada. A relação entre estes coeficientes permite determinar os parâmetros ópticos e propriedades físicas de uma amostra. A fig. 2.16 mostra o esquema de medida por fotoluminescência.

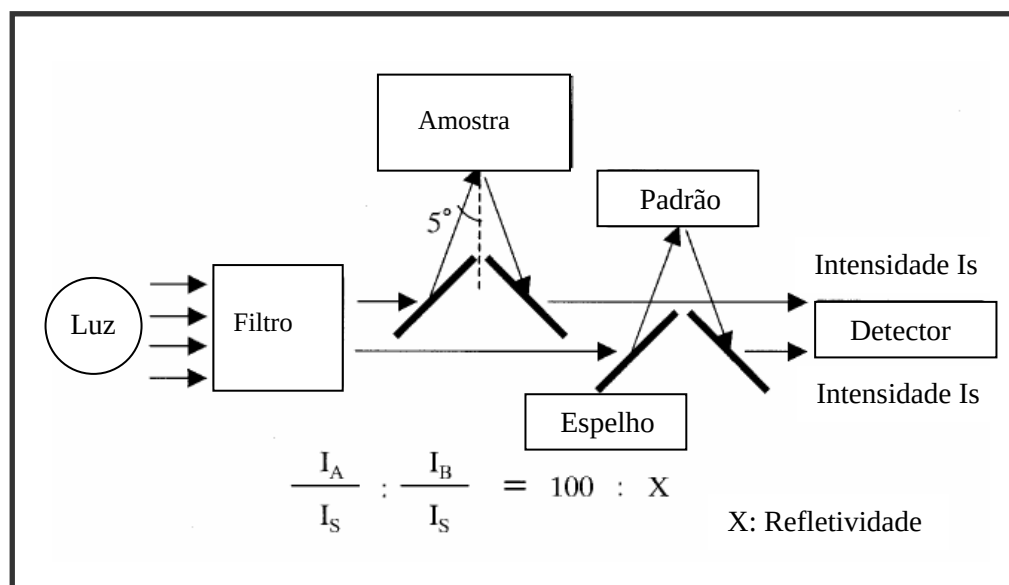


Figura 2.16 – Ilustração do esquema de medida de reflexão por raios de luz (Shimizu e Fujii, 2003)

2.4. Características dos Aços para Moldes e Matrizes

O aço é a matéria prima base para a agregação de valores quando se fala em moldes. O processo que mais vai agregar valor ao aço será o de usinagem. Desta forma o aço é a base para todos os processos subseqüentes, portanto a utilização de aços de elevada qualidade se torna um fator fundamental para o bom desempenho do molde (Ramos, 2004).

De acordo com Mesquita *et al.* (2003), a demanda de mercado por uma maior velocidade nos lançamentos de novos produtos e o encurtamento do ciclo de desenvolvimento, utilizando técnicas avançadas como prototipagem rápida, tem exigido dos fabricantes de moldes uma resposta rápida. Essa resposta tem sido buscada em soluções como a utilização de modernas técnicas de usinagem e a transferência eletrônica de dados. A disponibilidade de aços para moldes também é muito importante nessa resposta rápida ao mercado.

Na fabricação de plásticos alguns subprodutos corrosivos podem ser produzidos. A corrosão pode também ser desenvolvida pela condensação do ar, através de gases agressivos, devido aos ciclos alternados de resfriamento e aquecimento. Nestes casos, além das propriedades mecânicas necessárias para qualquer peça, o material deve também ter boa resistência à corrosão. Esta resistência à corrosão, mesmo não sendo utilizado material injetado corrosivo, aumenta a vida útil do molde. Nestes casos o material recomendado é um aço inoxidável.

Segundo Gennari *et al.* (2001), os aços inoxidáveis, em geral, são requeridos na fabricação de moldes por possuírem boas propriedades de resistência mecânica e, principalmente, resistência à corrosão. Entretanto, esses materiais compreendem várias famílias de ligas com suas próprias características de microestrutura. Apesar dessa diversidade, em geral, os aços inoxidáveis apresentam baixa usinabilidade com forte aderência na ferramenta levando, em alguns casos, a quebras e lascamento da aresta (Trent, 1989). A baixa usinabilidade é ocasionada pela composição necessária para que apresentem propriedades de elevadas resistência mecânica e à corrosão, especialmente para os austeníticos, grupo com melhores propriedades e, conseqüentemente, maior demanda. A presença de elementos como cromo, níquel e molibdênio são as causas de altas deformações plásticas, determinando elevadas forças de atrito e de corte com prejuízos para a vida da ferramenta (Gennari *et al.*, 2001).

Alguns recursos para melhoria da usinabilidade dos aços inoxidáveis são empregados, como por exemplo, a adição de elementos como enxofre, manganês, chumbo entre outros (Metals Handbook, 1989). No entanto, a adição destes elementos prejudica

outras propriedades destes materiais como resistência à corrosão, ductilidade, tenacidade e soldabilidade. Para moldes é necessária uma boa polibilidade, que seria um termo equivalente à usinabilidade para processos de polimento. Segundo Mesquita et al. (2005) a adição de enxofre prejudica a polibilidade do material, o que torna indesejável principalmente em matrizes para moldes de plásticos. Ainda segundo Mesquita et al. (2005) uma alternativa pesquisada para melhoria da usinabilidade é a adição de Ca ao material, o que proporcionará ganho na usinabilidade sem perdas na polibilidade. A seguir, são feitos alguns comentários a respeito de importantes materiais utilizados na fabricação de moldes e matrizes e que são utilizados em diversas pesquisas no LEPU – Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

O aço VP20 ISO produzido pela Villares Metals, por exemplo, é similar ao aço ABNT P20, porém com modificação nos teores de manganês e níquel. O sufixo ISO refere-se à tecnologia diferenciada do metal líquido. Este aço possui elevada usinabilidade sem perda de polibilidade. Para tanto, o aço VP 20 ISO é produzido com baixo teor de enxofre e submetido a um tratamento com Ca. A composição do VP20 ISO é apresentada na tab. 2.3.

Os aços inoxidáveis martensítico PH endurecível por precipitação denominado de VP 80, a qual adquire praticamente a mesma dureza final dos aços inoxidáveis martensíticos tratados por têmpera e revenido (de 35 a 48 HRc), possuem alta resistência a corrosão, cerca de 60% superior à dos aços inoxidáveis martensíticos. Este maior resistência a corrosão é promovida por três fatores:

- Teor de Cr de 12%, garantindo a inoxidabilidade;
- O baixíssimo teor de C, que reduz a taxa de corrosão, pela não formação de carbonetos com o Cr;
- Teor de 1,5% de Mo, que aumenta consideravelmente a resistência à corrosão.

Devido esta maior resistência a corrosão o aço VP 80 é indicado para materiais corrosivos como PVC. A composição química do VP 80 é apresentada na tab. 2.3.

Na obtenção do aço VP 80, além da fusão e refino, são empregados processos de refusão por VAR (*vacuum arc remelting*). Neste processo o lingote produzido é refundido sob vácuo o que traz vantagens como a redução do teor de elementos como O, N e H, a eliminação de inclusões grosseiras e o refino da microestrutura. Esta microestrutura mais refinada traz uma melhor polibilidade do material (Mesquita et al., 2005).

O aço V304 UF (Usefac) tem sua composição muito próxima ao aço ABNT 304, a diferença esta no tratamento submetido ao cálcio (Ca). Igualmente aos demais aços inoxidáveis apresentados anteriormente, o tratamento ao cálcio busca uma melhor

usinabilidade sem prejuízo a polibilidade do material. A composição química do aço V304 UF é apresentada na tab. 2.3 abaixo.

Tabela 2.3 – Composição química dos aços VP20 ISO, VP 80 e V304 UF (Mesquita et al. (2005), Gennari et al. (2001) e Ramos (2004) modificado pelo autor).

Aço	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	Ca	Al
VP20 ISO	0,36	0,3	1,6	1,8	0,8	0,2	-	-	<0,003	-	-
VP80	0,04	0,3	0,3	12	7,8	1,5	-	-	<0,005	-	1,2
V304 UF	0,02	0,34	1,79	18,3	8,24	0,42	0,52	0,034	0,024	< 10 ppm	-

De uma maneira geral, os materiais para fabricação de moldes devem conter algumas características que são desejáveis a peça acabada, bem como para facilitar sua fabricação. Barbosa (2001) dividiu estas características quanto ao uso e a fabricação. Tais descrições podem ser observadas na tab. 2.4.

Tabela 2.4 – Descrição das características desejáveis aos moldes quanto ao uso e a fabricação (Barbosa, 2001).

Quanto ao uso	Características desejáveis para fabricação
• Propriedades mecânicas (dureza, etc)	• Usinabilidade
• Respostas a nitretação	• Soldabilidade
• Facilidade de polimento	• Reprodutibilidade
• Respostas a texturação	• Estabilidade dimensional (se tratar termicamente)
• Condutibilidade térmica	• Mínimo risco e complexidade (se tratar termicamente)
• Resistência à corrosão (Inoxibilidade)	
• Reprodutibilidade	
• Mínimo custo	

De acordo com este autor, a seleção é feita priorizando algumas destas características, sendo necessário aceitar um certo compromisso, uma vez que ao melhorar as características de uso, as desejadas para confecção são freqüentemente prejudicadas e vice-versa.

Os elementos de composição para uma liga, geralmente vão depender das características desejadas no material. A tab. 2.5 mostra quais são os elementos que devem ser adicionados para conferir determinadas características no material.

Tabela 2.5 – Habilidade dos elementos de liga em conferir certas características aos aços para ferramentas e matrizes (Chiaverini, 2002).

Característicos	Elementos de liga
Dureza a quente	W, Mo, Co (com W ou Mo), V, Cr, Mn
Resistência ao desgaste	V, W, Mo, Cr, Mn
Profundidade de endurecimento	Mn, Mo, Cr, Si, Ni V(a)
Empenamento mínimo	Mo (com Cr), Cr, Mn
Tenacidade pelo refino de grão	V, W, Mo, Mn, Cr
(a) O vanádio fornece elevada profundidade de endurecimento se austenitizado a temperatura suficientemente elevada para dissolver o carboneto de vanádio	

Portanto, a escolha do material para moldes e matrizes vai depender basicamente das características do projeto, ou seja, a análise ficará para qual finalidade a matriz vai ser produzida.

2.5. Características de Usinabilidade e Polibilidade

A relação entre usinabilidade e polibilidade é muito importante na fabricação de moldes e matrizes, pois a usinagem é a parte do processo com o custo mais elevado, valorizando assim a importância de um aço com propriedades que lhe proporcione uma usinabilidade satisfatória, com uma conseqüente diminuição do custo na operação de usinagem.

A usinabilidade dos aços inoxidáveis tem sido abordada por engenheiros de indústrias de uma forma muito mais genérica do que com base em ensaios de pesquisa. Qualquer discussão sobre usinabilidade deve partir do princípio de que este conceito não se refere a uma única propriedade do material, a qual pode ser claramente definida e mensurada. De uma forma mais ampla, a usinabilidade deve ser compreendida como um sistema de propriedades que dependem de interações complexas e dinâmicas entre os materiais da peça e da ferramenta, do fluido e das condições de corte. Dessa forma, uma melhoria da mesma é caracterizada por um dos seguintes fatores (Trent, 1989):

- aumento da vida da ferramenta;
- maior taxa de remoção de material;
- melhoria do acabamento superficial;
- melhor remoção do cavaco;
- diminuição das forças de corte.

A polibilidade pode ser entendida como uma medida da facilidade de polimento de um material. A facilidade no polimento pode ser entendida de várias formas, como por exemplo a possibilidade de obtenção de determinado nível de rugosidade.

São diversos os fatores metalúrgicos que influenciam na polibilidade. Inclusões não metálicas como óxidos e sulfetos, podem diminuir a polibilidade, dependendo do tamanho e de como estão distribuídas. Além disso, a dureza deve ser uniforme e a presença de carbonetação é indesejável (Mesquita e Barbosa, 2005) e (Inoguchi, 2007).

Segundo Mesquita e Barbosa (2005), a relação entre a usinabilidade e polibilidade de um aço para molde, está focada principalmente no teor de enxofre. Formando inclusões com o manganês, tipo MnS, que possuem baixo ponto de fusão e alta deformabilidade, melhorando a usinabilidade. Estas causam um efeito lubrificante na aresta de corte e facilitam a quebra do cavaco na zona de cisalhamento. No entanto, estas inclusões diminuem a polibilidade do material.

O polimento é uma importante etapa na fabricação de moldes. No entanto, são operações manuais em função da própria geometria do molde, que não permite automatização do processo. As operações de polimento manual são executadas por profissionais treinados, que possuem habilidades e técnicas tradicionais. O alto nível de habilidade necessária para executar essa operação, também torna esse procedimento difícil de ser automatizado. Além disso, a falta de dados sobre os parâmetros de polimento dificulta ainda mais sua automatização (Huissoon et al, 2002; Steiner et al, 2005).

A dureza do material também pode influenciar a sua polibilidade (Zhao, 2007). A fig. 2.17 mostra a relação da dureza do aço com a polibilidade, sendo que o aumento da dureza causa um aumento na polibilidade da superfície. No entanto, é de conhecimento geral que o aumento da dureza de um aço prejudica a usinabilidade. Portanto, pode-se entender que a usinabilidade e a polibilidade são concorrentes entre si, mas em processos de fabricação de moldes e matrizes devem ser analisadas de forma conjunta, pois é grande a dependência de ambas no processo, tanto na qualidade como custo total do projeto.



Figura 2.17 – Relação da dureza do aço com a polibilidade (Bengtsson, 1983).

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O objetivo do trabalho é investigar, caracterizar e comparar a polibilidade de três materiais, sendo estes aços utilizados para moldes e matrizes. Foi programado para tanto, experimentos práticos, tais como: medidas de rugosidade superficial no perfilômetro e no interferômetro e medidas de refletividade utilizando o método de elipsometria. Foi realizado também ensaios de dureza e metalografia para caracterização dos materiais.

Além de algumas poucas publicações, não existe muita literatura sobre medidas de superfícies polidas, sendo um item muito dependente da experiência do polidor. Com isso, torna-se de grande importância o desenvolvimento de pesquisas para difundir e aumentar bases de conhecimento para que se possa em curto prazo conseguir soluções significativas no intuito de reduzir o custo de fabricação de moldes e matrizes.

Nesta seção do trabalho serão apresentados e descritos os materiais, equipamentos e métodos dos ensaios de polibilidade. Os ensaios foram realizados no laboratório de ensino e pesquisa em usinagem – LEPU – da Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC – da Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Foram ainda realizados ensaios de caracterização de materiais nos laboratórios de tribologia e materiais (LTM) e no Laboratório de Novos Materiais Isolantes e Semicondutores (LNMIS).

3.1. Materiais Investigados

Os materiais que serviram para a investigação deste trabalho foram três aços utilizados na fabricação de moldes e matrizes, estes materiais foram fornecidos pela empresa Villares Metals, identificados como:

- Aço VP80;
- Aço 304 UF;
- Aço VP20 ISO.

Estes materiais já foram descritos na seção 2.4 na revisão bibliográfica.

A micrografia dos materiais utilizados podem ser observadas nas Fig. 3.1, 3.2 e 3.3 abaixo. Para os materiais VP20 ISO e VP80 foram utilizados vilela's (5ml de HCL, 1g ácido pícrico, 100ml de etanol) para o ataque químico nas amostras.

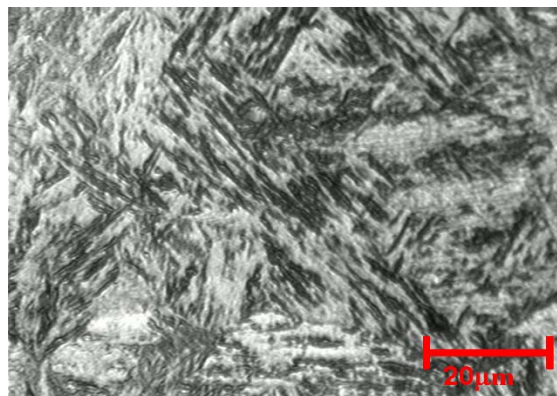


Figura 3.1 – Micrografia do aço VP 20 ISO atacada com vilella's.

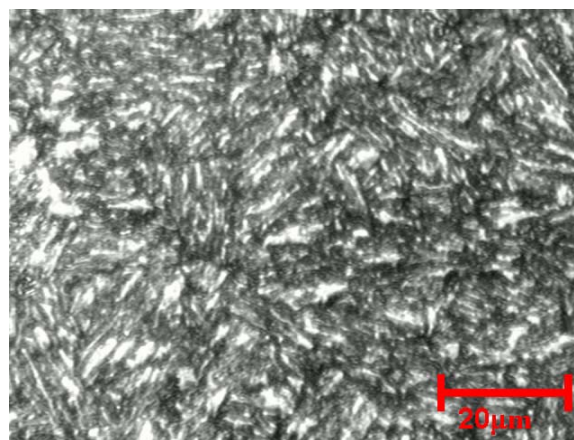


Figura 3.2 – Micrografia do aço VP 80 atacada com vilella's.

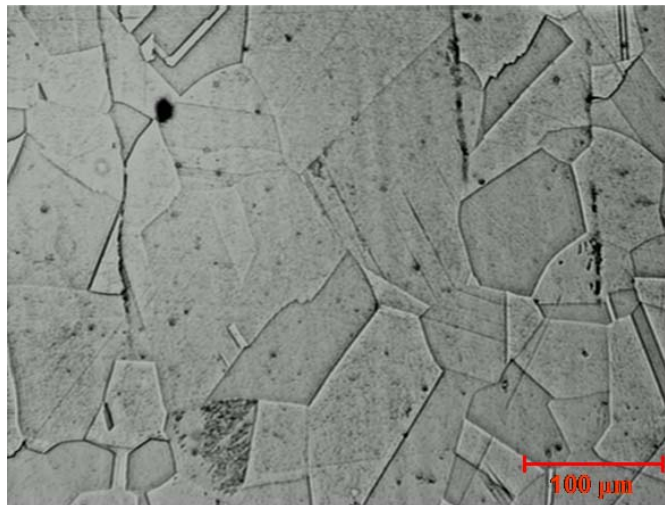


Figura 3.3 – Micrografia do aço 304 UF atacada com uma solução composta por 10ml de ácido nítrico, 10ml de ácido acético, 15ml de ácido clorídrico, 5ml de glicerol.

3.1.1. Preparação dos corpos de prova

A seguir tem-se a seqüência de preparação dos corpos de prova que foram posteriormente utilizados nos ensaios de metalografia e caracterização de superfícies.

1º etapa. Corte das amostras: O tamanho de cada corpo de prova foi definido levando-se em conta as análises subseqüentes que seriam realizadas e o melhor tamanho para um correto embutimento, sendo assim, chegou-se a conclusão que a amostra deveria ter uma área aproximada de 1cm².

2º etapa. Embutimento: Previamente ao procedimento de embutimento, a amostra obtida foi devidamente limpa. A limpeza física destinou-se à remoção de sujeiras sólidas, graxas, oleosidade contida nas amostras etc. A limpeza química (detergente) teve o objetivo de eliminar qualquer contaminante existente.

3º etapa Lixamento e polimento: As amostras foram finalizadas depois do procedimento de lixamento e polimento. No processo de lixamento utilizou-se água para refrigeração, minimizando o empastamento, fazendo com que o abrasivo da lixa fosse distribuído mais uniformemente quando em contato com a amostra, além de remover partículas do abrasivo, da bakelite de embutimento e da própria amostra que se aderem à superfície da amostra. No processo de polimento utilizou-se abrasivo a base de diamante (utilizado para polimento metálico) e álcool como lubrificante.

3.1.2. Materiais consumíveis utilizados

Os materiais consumíveis foram utilizados apenas no processo de metalografia das amostras. Estes materiais foram definidos de acordo com as normas do fabricante dos consumíveis. Apenas no processo de embutimento o material (durofast) utilizado foi da fabricante Arotec, em todos os outros, os materiais utilizados foram da empresa americana *Struers*. O material consumível utilizado foi escolhido em relação às características dos materiais analisados (dureza e ductilidade), sendo que apenas no processo de lixamento, utilizou-se lixas de mesma marca e granulometria.

3.2. Equipamentos Utilizados

Neste item serão descritos os equipamentos e acessórios utilizados para a realização dos ensaios de metalografia, medida de dureza e análise de superfície (rugosidade através da interferometria e perfilometria e a refletividade através da fotoluminescência).

3.2.1. Equipamentos de metalografia

Neste item são apresentados todos os equipamentos utilizados desde o corte das amostras até o polimento final.

Na fig. 3.4 abaixo tem-se a cortadora metalográfica CM 70 da marca teclago.



Figura 3.4 – Cortadeira Discoton 6 da Struers utilizada no corte das amostras.

O equipamento utilizado no embutimento das amostras foi a embutidora da fabricante Fortel (vide Fig. 3.5 abaixo).



Figura 3.5 – Equipamento utilizado para o embutimento das amostras.

O equipamento utilizado no lixamento foi Aropol S do fabricante Arotec (vide Fig. 3.6 abaixo).



Figura 3.6: Equipamento utilizado no Lixamento de marca aropol S da marca arotec.

O equipamento utilizado no polimento foi Dap 7 da fabricante americana Struers. Este equipamento possui um acoplamento (Pedemin – S) que permite o polimento automático (vide Fig. 3.7 abaixo).



Figura 3.7: Equipamento utilizado no polimento de marca labopol-2 da marca Struers.

3.2.2. Equipamentos de caracterização de superfícies

A seguir tem-se a descrição dos equipamentos utilizados para a caracterização das superfícies dos materiais analisados na pesquisa.

3.2.2.1. Rugosímetro

As medidas de rugosidade foram realizadas em parceria com a empresa Taylor Hobson do Brasil. Os testes ocorreram em São Paulo – SP e o rugosímetro utilizado foi o *Form Talysurf Intra* da marca *Taylor Hobson*.



Figura 3.8. Rugosímetro *Form Talysurf Intra* da marca *Taylor Hobson*.

3.2.2.2. Interferômetro

O interferômetro a laser utilizado para fazer a caracterização da superfície é capaz de reconhecer imperfeições na superfície de até 100 nm na direção vertical. O interferômetro em questão consegue captar irregularidades da superfície da ordem de 500 µm de profundidade de vales e 500 µm de altura máxima dos picos. A partir destes valores tornam-se imprecisos os resultados de medição. O interferômetro da marca *UBM Microfocus Expert IV* utilizado nas medições pode ser visualizado na Fig. 3.9. O software utilizado é o *UBM Measurement Analysis*.

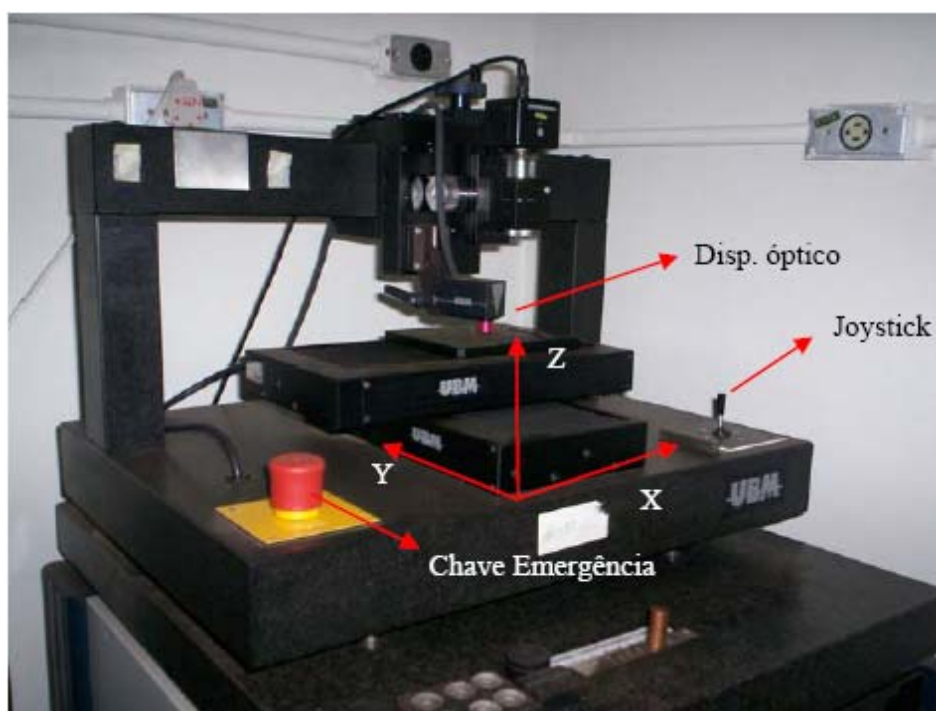


Figura 3.9 – Interferômetro utilizado nos testes de medição de acabamento superficial.

3.2.2.3 Fotoluminescência

Os ensaios para a determinação da refletividade dos materiais foram realizados no LNMIS, para tanto, utilizou-se o laser *Stability 2017* da marca *Spectra-Physics* com um comprimento de onda de 514,5 nm. A figura 3.10 mostra o laser utilizado. O laser ainda percorreu um caminho óptico antes de ser incidido na superfície das amostras. A Fig. 3.11 abaixo mostra o caminho óptico percorrido pelo laser.

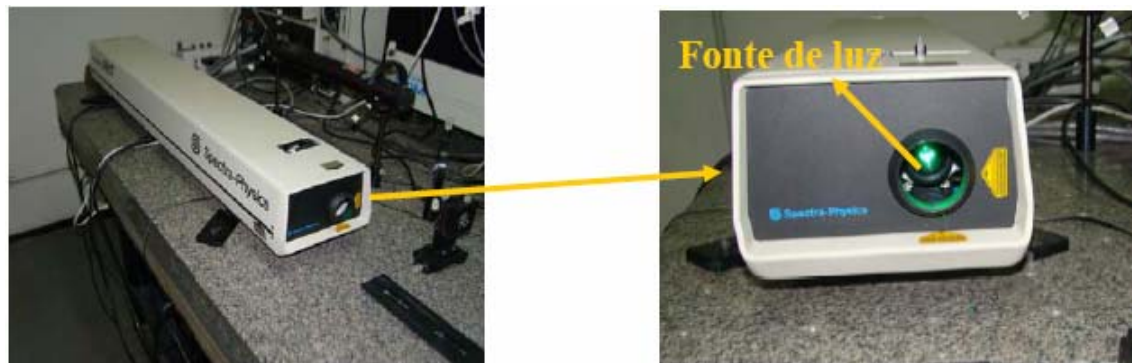


Figura 3.10 – Laser *Stability 2017–0,65* da marca *Spectra-Physics* utilizado nos ensaios de refletividade.

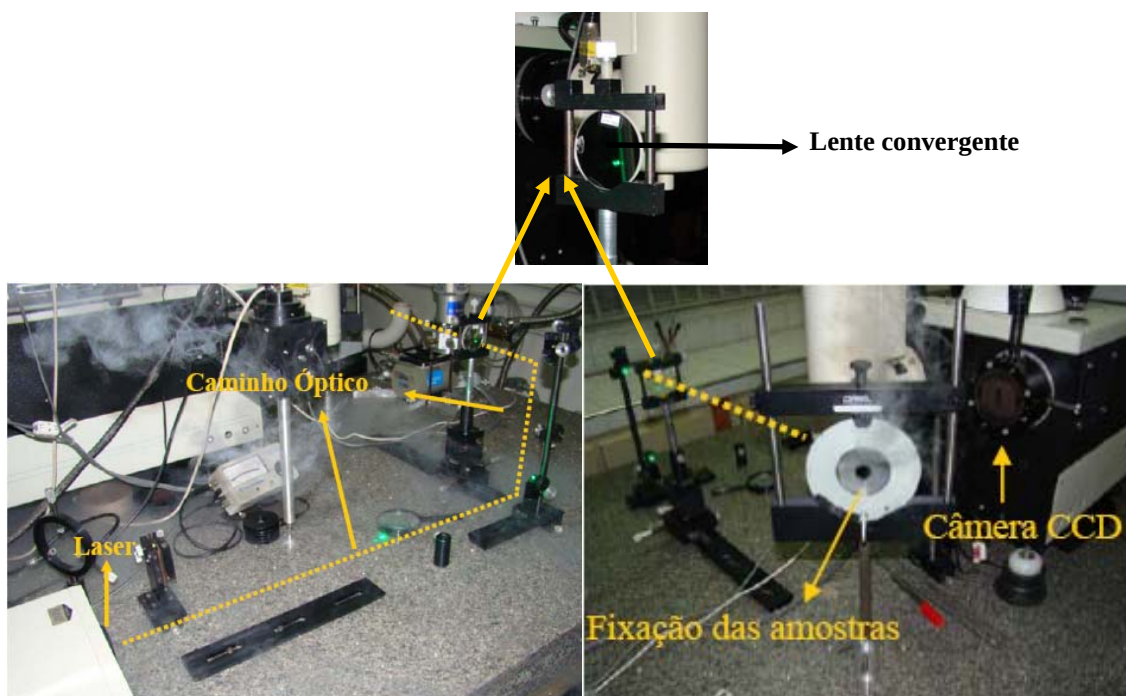


Figura 3.11 – Caminho óptico percorrido pelo laser nos ensaios

A câmera CCD utilizada nos experimentos foi SPEX 750 M. A Fig. 3.12 mostra a câmera CCD utilizada, além do detalhe do orifício onde o laser foi projetado.



Figura 3.12 – Câmera CCD utilizada nos experimentos de refletividade.

Nas Fig. 3.13 e 3.14 a seguir tem-se uma visão geral de todos os equipamentos utilizados neste ensaio e uma esquematização de funcionamento do sistema.



Figura 3.13 – Vista de todos os equipamentos utilizados nos ensaios de refletividade.

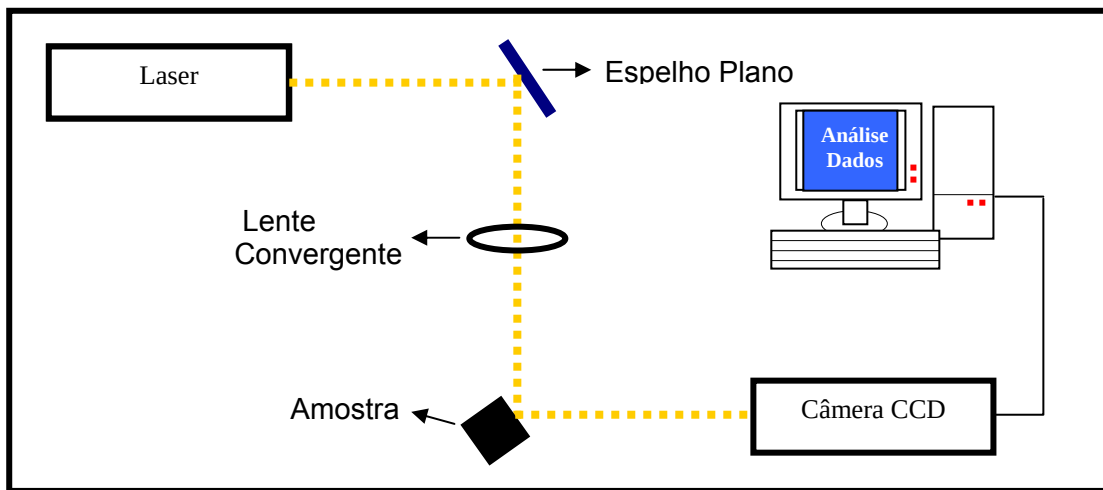


Figura 3.14 – Esquemática do funcionamento do sistema para captar a luz refletida pelos materiais.

O software utilizado para captar o sinal da câmera foi o Spectra Max (para versão do Windows 2.50). A intensidade de luz obtida pelas amostras é uma medição arbitrária e seu valor está relacionado a uma amostra padrão. Nestes testes a amostra padrão utilizada foi um espelho plano, considerado a maior intensidade captada pela câmera. As amostras têm suas intensidades relativas a este espelho plano utilizado na calibração do equipamento.

3.2.3. Caracterização dos materiais

3.2.3.1 Medição de dureza

A carga utilizada nos ensaios de dureza Vickers foi de 40 kg. Para a medição utilizou-se um durômetro universal da marca Wolpert. Este equipamento está locado no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da FEMEC-UFU, representado pela Fig. 3.15.



Figura 3.15 – Durômetro da marca Wolpert.

Os valores de dureza levantados para cada material em análise estão representados na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Resultados da medição de dureza das amostras.

Material	Dureza Vickers (40)
VP80	366
VP20 ISO	324,3
304 UF	144,8

3.2.3.2 Medidas de microdureza

As microdureza foram obtidas com uma carga de 100 gramas e com um tempo de aplicação de 15 segundos. A medição da microdureza foi realizada em 05 pontos distintos ao longo de cada amostra e feita uma média desses valores. Utilizou-se um microdurômetro da marca SHIMADZU modelo HMV, que é mais um equipamento locado no Laboratório de Tribologia e Materiais da FEMEC-UFU. A Fig. 3.16 representa uma fotografia do microdurômetro e do computador utilizado para o tratamento e medições das imagens da marca deixada pelo penetrador.



Figura 3.16 – Microdurômetro da marca HVM e computador para tratamento de imagens.

A Tab. 3.2 abaixo mostra os valores de microdureza vickers dos três materiais em análise.

Tabela 3.2 – Valores da microdureza dos materiais analisados.

	Materiais		
	304 UF	VP 20 ISO	VP 80
Micro Dureza Vickers	230,9	388,6	420,6
	252,2	382,0	428,3
	219,1	388,6	436,1
	247,0	385,3	444,2
	238,7	372,4	413,2
Valor Máx.	252,2	388,6	444,2
Valor Min.	219,1	372,4	413,2
Média	237,6	383,4	428,5
Dsv. Padrão	13,1	6,7	12,3
C.V	5,5	1,8	28,6

3.2.3.3 Microscópio para a análise de superfície.

As imagens das amostras foram obtidas por um estéreo microscópio da marca *Olympus* com um aumento máximo de 45 vezes.

A Fig. 3.17 apresenta o sistema de aquisição de imagens. Utilizou-se o estéreo microscópico olympus com o *software Image Express*.



Figura – 3.17. Sistema de aquisição de imagens (45X).

3.3 Metodologia

Primeiramente, realizou-se a preparação das amostras, onde se utilizou para o corte das amostras um disco abrasivo e uma cortadeira elétrica. Em seguida utilizou-se bakelite para o embutimento a quente. Feito os embutimentos realizou-se para todas as amostras o lixamento com as seguintes granulometrias: 400, 600 e 1000. Por fim, realizou-se o polimento utilizando abrasivos de 3 μm e em seguida de 1 μm . Para cada novo lixamento ou polimento sempre permaneceram três amostras para cada material. Sendo assim, a análise foi realizada em um total de 45 amostras para os três aços. Os ensaios de polimento foram realizados no LTM (Laboratório de Tribologia e Materiais) e os ensaios de embutimento e lixamento realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Universidade Federal de Uberlândia. A Tab. 3.4 abaixo mostra como ficaram distribuídas às amostras por tipo de aço e tipo de acabamento.

Tabela 3.3 – Distribuição das amostras por material e acabamento.

Acabamento	Aços			Total
	ABNT 304	VP 20	VP 80	
Lixamento 400	3	3	3	9
Lixamento 600	3	3	3	9
Lixamento 1000	3	3	3	9
Polimento 3 μm	3	3	3	9
Polimento 1 μm	3	3	3	9
Total (amostras)	15	15	15	45

Durante o processo de lixamento, as amostras foram constantemente observadas, sendo que não houve padronização de tempo e a qualidade final foi visual.

Durante o processo de polimento das amostras de 3 μ m e 1 μ m foram realizados 5 medidas de rugosidade com intervalos de 5 minutos para cada medida (estas medidas foram realizadas no interferômetro a laser), sendo mantidas as mesmas configurações da politriz, até um total de 25 minutos de polimento.

Na seqüência, para cada amostra, foram realizadas as medidas de rugosidade no interferômetro a laser no LTM e no rugosímetro e as medidas de refletividade no LNMIS. Para os três métodos utilizados na pesquisa, foram realizadas três medidas para cada amostra, ou seja, três medidas de rugosidade, três medidas de refletividade e três medidas de interferometria a laser.

As medidas de refletividade e rugosidade nas amostras polidas foram realizadas apenas nas amostras com 25 minutos de polimento. Já para as medidas no interferômetro, foram feitas as medidas, para amostras polidas, nos intervalos de 5 minutos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos experimentos realizados para determinar a polibilidade dos três materiais investigados, através de três diferentes métodos de análise de superfícies.

4.1. Comparação entre os métodos utilizados

Os resultados de medição das rugosidades (utilizando o interferômetro e o rugosímetro) e refletividade das amostras foram comparados para cada material (aço VP80, VP20 ISO e o aço 304 UF).

Esta análise apenas tenta identificar se o método de fotoluminescência pode ser utilizado de forma confiável na análise de rugosidade ou polibilidade de superfícies com rugosidades apropriadas para moldes de injeção de plástico. Além disso, tenta-se buscar uma relação entre a refletividade e a rugosidade.

4.1.1. Resultados para o aço VP80

Os resultados das medidas realizadas no interferômetro a laser para o aço VP80 mostraram que a rugosidade da superfície diminui com o nível do polimento. A ressalva fica para a amostra que foi lixada com a granulometria de 600, onde ocorreu um aumento na rugosidade em relação ao lixamento de 400. A figura 4.1 mostra os valores de rugosidade (R_a) em μm para as diferentes granulometrias analisadas.

