

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO A LASER NA ANÁLISE DA  
TEXTURA DA SUPERFÍCIE GERADA POR TORNEAMENTO**

por

**Marcelo Mennet Marchiori**

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, maio de 2013

ESTUDO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO A LASER NA ANÁLISE DA TEXTURA DA  
SUPERFÍCIE GERADA POR TORNEAMENTO

por

**Marcelo Mennet Marchiori**

Licenciado em Física

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,  
da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Fabiano Bernardi

IF/UFRGS

Prof. Dr. Ricardo Rego Bordalo Correia

IF/UFRGS

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha  
Coordenador Substituto do PROMEC

Porto Alegre, 28 de maio de 2013.

*“God made solids, but surfaces were the work of the devil.”*  
Wolfgang Pauli

## **AGRADECIMENTOS**

À Ariadne Lamana, a mulher mais maravilhosa do mundo, minha esposa, da qual se deve mandar erigir uma estátua muito maior que o Cristo Redentor.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André João de Souza, sinceros e fraternos agradecimentos e pedidos de desculpas mil.

Ao pessoal do Laboratório de Usinagem (UFRGS), aos professores e pessoal do Laboratório Laser (UFRGS).

Aos professores Dr. Mikiya Muramatsu (USP) e Dr. Armando Albertazzi Gonçalves Jr. (UFSC), que me responderam mui prontamente quando lhes enviei minhas dúvidas.

Aos amigos Guilherme Cortelini, Guilherme Vargas, Júlio Shoffen, Flavio Horowitz, Ricardo Franke, Paulo Emmanuel, Roberto Ribeiro, Rafael Crespo e a todos os outros que eventualmente tenham sido esquecidos neste documento e que torceram por mim, sintam-se lembrados de coração.

Ao papai, que me proporcionou poder estudar; à mamãe, que sempre deu apoio; aos irmãos, pois, tenho certeza, torceram muito por isso.

E finalmente, mas não menos importante, ao CNPq, pelo apoio financeiro sob a forma de bolsa.

## RESUMO

A determinação da rugosidade é parte fundamental para a classificação da qualidade de uma superfície. Assim, iniciou-se este trabalho realizando-se estudos a respeito de seus métodos de medição. Devido à grande adaptabilidade e à velocidade dos métodos a laser, os estudos foram direcionados para estes tipos de técnicas de medição. Verificou-se que esses dispositivos vinculavam-se a sistemas em que o laser refletido era analisado através de sistemas com detectores do tipo CCD, em que a imagem refletida era analisada num todo. Assim, a bibliografia trouxe inspiração para mensurar a rugosidade de uma superfície gerada por torneamento horizontal, a partir da intensidade laser refletida. Propôs-se, então, um método baseado exclusivamente, na intensidade do sinal que era refletido pela superfície em estudo, a contar de uma incidência normal, já que aos autores ressaltavam que quanto maior a rugosidade da superfície menor seria o sinal refletido por ela. O sistema foi montado e sua capacidade de diferenciar distintas rugosidades foi testada. Então foram produzidas amostras com diferentes rugosidades, a fim de se obter uma função que pudesse correlacionar o sinal laser com a respectiva rugosidade (medida esta feita em rugosímetro de agulha). A função de transferência encontrada foi testada em amostras dissemelhantes das que a geraram, com o intuito de comprovar sua eficácia. Amostras fabricadas com ferramentas distintas de corte também foram produzidas e submetidas ao mesmo procedimento. As funções de transferência geradas alcançaram sucesso na previsão da rugosidade em, no máximo, 16,6% dos pontos, considerando uma margem de erro de 20%. A seguir, procurando-se os motivos que pudessem ter causado este percentual, levantou-se a possibilidade de estarem ocorrendo efeitos ópticos capazes de causar interferências devido às irregularidades na superfície. Efeitos capazes de degenerarem o sinal refletido. A comprovação de que o sinal eventualmente poderia estar sendo perturbado aconteceu através de referência bibliográfica e de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, em que se pôde observar a existência de estruturas na face das amostras que seriam isolada ou conjuntamente capazes de causar os efeitos citados.

**Palavras-chave:** rugosidade média, sistema de medição laser, sinal refletido, interferência.

## **ABSTRACT**

The determination of the roughness is a key for a good classification of a surface. Thereby, the work was started with a study about the roughness measurements methods. Due to the great adaptability and speed of laser methods, the studies were directed to these kinds of measurement techniques. It was observed in the literature that these laser devices were linked to systems where the reflected laser was analyzed by systems with CCD detectors, where the reflected image was entirely analyzed. Hence, the bibliography brought inspiration to measure the surface roughness generated by axial turning from the intensity of the reflected laser. It was proposed then a measurement method exclusively based on the intensity of the signal that was reflected by the surface under study, because the authors noted that as the roughness of surface became bigger as the signal reflected is became smaller. The proposed system has been assembled and ability to distinguish different roughness was tested successfully. Then samples were produced with different roughness in order to obtain a function that would correlate the laser signal with its roughness (this measurement is made by tactile measurement instrument). The transfer function obtained was tested on different samples that generated in order to prove its efficacy. Samples produced with different cutting tools were also produced and subjected to the same procedure. The transfer functions reached a successful prediction of the roughness maximum for 16.6% of the points assuming a margin of error of 20%. So, looking up the reasons that could have caused this percentage we think the possibility as the occurrence of some optical effects that can cause interference due to irregularities on the surface. These optical effects can degenerate the reflected signal. The proof that the signal could possibly be corrupted was made by the bibliographic references and some images obtained by scanning electron microscopy in which they could observe the existence of structures on the sample surfaces that would can be a reason for these effects individually or together.

**Keywords:** roughness average, laser measuring system, reflected signal, interference.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos.....	7
1.1.1	Geral.....	7
1.1.2	Específicos.....	7
1.2	Justificativa.....	7
1.3	Organização da Dissertação.....	7
<b>2</b>	<b>RUGOSIDADE.....</b>	<b>9</b>
2.1	Caracterização da Superfície.....	10
2.2	Parâmetros de Rugosidade.....	11
2.3	Medição de Rugosidade.....	13
2.4	Avaliação da Rugosidade por Métodos de Medição a Laser.....	15
2.4.1	Espalhamento Óptico.....	21
<b>3</b>	<b>PROPOSTA DE MÉTODO DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE.....</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
4.1	Preparação do Laser e do Chopper.....	27
4.2	Amplificador Lock-in.....	28
4.3	Posicionamento da Amostra.....	30
4.4	Verificação do Alinhamento.....	31
4.5	Aquisição de Dados.....	32
4.6	Softwares para Análise de Dados.....	32
4.7	Procedimentos Preliminares.....	33
4.8	Caracterização dos Corpos de Prova.....	34
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTAÇÕES.....</b>	<b>37</b>
5.1	Testes Iniciais.....	37
5.2	Testes com Aço SAE 1020 e SAE 4140.....	41
5.3	Testes com Aço SAE 4140 e Ferramenta Alisadora.....	47
5.4	Testes com Aço SAE 4140 e Ferramenta Convencional.....	50
5.5	Validação dos Resultados das Funções FT <sub>1</sub> e FT <sub>2</sub> .....	53
5.5.1	Validação de FT <sub>1</sub> .....	53
5.5.2	Validação de FT <sub>2</sub> .....	54
<b>6</b>	<b>Discussão dos Resultados.....</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>63</b>
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	64
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema dos movimentos relativos entre a peça e a ferramenta [Sandvik, 2009] ..2	2
Figura 1.2: Esquema do perfil teórico de corte e da ferramenta responsável pela geração da rugosidade [adaptado de Machado <i>et al.</i> , 2009] .....	2
Figura 1.3: Esquema do perfil de corte pela ferramenta: (a) alisadora; (b) convencional [Grzesik e Zalisz, 2008].....	2
Figura 1.4: Ordens de desvio da superfície [adaptado de Lu, 2008].....	3
Figura 2.1: Croqui de superfícies: (a) geométrica; (b) real [ABNT/NBR ISO 4287:2002].....	10
Figura 2.2: Diagrama dos elementos que influenciam no perfil da superfície. [Rosa, 2004] ..	10
Figura 2.3: Distâncias de pico e de vale e representação da linha média para um dado comprimento de avaliação [NBR ISO 4287:2002].....	11
Figura 2.4: Faixa de valores de rugosidade média para diferentes processos de fabricação por usinagem [Souza, 2011].....	14
Figura 2.5: Esquema da montagem de Osanna <i>et al.</i> , 1988: as bobinas movimentam os ímãs para manter o laser focalizado na superfície.....	16
Figura 2.6: Intensidade relativa (%) vs. ângulo de reflexão (°) [adaptado de Yim e Kim, 1990] .....	17
Figura 2.7: Padrão de imagem conforme direção das ranhuras [adaptado de Kim <i>et al.</i> , 2002]. .....	19
Figura 2.8: Esquema da montagem do aparato [adaptado de Wang <i>et al.</i> , 2003].....	19
Figura 2.9: Princípio de medição da luz espalhada [adaptado de Thurn e Brodmann, 1986]..	21
Figura 2.10: (a) princípio do método de espalhamento de luz; (b) micrografia de superfície usinada em torno cilíndrico e superfície laminada a frio; (c) padrão de espalhamento para superfície laminada a frio [adaptado de Thurn e Brodmann, 1986].....	22
Figura 2.11: Esquema da influência do perfil da amostra na distribuição de espalhamento para duas superfícies ('a' e 'b') com rugosidades semelhantes [adaptado de Thurn e Brodmann, 1986]. .....	22
Figura 3.1: Montagem esquemática do sistema de medição proposto .....	23
Figura 4.1: Sistema de medição laser desenvolvido.....	26
Figura 4.2: Foto do laser.....	27
Figura 4.3: Painel de configurações do <i>lock-in</i> . .....	28
Figura 4.4: Esquema teórico de funcionamento de um <i>lock-in</i> [adaptado de Wolfson, 1991].	28
Figura 4.5: Fotos do posicionador de amostras: (a) porta amostra em sua totalidade; (b) detalhe da mesa de apoio e do “batente” de posicionamento; (c) sistema de translação vertical; (d) o sistema de translação horizontal .....	30

Figura 4.6: (a) vista superior de um nível bolha; (b) esquadro combinado completo. ....	31
Figura 4.7: Fotografia dos monitores analógicos e digitais do <i>lock-in</i> . ....	32
Figura 4.8: Rugosímetro Mitutoyo SurfTest SJ-201: (a) padrão de calibração/aferição, a região marcada com “P” é polida; a região marcada com “R” é rugosa; (b) equipamento de medição .....	33
Figura 4.9: Corpos de prova iniciais. (a) usinagem igual em todo seu comprimento (uma amostra); (b) quatro amostras diferentes (quatro combinações de parâmetros de corte). Dimensões em milímetros. ....	34
Figura 4.10: CP4140 produzido com 13 amostras, feito em SAE4140. Valores em (mm). ....	36
Figura 5.1: Amostras para medição de refletividade total para os aços: (a) SAE 1020; (b) SAE 1045; (c) SAE 4140 .....	39
Figura 5.2: Espectrofotômetro CARY5000.....	39
Figura 5.3: Teste comparativo de refletividade entre SAE4140, SAE1020 e SAE1045: (a) espectro total de 500 até 700 nm; (b) detalhe no comprimento de onda usado (633 nm).....	40
Figura 5.4: Distribuição dos pontos no gráfico da Rugosidade vs. Sinal laser espalhado.....	41
Figura 5.5: Rugosidade efetiva vs. Sinal laser (as barras de erros representam o desvio padrão de cada um dos pontos).....	43
Figura 5.6: Funções de transferência com diferentes coeficientes de correlação.....	44
Figura 5.7: Rugosidade $R_a$ vs Sinal Laser dos corpos de prova 1, 5, 8, 23, 24. ....	45
Figura 5.8: Gráfico (corrigido) de $R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) vs. Sinal laser ( $\mu\text{V}$ ) .....	46
Figura 5.9: Primeiro gráfico do melhor ajuste de Rugosidade vs Sinal laser.....	46
Figura 5.10: Gráfico que expressa a FT, juntamente com os pontos experimentais .....	47
Figura 5.11: Gráfico de $FT_1$ e pontos experimentais de $R_a$ vs. Sinal laser, CP4140 .....	49
Figura 5.12: Gráfico de rugosidade $R_a$ vs. sinal laser SL das amostras CP 4140 (0,07-0,18) com três pontos com desvio padrão menor que a marca do ponto .....	51
Figura 5.13: Curva de melhor ajuste referente aos pontos da amostra CP4140 (0,07-0,18) com dados experimentais.....	51
Figura 5.14: Pontos de rugosidade corrigido vs. sinal laser, do CP4140 (0,07-0,18) com três pontos com desvio padrão menor que a marca do ponto.....	52
Figura 5.15: Curva $FT_2$ e pontos da amostra CP4140 (0,07-0,18) com dados da Tabela 5.7 ..	53
Figura 6.1: Diferença de caminho óptico [Persson, 1996] .....	57
Figura 6.2: Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL/EO modelo Jib-450.....	59
Figura 6.3: Imagem feita em MEV da superfície da amostra CP8D: (a) estrias com espaçamento igual ao avanço, (b) estriamento muito menor que o avanço.....	59
Figura 6.4: Imagem feita em MEV da superfície da amostra CP5B com sequência de magnificação: (a) 25x; (b) 50x; (c) 100x; (d) 500x; (e) 2000x.....	60

Figura 6.5: Imagem MEV da superfície da amostra CP8A com microtrincas com sequência de magnificação: (a) 500x; (b) 2000x; (c) 4500x.....	60
Figura 6.6: Imagem MEV da superfície da amostra CP1B com detalhe para as estruturas esferoidais: (a) 25x; (b) 50x; (c) 100x; (d) 500 x; (e) 2000x; (f) 4500x.....	61
Figura 6.7: No detalhe do desgaste em ferramenta de corte, distantes um do outro aproximadamente 10 $\mu\text{m}$ [Grzesik e Zalisz, 2008].....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Tabela de comprimento da amostragem ( <i>cut-off</i> ).....	14
Tabela 5.1: Dados da potência emitida pelo laser utilizado nas medições.....	37
Tabela 5.2: Composição aproximada dos corpos de prova (em %) .....	38
Tabela 5.3: Resumo dos dados de Rugosidade ( $R_a$ ) medida com SJ-201 e sinal laser espalhado .....	40
Tabela 5.4: Dados combinados para os cinco corpos de prova .....	42
Tabela 5.5: Erro relativo na estimação da rugosidade $R_a$ com $FT_1$ para os Testes Iniciais.....	48
Tabela 5.6: Valores efetivos do sinal laser e dos valores de rugosidade calculados e medidos. ....	49
Tabela 5.7: Dados experimentais CP4140 (0,07-0,18).....	50
Tabela 5.8: Uso das $FT_1$ para previsão de rugosidades de CP4140(0,07-0,18) .....	54
Tabela 5.9: Uso das $FT_2$ para previsão de rugosidades de CP1, CP5, CP8,CP23, CP24.....	54
Tabela 5.10: Uso das $FT_2$ para previsão de rugosidades de CP4140(0,07-0,18) .....	55

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AFM:	Microscópio de Força Atômica ( <i>Atomic Force Microscope</i> )
ASC:	Correlação Angular de Speckle ( <i>Angular Speckle Correlation</i> )
CCD:	Dispositivo de Acoplamento de Carga ( <i>Charge Coupled Device</i> )
CD:	Disco Compacto ( <i>Compact Disk</i> )
ELA:	Efeito de Localização de Anderson
FT:	Função de Transferência
LAMEF:	Laboratório de Metalurgia Física
Laser:	Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação ( <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> )
LSA:	Análise de Escaneamento a Laser ( <i>Laser Scanning Analysis</i> )
PSD:	Detecção Sensível à Fase ( <i>Phase Sensitive Detection</i> )
RMS:	Raiz quadrática média ( <i>Root Mean Square</i> )
rpm:	Rotações por minuto
SAE:	Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade ( <i>Society of Automotive Engineers</i> )
SM:	Sistema de medição
STM:	Microscópio de tunelamento ( <i>Scanning Tunneling Microscope</i> )

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\theta_m$	Ângulo onde ocorre o máximo de interferência da grade [rad]
$\theta_i$	Ângulo de incidência da luz na grade [rad]
$m$	Ordem de difração da grade [adimensional]
$d$	Espaçamento existente entre as fendas (ou padrões) da grade [m]
$\lambda$	Comprimento de onda da luz incidente [m]
$a_p$	Profundidade de corte [mm]
$f$	Avanço da ferramenta de corte [mm/volta]
$r_{\varepsilon 1}, r_{\varepsilon 2}$	Raios de ponta <i>wiper</i> [mm]
$r_\varepsilon$	Raio de ponta da ferramenta de corte [mm]
$r_{bo}$	Raio de alisamento (para ferramenta <i>wiper</i> ) [mm]
$R_a$	Rugosidade de desvio aritmético médio [ $\mu\text{m}$ ]
$R_q$	Rugosidade de desvio médio quadrático [ $\mu\text{m}$ ]
$R_t$	Rugosidade de altura total do perfil [ $\mu\text{m}$ ]
$R_z$	Rugosidade de altura máxima do perfil [ $\mu\text{m}$ ]
SL	Sinal Laser – intensidade laser refletida [ $\mu\text{V}$ ]

# 1 INTRODUÇÃO

Diferentes autores afirmam que a geração da rugosidade de uma superfície é dependente de vários fatores. Sendo assim, quando se trata de gerar a superfície por processo de usinagem de torneamento, os parâmetros, em geral, mais considerados são velocidade de corte<sup>1</sup>, avanço<sup>2</sup>, profundidade de corte<sup>3</sup>, geometria da ferramenta e dureza da peça [Attanasio *et al.*, 2010; Lu, 2008; Ozel, 2005; Prazad *et al.*, 2009; Saini, 2012; Suhail *et al.*, 2010]. Entretanto, existem formas de prever, com boa aproximação, as rugosidades geradas por torneamento, utilizando esses parâmetros [Diniz *et al.*, 2003; Machado *et al.*, 2008; Kalpakjian e Schind, 2010; Klocke, 2011].

De maneira geral, os processos de usinagem podem ser divididos em dois grandes grupos: convencionais e não convencionais. Os processos convencionais são, de maneira geral, considerados aqueles que realizam o corte propriamente dito, principalmente por cisalhamento de uma porção do material da peça, ocasionado pelas grandes forças infringidas contra ela pela ferramenta cortante. Todavia os processos não convencionais utilizam outras técnicas para dar forma à peça, tradicionalmente fornecendo energia de maneira muito concentrada ao corpo que está sendo usinado, mas com taxa de remoção de material muito inferior, como, por exemplo, corte laser, eletroerosão, corte plasma [Souza, 2011].

Os processos de torneamento são definidos como sendo processos mecânicos de usinagem, destinados a gerar superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas de monocortantes, sendo que tais ferramentas têm geometria definida (cunhas cortantes com formato e tamanhos conhecidos) [Souza, 2011]. Pode-se ver uma representação esquemática de um processo de torneamento na Figura 1.1 para duas operações de corte externo distintas: faceamento e corte longitudinal.

Na Figura 1.1, “ $a_p$ ” indica a profundidade de corte, “ $n$ ” indica o sentido de rotação da peça e “ $f$ ” indica a direção e o sentido de avanço (movimento da ferramenta de corte, respectivamente, perpendicular e paralelo ao eixo de rotação da peça).

Sempre que uma superfície é submetida a um processo de torneamento, a ferramenta de corte deixa gravada nela uma marca, caracterizada por ser periódica e ter, em teoria, a forma negativa (espelhada) da ferramenta que a gerou.

---

<sup>1</sup> Velocidade de corte é a velocidade periférica da ponta da ferramenta na peça.

<sup>2</sup> Avanço é o deslocamento da ferramenta de corte paralelamente ao eixo de rotação, em uma volta da peça durante, a usinagem.

<sup>3</sup> Profundidade de corte é definida pela espessura da camada de material retirada da peça que está sendo usinada.

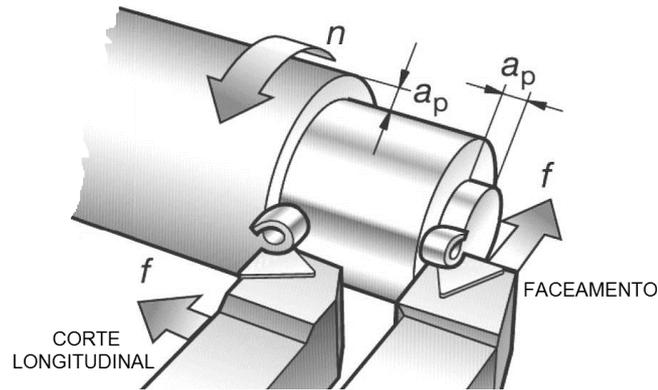


Figura 1.1: Esquema dos movimentos relativos entre a peça e a ferramenta [Sandvik, 2009]

A Figura 1.2 esquematiza como a rugosidade é gerada em torneamento de forma dependente do avanço e da geometria da ferramenta de corte (raio de ponta).

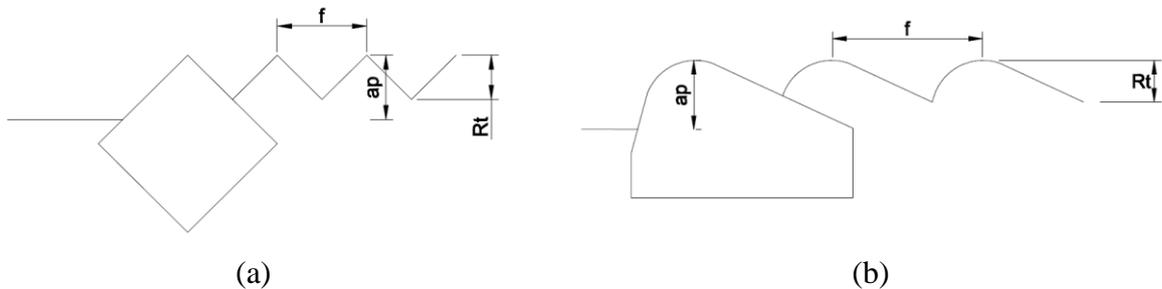


Figura 1.2: Esquema do perfil teórico de corte e da ferramenta responsável pela geração da rugosidade [adaptado de Machado *et al.*, 2009]

As ferramentas de corte alisadora (*wiper*) e convencional (*standard*) resultam em superfícies com características microgeométricas diferentes, como ilustra a Figura 1.3.

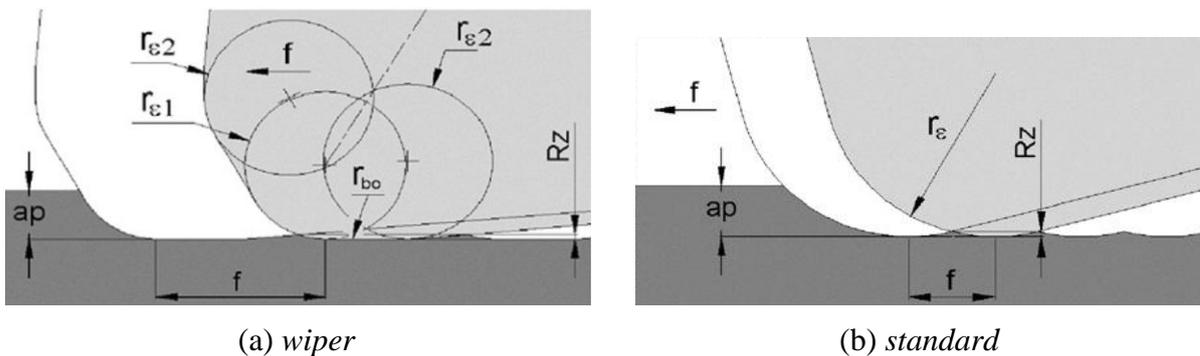


Figura 1.3: Esquema do perfil de corte pela ferramenta: (a) alisadora; (b) convencional [Grzesik e Zalisz, 2008]

Uma pastilha convencional tem raio de ponta único, que pode variar de 0,1 a 2,4 mm. Além disso, a rugosidade está diretamente relacionada ao avanço utilizado. O raio de ponta

em uma pastilha alisadora (*wiper*) tem sua construção utilizando de 3 a 9 raios diferentes. Isso aumenta o comprimento de contato das pastilhas e o efeito das faixas de avanço ou a superfície de um modo positivo [Sandvik, 2009].

A textura gerada no torneamento é o que determina a rugosidade da superfície.

Quando o processo é de desbaste, a textura/rugosidade gerada pelo torneamento é grosseira, quando comparada à superfície gerada em processo de acabamento, pois os movimentos de avanço e profundidade de corte são maiores do que no acabamento. Isso se deve ao fato de que, no desbaste, o objetivo é, grosso modo, retirar material da peça, i.e., prepará-la para o processo de acabamento que, ao que tudo indica, virá logo após; e na etapa de acabamento, a meta é deixar a superfície com uma rugosidade “o mais próximo possível” da desejada e necessária para seu uso.

A rugosidade da superfície usinada por torneamento é o resultado, principalmente, da velocidade e profundidade de corte e das características geométricas da ferramenta. Contudo, existem outros fatores que podem influir sobre a geração de rugosidades, dentre eles: deformações plásticas, rupturas, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais, reações químicas etc. [Benardos e Vosniakos, 2003].

