CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ESTUDO EXPERIMENTAL DA AFERIÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL POR ULTRASSOM

Luis Bráulio Mendes Martins

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientador:
Maurício Saldanha Motta, D.Sc.

Rio de Janeiro
Junho 2016

ESTUDO EXPERIMENTAL DA AFERIÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL POR ULTRASSOM

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Luis Bráulio Mendes Martins

Aprovada por:

_____

Prof. Maurício Saldanha Motta, D.Sc.

_____

Prof. Silvio Romero de Barros, D.Sc.

_____

Prof. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, D.Sc.

Rio de Janeiro

Junho de 2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M386 Martins, Luís Bráulio Mendes
Estudo experimental da aferição da rugosidade superficial por ultrassom / Luís Bráulio Mendes Martins.—2016.
xi, 50f. + anexos : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2016.
Bibliografia : f. 48-50
Orientador : Maurício Saldanha Motta

1. Ultrassom. 2. Tecnologia de materiais. 3. Aspereza de superfície. 4. Testes não-destrutivos. 5. Engenharia mecânica. I. Motta, Maurício Saldanha (Orient.). II. Título.

CDD 620.11274

Agradecimentos.

Agradeço sempre a Deus por me dar força constante que me fez prosseguir nos momentos difíceis deste caminho.
Agradeço também a minha namorada Giselle Rodrigues de Oliveira, por compartilhar os momentos de alegrias e tristezas durante o mestrado. Pela companhia e pelo carinho, dedico este trabalho a você. A meu pai, Sr. Luis Mendes Martins pelo amor que o tenho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca pelo apoio e pela oportunidade de ter conseguido realizar o mestrado.

Agradeço ao meu orientador o Dr. Maurício Saldanha Motta por fornecer as ferramentas teóricas e experimentais e o apoio profissional e emocional, que me mantiveram no caminho do aprendizado e da execução deste trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Materiais do Mestrado, em particular ao professor Dr. Silvio de Barros pela atenção e presteza.

Ao professor Sidney Taylor pelo excelente apoio ao conhecimento.

“A evolução do homem passa, necessariamente, pela busca do conhecimento.”

Sun Tzu

RESUMO

ESTUDO EXPERIMENTAL DA AFERIÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL POR ULTRASSOM

Luis Bráulio Mendes Martins

Orientador:

Maurício Saldanha Motta

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET-RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

A rugosidade é considerada um parâmetro de difícil determinação prática e ao mesmo tempo de grande importância, pois ela é uma chave fundamental para uma boa classificação superficial. Na colagem de peças metálicas, a rugosidade dos substratos tem influência direta na qualidade da junta. O principal objetivo deste estudo foi avaliar o uso do método ultrassônico por uma técnica pulso-eco para investigar a rugosidade superficial de substratos. A literatura indica que o método ultrassônico pode ser correlacionado com os parâmetros de rugosidade tradicionais. O trabalho realizado consiste na análise e interpretação dos resultados obtidos a partir de amostras do mesmo material com diferentes níveis de rugosidade, placas de aço A-36 foram usadas com diferentes tratamentos mecânicos. Os resultados mostraram que a técnica usada é capaz de identificar os diferentes níveis de rugosidade. Uma comparação dos resultados de rugosidade obtida por essa técnica e aqueles obtidos através de um rugosímetro foi feita e mostrou resultados satisfatórios.

Palavras- chave:

Ultrassom; Rugosidade superficial; END

Rio de Janeiro

Junho de 2016

Abstract

EXPERIMENTAL STUDY OF ROUGHNESS MEASUREMENT BY ULTRASOUND

Luis Bráulio Mendes Martins

Advisor:

Maurício Saldanha Motta

Abstract of dissertation submitted to programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suchow da Fonseca, CEFET/RJ, as partial fulfillment of the requeriments for the degree of Master in Mechanical Engineering and Materials Technology.

The roughness is considered a parameter difficult to determine practice at the same time has great importance, because it is a fundamental key to a good surface classification. For bonding metal parts, the roughness of the substrate has a direct influence on joint quality. The aim of this study was to evaluate the use of ultrasonic method by a pulse-echo technique to investigate the surface roughness of substrates. Literature already proposes a surface roughness parameter connected to the ultrasonic method, which can be correlated with traditional roughness parameters. The work performed is in the analysis and interpretation of results obtained from samples of the same material with different levels of roughness, the steel plates A-36 were used with different mechanical treatments. The results showed that the technique used is capable of identifying the different levels of roughness. A comparison of surface roughness results obtained by this technique and those obtained by a surface roughness tester was taken and showed satisfactory results.

Keywords:

Ultrasonic; Surface roughness; NDT

Rio de Janeiro

Junho 2016

Sumário

I. Introdução 1
II. Revisão Bibliográfica. 2
II.1. Teoria da Rugosidade 2
II.2. Parâmetros de Rugosidade mais usados. 5
II.3. Ensaio por ultrassom 7
II.4. Ensaios por ultrassom para determinar a rugosidade 7
II.5. Método pulso-eco ultrassônico 8
II.6. Medição da textura superficial com o uso do ultrassom 9
II.7. Aspectos teóricos da medição da rugosidade por ultrassom 9
II.8. Estudo do efeito da textura superficial em sinais ultrassônicos 10
II.9. Dispersão de velocidade na propagação de ondas de Rayleigh em superfícies rugosas 11
II.10. Atenuação da reflexão produzida pela rugosidade superficial e a transmissão 15
II.11. Analise dos ângulos de incidência de feixe ultrassônico em uma superfície 19
II.12. Transformada da Fourier 22
III. Procedimento Experimental 23
III.1. Preparação do corpo de prova 23
III.2. Experimento ultrassônico 24
IV. Resultados 28
IV.1. Análise de Estatística 28
V. Análise dos Resultados 33
VI. Conclusões 44
VII. Sugestões 45
Anexo 1 - Tabela de distribuição de ANOVA – Folha 1 de 2. 50
Anexo 1 - Tabela de distribuição de ANOVA – Folha 2 de 2. 51
Anexo 2 - Manual do rugosimetro mecânico – Folha 1 de 2. 52
Anexo 2 - Manual do rugosimetro mecânico – Folha 2 de 2. 53
Anexo 3 - Perfil tridimensional de uma superfície com tratamento jateamento G-40. 54
Anexo 4 - Perfil tridimensional de uma superfície com tratamento jateamento por areia. 55

Lista de Figuras

Figura II.1 Representação da textura de superfície. 3
(DIN 4760, 1982). 3
Figura II.2 Representação esquemática das características de uma superfície 4
(ASME B.46.1, 1992). 4
Figura II.3 Representação das amplitudes de picos e vales no perfil de rugosidade. Fonte
(NBR ISO 4287, 2002). 5
Figura II.4. Ilustração do parâmetro de rugosidade Ra, adaptação 6
(FACCIO, 2002). 6
Figura II.5 Amplitudes de deslocamentos relativos, em função da profundidade, para uma onda
de Rayleigh. (SINCLAIR, 1970). 12
Figura II.6 Distribuição normalizada do fluxo de energia com a profundidade. 13
(SINCLAIR, 1970). 13
Figura II.7 Razão entre as velocidades da onda de Rayleigh para uma superfície rugosa e para
uma superfície lisa. (SINCLAIR, 1970). 15
Figura II.8 Razão atenuação induzida pela superfície rugosa, por diferentes fases de
modulação 1- Gausiana, 2- Simpson, 3- triangular, 4- senoidal, 5- retangular. 18
(NAGY, 1987). 18
Figura II.9 Razão entre as velocidades da onda de Rayleigh para uma superfície 20
rugosa e para uma superfície lisa. 20
(SUNG JUN OH, 1996). 20
Figura III.1 Jateamento abrasivo G-40 e areia e o rugosímetro mecânico Mitutoyo. 23
Figura III.2 Corpos de provas utilizados no experimento da esquerda para direita, sem
tratamento, com jateamento G-40 e jateamento por Areia. 24
Figura III.3 Aparelho pulso/receptor modelo 5073PR. 25
Figura III.4 Aparelho pulso/receptor modelo 5073PR. 25
Figura III.5 Sapata de sílica pura fabricada para o experimento.(Padrão). 25
Figura III.6 Perfil esquemático do experimento. 26
Figura III.7 Gráfico e tabela, dados obtidos com o uso do software. 26
Figura III.8 modulação dos sinais. 27
Figura IV.1 curva de distribuição F. 30
Figura IV.2 curva de distribuição F. 31
Figura V.1. Gráfico gerado para a sílica (Padrão). 33
Figura V.2 Gráfico para o corpo de prova sem tratamento superficial para análise (E). 33
Figura V.3 Gráfico para o corpo de prova sem tratamento superficial para análise (E/P). 34
Figura V.4 Gráfico para o corpo de prova com tratamento superficial jateamento G-40 para
análise (E). 34
Figura V.5 Gráfico para o corpo de prova com tratamento superficial jateamento G-40 para
análise (E/P). 35
Figura V.6 Gráfico para o corpo de prova com tratamento superficial jateamento por areia para
análise (E). 35
Figura V.7 Gráfico para o corpo de prova com tratamento superficial jateamento por areia para
análise (E/P). 36
Figura V.8 Analise da amplitude comparando o uso do padrão. 37
Figura V.9 Analise do comportamento da frequência com o aumento da rugosidade sem dividir
pelo padrão e dividido pelo padrão. 38
Figura V.10 Análise do comportamento de todos os dados de amplitudes. 39
Figura V.11 Análise do comportamento de todos os dados de frequência. 40
Fonte: Douglas C. Montgomery e George C. Runger. 50
Fonte: Douglas C. Montgomery e George C. Runger. 51
Fonte: Manual do rugosímetro tesa technology 52

Fonte: Manual do rugosímetro tesa technology 53

Lista de tabelas.

Tabela III.1 Valores de Rugosidades. 24
Tabela IV.1 Resultados obtidos durante o experimento para a amplitude da análise (M)..... 30
Tabela IV.2 Resultados obtidos durante o experimento para a frequência para análise (M). ... 31
Tabela V.1 Resultados obtidos para a Amplitude. 39
Tabela V.2 Resultados obtidos para a Frequência. 40
Tabela V.3 Resultados gerais obtidos..... 41
Tabela V.4 Resultados obtidos pela comparação do rugosímetro mecânico e o ultrassônico. . 42

I. Introdução

Ensaios não destrutivos (END) é qualquer tipo de ensaio praticado a um material onde não ocorra alteração de forma permanente nas suas propriedades físicas, química, mecânica ou dimensionais, ou seja, o mesmo implicará um dano imperceptível ou nulo. (CARTZ, L, 1995).

Segundo GARCIA (2000) END representa um conjunto amplo de técnicas de análise utilizadas na ciência e na indústria para avaliar as propriedades de um material, um componente ou sistema, sem causar danos, baseando-se na aplicação de fenômenos físicos como, por exemplo, ondas acústicas, elasticidade, capilaridade, e qualquer tipo de teste que não implique dano considerável à amostra examinada. São técnicas que permitem que a peça testada continue em perfeito estado após a inspeção.

O teste por ultrassom é um método comum de ensaio não destrutivo, que é baseado em ondas de ultrassom para detecção interna de defeitos em materiais ou para medição de espessura de paredes. Um exemplo de aplicação da técnica é a aferição da espessura em peças industriais em que os instrumentos foram aperfeiçoados de modo a fazer a coleta de dados com maior facilidade. A principal finalidade do ensaio é a detecção de descontinuidades internas em materiais metálicos e não metálicos, através da introdução de um feixe sônico que é refletido por esta descontinuidade. As técnicas derivadas do uso do ultrassom são utilizadas em diversas áreas, destacando-se na área de saúde e ensaios não destrutivos.

Historicamente os ensaios ultrassônicos tem amplo uso na medicina, porém na indústria mecânica não tem utilização tão corrente para medição de rugosidade.

A motivação deste estudo dá-se nas questões relacionadas à medição da rugosidade com métodos não convencionais, para o desenvolvimento de técnicas ultrassônicas na aferição da rugosidade superficial de materiais metálicos e da necessidade da indústria nos casos em que não existe possibilidade de medição pelo rugosímetro convencional.

II. Revisão Bibliográfica.

Preliminarmente, é necessário esclarecer que a rugosidade ou o perfil linear de uma superfície, é geralmente representado em escala de ampliação distinta para as direções vertical e horizontal. Isto ocorre devido necessidade de se evidenciar as mudanças no perfil na direção perpendicular a superfície (FACCIO, 2002).

A medição de rugosidade necessita de um cuidado especial, visto que, em muitos casos, ela é relevada em beneficio de outras grandezas envolvidas. A rugosidade, ou os parâmetros que são adotados para desempenhá-la, tem sido em muitos casos uma caracterização incompleta do perfil ou da superfície que se deseja analisar.

Os parâmetros de rugosidade são valores numéricos oriundos de integrações de perfis amostrais de superfície. Dessa forma, são representações que estão sujeitas a vários erros tanto de medição como de interpretação. Entretanto, sua praticidade é enorme, uma vez que possibilita a disposição de vários valores numéricos para comparar e analisar as superfícies, seja com o objetivo de resumir várias informações existentes em uma superfície tridimensional, ou até para fazer a separação e a classificação de superfícies distintas, originadas por diversos processos de fabricação.

II.1. Teoria da Rugosidade

A rugosidade sendo definida como a variação de relevo de uma área superficial, são irregularidades, pequenas saliências e reentrâncias na superfície, sendo inserida no processo de fabricação da peça ou danificada com o passar do tempo devido ao desgaste ou por intempérie entre elas a corrosão.

Segundo FOROUZBAKHSH (2008) não existem superfícies totalmente lisas, essas possuem algum grau de rugosidade, mesmo que seja apenas em níveis atômicos. Para as superfícies feitas pelo homem, a rugosidade decorre do processo de fabricação que pode envolver diversos tipos, dentre eles: a deposição química, polimento, erosão ou várias outras técnicas comumente usadas. O correto funcionamento de um componente fabricado em grande parte é diretamente dependente do seu grau de rugosidade.

Considerada de forma negativa, na verdade a rugosidade é extremamente importante para indústria mecânica, principalmente em peças de aço para possibilitar superfície de atrito, essencial para aderência de revestimentos industriais, por exemplo, no processo de colagem. Sendo de grande importância quantificar o grau de rugosidade de uma superfície.

A quantificação dessas irregularidades superficiais pode ir de uma natureza macroscópica até microscópica, sendo decomposta em erro de forma, ondulações e rugosidade. A desigualdade entre erro de forma, ondulações e rugosidade é baseada no comprimento de onda da superfície analisada ou no espalhamento entre picos. (DE MARÉ et al., 1997).

Devido à complexidade associada à caracterização e avaliação da estrutura superficial, é necessário compreender os desvios gerados pelos processos de fabricação e os sistemas de medição existentes para quantificá-los. Entretanto, este último aspecto requer o conhecimento do mecanismo de aquisição de perfis e as condições de operação em função do objetivo de caracterização da superfície. Atualmente esses aspectos são definidos por referências específicas de fornecedores e por normas internacionais.

A norma alemã (DIN 4760, 1982) classifica a superfície em seis classes e as irregularidades de erro de forma, ondulação e rugosidade são designadas como de primeiro até sexto grau de acordo com o perfil. De acordo com a Figura II.1 abaixo.