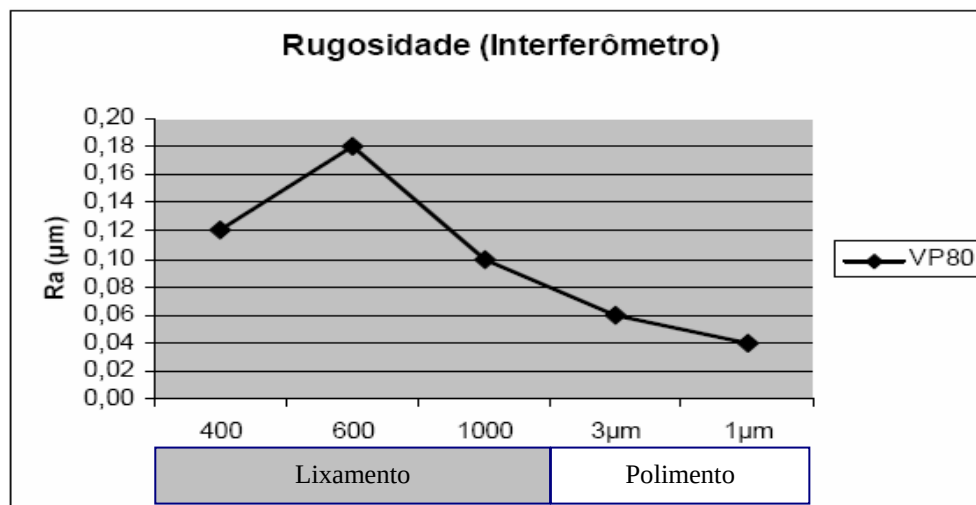


Figura 4.1 – Rugosidade do aço VP80 para amostras com diferentes granulometrias obtidas no interferômetro a laser.

Resultados similares foram obtidos com o rugosímetro com apalpador, como mostra a figura 4.2. Observa-se uma diminuição na rugosidade com a diminuição do tamanho do abrasivo. No entanto, em relação a medição realizada no interferômetro a laser, os resultados são em média menores. Este fato pode ser justificado pela melhor resolução no eixo X do rugosímetro (*Form Talysurf Intra*). Enquanto o interferômetro consegue analisar 100 pontos por milímetro, o rugosímetro tem uma resolução de 1000 pontos por milímetro. Vale ressaltar que na amostra lixada com granulometria 600 (fig. 4.2) não houve uma diminuição de rugosidade em relação a amostra de granulometria 400 nos resultados com o rugosímetro, como aconteceu na medição com o interferômetro.

Outro ponto que merece destaque é o aumento da rugosidade na amostra polida com pasta de diamante de 1µm em relação a amostra polida com pasta de 3µm. Mesmo sendo um aumento pequeno, não pode ser desconsiderado pelo fato de se tratar de um processo para melhorar a rugosidade obtida anteriormente. Uma possível explicação pode ser o acontecimento de *overpolishing* (Bengtsson, 1983) ocasionando um pior acabamento e como consequência um aumento na rugosidade.

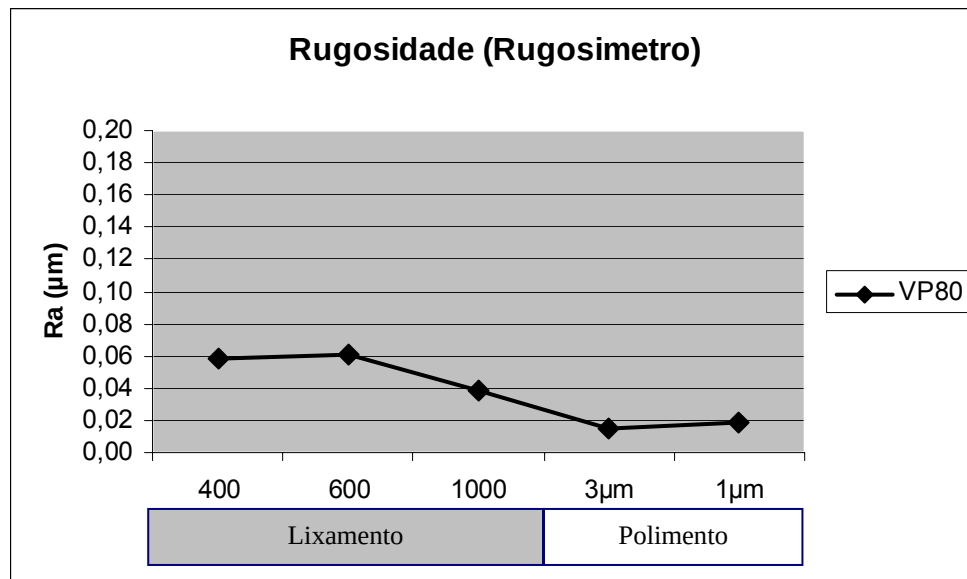


Figura 4.2 – Rugosidade do aço VP80 para amostras com diferentes granulometrias obtidas no rugosímetro.

Os valores de rugosidade obtidos para as mesmas amostras, mas para o parâmetro Rz pode ser observado na figura 4.3 abaixo. Os dados mostram uma queda mais acentuada da rugosidade com comparado com o parâmetro Ra, sendo que para ambos os parâmetros acontecem um aumento na rugosidade quando o acabamento superficial passa de #3μm para #1μm.

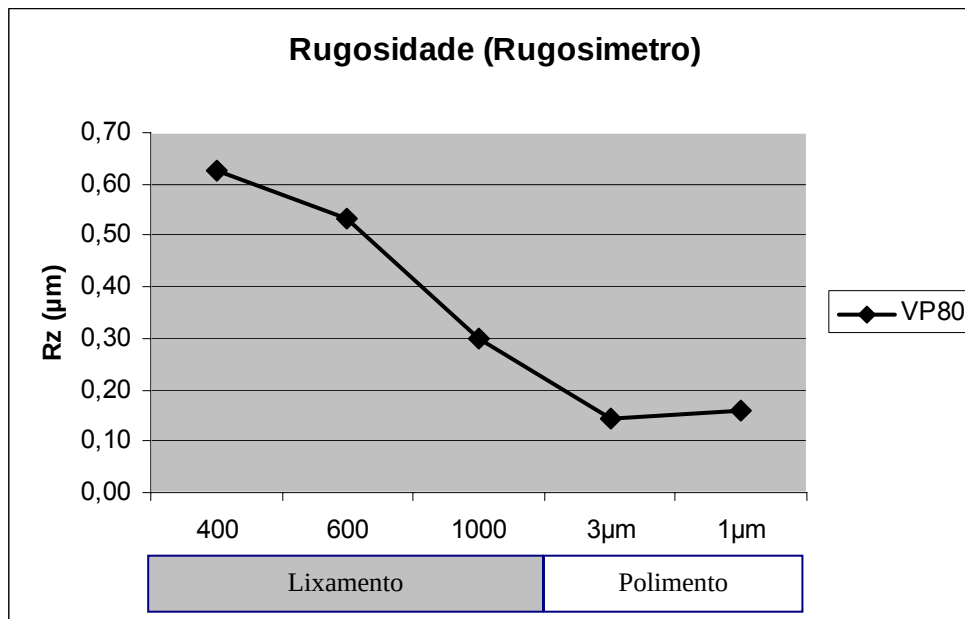


Figura 4.3 – Rugosidade (Rz) do aço VP80 para amostras com diferentes granulometrias obtidas no rugosímetro.

A fig. 4.4 mostra os valores da refletividade em função do nível de acabamento das amostras. É possível perceber uma relação com a rugosidade, quando os resultados são comparados com os resultados apresentados nas figuras 4.1 e 4.2.

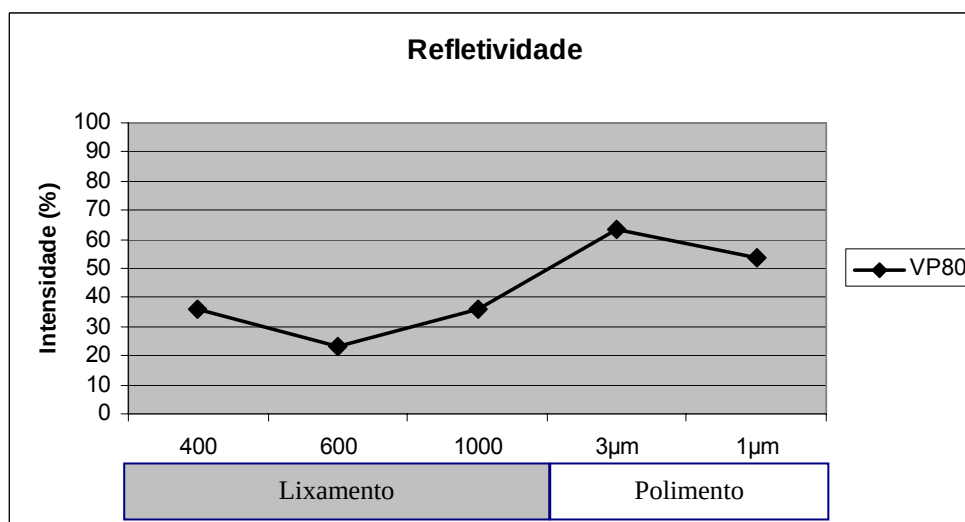


Figura 4.4 – Intensidade de refletividade (%) do aço VP80 para amostras com diferentes granulometrias obtidas pela técnica de fotoluminescência.

Na relação com as medidas feitas pelo interferômetro a laser, pode-se verificar que o aumento da rugosidade na amostra com granulometria 600 em relação a amostra com

granulometria de 400 (figura 4.1) é verificado também na refletividade, pois nas mesmas amostras tem uma pior refletividade para amostra de granulometria 600.

Com o aumento da rugosidade a refletividade de uma superfície tende a diminuir devido ao maior espalhamento do laser quando refletido por uma amostra com superfície irregular. A figura 4.5 mostra um esquema de reflexão de raios incidentes em uma superfície com uma determinada rugosidade (Lucchini Sidermeccanica e Zanola - catálogo).

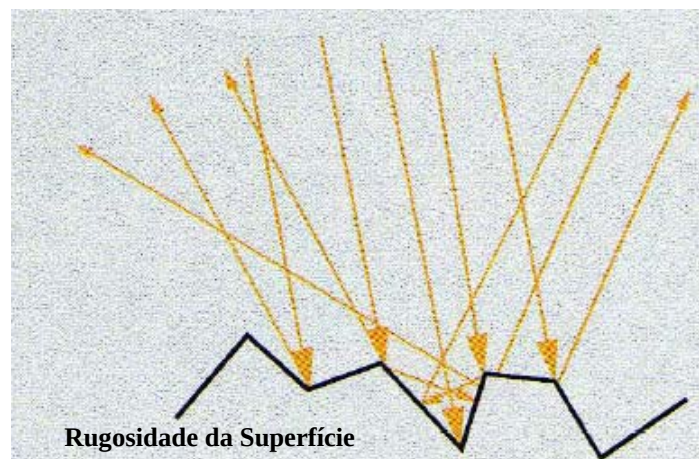


Figura 4.5 – Reflexão de raios incidentes em uma superfície com rugosidade (Lucchini Sidermeccanica e Zanola – catálogo).

A relação entre a rugosidade e a refletividade também foi estudada por Shimizu e Fujii (2003). Nesta pesquisa eles também encontraram a mesma relação, ou seja, o aumento da rugosidade diminuía a refletividade.

A Fig. 4.6 mostra a correlação entre os resultados de refletividade e rugosidade medida com o rugosímetro. A Fig. 4.7 mostra a relação de refletividade e rugosidade obtida com o interferômetro a laser. Percebe-se que existe uma correlação melhor com os resultados do rugosímetro. Ainda pode-se dizer que para rugosidades menores, objetivo do polimento, a relação é melhor com os resultados obtidos com o rugosímetro.

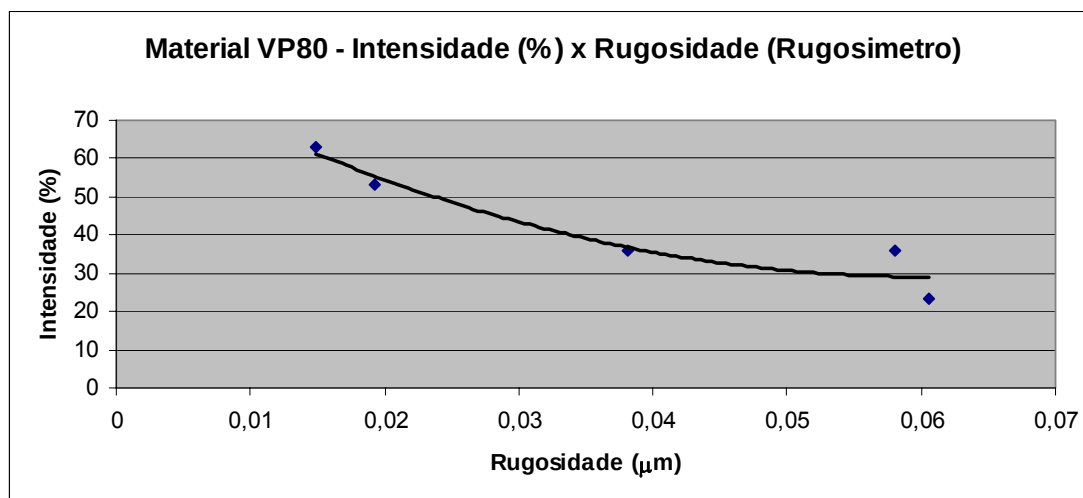


Figura 4.6 – Gráfico de tendência da intensidade (%) de refletividade do material VP80 e a rugosidade (R_a) obtida pelo rugosímetro.

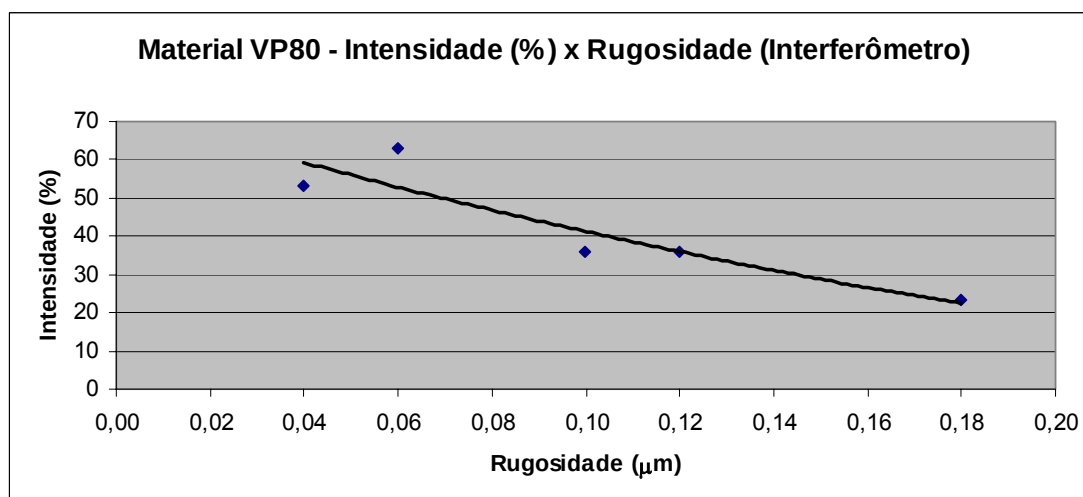


Figura 4.7 – Gráfico de tendência da intensidade (%) de refletividade do material VP80 e a rugosidade obtida pelo interferômetro a laser.

4.1.2. Análise utilizando o aço VP20 ISO

A Fig. 4.8 mostra os resultados da rugosidade em função do nível de acabamento para o aço VP20 ISSO. Observa-se um aumento na rugosidade desde a amostra lixada com abrasivo de granulometria 400 até a amostra lixada com abrasivo de granulometria 1000. As amostras polidas com pasta de diamante têm menores rugosidades, mas não existe diferença significativa entre os polimentos com 3 e 1 μm .

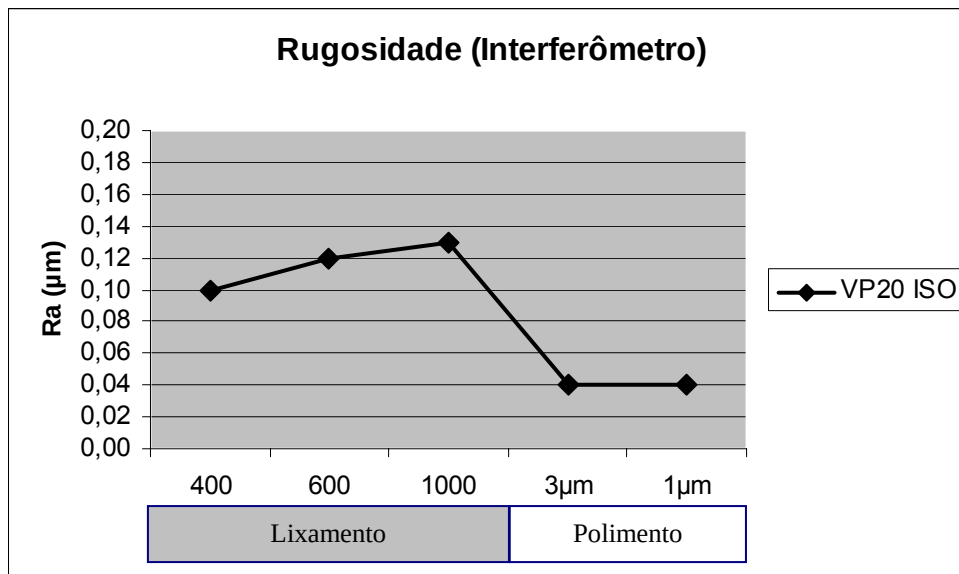


Figura 4.8 – Rugosidade (Ra) do aço VP20 ISO para amostras com diferentes granulometrias obtidas no interferômetro.

Na medição de rugosidade das amostras utilizando o rugosímetro (fig. 4.9), observou-se um aumento na rugosidade para amostra preparada com lixa de granulometria 1000 em relação a amostra preparada com lixa de granulometria 600, fato ocorrido também nas medições de rugosidade com interferômetro (fig.4.8). As amostras polidas com pasta de diamante de 3μm e 1μm tiveram uma considerável redução na rugosidade, verificada em ambos os métodos (interferômetro e rugosímetro). No entanto, as rugosidades medidas com o rugosímetro têm valores menores comparadas com os valores obtidos no interferômetro.

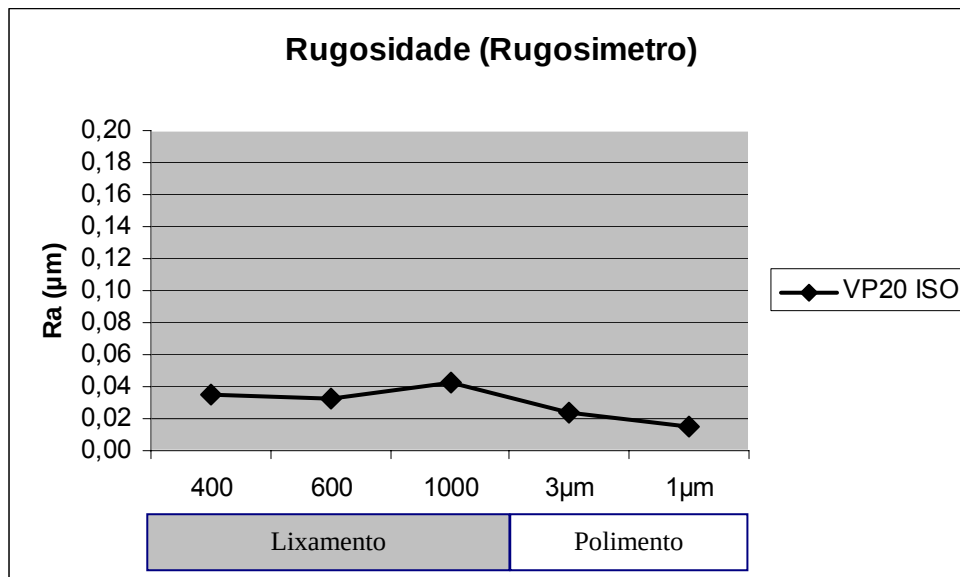


Figura 4.9 – Rugosidade (Ra) do aço VP20 ISO para amostras com diferentes granulometrias obtidas no rugosímetro.

A rugosidade do material VP20 ISO obtida pelo parâmetro Rz teve, assim como obtido no parâmetro Ra, a amostra lixada #1000 com a maior rugosidade. A variação medida entre amostras de granulometria #400 e #600 foi muito pequena, assim como, nas amostras de 3μm e 1μm. A figura 4.10 mostra a rugosidade Rz obtida pelo aço VP20 ISO.

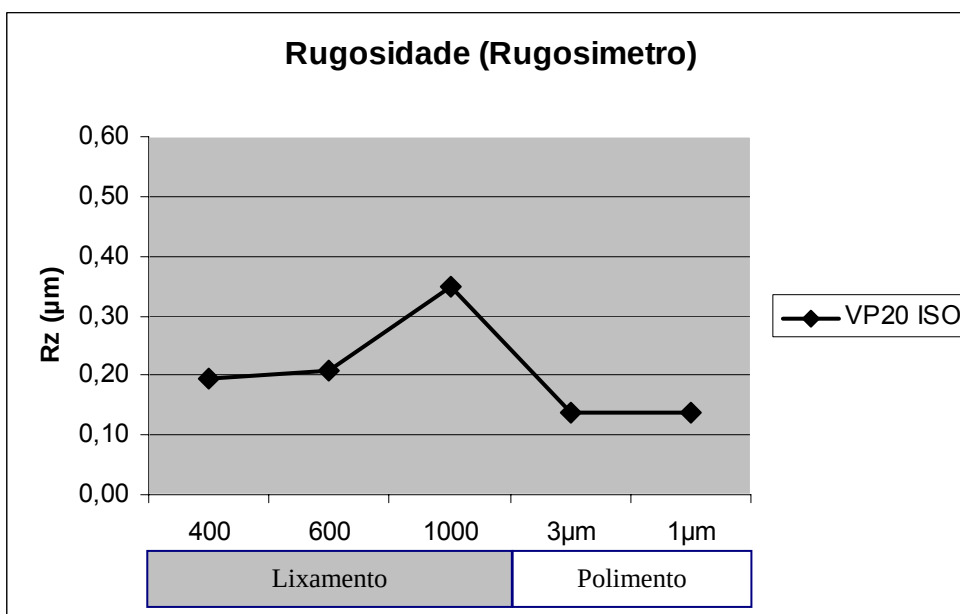


Figura 4.10 – Rugosidade (Rz) do aço VP20 ISO para amostras com diferentes granulometrias obtidas no rugosímetro.

A Fig. 4.11 mostra os resultados obtidos para a refletividade pelo método de fotoluminescência. Neste caso a refletividade aumenta com a preparação da superfície até a amostra correspondente ao lixamento com granulometria 1000 para depois ter uma pequena queda.

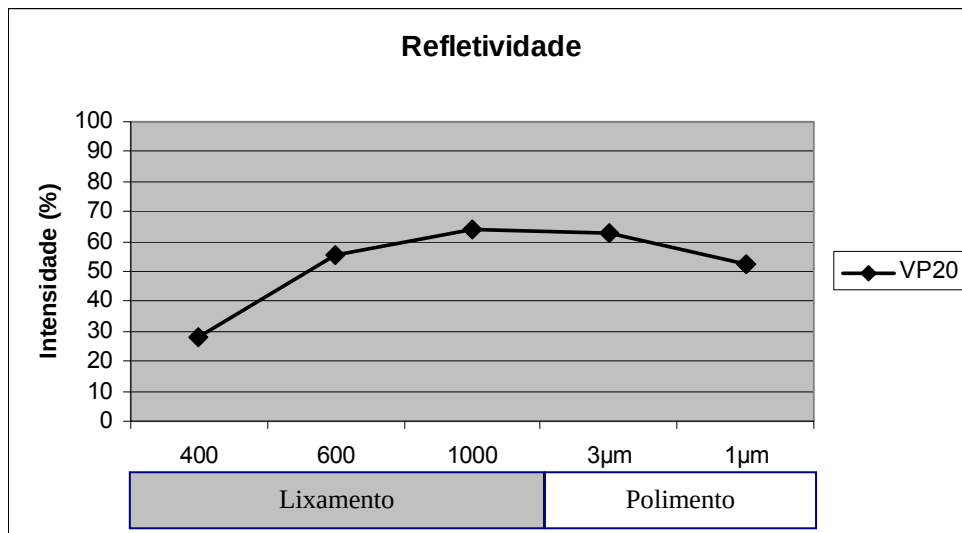


Figura 4.11 – Intensidade (%) de refletividade do aço VP20 ISO para amostras com diferentes granulometrias obtidas pela técnica de fotoluminescência.

Com estes resultados, não é possível encontrar uma boa relação com a rugosidade (medida pelo rugosímetro e interferômetro), como mostram as Figs. 4.12 e 4.13. A linha de tendência tem o mesmo formato para os dois métodos de medição de rugosidade. No entanto a relação é um pouco melhor com os resultados obtidos com o rugosímetro. Isto se deve ao fato de terem sido obtidos valores menores neste caso.

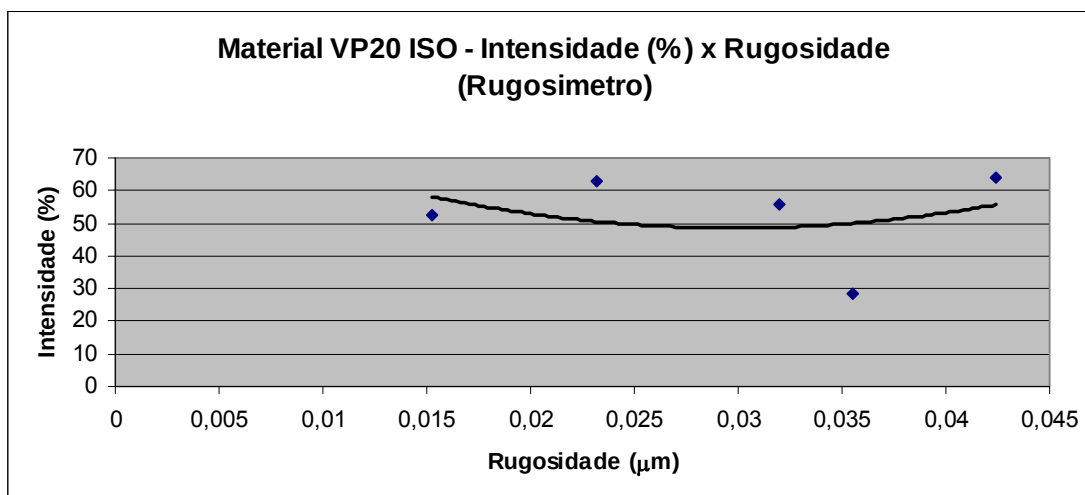


Figura 4.12 – Gráfico de tendência da intensidade (%) de refletividade do material VP20 ISO e a rugosidade obtida pelo rugosímetro.

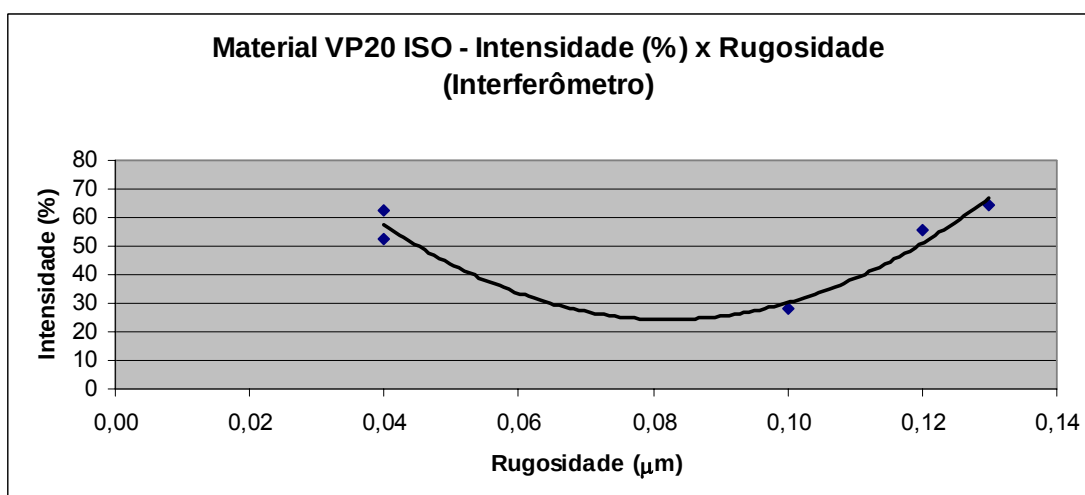


Figura 4.13 – Gráfico de tendência da intensidade (%) de refletividade do material VP20 ISO e a rugosidade obtida pelo interferômetro a laser.

4.1.3. Análise utilizando o aço 304 UF

A rugosidade apresentada na análise do aço 304 UF realizado pelo interferômetro a laser pode ser observado na figura 4.14 abaixo. Os resultados obtidos estão de acordo com o esperado, ou seja, a rugosidade diminuiu de acordo com a granulometria utilizada na preparação das amostras, desta forma quanto menor a granulometria das lixas e pastas de diamantes usadas menor foi a rugosidade. A ressalva fica para as amostras de 3 μm e 1 μm , que apresentam valores de rugosidade similares.

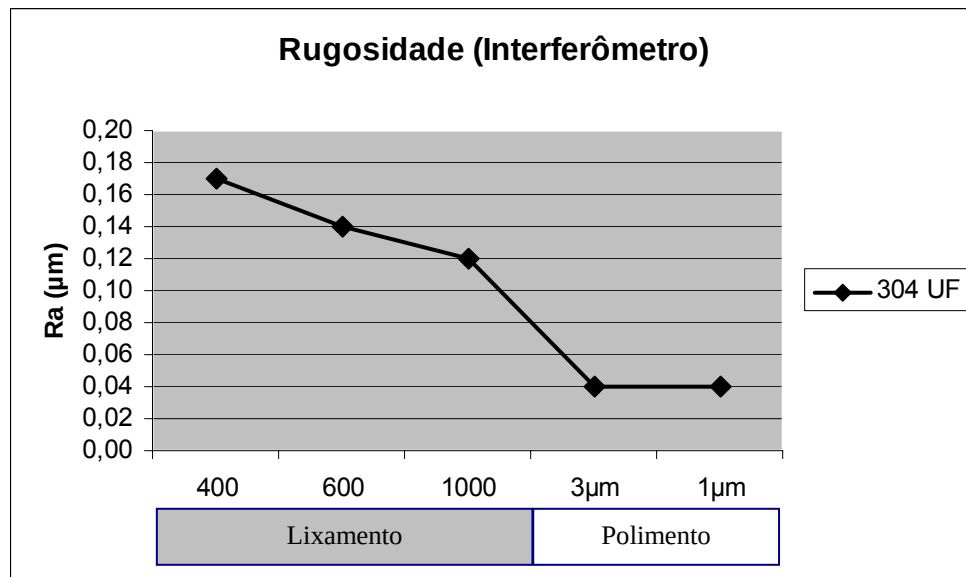


Figura 4.14 – Rugosidade (Ra) do aço 304 UF para amostras com diferentes granulometrias obtidas no interferômetro.

Na rugosidade (Ra) obtida pelo rugosímetro (fig. 4.15), tem-se praticamente o mesmo padrão obtido pelo interferômetro, sendo que os valores de rugosidade obtidos pelo rugosímetro são menores para todas as amostras o que mais uma vez evidencia a melhor resolução do rugosímetro.

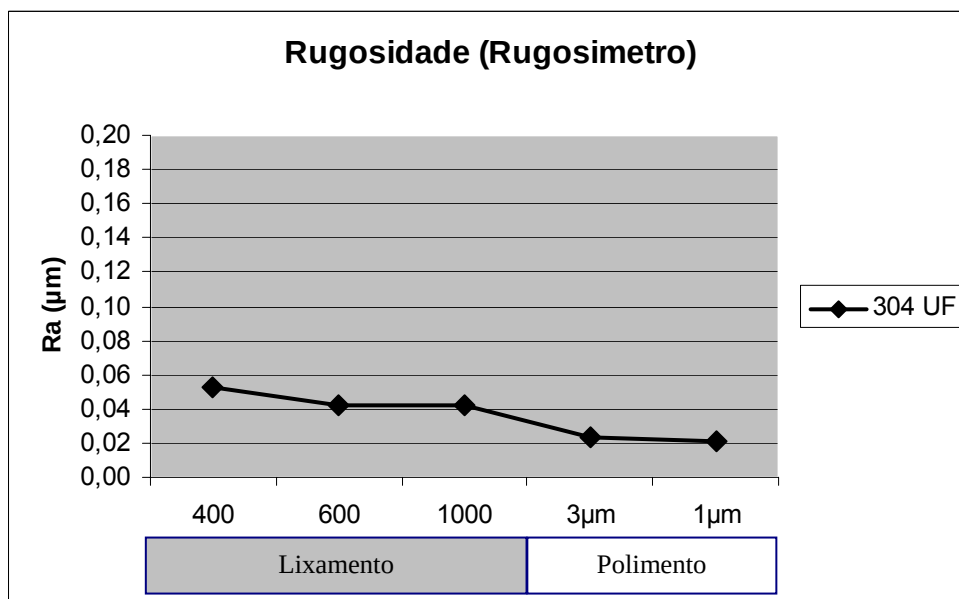


Figura 4.15 – Rugosidade (Ra) do aço 304 UF para amostras com diferentes granulometrias obtidas no rugosímetro.

A rugosidade obtida pelo parâmetro Rz segue o mesmo padrão dos resultados obtidos pelo parâmetro Ra. A figura 4.16 mostra os valores obtidos da rugosidade Rz.

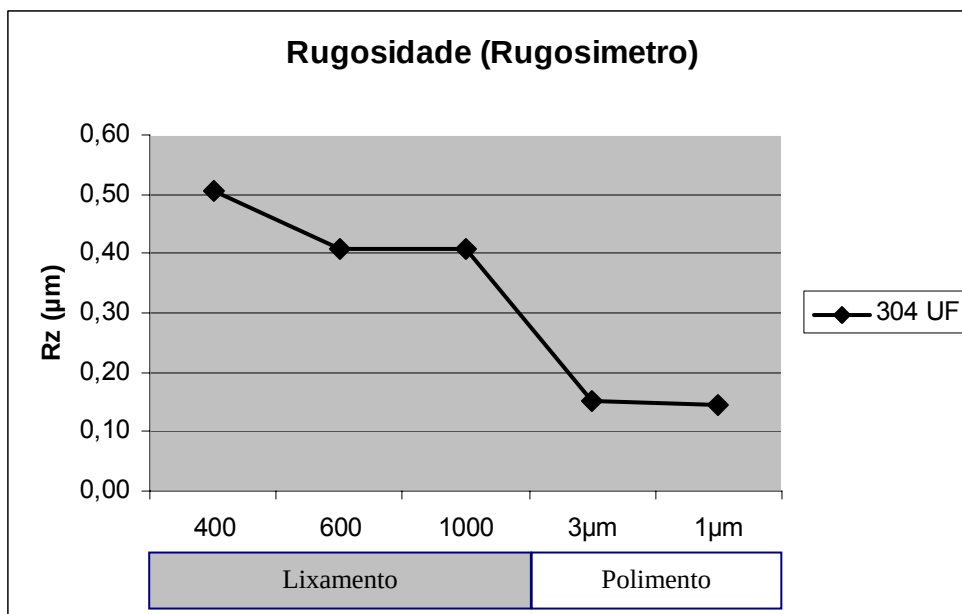


Figura 4.16 – Rugosidade (Rz) do aço 304 UF para amostras com diferentes granulometrias obtidas no rugosímetro.

A Fig. 4.17 mostra os resultados de refletividade obtidos pela técnica de fotoluminescência para o aço 304 UF. Neste caso, a melhor refletividade foi obtida pela amostra preparada com lixa de granulometria 600. Apesar de não apresentar uma relação esperada entre refletividade e rugosidade (diretamente proporcional), a correlação entre os resultados obtidos é boa, principalmente para os resultados de rugosidade obtidos com o rugosímetro, como mostra a Fig. 4.18.

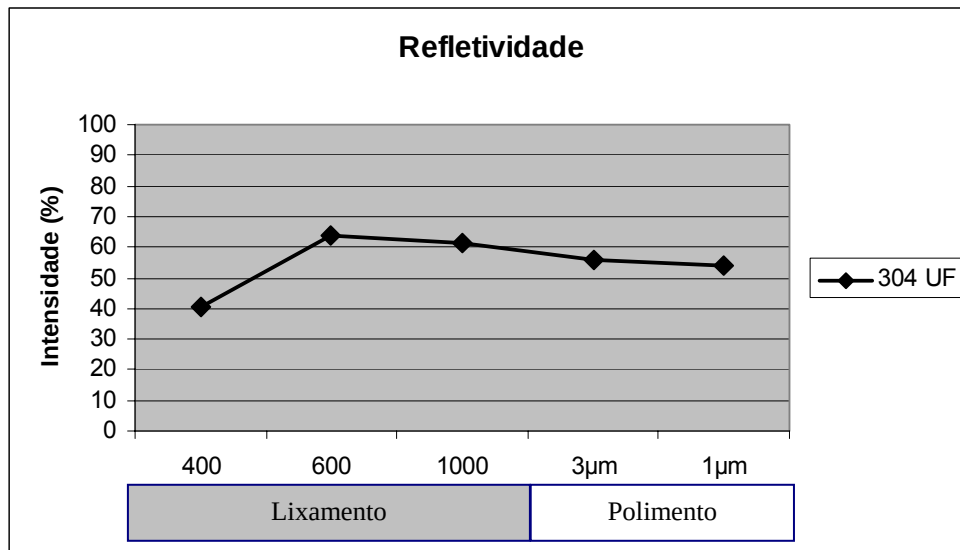


Figura 4.17 – Intensidade (%) de refletividade do aço 304 UF para amostras com diferentes granulometrias obtidas pela técnica de fotoluminescência.