A rugosidade é um parâmetro muito importante em processos de fabricação, pois define quanto tempo de trabalho deverá ser despendido com uma peça até que ela obtenha o acabamento desejado. Normalmente, quando sua topografia é muito acidentada, a superfície é dita mais rugosa; e quando é menos irregular, diz-se menos rugosa (ou mais lisa). Pode-se observar na, Figura 1.4, como as diferentes influências são consideradas, dada cada ordem (tipo) de desvio que pode ocorrer.

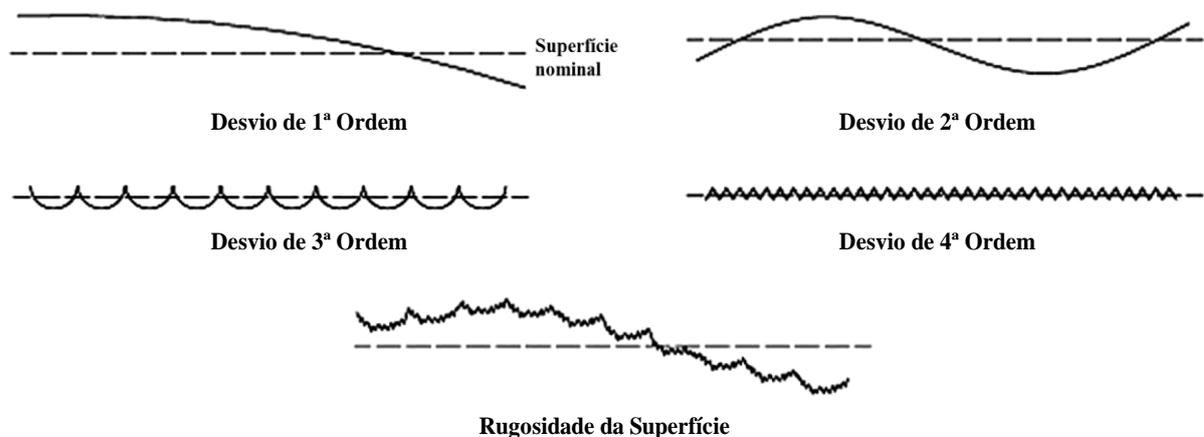


Figura 1.4: Ordens de desvio da superfície [adaptado de Lu, 2008]

A primeira ordem (desvio de forma) e a segunda ordem (ondulação) referem-se a

irregularidades macrogeométricas, causadas por: defeitos em guias de máquinas-ferramentas, deformações por flexão da máquina ou da peça, fixação errada da peça ou da ferramenta, deformações por temperatura, desgastes, vibrações, etc. A terceira ordem (ranhuras) e a quarta ordem (estrias, escamas, ressaltos) referem-se a: irregularidades microgeométricas devido à forma da cunha cortante da ferramenta, avanço, profundidade de corte, mecanismos de formação de cavacos, tratamentos superficiais etc.. As diferentes ordens se superpõem e formam o perfil real da rugosidade superficial [DIN 4760:1982-06; Lu, 2008]. Vale lembrar que a funcionalidade da superfície precisa sempre ser considerada; por exemplo, a superfície externa do bloco de um motor a combustão interna não exige o mesmo grau de acabamento que a superfície da câmara de combustão interna.

Apesar da boa previsibilidade teórica da rugosidade, sabe-se que grande parte das peças produzidas necessita de mensuração das rugosidades e, na atualidade, de maneira geral, faz-se uso de medições baseadas em técnicas que utilizam sistemas mecânicos que a medem através de uma agulha/ponteira/*probe* [Clarke e Thomas, 1979; Dhanasekar *et al.*, 2008; Goch *et al.*, 1999; Kiely *et al.*, 1992; Kima *et al.*, 2002; Mattsson e Wagberg, 1993; Shiraishi, 1989; Tay *et al.*, 2003; Thurn e Brodmann, 1986; Wang *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2003; Yanagi *et al.*, 1986; Yim e Kim, 1994]. Esses métodos mecânicos de medição, apesar de serem muito eficientes e precisos, implicam remoção da peça da máquina e/ou interrupção da operação de corte para a realização da medição. Quando a máquina é parada, seja para medir-se da rugosidade sem a retirada da peça, seja para a retirada da peça da máquina, perde-se tempo e aumenta-se o custo de produção. Caso o processo não seja interrompido, a medição da rugosidade só poderá ser realizada encerrada a usinagem, o que pode acarretar na perda total da peça fabricada e perda total do tempo investido nesse processo.

Além dos sistemas mecânicos por contato, existem alguns métodos de medição sem contato que são utilizados, também acarretando a necessidade de parada (interrupção) do processo, ou somente sendo aplicáveis após o término da etapa de corte, como os perfilômetros ópticos (por interferometria e por detecção do erro focal) [Moy *et al.*, 2011] e até sondas de varredura microscópica (AFM<sup>4</sup>) [Durakbasa *et al.*, 2007].

Estatísticas mostram que o tempo de máquinas operatrizes paradas, na indústria, chega a 6,8%, por quebra de ferramentas de corte. Assim, um processo que faça o monitoramento constante desta ferramenta e seja capaz de prever sua quebra iminente seria de grande ajuda. Além disso, se este monitoramento fosse capaz de verificar a rugosidade (acabamento da

---

<sup>4</sup> AFM = Microscópio de Força Atômica (do inglês *Atomic Force Microscope*).

superfície) da peça que está sendo usinada, isso seria útil ao processo como um todo [Rehorn *et al.*, 2005], pois, o objetivo da fabricação é conseguir a melhor relação custo/benefício [Klocke, 2011]. Por isso, desde o final dos anos 1970, têm-se buscado desenvolver sistemas capazes de realizar tal monitoramento [Clarke e Thomas, 1979].

A investigação da topografia da peça pode ser feita usando-se medições *in-situ*<sup>5</sup>, ou pode ser realizada após a produção da peça, chamadas *ex-situ*<sup>6</sup>. Quando a obtenção da rugosidade é realizada *ex-situ*, tem-se comumente o uso de apalpador (ou agulha) – tecnologia já consolidada nos meios acadêmico e científico. Neste caso, é preciso parar a máquina-ferramenta para que a peça seja retirada dela. Assim, o apalpador percorre a superfície tocando a peça, determinando a rugosidade em função das perturbações geradas pela topografia da peça usinada na agulha. Já os métodos *in-situ* não fazem uso de agulhas, mas de sistemas ópticos que empregam laser e são capazes de fornecer dados de rugosidade por espalhamento ou adaptação focal. Além disso, quando a medição é realizada *in-situ*, a medição é mais rápida, evitando perda de tempo com reconfiguração da máquina e até, de maneira eventual, recalibração [Byrne *et al.*, 1995].

Ambas as técnicas (*in-situ* ou *ex-situ*) requerem certo grau de habilidade para os devidos ajustes e interpretações das informações obtidas. Pensando nisso, realizou-se um estudo sobre medição de rugosidade por métodos que não utilizem contato físico e que possam ser implantadas em medidas *in-situ* e *on-line*<sup>7</sup>.

Com o passar dos anos, foram sugeridas e utilizadas diferentes técnicas para medições de rugosidades: capacitivas, resistivas, pneumáticas, friccionais [Sherrington e Smith, 1988a]. Contudo, as que apresentaram melhores resultados são as que utilizaram luz (os chamados métodos ópticos). Assim, direcionou-se este estudo para este tipo e, mais especificamente, para métodos que empregam laser. Diferentes pesquisadores conseguiram alcançar grande êxito em seus trabalhos. No entanto, os dispositivos usados por eles eram bastante complexos, por fazerem uso de análise de imagens, câmeras CCD, focalização precisa do laser; todavia, resultados práticos com acertos próximos a 90% foram encontrados [Kima *et al.*, 2002, Lu, 2008; Persson, 2006, Tay *et al.*, 2003, Valliant *et al.*, 2000, Wang *et al.*, 2003].

Algumas formas de medição de rugosidade por meios ópticos utilizam essencialmente

---

<sup>5</sup> *In-situ* é expressão latina que significa no lugar. Neste caso, tem significado referente à análise a ser realizada no local em que a peça foi fabricada (sem retirá-la da máquina operatriz).

<sup>6</sup> *Ex-situ* é expressão latina que significa fora do lugar. Neste caso, tem sentido contrário à expressão *in-situ*.

<sup>7</sup> *On line*, neste caso, refere-se à tomada de dados da determinada medição a ser realizada durante a fabricação da peça que vai ou está sendo estudada.

a análise do sinal que retorna ao detector após a luz incidir na superfície em estudo. Esta análise pode ser feita de diferentes formas, tais como o estudo de *speckle*<sup>8</sup>. Neste estudo, segundo Persson, 2006, verificam-se as zonas claras e escuras (máximos e mínimos de interferência) da imagem preto-e-branco formada e o estudo do espalhamento difuso, causado pela superfície, em que se faz uso de um detector que abrange um grande ângulo da reflexão.

Uma maneira de medir a rugosidade é utilizar o Modelo de Difração de Fraunhofer; entretanto, apenas é aplicável a rugosidades que sejam muito menores que o comprimento de onda ( $\lambda$ ), utilizado na medida [Tay *et al.*, 2003]. A difração é, junto com a interferência, um fenômeno tipicamente ondulatório, descrito, pela primeira, vez por Leonardo da Vinci (1452-1519) e, mais tarde, em publicação póstuma, por Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) em 1665. De acordo com Christiaan Huygens (1629-1695), a difração ocorre quando a frente de onda encontra um obstáculo que tenha tamanho aproximado do comprimento de onda; assim, cada parte da frente de onda passa a se comportar como uma nova fonte que originará ondas circulares distintas, que podem interferir umas com as outras [Born e Wolf, 1980].

Segundo Thurn e Brodmann, 1986, as principais motivações para a utilização de medidas ópticas de superfície são robustez, velocidade (tempo de reação baixo), precisão e alta capacidade de adaptação a diferentes tipos de peças, geometrias, ambientes e situações.

Tomando-se isso como referência, propõe-se o estudo de um sistema capaz de realizar as mesmas medições de rugosidade com o uso de laser, porém sem os dispositivos de análise de imagem, câmeras CCD, softwares e controladores de foco. Sugere-se esse método, uma vez que é adequado para superfícies torneadas, brunidas, lapidadas, retificadas e polidas [Kim *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2003]. Além disso, o laser apresenta comprimento de onda definido por uma banda de frequências (tanto mais monocromática quanto mais estreita é a banda), maior facilidade em ter sua intensidade constante e é, geralmente, colimado. Geralmente, a medição da rugosidade com o uso do laser com  $\lambda = 660$  nm é a mais aplicada, pois permite fazer medidas de superfícies com rugosidades entre 5 e 500 nm [Valliant *et al.*, 2000].

Pelo fato de a proposta tratar de equipamento de teste mais simples que seus antecessores pretende-se analisar o sinal laser (com detectores semicondutores – antigamente chamados de detectores de estado sólido) visando diferenciar padrões de rugosidade. E dessa forma, classificá-los para que, conseqüentemente, seja possível reduzir o tempo de medição de superfícies (anteriormente realizado com dispositivo mecânico táctil).

---

<sup>8</sup> *Speckle*: é um fenômeno óptico que causa a formação de imagem com diversos pontos claros e escuros causados por interferência entre as frentes de onda de uma fonte de luz coerente refletidas em uma superfície.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Geral

Promover a detecção mais rápida de rugosidades, através da concepção de um equipamento capaz de identificar diferentes padrões de textura, a partir de reflexão de laser incidido sobre a superfície gerada por torneamento.

### 1.1.2 Específicos

Estudar as técnicas envolvidas com medida de rugosidade com e sem contato, com especial ênfase nos métodos de medição sem contato que utilizam laser nas medições.

Desenvolver um dispositivo, ao longo do processo, de estudo para que os testes e as medidas sejam efetuados.

Medir os sinais laser refletidos pela superfície em estudo, visando gerar uma função capaz de traduzir este sinal (medido em volts) em um parâmetro de rugosidade conhecido.

## 1.2 Justificativa

Assim como o rugosímetro de agulha, as técnicas de perfilometria por contato e o AFM não são possíveis de serem utilizados *in-situ*. Além disso, o método de medição de rugosidade proposto é aplicável em situações de medidas em que a superfície estudada esteja em movimento (ou não). Outra vantagem é não haver necessidade de contato, o que evidencia a vantagem sobre métodos que exijam parada do equipamento para a medição.

Com o sistema óptico de medição via reflexão de laser (que faz uso de detector de menor custo que a câmera CCD e não precisa de análise de imagens), espera-se poder realizar medidas *in-situ/on-line* e, assim, efetuar uma varredura completa do perfil de rugosidade da peça usinada.

## 1.3 Organização da Dissertação

A dissertação está organizada conforme os itens que se seguem:

**Capítulo 2 – Rugosidade.** Neste capítulo, far-se-á uma rápida revisão a respeito deste tema, citando os diferentes parâmetros de rugosidade, vantagens, limitações e o porquê do

parâmetro de rugosidade média ( $R_a$ ) ser utilizado predominantemente no trabalho. Também serão apresentados os métodos de medição de rugosidade por laser, através de uma concisa revisão histórica do desenvolvimento desse tipo de método e uma breve explicação deste princípio físico, utilizado na maioria das medidas ópticas de rugosidade.

**Capítulo 3 - Proposta de Metodologia de Medição de Rugosidade.** Aqui será apresentado o detalhamento da proposta a respeito do desenvolvimento do dispositivo de medição e sua devida caracterização.

**Capítulo 4 – Materiais e Métodos.** Descrição dos dispositivos, equipamentos, materiais, ferramentas, acessórios, sistemas e de outros itens utilizados nos ensaios realizados.

**Capítulo 5 – Experimentações.** Detalhamento dos procedimentos para a realização dos testes e aquisição dos dados (intensidade laser refletida e rugosidade  $R_a$ ), considerando amostras distintas de superfícies torneadas, obtidas em diferentes condições de corte.

**Capítulo 6 – Resultados.** Apresentação dos mesmos em formato de tabelas e gráficos.

**Capítulo 7 - Conclusões.** Considerações finais a respeito dos resultados obtidos em função dos objetivos propostos, vantagens e limitações do sistema de medição implantado, e apresentação de propostas para trabalhos futuros.

## 2 RUGOSIDADE

O estudo do acabamento superficial torna-se importante nos casos em que se exige uma exatidão no ajuste entre peças unidas e naqueles em que padrões dimensionais e de forma devam ser satisfeitos para garantir a funcionalidade do conjunto.

Segundo Mesquita, 1992, o processo de usinagem é realizado a fim de obter uma superfície que apresente fatores superficiais (textura) e subsuperficiais (integridade) apropriados, com o propósito de garantir segurança, qualidade e longa vida ao item fabricado.

Quando analisadas em detalhes, as superfícies usinadas das peças exibem irregularidades formadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre tal superfície. De acordo com Machado *et al.*, 2009, a rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou erros microgeométricos, resultantes do processo de corte.

A rugosidade gerada na usinagem é mais influenciada pelo processo que pela máquina. Conforme Machado *et al.*, 2009, os fatores que podem contribuir com a rugosidade gerada são marcas da quina da ferramenta ou de fragmentos dela, as quais podem apresentar natureza periódica para alguns processos e aleatória para outros; geração de rebarba do material durante a operação de corte; restos de aresta postiça de corte de uma ferramenta na superfície usinada; forma geométrica do quebra-cavaco na quina da ferramenta.

Rugosidade é uma medida da topografia da superfície de interesse. Suas reentrâncias, saliências, riscos, buracos e ondulações são de interesse da indústria em geral, pois é ela que classifica a superfície, seu aspecto e características necessárias ao seu uso. Ou seja, a contar deste valor de rugosidade é que pode ser garantida a qualidade superficial da peça em questão. Assim, usa-se essa classificação para assegurar a diminuição de atrito, proporcionar melhor vedação ou acoplamento, e também quanto ao aspecto visual exigido pela superfície técnica. Além disso, a investigação da topografia da superfície usinada é, neste caso, fator que pode fornecer indiretamente importante indicativo de desgaste da ferramenta de corte, com se pode ver em Dagnall<sup>9</sup> *apud* Sherrington e Smith, 1988a,b.

No Brasil, a rugosidade é normatizada pela ABNT/NBR ISO 4287:2002.

A rugosidade é medida de acordo com a quantidade de picos e vales apresentadas pela superfície. Se esses picos e vales têm grandes desvios na profundidade e altura em relação à superfície média, ela é considerada rugosa; se têm poucos desvios, é considerada lisa.

---

<sup>9</sup> Dagnall, H., 1980, "Exploring Surface Texture", Rank Taylor Hobson, Leicester, 170p.

## 2.1 Caracterização da Superfície

Para medir as saliências e reentrâncias na superfície, devem-se considerar alguns aspectos de nomenclatura. Existem, para fins práticos, duas superfícies: a geométrica e a real. A superfície geométrica é a consideração teórica, ou como seria a superfície ideal, sem nenhum tipo de imperfeição. Já a superfície real é, de fato, a superfície em estudo, em que, dependendo do grau de detalhamento utilizado em sua análise, sempre apresenta certo grau de irregularidades. Observam-se, na Figura 2.1, as diferenças entre essas duas superfícies. Essas imperfeições são heranças do processo de fabricação, por exemplo, por torneamento, laminação, forjamento, ataque químico, retificação.

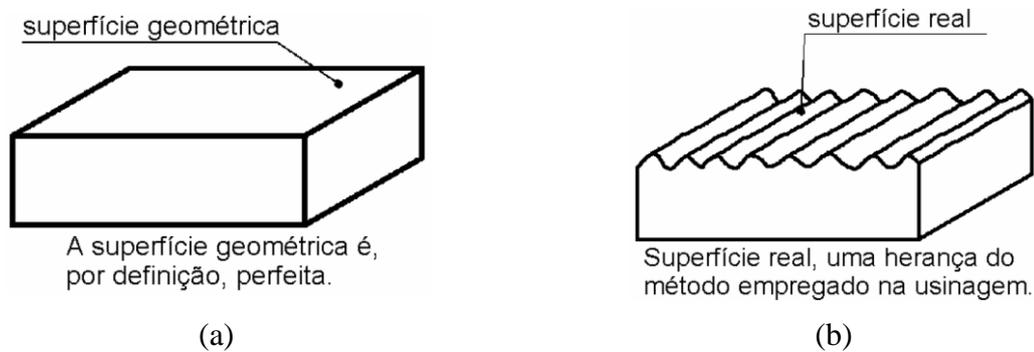


Figura 2.1: Croqui de superfícies: (a) geométrica; (b) real [ABNT/NBR ISO 4287:2002]

A superfície efetiva é aquela obtida pelo instrumento de medição. Quanto maior for a qualidade do sistema de medição, mais ela se aproxima da superfície real.

A rugosidade da superfície pode ser afetada por fatores inerentes à superfície e/ou decorrentes do processo de fabricação, tais como ondulação na superfície e defeitos na forma (planicidade), conforme mostra a Figura 2.2.

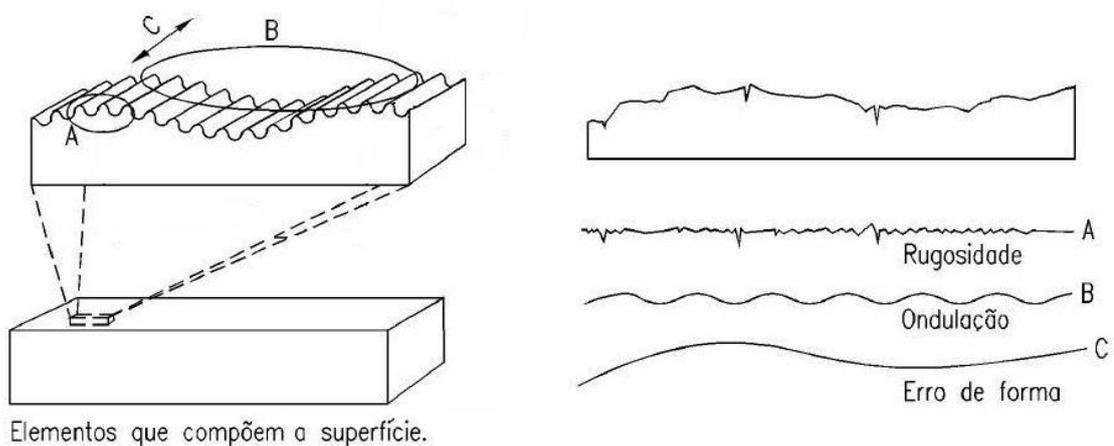


Figura 2.2: Diagrama dos elementos que influenciam no perfil da superfície. [Rosa, 2004]

## 2.2 Parâmetros de Rugosidade

No Brasil, a norma ABNT-NBR 4287-2002 é responsável pelo fornecimento de especificações a respeito de parâmetros de rugosidade superficial.

Os parâmetros de rugosidade são diferentes e aplicáveis a diversas situações. A sua escolha depende da aplicação da superfície, sendo recomendado o uso de mais de um parâmetro para identificar particularidades desejáveis.

Exemplificando, a medição da rugosidade de uma peça utilizada em vedação tem de preencher diferentes requisitos, quando comparada com peças utilizadas em um eixo motor (sem necessidade de vedação). No caso da peça de vedação, um parâmetro que identifique os maiores picos de rugosidade pode melhor caracterizar a qualidade da superfície que outro que forneça apenas o valor médio das alturas de picos e vales; um pico de rugosidade elevado em uma peça de vedação pode causar vazamentos, e isso não tem importância em um eixo.

O parâmetro de rugosidade média (ou desvio médio aritmético) “ $R_a$ ” (do inglês *Roughness Average*) é um parâmetro bem conhecido e utilizado por engenheiros há décadas, servindo basicamente, como modelo de medida. Ele reflete um parâmetro conhecido e comprovado experimentalmente; assim, sua utilização fornece solução confiável [Kováks *et al.* 2012]. Além disso,  $R_a$  é o padrão de rugosidade mais usado em âmbito internacional em usinagem [Mesquita, 1992].

A rugosidade  $R_a$  é calculada pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas  $Z_i(x)$ , conforme a Figura 2.3 e de acordo com a Equação 2.1.

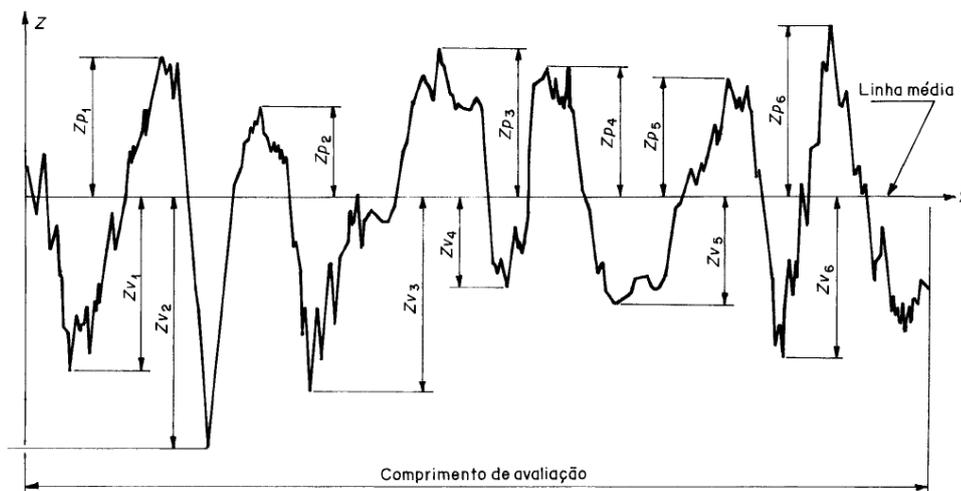


Figura 2.3: Distâncias de pico e de vale e representação da linha média para um dado comprimento de avaliação [NBR ISO 4287:2002]

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

onde:  $l_m$  = comprimento de avaliação

$Z_i(x)$  = distâncias de pico ( $Z_p$ ) e de vale ( $Z_v$ ) da amostra

Em usinagem com ferramentas de geometria definida, a rugosidade  $R_a$  é calculada partindo da relação entre o avanço  $f$  [mm/volta] e o raio de ponta  $r_e$  [mm] da ferramenta de corte pela Equação 2.2. Mello *et al.*, 2012, determinaram, de forma empírica, a Equação 2.3, para calcular, respectivamente, a rugosidade média  $R_a$  [ $\mu$ m] para a ferramenta *wiper*.

$$R_a = \frac{1000 \cdot f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_e} \quad (2.2)$$

$$R_a = 0,520 + 3,56 \cdot \left(\frac{r_e}{f}\right)^{-2,12} \quad (2.3)$$

O parâmetro  $R_a$  é geralmente utilizado para medir a rugosidade de superfícies em uma linha de produção, superfícies com sulcos periódicos (gerados por torneamento e fresamento) e para superfícies em que apenas o acabamento estético é importante [Whitehouse, 1994].