Graus de desvio de forma (representação exagerada de seção de perfil)	Exemplos	Causas possíveis
1º grau: desvio de forma 	Desvio de prumo, arredondamento	Deflexão da peça ou da máquina durante a fabricação da peça, defeito ou desgaste nas guias da máquina-ferramenta.
2º grau: ondulações 	Ondas	Vibrações da máquina, deformação ou desvio da fresadora durante a fabricação da peça.
3º grau: rugosidade 	Entalhes ranhuras	Geometria da ferramenta de corte, avanço ou profundidade da ferramenta durante a fabricação da peça.
4º grau: rugosidade 	Sulcos, estrias, escamas, amassados	Processo de formação de cavacos (p. ex., por rasgo), deformação da superfície por raios durante a fabricação da peça.
5º e 6º graus: rugosidade Não podem ser representadas como uma seção de perfil simples	Textura, estrutura de treliça	Processo de cristalização, mudanças na estrutura por solda, transformações a quente ou efeitos de produtos químicos, p. ex., corrosão, decapagem.

Figura II.1 Representação da textura de superfície.
(DIN 4760, 1982).

Analisando de acordo com a Figura II.1, a separação dos elementos superficiais que constitui o perfil medido. A sobreposição das classes da variação de forma apresentada esquematicamente como superfície pode ser constituída de fatores que separadamente caracterizam a medição como rugosidade e ondulação. Ainda observando a figura é possível relacionar os processos no qual a superfície foi obtida pelas marcas deixadas na peça com cada classe de variação de forma.

Uma superfície pode ser definida como contorno que separa um objeto de outro objeto, substância ou espaço. A medição de uma superfície é conhecida como perfil total ou superfície efetiva (NBR ISO, 4287, 2002). Este perfil geralmente é apresentado no sistema de coordenadas.

No entanto, medições topográficas podem ser realizadas, a partir de sucessivas ligações bidimensionais ou uma diretamente tridimensional (ASME B 46.1, 1992). A partir dos perfis medidos podem ser realizadas caracterizações de elementos superficiais específicos. Para

tanto, os mesmo são submetidos a uma metodologia de filtragem que permitem minimizar ou enfatizar características específicas da superfície analisada. Neste caso, um novo perfil é formado e sendo denominado de perfil filtrado. (ISO 3274, 1996).

De acordo com a Figura II.2, que se apresentam, de forma esquemática, os componentes básicos de um perfil. Além da rugosidade e da ondulação, outros elementos de uma superfície são ilustrado como erro de forma, os defeitos e a direção predominante na superfície.

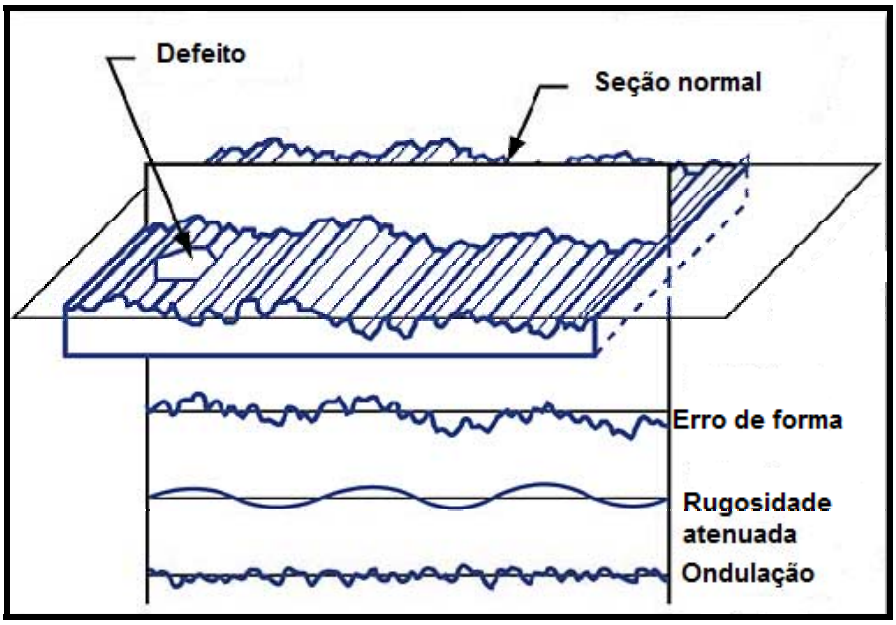


Figura II.2 Representação esquemática das características de uma superfície (ASME B.46.1, 1992).

De acordo com (SCHEES at al.,1998), um perfil de superfície é constituído de uma faixa de irregularidades com variadas oscilações ou frequências. Aquelas oscilações de alta frequência ou de ondas curtas são denominadas de rugosidade. As ondulações de baixa frequência e ondas longas são denominadas de ondulações.

O problema significativo da determinação dessas irregularidades está na identificação inicial. O limite entre rugosidade e ondulação é discutível, dependendo do processo de fabricação ou da aplicação da peça. Uma solução para esse inconveniente é a determinação da amplitude do comprimento de amostragem, para especificar numericamente o comprimento da frequência de onda acima ou abaixo do qual, uma das componentes de superfície (rugosidade ou ondulação) é eliminada.

De acordo com a (NBR 8404, 1984), o perfil de rugosidade ou de ondulação é constituído de dois elementos básicos, denominados de picos (porção superior) e vales (porção inferior). Na Figura II.3 têm-se, esquematicamente, os elementos de um perfil de rugosidade. Nesta

figura as cotas de altura Z_p e Z_v referem-se aos picos e aos vales em função de uma linha média, respectivamente.

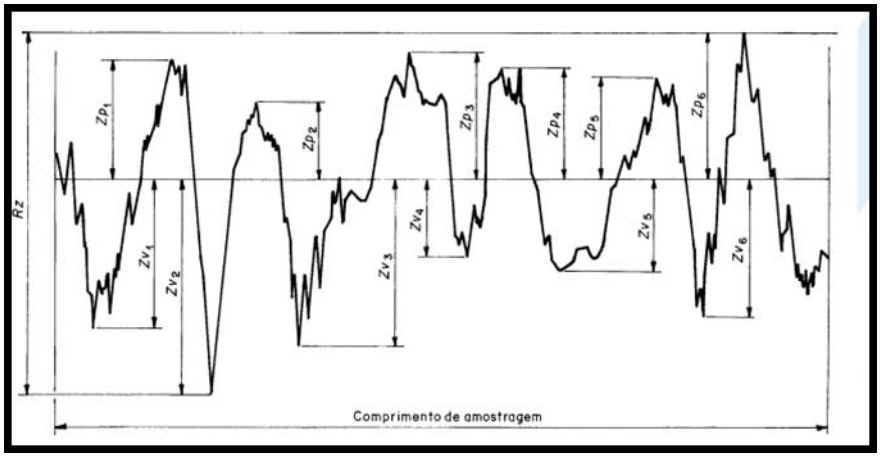


Figura II.3 Representação das amplitudes de picos e vales no perfil de rugosidade. Fonte (NBR ISO 4287, 2002).

A determinação de Z_p e Z_v depende necessariamente da definição da região de interface entre picos e vales e do comprimento de amostragem.

A escolha do instrumento adequado para uma medição de textura superficial pode ser baseada em informações contidas em normas técnicas. Conforme a norma (ASME B 46.1:2002), basicamente existem três grupos de instrumentos de medição de textura superficial, que são:

- Instrumentos com capacidade limitada de parâmetros;
- Instrumentos com capacidade limite de perfil;
- Instrumentos somente com parâmetros.

II.2. Parâmetros de Rugosidade mais usados.

Os principais parâmetros topográficos utilizados para definir a superfície podem ser classificados conforme segue abaixo:

O primeiro padrão desenvolvido foi o parâmetro (Ra) é calculado a partir da média aritmética dos desvios do perfil tomando como referência a linha média e é definido sobre um comprimento de amostragem l.

A rugosidade média, matematicamente, pode ser expressa pela equação abaixo:

$$R_a = \frac{1}{L}\int_0^l |\, y(x)\,|\, dx \qquad \text{(II.1)}$$

A figura abaixo ilustra este parâmetro.

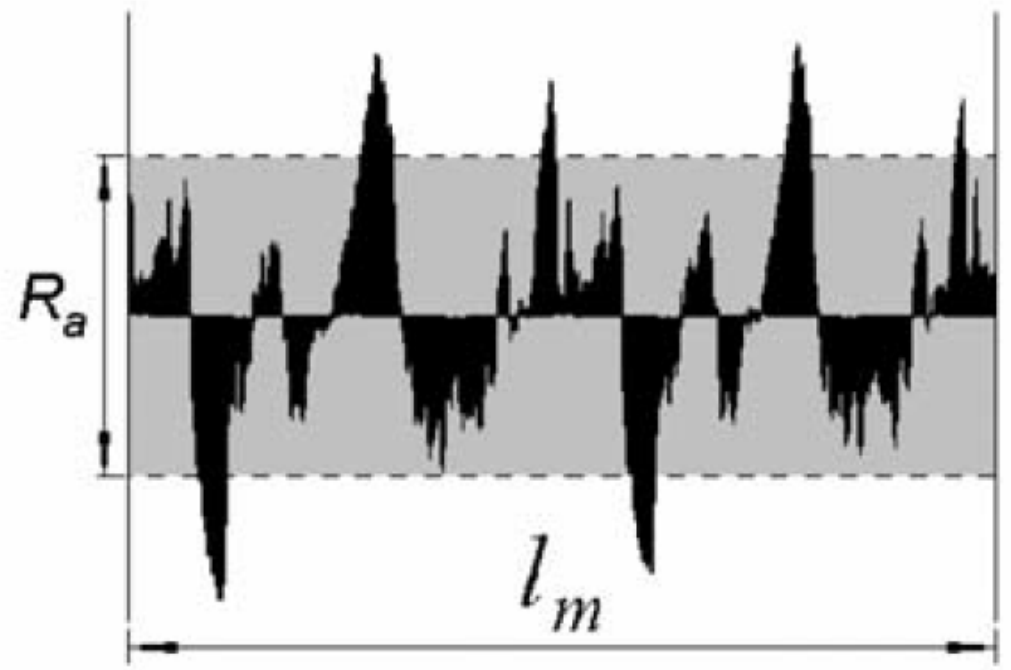


Figura II.4. Ilustração do parâmetro de rugosidade Ra, adaptação (FACCIO, 2002).

O parâmetro R_q em muitos aspectos semelhantes ao R_a. É definido como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil em relação à linha média em um comprimento l de avaliação.

A equação que define esta rugosidade quadrática média segue abaixo:

$$R_q = \frac{1}{L}\int_0^l |\, y^2(x)\,|\, dx \qquad \text{(II.2)}$$

O parâmetro R_t define a altura de um pico a um vale no comprimento de avaliação de perfil, isto é a amplitude máxima entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação.

II.3. Ensaio por ultrassom

O fator econômico é o principal motivo da utilização do ultrassom na indústria, uma vez que essa técnica possui baixos custos operacionais, sendo a maior dificuldade a necessidade de treinamento do operador. Os equipamentos portáteis permitem a realização de ensaios em campo muita vezes sem a necessidade da retirada da peça. É possível com o uso da inspeção por ultrassom, prever as condições de um material durante o processo de produção, evitando os custos das etapas finais de fabricação de uma peça defeituosa.

Neste estudo foi utilizado um método experimental onde foram correlacionados valores numéricos de rugosidade superficial, com sinais ultrassônicos, basicamente ensaio ultrassônico sendo classificado por ensaio não destrutível, que consiste em um feixe sônico de alta frequência (acima de 20000 Hz), que é inserido no material a ser inspecionado por meio de um transdutor conectado ao aparelho com o intuito de verificar parâmetros superficiais. O som que atravessa o material é refletido pelas interfaces e, identificado pelo transdutor.

O ultrassom é utilizado largamente como ferramenta de controle de qualidade na indústria de manufaturado, a superfície deve estar dentro de certos limites de rugosidade. Por conseguinte, a medição da rugosidade superficial é vital para o controle do processo de qualidade da peça ou componente. (FOROUZBAKHSH, 2008).

O ultrassom permite ainda, numa fase mais avançada, a aquisição de dados sobre as propriedades mecânicas, físicas e químicas de um material (TITTMANN, 1978). Durante sua propagação a onda ultrassônica carrega consigo informações sobre o material inspecionado através da variação da velocidade sônica e da atenuação.

II.4. Ensaios por ultrassom para determinar a rugosidade

Antes da 1° guerra mundial, o uso do sonar para encontrar objetos no fundo do mar inspirou estudiosos a aplicar o conceito de ultrassom em diagnósticos médicos (NDT RESOURCE CENTER, 2015).

No momento atual, segundo a literatura SUNG JUN OH (1994), a rugosidade superficial tem sido usada por muitos anos como forma de expressar ou examinar a qualidade superficial na indústria manufatureira. Através de uma prática industrial padrão, perfil bidimensional de superfície são medidos utilizando um rugosímetro de contato e, os dados obtidos são processados para obter os parâmetros padrões de rugosidade. Para melhoria da medição, um conjun-

to específico de corte para separar ondulação de rugosidade, tem sido definido e utilizado na avaliação de parâmetros de rugosidade superficial. No entanto, a grande inconveniência em utilizar o rugosímetro é a dificuldade em atividades de linha de produção. A maioria das inspeções em linha de produção usando rugosímetro mecânico de contato é realizada através de amostragem pré-determinadas, realizadas pelo recolhimento de amostras em intervalos pré-determinados, removendo-a do processo produtivo. O processo de inspeção sempre necessita de atendimento humano, devido custo e tempo elevado, com a utilização do rugosímetro, a inspeção de todas as amostras é, portanto inviável, devido ao alto grau de dificuldade associado ao processo. Com o objetivo de contornar essas dificuldades, muitos métodos de medição de rugosidade sem a presença do contato foram desenvolvidos, mas poucos têm sido colocados em uso em ambiente fabril, devido ao custo elevado de instrumentos e a falta de interesse dos responsáveis. A técnica sem contato oferece algumas vantagens em comparação com o rugosímetro de contato:

- Ausência de danos superficiais;
- Velocidade de análise relativamente maior.

Segundo a literatura SUNG JUN OH (1994), as maiorias das técnicas ópticas, no entanto, são ainda limitadas à aplicação em laboratório, devido à dificuldade de adaptação nas condições severas de ambiente fabril e, também ao elevado custo de construção de um sistema de medição.

A técnica ultrassônica para medição de uma superfície rugosa é pouco relatada em estudos, apesar da ampla utilização da técnica em outras áreas de END.

II.5. Método pulso-eco ultrassônico

No método pulso-eco, impulsos curtos são produzidos por um transdutor e introduzidos no material em intervalos regulares de tempo. Quando um sinal encontra uma superfície refletora (qualquer defeito ou descontinuidade, como trincas e interface) parte ou toda sua energia é refletida. A direção do feixe refletido depende da orientação da superfície refletora e do ângulo de incidência.

II.6. Medição da textura superficial com o uso do ultrassom

A rugosidade da textura superficial é de difícil quantificação, por inúmeras razões, os parâmetros usados na medição convencional por contato, como a linha central média (CLA) ou RMS, pode ser válida apenas para um tipo ou faixas de rugosidade, tais como as encontradas em componentes usinados. Estas medições são dependentes da direção na qual a rugosidade é medida.

De acordo com GUANARAHNE (2001) em situações em que a superfície a ser avaliada é aleatória, especificações de uma rugosidade absoluta, numa dada direção, por métodos convencionais, pode ser significativo, no entanto, a técnica ultrassônica pode ser muito útil e mais adequada neste caso, uma vez que pode dar um “efeito bruto” com base no grau e na natureza do som espalhado, produzido por picos e vales da superfície.

Existem relatos, na literatura, que a técnica ultrassônica é uma ferramenta útil para avaliar os parâmetros característicos de uma superfície rugosa. Por conseguinte, a equação (II.1) abaixo representa para a expressão geral que estabelece a influência da rugosidade, com o coeficiente de reflexão especular R, com uma dada frequência F e com um ângulo de incidência normal.

$$R = R_0 . \exp . \left(\frac{-8\pi^2 R^2{}_q F^2}{C^2} \right) \qquad \text{(II.3)}$$

Onde:

R_0 = coeficiente de reflexão numa superfície lisa.