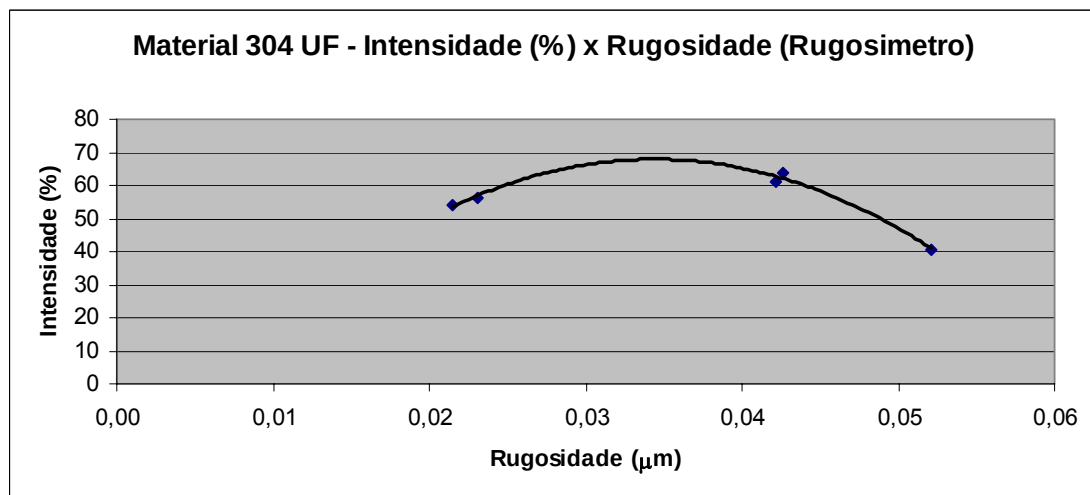


Figura 4.18 – Gráfico de tendência da intensidade (%) de refletividade do material 304 UF pela rugosidade (Ra) obtida através rugosímetro.

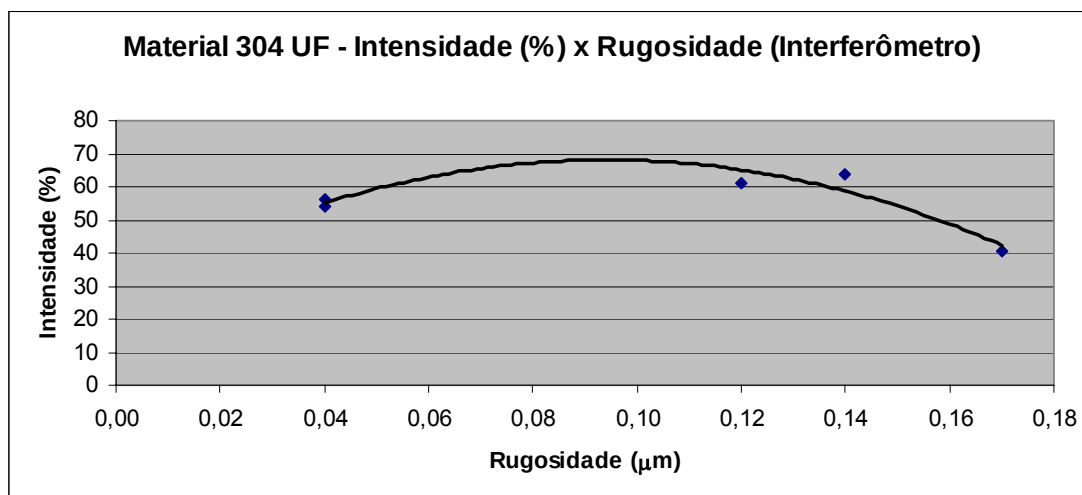


Figura 4.19 – Gráfico de tendência da intensidade (%) de refletividade do material 304 UF pela rugosidade (R_a) obtida através do interferômetro a laser.

Não será discutido neste trabalho a diferença entre os resultados de rugosidade obtidos pelos dois equipamentos utilizados no trabalho. No entanto, o comprimento de amostragem (*cut-off*) para o rugosímetro é maior do que no interferômetro. Isto deve influenciar nos resultados, principalmente para valores de rugosidade maiores.

4.2. Comparação das rugosidades obtidas para os materiais utilizados

Nesta sessão serão analisados os resultados das rugosidades obtidas para os materiais utilizados. Serão considerados apenas os resultados obtidos com o rugosímetro, pois os resultados se mostraram mais coerentes.

4.2.1. Comparação da rugosidade dos materiais lixados com granulometrias de 400, 600 e 1000

Na comparação dos materiais lixados com granulometria de 400 (fig. 4.20), o aço VP 20 ISO foi o que teve a menor rugosidade (R_a) entre os três materiais. A explicação para este fato pode ser a adição residual de Ca (Mesquita et al., 2005), tornando mais fácil a remoção do cavaco. Os mesmos resultados são verificados quando o parâmetro de rugosidade é o R_z (fig. 4.21).

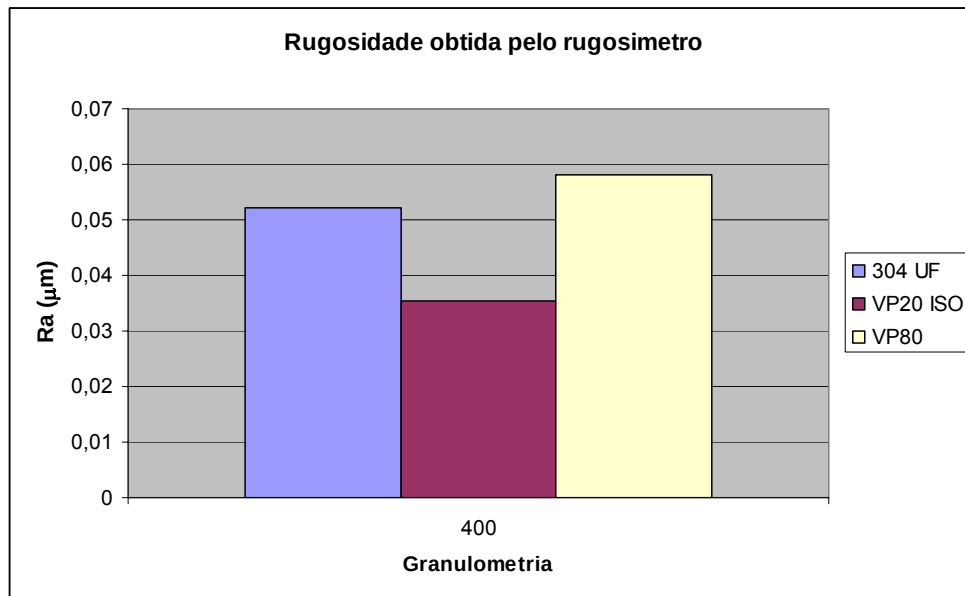


Figura 4.20 – Rugosidade (Ra) dos materiais analisados lixados com granulometrias #400.

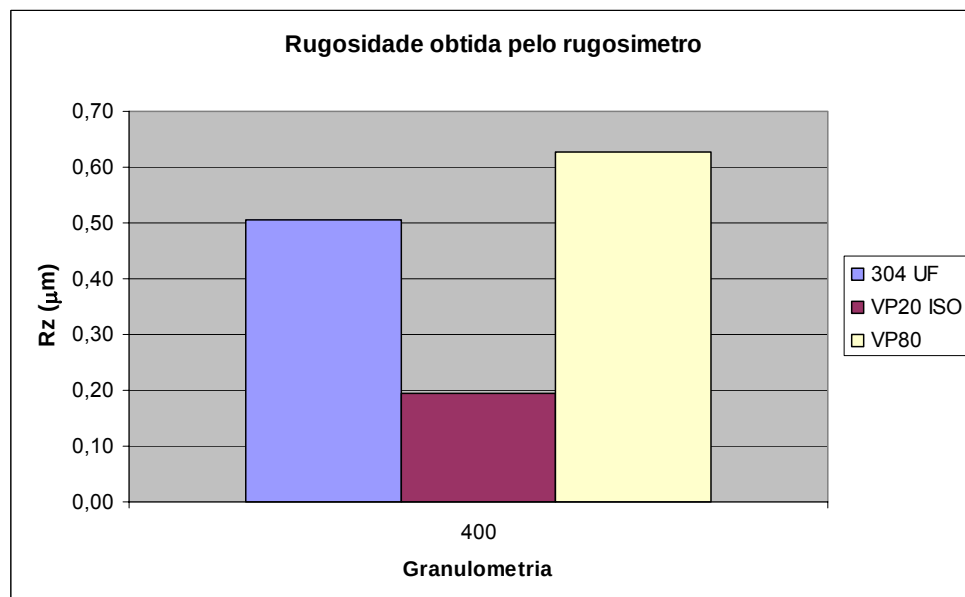


Figura 4.21 – Rugosidade (Rz) dos materiais analisados lixados com granulometrias #400.

O comportamento dos materiais para o lixamento com granulometria #600 (fig. 4.22) manteve-se o mesmo padrão do lixamento com granulometria #400. A mudança de parâmetro de rugosidade (Rz) também não interferiu nos resultados como mostrado na figura 4.23

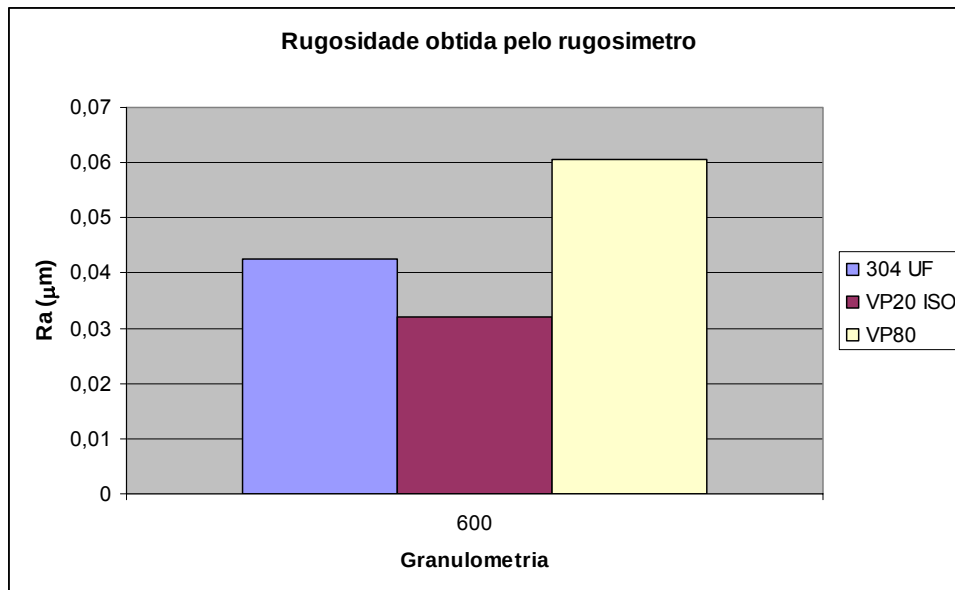


Figura 4.22 – Rugosidade (Ra) dos materiais analisados lixados com granulometrias #600.

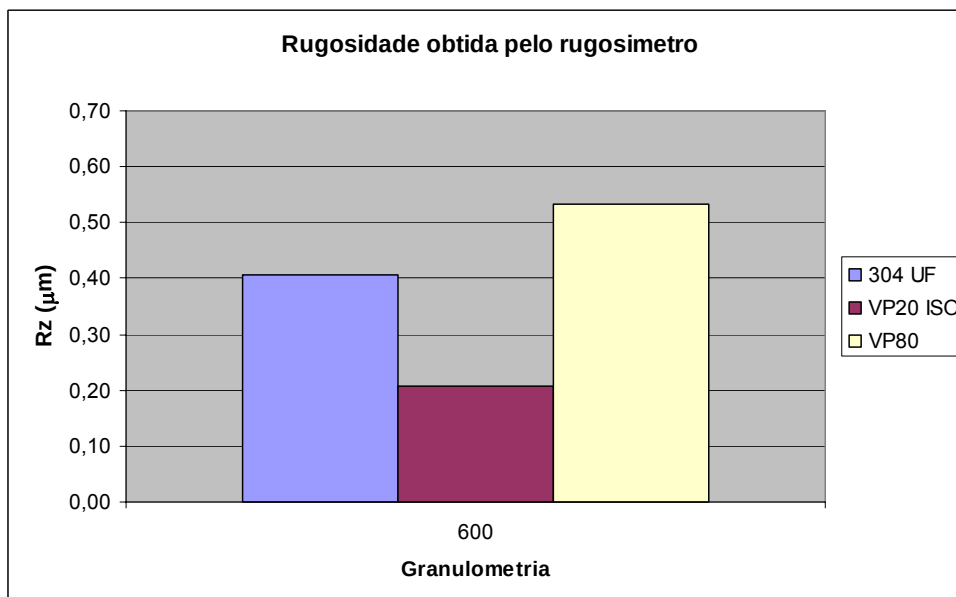


Figura 4.23 – Rugosidade (Rz) dos materiais analisados lixados com granulometrias #600.

O resultado da medição de rugosidade utilizando os parâmetros Ra e Rz para os materiais lixados com granulometria #1000 pode ser observado nas figuras 4.24 e 4.25 abaixo. O material VP80 obteve a menor rugosidade nestes casos.

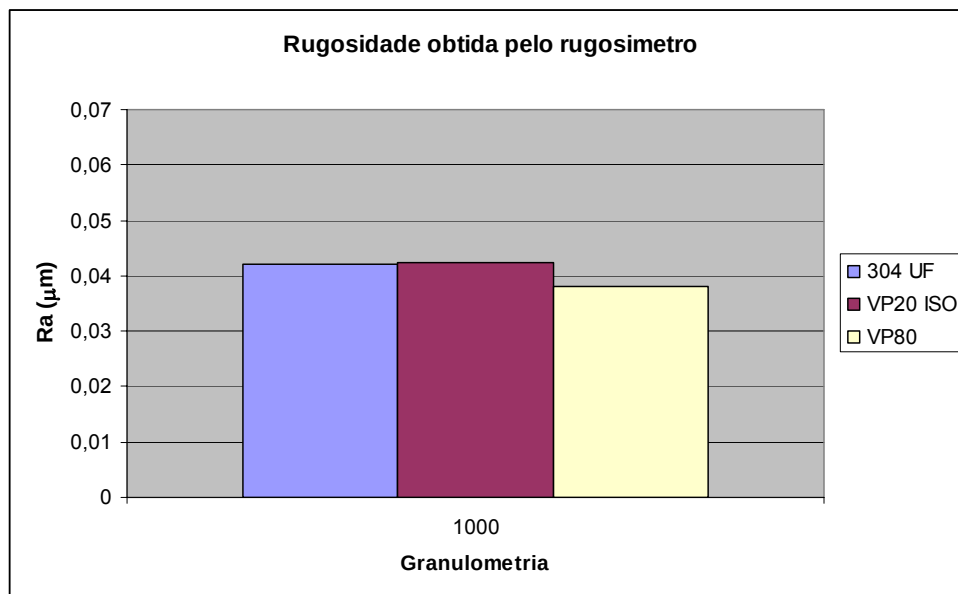


Figura 4.24 – Rugosidade (Ra) dos materiais analisados lixados com granulometrias #1000.

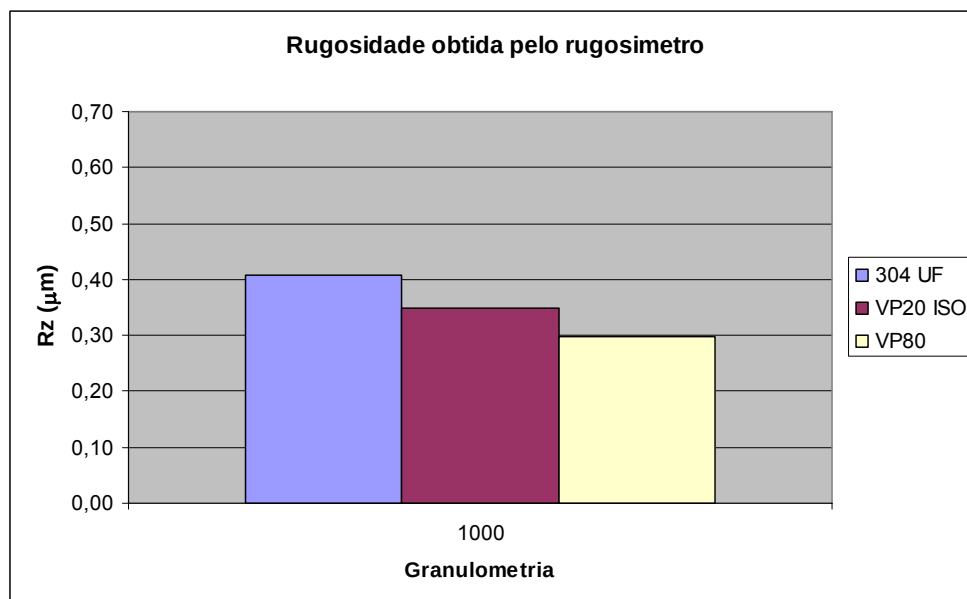


Figura 4.25 – Rugosidade (Rz) dos materiais analisados lixados com granulometrias #1000.

Deve ser observado que o VP20 ISO apresentou valores bem próximos de rugosidade para as três granulometrias, ou seja, independente da lixa utilizada, o acabamento (medido através da rugosidade Ra) é bem próximo.

4.2.2. Comparação da rugosidade dos materiais após o polimento com pasta de diamante

No polimento dos materiais com $3\mu\text{m}$ o aço VP80 teve a menor rugosidade medida em todos os testes, fato que deve ser explicado pelo método de obtenção do aço, pois, além da fusão e refino, são empregados processos de refusão por VAR (vacuum arc remelting). Neste processo o lingote produzido é refundido sob vácuo o que traz vantagens como a redução do teor de elementos como O, N e H, a eliminação de inclusões grosseiras e o refino da microestrutura. Esta microestrutura mais refinada traz uma melhor polibilidade do material (Mesquita et al., 2005). A figura 4.26 mostra a rugosidade (Ra) dos materiais polidos com acabamento de $3\mu\text{m}$.

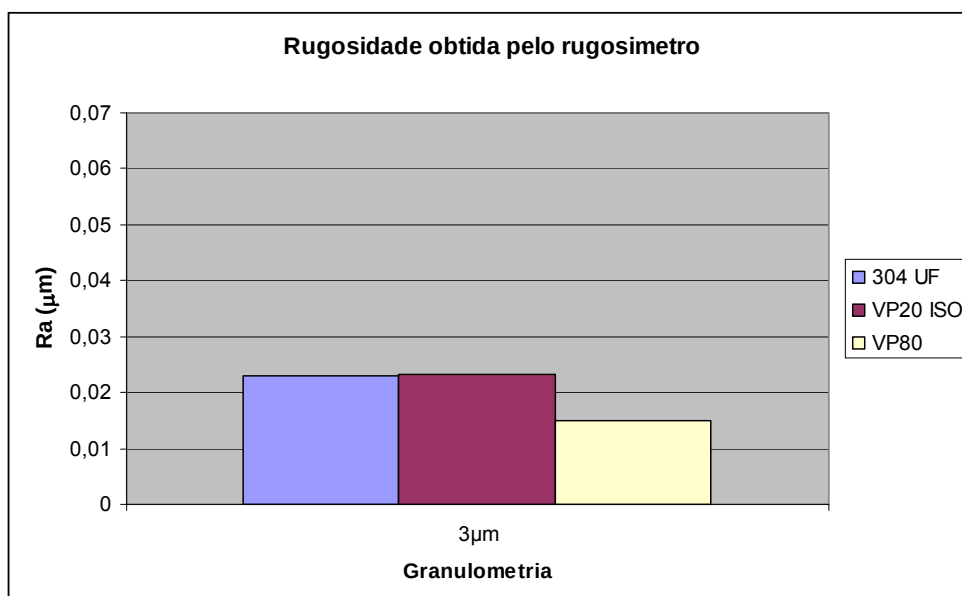


Figura 4.26 – Rugosidade (Ra) dos materiais analisados polidos com granulometria de $3\mu\text{m}$.

Os resultados de rugosidade (R_z) para os materiais polidos com $3\mu\text{m}$ (fig. 4.27) ficaram bem próximos para os três materiais, diferente dos resultados obtidos quando utilizado o parâmetro Ra (fig. 4.26). Neste caso, o valor de rugosidade (Ra) do aço VP80 foi menor.

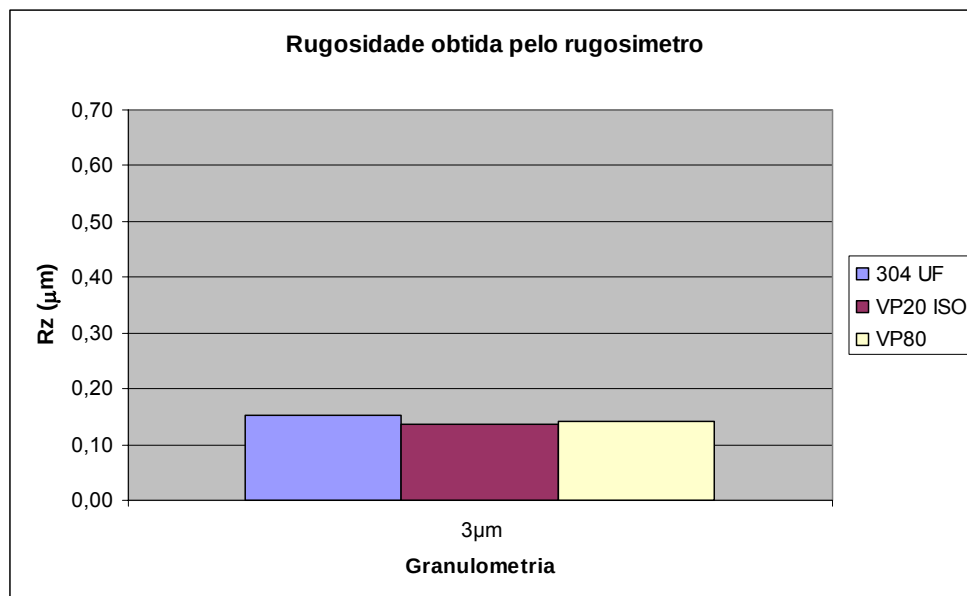


Figura 4.27 – Rugosidade (Rz) dos materiais analisados polidos com granulometria de 3μm.

Os resultados obtidos para rugosidade (Ra) no polimento com 1μm (fig. 4.28) apresentaram algumas diferenças. No aço VP80 houve um aumento na rugosidade, fato que pode ser explicado por um *overpolishing* do material o que causa um aumento na rugosidade, indicando assim que o melhor polimento deste material ocorre para a granulometria de 3μm. O aço VP20 ISO teve uma diminuição na rugosidade, mas ainda assim maior do que a encontrada para o aço VP80 para a granulometria de 3μm (fig. 4.26). Para os resultados de rugosidade utilizando o parâmetro Rz (fig. 4.29) têm-se uma pequena diminuição para os aços VP20 ISO e o aço 304 UF quando comparado com os resultados obtidos para o polimento com pasta de 3μm (fig. 4.27). Nesta mesma análise tem um aumento na rugosidade quando o aço analisado é o VP80.

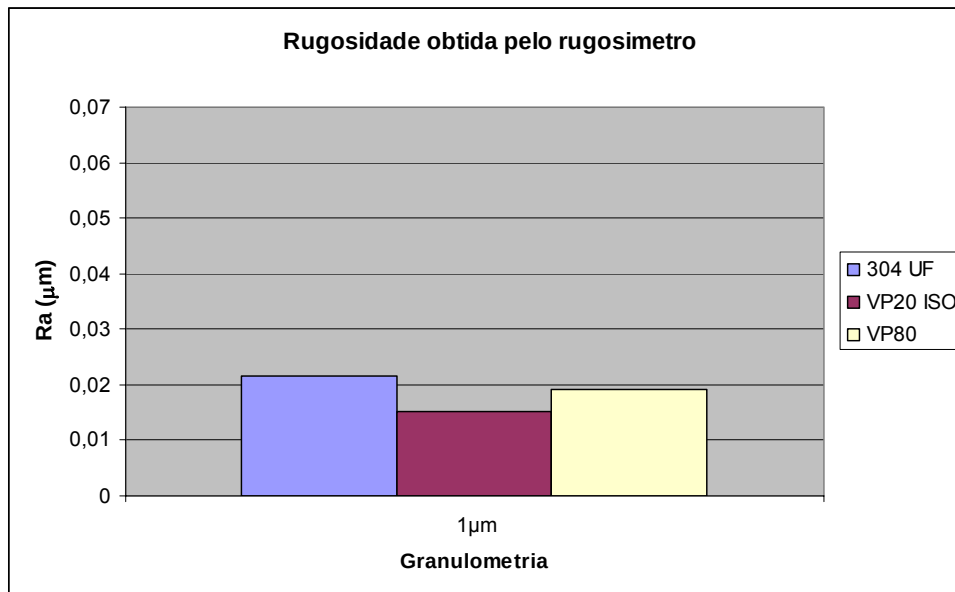


Figura 4.28 – Rugosidade (Ra) dos materiais analisados polidos com granulometria de 1 μm.

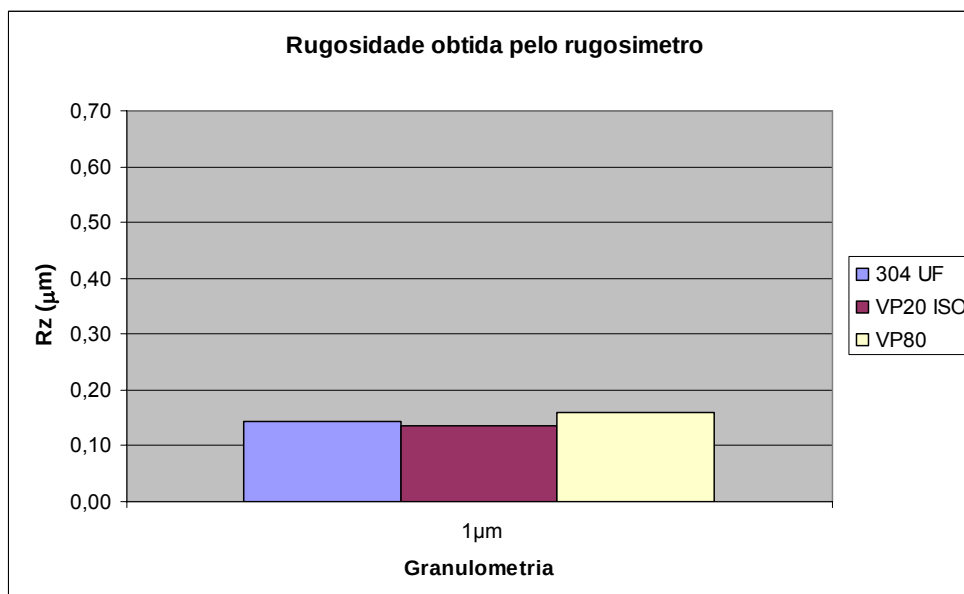


Figura 4.29 – Rugosidade (Rz) dos materiais analisados polidos com granulometria de 1 μm.

4.3. Relação entre rugosidade e dureza dos materiais.

A Fig. 4.30 e 4.31 mostra a relação entre rugosidade e dureza dos materiais utilizando os resultados das amostras preparadas com polimento com pasta de diamante de

3 e 1 μ m. Deve ser esperado uma relação inversa entre estes valores, como observado por Shimizu e Fugii (2003).

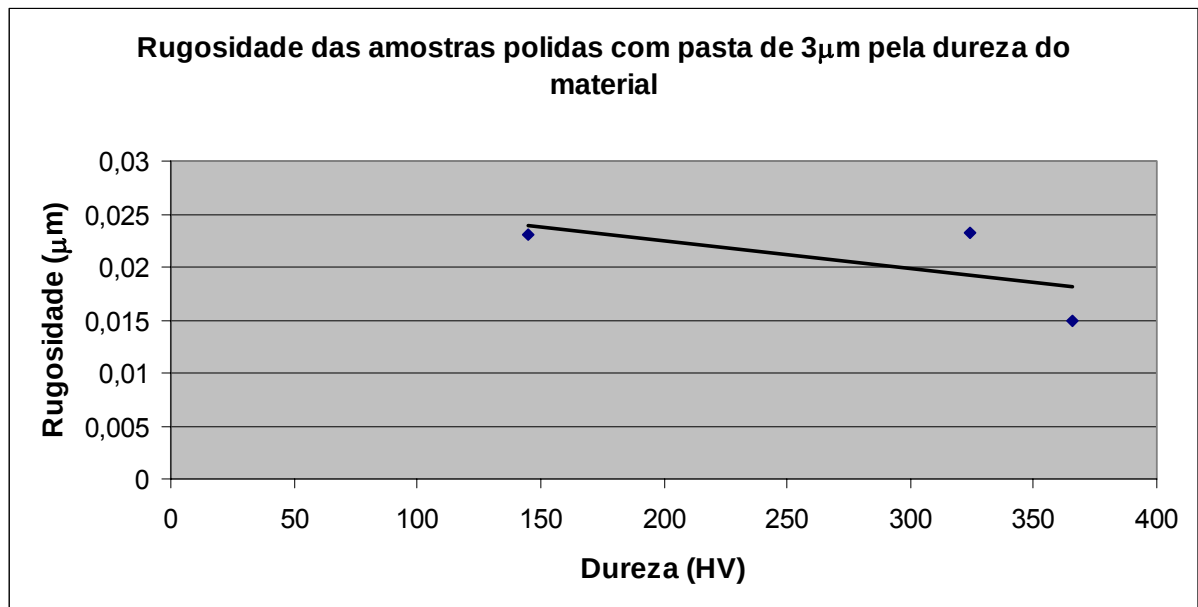


Figura 4.30 – Rugosidade (Ra) dos materiais para amostras de 3 μ m em relação a dureza.

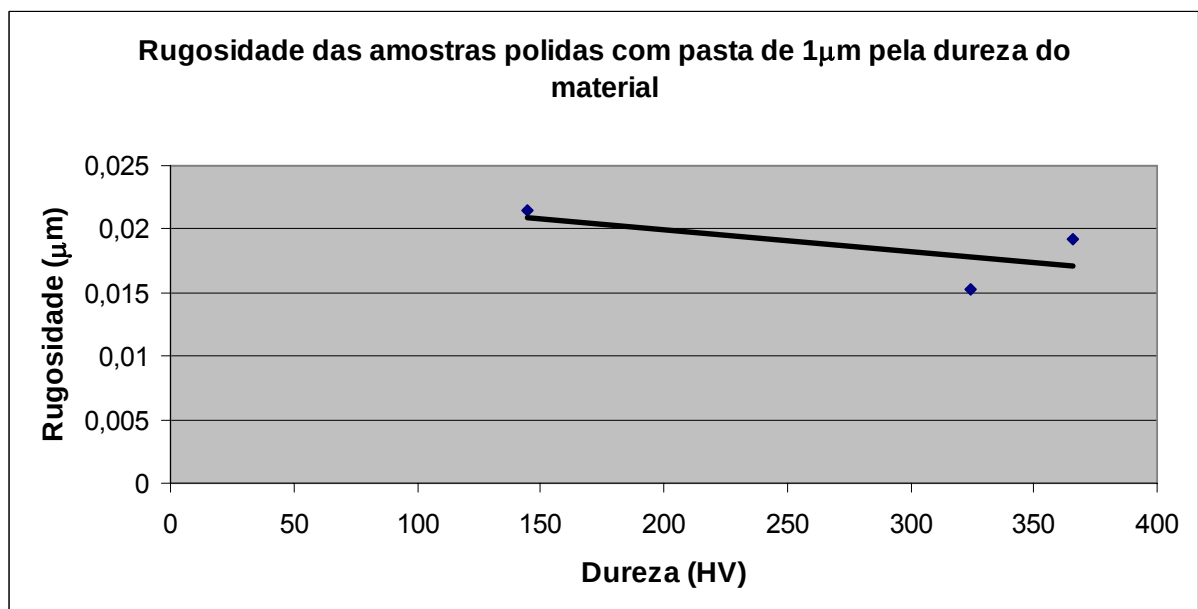


Figura 4.31 – Rugosidade (Ra) dos materiais para amostras de 1 μ m pela dureza

A seguir (fig. 4.32 e 4.33) tem-se a mesmas análises que foram realizadas nas figuras 4.30 e 4.31, sendo que o parâmetro de rugosidade utilizado neste caso foi o Rz. Neste caso não foi observado a mesma relação obtida por Shimizu e Fugii (2003).

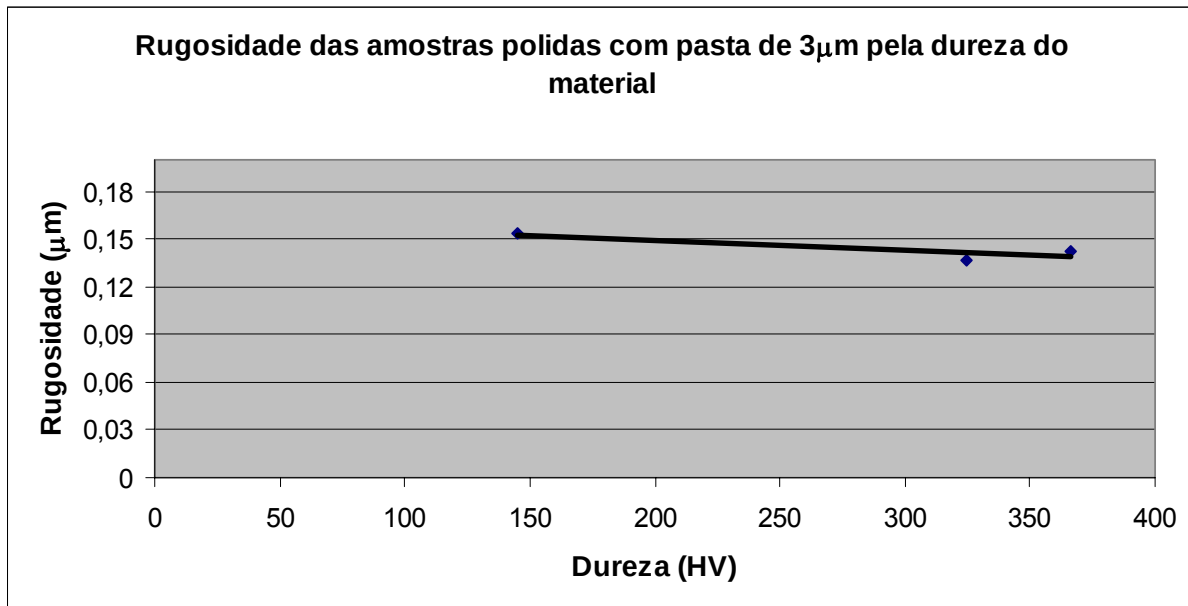


Figura 4.32 – Rugosidade (Rz) dos materiais para amostras de $3\mu\text{m}$ pela dureza

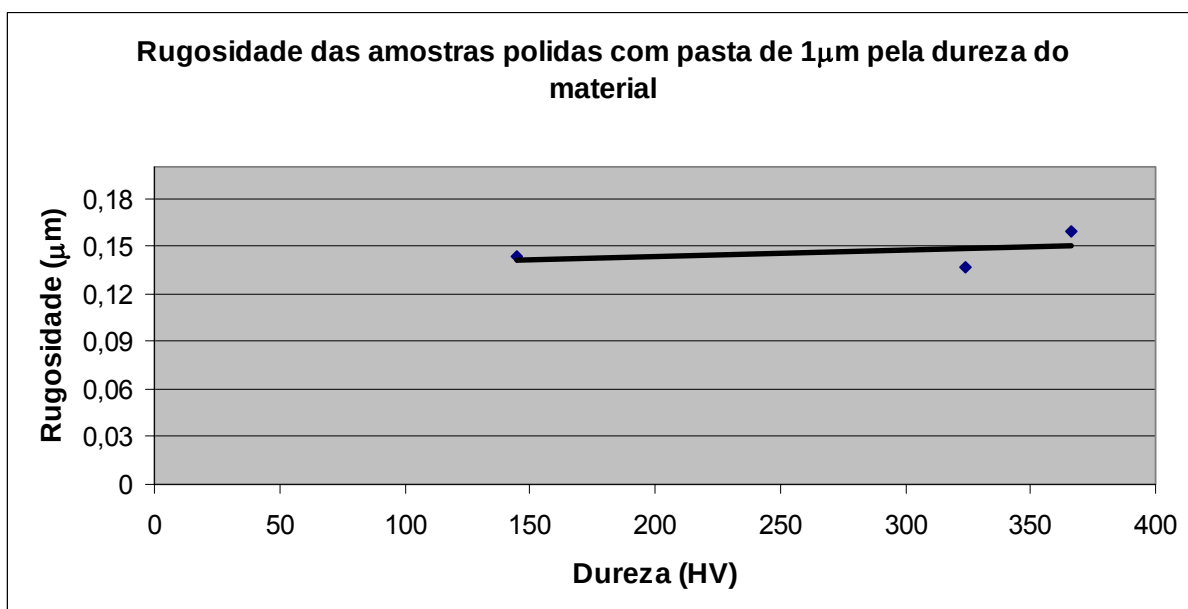


Figura 4.33 – Rugosidade (Rz) dos materiais para amostras de $1\mu\text{m}$ pela dureza

Nos diversos processos de polimento, a característica final é avaliada principalmente a olho nu e dependerá muito da experiência do polidor. Nos processos de polimento tem-se a busca do máximo polimento para cada material. Diante disso, é válido demonstrar os valores de menor rugosidade obtidos pelos materiais em relação a dureza. A Figura 4.34 e 4.35 mostram a menor rugosidade (Ra e Rz) de cada material pela dureza, sendo possível verificar uma tendência na diminuição da rugosidade (Ra) com o aumento da dureza do material (fig. 4.34). Para a rugosidade Rz (fig. 4.35) não foi possível observar qualquer variação.