Outro parâmetro de rugosidade bastante empregado é o desvio quadrático médio dos valores “ $R_q$ ” (do inglês *Root Mean Square* ou RMS). Assim como  $R_a$ , o parâmetro  $R_q$  tem as mesmas utilizações e fornece ao usuário, de maneira essencial, a mesma informação, já que ambas são médias; contudo, amplifica os valores que se distanciam da média. O parâmetro  $R_q$  é calculado pela Equação 2.4.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^l Z_i^2(x) dx} \quad (2.4)$$

O parâmetro “ $R_t$ ”, denominado altura total do perfil, é uma medida mais simples e não exige cálculos.  $R_t$  representa a maior distância de pico a vale em cada comprimento de amostragem<sup>10</sup> “ $i$ ”, dentro do comprimento de avaliação. Tomando como exemplo a Figura 2.3, o parâmetro  $R_t$  seria igual a  $Z_{t3} = Z_{p3} + Z_{v3}$ , por ser o maior dentre todos os  $Z_{ti}$ . Este parâmetro é comumente usado para analisar a rugosidade de superfícies de vedação, assentos

<sup>10</sup> O comprimento de amostragem é denominado *cut-off*. Em instrumentos de medição, o comprimento de avaliação é geralmente subdividido em 5 ou 7 comprimentos de amostragem.

de anéis de vedação, superfícies dinamicamente carregadas, parafusos altamente carregados, superfícies de deslizamento cujo perfil efetivo é periódico [Whitehouse, 1994].

O parâmetro “ $R_z$ ”, chamado altura máxima do perfil, é a soma da maior altura entre todos os picos e da maior profundidade entre todos os vales no comprimento de avaliação. Na Figura 2.3, o maior pico é o  $Z_{p6}$  e o maior vale é o  $Z_{v2}$ . Assim,  $R_z = Z_{p6} + Z_{v2}$ . Este parâmetro tem, essencialmente, as mesmas aplicações que  $R_t$ , entretanto mede a superfície de forma integral, sem levar em consideração os comprimentos de amostragem “ $i$ ”, observando todo o comprimento de avaliação [Whitehouse, 1994].

### 2.3 Medição de Rugosidade

De acordo com Gonçalves Jr e Sousa, 2008, “denomina-se processo de medição o conjunto de fatores envolvidos em uma operação de medição; abrange o meio de medição, o procedimento de medição, o agente que efetua a medição, o método de medição e a clara definição do mensurando”.

Medições de rugosidade são necessárias para quantificar ou classificar a superfície. Ela pode estar com acabamento visualmente satisfatório, entretanto, quando é medida com rugosímetro, ela pode ficar fora das especificações de projeto.

Pensando nisso, foram desenvolvidas, ao longo dos anos, diferentes técnicas de medição de rugosidades ou avaliação de acabamentos. O trabalho de Sherrington e Smith, 1988a, mostrou diferentes meios para fazê-lo, cada um deles aplicável a certa faixa de rugosidades e com suas limitações:

- **métodos capacitivos:** aplicam-se a rugosidades  $R_a$  maiores do que  $3,2 \mu\text{m}$ ; entretanto, não podem ser usados para medir grandes comprimentos de medição/avaliação (até 15 mm);
- **métodos pneumáticos:** não são indicados para rugosidades abaixo de  $0,15 \mu\text{m}$  e são de muito difícil ajuste, o que praticamente impossibilita o seu uso comercial;
- **métodos friccionais:** dependem fortemente do tipo de superfície (características tribológicas) que se está estudando, restringindo seu uso quando as rugosidades são superiores a  $3,2 \mu\text{m}$ .

A rugosidade é, em geral, medida com uso de métodos mecânicos táteis, i.e., que fazem uso de um apalpador (também chamado de ponteira, ou agulha, ou sonda). Tais métodos têm eficácia comprovada e são amplamente aceitos como instrumentos de medida, inclusive existindo dispositivos fabricados, comercialmente, em uma série de diferentes marcas e modelos (Mitutoyo, Defelsko, Instrutemp, PCE Instruments, etc.).

Na medição da rugosidade, são recomendados valores para o comprimento da amostragem (*cut-off*), conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Tabela de comprimento da amostragem (*cut-off*)

Rugosidade $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Mínimo <i>cut-off</i> [mm]
De 0 até 0,1	0,25
Maior que 0,1 até 2,0	0,80
Maior que 2,0 até 10,0	2,50
Maior que 10,0	8,00

A Figura 2.4 ilustra a classificação dos acabamentos superficiais (geralmente encontrados na indústria mecânica) em 12 grupos, e as organiza de acordo com o grau de rugosidade e o processo de usinagem que pode ser usado em sua obtenção.

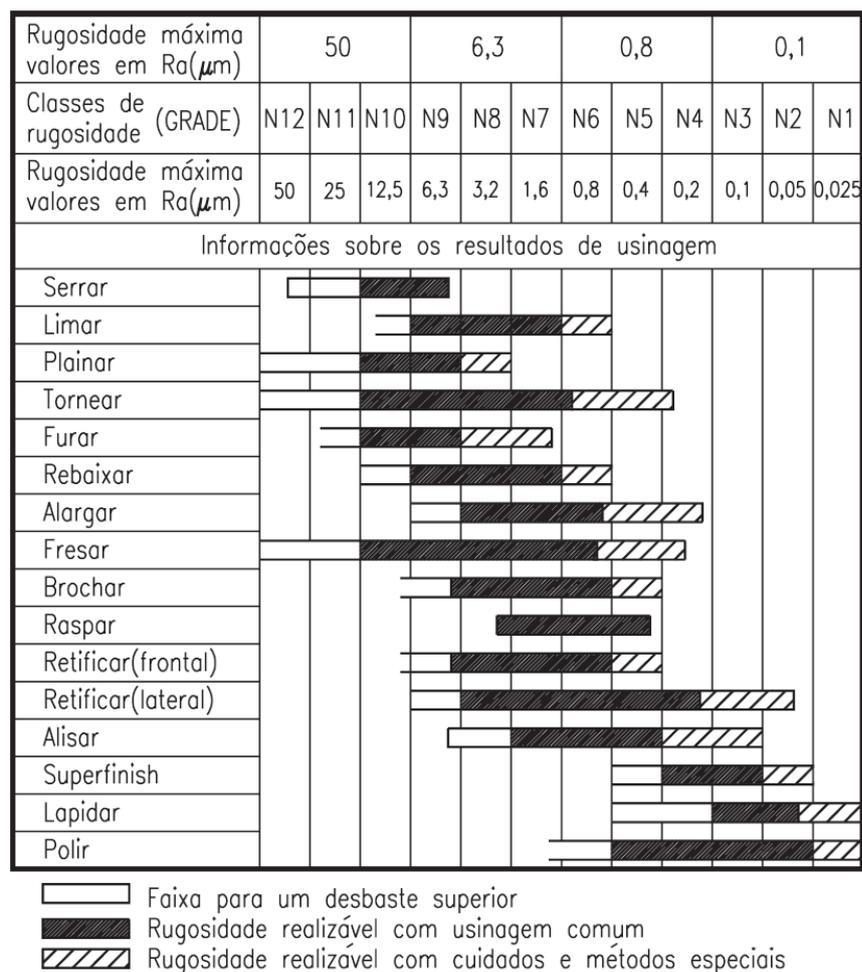


Figura 2.4: Faixa de valores de rugosidade média para diferentes processos de fabricação por usinagem [Souza, 2011].

As fontes de erros de medição, nesses casos (por contato com uso de apalpador), são:

- diâmetro da ponta da agulha;
- carga aplicada pela ponta da agulha;
- velocidade de deslocamento da agulha;
- deslocamento lateral da agulha devido às irregularidades;
- danos causados pela sapata ou calço;
- elasticidade da superfície técnica.

A determinação da incerteza de medição da rugosidade é um tema ainda em estudo, pela sua alta complexidade.

## 2.4 Avaliação da Rugosidade por Métodos de Medição a Laser

Sem exceções, os autores estudados partiram do princípio de que a luz, quando incide em uma superfície, é refletida. Essa reflexão acontece de maneira mais ou menos difusa e, dessa forma, a rugosidade relaciona-se com o espalhamento.

Considerando que as medidas de rugosidade, na maior parte das vezes, são realizadas após a produção da peça, desde Beckmann e Spizzichino<sup>11</sup> *apud* Yanagi *et al.*, 1986, a medição óptica vem-se mostrando muito útil na solução dos problemas, evitando a parada da produção. Estes contratempos decorreram, de forma intrínseca, dos métodos por contato, tais como sensibilidade a vibrações, custos elevados, lentidão, sensibilidade à umidade e à temperatura, amostra riscada pela agulha, amostra com dimensões limitadas, dificuldade de medir superfícies curvas e a impossibilidade de serem usados *in-situ* [Osanna *et al.*, 1988].

Uma série de trabalhos, baseados em monitoramento óptico/laser, foi realizada até o final da década de 70. Neles sugeriram-se diferentes métodos de medição de rugosidade sem contato (capacitivos, friccionais e pneumáticos), abandonados por apresentarem muitas dificuldades técnicas. Clarke e Thomas, 1979, baseando-se na Análise de Escaneamento a Laser (LSA – *Laser Scanning Analysis*) de Westberg, 1967, desenvolveram uma metodologia que usava o efeito denominado *glossmeter* (medidor de brilho). No caso, um feixe de laser era refletido a partir de um espelho poligonal que girava a alta velocidade sobre a superfície da amostra e então o feixe era refletido para um detector fixo de abertura conhecida. Registrando variações na refletância da superfície através da variação do sinal podia-se estabelecer uma

---

<sup>11</sup> Beckmann, P.; Spizzichino, A., 1963, “The Scattering of Electromagnetic Wave from Rough Surfaces”, Pergamon, Oxford, pp. 69.

relação com variações de textura da peça em análise. O diâmetro do ponto de laser foi fixado em 200  $\mu\text{m}$  e  $\lambda = 623 \text{ nm}$ . O detector permanecia fixo, posicionado a um ângulo transversal igual a  $30^\circ$  e a captação de pontos tinha frequência máxima de 5 kHz.

Então, um método que poderia ser realizado mais rapidamente foi proposto por Yanagi *et al.*, 1986. A contribuição dele foi observar que a peça, na qual se fazia a medida, deveria estar, por completo, livre de impurezas, pois a sujeira aumentaria o espalhamento na superfície, degradando o sinal, em um indicativo de que o método é bastante sensível.

Medidas da rugosidade com maior rapidez e precisão foram estabelecidas por Thurn e Brodmann, 1986. Em seu sistema, uma fonte de luz (diodo IR) era projetada na superfície da amostra. A luz refletida e espalhada da superfície era direcionada a um detector através de lentes e divisor de feixe. Após, o sinal dos detectores era digitalizado e, em sequência, processado no microcomputador. Eles ressaltaram que o procedimento proposto era capaz de fornecer, indiretamente, informações a respeito da ferramenta de corte e que ainda poderia ser realizado *in-situ* e *on-line*.

O método de medição de Osanna *et al.*, 1988, diferencia-se dos anteriores, já que seu sistema foi desenvolvido com componentes comerciais de baixo custo. Também obtinham o sinal proveniente do laser, mas não diretamente do laser refletido, e sim do sinal fornecido pelo ajuste focal do laser sobre a superfície, como mostra a Figura 2.5. O sistema proposto foi testado, comparativamente, com rugosímetro por contato e os resultados foram satisfatórios.

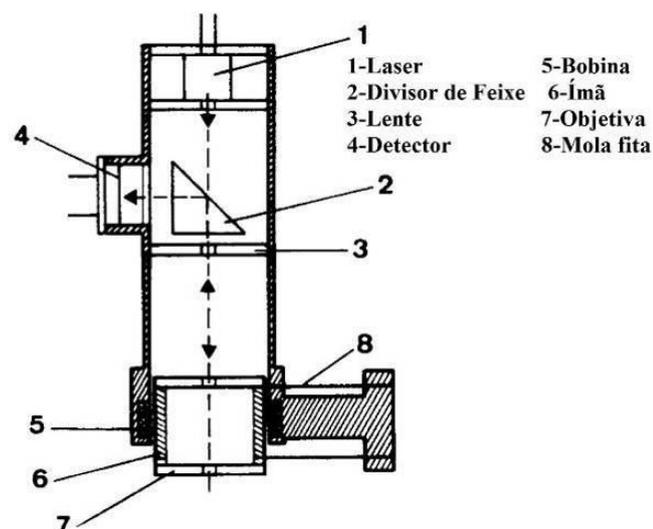


Figura 2.5: Esquema da montagem de Osanna *et al.*, 1988: as bobinas movimentam os ímãs para manter o laser focalizado na superfície

A necessidade de comparação entre os métodos de medição de rugosidade "tradicionais" e "inovadores", i.e., com e sem contato, foi ressaltada por Yim e Kim, 1990, no

intuito de corroborar ou refutar a inovação. A medição óptica (sem contato), através de espalhamento, mostrou-se eficaz, porquanto foi possível medir rugosidades de  $0,025 \mu\text{m}$  a  $1,6 \mu\text{m}$ . Observou-se também que o comprimento de onda, usado no laser incidente, deveria ser escolhido com base no raio de curvatura da rugosidade esperada e na periodicidade da ondulação da superfície. Seus experimentos comprovaram que a incidência normal é, em termos fundamentais, mais interessante que uma transversal, porque tende a maximizar a adaptabilidade do sistema a diferentes configurações de superfícies, permitindo que se possam efetuar medições em faces planas, superfícies curvas, retificadoras, fresadoras e até, diretamente, no torno em operação.

A Figura 2.6 mostra a intensidade refletida em função do ângulo de reflexão. Nota-se que o valor da intensidade máxima diminui com o aumento da rugosidade e também a largura da curva de intensidade se amplia com o acréscimo da rugosidade. Isso mostra que o espalhamento é, de forma direta, ligado à rugosidade.

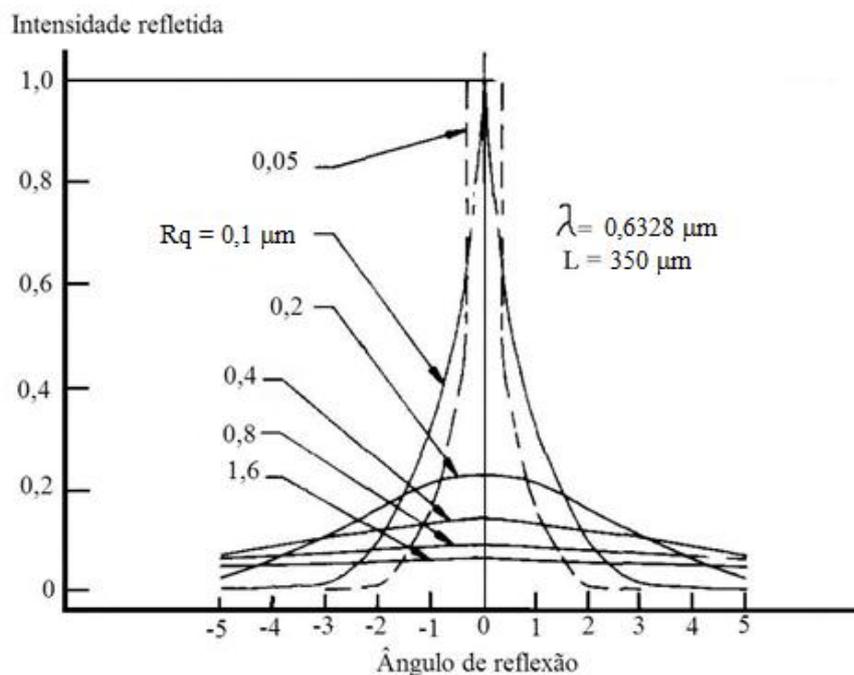


Figura 2.6: Intensidade relativa (%) vs. ângulo de reflexão ( $^\circ$ ) [adaptado de Yim e Kim, 1990]

Considerando que o acabamento é muito importante na engenharia moderna, Kiely *et al.*, 1992, propuseram um sistema de monitoramento óptico capaz de realizar medições mais rápidas e exatas que os métodos anteriores. Apresentaram um modelo comercial para obter valores de rugosidade, baseado em óptica geométrica, enfatizando que tal dispositivo não é destrutivo e/ou invasivo, sendo capaz de varrer toda a superfície da amostra sem contato.

Mattsson e Wagberg, 1993, propuseram também a utilização de itens/peças comerciais

na montagem de um sistema de medição. O dispositivo concebido fazia uso de um cabeçote emissor de laser, provindo de um leitor de CD que utilizava  $\lambda = 780$  nm, um ponto focal de aproximadamente  $1 \mu\text{m}$  de diâmetro e sensibilidade vertical de  $0,03 \mu\text{m}$ . As medições verticais eram obtidas por meio da autofocalização do cabeçote; através da diferença de sinal existente em uma série de detectores, o sinal da diferença vertical da amostra é gerado. Por um *looping* de alimentação, o sinal da vertical força o sistema de lentes a se mover para a posição que corresponda ao ponto focal inicial da superfície, de forma semelhantemente ao que fizeram Osanna *et al.*, 1988, para obter a informação referente à topografia da superfície.

Yim e Kim, 1994, obtiveram comparação entre superfícies consideradas lisas e outras rugosas e, baseados em Beckmann e Spizzichino *apud* Yanagi *et al.*, 1986, desenvolveram um dispositivo capaz de identificar, baseado na diferença de sinais, as duas superfícies.

Buscando desenvolver um método com grande aplicabilidade na automação de processos, Wang *et al.*, 1998, aproveitaram os resultados de Leger e Perrin, 1976, que utilizaram laser para medir tanto o espalhamento quanto a imagem do padrão granular da reflexão da luz coerente (*speckle*). Assim, capacitaram-se a fazer estimativa da rugosidade das superfícies e enfatizaram as vantagens dos métodos laser, frente aos métodos de contato.

Goch *et al.*, 1999, constataram que o método a laser é o que melhor se ajusta a medições de rugosidade, já que métodos tradicionais (com contato) para esta necessidade não são aplicáveis para medições *on-line*. Desta forma, utilizando o espalhamento e também a medição do padrão *speckle*, propôs-se fazer a comparação de dois padrões de *speckle* de uma mesma amostra, obtidos, contudo, com lasers com comprimentos de onda diferentes. Com isso, chegaram à rugosidade das superfícies estudadas.

A resposta rápida em sistemas de medição de rugosidade por laser foi introduzida por Valliant *et al.*, 2000. Realizaram medições utilizando laser com comprimento de onda na região do vermelho no espectro visível ( $\lambda = 660$  nm) e constataram que a rugosidade não pode ser inferior a 5% do comprimento de onda incidente (até 33 nm), pois haveria resultados alterados que não representariam a realidade.

No estudo das propostas de Kim *et al.*, 2002 e Wang *et al.*, 2003, notou-se que ambos basearam-se no padrão de espalhamento resultante da rugosidade da amostra. O método mostrou erro de até 10% em relação a técnicas de medição de rugosidade por contato. Ressaltaram que medições a laser (usando  $\lambda = 633$  nm) são ideais para processos de torneamento, brunimento, lapidação, retificação e polimento [Kim *et al.*, 2002]. Assim, de acordo com o tipo de padrão gerado pelo processo/ferramenta, a reflexão do laser pôde

produzir um padrão característico, como mostra a Figura 2.7. Esta proposta mostrou a vantagem de não sofrer a interferência da luz ambiente durante as mensurações, pois há o procedimento de subtrair o sinal resultante da luz ambiente do sinal da medição.

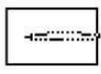
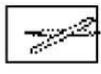
	Processo	Padrão de ranhura	Imagem	Padrão extraído
(a)	<b>Torneamento</b>			
(b)	<b>Retificação</b>			
(c)	<b>Polimento</b>			

Figura 2.7: Padrão de imagem conforme direção das ranhuras [adaptado de Kim *et al.*, 2002].

Baseado na medição da quantidade de luz espalhada, Wang *et al.*, 2003, desenvolveram o método de mensuração laser de rugosidade, usando  $\lambda = 780 \text{ nm}$ . O leque de luz espalhada foi coletado por um arranjo de detectores, dispostos em um ângulo ao redor do centro da reflexão especular, como ilustra o esquema da Figura 2.8.

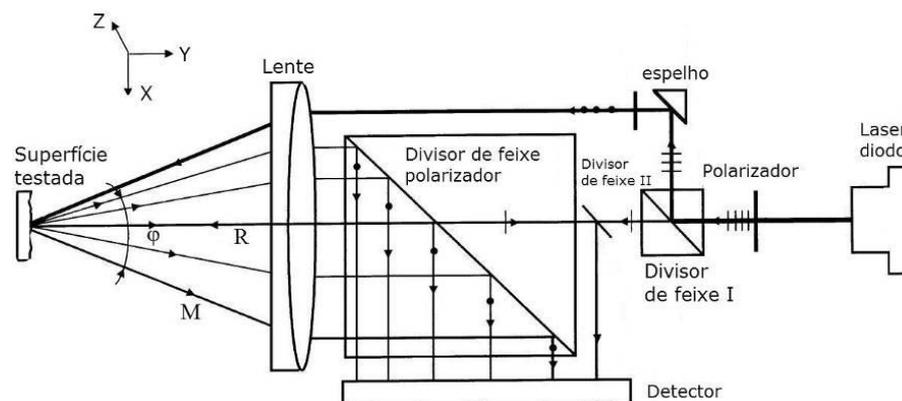


Figura 2.8: Esquema da montagem do aparato [adaptado de Wang *et al.*, 2003]

O aparato de Wang *et al.*, 2003, conseguiu-se medir rugosidades de  $0,005$  a  $6 \mu\text{m}$  em superfícies de peças torneadas com ferramenta de diamante e em superfícies de cobre e alumínio polidas e lapidadas. Para a comprovação da eficiência, os dados obtidos na medição com laser foram comparados com os coletados por rugosímetros de agulha (com contato). Os resultados apresentaram uma diferença máxima de  $9,1\%$ . Entretanto, o sistema proposto não

foi muito eficiente em distinguir a diferença entre rugosidade e microtrincas e/ou defeitos.

Tay *et al.*, 2003, propuseram um sistema laser *in-situ* que capturava a luz espalhada pela amostragem de rugosidade de uma peça em um ângulo de abertura de 28° (com centro na reflexão especular). Os autores apresentaram uma análise do padrão de espalhamento produzido e também uma discussão específica sobre o desenvolvimento da ponteira, a fim de evitar o efeito do fluido lubrificante e torná-la mais robusta. De acordo com os autores, os seguintes fatores devem ser levados em consideração no desenvolvimento do dispositivo:

- a luz espalhada deve ser captada em um ângulo grande (23° em torno do ponto central);
- o sistema deve ter uma pequena razão entre o diâmetro do feixe ( $d$ ) e o diâmetro da peça medida ( $D$ ) (isto é,  $d/D$ ). Isso garante o efeito da curvatura da superfície seja minimizado;
- o instrumento de medição não deve interferir na usinagem em momento algum.

Rehorn *et al.*, 2005, observaram que o tempo perdido em processos de usinagem em função de quebra de ferramentas fica em torno de 6,8%. No entanto, Najafi e Hakim, 1992, afirmaram que processos de monitoramento *in-situ* são capazes de melhorar esse número. A previsibilidade é facilitada no torneamento, porque a ferramenta está sempre posicionada de forma perpendicular ao corte e monitoramento. Além de melhorar as estatísticas em relação à quebra, as medições *in-situ* também otimizariam o tempo do processo de 10 a 50%.

Para descrever o seu método de medição de rugosidade, Persson, 2006, criou o termo Correlação Angular *Speckle* (ASC – *Angular Speckle Correlation*) que estabelece a relação entre a topografia e a rugosidade RMS ( $R_q$ ). Seus procedimentos são semelhantes aos de outros autores [Kima *et al.*, 2002; Tay *et al.*, 2003; Valliant *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2003] já que, todos utilizam a medida do espalhamento para inferir sobre a rugosidade.

O *speckle* produzido por uma peça rugosa foi relacionado com a rugosidade por Dhanasekar *et al.*, 2008. Enfatizaram a problemática de métodos por contato para medição de rugosidade e exaltaram a robustez e a rapidez das medições com laser. O método proposto convertia o sinal de *speckle* do detector em imagem preto e branco, contabilizava a quantidade de pontos luminosos e não luminosos, encontrando a correlação com a rugosidade.

Com uma visão mais abrangente, Weckenmann *et al.*, 2009, propuseram a utilização de vários sensores. Assim, podia-se obter uma visão mais ampla a respeito da amostra e, com a superposição das informações, montar somente uma resposta. Tendo diferentes fontes, aumenta-se a confiabilidade do sistema, uma vez que os resultados se completam e corroboram seus resultados. Um dos métodos utilizado para caracterizar as peças é o laser empregando o *speckle* para obter o sinal, como descrito por Dhanasekar *et al.*, 2008.

### 2.4.1 Espalhamento Óptico

O espalhamento do laser em uma superfície acontece em função da textura por ela apresentada. Assim, em teoria, a amostra mais rugosa ocasiona mais espalhamento difuso e a superfície menos rugosa, menos espalhamento [Natarajan, 2011]. Deste modo, seja medindo o ângulo de abertura da reflexão espalhada, seja medindo o padrão de imagem formada por ele (vide Figura 2.7), ou até mesmo medindo a intensidade dessa reflexão espalhada [Heitmann, 1977], espera-se poder relacionar tal medida à rugosidade da amostra.

Thurn e Brodmann, 1986, realizaram medições ópticas de rugosidade utilizando um equipamento que incidia luz em direção normal à superfície. Fizeram isso, com início no ângulo zero (chamado de ângulo de reflexão especular) e, então, medindo a diminuição das intensidades em cada ângulo, podia-se inferir a rugosidade. A Figura 2.9 ilustra o princípio.