C = velocidade do som num fluido imerso.

R_q = Root mean square, parâmetro de rugosidade, definida por convenção de medida.

II.7. Aspectos teóricos da medição da rugosidade por ultrassom

Segundo BILLY (1986) a atenuação de ondas acústicas de superfície em uma superfície rugosa aumenta com o crescimento da rugosidade e da frequência sendo proporcional aos parâmetros estatísticos de uma superfície rugosa.

Para GERALDO (1992) o espalhamento ultrassônico é o principal fator de medição da rugosidade superficial utilizando a modelagem de OGILVY no qual se define que há dois principais métodos quantitativos de medição de rugosidade: que são: o tempo de voo da onda e o decréscimo da amplitude da onda refletida pela superfície rugosa.

Segundo CHIANG (1993) o espalhamento ultrassônico em uma superfície rugosa é dividido em parcelas de ondas difusas e coerentes, para superfícies com maiores níveis de rugosidades a difusão se apresenta em todas as direções. O espectro do campo espalhado é mais

largo que o campo refletido especular, cuja largura espectral é a mesma do campo incidente, este fenômeno esta associado ao espalhamento do sinal refletido pela rugosidade superficial.

A superfície refletora pode ser considerada, como sendo um transmissor de ondas incidentes. Parte do feixe incidente é refletida de volta ao transdutor e parte, transmitida, para o material, de acordo com a impedância acústica, entre os dois meios. Podemos-nos supor que a área efetiva do refletor, numa distância próxima, é equivalente a de um disco com o mesmo raio do transdutor.

Uma reflexão pode ser considerada, como uma projeção, de um plano refletor, com as áreas, elementares projetadas, por uma superfície média.

II.8. Estudo do efeito da textura superficial em sinais ultrassônicos

De acordo com GUANARAHNE (2001), considere um transdutor ultrassônico, de banda larga, com um ângulo de incidência normal (90°). O transdutor emite pulsos curtos ultrassônicos e, pulso refletido pelo alvo (superfície) sendo recebido pelo mesmo transdutor. O espectro de frequência e o sinal recebido podem ser calculados com auxílio de um computador, de maneira rápida, pela transformada de Fourier, através da multiplicação da frequência, pelo componente de reflexão $\left(R / R_q\right)$. Pode-se obter a relação, para cada componente de frequência, com a respectiva superfície lisa, pela equação abaixo:

$$\left|m(rugosidade\ )\right| = \left|m(lisa)\right|.\exp\left(\frac{-8\pi^2 St^2 fi^2}{C^2}\right) \qquad \text{(II.4)}$$

Onde:

$m(rug)$ = componente de frequência rugoso.

$m(lis)$ = componente de frequência liso.

St = coeficiente de textura.

fi = frequência.

C = velocidade do som no meio.

Segundo GUANARAHNE (2001) os efeitos da rugosidade superficial sobre a medição, para superfícies semelhantes, independem do tipo de material, possuem o mesmo efeito de medição, sendo desenvolvida para auxiliar na caracterização de estruturas cristalinas, examinando condições superficiais, tais como encontradas em depósitos de minerais, em tubulação de Petróleo.

II.9. Dispersão de velocidade na propagação de ondas de Rayleigh em superfícies rugosas

De acordo com SINCLAIR (1970) poucas pesquisas têm sido conduzidas acerca dos efeitos da rugosidade na propagação de ondas de superfície. O autor entende que a velocidade da onda de Rayleigh é afetada pela aderência de partículas a uma superfície, entretanto, pesquisas recentes mostram que ondas de superfície podem ser guiadas por depósitos de filmes finos sobre um substrato e que a velocidade é afetada pela presença de filme, levando em consideração propagação em uma superfície livre onde as dimensões da rugosidade são pequenas em comparação ao comprimento de onda.

Para a propagação de ondas de Rayleigh em uma superfície livre onde as dimensões de rugosidade são pequenas em relação ao comprimento de onda, são feitas as seguintes suposições:

- Uma superfície rugosa pode ser tratada como uma superfície lisa com um depósito adicional de massa.
- Os efeitos elásticos das irregularidades são desprezíveis.
- As amplitudes de deslocamento relativo (em função da profundidade) são poucas afetadas pela adição de massa.

As amplitudes de deslocamento relativo típicas para uma onda de Rayleigh, em função da profundidade abaixo da superfície, são mostradas na figura II.4 abaixo. A superfície encontra-se no plano x_1, x_2 e a direção de propagação é x_1. Como a energia associada à propagação da onda é proporcional ao quadrado da amplitude, a distribuição do fluxo de energia (com a profundidade) para uma onda de Rayleigh é proporcional à soma dos quadrados das amplitudes de deslocamento relativos nas direções x_1 e x_3.

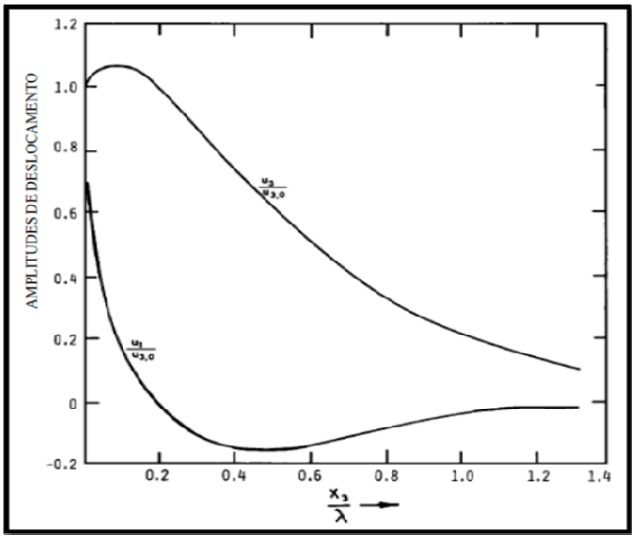


Figura II.5 Amplitudes de deslocamentos relativos, em função da profundidade, para uma onda de Rayleigh. (SINCLAIR, 1970).

Um exemplo é mostrado na Figura II.4 em forma normalizada, como função de x_3 / λ, onde λ é o comprimento de onda. De fato, a função mostrada é dada por:

$$F\left(\frac{x_3}{\lambda}\right) = \frac{\left(\mu_1 / \mu_{30}\right)^2 + \left(\mu_3 / \mu_{30}\right)^2}{\left(\mu_{10} / \mu_{30}\right)^2 + \left(\mu_{30} / \mu_{30}\right)^2} = \frac{{\mu_1}^2 + {\mu_3}^2}{{\mu_{10}}^2 + {\mu_{30}}^2} \tag{II.5}$$

Onde μ_1 e μ_3 são amplitudes de deslocamento nas direções x_1 e x_3, respectivamente, e μ_{10} e μ_{30} são os valores de μ_1 e μ_3 em $x_3 = 0$. O fluxo de energia total de uma onda em uma superfície lisa é proporcional a:

$$\int_0^\infty F\left(\frac{x_3}{\lambda}\right) d\left(\frac{x_3}{\lambda}\right) \tag{II.6}$$

Se um incremento de material $d\left(x_1 / \lambda\right) d\left(x_2 / \lambda\right)$ for considerado, a taxa do fluxo de energia será dada por:

$$E_1 = A\rho d\left(\frac{x_1}{\lambda}\right) d\left(\frac{x_2}{\lambda}\right) \int_0^\infty F\left(\frac{x_3}{\lambda}\right) d\left(\frac{x_2}{\lambda}\right) \tag{II.7}$$

Onde A é uma constante associada ao material e à frequência e ρ é a densidade. Se agora adicionarmos massa à superfície (irregularidades), a taxa do fluxo de energia para essa massa extra será dada por:

$$E_2 = \mathrm{A}\rho \frac{\nu}{\lambda^3}\lambda^2 d\left(\frac{x_1}{\lambda}\right)d\left(\frac{x_2}{\lambda}\right)F\left(\frac{x_3}{\lambda}\right), \text{ em } x_3 = 0, \tag{II.8}$$

Onde ν é o volume de irregularidade por unidade de área e $\left(\nu/\lambda^3\right)\lambda^2$ é o volume de irregularidade em unidades cúbicas de comprimento de onda, para uma área de um comprimento de onda quadrado. Como $F\left(x_3/\lambda\right)=1$ em $x_3 = 0$, então:

$$E_2 = \mathrm{A}\rho \frac{\nu}{\lambda} d\left(\frac{x_1}{\lambda}\right)d\left(\frac{x_3}{\lambda}\right) \tag{II.9}$$

Para uma superfície rugosa, a taxa de energia (E) é a soma de E_1 e E_2; portanto,

$$E_2 = \mathrm{A}\rho d\left(\frac{x_1}{\lambda}\right)d\left(\frac{x_3}{\lambda}\right)\left(B + \frac{\nu}{\lambda}\right), \tag{II.10}$$

$$B = \int_0^\infty F\left(\frac{x_3}{\lambda}\right)d\left(\frac{x_3}{\lambda}\right) \tag{II.11}$$

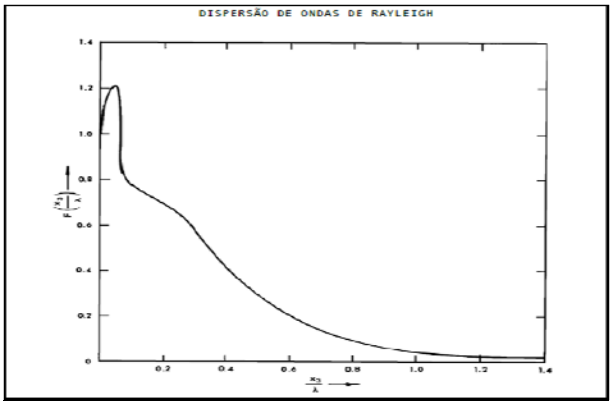


Figura II.6 Distribuição normalizada do fluxo de energia com a profundidade. (SINCLAIR, 1970).

De acordo com SINCLAIR (1970) a superfície rugosa em um sólido de densidade ρ pode ser considerada equivalente a uma superfície lisa sobre uma substância de densidade ρ'. Logo, ρ' é a densidade efetiva do sólido quando se tratam de ondas de superfície, neste caso,

$$E = \mathrm{A}\rho' d\left(\frac{x_1}{\lambda}\right) d\left(\frac{x_3}{\lambda}\right)\mathrm{B} \tag{II.12}$$

Das equações 8 e 9, temos:

$$\sigma\left(B + \frac{V}{\lambda}\right) = \rho' B. \tag{II.13}$$

Para constantes elásticas conhecidas, a velocidade da onda de Rayleigh (C_R) é proporcional à velocidade de cisalhamento e, assim:

$$C_R = R\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{II.14}$$

Onde R é a constante de proporcionalidade μ é o módulo de rigidez. Sendo C_R' a velocidade para uma superfície rugosa, então, das equações II.11 e II.12.

$$\frac{C_R'}{C_R} = \left(\frac{\rho}{\rho'}\right)^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{B}{B + \left(\frac{V}{\lambda}\right)}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{II.15}$$

Se fizermos a substituição $\frac{1}{\lambda} = \frac{n}{C_R'}$, onde n é a frequência, a eq. II.14 poderá ser reescrita na forma:

$$C_R^{\,2} - C_R'^{\,2} = \nu n / B \tag{II.16}$$

Da equação II.14 com $V / \lambda << B$, ou da equação II.13 com $C_R - C_R'$ valores muito pequeno, tal que C_R' é aproximadamente C_R, pode-se obter a equação II.15 abaixo:

$$\frac{\Delta C_R}{C_R} \approx \frac{1}{2B}\frac{V}{\lambda'} \qquad \text{(II.17)}$$

Onde

$$\Delta C_R = C_R - C_R'$$

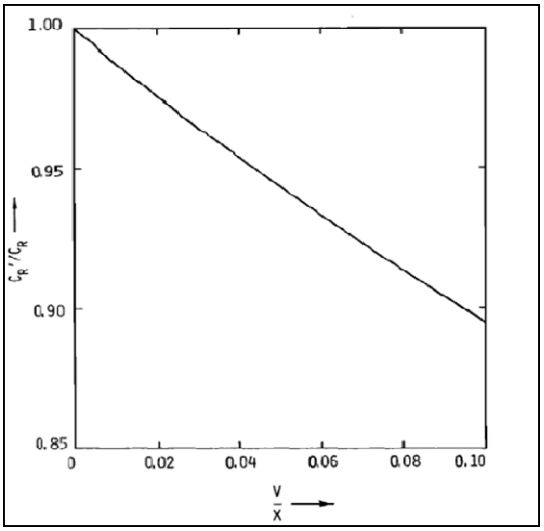


Figura II.7 Razão entre as velocidades da onda de Rayleigh para uma superfície rugosa e para uma superfície lisa. (SINCLAIR, 1970).

A figura II.6 mostra C_R'/C_R em função de V/λ; esses valores foram obtidos pela equação II.15 para B = 0,40, nesta equação mostra uma relação linear entre $\Delta C_R/C_R$ e V/λ para pequenos valores de V/λ. Para rugosidade de superfície de uma determinada geometria, $V = C.h$, onde h é a altura e C é uma constante, tal que $V/\lambda = C(h/\lambda)$. Isto demonstra a importância de superfície lisa para ondas de Rayleigh de pequenos comprimentos de onda e sugere um critério de rugosidade de V/λ para a propagação de ondas de superfície, o que está de acordo com o critério usualmente aceito de (h/λ).

II.10. Atenuação da reflexão produzida pela rugosidade superficial e a transmissão

Segundo NAGY (1987) o feixe incidente é dividido em dois componentes: componente transmitido e componente refratado. Para uma correlação com os resultados experimentais, a onda transmitida é atenuada de maneira similar a refletida, e essas atenuações são de forma independente da frequência para os casos de baixos valores de rugosidade superficial.

A análise da interação da onda acústica, com a rugosidade aleatória (superfície não orientada), separado por dois diferentes meios possui grande dificuldade, sendo esta dificuldade

em função da complexidade dos campos gerados: uma única onda incidente pode produzir tanto ondas longitudinais e de cisalhamento, em ambos os meios, quanto ondas de Rayleigh ao longo da interface. Naturalmente, todas estas ondas terão diferentes níveis de difusão dependentes da rugosidade superficial. Praticamente, todos os trabalhos teóricos e experimentais deste assunto, em relação a componente refletida, ou seja, o retorno da energia acústica possui mais informações do que a componente transmitida, isto é, o campo disperso no segundo meio, normalmente contém apenas uma parte insignificante da energia incidente, o que torna de fundamental importância, sempre que se analisa uma superfície rugosa, estudar criteriosamente a componente refletida.

Na transmissão de um feixe ultrassônico, alinhado, através de uma interface plana, com ângulo de incidência normal (90°), com rugosidade aleatória, posicionado no plano, $Z = 0$, de um sistema de coordenadas x, y, z.

A interface rugosa, considerando geometricamente plana, sobre a área A é:

$$\iint_A h(x, y)dxdy = 0 \tag{II.18}$$

A qualidade da superfície é caracterizada por um único parâmetro eficaz de rugosidade conforme equação abaixo:

$$h = rms \tag{II.19}$$

$$h^2 = \frac{1}{A}\iint_A h^2(x, y)dxdy \tag{II.20}$$

De acordo com NAGY (1987) o efeito da rugosidade superficial é considerado como uma fraca perturbação de um plano de onda conhecido que envolve os mesmos índices de refração de uma superfície lisa. Esta aproximação está limitada a superfície com baixos valores de rugosidades, quando h é pequeno em comparação com o comprimento de onda, tanto acusticamente e o comprimento de correlação com a rugosidade, ou seja, a média da curvatura da superfície é pequena.