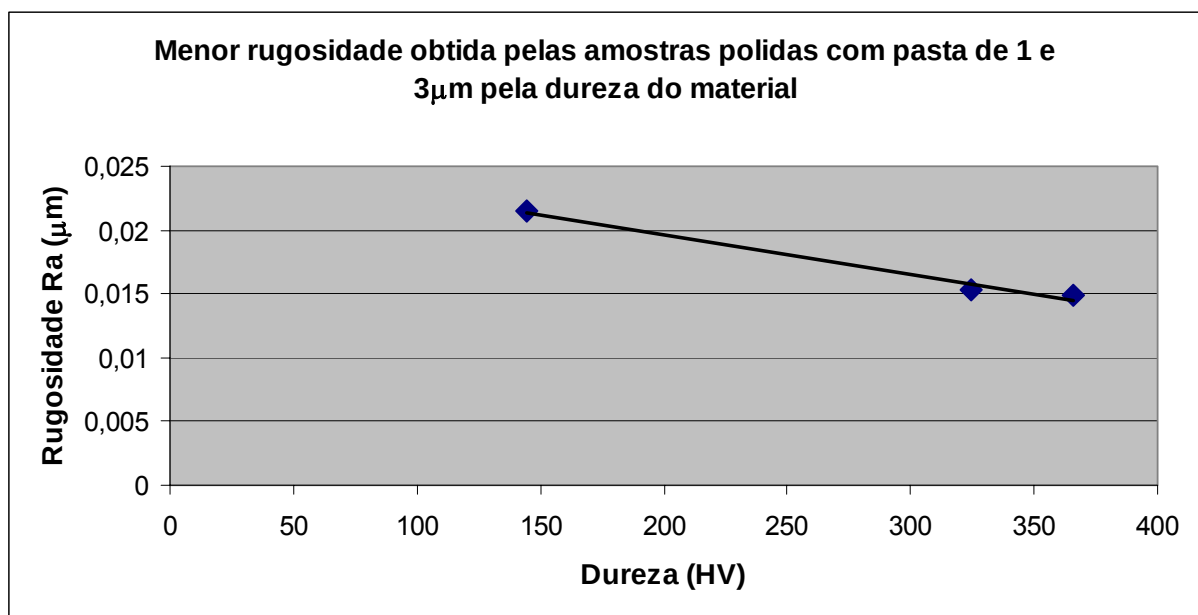


Figura 4.34 – Menor rugosidade (Ra) obtida dos materiais para amostras de 3μm e 1μm pela dureza.

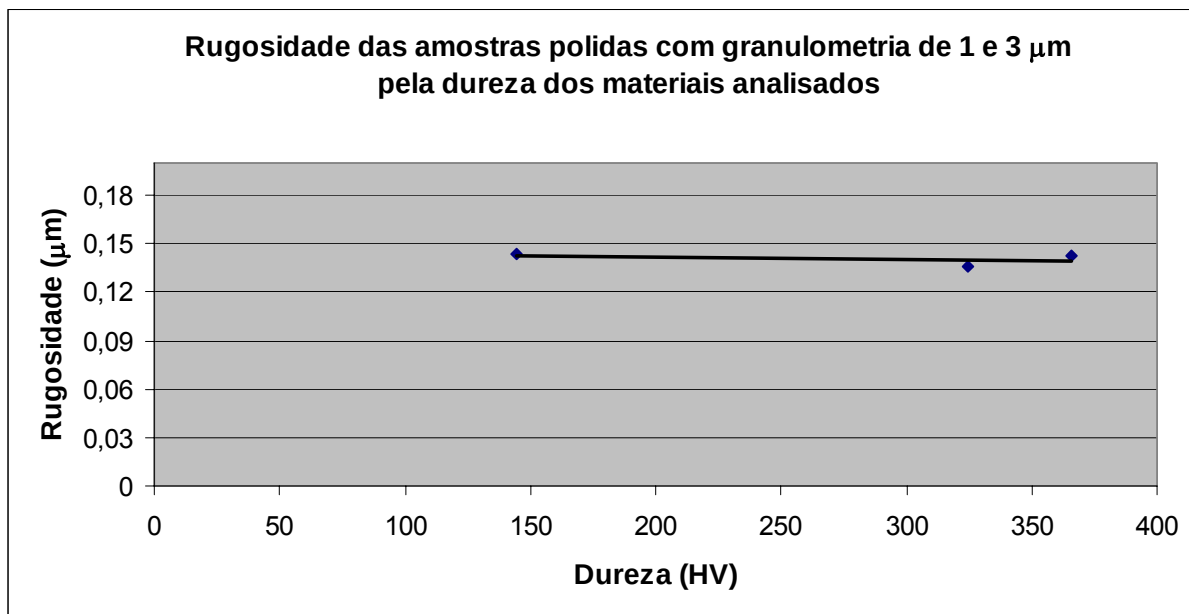


Figura 4.35 – Menor rugosidade (R_z) obtida dos materiais para amostras de $3\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$ pela dureza.

4.4. Evolução do acabamento com o tempo de polimento para os materiais

Nesta sessão serão discutidos os resultados obtidos para os três materiais analisados variando o tempo de polimento. Realizaram-se medidas de rugosidade ao longo de 25 minutos com intervalos de 5 minutos para cada medida durante o polimento. As medidas foram realizadas no interferômetro a laser.

4.4.1. Polimento com pasta de diamante de $3\mu\text{m}$

Na variação da rugosidade pelo tempo para os três materiais verificou-se que o material VP20 ISO, para todos os intervalos medidos, manteve-se com uma menor variação na rugosidade medida. No entanto, a rugosidade (após 25 minutos de polimento) dos três materiais foi muito próxima, fato que pode ser observado na figura 4.36 abaixo.

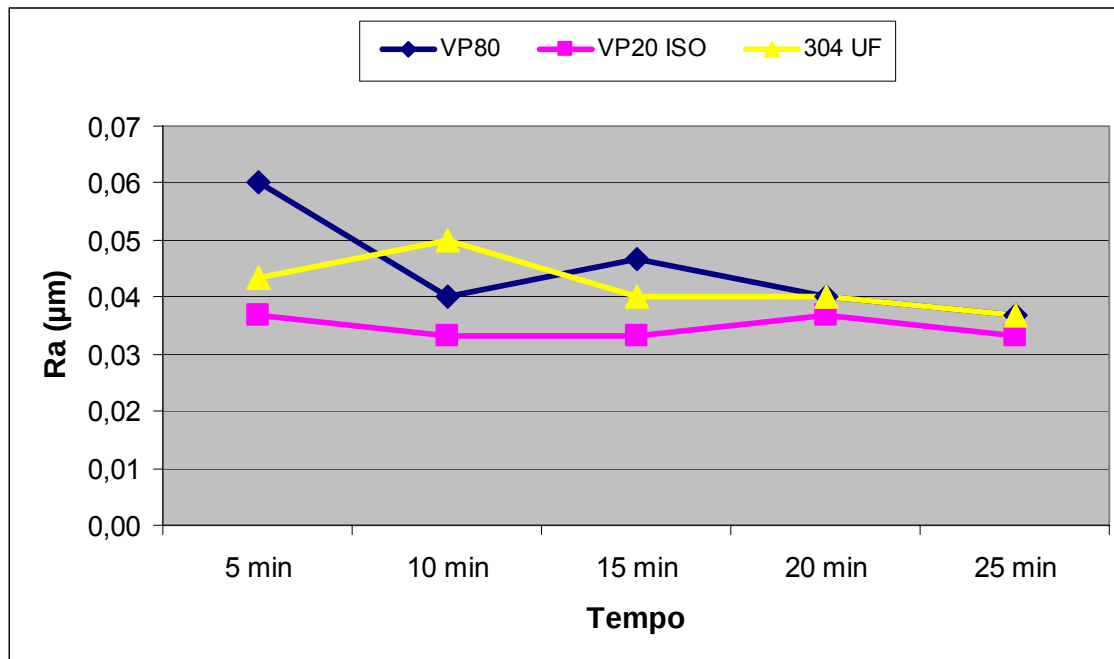


Figura 4.36 – Medida de rugosidade para cada material com acabamento de $1\mu\text{m}$ com variação de tempo.

A Fig. 4.36 mostra que os níveis de rugosidade final das amostras podem ser atingidos após os 5 minutos iniciais de polimento. Valores de R_a de $0,4\mu\text{m}$ são obtidos após este tempo de polimento e não se obtém melhora na rugosidade. No entanto, a rugosidade para o material VP80 atinge valores próximos de $0,06\mu\text{m}$ após os primeiros 5 minutos de polimento, mas melhora após 10 minutos, atingindo valores próximos dos outros materiais. Talvez por ter uma dureza média maior, este material necessita de um tempo maior para atingir o nível final de rugosidade.

4.4.2. Materiais com polimento de $1\mu\text{m}$

Os resultados da variação da rugosidade com tempo de polimento para os três materiais podem ser observados na Fig. 4.37. O aço 304 UF aparentemente tem sua rugosidade aumentada com o tempo de polimento. Neste material em virtude do grande aumento que ocorre entre o polimento de 10 até 15 minutos é possível que tenha ocorrido um fenômeno conhecido como *pitting* (a explicação detalhada deste acontecimento pode ser verificado na figura 2.6) sendo que uma das principais causas é a pureza do material. A figura 4.38 mostra a microestrutura do aço 304 UF. Nesta microestrutura é possível verificar algumas impurezas no material o que possivelmente tenha causado o aumento da rugosidade no intervalo de polimento de 10 a 15 minutos.

As rugosidades dos aços VP80 e VP20 ISO são muito próximas durante os 20 minutos de polimento. Para o VP80 não é observado nenhuma melhora na rugosidade, enquanto que o VP20 mostra indícios que a rugosidade pode ser prejudicada se o tempo de polimento exceder os 20 minutos. Este valor vai depender de vários fatores que, não foram investigados neste trabalho.

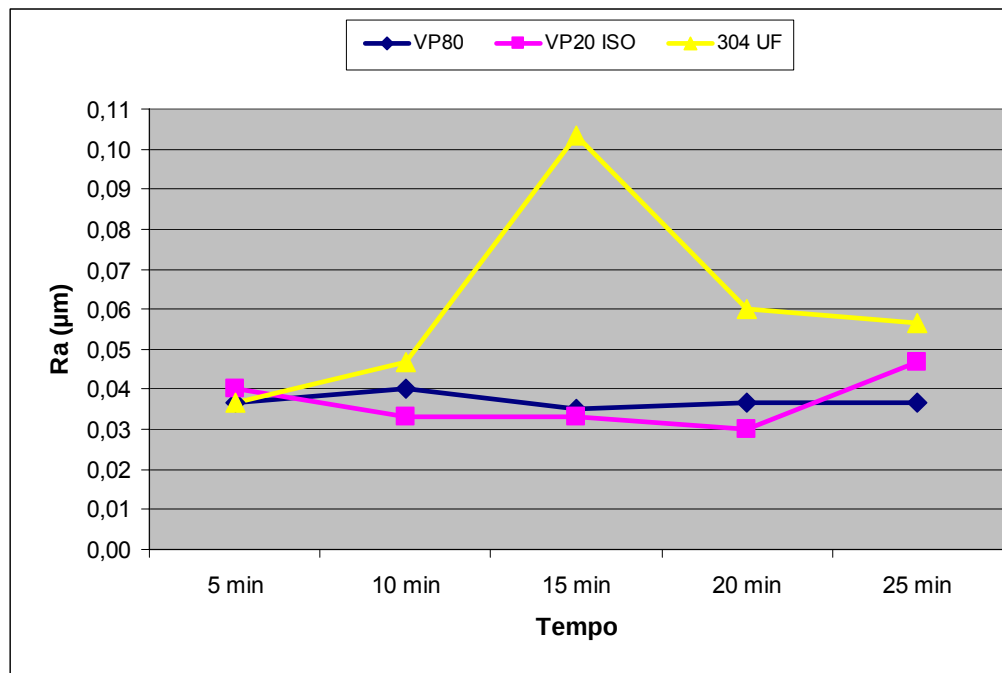


Figura 4.37 – Medida de rugosidade para cada material com acabamento de 1µm com variação de tempo.

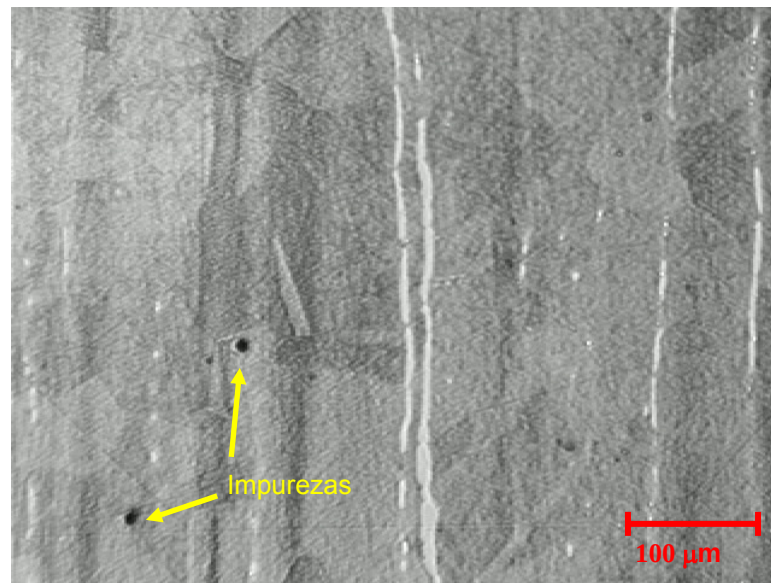


Figura 4.38 – Microestrutura do aço 304 UF atacada com nital (3%).

4.5. Análise das imagens dos materiais com a variação da granulometria do abrasivo utilizado

Nesta sessão é feita uma análise das características de cada superfície dos materiais analisados com a variação da granulometria do abrasivo utilizado. Nas figuras 4.39, 4.40 e 4.41 tem – se os aços VP80, VP20 ISO e 304 UF, respectivamente. De uma forma geral, é possível analisar as imagens apenas das superfícies polidas e para esta análise visual as imagens obtidas para o aço VP80 e VP20 ISO estão mais próximas de um mesmo padrão o que não ocorre para o aço 304 UF, pois é possível observar nesta imagem uma superfície com um pior acabamento.

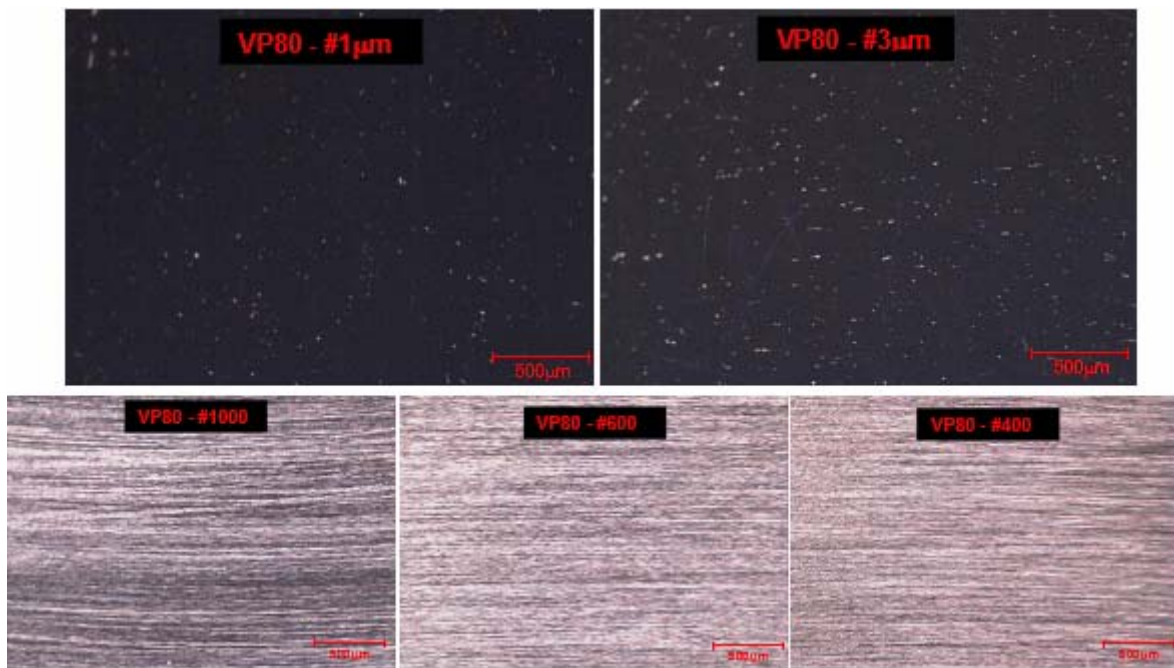


Figura 4.39 – Imagens de amostras obtidas para o aço VP80.

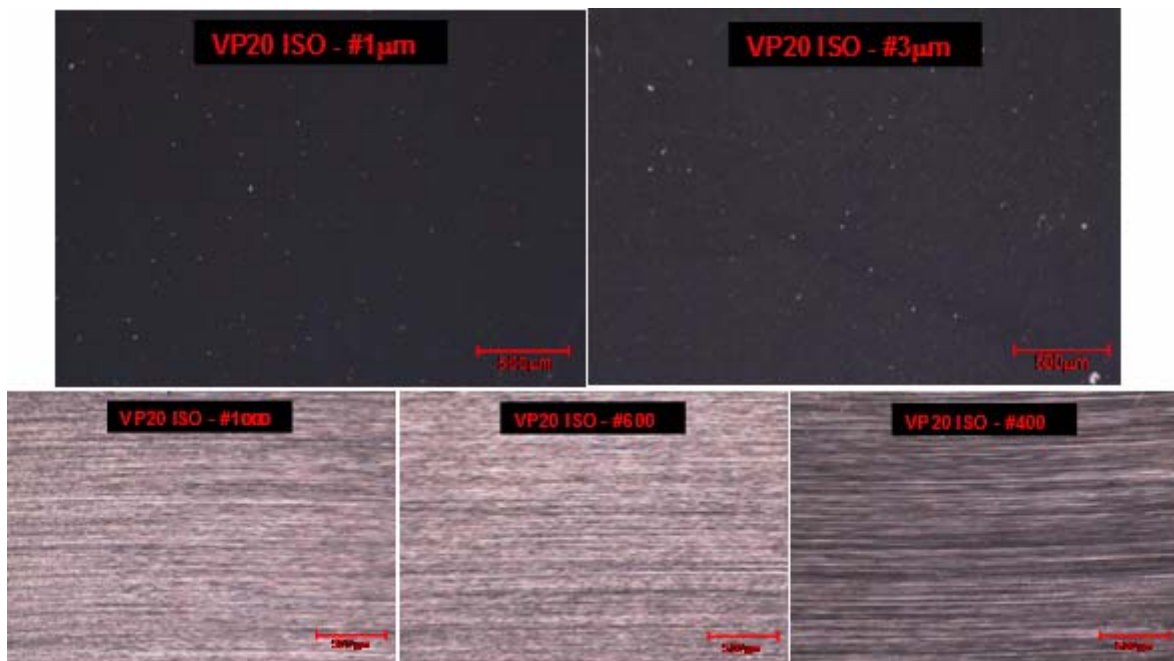


Figura 4.40 – Imagens de amostras obtidas para o aço VP20 ISO.

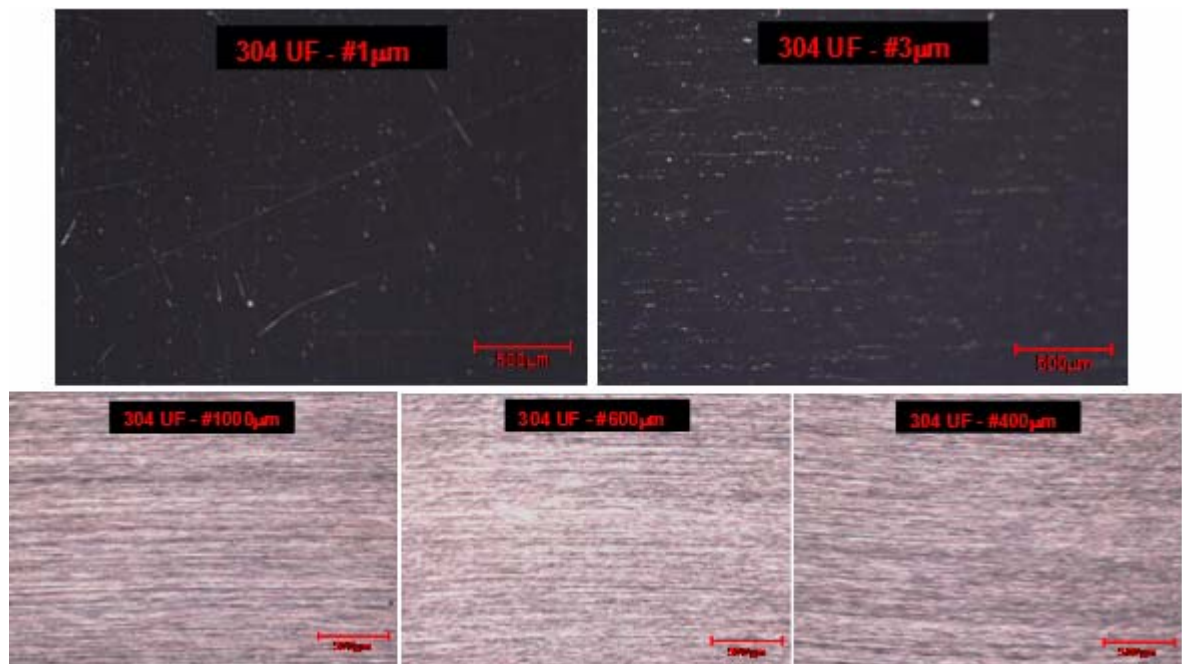


Figura 4.41 – Imagens de amostras obtidas para o aço 304 UF.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Depois de concluídos os testes de rugosidade e refletividade dos materiais e feitas às análises e comparações para os três materiais, foi possível extrair algumas conclusões a respeito dos materiais e dos métodos de caracterização de superfície. São elas:

- O material VP 80 obteve uma boa relação entre o aumento da rugosidade e a diminuição da refletividade;
- A refletividade pelo método de fotoluminescência não demonstrou a mesma relação da rugosidade pela refletividade para os materiais VP20 ISO e 304 UF;
- O material VP20 ISO teve a rugosidade diminuída mais rapidamente em relação aos demais materiais quando comparado o tempo de polimento;
- Observou-se de um modo geral que os materiais com maior dureza apresentaram uma menor rugosidade;
- Na análise visual o material V304 UF demonstrou ter um pior polimento em comparação aos demais aço analisados.

CAPÍTULO VI

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Pesquisar sobre um instrumento óptico que possa ser utilizado na indústria, durante o processo de polimento de moldes e matrizes, para fazer medições de refletividade do material, servindo para comparações durante o polimento.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbosa, C.A., 2001, **Desempenho de Aços Para Confecção de Moldes Para Plásticos**, Workshop sobre tecnologia de fabricação de moldes São Paulo, S.P. 11-04-2001.

Barcellos, R. **Detecção de riscos em lentes esféricas, por luz refletida, através de descritores de fourier**. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Bengtsson, K. **Polishing of Tool Steels**. Carl Hanser Verlag, Mold-Making Handbook: For the Plastics Engineer, pp. 373-378, 1983.

Chancel, P. **Como Reduzir a Rugosidade da Superfícies de Peças Fresadas**. Máquinas e Metais, dezembro de 2000.

Chiaverini, V. **Aços e Ferros Fundidos**, São Paulo : Editora Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 7º edição. 2002.

Dewes, R.C., Aspenwall, D.K., **A Review of ultra speed Milling of Hardened Steels**, Journal Of Materials Processing Technology, 69 (1997) 1-17.

Fallbohmer P, Altan, T., Tonshoff, H.K., Nakagawa, T., **Survey of The Die and Mold Manufacturing Industry – Practices in Germany, Japan, and the United States-**, Journal of Materials Processing Technology 59 (1996) 158-168.

Fallbohmer P, Rodríguez, C. A., Ozel, T., Altan, T., 2000, **High-speed Machining of Cast Iron And Alloy for Die and Mold Manufacturing**, Journal of Materials Processing Technology, V98,104-115.

Gadelmawla, E.S.; Koura, M.M.; Makoud, T.M.A.; Elewa, I.M. and Soliman, H.H., 2002, **Roughness parameters**, Journal of Materials Processing Technology; Vol.123, pp 133-145.

Gregolin, J.A.R.; Antunes, A.M.S. (2002). **Estudo prospectivo sobre tecnologias de fabricação de moldes para injeção de plásticos**. Relatório. Projeto de pesquisa fomentado pela FINEP.

Gennari, W., Machado, Á. R., Barbosa, C. A. **Fresamento de aços inoxidáveis ABNT 304 e ABNT 316 com usinabilidade melhorada por desoxidação pelo cálcio**. In: 1º COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2001, Curitiba - PR. Anais do 1º COBEF. , 2001.

Hutchings, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials – (Metallurgy & Materials Science Series)** 1992.

Huissoon, J. P., ISMAIL F., JAFARI A., BEDI S., **Automated Polishing of Die Steel Surfaces**. Springer-Verlag London Limited 2002.

Inoguchi, T. **Influence of Non-Metallic Inclusions and Carbides on Pinhole Susceptibility in Mirror Polishing**. Denki Seiko (Electric Furnace Steel). Vol. 78, no. 4, pp. 361 – 368. Nov. 2007.

Xiang, J. **The evolution of surfaces and their measurement**. In: The 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII-2009), 29 June - 2 July 2009, Saint-Petersburg, Russia. (In Press).

Klocke, E. Damborn, O. Capudi Filho, G.G., **Influence of the polishing process on the near-surface zone of hardened and unhardened steel**. Science Direct, 2005.

Lucchini sidermeccanica e Zanola. **Tool Steel Polishing – Catálogo**. Itália.

Machado, I. F. ; Driemeier, L. ; Marcicano, J. P. ; Dias, C. A. N. . **An investigation of the effect of machining parameters on the strain induced martensite formation during turning in an austenitic stainless steel**. In: 17 th International Congress of Mechanical Engineering, 2003, São Paulo. 17 th International Congress of Mechanical Engineering. São Paulo : COBEM 2003 - Escola Politécnica, 2003.

Machado, A. R, Da Silva, M. B; Coelho, R. T; Abrão, A. M. **Teoria da Usinagem dos Materiais** 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

Mesquita, R. A. Barbosa, C.A. **Desenvolvimento de Aço com Usinabilidade Melhorada e Aços Endurecíveis por Precipitação para Moldes de Plástico**. Tecnologia em Materiais. São Paulo, V. 1, N. 4, p. 11 – 15, abr. – jun. 2005.

Mesquita, R. A.; Barbosa, C, A. **MELHORIAS DE PROPRIEDADES DOS AÇOS PARA MOLDES, COM FOCO NA MANUFATURA DO MOLDE**. Seminário Programador CAM 2007 Joinville, 19/NOV/2007

Mesquita, R.A; Barbosa, C.A. **Desenvolvimento de aço com usinabilidade melhorada e aço endurecíveis por precipitação para moldes de plástico**. In: Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, V.1, n.4, p.11-15, abr.-jun. 2005

Mesquita, R.A., Sokoplowski, A., Barbosa, C.A., 2003, **Desenvolvimento de Aços Especiais com Usinabilidade Melhorada**, Revista Máquinas e Metais, no 448, maio, pág 86-112.

Mesquita, N. G. M. **Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função fabricação**. Florianópolis, 1992. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina.

Metals Handbook, Vol.16 (1989), 9th Edition, - **Machining** - ASM International, USA.

Milan, J.C.G; Machado, A.R; Barbosa, C.A. **Usinabilidade de aços para moldes de injeção de plástico tratados com cálcio**. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2000, Rio de Janeiro.

Naves, V. T. G. **Estudo da Usinabilidade dos Ferros Fundidos Cinzentos Ligados (CrCuSn e CrCuSnMo) e Vermicular Classe 350 no Fresamento Frontal em Alta Velocidade de Corte.** 2009. 145 p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

Oliveira, J.M. **Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas para Produção de Moldes e Matrizes.** Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Materiais da Universidade Federal de Caxias do Sul, 2006.

Ramos, C.A.D., Machado, A.R.,(2002) **Usinagem de Moldes e Matrizes**, Centro Federal de Educação Tecnológica Minas Gerais, 2002.

Ramasawmy, H., Blunt, L., **Effect of EDM process parameters on 3D surface topography.** Journal of Materials Processing Technology, n 148 pg 155-164 , 2004.

Stemmer, C. E., **Ferramentas de Corte I.** 6a edição Ed Da UFSC, 2005

Samuels, L.E., **Metallographic Polishing Mechanical Methods.** American Society for Metals, OHIO,1982.

Silva Filho, M. S. **Fresamento por Regiões com uma Alternativa na Usinagem de Cavidades para Moldes de Injeção Através de Sistema CAD/CAM**, 2000 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina.

Steiner, C.,Hinze, D.,Pavezzi, L. A., **Técnica de Polimento na Construção de Moldes.** III Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, São Paulo, SP, 10 a 12 de agosto de 2005.

Sandvik, 2000, **Pesquisa Acelera e dá Tom de Modernidade à Usinagem**, O mundo da usinagem, vol 2, Publicação da Divisão Coromant da Sandvik do Brasil. São Paulo, S.P.

Shimizu, T. Fujii, T. **Mirror Surface Finishing Properties of Plastic Mold Steels.** Denki Seiko (Electric Furnace Steel). Vol. 74, no. 2, pp. 125 – 130. Apr. 2003.

Trent, E.M., 1989, **Metal Cutting**, 3rd edition., Butterworths, London. 245 pags, ISBN 0-408-108568.

Watanabe, B. **Como alcançar economia em Fresamento 5 eixos**. Grapho News. Nº38; ano X; 2008.

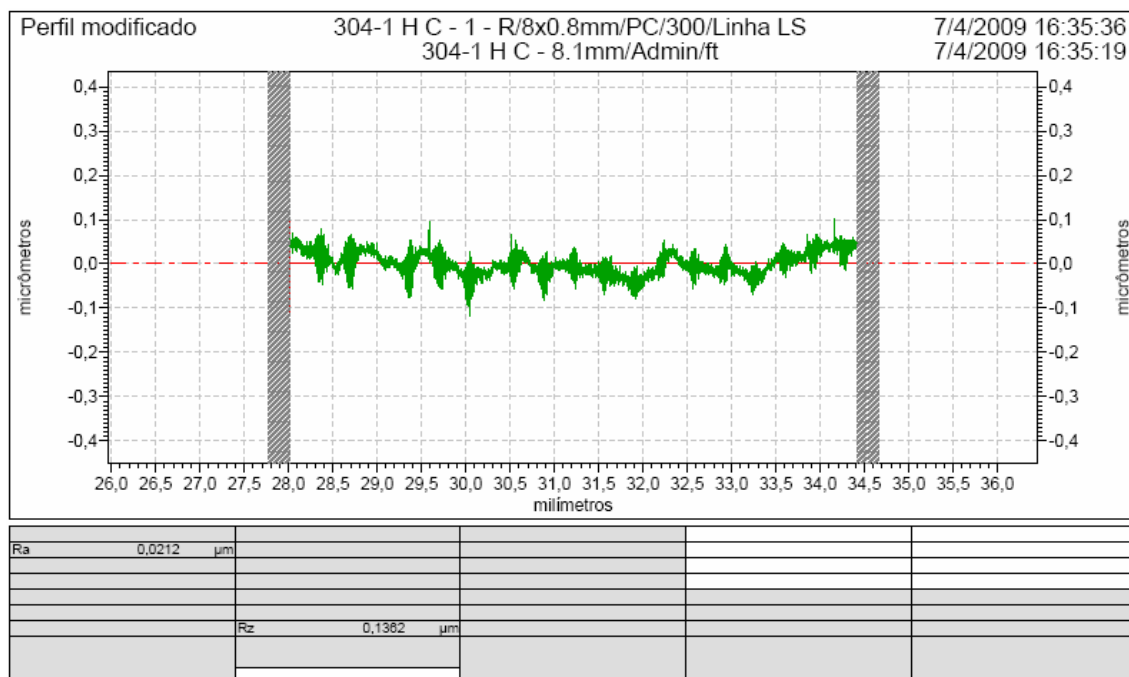
Whitehouse, D.J., 1999, **Characterizing the machined surface condition by appropriate parameters**, Proceedings of the Third Industrial Tooling Conference, Southampton Institute, Molyneux Press, pp.8–31.

Zhao, X. **Effect of Hardness on the Polishing Performance of Steel for Plastic Molding**. Moju Gongye (Die & Mould Industry). Vol. 33, no. 11, pp. 65 – 66. 2007.