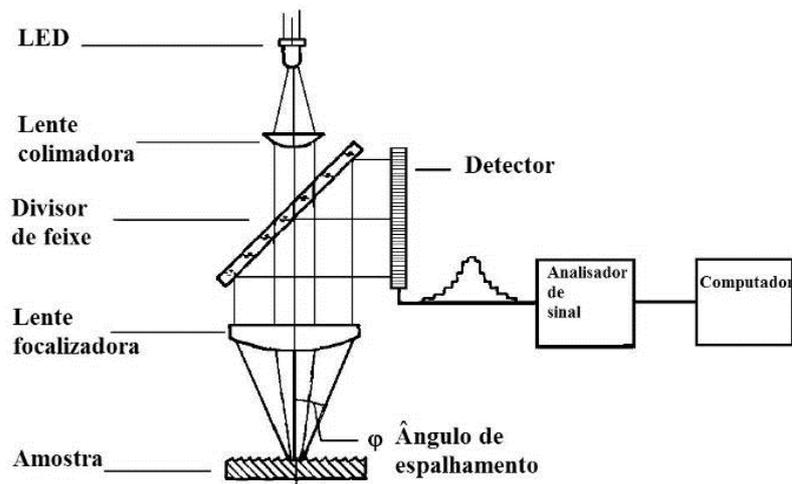


Figura 2.9: Princípio de medição da luz espalhada [adaptado de Thurn e Brodmann, 1986].

Como se pode ver nas Figura 2.10 e Figura 2.11, o espalhamento da luz é capaz de gerar diferentes respostas e formas de sinal. Isso capacitou G. Thurn e R. Brodmann ao desenvolvimento de novos dispositivos de medição.

Na Figura 2.10, tem-se: em (a) o esquema do aparato experimental em que ocorre o espalhamento; em (b), vê-se o espalhamento que foi gerado em uma superfície cilíndrica torneada, resultando em um padrão periódico de rugosidade que ocasiona um padrão de reflexão característico; em (c), pode-se observar uma superfície gerada por laminação vê-se que não há presença de padrão periódico em seu relevo, o que resulta em uma reflexão de luz sem padrão característico (gerou apenas um borrão cujo centro tem intensidade máxima de luz, que diminui à medida que se afasta deste).

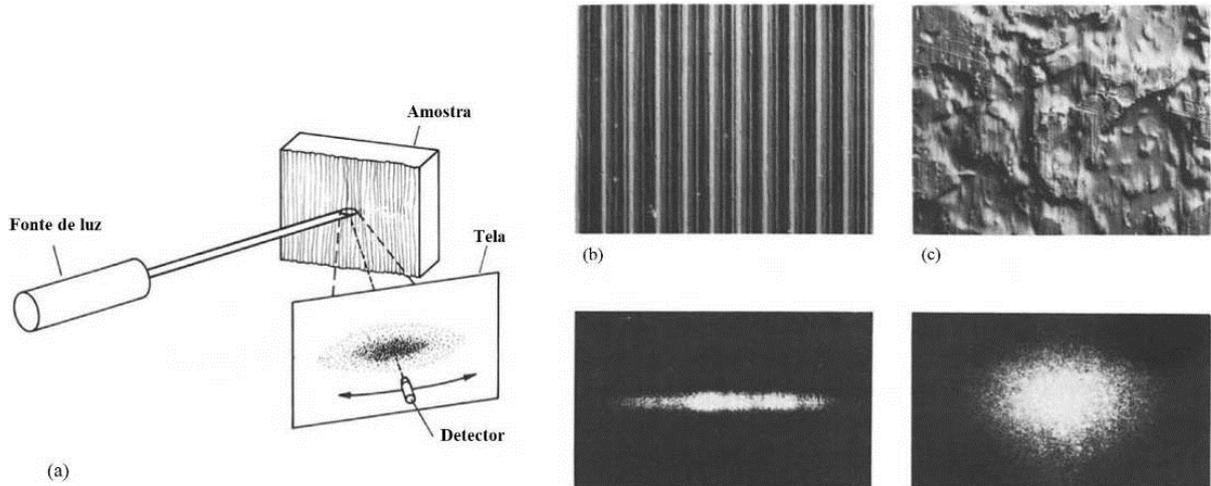


Figura 2.10: (a) princípio do método de espalhamento de luz; (b) micrografia de superfície usinada em torno cilíndrico e superfície laminada a frio; (c) padrão de espalhamento para superfície laminada a frio [adaptado de Thurn e Brodmann, 1986].

Na Figura 2.11, têm-se duas superfícies com rugosidades virtualmente iguais que produziram efeitos distintos quando medidos com laser. No caso, a superfície “a”, detentora de maior amplitude entre picos e vales, provoca uma reflexão com menor espalhamento do que a superfície “b”, com amplitude menor entre picos e vales.

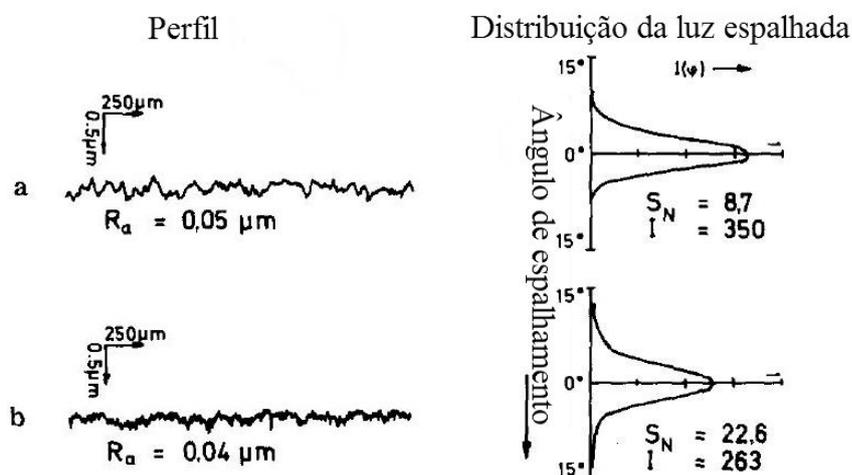


Figura 2.11: Esquema da influência do perfil da amostra na distribuição de espalhamento para duas superfícies (‘a’ e ‘b’) com rugosidades semelhantes [adaptado de Thurn e Brodmann, 1986].

Nesse sentido, pretende-se realizar um estudo prático para a proposta de um método capaz de, opticamente e baseado em laser, realizar medição de rugosidade sem contato.

### 3 PROPOSTA DE MÉTODO DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

Como se sabe, uma superfície idealmente lisa proporciona uma reflexão de luz bastante uniforme. Sendo assim, a reflexão de um feixe laser tem direção e comportamento bem conhecido [Paiva, 2004]. Entretanto, quando a reflexão da luz acontece em superfícies reais, ocorre uma distorção da luz refletida, em função da superfície “real” apresentar irregularidades quando comparada com a “ideal”.

A perturbação causada pela superfície real está, diretamente, ligada às características da superfície em si. Cada pequena distorção pode ocasionar diferentes tipos de perturbações. Logo, superfícies geradas em situações diferentes, com parâmetros distintos no processo de preparação, tendo rugosidades diferentes (ou semelhantes), causam efeitos desiguais na luz refletida (vide Figura 2.10).

Com a intenção de desenvolver uma nova abordagem para a análise de rugosidade de uma superfície usinada via método de medição a laser, pretende-se, tomando como base o resultado parcial da técnica abordada por Yim e Kim, 1990, efetuar estudo para desenvolvimento de técnica capaz de caracterizar a rugosidade de uma superfície gerada por torneamento horizontal com base na luz laser a ser refletida por ela, fundamentando-se nos trabalhos de Benardos e Vosniakos, 2003, Clarke e Thomas, 1979, Dagnall, 1980, Dhanasekar *et al.*, 2008, Kiely *et al.*, 1992, Lu, 2008, Osanna *et al.*, 1988, Sherrington e Smith, 1988a, Sherrington e Smith, 1988b, Tay *et al.*, 2003, Valliant *et al.*, 2000, Wang *et al.*, 2003. A Figura 3.1 ilustra a configuração teórica inicial do dispositivo.

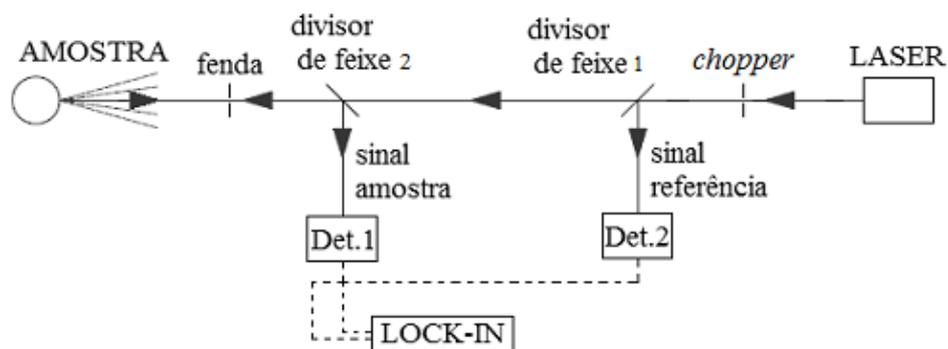


Figura 3.1: Montagem esquemática do sistema de medição proposto

No esquema da Figura 3.1, o laser ( $\lambda = 633\text{nm}$ ) emite continuamente, enquanto o *chopper* fraciona o feixe em pulsos *quasi* quadrados. O feixe é separado em duas partes no divisor de feixe 1, parte dele é captado e enviado ao *lock-in* para a geração da referência. Parte do sinal, não desviado, segue para a amostra em que é refletida. O laser proveniente da

amostra é então desviado, pelo divisor de feixe 2, e segue para o Det. 2. O sinal captado em Det. 2 é enviado ao *lock-in*, onde será processado (ver item 4.2 na página nº 28), para a remoção de quaisquer ruídos luminosos que, por ventura, possam estar presentes no local de medição. Desta maneira, tem-se o sinal limpo, sendo possível usar o equipamento em locais em que seja necessária a iluminação para o operador das máquinas operatrizes.

Na proposta, será utilizado apenas o ponto central, detectado com uma área fixa, em que acontecerá, teoricamente, o máximo de sinal da reflexão (vide Figura 2.6). O método baseia-se no fato de superfícies rugosas provocarem maior espalhamento da luz que incide sobre ela do que superfícies menos rugosas, ou “a intensidade absoluta refletida varia significativamente com a rugosidade da superfície”, [Heitmann, 1977]. Esta medição de intensidade será comparada com os dados de rugosidades conseguidos através do método de medição por contato (rugosímetro de agulha/apalpador).

Os diferentes níveis de sinal serão relacionados através de uma função matemática, denominada função de transferência (FT). Definida a FT (relação entre o sinal laser medido e os dados de rugosidade obtidos pelo rugosímetro), poder-se-á inferir diretamente sobre o valor da textura da peça dentro de certo intervalo de aceitação sem a necessidade de rugosímetro. Como se espera realizar a monitoração de diferentes superfícies com distintos níveis de rugosidade, refletividade e espalhamento, será preciso gerar rugosidades diferentes.

Métodos de medição a laser se adaptam, teoricamente, a processos *in-situ* de torneamento, brunimento, lapidação, retificação e polimento [Kim *et al.*, 2002], pois, segundo Rehorn *et al.*, 2005, a ferramenta estará parada (sem rotação) e quando transladada, faz isso com muita firmeza e rigidez, proporcionando grande precisão no posicionamento do dispositivo, condição necessária para medições de rugosidade a laser.

Na montagem do aparato para a realização das medições, será necessário que se possibilite que esse dispositivo seja capaz de:

- proporcionar leituras do sinal de refletividade da superfície;
- movimentar a amostra de forma vertical e horizontal;
- garantir uniformidade na potência emitida pela fonte laser;
- garantir uniformidade nos detectores;
- proporcionar repetitividade<sup>12</sup> de sinal quando efetuada a medição da mesma amostra em dias diferentes.

---

<sup>12</sup>Repetitividade é, segundo Gonçalves Jr e Sousa, 2008, a faixa de valores simétrica em torno do valor médio, dentro da qual o erro aleatório de um sistema de medição é esperado com certa probabilidade.

A área iluminada será circular, com aproximadamente 2,5 mm de diâmetro. A fonte luminosa a ser utilizada é um laser OPTO HeNe (ver item 4.1 na página nº 27), com comprimento de onda nominal  $\lambda = 633$  nm, por ser o mais indicado para as rugosidades que se pretende estudar, e assim, espera-se escapar das flutuações no sinal luminoso e difrações que causariam perturbações no sinal [Kima *et al.*, 2002].

Quando de posse de todos os dados (tanto de refletividade quanto de rugosidade  $R_a$ ) medidos com o sistema de medição laser e o rugosímetro, a etapa de análise será efetuada, procurando-se determinar, de modo indireto a rugosidade através da relação matemática entre  $R_a$  e o sinal laser “SL” (refletido de forma difusa). Uma vez determinadas as funções de transferência mais prováveis ( $R_a = f(\text{SL})$ ), poder-se-á corroborar a exequibilidade das medidas com o novo sistema.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 4.1 mostra a foto, em visão geral, do sistema de medição desenvolvido com base na proposta apresentada na Figura 3.1.

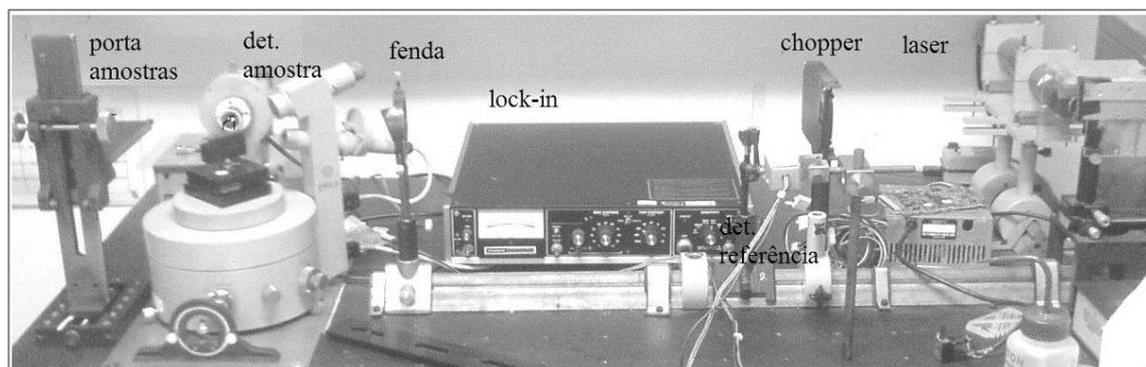


Figura 4.1: Sistema de medição laser desenvolvido

As etapas que seguem explicam o procedimento experimental realizado e posteriores medições de sinal laser, que será relacionado com a rugosidade superficial. Como, no cálculo de todas as médias, sempre há necessidade de arredondamentos, e em decorrência da quantidade de algarismos significativos que estão sendo usados, estes procedimentos serão desenvolvidos baseados na norma ABNT-NBR 5891, 1977.

Nas medições a serem feitas (do sinal laser refletido), medir-se-ão quantidades de tensão a serem associadas à rugosidade da superfície medida. Entretanto, essas medições serão referentes a um mensurando variável, uma vez que cada um dos vários pontos tomados em cada amostra fornecerá uma lista de dados diferentes a serem usados para calcular a média desses valores. Nos tipos de medições que estão sendo realizadas nas amostras para aquisição de dados, haverá possibilidades de erros aleatórios. As medições ocorrerão, exceto as de sinal do laser que refletiram na amostra, em dispositivos calibrados, e com incerteza conhecida.

O sistema de detecção do sinal laser, que foi montado para fazer as medições de sinal refletido, utiliza o *lock-in* para leitura de sinal detectado. Conhece-se a resolução<sup>13</sup> do *lock-in* por suas escalas. Além disso, durante a realização dos experimentos, foram feitas, (em dias separados e em ocasiões completamente distintas), quarenta medições repetidas de uma mesma amostra em cada dia, obtendo-se uma diferença entre o maior e menor valor médio do sinal de menos de  $10^{-3}$   $\mu$ V. Essas medidas mostraram-se aparentemente iguais, apresentando

<sup>13</sup> A resolução de equipamentos analógicos é dada pelos valores da escala existentes entre duas marcas sucessivas, e a resolução, para esse sistema pode ser definida como 1/5 do valor da escala, pois se trata de Sistema de Medição (SM) de boa qualidade (traços e ponteiros finos, etc.) [Gonçalves Jr. e Sousa, 2008]

reprodutibilidade nos resultados e mantendo-se dentro do intervalo de confiança de 95% em torno do valor médio.

O rugosímetro SJ-201 (a ser usado para as medições efetivas de rugosidade “ $R_a$ ”), por exemplo, tem capacidade de proceder medições de rugosidade com resolução de  $0,01 \mu\text{m}$  (ver Figura 4.8). Entretanto, ele possui um padrão, com rugosidade conhecida, para a verificação e calibração de seu sistema de medição, que pode ser realizado sempre que se julgar necessário.

Ainda se deve levar em consideração a incerteza padrão das medidas. Para este valor utilizar-se-á o valor do desvio padrão das medidas realizadas [Gonçalves Jr e Sousa, 2008].

#### 4.1 Preparação do Laser e do Chopper

O dispositivo emissor laser utilizado (Figura 4.2) foi da marca OPTO HeNe, com comprimento de onda  $\lambda = 633 \text{ nm}$  (que será chamado somente de laser), com potência nominal de  $5 \text{ mW}$ . A potência de emissão verificada não alcança mais esse montante, sendo encontrado para tal o valor de  $(3,662 \pm 0,004) \text{ mW}$ . Para maiores detalhes, ver Seção 5.1.

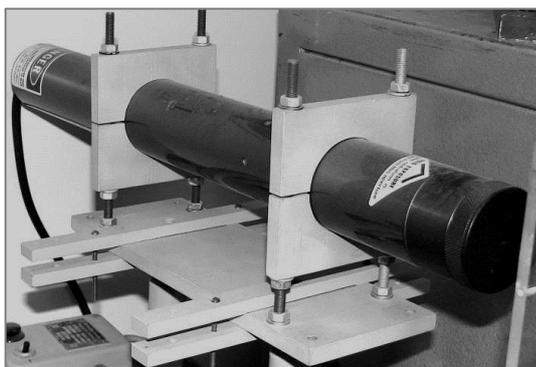


Figura 4.2: Foto do laser

Para o emprego do referido laser, é necessário que conectá-lo a uma fonte estabilizada de tensão. Também é preciso que ele seja ligado cerca de 30 min antes de efetuar o uso, porque, neste intervalo, a intensidade do laser emitido varia bastante (este tempo gasto serve apenas para aguardar a estabilização da intensidade do laser). Dessa maneira, a potência emitida pelo laser é aproximadamente constante, com uma incerteza de potência insignificante frente à grandeza da potência mensurada.

Outro dispositivo que deve ser ligado algum tempo antes de seu uso efetivo é o *chopper*. Ele é responsável por bloquear o feixe laser de forma intermitente, de modo que este chegue à amostra também de forma intermitente, e, como resultado, o sinal atinja os

detectores (de referência e sinal da amostra) de maneira intermitente. Isso é feito para que os sinais luminosos da sala, que não sejam provenientes do laser, sejam filtrados pelo *lock-in*.

## 4.2 Amplificador Lock-in

O *lock-in* ITHACO-DYNATRAC 397E0 (Figura 4.3) é o equipamento usado para filtrar/amplificar o SL adquirido. No dispositivo proposto, o mesmo tem a função de filtrar os sinais indesejados de luz que, eventualmente cheguem ao detector.



Figura 4.3: Painel de configurações do *lock-in*.

Segundo Thinks, 2013, o *lock-in* é usado para medir sinais de corrente alternada muito pequena, até da ordem de poucos nanovolts. Podem ser feitas medições exatas, mesmo quando o sinal é centenas de vezes menor que o ruído junto a ele. O *lock-in* usa uma técnica chamada de “Detecção Sensível à Fase” (PSD – *Phase Sensitive Detection*), para fornecer a resposta do sinal em uma referência específica de frequência e fase. Os sinais que estejam em outras frequências que não sejam iguais a frequência de referência são rejeitados (filtrados) e não afetarão a medida. As medições via *lock-in* requerem uma referência de frequência, neste caso, gerada pelo *chopper*, e do sinal proveniente da amostra.

Na Figura 4.4, o sinal de referência é a onda quadrada de frequência  $W_r$ . Se a saída senoidal do gerador de funções é usada para o experimento, a resposta é a onda que se segue.

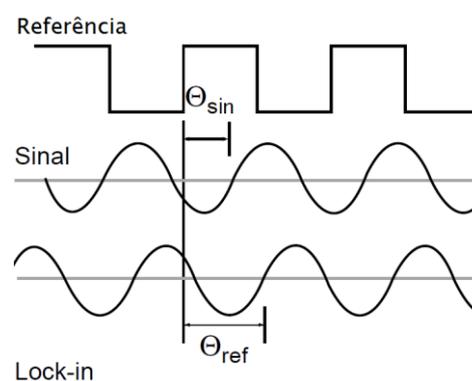


Figura 4.4: Esquema teórico de funcionamento de um *lock-in* [adaptado de Wolfson, 1991].

O sinal é dado pela Equação 4.1:

$$\text{Resp} = V_{\sin} \text{sen}(W_r t + \theta_{\sin}) \quad (4.1)$$

onde:

Resp = resposta do gerador de funções

$V_{\sin}$  = amplitude do sinal

$W_r$  = a frequência do sinal

$\theta_{\sin}$  = fase do sinal

O *lock-in* gera seu próprio sinal de referência, baseado na onda quadrada fornecida a ele. Na Figura 4.4, a referência externa, a referência do *lock-in* e o sinal da amostra são mostrados. A referência interna fica dada pela Equação 4.2:

$$\text{Rint} = V_1 \text{sen}(W_1 t + \theta_{\text{ref}}) \quad (4.2)$$

onde:

Rint = referência interna

$V_1$  = amplitude de referência

$W_1$  = frequência de referência

$\theta_{\text{ref}}$  = fase de referência

O *lock-in* amplifica o sinal e multiplica pelo sinal referência usando a PSD. A saída PSD é simplesmente o produto de duas ondas senoidais (Eq. 4.3).

$$\begin{aligned} V_{\text{psd}} &= V_{\sin} \text{sen}(W_r t + \theta_{\sin}) \cdot V_1 \text{sen}(W_1 t + \theta_{\text{ref}}) \Rightarrow \\ V_{\text{psd}} &= \frac{1}{2} V_{\sin} V_1 \cos(W_r t - W_1 t + \theta_{\sin} - \theta_{\text{ref}}) - \frac{1}{2} V_{\sin} V_1 \cos(W_r t + W_1 t + \theta_{\sin} + \theta_{\text{ref}}) \end{aligned} \quad (4.3)$$

A saída PSD é dada por dois sinais AC: um da diferença de frequências e o outro da soma de frequências. Ela passa por um filtro passa baixa e os sinais AC são removidos.

Porém se  $W_r = W_1$ , a componente da diferença de frequências será um sinal de corrente contínua. Neste caso, o sinal da filtragem PSD será dado pela Equação 4.4.

$$V_{\text{psd}} = \frac{1}{2} V_{\sin} V_1 \cos(\theta_{\sin} - \theta_{\text{ref}}) \quad (4.4)$$

Este sinal DC é proporcional à amplitude do sinal da amostra.

O *lock-in* utiliza o sinal proveniente da amostra e divide-o pelo sinal de referência (no caso, proveniente do mesmo feixe de laser, transformado em um intermitente) e integra em um tempo específico (geralmente da ordem de milissegundos até segundos) [Scofield, 1994; Wolfson, 1991]. O equipamento é ligado juntamente com o laser e o *chopper* e leva alguns instantes para que localize a “referência” e efetivamente inicie o processo de “filtragem”.

### 4.3 Posicionamento da Amostra

A amostra deve estar sempre posicionada de maneira que a incidência do laser ocorra de forma “normal”, i.e., a incidência seja perpendicular à superfície.

A incidência normal é garantida, efetuando-se procedimento de alinhamento, em que o feixe de laser é posicionado paralelamente a uma mesa plana e horizontal. Visando garantir que a posição da amostra esteja correta. Um espelho é posicionado em seu lugar e o feixe incidente é refletido sobre ele mesmo, fazendo-o atravessar a fenda (vide Figura 4.1). Se o feixe refletido incidir no centro da fenda, o posicionador de amostras (Figura 4.5), alinhado de forma perpendicular ao feixe incidente, garantirá a posição vertical da amostra. Além disso, assegura que o plano gerado pelo eixo da amostra e pelo feixe incidente forme um ângulo reto em relação ao plano formado por este e pelos que vão até os detectores da amostra.