Sem a presença de rugosidade superficial, os campos refletidos e transmitidos seriam simples propagação de feixe plano em sentidos opostos.

Sendo R_0 e T_0 coeficientes de reflexão e transmissão, bem conhecidos para incidência normal, em uma interface plana lisa.

Conforme NAGY (1987) na presença de rugosidade superficial, tanto as ondas refletidas e transmitidas tornam-se campos complexos espalhados. O interesse na reflexão de plano

modificado e transmissão de plano modificados, com os coeficientes R e T, então se deve ignorar completamente, os chamados componentes incoerentes dos campos espalhados e basear os cálculos simplesmente com a redução de força, de o componente especular espalhado, de modo coerente. Sabe-se que a energia incidente é dividida em componentes refletida e transmitida, do mesmo modo, no caso de uma superfície plana e lisa, esses componentes são indicados por $\Phi R(x,y)$ e $\Phi T(x,y)$, modulações de fase aleatória, respectivamente.

A atenuação das fases de ondas resultantes pode ser diretamente representada pelo campo especular perturbado, com a frequência angular. O espectro de onda coerente é dado por:

$$E = \frac{E_0}{E}\iint_A e^{i\Phi(x,y)}dxdy \tag{II.21}$$

Onde E_0 é a amplitude do campo complexo, sem perturbação e sem rugosidade e $\Phi(x,y)$ é a modulação de fase aleatória, devido à rugosidade da superfície.

De acordo com a aproximação de fase, com a perturbação, a superfície rugosa age como uma fina placa de fase.

As modulações de fase induzida pela rugosidade superficial podem ser facilmente expressas por $h(x,y)$:

$$\Phi r(x,y) = -2h(x,y)K_1 \tag{II.22}$$

$$\Phi t(x,y) = -h(x,y)(K_2 - K_1) \tag{II.23}$$

Onde K_1 e K_2 são respectivamente fatores de ondas, no primeiro e no segundo meio. Logo, presume-se que o perfil de superfície, é um processo aleatório, ergódico, concluindo da equação II.20 e da equação II.21 que a perturbação de fase ergótica, também, sob estas condições, a integral de área da equação 20 pode ser expressa pela distribuição de probabilidade de densidade pela equação $p(\Phi)$ da modulação de fase aleatória:

$$E = E_0\int_{-\infty}^{\infty} e^{i\Phi}\,p(\Phi)d\Phi \tag{II.24}$$

Equações II.20 e II.21 são bem conhecidas para determinar a parte especular e coerente do campo refletido, mas para o conhecimento dos autores, elas nunca foram aplicadas ao problema da transmissão. Para posterior comparação com os resultados experimentais, vamos

resolver a equação II.20 para distribuição de Gauss, quando a função densidade de probabilidade é:

$$P(\Phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Phi_e} e^{-\Phi^2/2\Phi_c^2} \tag{II.25}$$

Onde Φ_c é o valor de RMS ou propagação de distribuição. Substituindo a equação II. 21 na equação II.22 resulta na equação II.24, conforme representado abaixo:

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{2\pi}\Phi_e} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\phi e^{-\phi^2/2\phi_c^2 d\phi}} \tag{II.26}$$

A solução da equação II.27 é bem conhecida e, esta apresentada abaixo:

$$E = E_0 e^{-\phi_c^2/2} \tag{II.27}$$

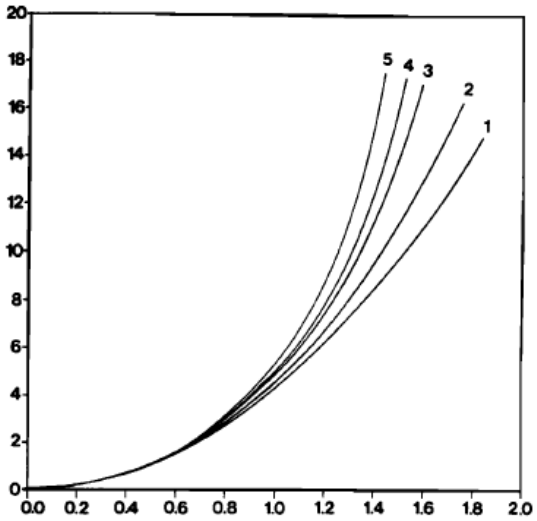


Figura II.8 Razão atenuação induzida pela superfície rugosa, por diferentes fases de modulação 1- Gausiana, 2- Simpson, 3- triangular, 4- senoidal, 5- retangular.
(NAGY, 1987).

A figura II.7 apresenta as cinco principais distribuições de probabilidade, a distribuição gaussiana produz a menor atenuação enquanto as outras distribuições resultam em redução mais severa da componente especular.

Finalmente, os coeficientes de reflexão e transmissão modificados pela distribuição de Gauss, podem ser escrito pelas equações II.28 e II.29 como segue:

$$R = R_0 e^{-2h^2 K_1^2} \tag{II.28}$$

$$T = Toe^{-1/2h^2(K_1 - K_2)} \tag{II.29}$$

A equação II.26 é formulada, frequentemente, utilizada em estudos do ultrassom, que implicam em valores de rugosidade superficial, entretanto a equação II.27 nos dá a ferramenta para lidar com a transmissão.

A redução de força dos sinais de superfície rugosa é inteiramente devido à dispersão, induzindo atenuação.

Os autores (NAGY, et al., 1987) confirmaram que a atenuação total do eco de fundo, induz todas as três interações com a superfície rugosa, isto é, a reflexão a partir da interface com a superfície de teste gera perda por transmissão e, esta perda é a mesma em ambas as direções.

Os autores (NAGY, et al., 1987) verificaram que o sinal recebido caiu drasticamente, quando ocorre um desalinhando do ângulo de incidência, o que indica que o componente especular é mais intenso quando comparado ao do campo difuso.

II.11. Analise dos ângulos de incidência de feixe ultrassônico em uma superfície

Conforme (SUNG JUN OH et al., 1996) ao usar um ângulo de incidência normal, ou seja, 90° com a superfície, o feixe ultrassônico pulsado, foram capazes de relacionar as medidas das amplitudes dos sinais refletidos com a media da rugosidade superficial. A verificação entre a teoria e os resultados experimentais, sendo fundamental na comparação entre os cálculos obtidos do modelo de espalhamento de Kirchhoff e a amplitude de distribuição.

Para uma modelagem das ondas ultrassônicas refletidas a partir de várias superfícies usando o método da resposta ao impulso, o estudo consistiu em dividir a superfície em pequenas áreas consideradas pontos refletor. Uma vez que o cálculo da resposta ao impulso de um ponto qualquer da superfície requer o conhecimento da coordenada. A figura II.8 representa a superfície mapeada no plano (x, y). Em seguida considerando a distribuição simétrica em torno do eixo z (esse eixo é o central) do transdutor, os pontos de passagem dentro de uma distância radial do eixo central são selecionados. O raio da borda foi cuidadosamente escolhido para acomodar a influência de sinais fracos, inferior a 50% da amplitude máxima. De acordo com (SUNG JUN OH et al., 1996)

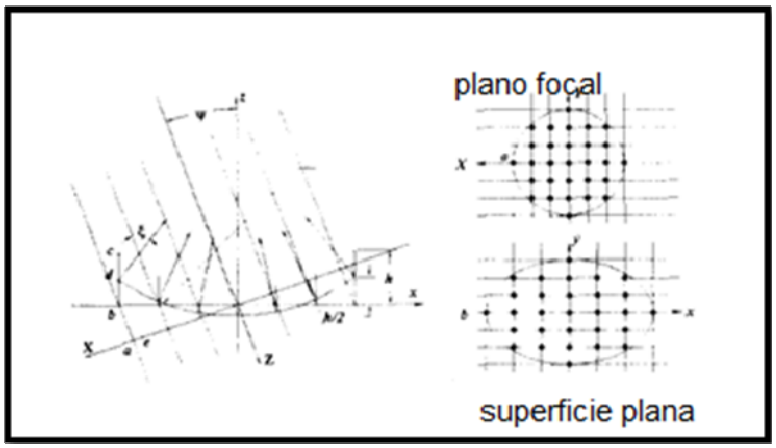


Figura II.9 Razão entre as velocidades da onda de Rayleigh para uma superfície rugosa e para uma superfície lisa.
(SUNG JUN OH, 1996).

De acordo com SUNG JUN OH (1996) a análise do sinal do eco, a partir de um ponto refletor pode ser resumido da seguinte forma: a mesma pressão sonora que o transdutor provoca na superfície é em módulo o mesmo valor que a superfície provoca no cabeçote. $E(M,t)$ Pode ser representado por:

$$E(M,t) = -\frac{K_a}{2c}\rho\gamma(M)\phi_i(M,t).\phi_i(M,t).\frac{\partial^2 v(t)}{\partial t^2} \qquad \text{(II.30)}$$

Onde K é constante, C é a velocidade do som no meio e a é um fator de escalonamento.

Uma vez que o ângulo de incidência, do impulso e o tamanho da superfície coberta pelo pulso são diretamente proporcionais, da inclinação superficial e dos elementos de superfície, logo $\gamma(M)$ torna-se zero.

De acordo com SUNG JUN OH (1996) no método da resposta do impulso, a função velocidade deve ser conhecida. Na teoria, o perfil de uma onda transiente medido por um receptor por um ponto ideal, este receptor localizado no ponto focal é uma derivada de primeira ordem da função primitiva, velocidade. Enquanto a forma do sinal refletido a partir de um ponto ideal localizado no ponto focal pode ser considerada a derivada de segunda ordem da mesma função primitiva, função velocidade. Na realidade, o tamanho finito de um receptor ou de um refletor provoca uma alteração no formato efetivo do ponto refletor médio.

A amplitude diminui com o aumento do ângulo de incidência. A amplitude é próxima a zero quando o ângulo de incidência se aproxima do valor de 14°, que é, aproximadamente, a

metade do ângulo cônico dos feixes incidentes. Praticamente, nenhum sinal é esperado além dos 14°, pois a maioria dos feixes incidentes é refletida especularmente.

Ambos os resultados numéricos e experimentais são consistentes, mostrando uma redução gradual da amplitude à medida que aumenta o ângulo de incidência, acima de 14°. Portanto, pode-se concluir que a quantidade máxima de ondas refletidas volta para o transdutor quando a incidência é normal (90°), com a superfície horizontal.

A diferença entre as amplitudes torna-se mais proeminente com ecos gerados por pulsos com o ângulo de incidência elevados, o pico de amplitude do eco é insensível à superfície rugosa na incidência normal, enquanto ele mostra alta sensibilidade próximos dos valores no intervalo de 10° à 12°.

De acordo com SUNG JUN OH (1996) para altos ângulos de incidência, o aumento do pico de amplitude do eco com o aumento da rugosidade superficial, uma explicação plausível seria que uma superfície muito lisa, reflete a maior parte dos feixes incidentes para ângulos de incidência altos, por outro lado as superfícies mais rugosas dispersam os feixes de volta para o transdutor. Esta característica é muito própria para a medição da rugosidade superficial.

A mudança do pico de amplitude do sinal refletido, em função da posição foi obtida com vários ângulos de incidência através do calculo dos valores de pico de amplitude dos sinais refletidos ao longo da direção de exploração. Esta distribuição é considerada um convoluto entre o impulso ultrassônico e a geometria da superfície, a maior sensibilidade poderia ser encontrada para ângulo de incidência de aproximadamente 10°.

De acordo com SUNG JUN OH (1996) com aumento da rugosidade, a variação pico a pico da amplitude aumenta.

As limitações da técnica podem ser reduzidas com o uso de um feixe ultrassônico com um ponto focal menor.

A partir dos perfis de amplitude obtidos por medições ultrassônicas, os parâmetros do perfil de superfície podem ser extraídos na mesma maneira como os perfis extraídos por um rugosímetro.

De acordo com SUNG JUN OH (1996) os dados digitalizados de ultrassom de diversas superfícies mostraram mudanças na amplitude e frequência para diferentes rugosidades. A amplitude de dados ultrassônicos variou com a rugosidade, enquanto a frequência correspondeu bem aos perfis de superfície medidas.

O resultado da analise numérica com base na resposta ao impulso mostrou uma boa concordância com os dados experimentais, no perfil de um feixe focalizado, medido formas e eco de distribuição de amplitudes de picos positivos para várias superfícies, e confirmou a validade das suposições feitas para a aplicação do método da resposta ao impulso.

De acordo com SUNG JUN OH (1996) a interação do feixe ultrassônico com a superfície rugosa em seu estudo não foi completamente caracterizada. Seu estudo apresenta os primeiros resultados complexos de modelagem analítica do feixe refletido, variando a amplitude

da superfície usinada, por uma verificação experimental e concluiu que a comparação com a rugosidade, o método mostrou um aumento de sensibilidade em diferenciar superfícies usinadas com diferentes níveis de rugosidade e a possibilidade de obtenção de informações do perfil de superfície em conjunto com os parâmetros de rugosidade superficial correlacionado, e que os valores de rugosidade determinados por ultrassom tem sido de excelente correlação com os valores obtidos por um rugosímetro mecânico.

II.12. Transformada da Fourier.

Representa-se matematicamente o som como uma série de Fourier, sendo a forma de onda uma função no domínio do tempo, mas para analise ser consistente, precisa-se de uma função no domínio das frequências, ou seja, qualquer fenômeno ondulatório, que no caso do estudo, a onda ultrassônica, pode ser analisada através do seu espectro, logo a transformada de Fourier fornece em detalhamento em função da frequência que compõe esse sinal.

A transformada rápida de Fourier – FFT (do inglês Fast Fourier Transform), um algoritmo eficaz para calcular o valor de uma transformada Discreta de Fourier e sua inversa com o objetivo de processamento do sinal para conseguir ter uma análise da frequência.

III. Procedimento Experimental

III.1.Preparação do corpo de prova

Para a confecção dos corpos de provas foram escolhidas três placas de aço baixo carbono A-36, com embasamento em sua extensa utilização em empresas do ramo metal mecânico, para aumentar a rugosidade superficial em dois deles, foi escolhido o jateamento abrasivo de granalha de aço G-40 e jateamento abrasivo por areia, o procedimento de jateamento abrasivo foi selecionado para produzir essas rugosidades aleatórias, sendo uma operação de tratamento de superfícies que consiste em propulsionar um fluxo de material abrasivo contra uma superfície em alta velocidade, de maneira a erodir uma superfície, ou seja, aumentar os parâmetros de rugosidade superficial.