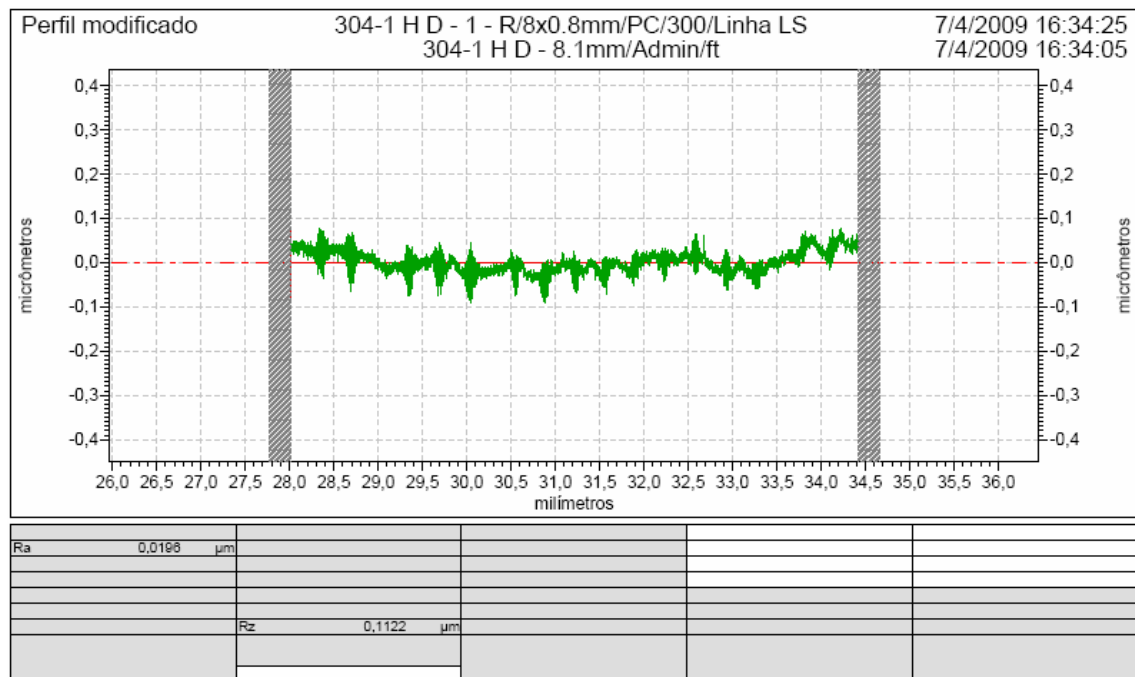
CAPÍTULO VIII

Anexos

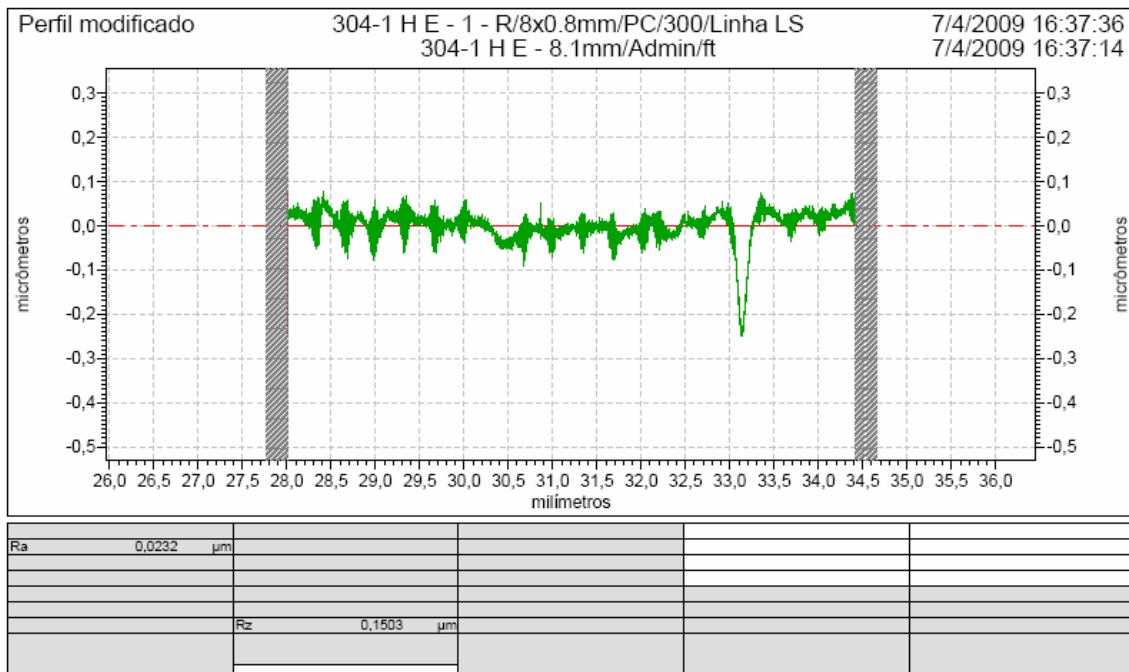
Amostra 1



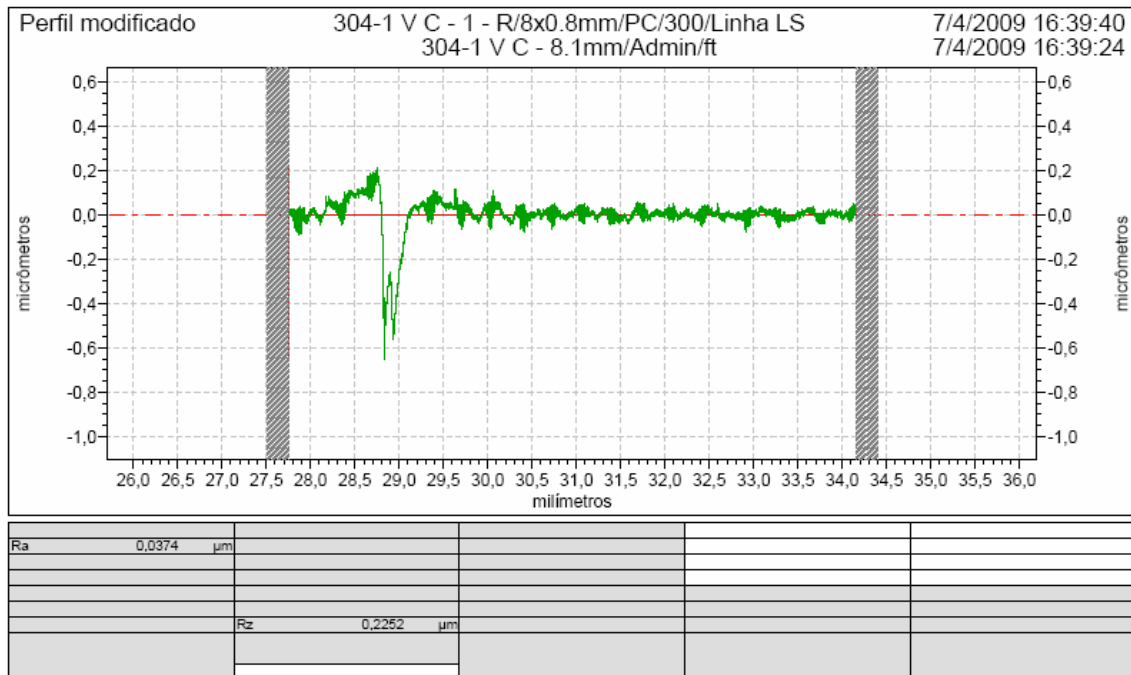
Amostra 2



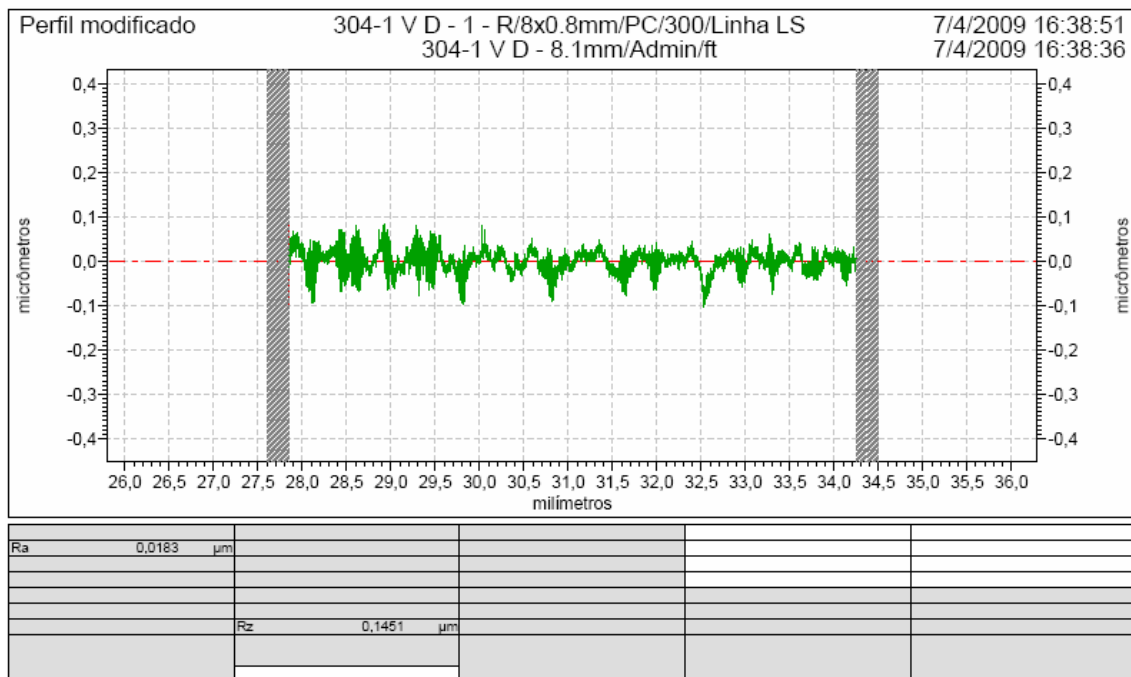
Amostra 3



Amostra 4



Amostra 5



Amostra 6

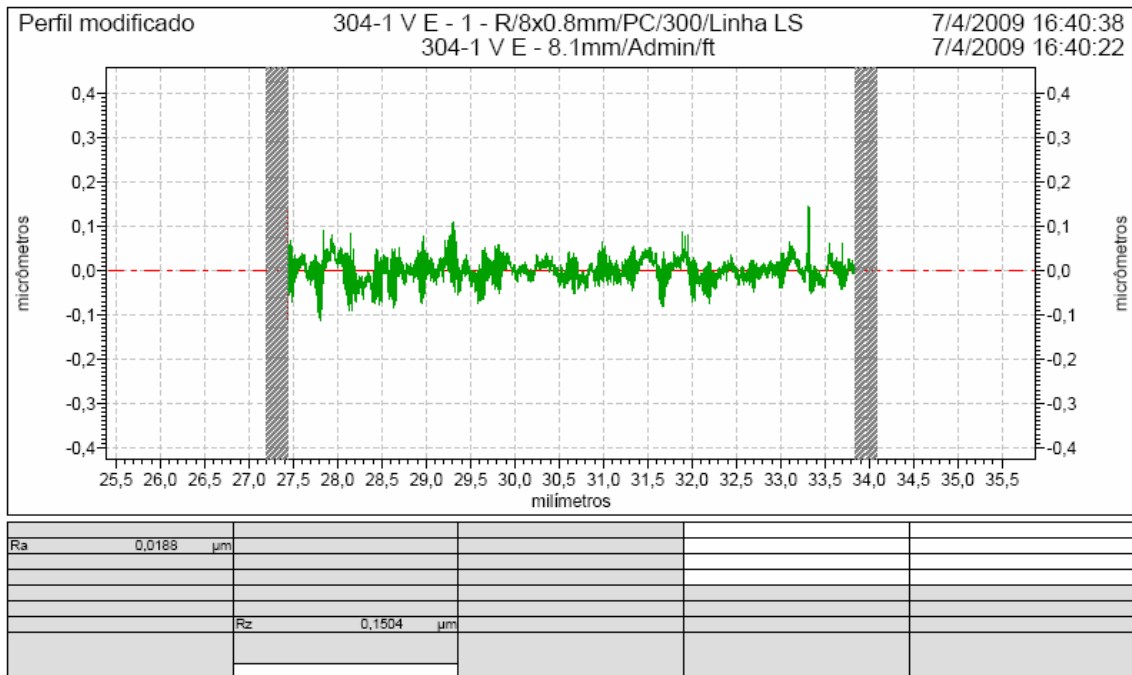
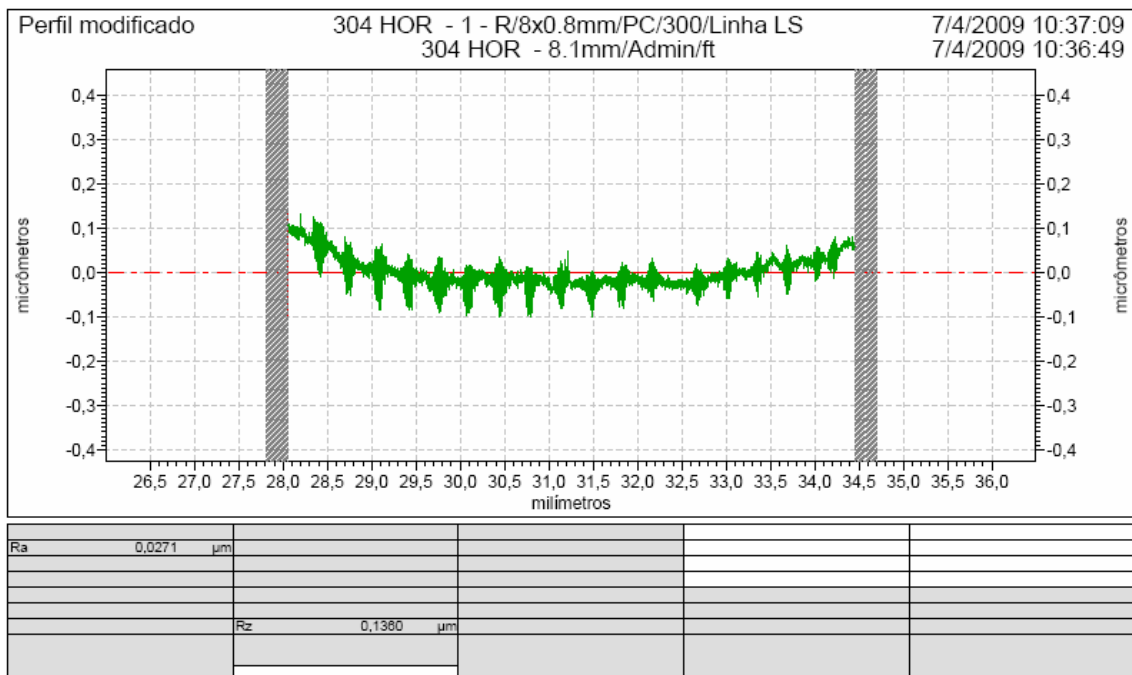
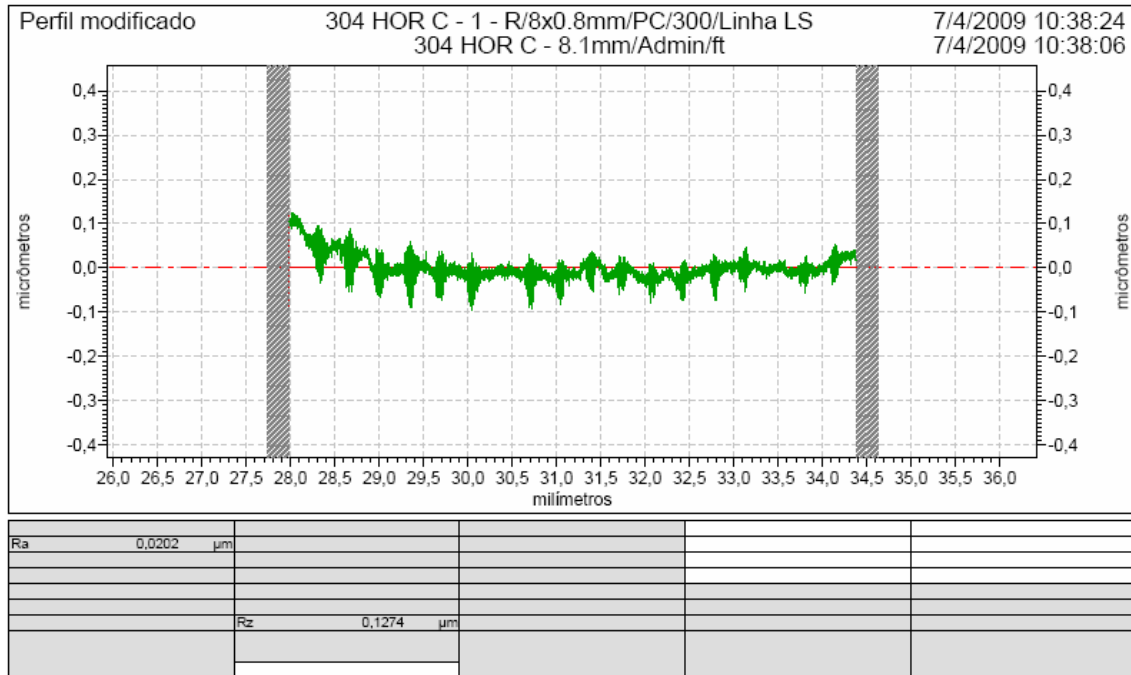


Figura 8.1 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço 304 UF com granulometria $3\mu\text{m}$.

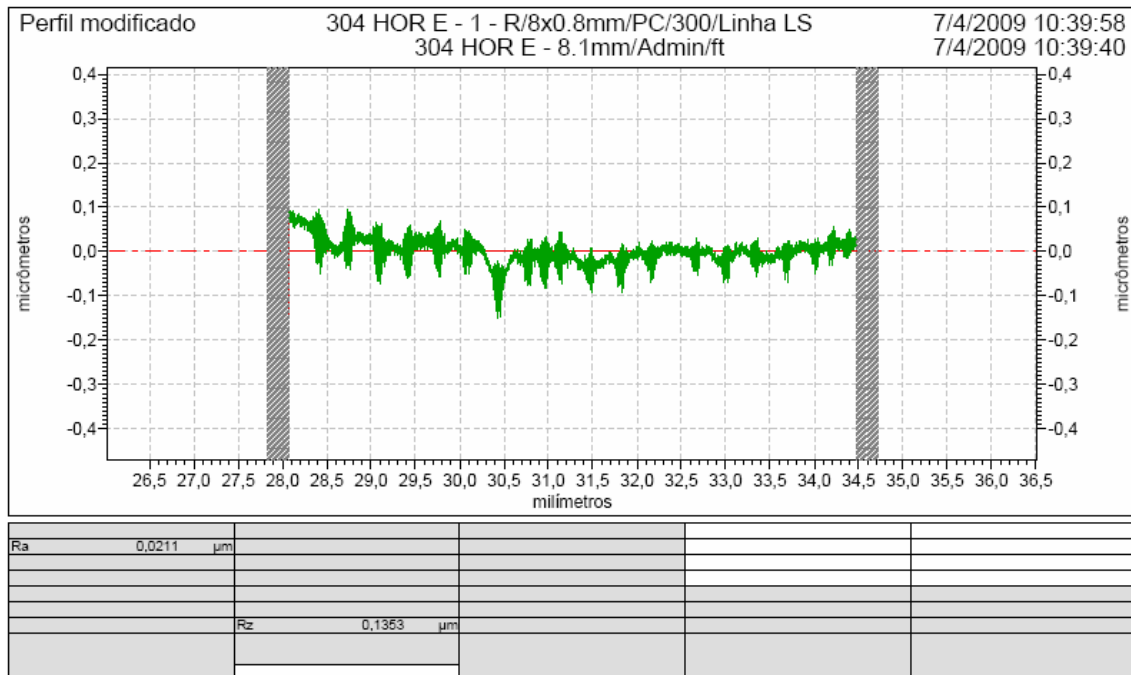
Amostra 1



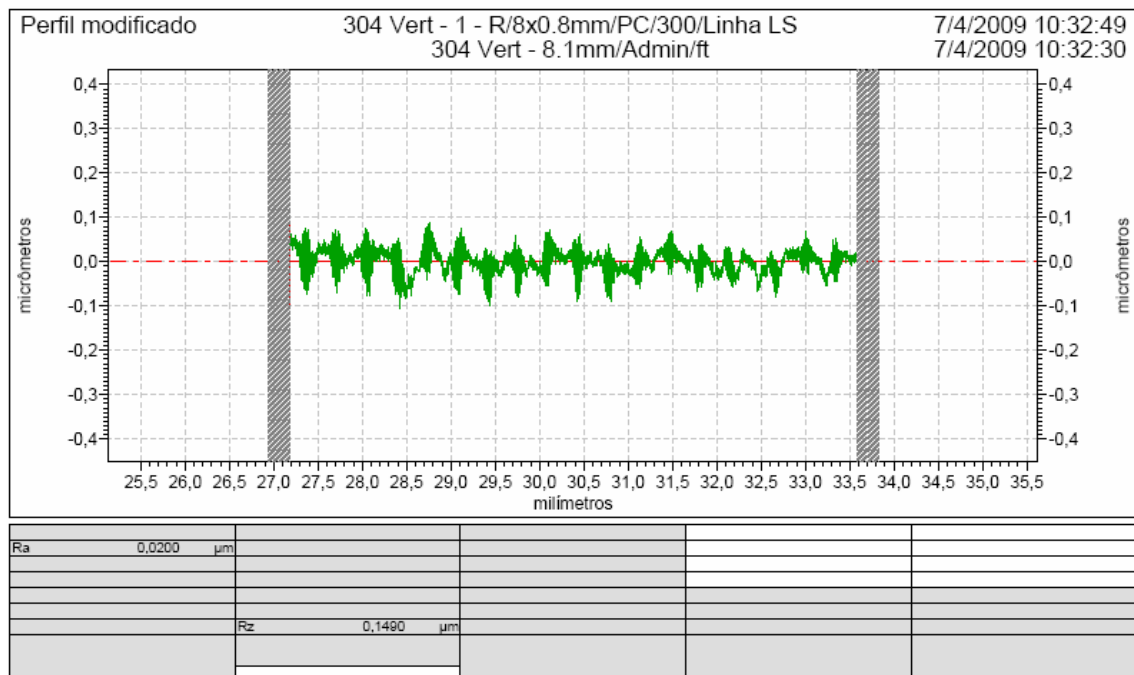
Amostra 2



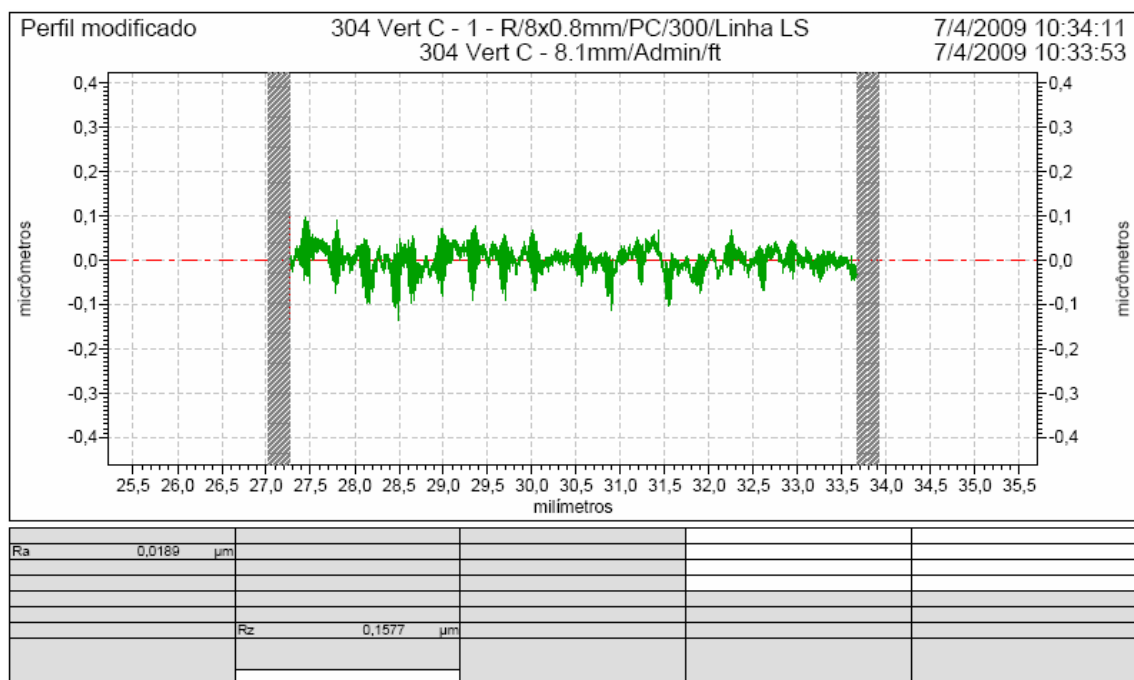
Amostra 3



Amostra 4



Amostra 5



Amostra 6

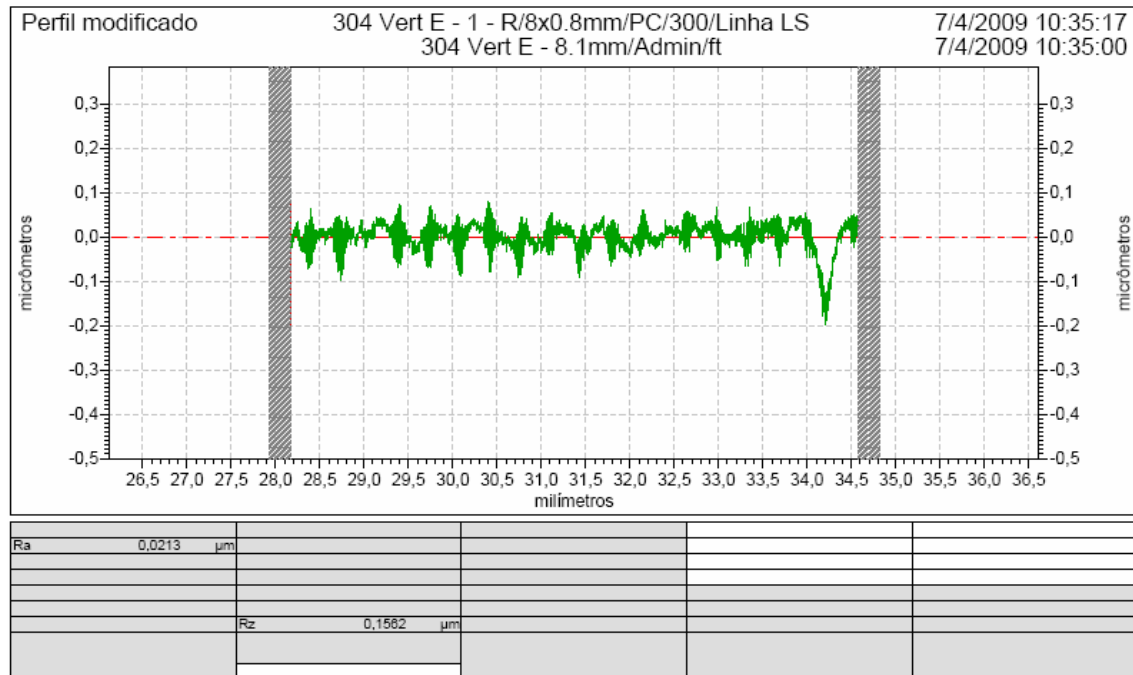
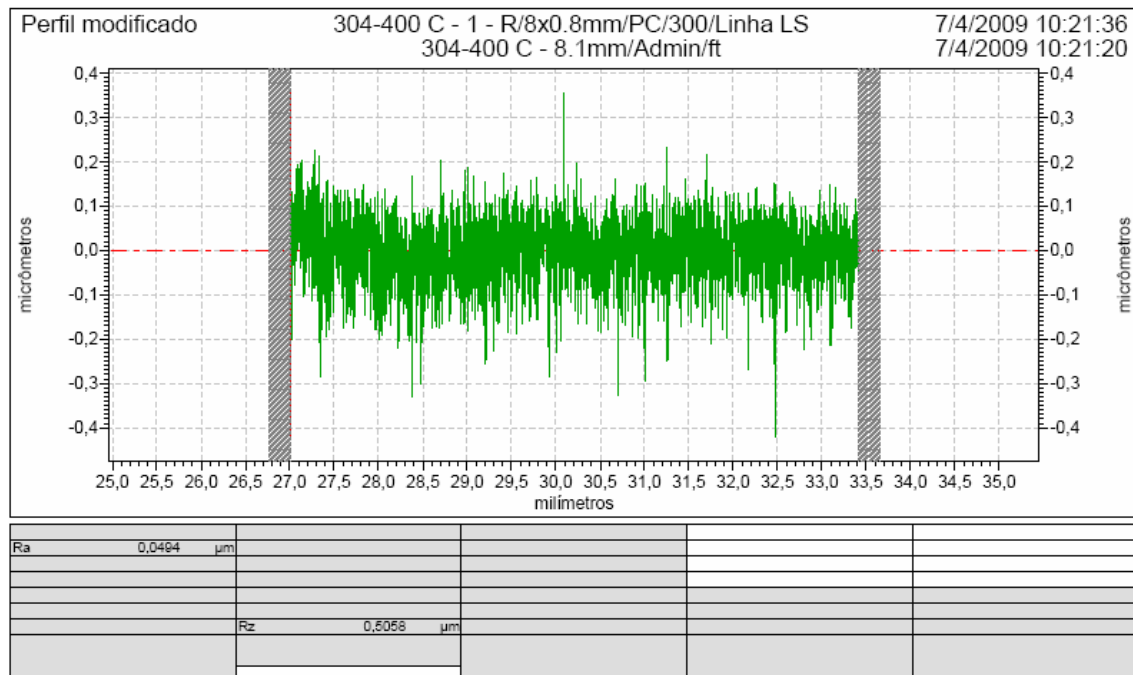
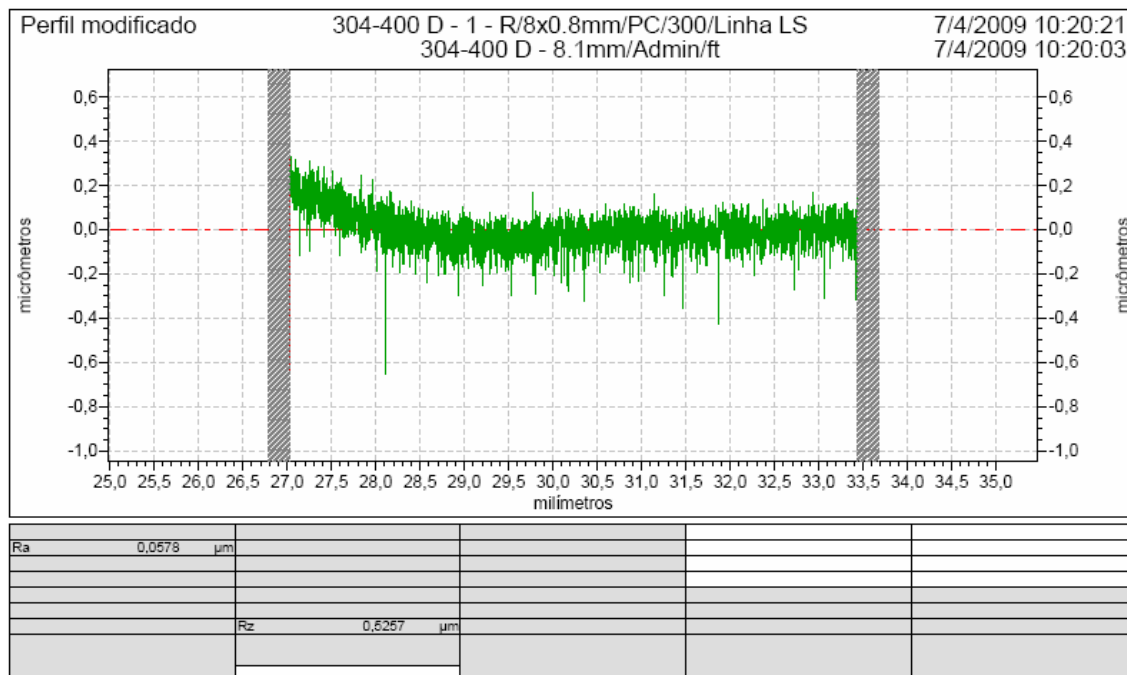


Figura 8.2 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço 304 UF com granulometria 1μm.

Amostra 1



Amostra 2



Amostra 3

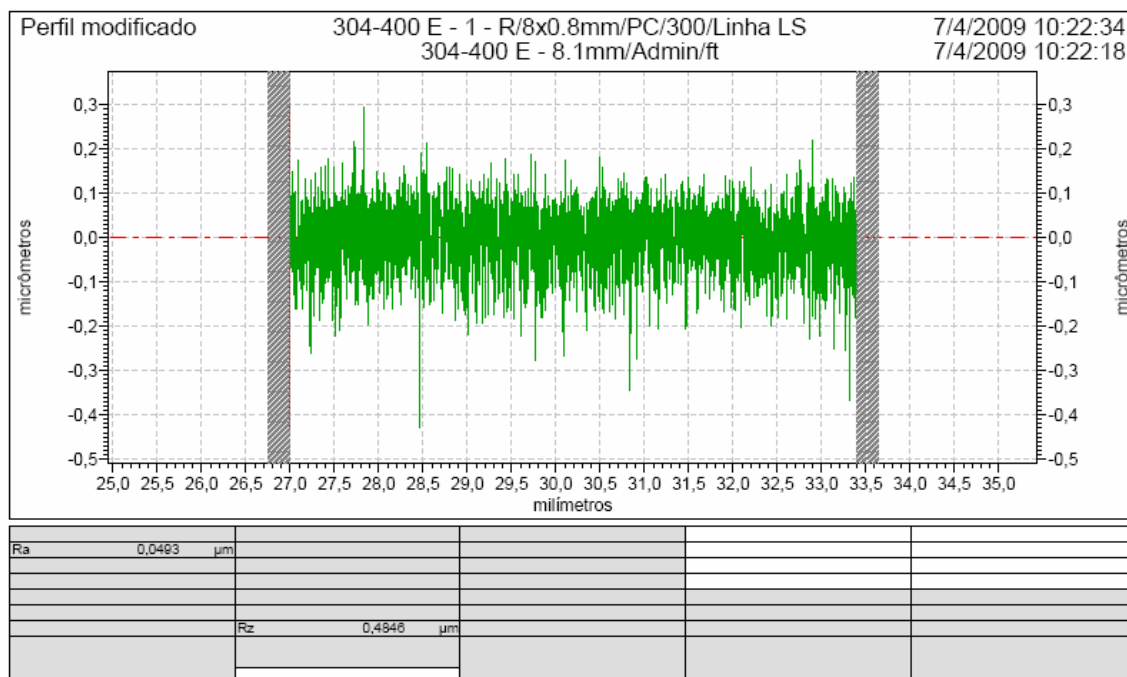
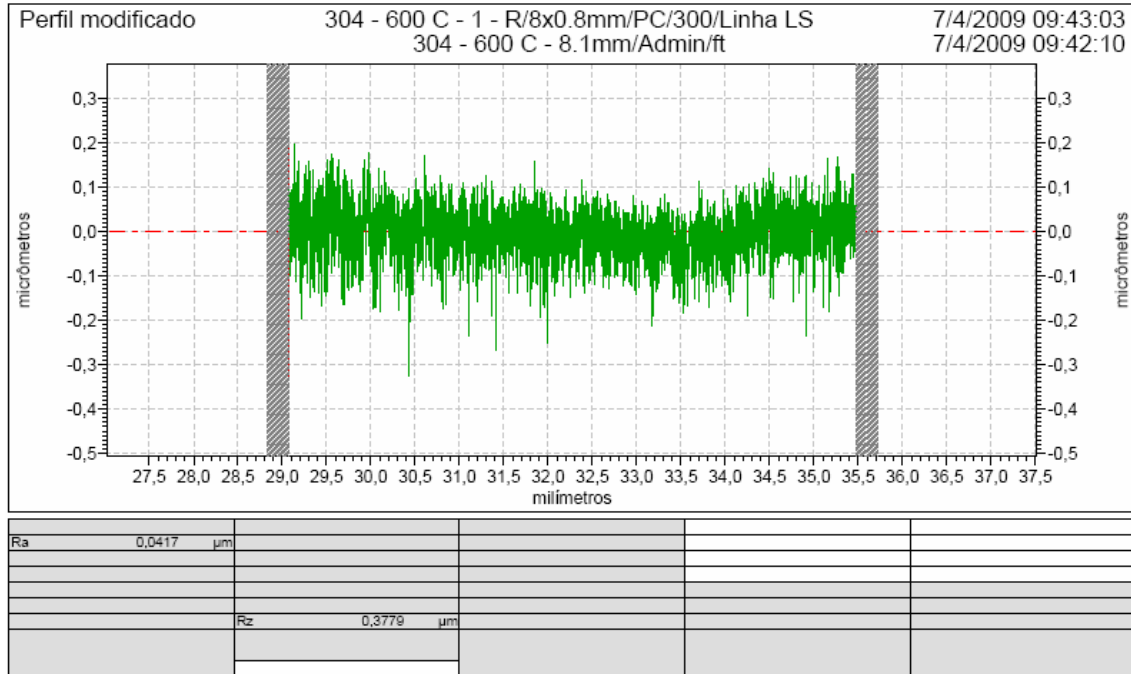
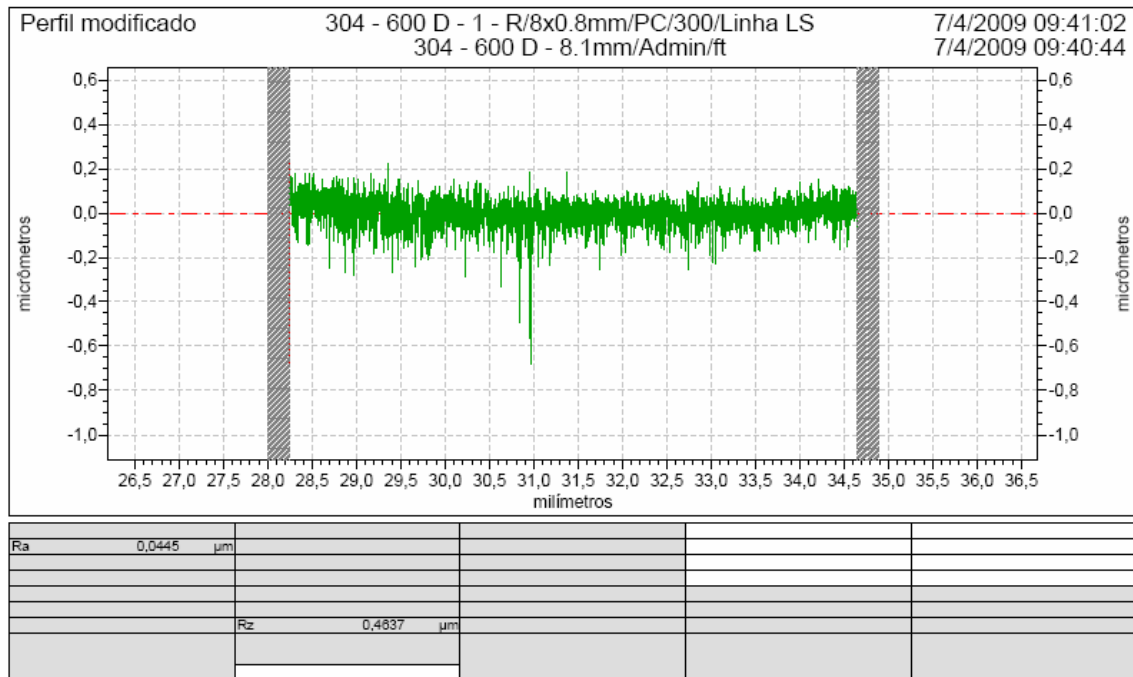


Figura 8.3 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço 304 UF com granulometria 400 μm.