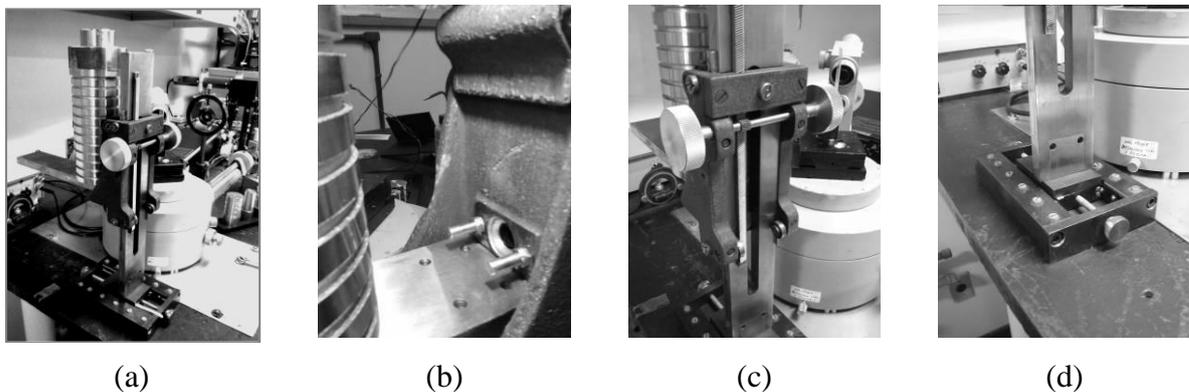


Figura 4.5: Fotos do posicionador de amostras: (a) porta amostra em sua totalidade; (b) detalhe da mesa de apoio e do “batente” de posicionamento; (c) sistema de translação vertical; (d) o sistema de translação horizontal

Durante todo o processo de medição (alinhamento, posicionamento, reposicionamento e registros), um cuidado especial foi tomado quanto a não tocar na amostra com a mão nua (sem luvas), o que poderia transferir a oleosidade da mão do operador para as amostras fazendo com que fosse foco de acúmulo de poeira (como citado por Yanagi *et al.*, 1986) e também funcionando com o facilitador de oxidação.

O posicionamento da amostra durante as medições foi verificado através de relógio comparador que apontava eventuais desvios no posicionamento. Após as medições, as amostras foram acondicionadas em papel macio e depositadas em ambiente livre de poeira e/ou umidade a fim de conservá-las no caso de ser necessária a repetição de alguma medição.

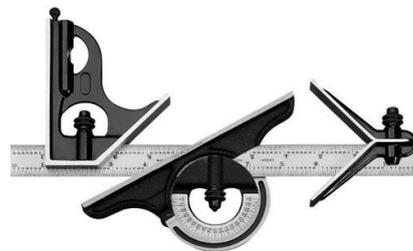
#### 4.4 Verificação do Alinhamento

Como supracitado, o alinhamento é essencial. Em função disso, procedeu-se seguindo sempre as etapas abaixo relacionadas de modo a garantir que medidas realizadas em diferentes ocasiões estivessem tão alinhadas quanto em um procedimento anterior:

- 1) Iniciava-se o alinhamento (no caso do primeiro procedimento) ou verificação do alinhamento (no caso de procedimentos posteriores) com a inspeção visual, com o objetivo de garantir que todos os detectores, laser, divisores de feixe, suporte de amostra e transladores estivessem alinhados.
- 2) Após isso e a estabilização do laser, a horizontalidade (nível horizontal) do dispositivo “porta amostra” foi verificada<sup>14</sup>, através de um nível “olho de boi” (Figura 4.6a) e um esquadro combinado completo (Figura 4.6b), além de também verificar a movimentação do ponto refletido na amostra<sup>15</sup> (quando da translação vertical).



(a)



(b)

Figura 4.6: (a) vista superior de um nível bolha; (b) esquadro combinado completo.

- 3) Foi examinado então, através do posicionamento de um espelho plano na posição da amostra, se o laser refletido estava de fato incidindo no detector da amostra; da mesma maneira, verificou-se se o divisor de feixe do sinal referência estava na posição adequada.

Uma vez realizados esses três passos, as amostras poderiam ser mensuradas.

<sup>14</sup>Esta verificação de horizontalidade era uma verificação grosseira, para caso de ser necessário algum tipo de reposicionamentos ou reajuste em algum dos parafusos de fixação do porta amostra.

<sup>15</sup>Esta checagem, em que era utilizando o ponto refletido, era a verificação fina do posicionamento.

## 4.5 Aquisição de Dados

A aquisição dos dados (ou processo de medição das amostras) foi realizada verificando-se a intensidade de tensão lida no detector de amostra através do dispositivo *lock-in*. Todas as leituras ocorreram após a estabilização dos mostradores, i.e., não acontecia nenhuma oscilação tanto no *display* digital quanto no indicador analógico. Na Figura 4.7, pode-se observar o painel de leituras do *lock-in*.



Figura 4.7: Fotografia dos monitores analógicos e digitais do *lock-in*.

Os parâmetros de ajuste do *lock-in* deveriam estar sempre configurados da mesma maneira, ou seja, igualmente à medida inicial, de forma que se pudesse ter reprodutibilidade nas medições. Esses parâmetros foram fixados em ganho “zero”, tempo de integração “0,25 s”, sensibilidade variando de 0,1 a 10 mV (apenas variando quando necessário, por motivo de o sinal tornar-se muito grande ou muito pequeno para determinada escala, com objetivo de aumentar a precisão da medição).

## 4.6 Softwares para Análise de Dados

Os dados foram analisados através de cálculos estatísticos e sob a forma de tabelas e gráficos. Nos gráficos, procurou-se uma relação que permitisse ajustar uma função que relacionasse os dados coletados da refletividade da superfície com os dados de rugosidade medidos. Esta relação foi determinada pelo melhor ajuste de curva que mostrasse um comportamento em que, para rugosidades muito pequenas, houvesse um sinal laser muito grande e, para rugosidades altas, o sinal laser diminuísse gradativamente. O ajuste de curvas foi realizado pelo método dos mínimos quadrados, através de ferramentas internas dos *softwares*, bem como médias, desvios padrões e índice de correlação.

Os softwares computacionais utilizados para analisar os dados foram o ORIGINLab<sup>®</sup>

7.0, LabFit Curve Fitting Software 7.2.48 [Silva, 2011] e Microsoft® Excel. O ORIGINLab® 7.0, permite realizar ajuste para funções determinadas, i.e., uma vez escolhida a equação, ele procura o melhor ajuste usando o método dos mínimos quadrados. O LabFit realiza uma busca em sua coleção de aproximadamente 500 funções, de acordo com o número de parâmetros que se definem para a tentativa de ajuste, determinando-se a variável dependente, a variável independente e a quantidade de parâmetros. Assim, faz a busca, também utilizando o método dos mínimos quadrados. O Excel auxilia nos dados inseridos e nos cálculos de média de valores, verificações a respeito da função definida nos ajustes, entrada de dados e manipulação de tabelas.

#### 4.7 Procedimentos Preliminares

Inicialmente, realizou-se a montagem do sistema experimental, com o propósito de apenas testar a sensibilidade de medição de rugosidade. Assim, verificou-se se o dispositivo, em um todo, era capaz de diferenciar a intensidade de sinal da luz laser, que ora era refletida por uma superfície lisa (polida), ora era refletida por superfície rugosa (com ranhuras características de usinagem). O teste foi realizado a partir da superfície de calibração/aferição (Figura 4.8a) do Rugosímetro Portátil Mitutoyo, modelo SurfTest SJ-201 (Figura 4.8b), disponível no Laboratório de Usinagem (Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS), em um dispositivo “protótipo” montado no Laboratório Laser (Instituto de Física da UFRGS), exclusivamente para este fim, conforme o planejado. O padrão (Figura 4.8a) tem rugosidade diferente em locais distintos, o que permitirá identificar, de maneira fácil, se haverá ou não diferença na intensidade do sinal laser refletido em cada um dos pontos medidos.



Figura 4.8: Rugosímetro Mitutoyo SurfTest SJ-201: (a) padrão de calibração/aferição, a região marcada com “P” é polida; a região marcada com “R” é rugosa; (b) equipamento de medição

Uma vez constatada a capacidade do sistema de diferenciar amostras com distintas rugosidades, iniciar-se-á a montagem de dispositivo de medição definitivo. Alguns testes foram realizados em corpos de prova já usinados anteriormente.

#### 4.8 Caracterização dos Corpos de Prova

Como se vê na Figura 4.9, os corpos de prova (CP) têm formas variadas; alguns com apenas um padrão de rugosidade, e outros com quatro padrões de rugosidade, e cada um desses padrões de rugosidade é equivalente a uma amostra. Estes CP's foram produzidos originalmente para outra pesquisa do Laboratório de Usinagem, a fim de permitir o estudo comparativo de rugosidades entre os dois tipos de ferramentas (alisadora e convencional) [Geier *et al.*, 2010]. Essas amostras proporcionaram acesso a uma gama de rugosidades diferentes, utilizadas preliminarmente na pesquisa.

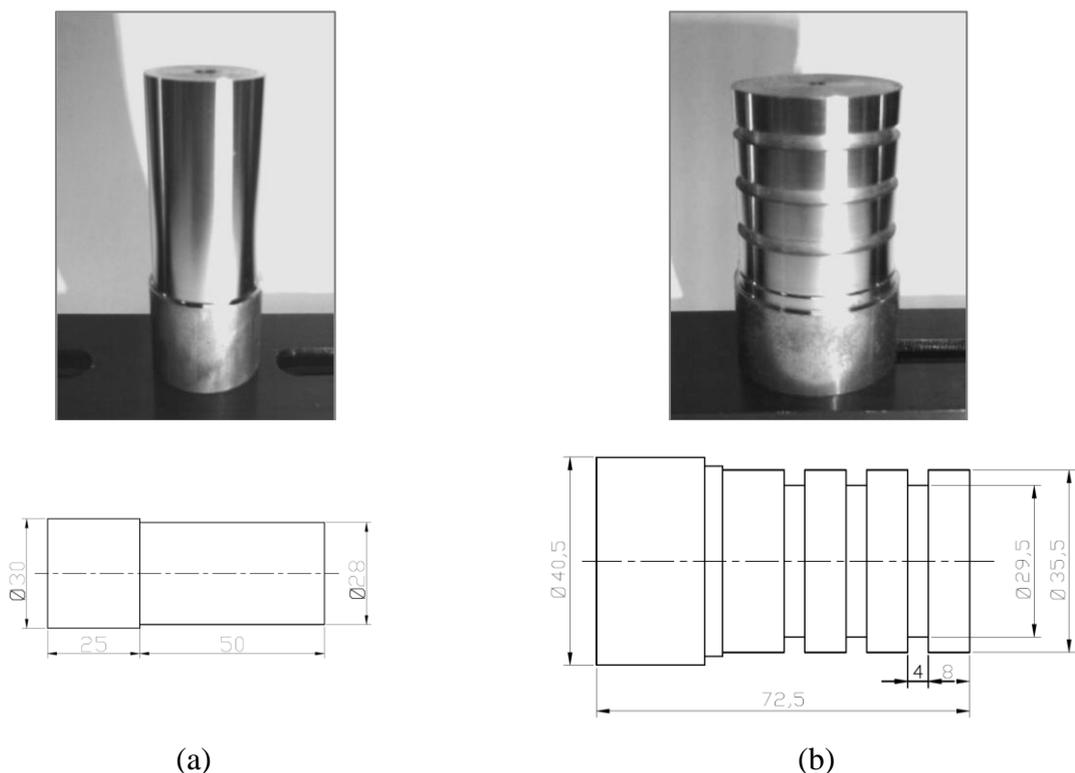


Figura 4.9: Corpos de prova iniciais. (a) usinagem igual em todo seu comprimento (uma amostra); (b) quatro amostras diferentes (quatro combinações de parâmetros de corte).

Dimensões em milímetros.

Como os corpos de prova disponíveis são compostos de diferentes naturezas, realizar-se-ão testes a respeito de seu comportamento em relação ao comprimento de onda usado no laser (ver seção 5.1). Os testes confirmarão se os aços SAE 1020, SAE 1045 e SAE 4140

apresentam ou não refletividade diferente, i.e., se algum deles absorve mais radiação (no comprimento de onda do estudo) ou não.

Quando mais corpos de prova forem fabricados, procurar-se-á manter constante o máximo de parâmetros possível no experimento, fazendo com que eventuais divergências nos dados coletados possam ter sua causa mais facilmente identificada.

Para a etapa seguinte, fabricaram-se, a partir de CP's como os a Figura 4.9b, novos corpos de prova que mantiveram a mesma forma, porém com diâmetros reduzidos que diminuiriam conforme os parâmetros de corte usados. Utilizando o torno mecânico ROMI, modelo I20, com  $v_c = 110$  m/min ( $n = 1000$  rpm), os CPs denominados 1, 5 e 8 foram feitos em aço SAE 1020, com ferramenta de corte convencional de pastilha triangular classe PF com  $r_\epsilon = 0,8$  mm,  $a_p = 1$  mm, variando apenas o avanço ( $f = 0,042$  a  $0,229$  mm/min); e os CPs 23 e 24 em aço SAE 4140, empregando pastilha da mesma geometria e classe, mas com raio de ponta  $r_\epsilon = 0,4$  mm,  $a_p = 0,6$  mm, variando também o avanço ( $f = 0,042$  a  $0,250$  m/min).

Antes de efetuar as medições do sinal refletido pelas amostras, os CPs foram faceados para garantir uniformidade do posicionamento no dispositivo de medição laser. Também, antes das mensurações, será aferida a potência emitida pelo dispositivo laser, com o objetivo de verificar se a potência da iluminação, nas superfícies, permanecerá constante em diferentes dias e/ou no mesmo dia, em diferentes momentos.

Em etapa posterior, foi fabricado novo CP no torno mecânico ROMI modelo I20, desta vez apenas em SAE 4140, como se pode ver na Figura 4.10. Chamado de CP4140, em tarugo de aço SAE 4140, com uma série de 12 amostras nele (A-L), fabricadas utilizando ferramenta de corte alisadora de pastilha triangular classe WF com raio de ponta  $r_\epsilon = 0,4$  mm, velocidade de corte  $v_c = 475$  m/min ( $n = 2000$  rpm), profundidade de corte  $a_p = 1$  mm, variando apenas o avanço  $f = 0,09$  a  $0,20$  mm/volta. Para as amostras foram dados nomes CP4140 (A-L).

Na última etapa, em que foi necessária a fabricação de mais um CP, agora no torno CNC Mazak QTN 100-II, utilizou-se o CP4140 da etapa anterior, apenas empregando ferramenta convencional de pastilha triangular classe PF com  $r_\epsilon = 0,4$  mm,  $v_c = 515$  m/min,  $a_p = 1$  mm, variando apenas  $f = 0,07$  a  $0,18$  mm. As amostras receberam nomes análogos a “CP4140 + *avanço*” (0,07 a 0,18).

A partir das medidas de intensidade do laser refletidas pelas amostras serão montadas tabelas de relação entre as rugosidades (mensuradas com rugosímetro SJ-201) e as refletividades (obtidas através da intensidade do sinal laser).

Então, em decorrência desta relação, procurar-se-á a curva que melhor se ajusta aos pontos obtidos de forma experimental. Desta maneira, será possível definir uma função (chamada função de transferência), permitindo determinar, empiricamente, a rugosidade da superfície usinada como função do sinal laser captado.

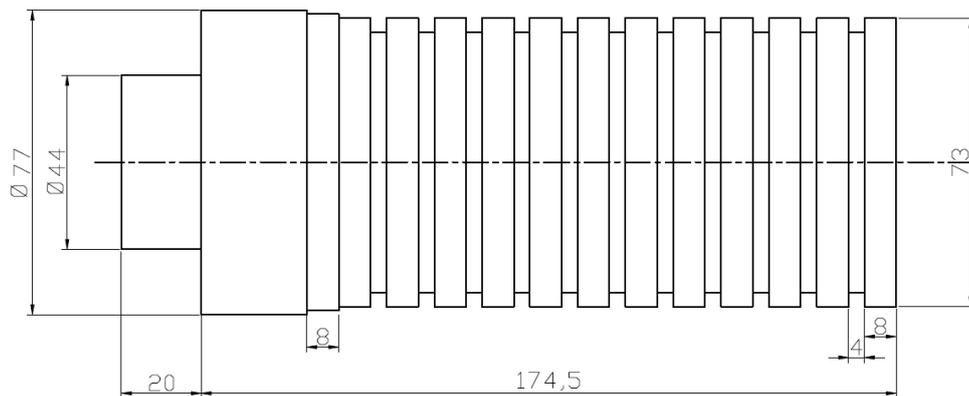
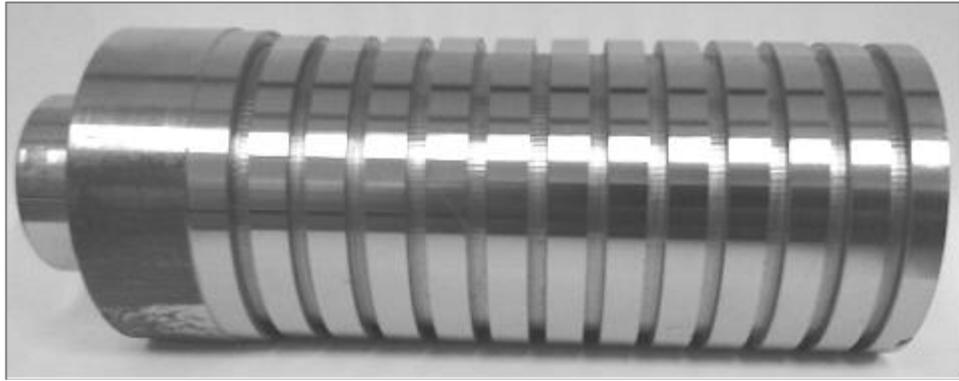


Figura 4.10: CP4140 produzido com 13 amostras, feito em SAE4140. Valores em (mm).

## 5 EXPERIMENTAÇÕES

A rugosidade gerada na usinagem é mais influenciada pelo processo do que pela máquina [Machado *et al.*, 2009]. Assim, nesta parte, serão apresentados os procedimentos efetuados para a realização dos testes e aquisição dos dados (intensidade laser refletida e rugosidade “ $R_a$ ”), bem como seus resultados, considerando amostras distintas de superfícies torneadas obtidas em diferentes condições de corte. Para tanto, o capítulo foi dividido em quatro seções: (1) Testes Iniciais; (2) Testes com Aço SAE 1020 e SAE 4140; (3) Testes com Aço SAE 4140 e Ferramenta Alisadora; (4) Testes com Aço SAE 4140 e Ferramenta Convencional.

### 5.1 Testes Iniciais

No início, mediu-se a intensidade do sinal laser refletido por superfícies geradas por torneamento cilíndrico horizontal. Essas superfícies (vide Figura 4.9) foram fabricadas para o estudo de Geier *et al.*, 2010, e, após realizar os procedimentos necessários para adequar as amostras ao sistema proposto, estas tiveram suas rugosidades medidas através do rugosímetro SJ-201 e também seu sinal laser correspondente.

A rugosidade foi mensurada com o SJ-201, quatro vezes em cada amostra em quatro diferentes localizações da superfície, pois o rugosímetro foi definido como o equipamento de referência para a definição da superfície efetiva, com incerteza conhecida. Já o sinal laser foi medido em quarenta pontos diferentes da amostra, todos tomados aleatoriamente.

A potência do laser foi verificada com wattímetro Thor Labs modelo PM100D, após período de aproximadamente 25 min para a estabilização da potência emitida. Este wattímetro fornece automaticamente os dados de potência média emitida, medida de potência máxima, medida de potência mínima e desvio padrão. Em torno de 720 diferentes medições, tomadas durante aproximadamente 03min30s, da potência emitida pelo laser foram realizadas, desses pontos obtiveram-se os dados que podem ser vistos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Dados da potência emitida pelo laser utilizado nas medições.

Laser Optron	Medidas
Mínimo	3,657 mW
Máximo	3,666 mW
Média	3,662 mW
Desvio padrão	0,002154 mW

Testes análogos com resultados equivalentes foram processados pelo menos a cada três etapas de medições do sinal laser nas amostras. A variação que se pôde notar sempre se manteve dentro da mesma faixa.

O cálculo de incerteza da potência de iluminação emitida pelo laser foi realizado pela Equação 5.1 [Gonçalves Jr. e Sousa, 2008], em que o intervalo de confiança de 95% foi considerado<sup>16</sup>.

$$RM = \bar{X} \pm \frac{1,96.s}{\sqrt{n}} \quad (5.1)$$

onde: RM = resultado da medição (mensurando<sup>17</sup>);

$\bar{X}$  = média aritmética das medidas;

s = desvio padrão das medidas;

n = quantidade de medidas realizadas (40 pontos).

Dos dados da Tabela 5.1 e de acordo com a Equação 5.1, o resultado da incerteza da medição foi de 0,00016 mW. Logo, como este valor calculado é menor que a resolução do instrumento de medição (0,001 mW), o valor pôde ser desprezado.

Como os corpos de prova haviam sido confeccionados com três qualidades de aços diferentes (SAE 1020, SAE 1045 e SAE 4140) (Tabela 5.2), foram fabricadas amostras com cada um desses aços para a realização de teste comparativo de refletividade total entre eles.

Tabela 5.2: Composição aproximada dos corpos de prova (em %)

Material	C	Si	Mn	S <sub>máx</sub>	P <sub>máx</sub>	Cr	Ni	Mo
SAE 1020	0,20	0,25	0,45	0,040	0,040	-	-	-
SAE 1045	0,45	0,25	0,75	0,040	0,040	-	-	-
SAE 4140	0,40	0,27	0,87	0,040	0,040	0,95	-	0,20

Produziram-se pequenos discos de cada material (não foi necessário o embutimento), e uma das faces foi polida até espelhamento (no LAMEF – Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS), Figura 5.1, então, o teste foi realizado.

<sup>16</sup> A determinação do erro sistemático dependia da utilização de um valor verdadeiro convencional para se tomar como referência, e isto não foi possível de se definir para a potência de iluminação emitida. Assim, consideraram-se apenas os efeitos aleatórios sobre o resultado da medição realizada com o wattímetro.

<sup>17</sup> Medição do sinal laser refletido pela amostra.

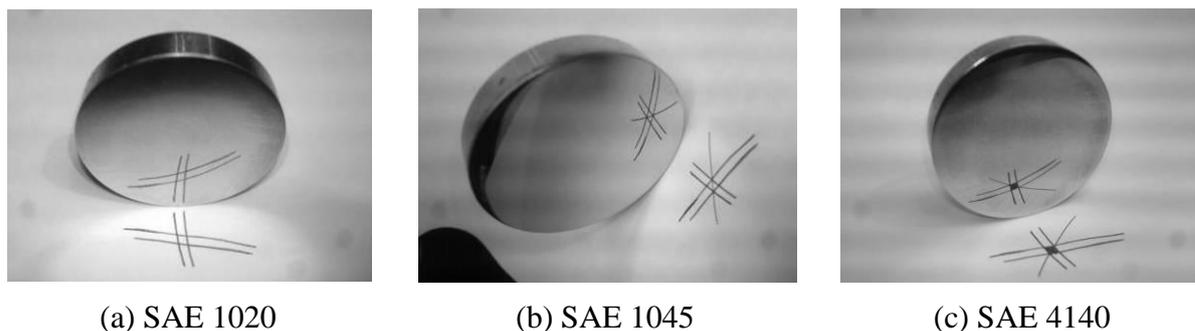


Figura 5.1: Amostras para medição de refletividade total para os aços: (a) SAE 1020; (b) SAE 1045; (c) SAE 4140

O processo de produção destas amostras foi semelhante ao processo de polimento para análise metalográfica; o polimento foi realizado com lixas d'água aplicadas em sequência, do grão mais grosso ao mais fino, com lixa 100, 200, 400, 1000, 2000, 4000 e disco de polimento com alumina em pó como material abrasivo (porém, sem ataque químico algum). O teste visa fornecer informações sobre o comportamento (reflexão/absorção) de superfícies planas em relação a uma faixa do espectro de radiações eletromagnéticas. Neste caso, usou-se uma faixa de comprimentos de onda dentro do visível, que inclui o comprimento de onda do laser a ser aplicado nas medidas de rugosidade ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ). Na sequência, realizou-se teste de refletividade difusa total, nas dependências do Laboratório Laser da UFRGS, com o espectrofotômetro Variant – CARY5000 (Figura 5.2), com uso da esfera integradora, a fim de identificar se havia ou não diferenças na refletividade entre eles (pois possuem composições diferentes – vide Tabela 5.2).



Figura 5.2: Espectrofotômetro CARY5000

O teste não mostrou indicativo de existência de diferenças significativas entre os três materiais das amostras, como se vê na Figura 5.3.

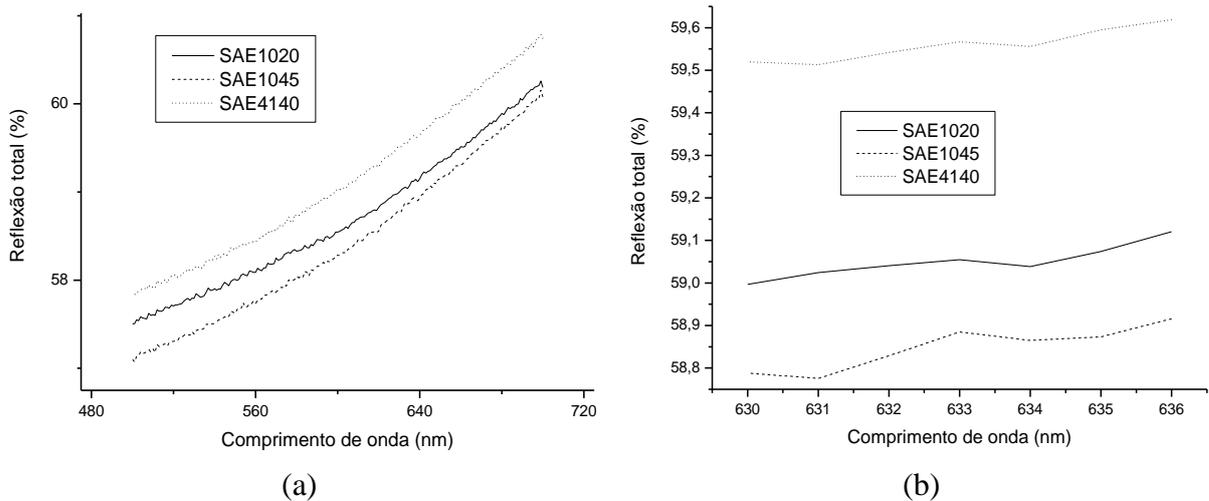


Figura 5.3: Teste comparativo de refletividade entre SAE4140, SAE1020 e SAE1045: (a) espectro total de 500 até 700 nm; (b) detalhe no comprimento de onda usado (633 nm).