As superfícies dos três corpos de provas, foram analisados por meio de um rugosímetro mecânico Mitutoyo, para a obtenção dos parâmetros das superfícies rugosas, com velocidade de varredura foi resolvido em 1000 $\mu m / s$, sob temperatura ambiente de (25°C), conforme figura III.1 abaixo:

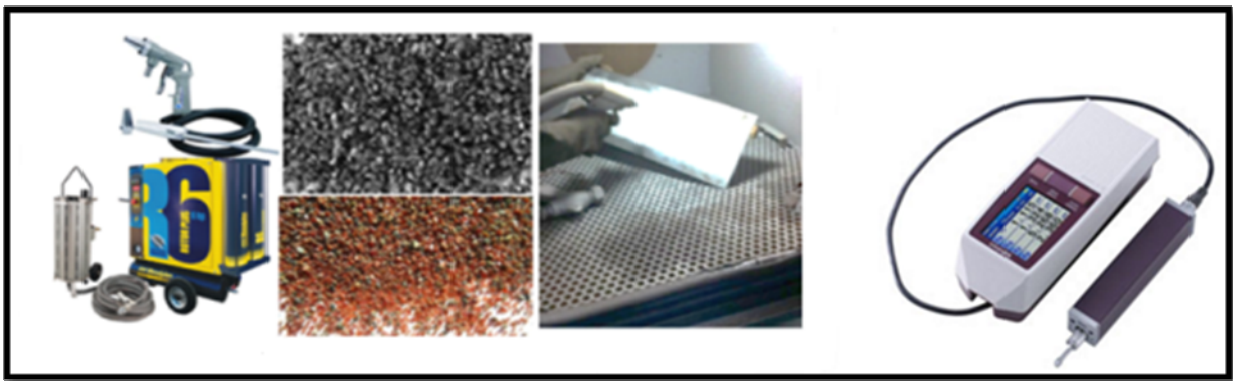


Figura III.1 Jateamento abrasivo G-40 e areia e o rugosímetro mecânico Mitutoyo.

Os três corpos de provas, nos quais se produziu níveis de valores de rugosidade superficial tridimensional, pegando um corpo de prova sem tratamento algum, outro com tratamento de jateamento G-40 e finalmente o terceiro com jateamento por Areia. Conforme indicado na figura III.2 abaixo, os corpos de provas utilizados no experimento.

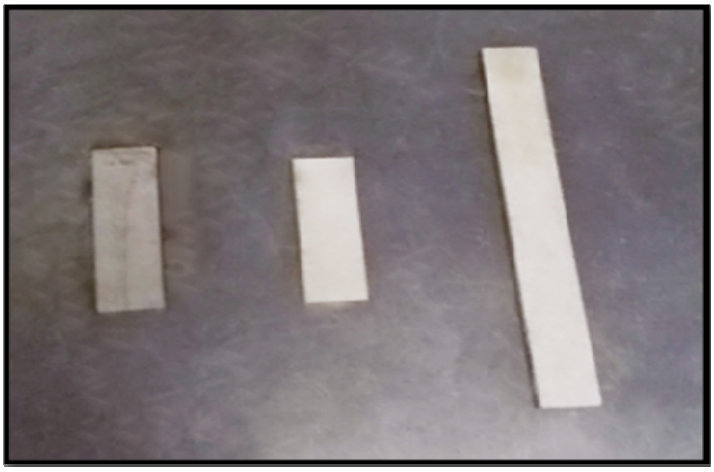


Figura III.2 Corpos de provas utilizados no experimento da esquerda para direita, sem tratamento, com jateamento G-40 e jateamento por Areia.

Com o objetivo de obter uma superfície aleatória, foi escolhido o tratamento superficial de jateamento, e assim a natureza física dos sinais refletidos por esta superfície aleatória, não terá uma orientação, de acordo com o anexo para superfície com jateamento G-40 e areia.

A fim de realizar um dos principais objetivos do presente estudo foram obtidos por critério de rugosidade com o uso do rugosímetro mecânico de contato, os valores dos principais parâmetros de rugosidade que são apresentados na tabela III. 1 abaixo:

Tabela III.1 Valores de Rugosidades.

VALORES DE RUGOSIDADE			
Parâmetros de Rugosidade	CP sem Tratamento Superficial	CP com Jateamento G-40	CP com Jateamento de Areia
Ra	1,23 µm	3,81 µm	10,9 µm
Rq	1,48 µm	4,79 µm	15,5 µm
Rt	8,67 µm	35,26 µm	73,2 µm

III.2.Experimento ultrassônico

O experimento foi realizado com o uso de um sistema ultrassônico formado por um osciloscópio DPO 4034, um aparelho pulso receptor modelo 5073PR, de acordo com as figuras III.3 e III.4, o transdutor utilizado modelo NDT: BHG102 com diâmetro de 0,25 polegadas que possui frequência central de 10 MHz .



Figura III.3 Aparelho pulso/receptor modelo 5073PR.



Figura III.4 Aparelho pulso/receptor modelo 5073PR.

Para cada corpo de prova foram realizadas 10 medições ao longo da superfície e também um sinal foi obtido da superfície de um atrasador de sinal, feito de sílica, denominado de padrão, de acordo com a figura III.5 abaixo, tendo sido fabricado para o uso exclusivo no experimento.

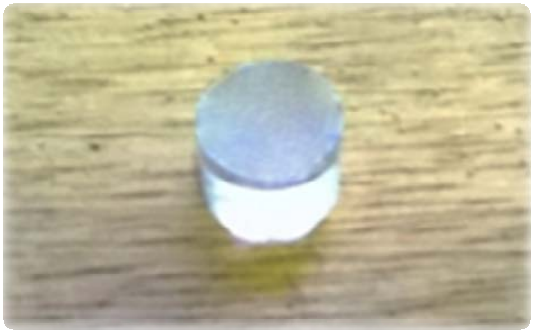


Figura III.5 Sapata de sílica pura fabricada para o experimento.(Padrão).

Abaixo segue o esquemático da formação do experimento realizado, para a obtenção dos sinais, com o uso de uma sapata de sílica pura entre o corpo de prova e o cabeçote, perpendicularmente, para que o retorno do sinal, nesta configuração de 90° com a superfície.

De acordo com a figura III.6:

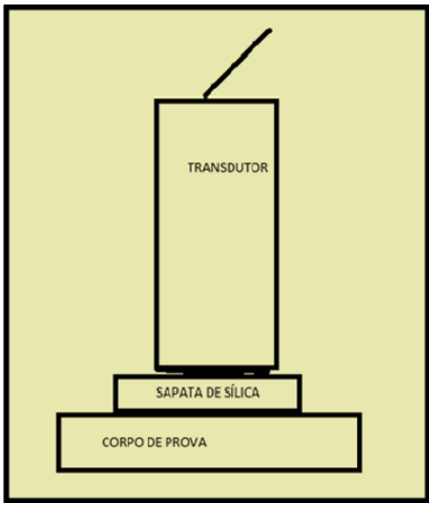


Figura III.6 Perfil esquemático do experimento.

Importando os sinais para um software, com o objetivo de analise dos pulsos ultrassônicos, de acordo com a figura III.7, que representa os sinais obtidos pela técnica.

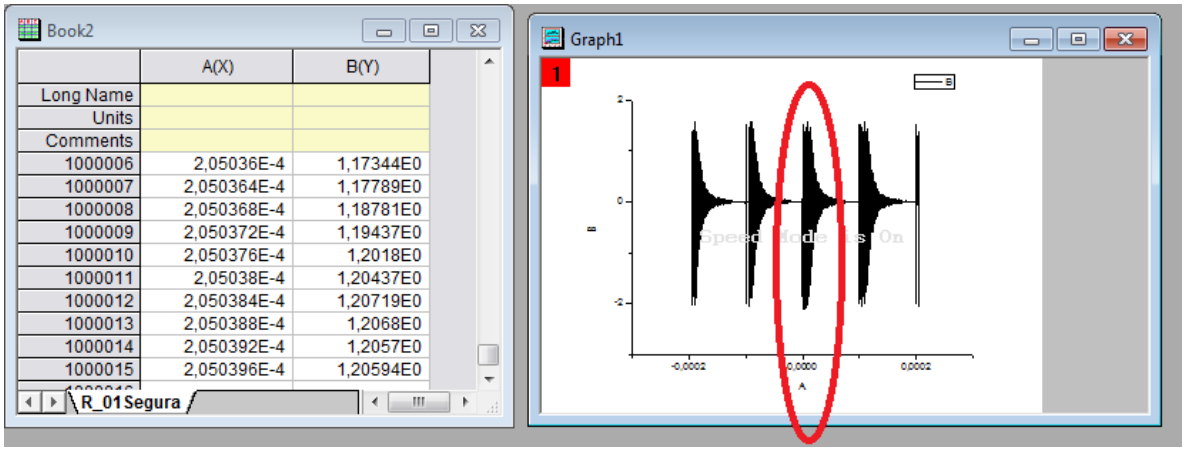


Figura III.7 Gráfico e tabela, dados obtidos com o uso do software.

O terceiro pico representa o sinal referente à superfície dos corpos de provas analisados no experimento.

Uma filtragem dentro de um sinal constituído por 10^6 pontos, recebido para analise, procedimento repetido para os 31 sinais do experimento, com o objetivo de separar apenas os sinais referentes ao sinal da superfície.

Após foi feita a transformada rápida de Fourier, e a partir do domínio da frequência foram analisados os parâmetros de amplitude e frequência máximas, nos espectros de frequência gerados conforme a figura III.8.

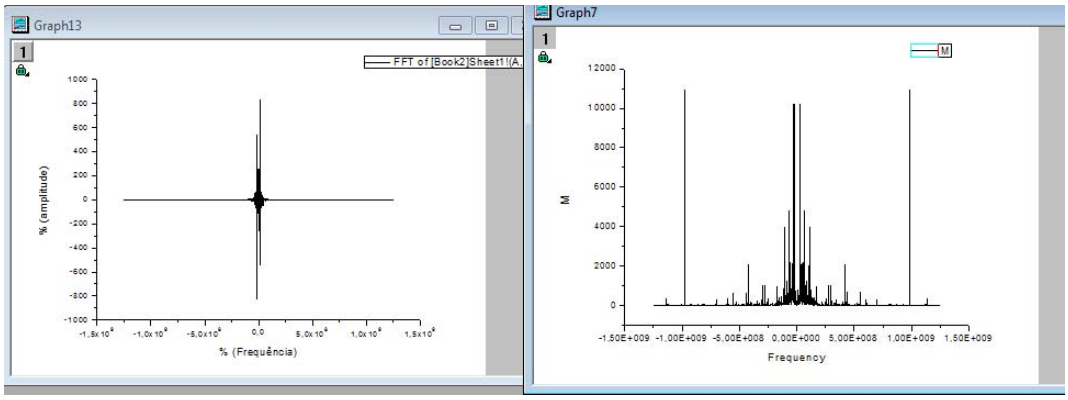


Figura III.8 modulação dos sinais.

Foram feita três análises para os corpos de provas, conforme descrito abaixo:

- A média dos 10 espectros de frequência gerados dos 10 sinais ultrassônicos individuais no tempo, sem dividir pelo padrão (M).

- O espectro de frequência gerado da média dos 10 sinais ultrassônicos no tempo para cada corpo de prova, sem dividir pelo padrão (E).

- O espectro de frequência gerado da média dos 10 sinais ultrassônicos no tempo, para cada corpo de prova, dividido pelo padrão (E/P).

Posteriormente foi feita uma análise dentro faixa de 5Mhz à 15Mhz de frequência, sendo a central possuindo valor de 10 MHz

Com os resultados foi feita uma apreciação estatística de anova (analise de variância), que é um procedimento utilizado para comparar três ou mais tratamentos.

IV. Resultados

IV.1. Análise de Estatística

O experimento do estudo consistiu em uma situação de 10 medições ao longo da superfície em cada um dos três grupos, analisando uma variável e determinados pressuposto são atendidos para o critério da análise de variância (ANOVA), que é uma ferramenta estatística que serve para comparar as médias aritméticas dos grupos.

Foi utilizado a (ANOVA) de fator único, e a primeira etapa foi elaborar as hipóteses conforme abaixo:

Partindo do pressuposto de que os três grupos representam populações cujos valores são selecionados de maneira aleatória e independente, seguem uma distribuição normal e possui variâncias iguais, a hipótese nula de nenhuma diferença nas médias aritméticas das populações:

- $H_0 = \mu_{semtratamento} = \mu_{G40} = \mu_{Areia}$.

É testada contra a hipótese alternativa de que nem todas as c médias aritméticas das populações são iguais:

- H_1 : Nem todas as μ_j são iguais (em que j= 1,2,..., c)

O calculo da soma dos quadrados entre os grupos (SQE) é representado abaixo:

$$SQE = \sum_{J=1}^{c} n_j \left(\bar{x}_j - \bar{\bar{x}} \right)^2 \qquad \text{(IV.1)}$$

Onde:

C = número de grupos

n_j = número de valores no grupo j

$\bar{x}_j$ = média aritmética da amostra do grupo j

$\bar{\bar{x}}$ = grande média

A variação dentro do grupo, geralmente chamada de soma dos quadrados dentro dos grupos (SQD), mede a diferença entre cada um dos valores e a média aritmética de seu próprio

grupo e somam os quadrados dessas diferenças ao longo de todos os grupos a equação abaixo demonstra ao cálculo da variação dentro do grupo.

$$SQD = \sum_{j=1}^{c} \sum_{i=1}^{n_g} \left(x_{ij} - \bar{x}_j \right)^2 \quad \text{(IV.2)}$$

Onde:

x_{ij} = i-ésimo valor no grupo j.

$\bar{x}_j$ = média aritmética da amostra no grupo j

A variação total é representada pela soma total dos quadrados (STQ) é a soma das duas partes, aquela que é decorrente de diferenças por entre os grupos e aquela que é decorrente de variações dentro dos grupos, conforme a equação abaixo:

$$STQ = SQE + SQD \quad \text{(IV.3)}$$

O grau de liberdade entre os grupos é dado pela equação abaixo:

$$gle = c - 1 \quad \text{(IV.4)}$$

Onde:

C = número de grupos

O grau de liberdade dentro dos grupos é dado pela equação abaixo:

$$gld = n - c \quad \text{(IV.5)}$$

O grau de liberdade total é a soma dos graus de liberdade entre e dentro dos grupos e é dado pela equação abaixo:

$$glt = gle + gld \quad \text{(IV.6)}$$

A tabela IV.1 concentra os valores de amplitude obtidos durante o experimento:

Tabela IV.1 Resultados obtidos durante o experimento para a amplitude da análise (M)

CORPOS DE PROVA			
AMPLITUDE(dB)	Sem tratamento	G40	AREIA
	825,58822	491,508639	207,8979
	641,00295	501,032448	207,2307
	662,60008	365,613148	124,3447
	744,84478	289,011799	323,4197
	786,64138	233,870628	184,0076
	207,23065	267,997612	182,2377
	789,310296	284,390364	194,2724
	736,030341	333,568619	128,2006
	731,226296	157,509482	125,6609
	504,150864	192,024863	149,9565
Soma	6628,625857	3116,527602	1827,2287
Média	662,8625857	311,6527602	182,72287
Variância	34200,64753	13209,7221	3541,743

QUADRO RESUMO						
FV	SQ	GL	QM	F	F crítico	*valor-P*
Entre os grupos	1235018	2	617509	36,3582	3,354131	2,19E-08
Dentro do grupo	458569	27	16984,04	-	-	-
Total	1693587	29	-	-	-	-

No caso da tabela acima F calculado é maior do que F critico logo se encontra na região de rejeição.

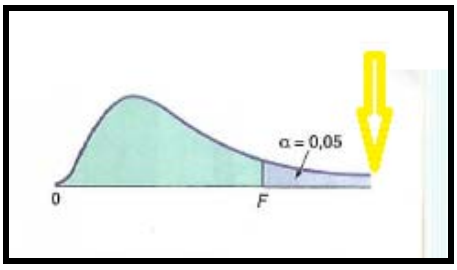


Figura IV.1 curva de distribuição F.

Rejeitamos a hipótese de Ho, ou seja, existem evidências de diferenças entre pelo menos um par de médias de rugosidades. Com a comparação direta do valor-p e α, reforçamos a rejeição da hipótese nula, concluindo que a técnica foi sensível para diferenciar os três grupos de amplitude. A tabela IV.2 concentra os valores de frequência obtida de forma individual durante o experimento:

Tabela IV.2 Resultados obtidos durante o experimento para a frequência para análise (M).