Amostra 1



Amostra 2



Amostra 3

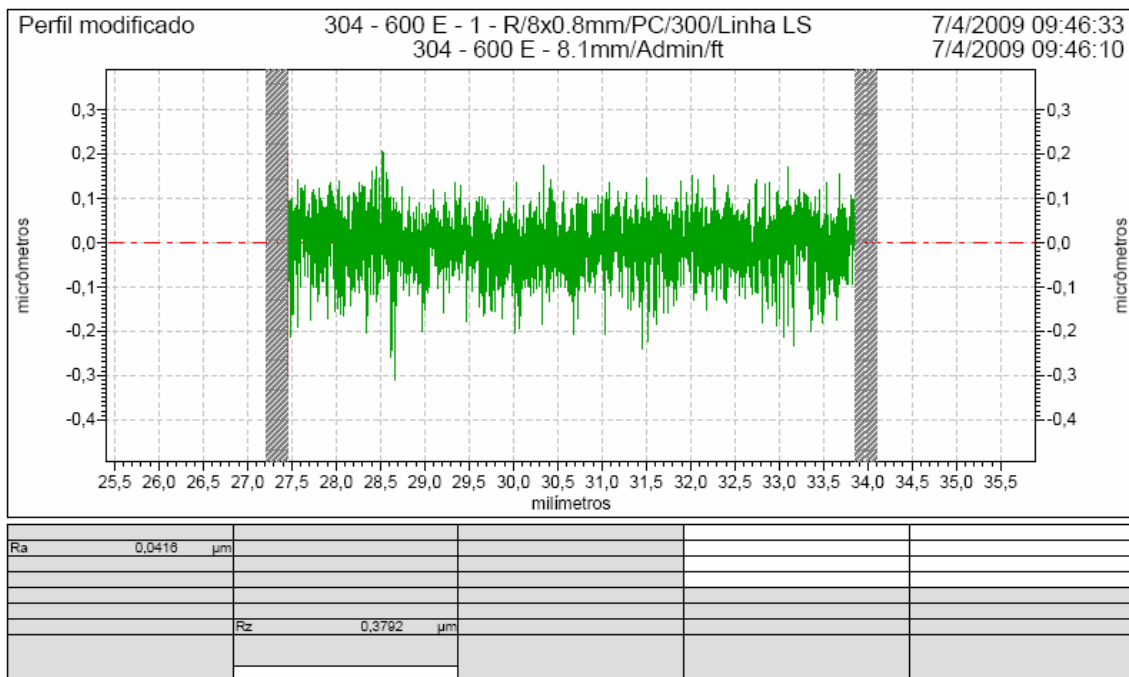
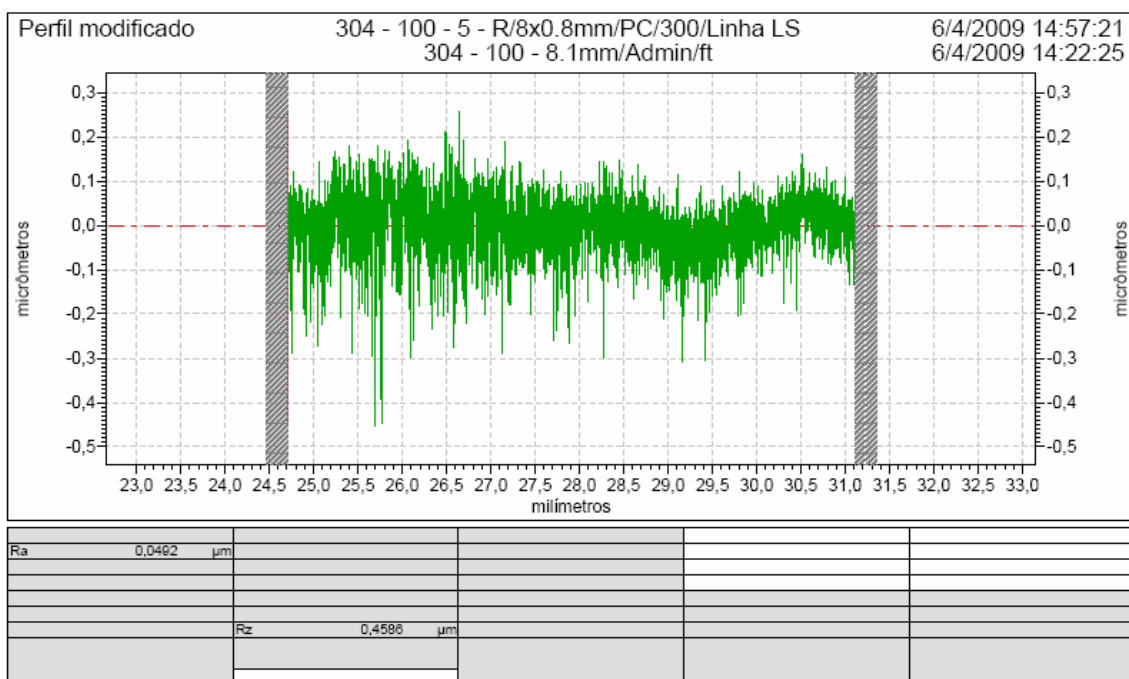
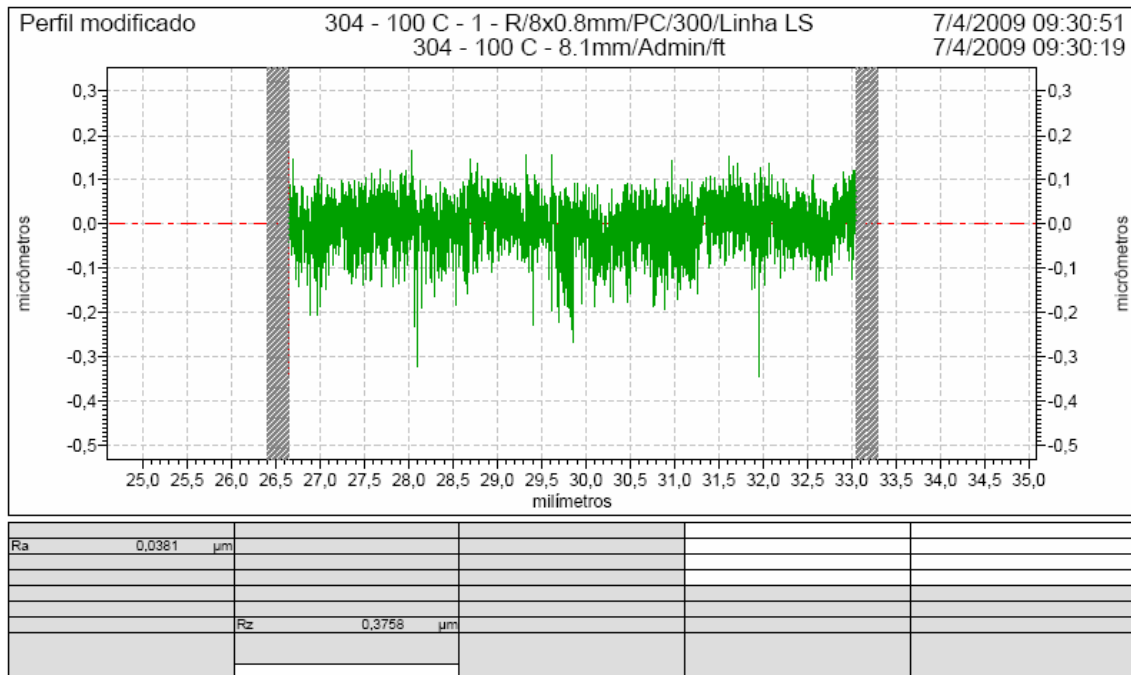


Figura 8.4 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço 304 UF com granulometria 600 μm.

Amostra 1



Amostra 2



Amostra 3

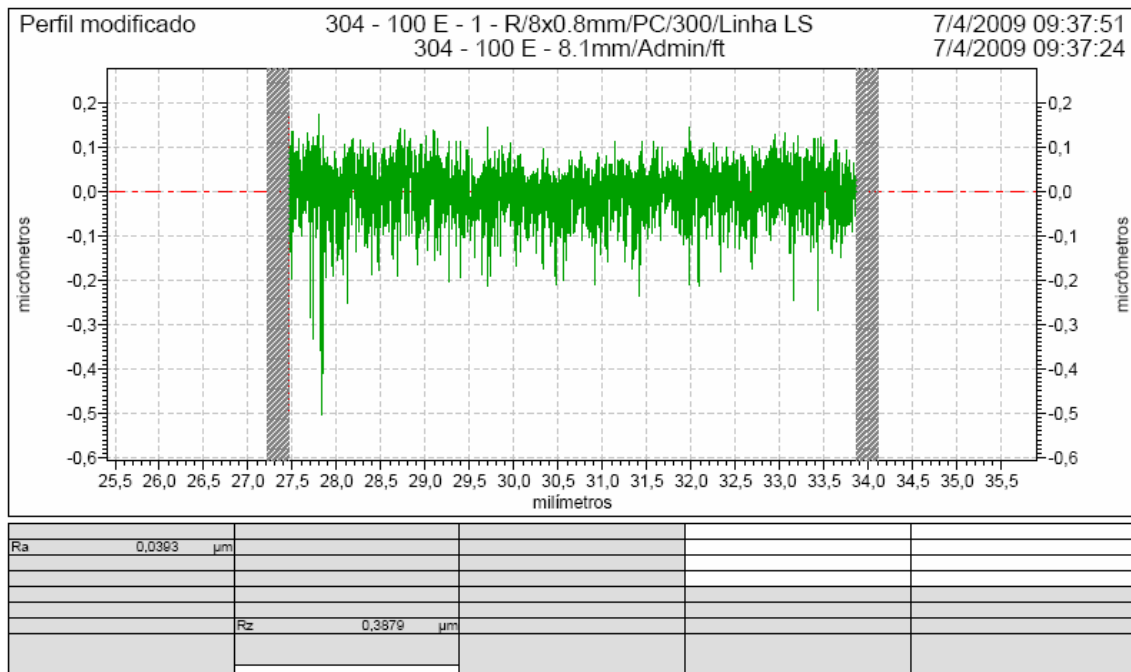
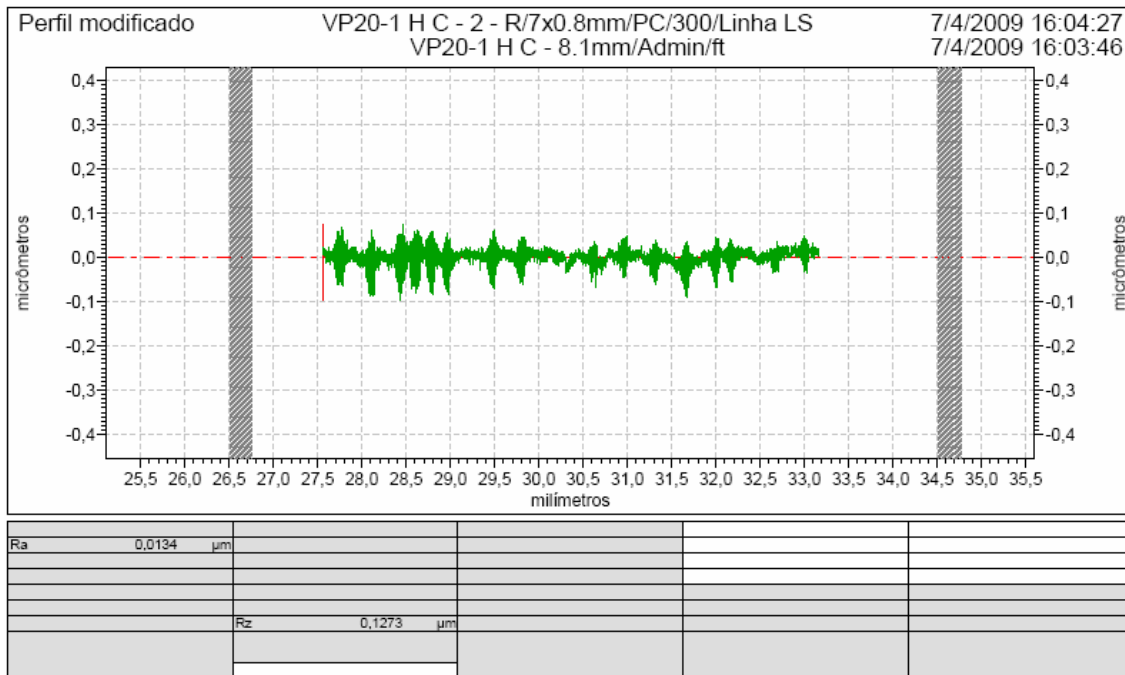
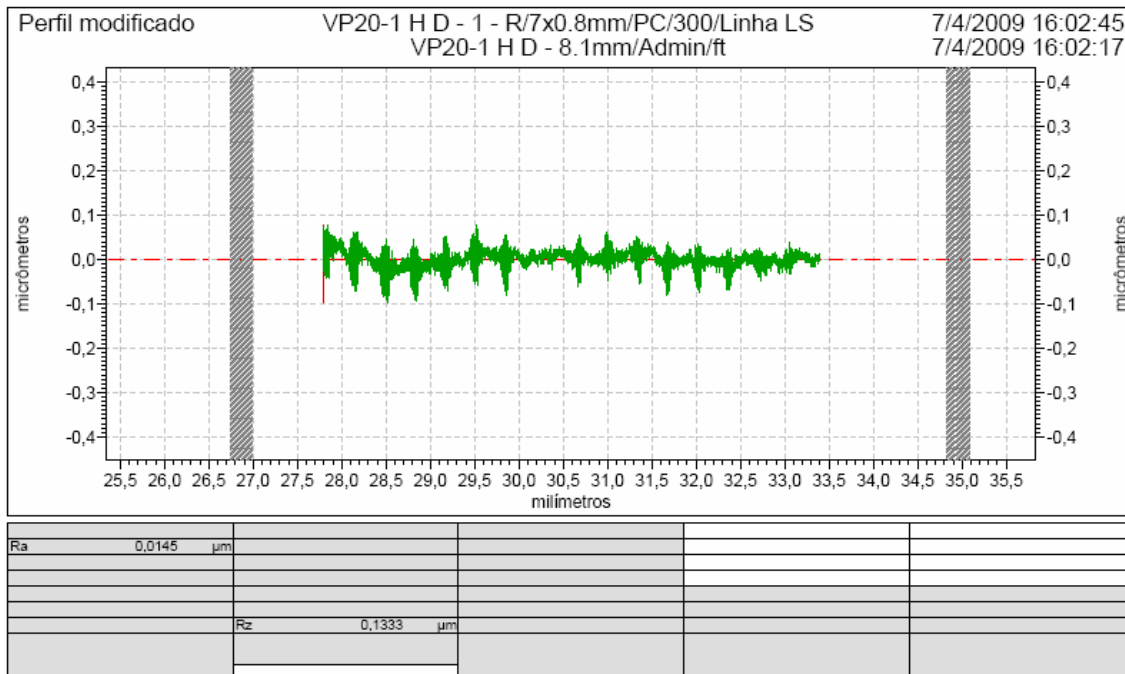


Figura 8.5 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço 304 UF com granulometria 1000 μm.

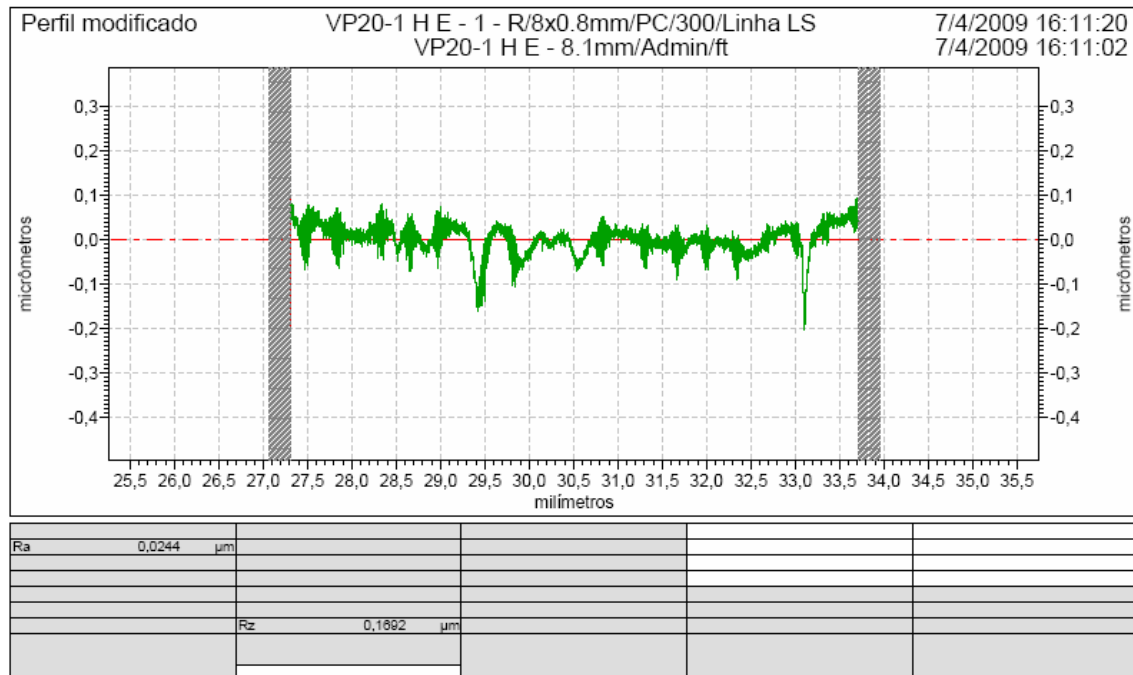
Amostra 1



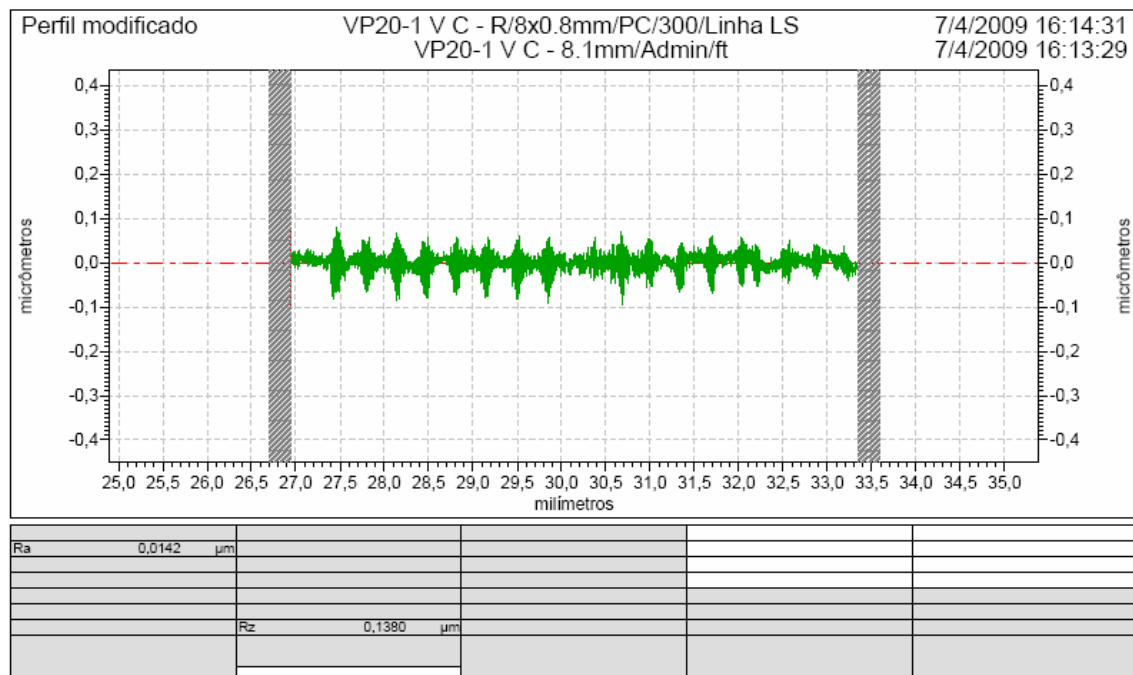
Amostra 2



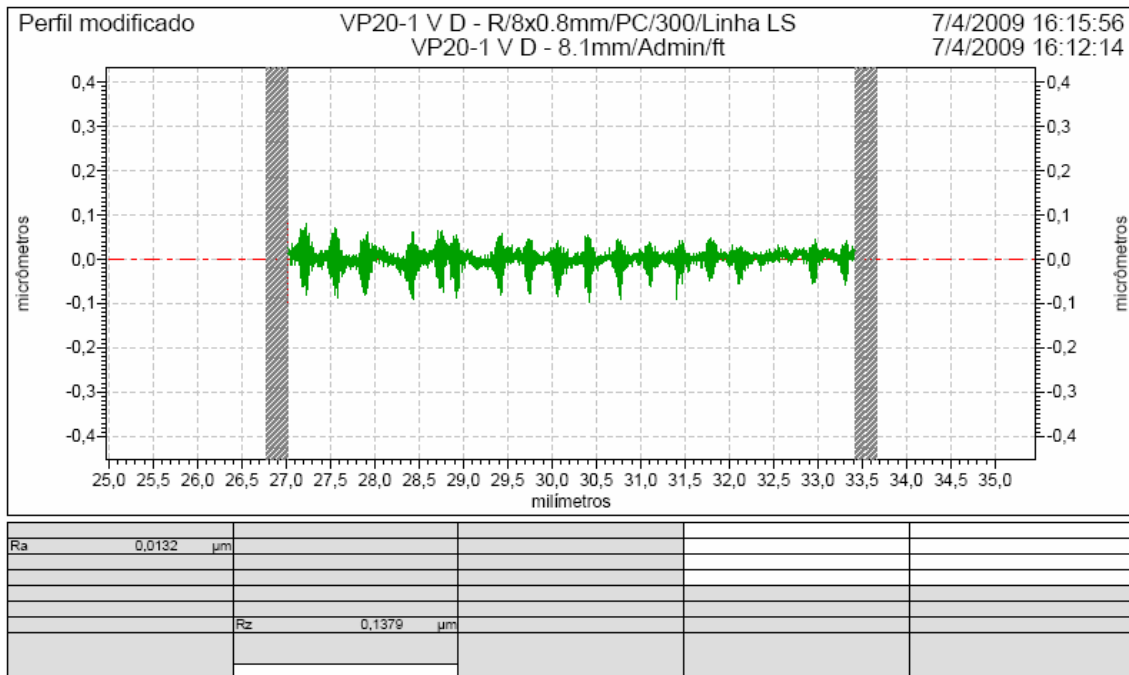
Amostra 3



Amostra 4



Amostra 5



Amostra 6

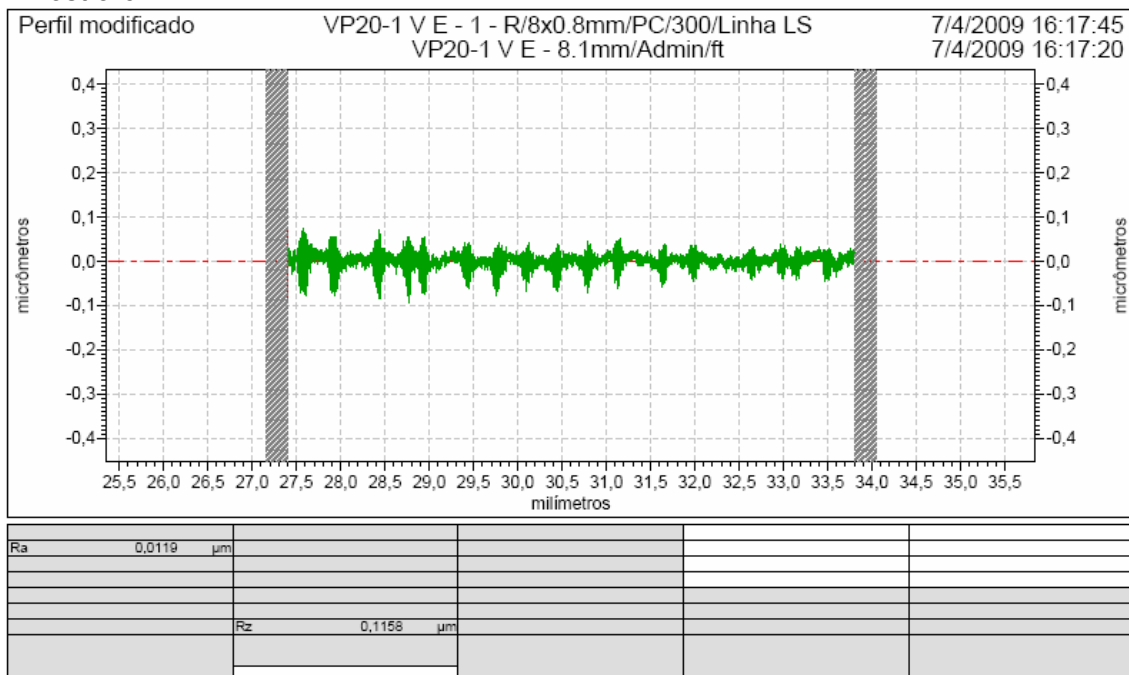
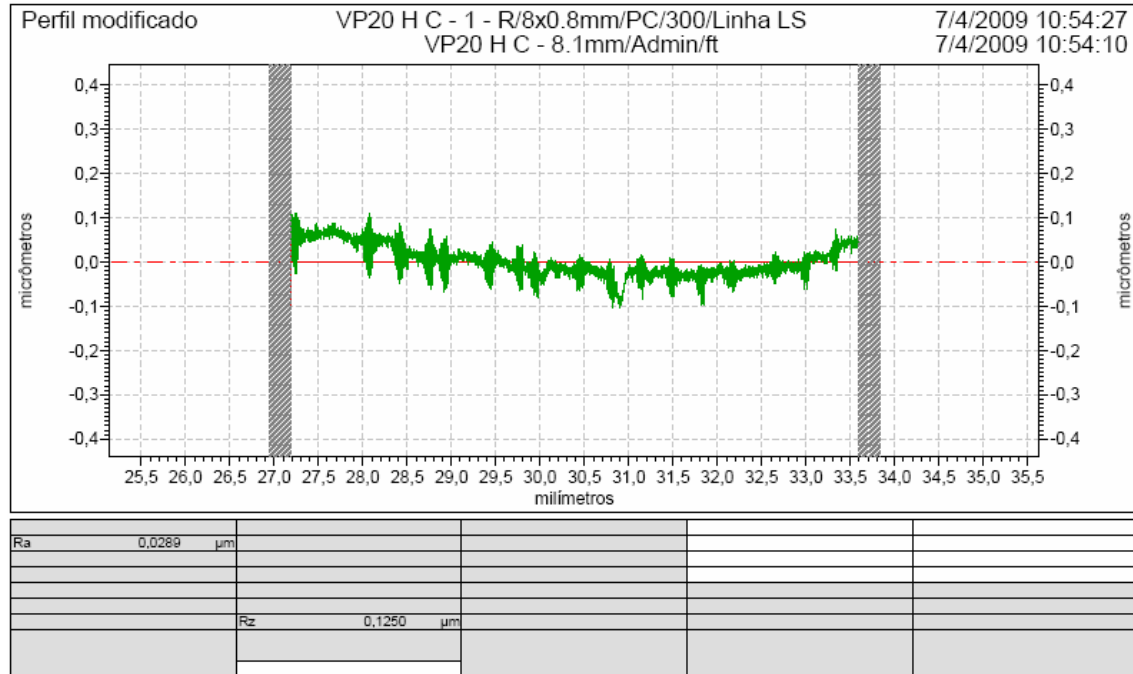
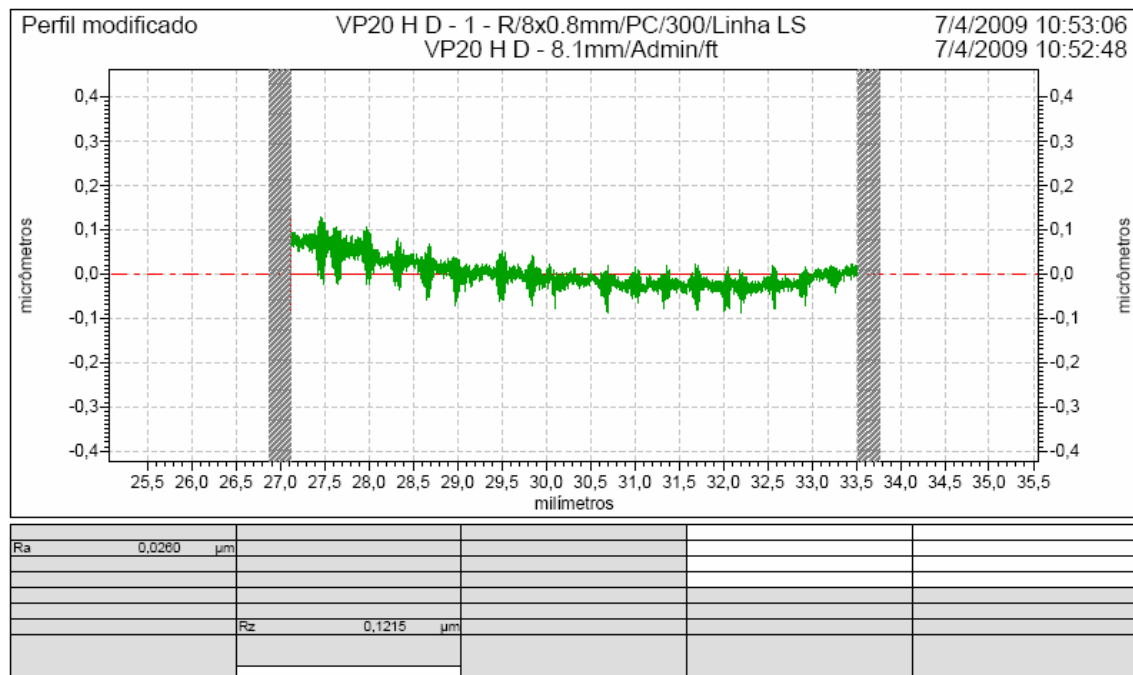


Figura 8.6 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço VP20 ISO com granulometria 1μm.