Durante os testes preliminares, obtiveram-se resultados promissores quando os pontos que relacionavam a rugosidade ( $R_a$ ) das amostras de Geier *et al.*, 2010 foram plotados. Ao medir o sinal refletido pela amostra, obteve-se o resultado médio exposto na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Resumo dos dados de Rugosidade ( $R_a$ ) medida com SJ-201 e sinal laser espalhado

Amostra	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Sinal Laser [ $\mu\text{V}$ ]	Amostra	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Sinal Laser [ $\mu\text{V}$ ]
2	1,88	182,4	19a	1,04	172,7
3	0,54	241,5	20d	0,37	259,8
4	0,58	240,4	20c	0,54	274,5
6	0,61	236,9	20b	0,77	350,1
13	0,50	464,7	20a	1,29	181,2
14	0,58	497,4	21d	0,31	126,9
17b	0,70	104,2	21c	0,96	129,2
17a	1,31	108,3	21b	2,52	73,8
18d	1,11	168,9	21a	4,07	66,4
18c	1,07	127,3	23d	0,35	155,0
18b	0,82	168,9	23c	0,90	124,8
19d	0,51	321,4	23b	2,14	99,6
19c	0,51	283,8	23a	3,81	118,8
19b	0,69	214,9	24d	0,69	190,6

A Figura 5.4 mostra a distribuição dos pontos da Tabela 5.3 no gráfico da intensidade do sinal laser SL em função da rugosidade  $R_a$ . No gráfico, nota-se claramente que há uma tendência à redução de intensidade do sinal laser SL [ $\mu\text{V}$ ] refletido pela superfície quando há o aumento da rugosidade  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] da amostra.



diferentes combinações de parâmetros de corte, que oferecem rugosidades diferentes em cada uma delas (vide Figura 4.9b).

A fabricação das vinte novas amostras (em condições de usinagem conhecidas) foi concretizada e a rugosidade  $R_a$  foi medida com o rugosímetro de agulha portátil Mitutoyo Surftest SJ-201 (vide Figura 4.8b). Em seguida, efetuaram-se as medições do espalhamento laser em, no mínimo, quarenta diferentes pontos de cada amostra, com a finalidade de garantir a uniformidade com a aleatoriedade das medições de sinal. A Tabela 5.4 mostra os valores médios de rugosidade medida com rugosímetro SJ-201 e de sinal laser medido das amostras.

Tabela 5.4: Dados combinados para os cinco corpos de prova

Parâmetros de Usinagem	Amostra	Avanço f [mm/volta]	$R_a$ estimado Eq. 2.2 [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ medido SJ-201 [ $\mu\text{m}$ ]	Sinal Laser $\bar{X}$ [ $\mu\text{V}$ ]	Sinal Laser s [ $\mu\text{V}$ ]
SAE 1020 $r_e = 0,8$ mm $a_p = 1,0$ mm	CP01A	0,042	0,070	0,54	205,6	61,1
	CP01B	0,047	0,088	0,45	125,9	20,3
	CP01C	0,057	0,130	0,65	170,7	45,3
	CP01D	0,068	0,185	0,61	210,5	45,4
	CP05A	0,073	0,213	0,59	191,8	36,1
	CP05B	0,094	0,353	0,67	387,8	93,2
	CP05C	0,104	0,433	0,76	211,4	45,7
	CP05D	0,119	0,567	0,84	165,8	43,7
	CP08A	0,135	0,730	1,01	182,9	20,9
	CP08B	0,166	1,104	1,34	181,0	14,7
	CP08C	0,187	1,402	1,63	181,8	16,2
	CP08D	0,229	2,102	2,16	137,0	9,9
SAE 4140 $r_e = 0,4$ mm $a_p = 0,6$ mm	CP23A	0,042	0,141	1,21	40,3	5,3
	CP23B	0,047	0,177	1,16	44,9	6,2
	CP23C	0,057	0,260	1,61	34,4	3,4
	CP23D	0,068	0,370	1,59	30,5	2,4
	CP24A	0,166	0,708	0,92	92,7	16,4
	CP24B	0,187	0,867	1,04	126,0	16,4
	CP24C	0,229	1,135	1,29	95,3	10,2
	CP24D	0,250	1,465	1,55	99,0	16,2

Nota-se na Tabela 5.4 que há uma discrepância entre  $R_a$  medido e  $R_a$  estimado, apesar dos CP's 1, 5, 8, 23, 24 também mostrarem uma tendência à diminuição do sinal laser com o aumento da rugosidade (ver Figura 5.5), pois a Eq. 2.2 foi desenvolvida para os parâmetros de melhor rendimento das ferramentas de corte e estas amostras foram fabricadas fora destes parâmetros de otimização. As amostras foram fabricadas simplesmente para que houvesse diferentes texturas entre elas, por isso desta esta diferença na estimação pela Eq. 2.2.

Com as amostras da Tabela 5.4 foi possível traçar o gráfico dos pontos que relacionam

a rugosidade com o sinal laser (Figura 5.5).

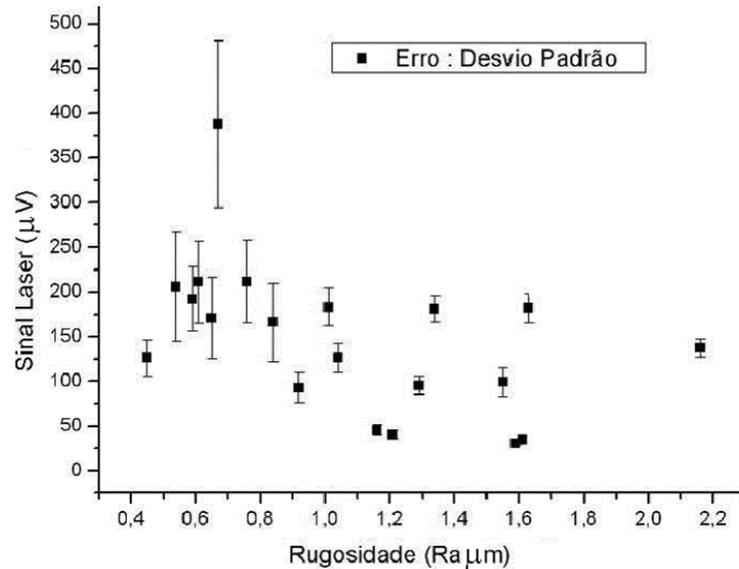


Figura 5.5: Rugosidade efetiva vs. Sinal laser (as barras de erros representam o desvio padrão de cada um dos pontos)

Por se tratar de dados de variáveis aleatórias (que segundo Gonçalves Jr e Sousa, 2008, são aquelas cujo valor não pode ser previsto exatamente, mas apenas por termos de probabilidade) foi quantificada a interdependência da variável sinal laser em função da rugosidade através de seu índice de correlação  $R(x,y)$ . Este índice, definido para variáveis aleatórias, indica a forma da dependência de uma variável  $x$  em relação à outra  $y$ . Elas são tão mais dependentes uma da outra quanto maior for o módulo de  $R$ . Este índice  $R$  é classificado por um número compreendido entre  $-1$  e  $+1$  e calculado pela Equação 5.2. O índice  $R = -1$  indica uma correlação inversa perfeita;  $R = 0$  indica correlação inexistente; e  $R = +1$  uma correlação direta perfeita. Quando  $|R| > 0,8$  é razoável considerar relação plena e se  $|R| < 0,2$  considera-se total falta de correlação [Gonçalves Jr e Sousa, 2008].

$$R(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.2)$$

onde:  $R(x,y)$  = coeficiente de correlação entre as variáveis  $x$  e  $y$

$x_i$  e  $y_i$  =  $i$ -ésimo par de valores de  $x$  e  $y$

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  = valores médios de  $x$  e  $y$

$n$  = número de medidas que formam pares  $(x,y)$

Procurou-se então obter a relação entre o sinal laser SL [ $\mu\text{V}$ ] com o valor conhecido de  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] medido com SJ-201 através do melhor ajuste (utilizando o software ORIGINLab<sup>®</sup>, que faz uso da técnica de mínimos quadrados).

A partir dos dados da Tabela 5.4 foram traçados duas linhas, como se pode notar no gráfico da Figura 5.6. Entretanto, a curva de menor índice de correlação ( $R^2 = 0,20$ ) fornece uma resposta mais próxima da esperada (como observado nos Testes Iniciais), pois para rugosidades abaixo de aproximadamente  $0,3 \mu\text{m}$ , o perfil indica diminuição do sinal laser enquanto que a curva de maior índice tem comportamento contrário ao esperado na teoria. A curva de melhor ajuste para esses dados ficou com índice de correlação igual a  $R = 51,7\%$ . Esta função é representada pela Equação 5.3 (Situação 1).

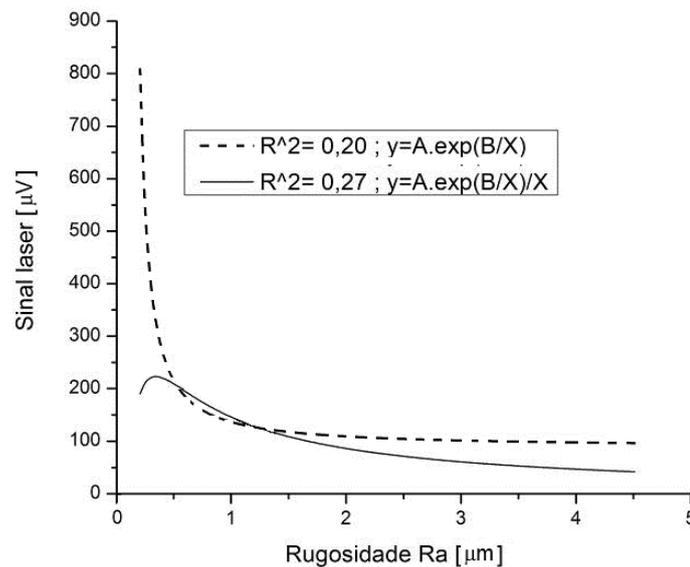


Figura 5.6: Funções de transferência com diferentes coeficientes de correlação.

$$SL_1 = K_1 \cdot e^{\frac{W_1}{R_a}} \quad (5.3)$$

onde:  $SL_1$  = sinal laser para situação 1.

$R_a$  = rugosidade média

$K_1 = 87,4 \pm 27,4$  [ $\mu\text{m}$ ]

$W_1 = 0,44 \pm 0,21$  [ $\mu\text{V}$ ]

Tomando por base a curva representada pela Equação 5.3, far-se-á um estudo da aproximação matemática que os pontos experimentais da Tabela 5.4 têm da curva definida pelo melhor ajuste. Primeiramente, utilizando o conceito de distância de Cook's, serão

retirados de pontos que estão distantes da curva em mais de 20% [Montgomery *et al.*, 2010]. Em seguida, substituem-se os pontos que tiveram seus valores excessivamente fora da curva pelos valores teóricos determinados pela Equação 2.2, pois as condições de corte para a produção dessas amostras não estavam dentro dos parâmetros recomendados pelo fabricante da ferramenta. Isto levará a uma nova coleção de pontos que deverá fornecer uma nova curva de ajuste com coeficiente de correlação mais elevado. A Figura 5.7 ilustra esta análise.

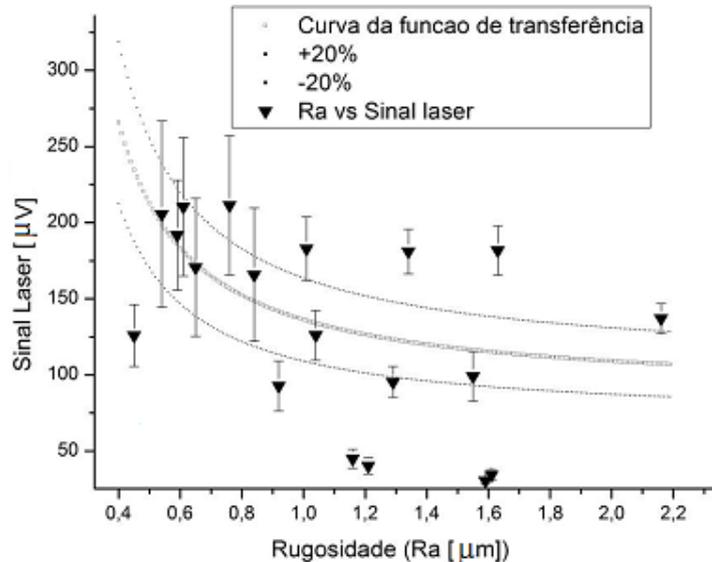


Figura 5.7: Rugosidade  $R_a$  vs Sinal Laser dos corpos de prova 1, 5, 8, 23, 24.

Com a retirada dos pontos divergentes, a Figura 5.8 fornece os pontos necessários para a definição do melhor ajuste de uma função a tais pontos. Assim, define-se a curva da nova função (Situação 2) que relaciona a Rugosidade ( $R_a$  prático) com o Sinal Laser (experimental) para um índice de correlação  $R = 80\%$ .

A Figura 5.9 tem a função representada pela Equação 5.4:

$$SL_2 = K_2 \cdot e^{\frac{W_2}{R_a}} \quad (5.4)$$

onde:  $SL_2$  = sinal laser para situação 2.

$$K_2 = 93,4 \pm 15,0$$

$$W_2 = 0,45 \pm 0,11$$

A Figura 5.10 mostra a representação gráfica da  $FT_1$  (Equação 5.5) que foi gerada a partir da Equação 5.4 que forneceu o melhor ajuste. As linhas mais tênues mostram aproximação de 20%, juntamente com os dados experimentais que a originaram (Tabela 5.4).

Esta curva apresenta coeficiente de correlação  $R = 80\%$  o que, segundo Gonçalves Jr e Sousa, 2008, indica correlação plena. Observa-se uma tendência de decaimento do sinal laser com o aumento da rugosidade. Contudo, os dados apresentam variações muito grandes para uma curva que deveria ter tanto menos sinal refletido quanto maior fosse a rugosidade da amostra [Heitmann, 1977; Persson, 1996].

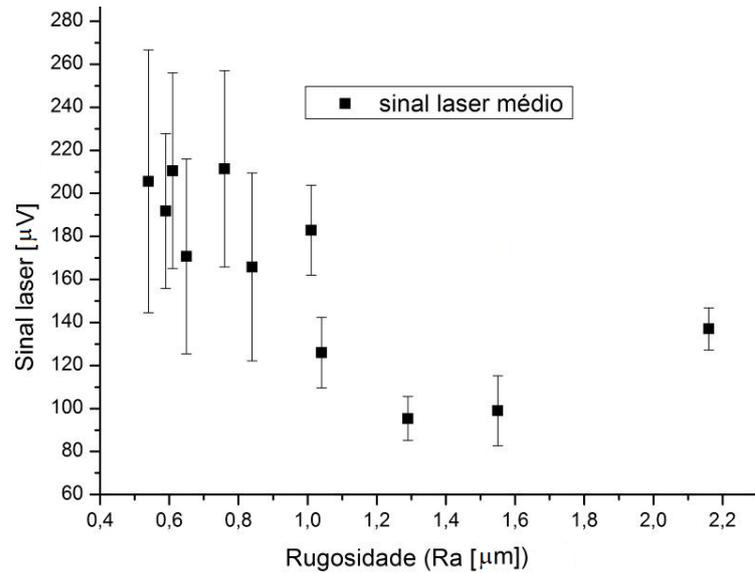


Figura 5.8: Gráfico (corrigido) de  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) vs. Sinal laser ( $\mu\text{V}$ )

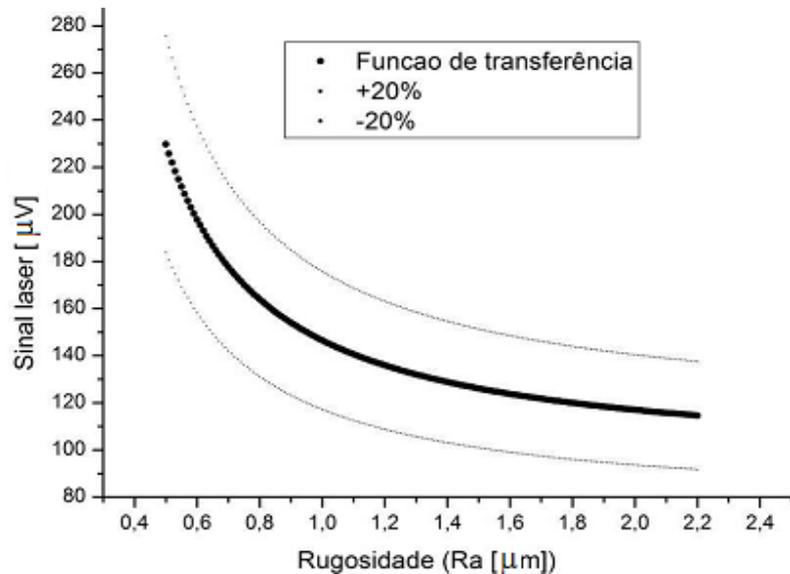


Figura 5.9: Primeiro gráfico do melhor ajuste de Rugosidade vs Sinal laser

Então se aplicou, apenas para teste, a função de transferência  $FT_1$  (Equação 5.5) aos dados que haviam sido obtidos nos Testes Iniciais (vide Tabela 5.3) e obteve-se o resultado apresentado na Tabela 5.5.

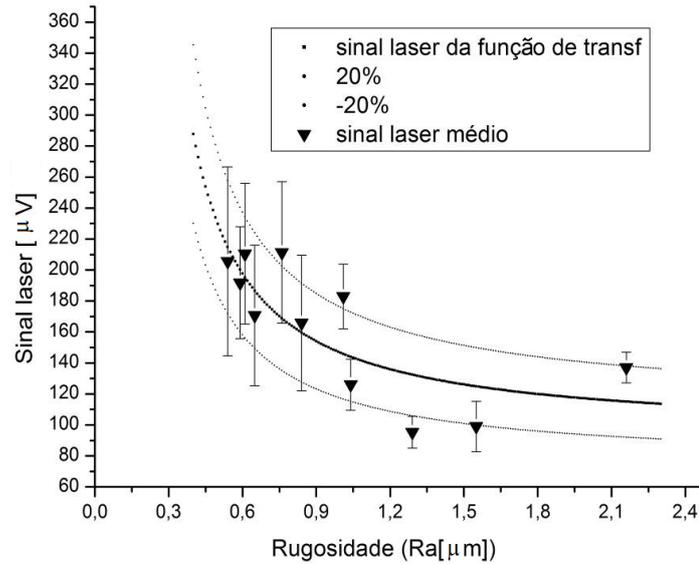


Figura 5.10: Gráfico que expressa a FT, juntamente com os pontos experimentais

A  $FT_1$  (Equação 5.5) foi gerada a partir da Equação 5.4.

$$R_a = \frac{0,45}{\ln\left(\frac{SL}{93,4}\right)} \quad (5.5)$$

Numa inspeção rápida dos resultados obtidos, pode-se observar que a  $FT_1$ , gerada através de superfícies que foram fabricadas com ferramenta convencional, possivelmente não se aplica às superfícies das amostras de Geier *et al.*, 2010. Nesta comparação não se pode concluir a respeito do desempenho da  $FT_1$ .

### 5.3 Testes com Aço SAE 4140 e Ferramenta Alisadora

Com intuito de examinar mais profundamente a função  $FT_1$  (Equação 5.5), testar-se-á sua aplicação a superfícies obtidas com ferramenta alisadora (*wiper*). Nesta fase realizou-se o estudo da superfície gerada por ferramenta alisadora (*wiper*). Para isso foi produzido um novo corpo de prova denominado CP4140 (Figura 4.10) em tarugo único de aço SAE 4140 com 12 amostras. Pretende-se avaliar a eficiência e a eficácia<sup>20</sup> da  $FT_1$  (Equação 5.5) em superfícies “alisadas”. A medição de sinal laser das novas amostras do CP4140, denominadas de “A” até “L” procedeu da mesma maneira que os CP’s anteriores. Todos os cuidados foram tomados e a coleta de dados aconteceu de maneira absolutamente análoga às anteriores.

<sup>20</sup> *Eficiência* reside basicamente em fazer as coisas da melhor maneira possível (resolver problemas), enquanto que *eficácia* consiste em fazer as coisas que são importantes para os resultados (alcançar o objetivo).

Tabela 5.5: Erro relativo na estimação da rugosidade  $R_a$  com  $FT_1$  para os Testes Iniciais

Amostra	Sinal Laser [ $\mu V$ ]	$R_a$ (efetivo) [ $\mu m$ ]	$R_a$ (calculado com $FT_1$ ) [ $\mu m$ ]	Erro Relativo [%]
2	182,4	1,88	0,672	64,2
3	241,5	0,54	0,474	12,3
4	240,4	0,58	0,476	17,9
6	236,9	0,61	0,484	20,7
13	464,7	0,50	0,280	43,9
14	497,4	0,58	0,269	53,6
17a	108,3	1,31	3,042	>100
17b	104,2	0,70	4,117	>100
18b	168,9	0,82	0,760	7,3
18c	127,3	1,07	1,454	35,9
18d	168,9	1,11	0,760	31,6
19a	172,7	1,04	0,732	29,6
19b	214,9	0,69	0,540	21,7
19c	283,8	0,51	0,405	20,6
19d	321,4	0,51	0,364	28,6
20a	181,2	1,29	0,679	47,4
20b	350,1	0,77	0,341	55,8
20c	274,5	0,54	0,417	22,7
20d	259,8	0,37	0,440	18,9
21a	66,4	4,07	-1,318	>100
21b	73,8	2,52	-1,910	>100
21c	129,2	0,96	1,387	44,5
21d	126,9	0,31	1,469	>100
23a	118,8	3,81	1,872	50,9
23b	99,6	2,14	7,013	>100
23c	124,8	0,9	1,553	72,6
23d	155	0,35	0,889	>100
24d	190,6	0,69	-0,283	64,2

Procurou-se investigar o comportamento do sinal laser em novo perfil de rugosidades produzido com ferramentas *wiper*, posto que algumas amostras de Geier *et al.*, 2010, foram fabricadas com este tipo. Espera-se que isto ocasione maior concordância entre a rugosidade calculada e a rugosidade real. Vale salientar que essas novas amostras, teoricamente, teriam de produzir sinais mais elevados, i.e., deveriam refletir mais o laser do que as superfícies testadas anteriormente, pois a ferramenta *wiper* (Figura 1.3a) foi projetada para ser capaz de promover um “alisamento” mais eficiente do que a ferramenta convencional (Figura 1.3b).

A Tabela 5.6 mostra comparativamente os valores médios efetivos de rugosidade obtidos utilizando o rugosímetro SJ-201, os valores estimados pela Equação 2.3 (concebida

por Mello *et al.*, 2012, para determinar a rugosidade  $R_a$  teórica de superfícies usinadas por ferramentas *wiper*) e os dados de sinal laser (média e desvio padrão de 40 pontos coletados em cada amostra) das 12 amostras do CP4140.

Tabela 5.6: Valores efetivos do sinal laser e dos valores de rugosidade calculados e medidos.

Amostra CP4140	$R_a$ medido SJ-201 [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ estimado Eq. 2.3 [ $\mu\text{m}$ ]	Sinal Laser $\bar{X}$ [ $\mu\text{V}$ ]	Sinal Laser s [ $\mu\text{V}$ ]
A	1,94	0,67	369,5	24,8
B	1,45	0,71	124,1	10,5
C	1,31	0,75	229,4	32,8
D	1,00	0,80	158,5	10,1
E	0,81	0,85	172,8	11,7
F	0,82	0,90	196,5	13,0
G	0,87	0,97	194,8	40,9
H	0,90	1,03	213,0	11,3
I	0,90	1,10	297,9	13,2
J	1,63	1,18	295,2	20,3
K	1,09	1,25	358,2	19,8
L	1,11	1,34	240,4	13,3

Ao observar a Figura 5.11 (gráfico que representa os dados da Tabela 5.6 e o gráfico da função de transferência  $FT_1$ ), nota-se que a Equação 5.5 não é hábil para prever a rugosidade de uma amostra usinada com ferramenta *wiper* através do sinal laser refletido por ela, pois a função  $FT_1$  foi desenvolvida a partir da usinagem com ferramenta convencional. Foi então iniciada uma nova etapa de produção de amostras como se vê no item subsequente.