CORPOS DE PROVA			
FREQUÊNCIA (Hz)	Sem tratamento	G40	AREIA
	13615987	12578639,4	11536733
	11509562	12605810,4	11544049
	11536733,2	12578639,4	10482287
	11536733,2	12578639,4	11536733
	11516877,4	11516877,4	11528373
	10494827	12578639,4	11536733
	11536733,2	12570279	12578639
	11536733,2	12578639,4	12578639
	10494827	12585954,6	11544049
	10474971,3	13619500,5	10474971
Soma	114253984,5	125791618,9	115341206
Média	11425398,45	12579161,89	11534120,6
Variância	8,33E+11	2,4573E+11	4,9E+11

QUADRO RESUMO						
FV	SQ	GL	QM	F	F crítico	*valor-P*
Entre os grupos	8,12E+12	2	4,06E+12	7,760055	3,354131	0,002175
Dentro do grupo	1,41E+13	27	5,23E+11	-	-	-
Total	2,22E+13	29	-	-	-	-

Com procedimento análogo ao que foi feito na analise para a amplitude, agora com os cálculos obteve a tabela de ANOVA para as frequências.

No caso F calculado (7,760055) é maior do que F critico (3,354130829). Para a analise das frequências se encontra na região de rejeição.

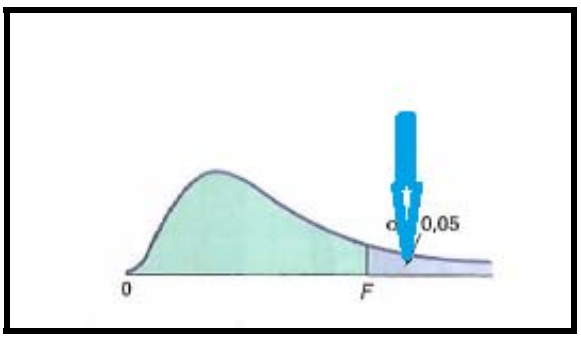


Figura IV.2 curva de distribuição F.

Rejeitamos a hipótese de Ho, ou seja, existem evidências de diferenças entre pelo menos um par de médias entre os grupos.

Comparando o valor-P de 0,002175 com α=5% reforçamos a rejeição de Ho, isto é: existe diferencias significativas entre os grupos de frequências. O valor-p de 0,002175 indica que existe uma chance de aproximadamente 0,2% de serem observadas diferenças desses valores.

V. Análise dos Resultados

Os resultados quantitativos dos ensaios são apresentados nas Figuras V.1 a V.7, para os respectivos tratamentos superficiais, representando as análises de (E) e (E/P), uma vez que os valores das amplitudes e frequências para análise (M) encontram-se nas tabelas IV.1 e IV.2.

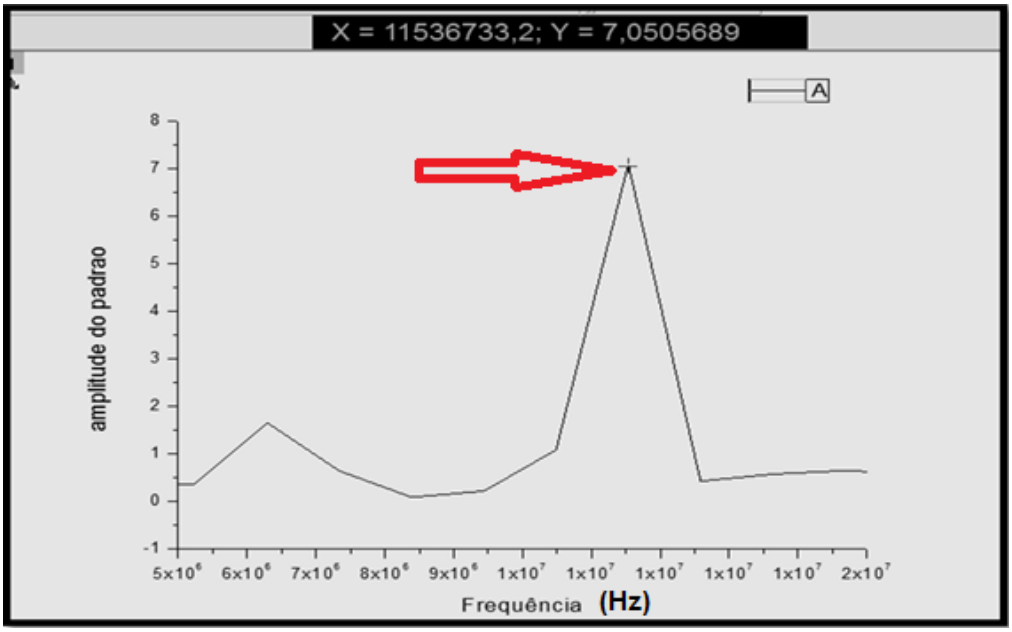


Figura V.1. Gráfico gerado para a sílica (Padrão).

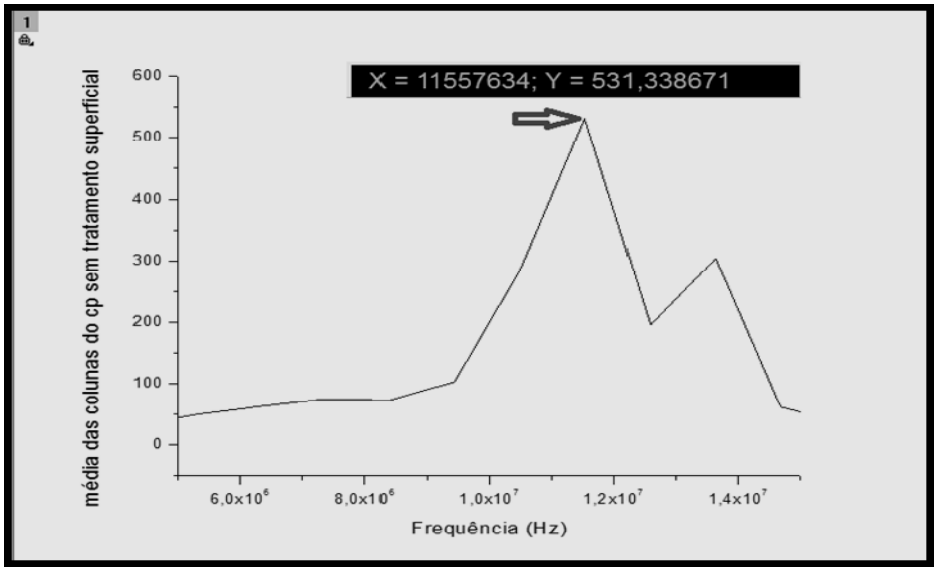


Figura V.2 Gráfico para o corpo de prova sem tratamento superficial para análise (E).

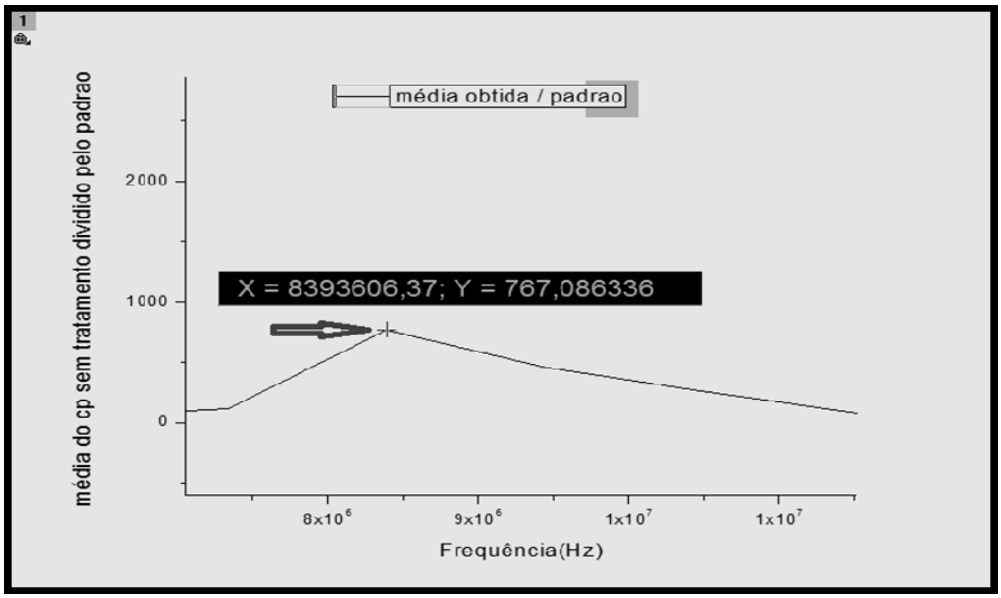


Figura V.3 Gráfico para o corpo de prova sem tratamento superficial para análise (E/P).

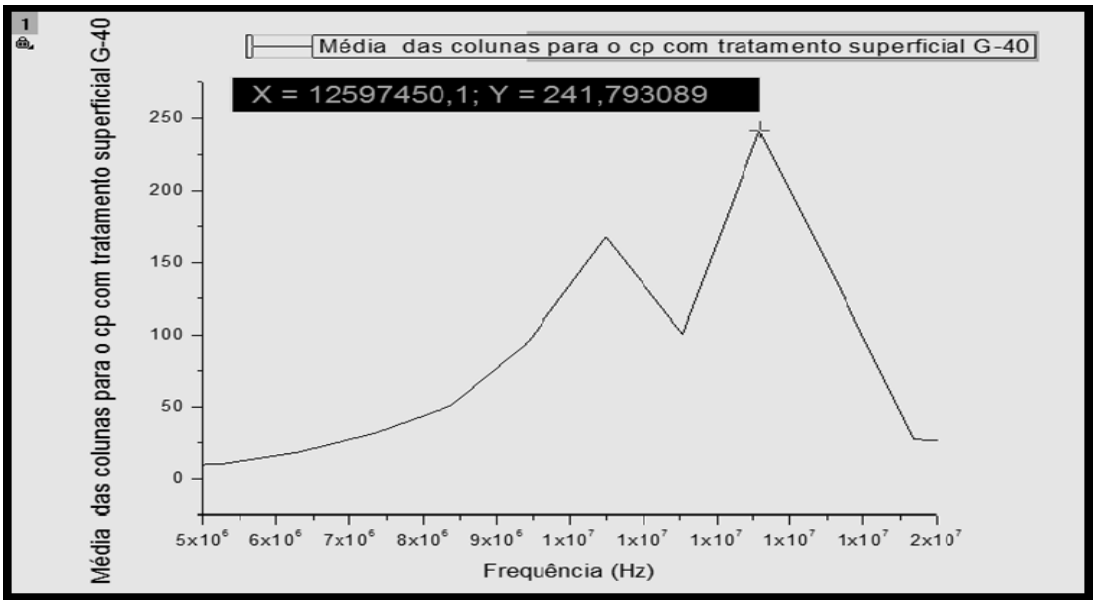


Figura V.4 Gráfico para o corpo de prova com tratamento superficial jateamento G-40 para análise (E).

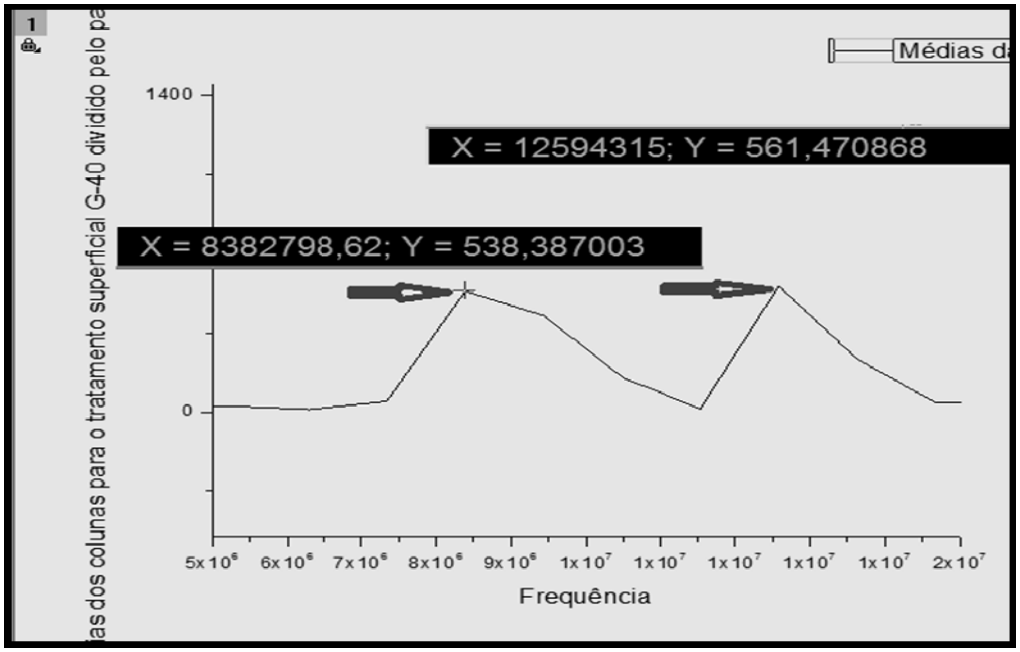


Figura V.5 Gráfico para o corpo de prova com tratamento superficial jateamento G-40 para análise (E/P).

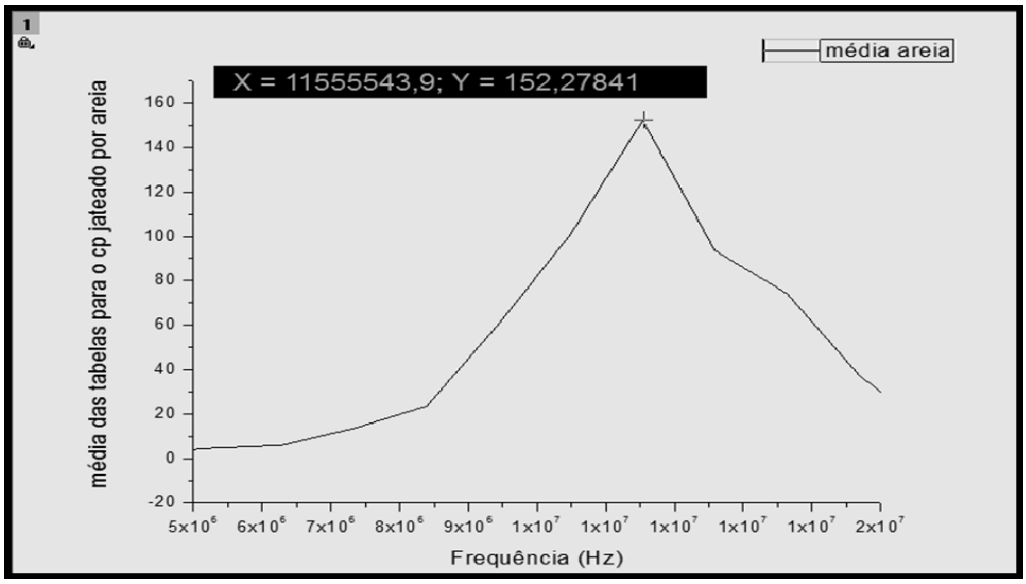


Figura V.6 Gráfico para o corpo de prova com tratamento superficial jateamento por areia para análise (E).