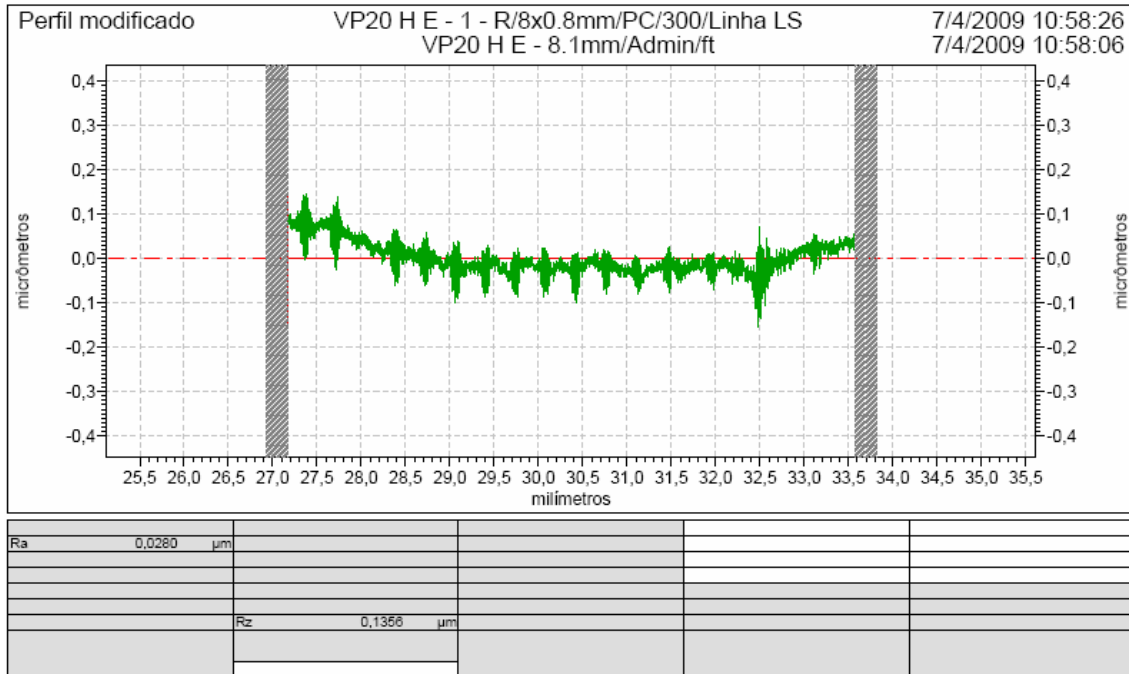
Amostra 1



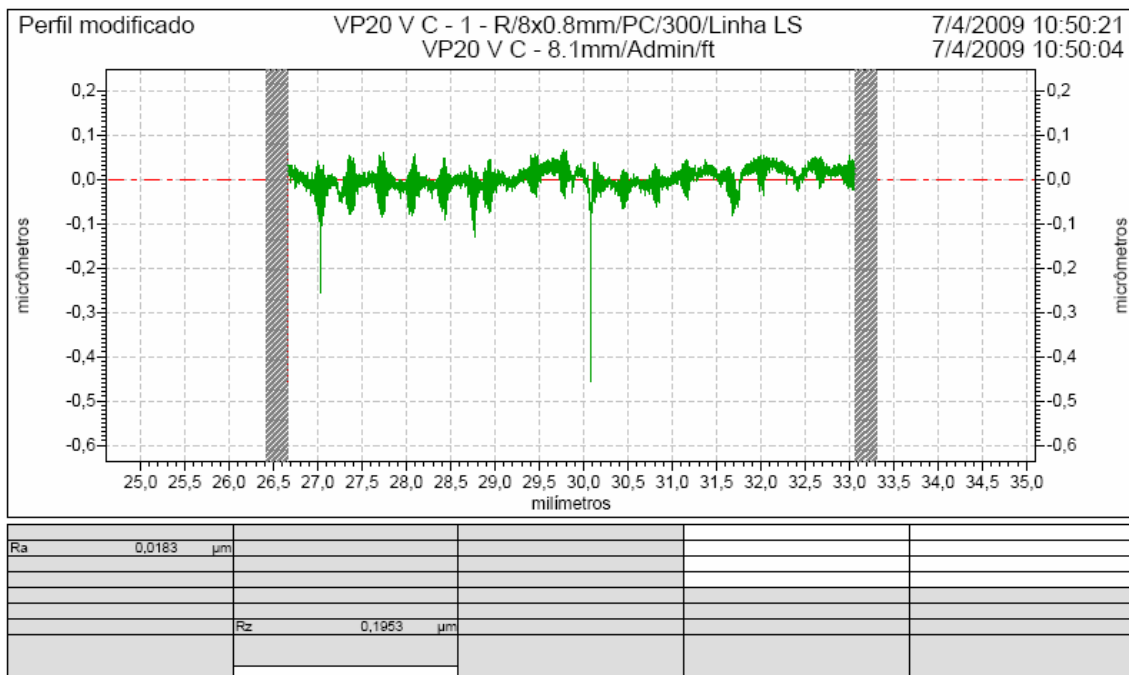
Amostra 2



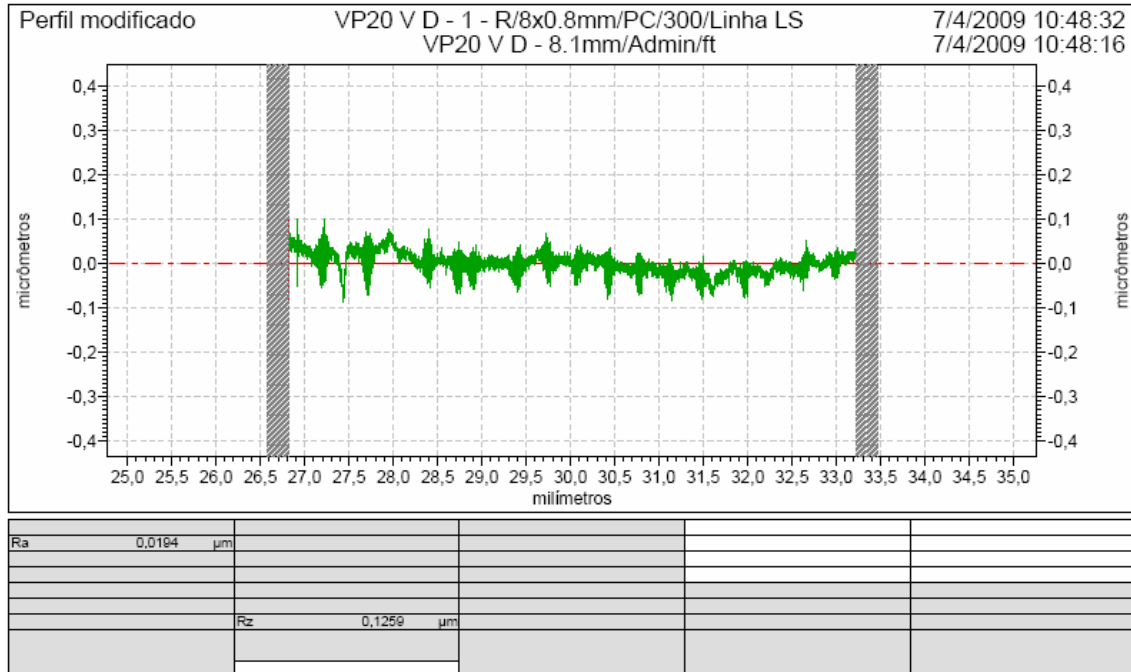
Amostra 3



Amostra 4



Amostra 5



Amostra 6

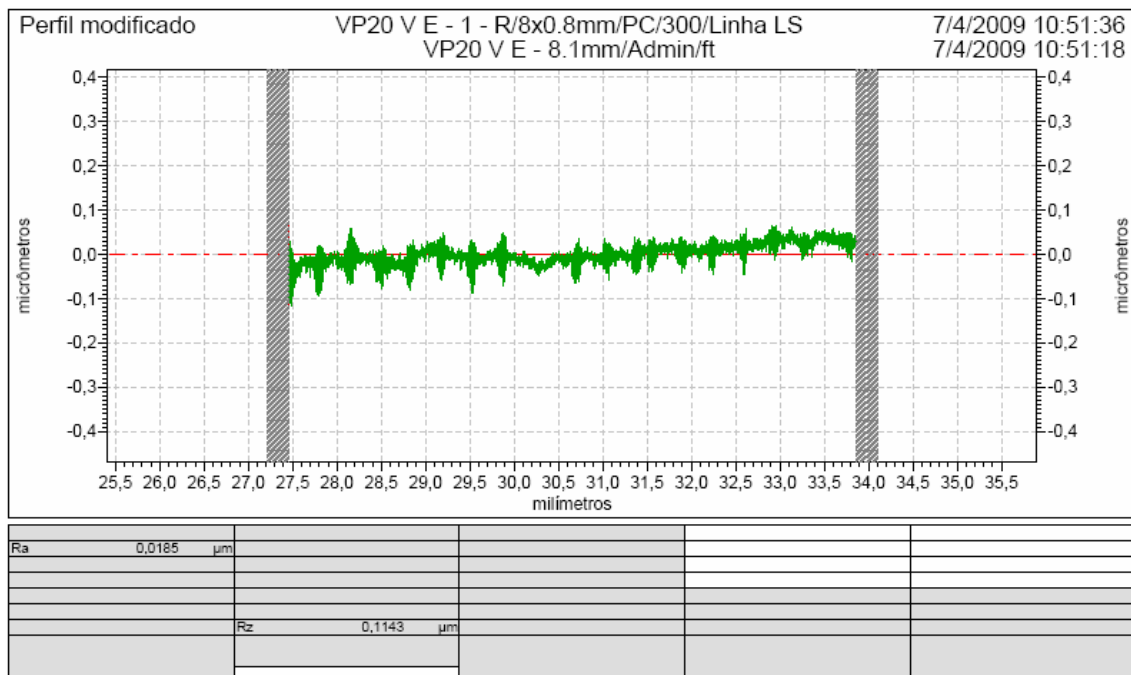
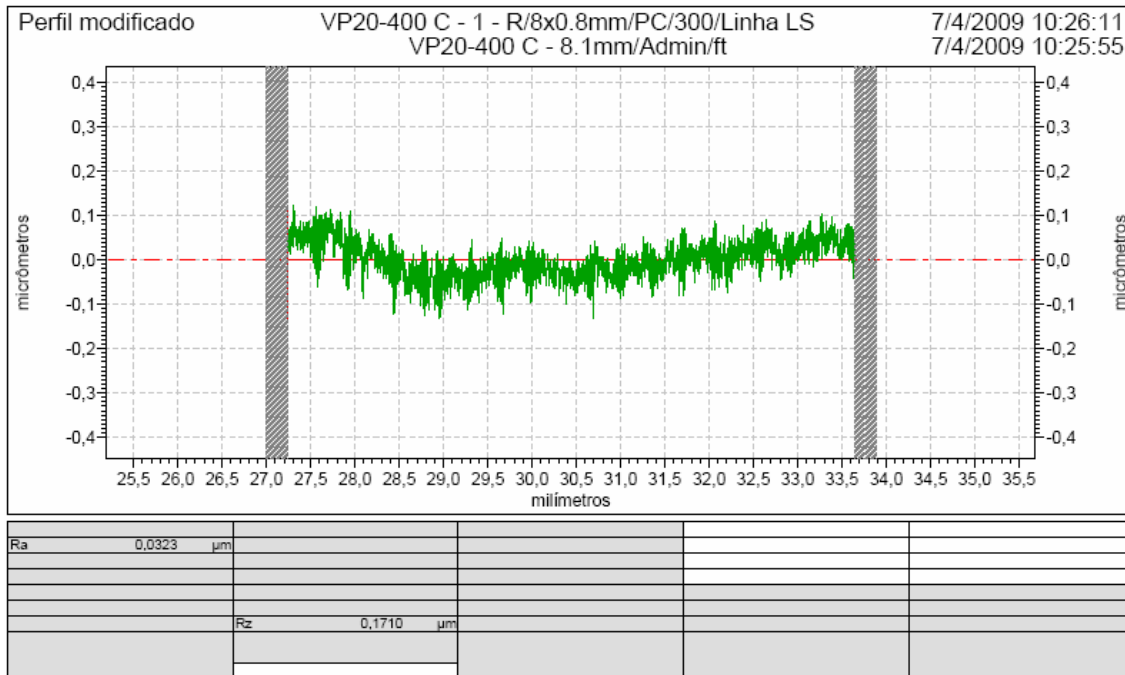
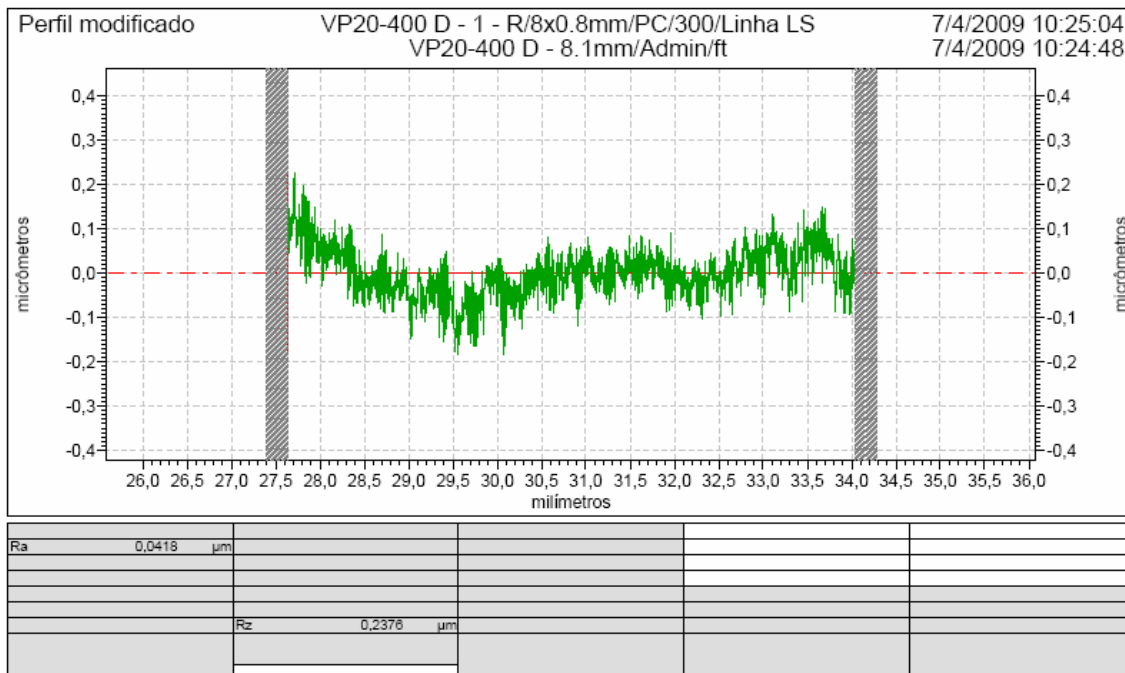


Figura 8.7 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço VP20 ISO com granulometria 3μm.

Medida 1



Medida 2



Medida 3

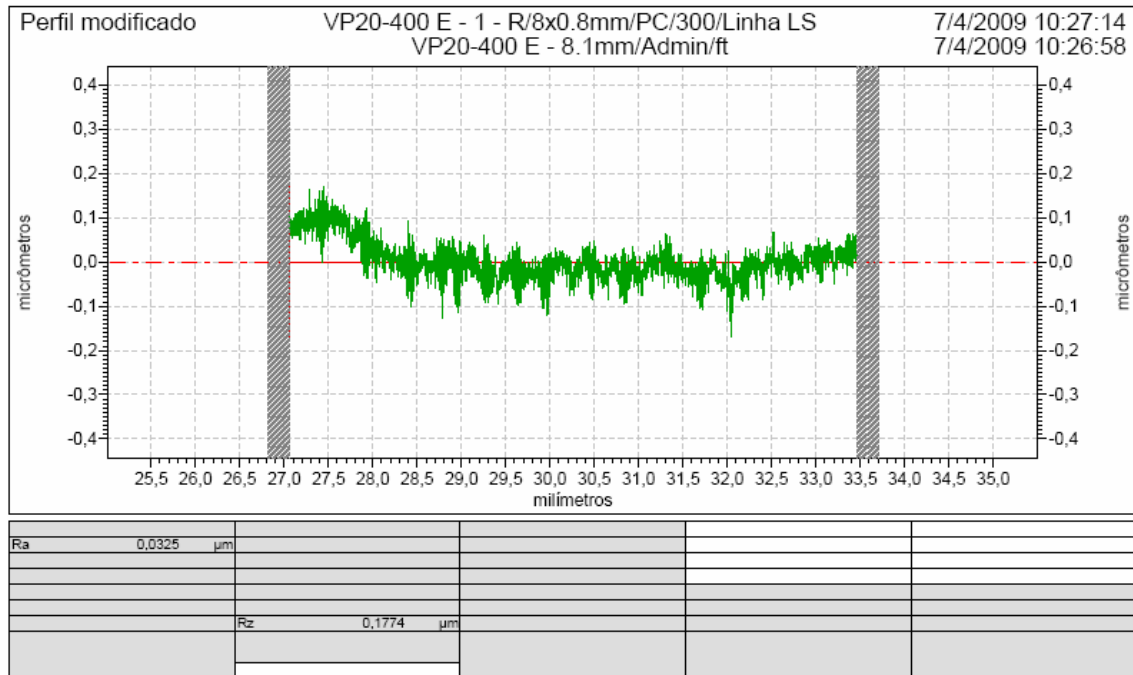
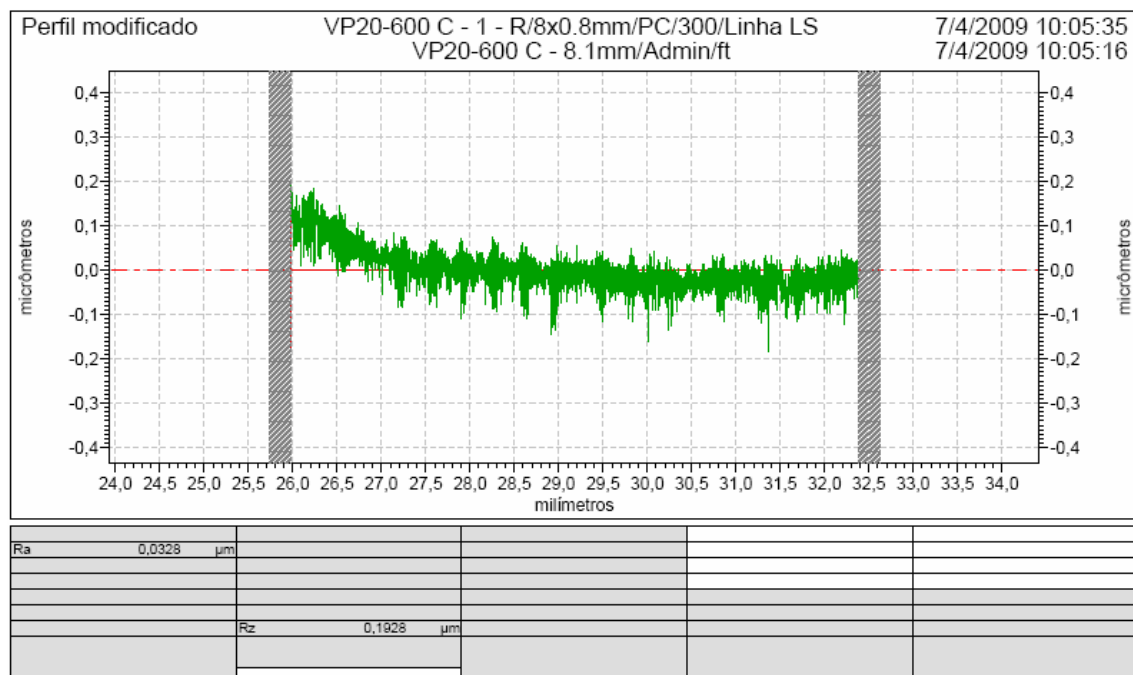


Figura 8.8 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço VP20 ISO com granulometria 400μm.

Medida 1



Medida 2

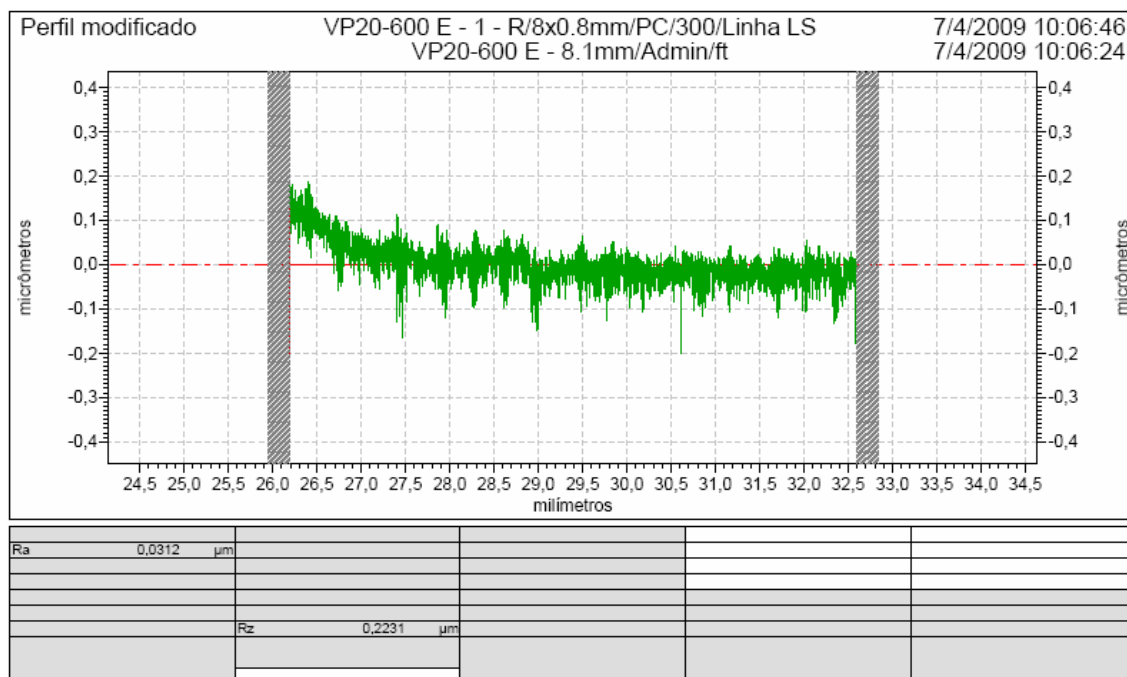
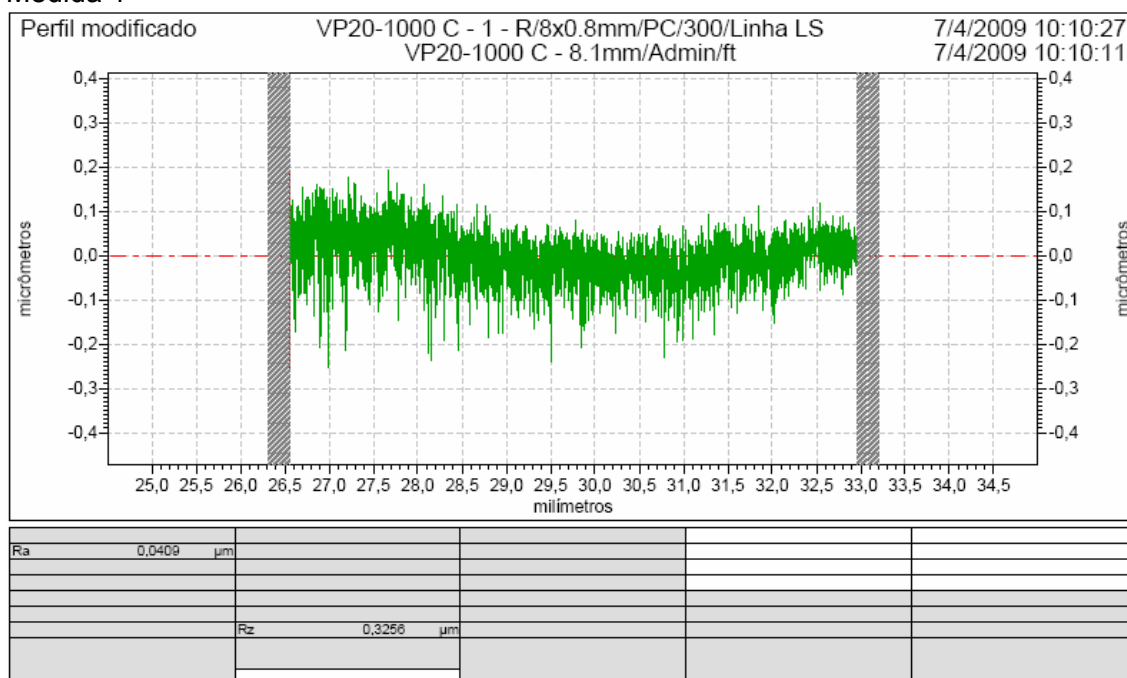
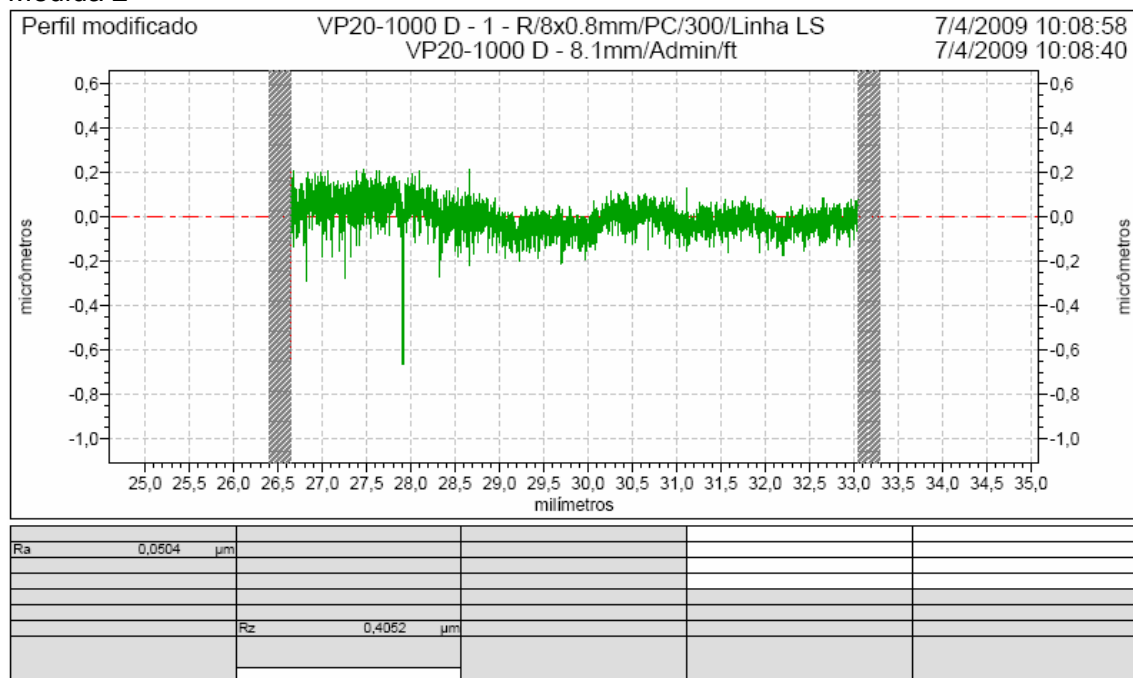


Figura 8.9 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço VP20 ISO com granulometria 600 μm .

Medida 1



Medida 2



Medida 3

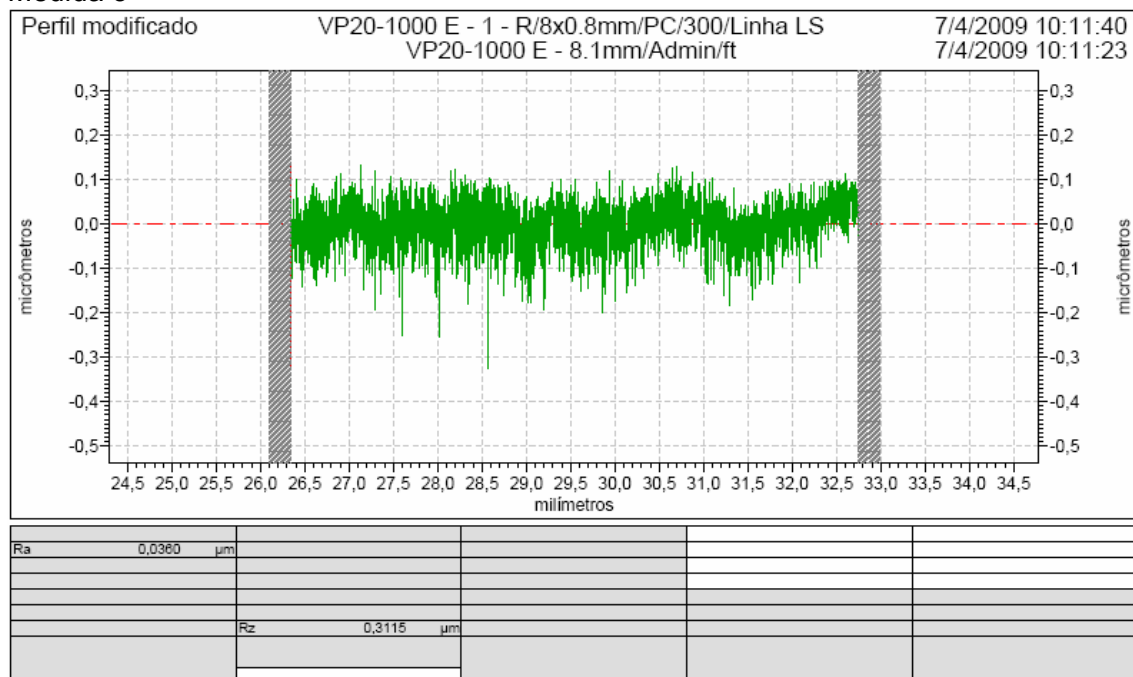
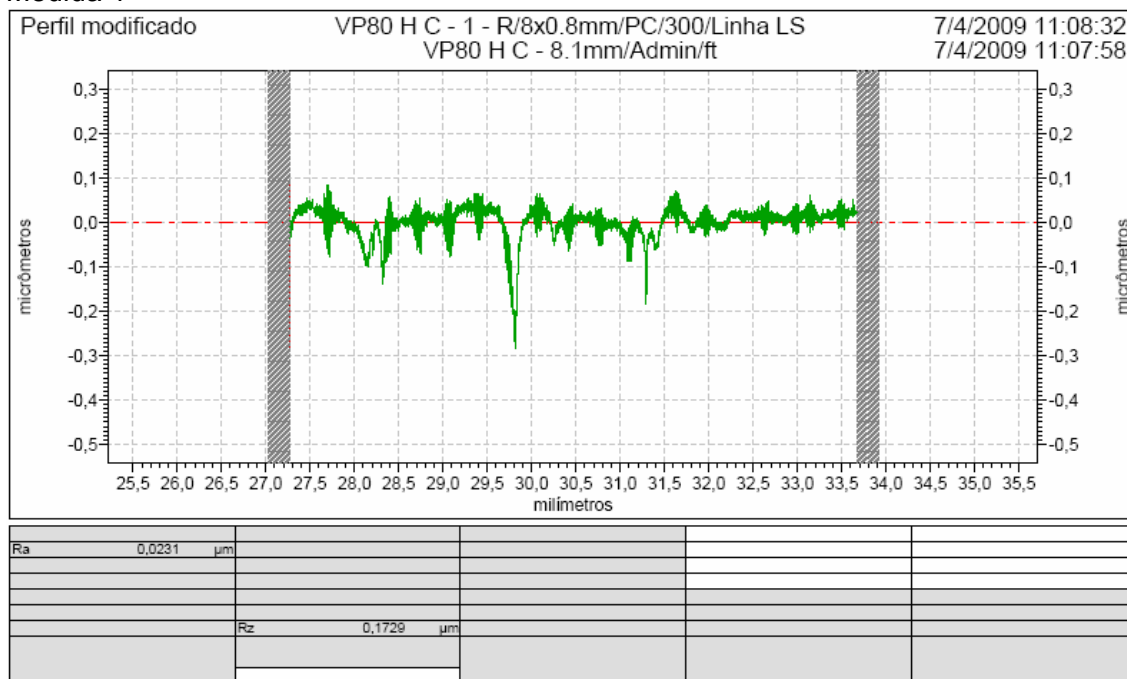
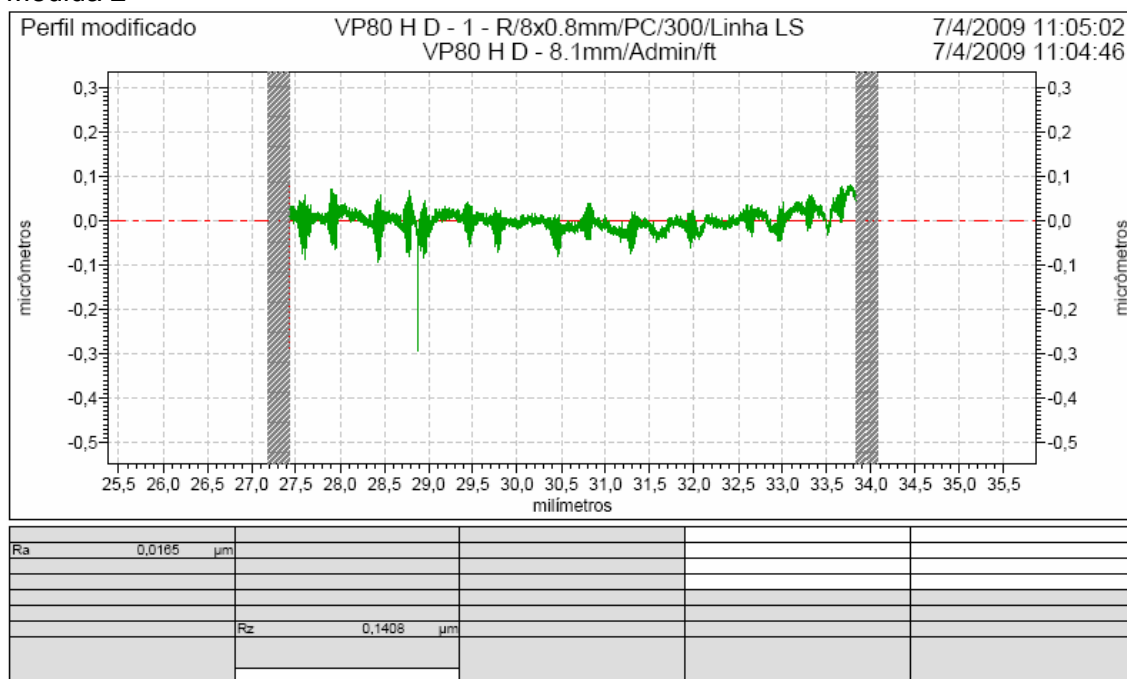


Figura 8.10 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço VP20 ISO com granulometria 1000μm.

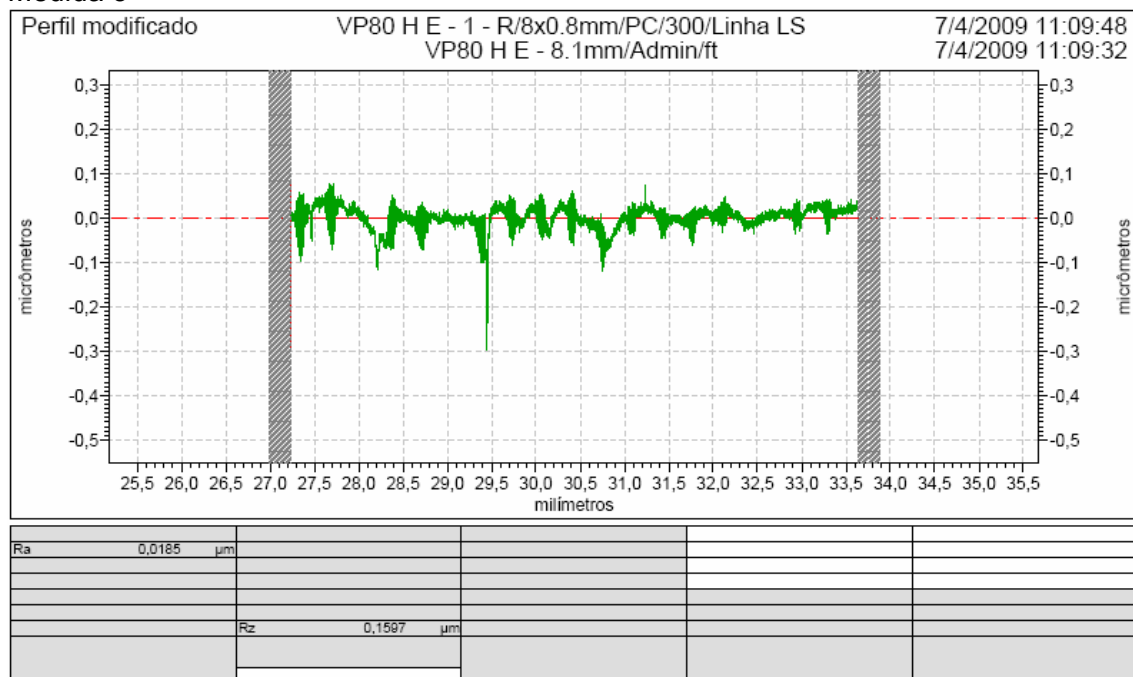
Medida 1



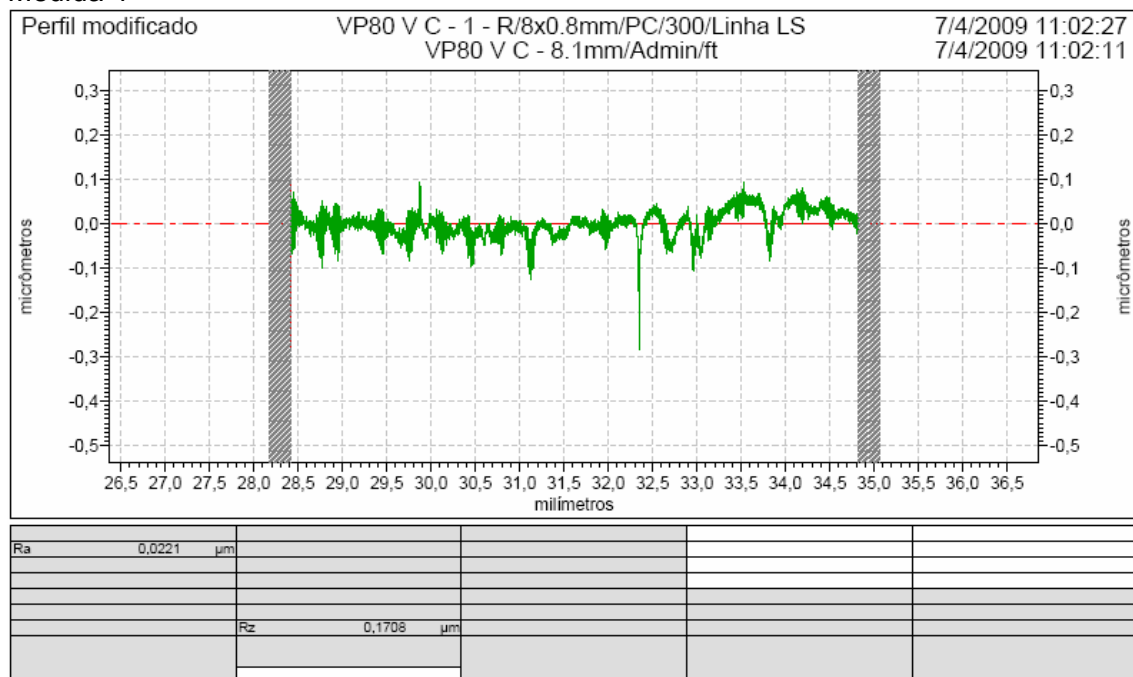
Medida 2



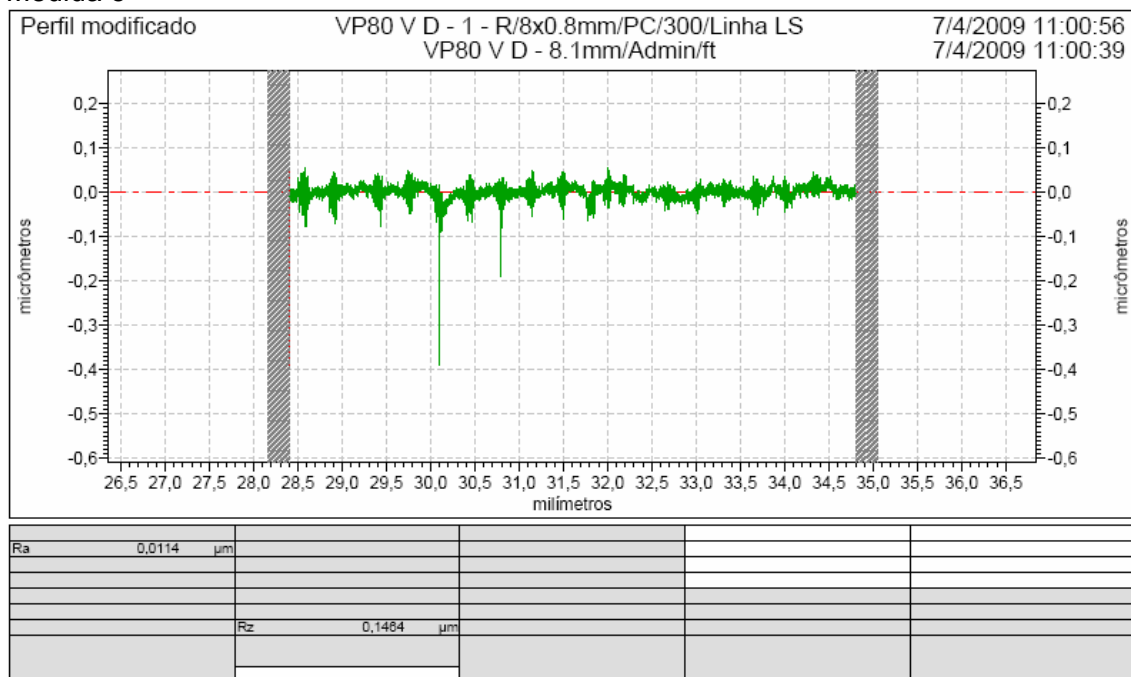
Medida 3



Medida 4



Medida 5



Medida 6

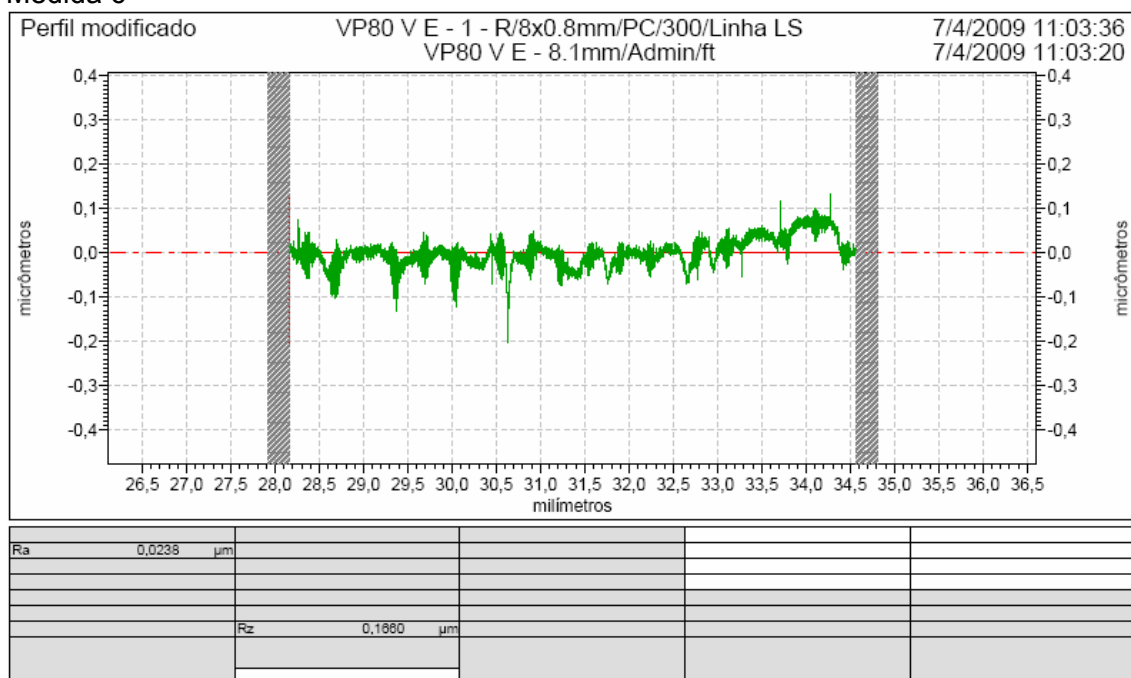
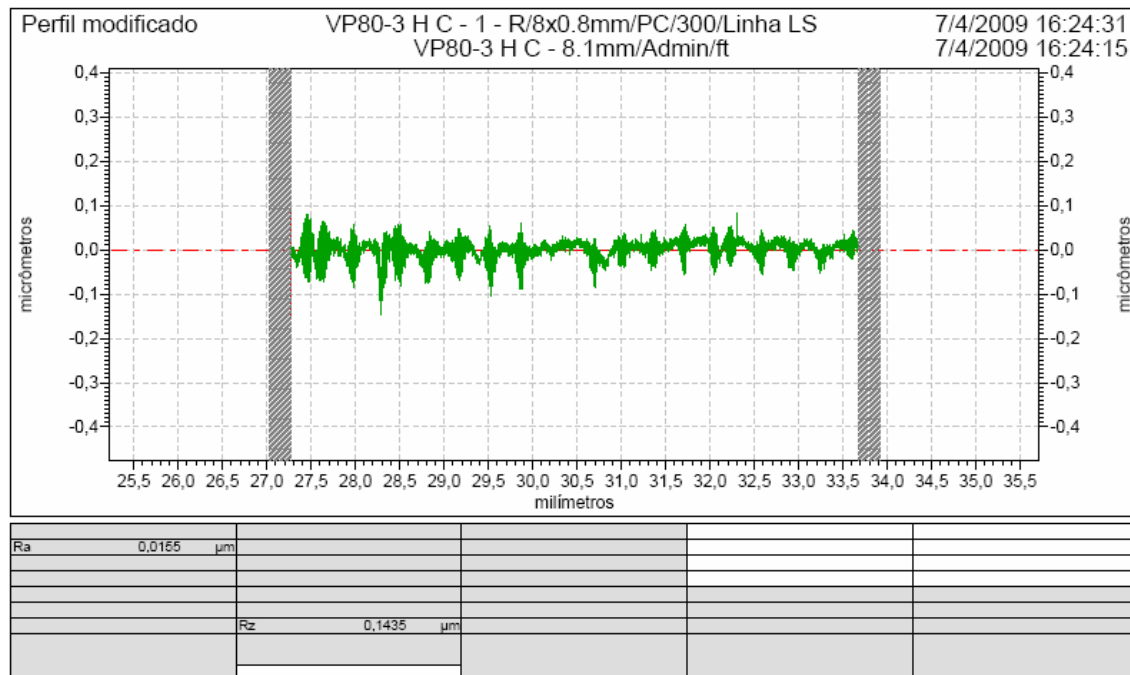
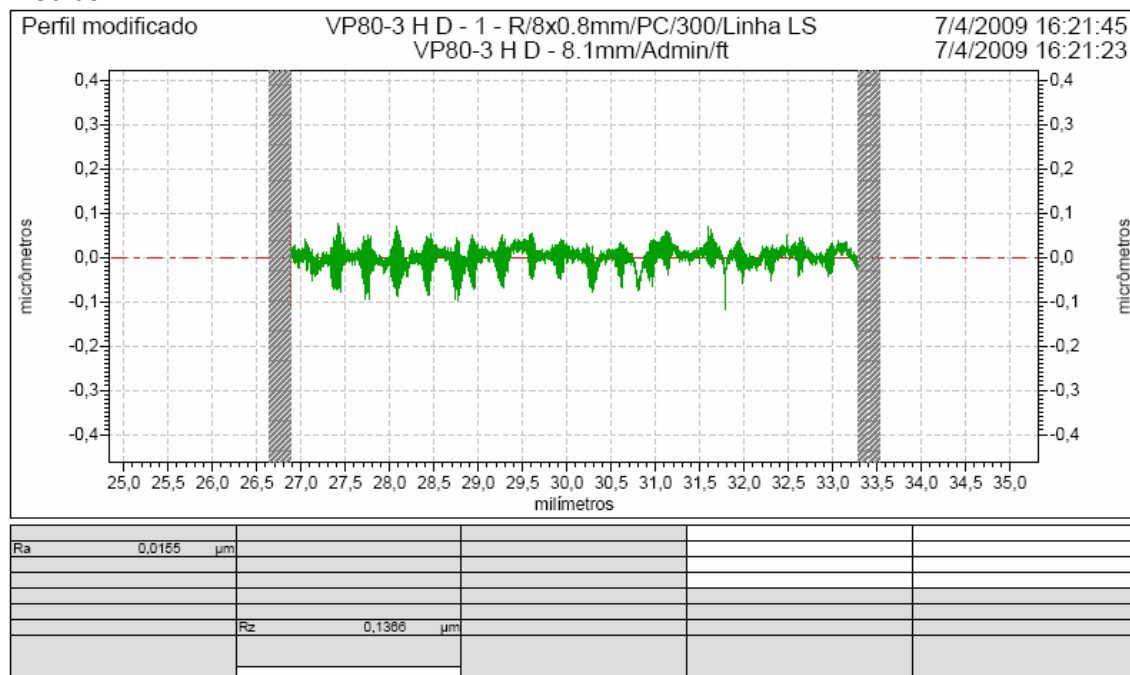


Figura 8.11 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço VP80 com granulometria 1 μ m.