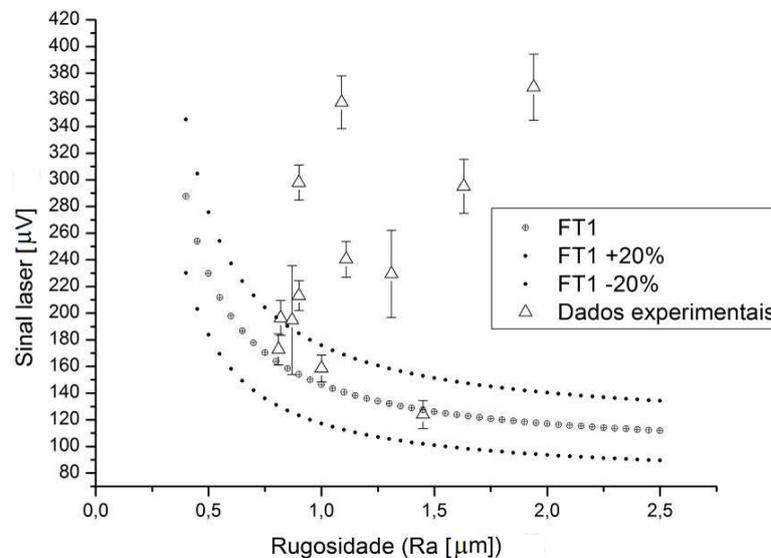


Figura 5.11: Gráfico de  $FT_1$  e pontos experimentais de  $R_a$  vs. Sinal laser, CP4140

## 5.4 Testes com Aço SAE 4140 e Ferramenta Convencional

A fim de encontrar a confirmação de que  $FT_1$  é capaz de estimar rugosidades  $R_a$  de superfícies torneadas por ferramenta convencional, a produção de mais amostras foi realizada. Assim, foram geradas 12 novas amostras no mesmo CP4140 (vide Figura 4.10) com objetivo de encontrar a função de transferência capaz de estimar as rugosidades de peças fabricadas.

Sabendo que a qualidade da superfície usinada depende de diferentes variáveis (condição da máquina, material da peça, dispositivo de fixação da ferramenta, avanço, raio de ponta da ferramenta de corte [Diniz *et al.*, 2008; Machado *et al.*, 2009; Kalpakjian e Schmid, 2010]) e visando aumentar o controle sobre elas, espera-se que a fabricação das novas amostras em um torno CNC diminua a influência das condições da máquina ferramenta.

Novas superfícies denominadas “CP4140+avanço” foram submetidas aos mesmos testes (sinal laser refletido, medida da rugosidade e estimativa teórica). Os dados experimentais e teóricos das 12 amostras deste CP estão descritos na Tabela 5.7.

A não correspondência dos resultados práticos com a Equação 2.2 é justificável, uma vez que a superfície, como disseram Machado *et al.*, 2009, depende de uma série de fatores: deformações plásticas, deformações elásticas, rupturas, tensões residuais na superfície, geração de calor, vibração e até reações químicas eventuais. Os dados experimentais obtidos são representados pelo gráfico da Figura 5.12.

Tabela 5.7: Dados experimentais CP4140 (0,07-0,18)

<b>Amostra CP4140</b>	<b><math>R_a</math> medido SJ-201 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b><math>R_a</math> estimado Eq. 2.2 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Sinal Laser <math>\bar{X}</math> [<math>\mu\text{V}</math>]</b>	<b>Sinal Laser s [<math>\mu\text{V}</math>]</b>
0,07	1,01	0,51	228,5	1,8
0,08	0,95	0,84	146,8	9,5
0,09	1,05	0,65	189,4	1,0
0,10	1,18	0,52	225,1	1,5
0,11	1,42	1,14	98,3	6,7
0,12	1,59	1,44	64,7	6,8
0,13	1,79	1,19	90,9	12,5
0,14	2,02	0,92	132,0	11,0
0,15	2,35	0,91	132,5	20,2
0,16	2,72	0,79	156,6	28,3
0,17	3,15	1,06	108,6	10,2
0,18	3,48	1,02	114,7	11,8

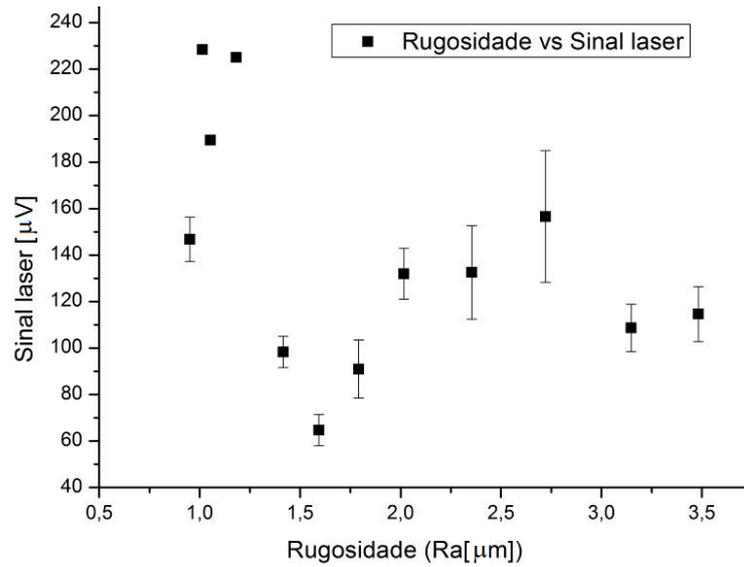


Figura 5.12: Gráfico de rugosidade  $R_a$  vs. sinal laser SL das amostras CP 4140 (0,07-0,18) com três pontos com desvio padrão menor que a marca do ponto

Analogamente ao procedimento utilizado para determinação da  $FT_1$ , procedeu-se a comparação dos pontos experimentais (Figura 5.12) com a curva gerada pela Equação 5.5 de modo a identificar os pontos distantes mais de 20%. A Figura 5.13 representa esta situação.

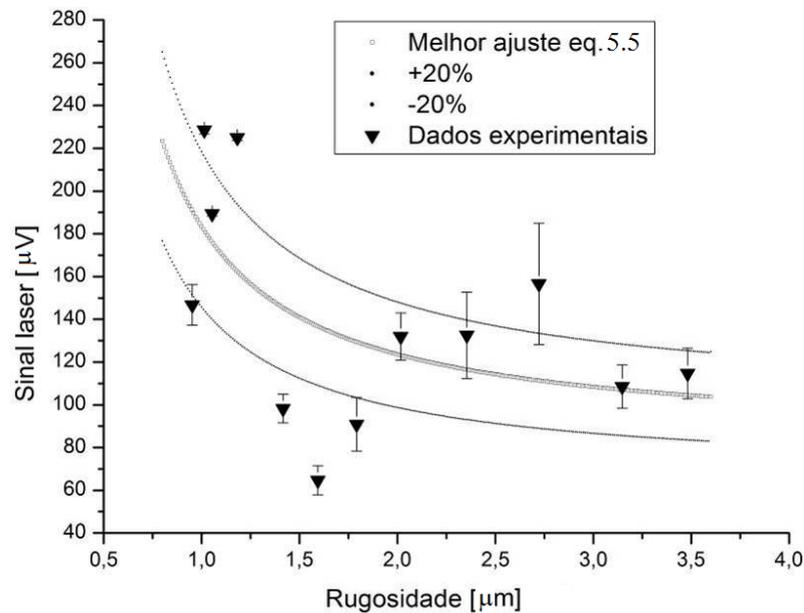


Figura 5.13: Curva de melhor ajuste referente aos pontos da amostra CP4140 (0,07-0,18) com dados experimentais

A partir dos dados práticos, define-se a curva da função (Situação 3) que relaciona a Rugosidade ( $R_a$ ) com o Sinal Laser para um índice de correlação  $R = 57\%$  (Equação 5.6).

$$SL_3 = K_3 \cdot e^{\frac{W_3}{R_a}} \quad (5.6)$$

onde:  $SL_3$  = sinal laser para situação 3.

$$K_3 = 83,3 \pm 22$$

$$W_3 = 0,79 \pm 0,34$$

A correção aconteceu executando a troca dos valores de rugosidade dos pontos experimentais que ficaram distantes mais de 20% pelos valores da previsão teórica de rugosidade de acordo com a Equação 2.2 (Figura 5.14). Acredita-se que ocorreram influências de vibrações, fixação, avanço, raio de ponta, tipo de ferramenta ou isoladamente ou em combinações entre elas [Machado *et al.*, 2008]. De posse desses dados corrigidos, procedeu-se nova busca pela curva que melhor se ajusta aos pontos.

A partir dos dados corrigidos, define-se a nova função (Situação 4) que relaciona a Rugosidade ( $R_a$ ) com o Sinal Laser para um índice de correlação  $R = 63\%$  (Equação 5.7):

$$SL_4 = K_4 \cdot e^{\frac{W_4}{R_a}} \quad (5.7)$$

onde:  $SL_4$  = sinal laser para situação 4.

$$K_4 = 106,3 \pm 15,7$$

$$W_4 = 0,308 \pm 0,104$$

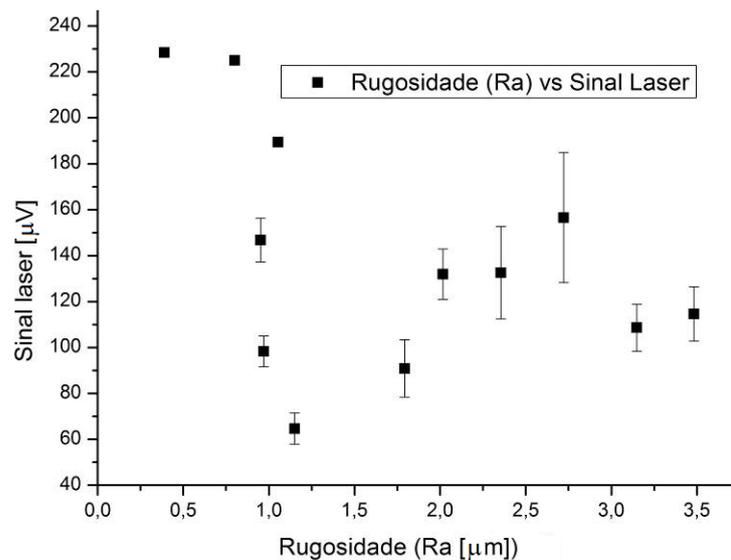


Figura 5.14: Pontos de rugosidade corrigido vs. sinal laser, do CP4140 (0,07-0,18) com três pontos com desvio padrão menor que a marca do ponto

A Figura 5.15 mostra o melhor ajuste da curva da Figura 5.14. Com ele determinou-se a função de transferência  $FT_2$  (Equação 5.8).

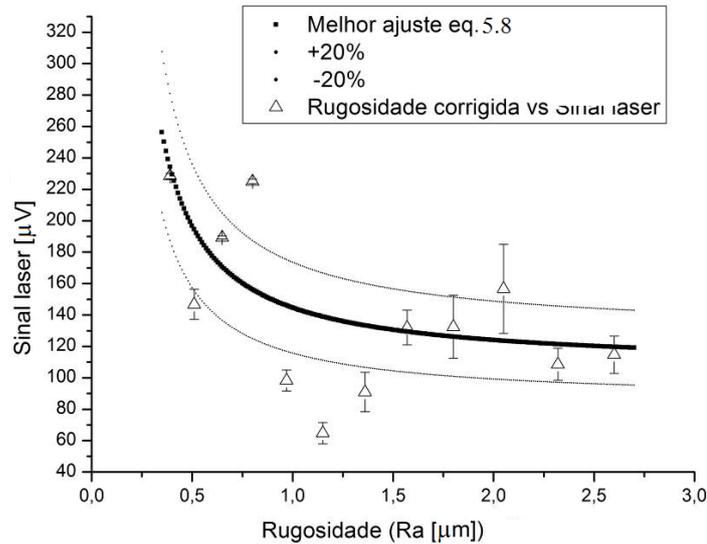


Figura 5.15: Curva  $FT_2$  e pontos da amostra CP4140 (0,07-0,18) com dados da Tabela 5.7

$$R_a = \frac{0,308}{\ln\left(\frac{SL}{106,3}\right)} \quad (5.8)$$

## 5.5 Validação dos Resultados das Funções $FT_1$ e $FT_2$

A Equação 5.7 teve um índice de correlação  $R = 63\%$ , valor abaixo do obtido pela Equação 5.4 ( $R = 80\%$ ), apesar de as condições de fabricação ter sido mais favoráveis à eliminação dos problemas que acompanham o processo como fixação, folgas e vibração. Com este índice baixo, é de se esperar que a capacidade da  $FT_2$  (Equação 5.8) de estimar a rugosidade de superfícies baseada no sinal laser refletido por elas seja deficiente.

Assim foi realizado o cálculo da estimação das rugosidades: primeiramente, com o uso de  $FT_1$  para os dados de sinal laser obtidos com o corpo de prova CP4140 (0,07-0,18) (vide Tabela 5.7); e seguindo a mesma lógica de ajuste dos dados, o uso da  $FT_2$  aos CP1, CP5, CP8, CP23 e CP24 (vide Tabela 5.4) e para o CP4140 (0,07-0,18).

### 5.5.1 Validação de $FT_1$

A Tabela 5.8 mostra os valores reais e estimados com  $FT_1$  para o CP4140 (0,07-0,18). Nota-se que, mesmo considerando uma incerteza nas funções de transferência de 20%, a

função  $FT_1$  obteve acerto em apenas 2 dos 12 pontos ou 16,6%.

Tabela 5.8: Uso das  $FT_1$  para previsão de rugosidades de CP4140(0,07-0,18)

<b>Amostra CP4140</b>	<b>R<sub>a</sub> medido SJ-201 [μm]</b>	<b>R<sub>a</sub> estimado Eq. 5.5 [μm]</b>	<b>Erro [%]</b>
0,07	1,01	0,50	50,7
0,08	0,95	1,00	5,0
0,09	1,05	0,64	39,3
0,10	1,18	0,51	56,9
0,11	1,42	8,82	>100
0,12	1,59	N/A	---
0,13	1,79	N/A	---
0,14	2,02	1,30	35,5
0,15	2,35	1,29	45,2
0,16	2,72	0,87	68,0
0,17	3,15	2,99	5,0
0,18	3,48	2,19	37,1

### 5.5.2 Validação de $FT_2$

A Tabela 5.9 mostra os valores reais e estimados com  $FT_2$  para CP1, CP5, CP8, CP23, CP24. Mesmo considerando uma incerteza nas  $FT$ 's de 20%, observa-se que a função  $FT_2$  obteve acerto em apenas 3 dos 20 pontos ou 15%.

Tabela 5.9: Uso das  $FT_2$  para previsão de rugosidades de CP1, CP5, CP8, CP23, CP24

<b>Amostra</b>	<b>R<sub>a</sub> medido SJ-201 [μm]</b>	<b>R<sub>a</sub> estimado Eq. 5.8 [μm]</b>	<b>Erro [%]</b>
CP01A	0,54	0,43	20,4
CP01B	0,45	1,32	>100
CP01C	0,65	0,57	12,3
CP01D	0,61	0,41	32,8
CP05A	0,59	0,47	20,3
CP05B	0,67	0,23	65,7
CP05C	0,76	0,41	46,1
CP05D	0,84	0,61	27,4
CP08A	1,01	0,51	49,5
CP08B	1,34	0,52	61,2
CP08C	1,63	0,51	68,7
CP08D	2,16	0,97	55,1

<b>Amostra</b>	<b>R<sub>a</sub> medido SJ-201 [μm]</b>	<b>R<sub>a</sub> estimado Eq. 5.8 [μm]</b>	<b>Erro [%]</b>
CP23A	1,21	N/A	---
CP23B	1,16	N/A	---
CP23C	1,61	N/A	---
CP23D	1,59	N/A	---
CP24A	0,92	N/A	---
CP24B	1,04	1,31	26,0
CP24C	1,29	N/A	---
CP24D	1,55	N/A	---

A Tabela 5.10 mostra os valores reais e estimados com  $FT_2$  (Equação 5.8) para o CP4140(0,07-0,18). Pode-se observar que, mesmo considerando uma incerteza nas funções de transferência de 20%, a função  $FT_2$  obteve acerto em apenas 2 dos 12 pontos ou 16,6%.

Tabela 5.10: Uso das  $FT_2$  para previsão de rugosidades de CP4140(0,07-0,18)

<b>Amostra CP4140</b>	<b><math>R_a</math> medido SJ-201 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b><math>R_a</math> estimado Eq. 5.8 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Erro [%]</b>
0,07	1,01	0,37	63,5
0,08	0,95	0,80	16,0
0,09	1,05	0,48	54,5
0,10	1,18	0,38	67,9
0,11	1,42	N/A	---
0,12	1,59	N/A	---
0,13	1,79	N/A	---
0,14	2,02	1,10	45,4
0,15	2,35	1,08	54,1
0,16	2,72	0,68	75,0
0,17	3,15	3,54	12,5
0,18	3,48	2,18	37,4

## 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na revisão bibliográfica (Seção 2.4), os autores afirmaram que conforme acontece aumento da rugosidade de uma superfície ela, gradativamente, proporciona a diminuição da intensidade do sinal laser refletido nela. Nas pesquisas citadas, foi dada ênfase a trabalhos referentes a monitoramento de superfícies que faziam uso de laser em seus dispositivos. Diferentes autores construíram seus equipamentos capazes de prever a rugosidade da superfície com grande precisão. Mas, na grande maioria dos casos, utilizavam dispositivos com câmeras, softwares de análise de imagens, sistemas de ar-comprimido, e sistemas de focalização (tanto do sinal refletido na superfície quanto da incidência do laser) bastante sofisticados. Mesmo assim, no decorrer do estudo, em nenhum momento a bibliografia pesquisada fez menção às dificuldades que foram encontradas.

O estudo realizado (análise da rugosidade em determinada superfície e sua relação com o sinal laser originado da reflexão nesta) dependeu de um sistema de medição laser simplificado montado para isso. Tal sistema mostrou ter sensibilidade capaz de diferenciar pequenas variações de textura que existam na superfície.

Entretanto, sabe-se que em análises de superfícies usinadas, geralmente se dá atenção a características (micro)dimensionais e (micro)geométricas, principalmente quando as peças requerem operações de acabamento. Sabe-se também que o laser pode ocasionar perturbações nos resultados das medições, pois superfícies periódicas podem funcionar como grades (redes) de difração óptica<sup>21</sup>. Contudo, a utilização do laser para este estudo pareceu bastante apropriada, pois a superfície em estudo não apresentaria padrão de irregularidade suficientemente pequeno a ponto de funcionar como uma rede de difração [Palmer, 2005]. Além disso, laser com comprimento de onda  $\lambda = 633$  nm já foi usado por diferentes pesquisadores que já fizeram medições de rugosidade com uso de laser.

Contudo, com base no estudo realizado, é plausível dizer que as rugosidades estudadas proporcionaram dificuldades de ordem física bastante complexas em relação à caracterização de sua superfície. Apesar de o sinal laser nos Testes Iniciais (Seção 5.1) apresentar comportamento dentro do esperado, foi realmente bastante trabalhoso definir funções capazes de prever a rugosidade de superfícies através de reflexão especular simples. No entanto, apesar destas dificuldades, o trabalho prosseguiu com sua proposta inicial.

---

<sup>21</sup> Uma grade de difração é um equipamento geralmente utilizado em óptica constituído de um determinado padrão em sua estrutura. Esta estrutura periódica pode ser composta por pequenas fendas ou ranhuras dispostas umas das outras a uma distância determinada [adaptado de Born e Wolf, 1980].

As principais dificuldades encontradas relacionam-se com a definição de uma função de transferência eficiente e eficaz, e com a relação pouco uniforme entre aumento de rugosidade e diminuição do sinal laser refletido.

Inicialmente, nos primeiros pontos discrepantes, pensava-se que a causa fosse um problema em apenas um CP e a dificuldade se sanaria com a tomada de mais pontos. Durante o prosseguimento, foi ficando claro que havia algum motivo desconhecido que fazia com que os sinais discrepantes acontecessem daquela maneira. Então, em consulta ao orientador, ao pesquisador da área de estudos de superfícies (POLI-USP), ao pesquisador e da área de metrologia (LABMETRO-UFSC) e a pesquisadores do Laboratório Laser (UFRGS), constatou-se que a influência que a superfície causa no feixe de laser parece estar vinculada a estruturas microgeométricas da peça.

Percebeu-se então que alterações microsuperficiais (rebarbas, fatores mecânicos, microtrincas, macrotrincas) geradas por torneamento, com dimensões semelhantes ao comprimento de onda do laser, poderiam estar influenciando nas medidas do sinal laser, sem necessariamente estarem influenciando nas medições realizadas com o rugosímetro (SJ-201).

Considerando que o fator de incerteza é qualquer fator que dá origem a dúvidas no resultado de um processo de medição, iniciou-se então uma busca ao fator que estivesse contribuindo para o sinal discrepante encontrado.

Levantou-se a hipótese de que um dos possíveis motivos para a causa do sinal obtido fosse a interferência do feixe de laser. A diferença de caminho percorrido causado pelas irregularidades da superfície para cada porção do laser pode causar este efeito (Figura 6.1).

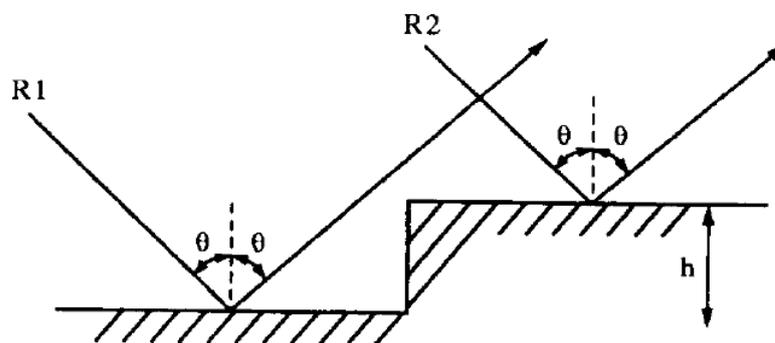


Figura 6.1: Diferença de caminho óptico [Persson, 1996]

Na Figura 6.1 é possível ver como as irregularidades da superfície podem causar a diferença de caminho do feixe de laser. A diferença entre R1 e R2 é dada pela Equação 6.1.

$$\Delta r = 2h \cos \theta \quad (6.1)$$

onde:  $\Delta r$  = diferença de caminho óptico  
 $h$  = altura existente entre as “irregularidades”  
 $\theta$  = ângulo de incidência

A diferença de fase causada pela diferença de caminho é definida pela Equação 6.2.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda} \quad (6.2)$$

onde:  $\Delta\phi$  = diferença de fase  
 $\lambda$  = comprimento de onda da luz incidente

Se na Equação 6.2  $\Delta\phi = \pi$ , então a diferença de fase causa uma interferência destrutiva, e quando isso ocorre, a reflexão se torna difusa, dificultando a detecção especular [Persson, 1996]. E como a literatura corroborou a hipótese, ela foi considerada possível [Persson, 1996 e Thurn e Brodmann, 1986].

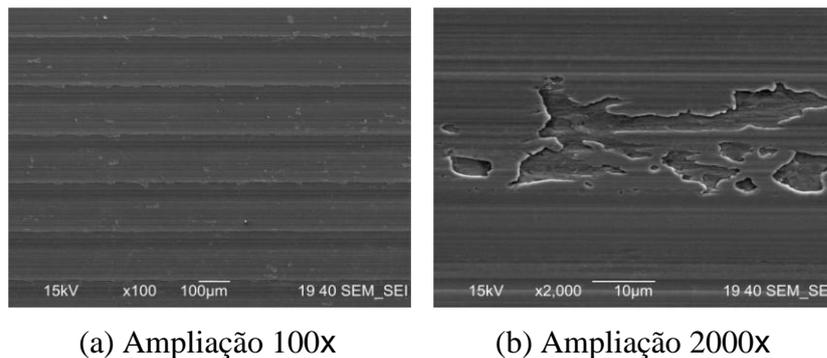
Na investigação ainda levantou-se a possibilidade de que estivesse ocorrendo na superfície um fenômeno chamado “Efeito de Localização de Anderson” (ELA). Este efeito aplica-se a estruturas tridimensionais que tem um grande número de partículas microscópicas dispostas desordenadamente em sua estrutura. ELA é capaz de fazer com que a luz incidente sobre o corpo não tenha seu espalhamento (e/ou atenuação) ocorrendo de maneira tradicional, mas sim como se ele aumentasse sua refletividade em função da interação mútua da luz com grande número das partículas dispersas no corpo [Anderson, 1958]. Outros trabalhos relatam a existência deste efeito em superfícies que contém grande número de irregularidades (também microscópicas) dispostas de forma irregular [Wiersma *et al.*, 1995; Chabé *et al.*, 2008]. Assim, ocasionado por irregularidades na superfície, o ELA é capaz de causar efeito contrário ao descrito anteriormente. Neste caso, ele pode ocasionar interferências construtivas fazendo com que a reflexão – que deveria ser difusa e resultar em um pequeno sinal captado no detector – tenha a intensidade aumentada. Assim, o efeito se manifesta como se ocorresse uma redução do coeficiente de difusão aumentando a refletividade [Wiersma *et al.*, 1995].

A fim de comprovar a existência de irregularidades microscópicas nas superfícies dos corpos de prova, realizou-se análise da superfície com uso do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Marca JEOL/EO modelo Jib-450 (Figura 6.2). Diversas fotos em MEV foram feitas, e invariavelmente as amostras apresentavam estruturas semelhantes. Foram escolhidas apenas as que melhor caracterizariam as superfícies analisadas como um todo.