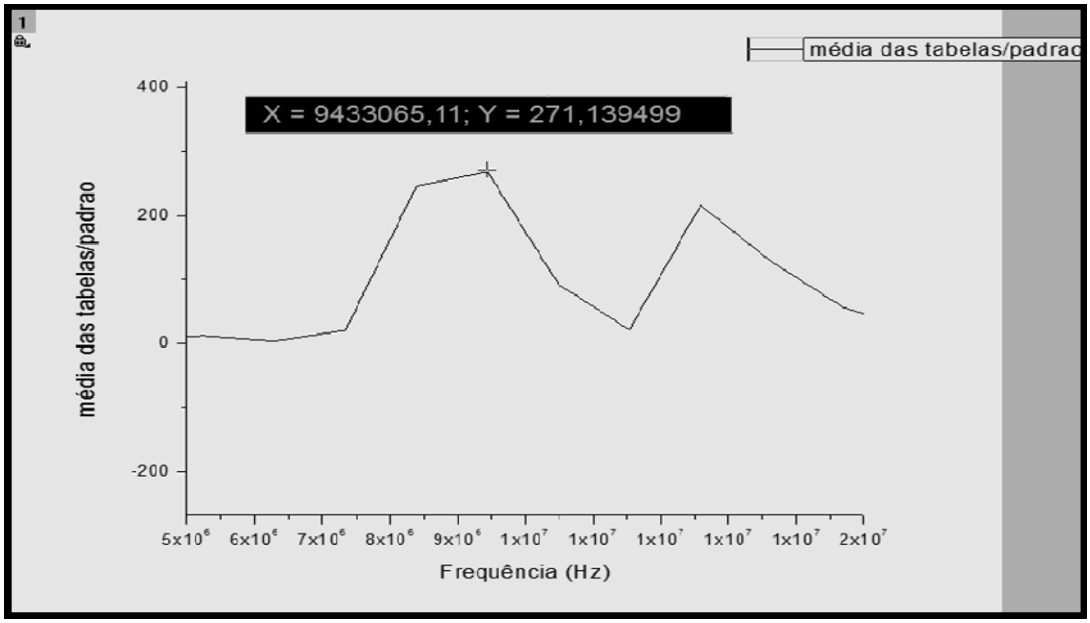


Figura V.7 Gráfico para o corpo de prova com tratamento superficial jateamento por areia para análise (E/P).

As análises mostraram uma influência significativa da rugosidade: com o crescimento da rugosidade ocorre o decréscimo da amplitude, os gráficos de atenuação obtidos apresentados nas Figuras V.1 a V.7, como podem ser vistos, revelaram uma diferença clara na atenuação para diferentes tratamentos mecânicos. Apesar de todos os corpos de prova testados, o resultado tem um comportamento previsível à rugosidade, ou seja, apenas um pico de valor dentro da faixa de frequência estudada, inesperadamente para o corpo de prova com tratamento G-40 apresentou dois picos próximos em valor de amplitude no intervalo de frequência analisado.

A figura V.8 abaixo apresenta as retas dos resultados do experimento para o comportamento da amplitude pela rugosidade média (Ra) com uma comparação entre as análises (E) e (EP).

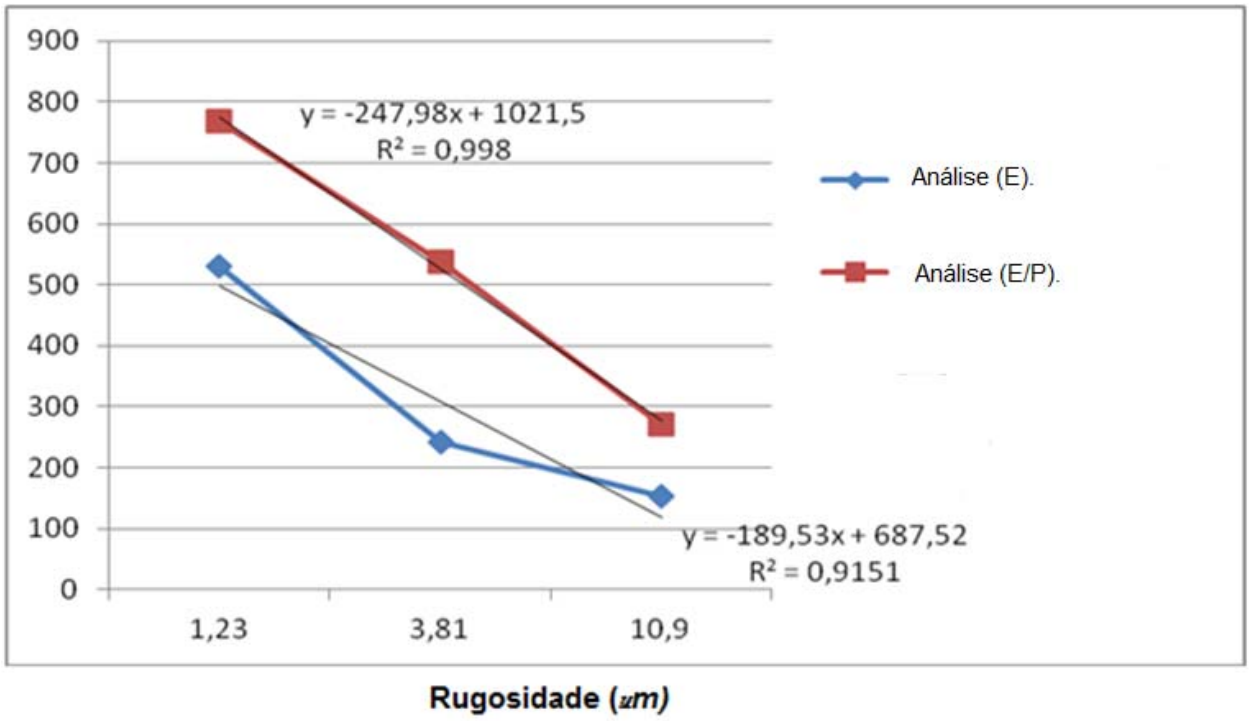


Figura V.8 Analise da amplitude comparando o uso do padrão.

A análise do comportamento da amplitude com o aumento da rugosidade das análises (E) e (EP) observando o gráfico acima, conclui-se que há uma similaridade de comportamento da amplitude que decresce nas duas situações.

A principal diferença na análise dos resultados da análise (E) e (E/P) é que na análise (E/P) há um comportamento mais indicado para realizar previsões e verificar a existência de correlações entre variáveis, apesar das duas regressões lineares possuírem valor de R^2 maior que 0,6 indicando uma relação entre variáveis forte, o valor de R^2 da regressão linear dividido pelo padrão é maior do que o valor de R^2 sem dividir pelo padrão (0,998>0,9151).

A técnica possui um comportamento coerente para fazer previsões de valores, entretanto, existe a necessidade de ampliação da faixa e examinar diferentes rugosidades em mais corpos de provas, sendo somente garantido neste intervalo de rugosidade que a previsão é valida, entre os valores de 1,23 até 10,9, valores este compreendido na faixa de rugosidade utilizado na indústria para o processo de colagem.

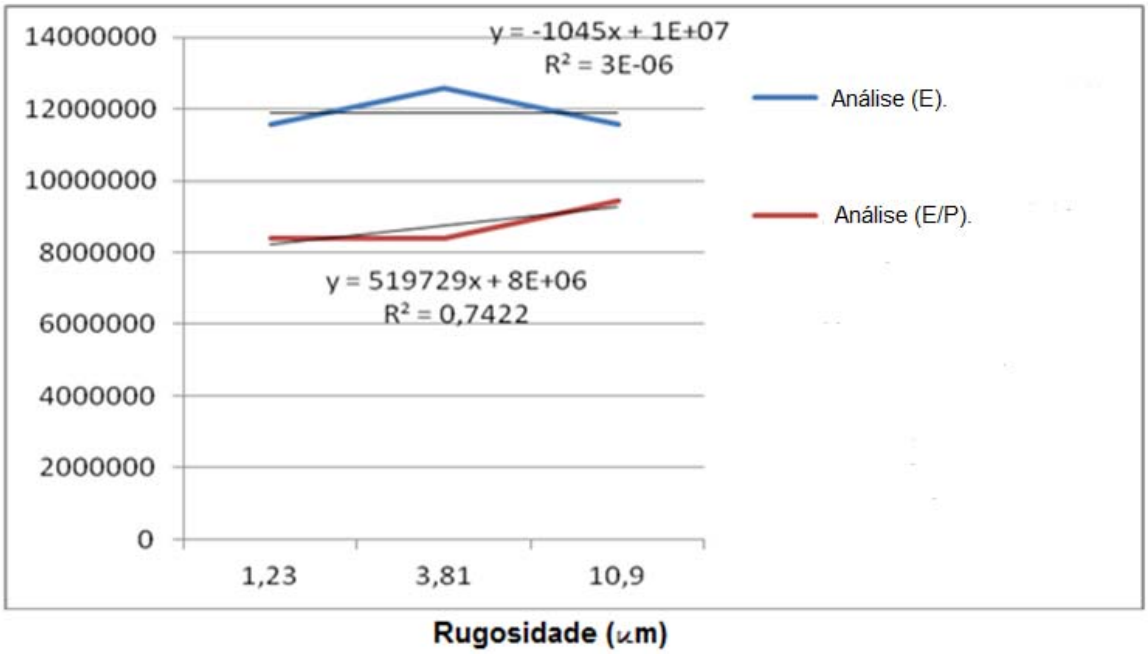


Figura V.9 Analise do comportamento da frequência com o aumento da rugosidade sem dividir pelo padrão e dividido pelo padrão.

Pela observação do gráfico, a frequência possui uma tendência de aumento com o crescimento da rugosidade, mas a diferença principal é que a frequência da análise (E/P) possui valor de R^2 =0,7422 (coeficiente de determinação) indicando uma relação entre variáveis forte, o mesmo não pode ser dito para a regressão linear da frequência da análise (E).

A faixa de frequência ótima em relação aos parâmetros de rugosidade tem uma tendência de aumento com o crescimento da rugosidade, isto prova que existe uma correlação entre o comprimento de onda e a rugosidade superficial.

Contudo um bom desempenho foi obtido por todos os corpos de provas, esses fatos evidenciam a influência direta da rugosidade superficial na resposta do comportamento da amplitude do sinal ultrassônico e da frequência.

Com a necessidade de generalizar o comportamento da amplitude, foram resumidos em uma tabela todos os valores para a amplitude obtidos durante o experimento e na analise dos sinais. A tabela abaixo indica esses valores.

Tabela V.1 Resultados obtidos para a Amplitude.

Rugosidade (Ra)	1,23	3,81	10,9
Amplitude da análise (E) (dB)	531,33	241,79	152,27
Amplitude da análise (E/P) (dB)	767,08	538,38	271,13
Amplitude da análise (M) (dB)	662,8626	311,6528	182,7229

Em seguida o gráfico de análise entre as amplitudes:

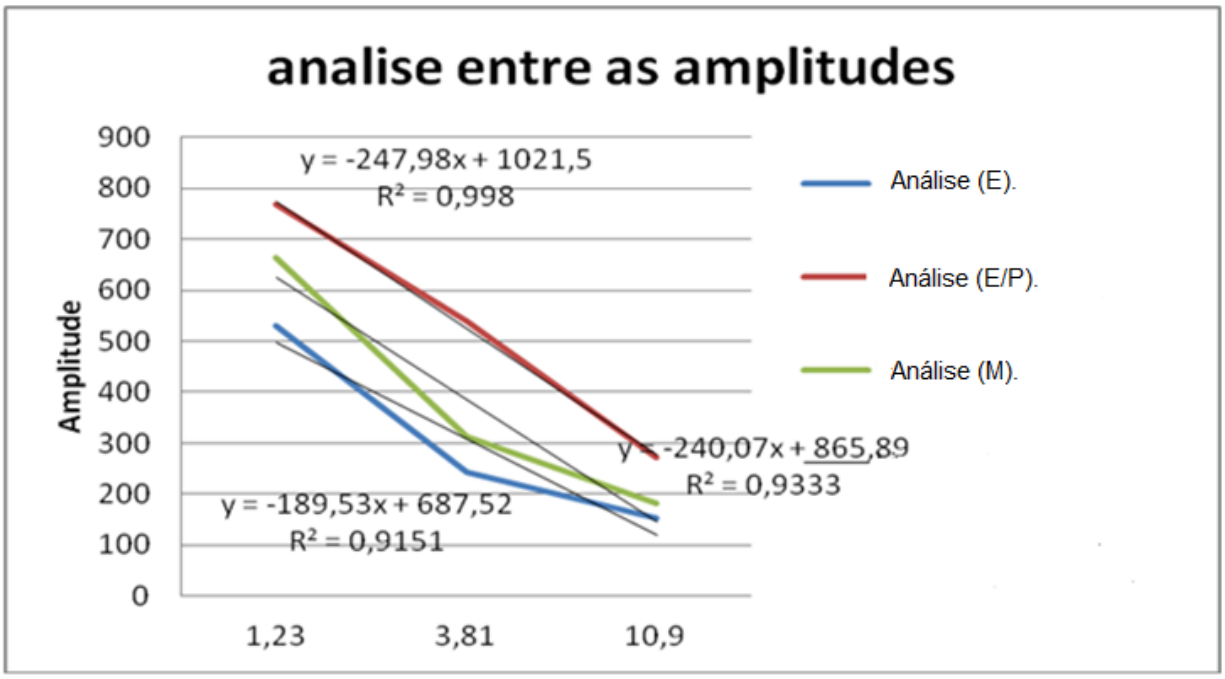


Figura V.10 Análise do comportamento de todos os dados de amplitudes.

A análise comportamental das amplitudes com os valores de rugosidade média mostra que existe em todas as analises a mesma semelhança, e todas apresentam uma boa correlação, pois valores R^2 próximos de um, sendo que a melhor correlação obtida foi com os valores da análise (E/P), em segundo a análise (M) da amplitude e em terceiro a análise (E), com isso reforça a importância para se conseguir um melhor resultado, a divisão pelo padrão torna-se necessário.

A tabela V.2 abaixo concentra os valores de frequência obtidos durante o experimento. De forma para analisar todo o comportamento das frequências no decorrer dos levantamentos de dados, conforme abaixo:

Tabela V.2 Resultados obtidos para a Frequência.

Frequência da análise (M) (Hz)	Frequência da análise (E) (Hz)	Rugosidade (Ra) (μm)	Frequência da análise (E/P) (Hz)
11425398,45	11557634	1,23	8393606,37
12579161,89	12597450,1	3,81	8382798,62
11534120,62	11555543,9	10,9	9433065,11

A seguir será apresentado o gráfico da análise da frequência pela rugosidade:

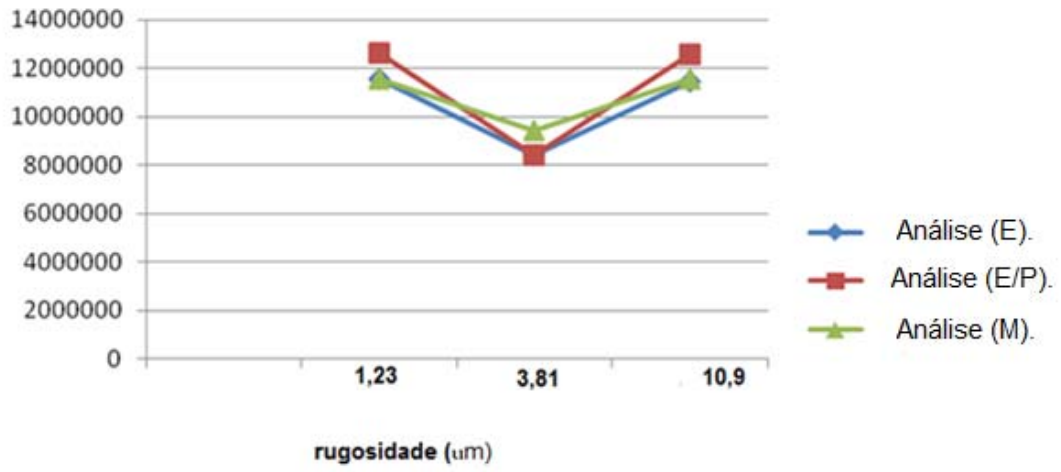


Figura V.11 Análise do comportamento de todos os dados de frequência.