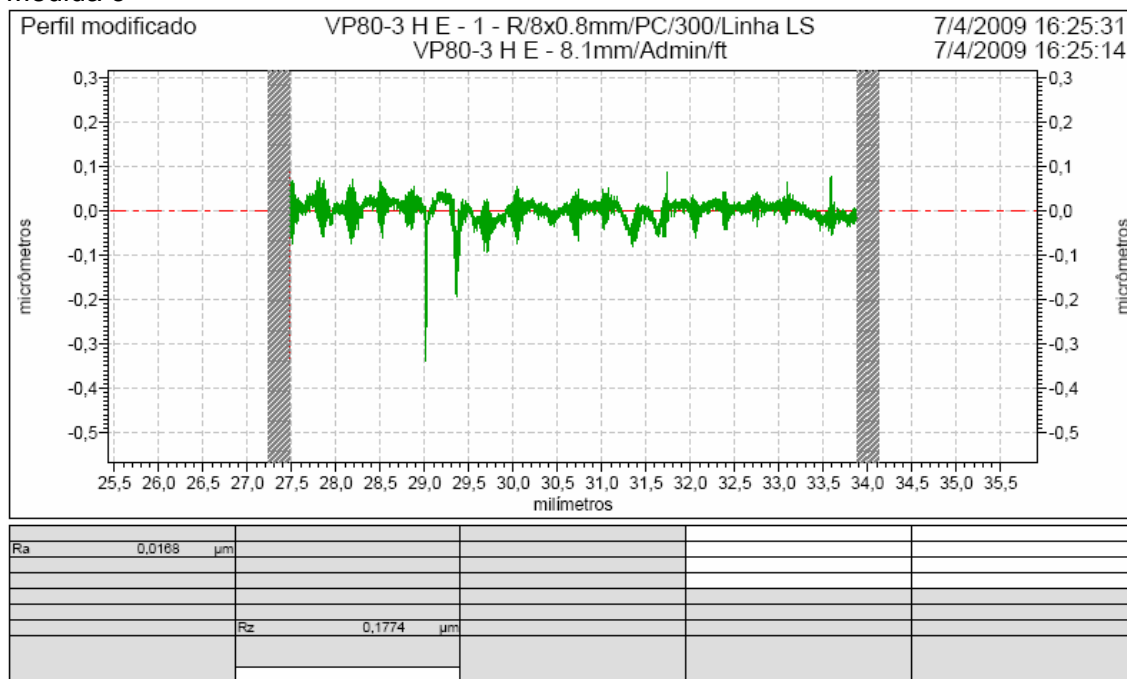
Medida 1



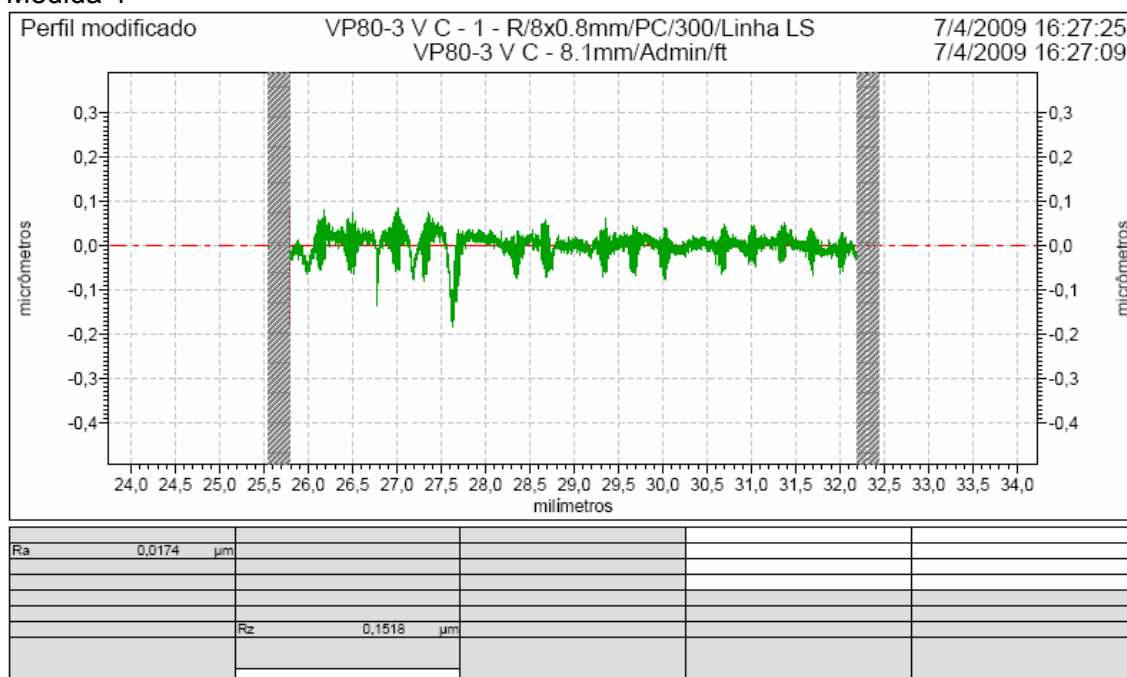
Medida 2



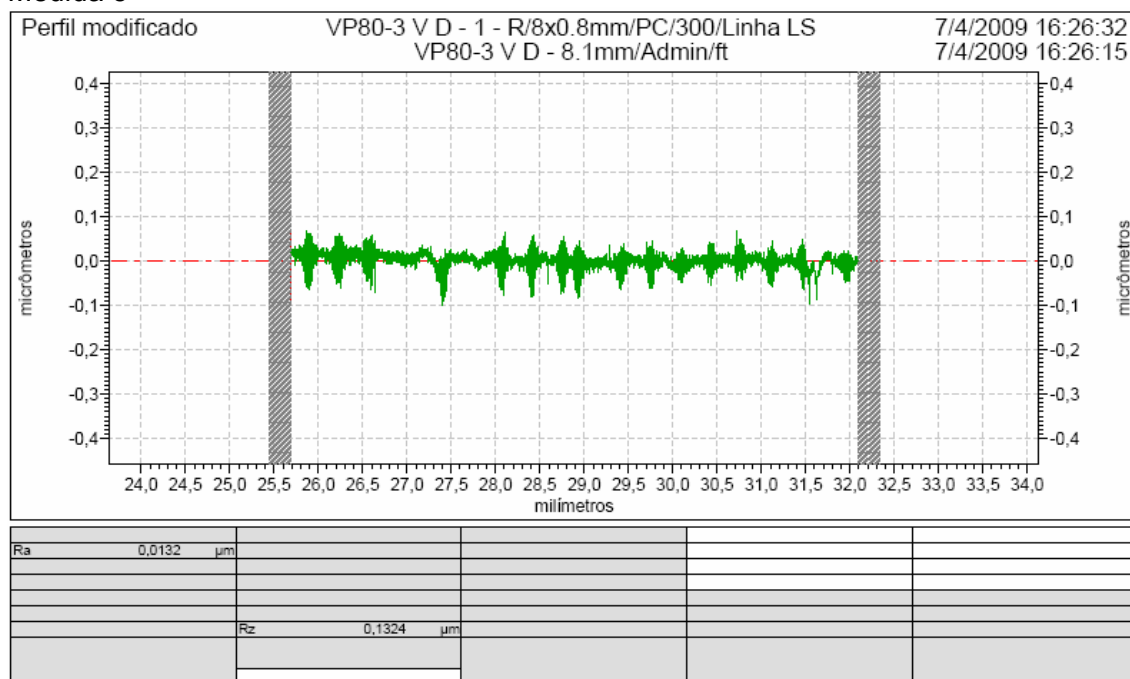
Medida 3



Medida 4



Medida 5



Medida 6

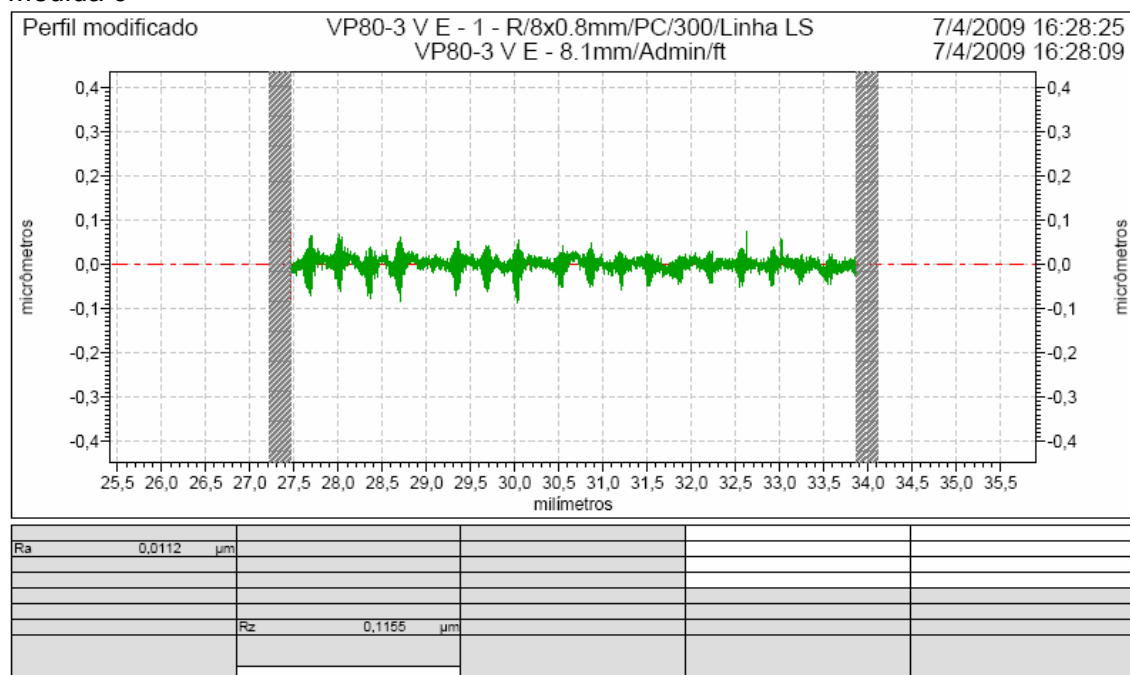
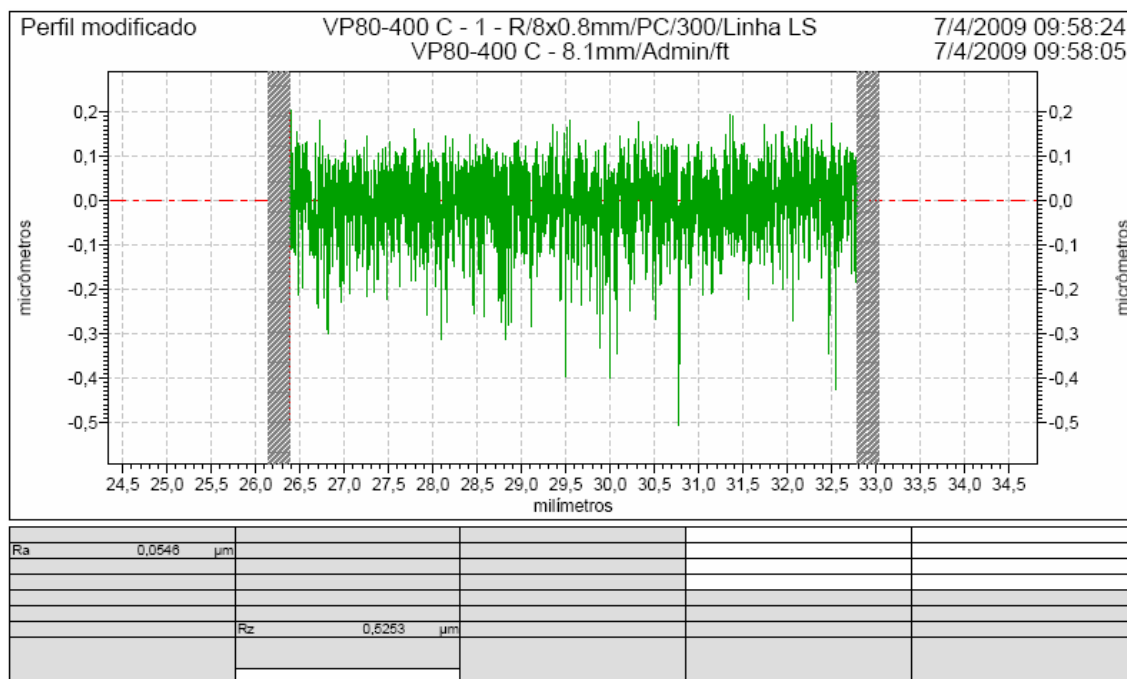
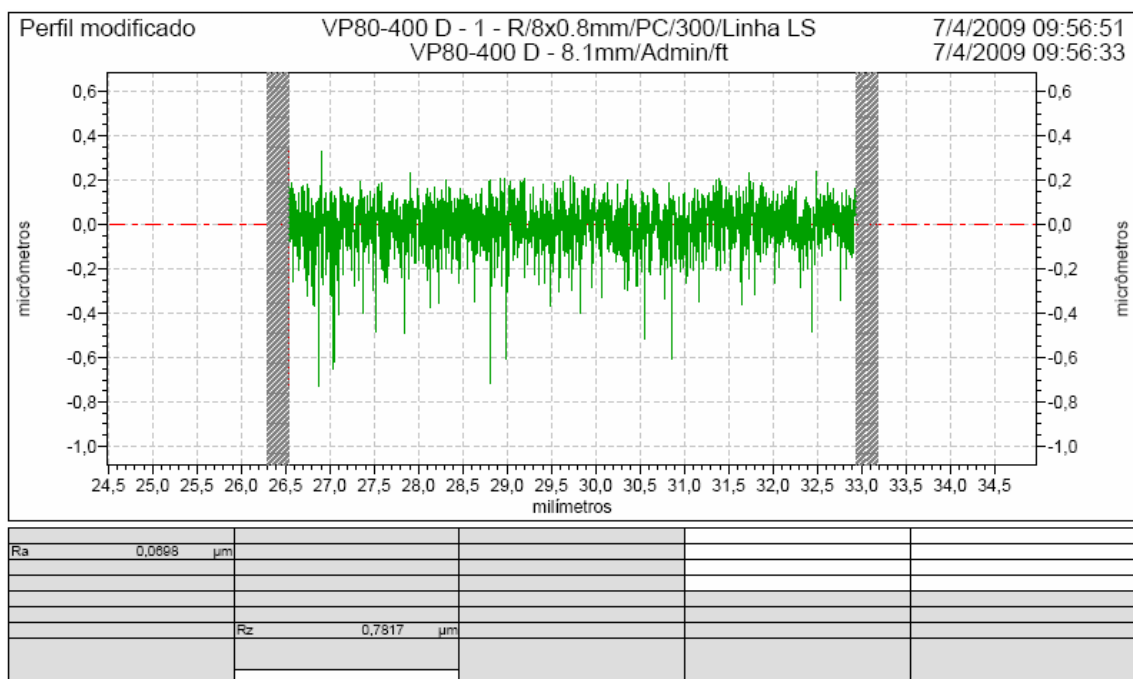


Figura 8.12 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço VP80 com granulometria $3\mu\text{m}$.

Amostra 1



Amostra 2



Amostra 3

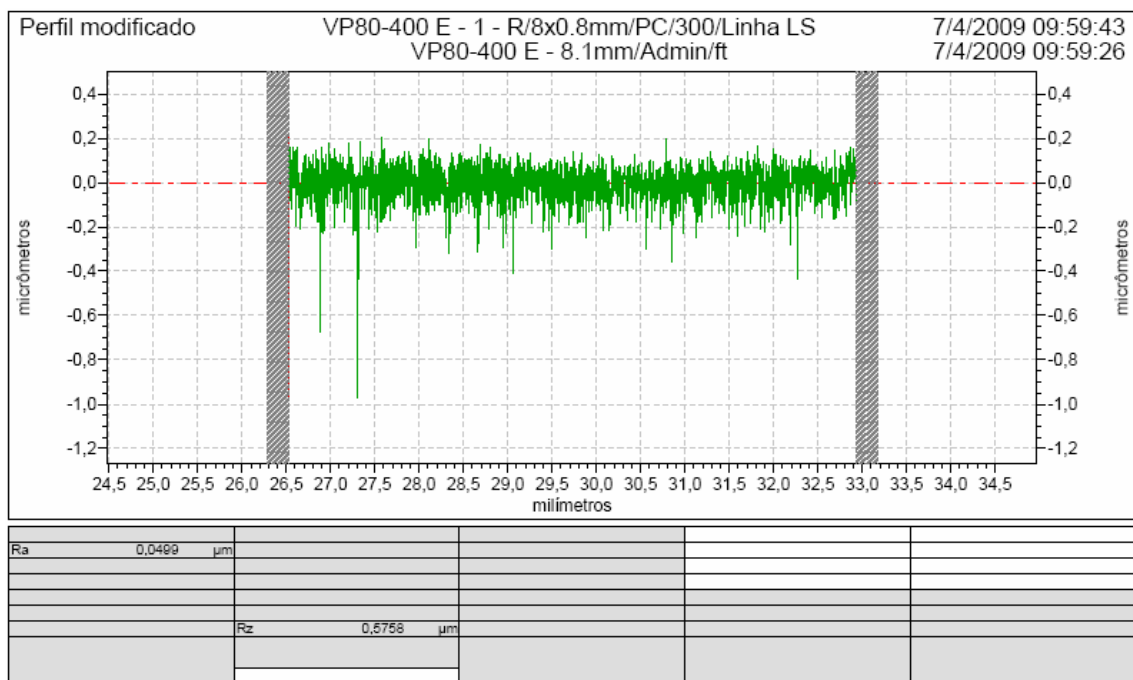
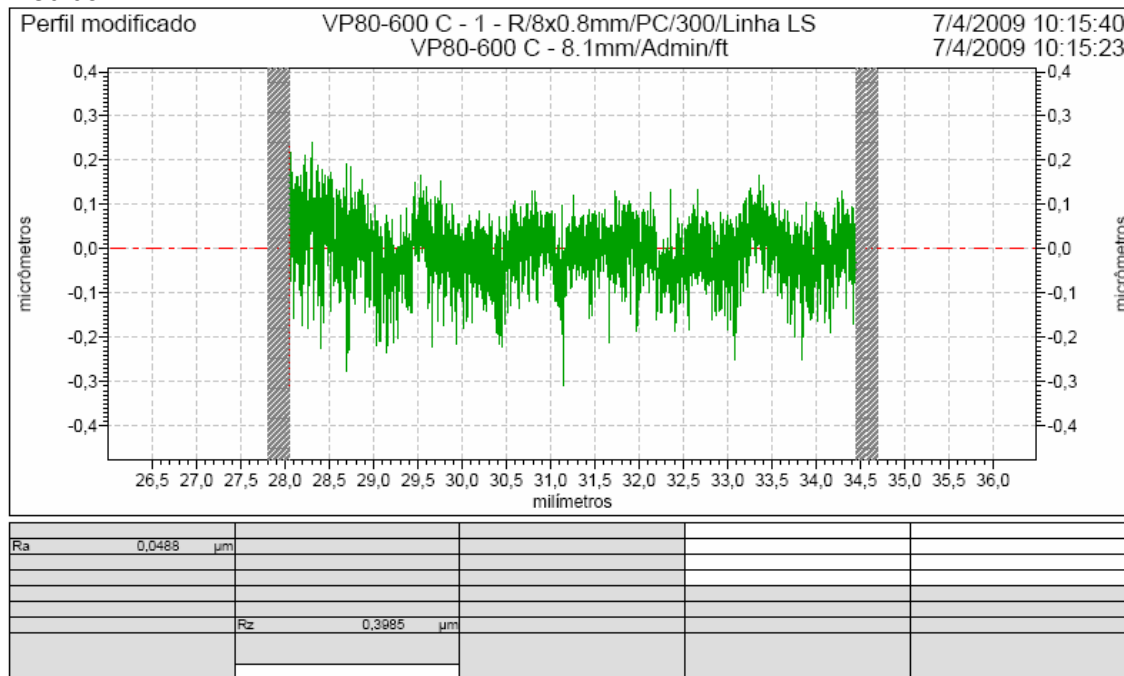
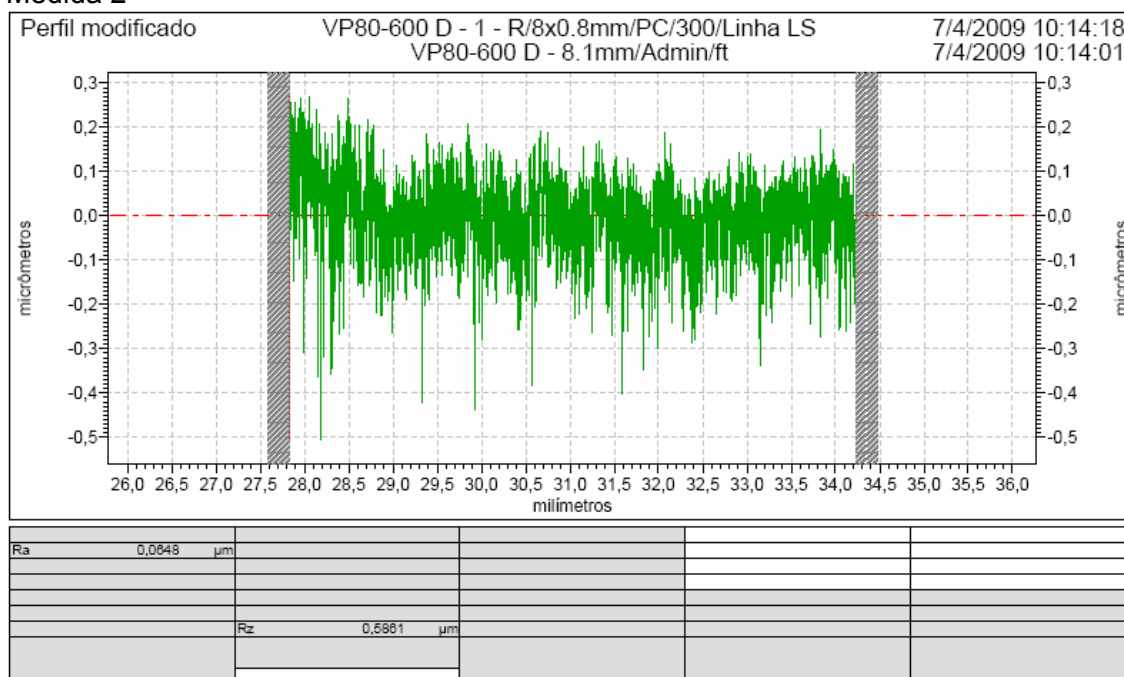


Figura 8.13 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço VP80 com granulometria 400 μ m.

Medida 1



Medida 2



Medida 3

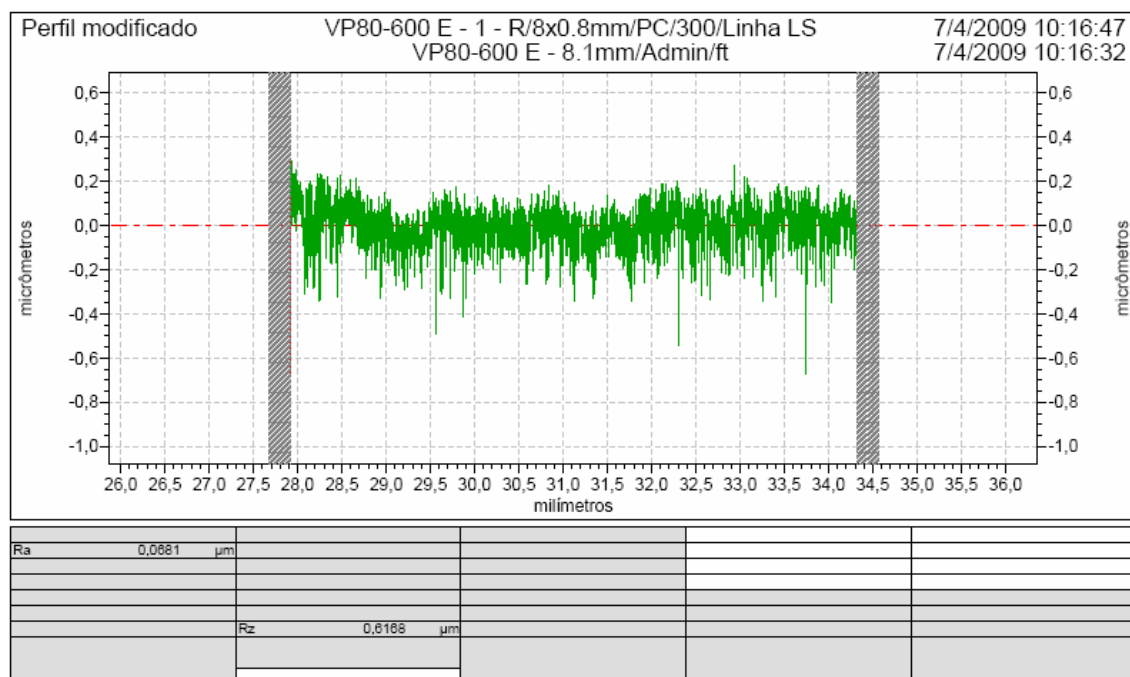
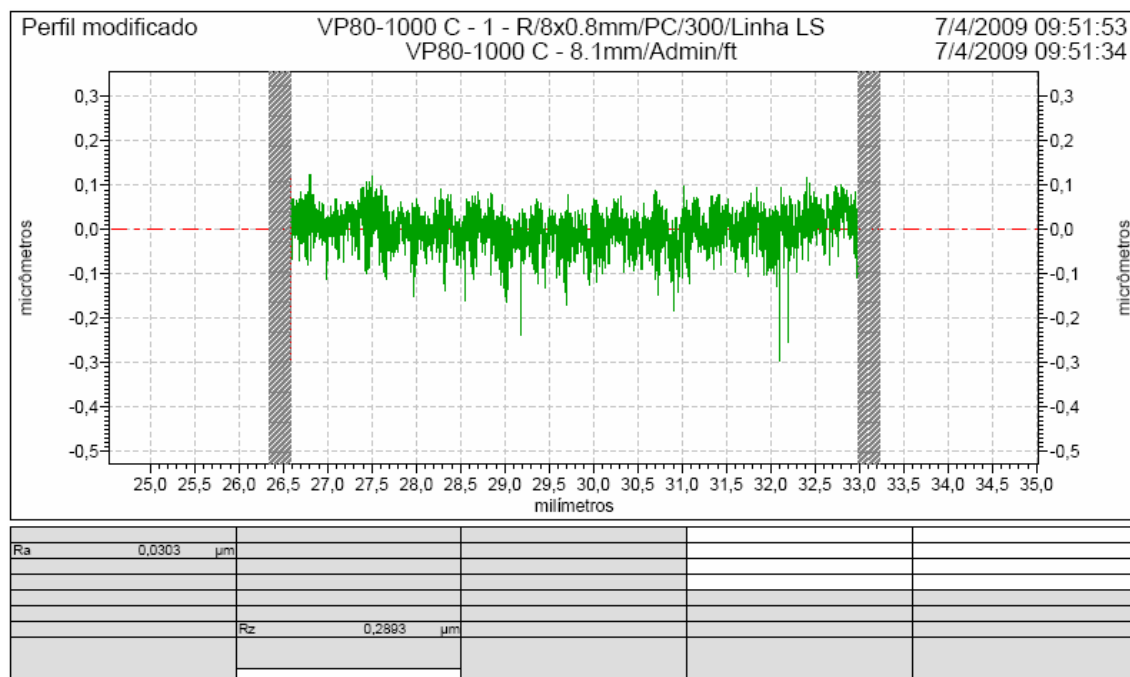
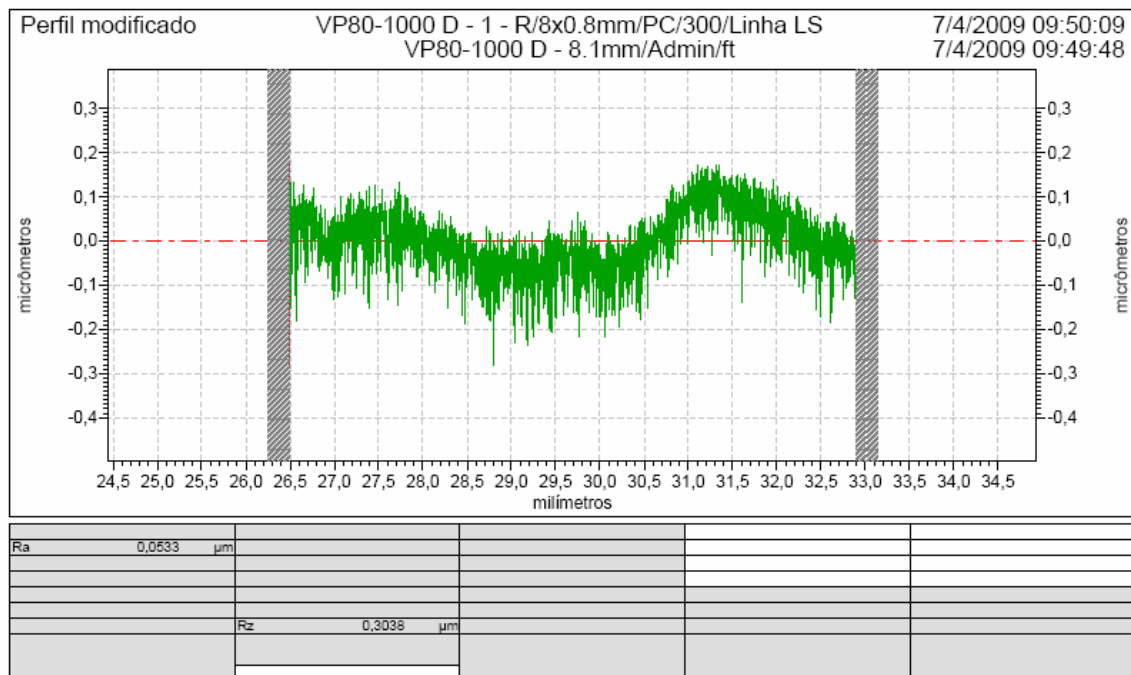


Figura 8.14 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço VP80 com granulometria 600μm.

Medida 1



Medida 2



Medida 3

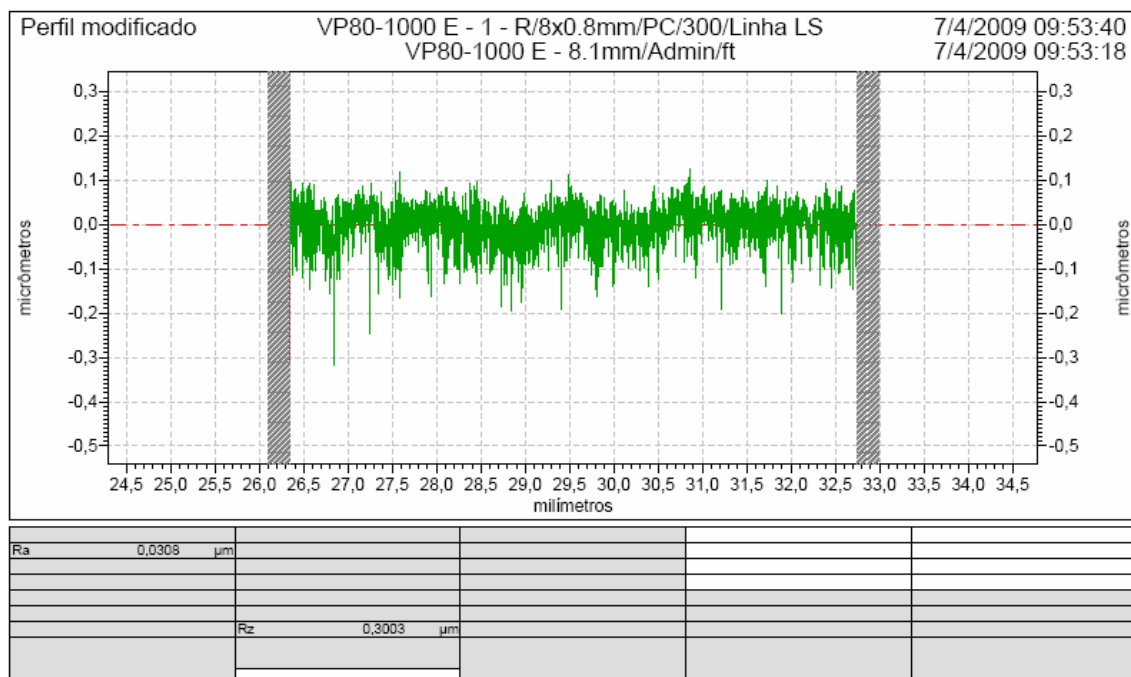


Figura 8.15 – Rugosidade obtida pelo rugosímetro Form Talysurf Intra da marca Taylor Hobson para o aço VP80 com granulometria 1000 μm .