Figura 6.2: Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL/EO modelo Jib-450

A Figura 6.3a mostra a superfície usinada (amostra CP8D) por ferramenta convencional com magnificação de 100x onde se pode notar a existência das ranhuras deixadas pela ferramenta de corte. Na Figura 6.3b com 2000x de aumento podem ser vistas estrias “dentro” do sulco deixado pelo raio de ponta da ferramenta e “dentro” da distância de avanço; vê-se também microranhuras e microestruturas formando buracos disformes que podem funcionar como centros espalhadores de luz, tanto como pontos de interferência destrutiva como ocasionar interferências destrutivas e também ELA.



(a) Ampliação 100x

(b) Ampliação 2000x

Figura 6.3: Imagem feita em MEV da superfície da amostra CP8D: (a) estrias com espaçamento igual ao avanço, (b) estriamento muito menor que o avanço

A Figura 6.4 nos mostra a superfície da amostra CP5B com a sequência de magnificação utilizada. O maior aumento (2000x) deixa claro que as estruturas de rugosidade das superfícies podem ocasionar os processos descritos acima, como as interferências: destrutiva e ELA. Também se podem ver rebarbas, fatores mecânicos (trincas por temperatura), microtrincas, recristalizações (fatores metalúrgicos).



existência de ELA. Provavelmente seja resultado da usinagem e não de alguma manipulação, i.e., incrustação ou depósito de material estranho, pois os “pontos brancos” apresentam-se uniformemente distribuídos, e se fossem resultado de processo posterior à usinagem não teriam esta distribuição, além de terem ocorrido em outras amostras (o que não aconteceu).

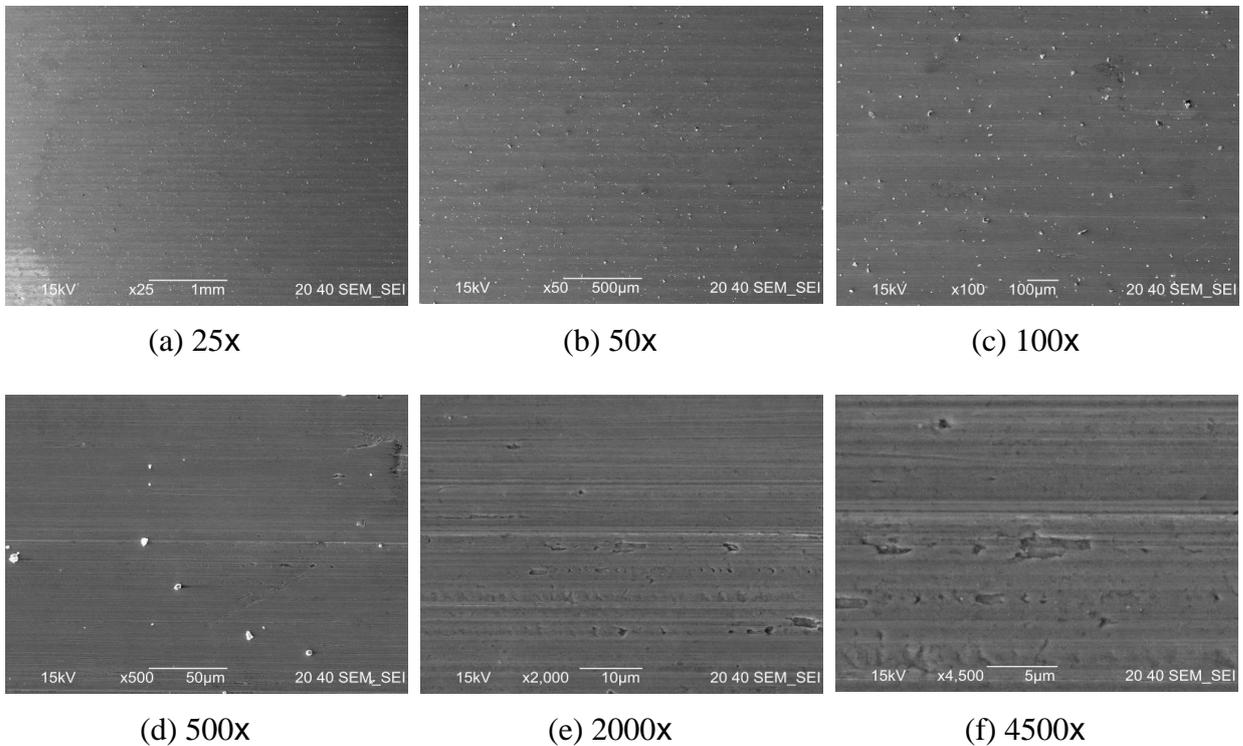


Figura 6.6: Imagem MEV da superfície da amostra CP1B com detalhe para as estruturas esferoidais: (a) 25x; (b) 50x; (c) 100x; (d) 500 x; (e) 2000x; (f) 4500x

Como existem várias fontes capazes de, individualmente ou em grupo, causarem os efeitos de sinal anômalo constatado nas medidas, fica-se impossibilitado de determinar qual (ou quais) efeito(s) tem maior resultado sobre o sinal. Assim, a fonte de incerteza é muito difícil de ser determinada, e é admissível inferir sobre todas as fontes de incerteza a dificuldade de se obter um sinal refletido bem comportado.

A Figura 6.7 mostra microsulcos na ferramenta. Este desgaste na ferramenta pode, com certeza, resultar em sulcos na peça, como os vistos na Figura 6.3b. Além disso, existem vários sulcos em distância capaz de gerar um efeito de grade de difração. Grzesik e Zalisz, 2008, mostram que acontecem formações de arestas postiças na ferramenta de corte com aproximadamente 500 nm (dimensões próximas de  $\lambda = 633$  nm utilizado). Isso pode ocasionar diminuição da qualidade do corte e ocasionando micro sulcos na superfície e fazer com que a superfície transforme-se em uma grade de difração que tem efeito não nulo no feixe laser refletido. A constatação matemática pode ser vista na análise da Equação 6.3 [Palmer, 2005].

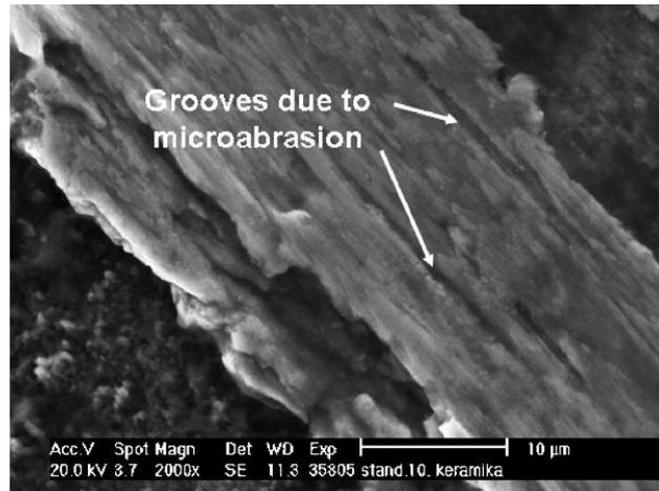


Figura 6.7: No detalhe do desgaste em ferramenta de corte, distantes um do outro aproximadamente 10  $\mu\text{m}$  [Grzesik e Zalisz, 2008].

$$\theta_m = \text{sen}^{-1} \left( \frac{m\lambda}{d} - \text{sen } \theta_i \right) \quad (6.3)$$

onde:  $\theta_m$  = ângulo onde ocorre o máximo de interferência da grade;  
 $m$  = ordem de difração da grade;  
 $d$  = espaçamento existente entre as fendas (ou padrões) da grade;  
 $\theta_i$  = ângulo de incidência da luz na grade.

Tomando como exemplo a imagem de Figura 6.7 e presumindo que aconteça algum tipo de efeito de grade na superfície da amostra e utilizando os dados da imagem (com menor espaçamento entre as ranhuras) de todo o trabalho para mensurar isto, tem-se que:

- $m = 1 \Rightarrow$  primeira ordem de difração referente à localização onde aconteceria o primeiro máximo de difração causado pela grade;
  - $d = 10 \mu\text{m} \Rightarrow$  distância entre as ranhuras;
  - $\lambda = 633 \text{ nm} \Rightarrow$  comprimento de onda incidente nos corpos de prova;
  - $\theta_i = 0 \Rightarrow$  ângulo de incidência do laser na superfície;
- $\therefore \theta_m = 3,62^\circ$ .

Isso mostra que a difração, provocada pelo efeito de grade das ranhuras da usinagem, aconteceria de fato. A fonte de incerteza dominante é indeterminada, i.e., se deve ou a uma particularidade bem definida ou a dificuldade de quantificar separadamente a ação simultânea e combinada de várias fontes de incerteza.

## 7 CONCLUSÕES

Tendo em vista a bibliografia consultada que relata a real necessidade de medições de rugosidade mais rápidas, entende-se que o objetivo do trabalho é bastante relevante. Contudo, durante a realização da pesquisa, notou-se que a dificuldade de realizar medições de rugosidade baseando-se em reflexão laser é bastante grande quando apenas se considera a intensidade do sinal refletido na direção normal.

As dificuldades apresentaram-se na fase de tomada de dados, onde efetivamente o sinal refletido do laser foi captado. Isto aconteceu, pois nos trabalhos da literatura revisada a respeito de medições de rugosidade com laser, em nenhum momento foi mencionado que estas dificuldades se apresentaram em suas pesquisas.

Os resultados apresentaram duas tentativas de se encontrar uma função de transferência (FT) que correspondesse uma intensidade do sinal laser  $SL$  [ $\mu V$ ] à rugosidade média  $R_a$  [ $\mu m$ ] gerada por torneamento. Testes comparativos das duas FTs foram feitos. Os resultados de  $R_a$  estimados por  $FT_1$  e  $FT_2$  mostraram que é necessário (como o fizeram os pesquisadores consultados) maior detalhamento na análise de  $SL$  e não somente o registro da intensidade. Contudo, em função de a proposta de dissertação ser específica para o estudo de uma metodologia, não se deu continuidade à concepção de tais dispositivos que possibilitassem uma análise mais detalhada (verificando a imagem *speckle* da amostra). No entanto, procurou-se encontrar motivos pelos quais  $FT_1$  e  $FT_2$  obtiveram resultados discrepantes para os valores estimados em relação aos medidos com o rugosímetro SJ-201.

Os prováveis impedimentos foram o Efeito de Localização de Anderson (ELA) e interferências. Por haver grandes dificuldades em separar os efeitos de cada um dos possíveis impedimentos, atrelou-se o sinal discrepante aos efeitos em conjunto. Tais interferências possivelmente foram causadas por certas peculiaridades na superfície e comprovadas pelas imagens obtidas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura. Nestas imagens veem-se trincas, fendas e buracos gerados pela usinagem, e cada um desses problemas na superfície pode ser causador dos efeitos citados. Contudo, não há como separar os efeitos ELA das interferências, pois não se tem conhecimento de qual deveria ser o sinal laser exato para tais superfícies.

Então, para a completa implementação de dispositivo semelhante, seria necessário seu aprimoramento, no sentido do dispositivo ser capaz de realizar análise mais completa do sinal laser refletido. Seja com uso de detectores que montem uma imagem capaz de analisar *speckle*, seja com detectores que analisem o sinal em ângulo tomando apenas a intensidade, certamente é importante o aprimoramento do sistema atual.

## 7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- **Inspeção de qualidade relativa de superfícies.** Para determinada ferramenta de corte com parâmetros conhecidos pode-se determinar o sinal laser esperado e fazer comparação com a superfície que está sendo usinada.
- **Determinação de vida de ferramenta de corte.** Determinar o fim de vida através de monitoramento do sinal laser, i.e., quando o sinal sofrer variação brusca é indicativo de alguma anomalia no sistema.
- **Monitoramento de falha em ferramenta de corte.** A falha pode, também, ser determinada a partir de variação brusca no sinal laser, isso é indicativo de anomalia no sistema.
- **Determinação de rugosidade com laser com sistema automatizado.** Tomando quantidade maior de pontos com auxílio de placa de aquisição e controle laser.
- **Determinação de rugosidade com a implementação de análise de *speckle*.**

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT-NBR4287; 2002; **“Especificações Geométricas do Produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, Definições e Parâmetros da Rugosidade”**, 18p.

ABNT-NBR5891; 1977; **“Regras de Arredondamento na Numeração Decimal”**, 1 p.

ABNT-NBR8404; 1984; **“Indicação do Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos”**, 10 p.

Anderson. P.W.; 1958; **“Absence of Diffusion in Certain Random Lattices”**; Physical Review Letters, Vol. 109, No. 5, pp. 1492-1505.

Akkus H., Asilturk I.; 2011; **“Predicting Surface Roughness of AISI 4140 Steel in Hard Turning Process through Artificial Neural Network, Fuzzy Logic and Regression Model”**; Scientific Research and Essays; Vol. 6, No 13, pp. 2729-2736.

Benardos, P. G.; Vosniakos, G. C.; 2003; **“Predicting Surface Roughness In Machining: A Review”**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 43, No.8, pp. 833–844.

Born, M; Wolf, E; 1980; **“Principles of Optics”**. 6.ed., Oxford: Pergamon Press, 854p.

Byrne, G.; Dornfeld, D.; Inasaki, I.; Ketteler, G.; König, W.; Teti, R.; 1995. **“Tool Condition Monitoring – The Status of Research and Industrial Application”**. Keynote Papers. Annals of the CIRP, Vol. 44, No.2, pp. 541-567.

Clarke, G. M.; Thomas, T. R.; 1979; **“Roughness Measurement with a Laser Scanning Analyzer”**, Wear, Vol. 57, No. 1, pp. 107-116.

Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L.; 2003; **“Tecnologia da Usinagem dos Materiais”**; Artliber, São Paulo, 249 p.

Dhanasekar, B.; Mohan, N. K.; Bhaduri, B.; Ramamoorthy, B.; 2008; **“Evaluation of Surface Roughness Based on Monochromatic Speckle Correlation Using Image Processing”**, Precision Engineering, Vol. 32, No. 3, pp. 196–206.

Durakbasa, M.N.; Osanna P.H. ; Demircioglu P.; 2011; **“The Factors Affecting Surface Roughness Measurements of the Machined Flat and Spherical Surface Structures – The geometry and the precision of the Surface”**; Measurement, Vol. 44, pp.1986–1999.

DIN 4760; 1982-06. **“Form Deviations; Concepts; Classification System”**. Deutsches Institut für Normung, DIN Standard, 2p.

Geier M.; Mello, M. S.; Souza. A. J.; 2010; **“Comparação entre as Ferramentas Wiper e Standard no Torneamento de Acabamento para Aços Baixo Carbono e Baixa Liga”**; Anais Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação; COBEF.

Gao, W.; Aoki, J.; Ju, B.; Kiyono, S.; 2007; “**Surface Profile Measurement of a Sinusoidal Grid Using an Atomic Force Microscope on a Diamond Turning Machine**”; Precision Engineering, Vol. 31, pp.304–309.

Goch, G.; Peters, J.; Lehmann, P.; Liu, H.; 1999; “**Requirements for the Application of Speckle Correlation Techniques to On-Line Inspection of Surface Roughness**”, Annals of the CIRP, Vol. 48, No. 1, pp. 467-470.

Gonçalves Jr., A. A.; Sousa, A. R.; 2008; “**Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**”; Manole, Barueri, SP; 407p.

Grzesik, W.; Zalisz, Z.; 2008; “**Wear Phenomenon in the Hard Steel Machining Using Ceramic Tools**”. Tribology International, Vol. 41, pp. 802–812.

Heitmann, D.; Permien, V.; 1977; “**Determination of Surface Roughness From Light Scattering Measurements**”; Optics Communications, Vol. 23, number 1, pp 131-134.

Hessainia, Z; Belbah A.; Yallese M. A.; Mabrouki T.; Rigal J. F.; “**On the Prediction of Surface Roughness in the Hard Turning**”, Measurements, Vol. 46, No 5, pp. 1671–1681.

Jang, D. Y.; Watkins, T. R.; Kozaczek K. J., Hubbard C. R., Cavin O. B.; 1996; “**Surface Residual Stresses in Machined Austenitic Stainless Steel**”. Wear, v.194, pp.168-173.

Kalpakjian, S. e Schmid, S.R.; 2010; “**Manufacturing Engineering and Technology**”, 6.ed., Person Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1176 p.

Kiely, A. B.; Lettieri, T. R.; Vorburger, T. V.; 1992. “**A Model of an Optical Roughness-Measuring Instrument**”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 32, No.1–2, pp. 33–35.

Kima, H. Y.; Shenb, Y. F.; Ahna, J. H.; 2002. “**Development of a Surface Roughness Measurement System Using Reflected Laser Beam**”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 130–131, pp. 662–667.

Klocke, F.; 2011. “**Manufacturing Processes 1: Cutting**”, RWTH Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 522 p.

Kovács, B. P.; Sipos S.; Czifra Á.; 2012; “**Interpretation of ‘ $R_z=4 \times R_a$ ’ and their roughness parameters in the evaluation of machined surfaces**”; 13<sup>th</sup> International Conference on Tools, Proceedings, pp 237-244.

Lalwani D.I., Mehta N.K., Jain P.K., 2008; “**Experimental Investigations of Cutting Parameters Influence on Cutting Forces and Surface Roughness in Finish Hard Turning of MDN250 Steel**”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 206, No 1–3, pp. 167–179.

Leger, D.; Perrin, J. C.; 1976. “**Real-Time Measurement of Surface Roughness by Correlation of Speckle Patterns**”. Journal of the Optical Society of America, Vol. 66, No. 11, pp. 1210–1217.

Lu, C.; 2008. “**Study on Prediction of Surface Quality in Machining Process**”, Journal of Materials Processing Technology Vol. 205, No. 1-3, pp. 439–450.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B.; 2009; “**Teoria da Usinagem dos Materiais**”, São Paulo: Edgard Blücher, 384p.

Mattsson, L.; Wagberg, P.; 1993. “**Assessment of Surface Finish on Bulk Scattering Materials a Comparison Between Optical Laser Stylus and Mechanical Stylus Profilometers**”, Precision Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 141–149.

Mello, M. S. ; Souza, A. J. ; Geier, M.; 2012; “**Determinação Empírica dos Parâmetros de Rugosidade Ra e Rt Aplicando Ferramenta Alisadora no Torneamento de Acabamento a Seco do aço AISI 4140**”; 7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luís - MA. Anais do VII CONEM (CD-ROM).

Mesquita, N. G. M., 1992; “**Avaliação e Escolha de uma Superfície Segundo sua Função e Fabricação**”, Florianópolis, SC, 142 p., Tese (Doutorado), POSMEC, UFSC.

Montgomery, D. C.; Peck, E. A.; Vining, G. G.; 2010; “**Introduction to Linear Regression Analysis**”, Wiley-India Edition, 3ed., 641p.

Moy, C. K.S.; Bocciarelli, M.; Ringer, S. P.; Ranzi, G.; 2011; “**Identification of the Material Properties of Al 2024 Alloy by Means of Inverse Analysis and Indentation Tests**”, Materials Science and Engineering A, Vol. 529, pp.119–130.

Najafi, B.; Hakim, H.; 1992; “**A Comparative Study of Non-Parametric Spectral Estimators for Application in Machine Vibration Analysis**”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 6, No. 6, pp. 551–574.

Natarajan, C; Muthu, S; Karuppuswamy, P; 2011; “**Investigation of cutting parameters of surface roughness for a non-ferrous material using artificial neural network in CNC turnin.**”; Journal of Mechanical Engineering Research, Vol. 3(1), pp. 1-14.

Palmer, C.; 2005; “**Diffraction Grating Handbook**”; Newport Corporation, sexta edição, 265p.

Osanna, P. H.; Durakbasa, N. M.; Vagszegi, I. G.; 1988; “**Laser Optical Roughness Measurement**”, Measurement, Vol. 6, No.1, pp. 33–36.

Paiva, Jr., Muramatsu, M., 2004; “**Desenvolvimento de um Rugosímetro a Laser**”, Revista de Física Aplicada e Instrumentação, Vol. 17, No 2, pp. 60-69.

Persson, U.; 2006. “**Surface Roughness Measurement on Machined Surfaces Using Angular Speckle Correlation**”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 180, No. 1-3, pp. 233–238.

Rehorn, A. G.; Jiang, J.; Orban, P. E.; 2005. “**State-of-the-art Methods and Results in Tool Condition Monitoring: A Review**”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 26, No. 7-8, pp. 693–710.

Rosa, L. C.; 2011. “**Acabamento de Superfícies, Rugosidade Superficial**” – Engenharia de Controle e Automação - UNESP.

Sandvik, 2009; “**Manual Técnico de Usinagem**”, Sandvik Coromant, São Paulo, 600p.

Selvan, M.S., Radhakrishnan V., 1973; “**Influence of side-flow and built-up edge on the roughness and hardness of the surface machined with a single point tool**”; *Wear*, Vol. 26, No 3, pp. 393–403.

Scofield, J. H.; “**A Frequency-Domain Description of a Lock-in Amplifier**”; *American Journal of Physics*, Vol 62 (2), pp.129-133.

Sherrington, I.; Smith, H.; 1988a. “**Modern Measurement Techniques in Surface Metrology, Part I: Stylus Instruments, Electron Microscopy and Non-Optical Comparators**”, *Wear*, Vol. 125, No. 3, pp 271–288.

Sherrington, I.; Smith, H.; 1988b. “**Modern Measurement Techniques in Surface Metrology, Part II: Optical Instruments**”, *Wear*, Vol. 125, No.3, pp 289 – 308.

Shiraishi, M.; 1989. “**Scope of In-Process Measurement, Monitoring and Control Techniques in Machining Processes Part 2: In-Process Techniques for Workpieces**”, *Precision Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp 27–37.

Silva, W.P. e Silva; 2011; C.M.D.P.S., “**LAB Fit Curve Fitting Software (Nonlinear Regression and Treatment of Data Program)**”; V 7.2.48, Software livre disponível na Internet, Acesso em: 10/03/2012.

Souza, A. J; 2011; “**Processos de Fabricação por usinagem, Parte I: Fundamentos de usinagem dos materiais**”; GPFAl, DEMEC, UFRGS, Apostila, 98p.

Tay, C. J.; Wang, S. H.; Quan, C.; Shang, H. M.; 2003. “**In Situ Surface Roughness Measurement Using a Laser Scattering Method**”, *Optics Communications*, Vol. 218, No. 1-3, pp. 1–10.

Think, 2013; “**About Lock-in Amplifiers, Applications #3**”; Disponível em <http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ApplicationNotes/AboutLIAs.pdf>, Acesso em: 01/05/2013.

Thurn, G.; Brodmann, R.; 1986; “**Roughness Measurement of Ground, Turned and Shot-Peened Surfaces by the Light Scattering Method**”, *Wear*, Vol. 109, No.1-4, pp.1–13.

Valliant, J. G.; Foley, M. P.; Bennett, J. M.; 2000. “**Instrument for On-Line Monitoring of Surface Roughness of Machined Surfaces**”, *Optical Engineering*, Vol. 39, No. 12, pp. 3247-3254.

Wang, S.; Tian, Y.; Tay, C. J.; Quan, C.; 2003. “**Development of a Laser-Scattering-Based Probe for On-Line Measurement of Surface Roughness**”, *Applied Optics*, Vol. 42, No. 7, pp. 1318-1324.

Wang, W.; Wong, P. L.; Luo, J. B.; Zhang, Z.; 1998. “**A New Optical Technique for Roughness Measurement on Moving Surface**”, *Tribology International*, Vol. 31, No. 5, pp. 281–287.

Weckenmann, A.; Jiang, X.; Sommer, K. D.; Neuschaefer-Rube, U.; Seewig, J.; Shaw, L.; Estler, T.; 2009. “**Multisensor Data Fusion in Dimensional Metrology**”, *Manufacturing Technology*, Vol. 58, No. 2, pp. 701–721.

Westberg, J.; 1967. “**Development of Objective Methods for Judging the Quality of Ground and Polished Surfaces in Production**”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, IMECHE Conference Proceedings*, Vol. 182, No. 11, pp. 260-273.

Whitehouse, D.J.; 1994; “**Handbook of Surface Metrology**”. IOP Publishing Ltd, London, pp. 988.

Wiersma, D. S.; Albada, M. P. van; Tiggelen, Bart A. van; Lagendijk, A.; 1995; “**Experimental Evidence for Recurrent Multiple Scattering Events of Light in Disordered Media**”; *Physical Review Letters*, Vol. 74, No. 21, pp. 4193-4197.

Wiersma, D. S.; Bartolini, P.; Lagendijk, A.; Righini, R.;1997; “**Localization of light in a Disordered Medium**”; *Letters to Nature, Nature*, Vol. 390, pp. 18-25.

Wolfson, R, 1991; “**The Lock-in Amplifier: a Student Experiment**”, *American Journal of Physics*, Vol, 59, No 6, pp. 569-572.

Yanagi, K.; Maeda, T.; Tsukada, T.; 1986. “**A Practical Method of Optical Measurement for the Minute Surface Roughness of Cylindrical Machined Parts**”, *Wear*, Vol. 209, No.1-4, pp. 57–61.

Yim, D. Y.; Kim, S. W.; 1990. “**Optical Roughness Measurement of Ground Surfaces by Light Scattering**”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 30, No.2, pp. 283–289.

Yim, D. Y.; Kim, S. W.; 1994. “**Light Scattering Patterns of Simulated Engineering Surfaces when the Surfaces Have a Sinusoidal Waviness**”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.34, No. 1, pp.33–41.