O estudo comportamental das frequências demonstra muita similaridade entre elas, revelando que existe um padrão comportamental que se repete para as diferentes situações de análise. As observações obtidas a partir do gráfico permitem concluir que a frequência se comporta de forma previsível, para as três situações e existe o mesmo ponto de inflexão. Esta conclusão leva a supor uma correlação de comprimento de onda e a rugosidade superficial.

A tabela abaixo resume os valores obtidos durante o levantamento de dados e análises dos sinais ultrassônicos durante o experimento prático.

Tabela V.3 Resultados gerais obtidos.

VARIÁVEIS	UNIDADE	SEM TRATA-MENTO	TRATAMENTO G40	TRATAMENTO AREIA
Rugosidade (Ra)	µm	1,23	3,81	10,9
Amplitude da análise (E)	dB	531,33	241,79	152,27
Amplitude da análise (E/P)	dB	767,08	538,38	271,13
Amplitude da análise (M)	dB	662,8626	311,6528	182,7229
Frequência da análise (E)	Hz	11557634,0	12597450,1	11555544
Frequência da análise (E/P)	Hz	8393606,37	8382798,62	9433065
Frequência da análise (M)	Hz	11425398,45	12579161,89	11534121

No procedimento de medição ultrassônica, a superfície interage apenas com o contato do transdutor e acoplante, o que faz com que não ocorram os danos causados pelas medições realizadas com perfilômetros de agulha. Isto faz dela uma alternativa muito interessante nos casos em que o material a ser medido é sensível e suscetível a riscos.

Ficou descrita a oportunidade de se estender as aplicações ultrassônicas além da simples caracterização de rugosidade, pois nos processo que envolva variações superficiais podem ser monitoradas através dela, a técnica mostrou ser capaz de detectar diferentes valores de rugosidade.

Para que se estabeleça a utilidade prática do método, é fundamental sua utilização intensiva, simplesmente assim poderão ser estabelecidos paradigmas e uma noção natural do significado dos valores obtidos através das medições ultrassônicas. Será necessário, então, realizar medições adicionais e a partir dos resultados obtidos estabelecerem por meio empírico, faixas de valores adequados para cada aplicação. Certamente este tipo de estudo poderá direcionar o estabelecimento de normas e procedimentos para medição da superfície rugosa por ultrassom.

Com o objetivo de estimar a rugosidade apenas pela técnica ultrassônica, foi determinada uma função da rugosidade com duas variáveis, sendo os parâmetros do modelo a seguir:

$$Rug = K.4{,}6082\, a^{-3.159}\, f^{-9.454} \qquad \text{(V.1)}$$

Onde:

f = frequência

a = amplitude

$K = 10^{68}$

A tabela V.4 mostra a comparação entre os valores obtidos pelo rugosímetro mecânico de contato e o rugosímetro ultrassônico, quando utilizada a equação V.1, para os parâmetros de amplitude e frequência da análise (E/P).

Tabela V.4 Resultados obtidos pela comparação do rugosímetro mecânico e o ultrassônico.

VALORES DE RUGOSIDADE			
Rugosímetro Mecânico (µm)	Rugosímetro Ultrassônico (µm)	Diferença	Variação (%)
1,23	1,23	0,00	0,00%
3,81	3,82	0,01	0,26%
10,90	10,93	0,03	0,27%

Para os valores obtidos e pela análise da tabela, conclui-se que o rugosímetro ultrassônico possui capacidade de aferição da superfície rugosa das amostras, foi mostrado através dos experimentos que a alta frequência em torno de 10 MHz pode ser significativamente útil para caracterizar a superfície rugosa da ordem de grandeza de 10^{-6} m.

As limitações encontradas durante o estudo da técnica ultrassônica para obter a rugosidade superficial são:

- A superfície precisa ser aleatória, se a rugosidade superficial for obtida por tratamento que oriente a superfície, o teste perde a eficácia.
- A presença dentro da faixa de frequência estudada, de mais do que um pico de amplitudes próximo em valor.
- A exigência de paralelismo na sapata de sílica.

As vantagens encontradas durante o estudo da técnica ultrassônica são:

- Não há danos na superfície estudada.
- Capacidade de se utilizar a técnica onde não é possível o uso do rugosímetro mecânico.
- A técnica é a melhor indicada para verificar a ocorrência de falhas no processo de tratamento superficial.
- Maior velocidade de medição de uma superfície.
- Não possui desgaste por utilização na medição.
- A possibilidade de realizar o ensaio na vertical e na posição sobrecabeça.
- Possibilidade de medição em área enquanto o rugosímetro mecânico apenas uma linha reta.

As desvantagens encontradas durante o estudo da técnica ultrassônica são:

- Maior tempo para obter valores em comparação com o rugosímetro.
- Necessidade de uso de software para o processamento.
- Uso de mais recursos para obter valores, tornando a técnica mais cara em comparação com o rugosímetro..
- O rugosímetro mecânico possui maior facilidade de uso.

VI. Conclusões

O principal objetivo deste trabalho foi estudar a influência e o comportamento do sinal ultrassônico sobre uma superfície rugosa. O importante aspecto deste trabalho foi avaliar a resposta à rugosidade em três diferentes níveis de rugosidade. Os ensaios foram realizados com o objetivo de comparar o decaimento da amplitude sem a divisão pelo padrão e com a divisão do mesmo.

Os resultados da investigação experimental mostrou que a rugosidade desempenha um papel significativo na atenuação das ondas ultrassônicas. Além disso, mostrou-se, também, a existência de uma relação entre as variações de rugosidade e frequência.

A influência do nível de rugosidade encontrado foi significativa e pode ser descrito como se segue:

- Com o aumento dos valores de rugosidades, ocorre um decréscimo dos valores das amplitudes dos sinais ultrassônicos.

- Simultaneamente com o decréscimo dos valores da amplitude há o aumento da frequência correspondente a esse pico.

- Há uma maior precisão na técnica quando há o uso da análise (E/P).

- A técnica é muito precisa em correlacionar rugosidade com amplitude do sinal ultrassônico.

- A técnica é sensível para caracterizar os diferentes corpos de provas.

- A técnica possui limitação sendo garantida apenas dentro do intervalo de rugosidade analisado.

- A principal causa do decréscimo da atenuação é ocasionada pela perda de energia do feixe refletido a partir da superfície, com o aumento da rugosidade.

Finalmente, os resultados aos testes ultrassônicos levam à conclusão que a rugosidade fornece uma redução significativa da amplitude dos sinais e uma tendência de aumento da frequência.

VII. Sugestões

Há espaços para futuras pesquisas nestes campos de conhecimento. Particularmente em análise de propagação ultrassônica em peças já coladas, esta análise fornece resultados quantitativos que podem ser aperfeiçoados.

A influência da rugosidade no pulso ultrassônico precisa ser estudada mais detalhamento antes e após o procedimento de colagem. Isto confirma que os resultados obtidos no presente estudo, sobre a qualidade da colagem de superfícies jateadas. A importância deste estudo é explicada pelo fato que a rugosidade tem grande influência para a colagem de substratos e o ensaio ultrassônico sendo largamente utilizados para avaliar de forma qualitativa e quantitativa, ambos amplamente utilizados na indústria mecânica.

Referências Bibliográficas

ASM Handbook. Nondestructive Evaluation and Quality Control. v. 17. 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Surface Engineering in: *Metals Handbook*, Vol 5, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 3274:1996.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 4287:2002; especificação geométrica do produto (GPS) – Rugosidade: Método do Perfil – termos, definições e parâmetro da rugosidade. Rio de janeiro: ABNT 2002.

BLESSING, G.V.; SLOTWINSKI, J.A.; EITZEN, D.G.; RYAN, H. "Ultrasonic measurements of surface roughness". *Applied Optics*, Vol. 32, No. 19, July 1993.

BRAGA, R. M. Sondas para medir a espessura residual de tubos por ultrassom. *Dissertação.PPGEM*: UFRGS, 2001.

CARTZ,L,. Nondestructive testing. ASM International 1995. Isbn 97-0-87170-517-4.

CHIANG, E.H.; ADLER, R.S.; MEYER, C.R.; RUBIN, J.M.; DEDRICK, D.K.; LAING, T.J. "Quantitative assessment of surface roughness using backscattered ultrasound: the effects of finite surface curvature"*. Ultrasound in Med. & Biol*., Vol. 20, No. 2, pp. 123-135, 1994.

DE BARROS, S., DE SOUZA, J. R., GOMES, K.C., SAMPAIO, E. M., BARBOSA, N. P., TORRES, S. M.; "Adhesion of the geopolymer bonded joints considering surface treatments", *The Journal of Adhesion*, v. 88, pp. 364-375, 2012.

DE MARÉ, C.; SCHEERS, J.; LAMBERT, F.; VERMEULEN, M.; DE GRAEF, L.; GADEYNE, Y. "Development of the Sibetex sheet having excellent drawability and paint appearance"**.** *La Revue de Métallurgie*, jun, 1997.

DEUTSCHIES INSTITUT FUR NORMUNG. DIN 4760:1982. Form deviations, concepts; classification system. Berlin, Germany, DIN. 1982.

DINAKARAN. D. Monitoring of surface roughness in end milling using ultrasonic technique, December 2009.

DOUGLAS C. MONTGOMERY E GEORGE C. RUNGER.. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.

FACCIO, Ian. Investigações sobre o acabamento superficial de usinagem com altíssima velocidade de corte. São Paulo: USP, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica: área de projeto e fabricação), Escola Politécnica, Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, 2002.

GARCIA, A, SPIN, J.A., SANTOS, C.A. Ensaios dos Materiais. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
HELLIER, C. J., Handbook of Nondestructive Evaluation, McGraw-Hill, USA, 2003.

ISO 4288-1996. Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture.

KRAUTKRAMER, Nondestructive Material Testing With Ultrasonics – Introduction to the Basic Principles.http://www.geinspectiontechnologies.com/products/ultrasonics/index.html. Acessado em 10/05/2015.

M.B.SALIN. Numerical simulation of bragg scattering of sound by surface roughness for different values of the Rayleigh parameter.(2013).

M.N.DURAKBASA. “The factors affecting surface roughness measurements of the machined flat and spherical surface structures” – The geometry and the precision of the surface . Development of measurement. (2011).

M.N.F. SANIMAN. “Application of air coupled ultrasound to noncontact evaluation of paper surface roughness”. (2015).

MOHAMMED. M. S. “Probability of detection simulations to study the influence of surface roughness on the reliability of ultrasonic testing system”, September 2013.

NAGY PETER “Surface roughness induced attenuation of reflected and transmitted ultrasonic waves”, March 1987.

NDT Education Resourge Center, Brian Larson, Editor, 2001-2013, The Collaboration for NDT Education, Iowa State University. Disponível em http://www.ndt-ed.org. Acesso em Fevereiro 2015.

Nondestructive evaluation: theory, techniques, and application., Edited by Peter J. Shull. Marcel Dekker New York 2001.

OGILVY, J. A, “Theoretical Comparison of Ultrasonic Signal Amplitudes from Smooth and Rough Defects”, NDT International Volume 19 Number 6, December 1986.

P.DEMIRCIOGLU.; “investigations on machined metal surfaces through the stylus type and optival 3D instruments and their mathematical modeling with the help of statistical techniques”.(2010).

PANAMETRICS, Ultrasound Technical Notes. < http://www.ndt.org> acessado em 16/03/2015.
R. SINCLAIR. Velocity dispersion of Rayleigh waves propagating along rough surfaces, December 1970.

SCHEERS, J.; VERMEULEN, M.; DE MARÉ, C,; MESEURE, K.. Assessment of steel surface roughness and waviness in relation with paint appearance. *International Journal of machine tools manufacture, v 38.*

SUNG JUN OH.; YUNG C. SHIN.; and ERIC S. FURGASON. “Surface roughness evaluation via ultrasonic scanning”, Vol. 41, No. 6, November 1994.

T.G. MATHIA. Recent trends in surface metrology. (2010).

TITTIMANN, B. R. “Ultrasonic Measurements for the Prediction of Mechanical Strenght”. NDT International, 11,1 ed.2, p 17-22, 1978.

X.JANE JIANG. Technological shifts in surface metrology. (2012).

YONG LI. “Analysis of surface acoustic wave propagation in a two dimensional phononic crystal” (2012).

Anexo 1 - Tabela de distribuição de ANOVA – Folha 1 de 2.

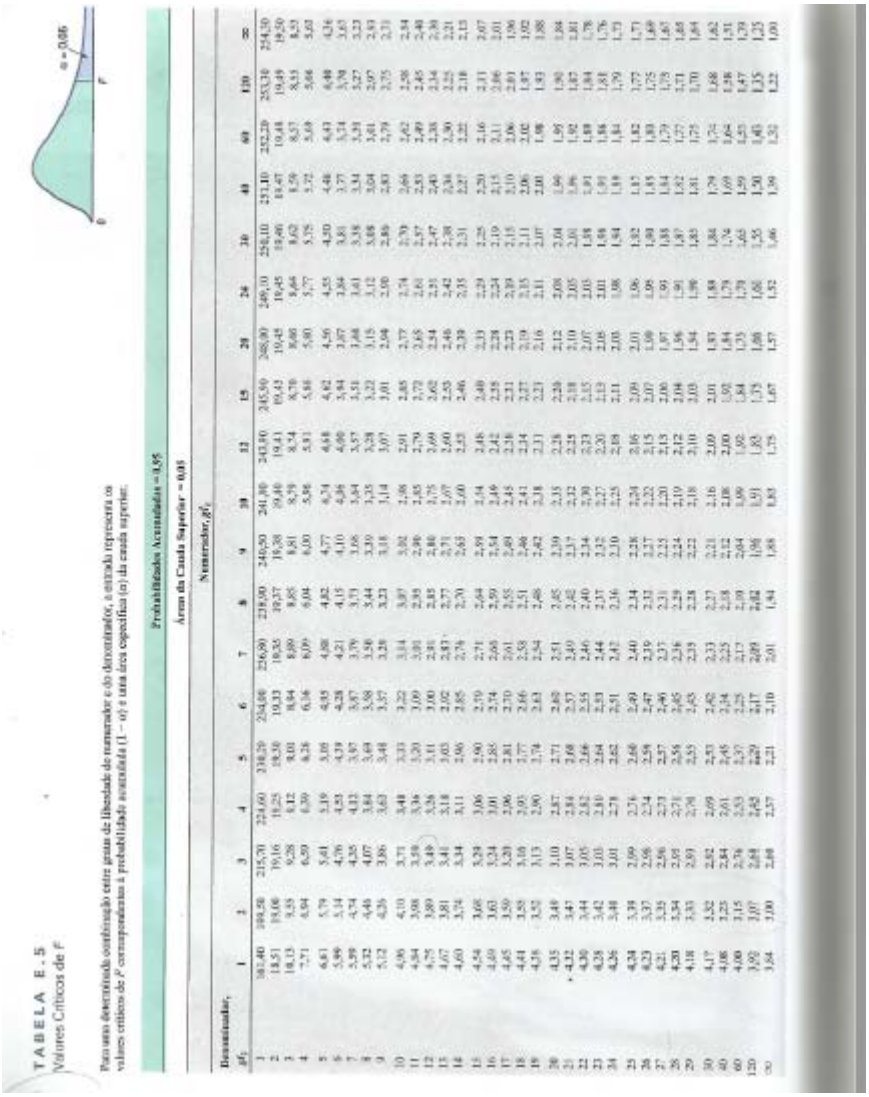


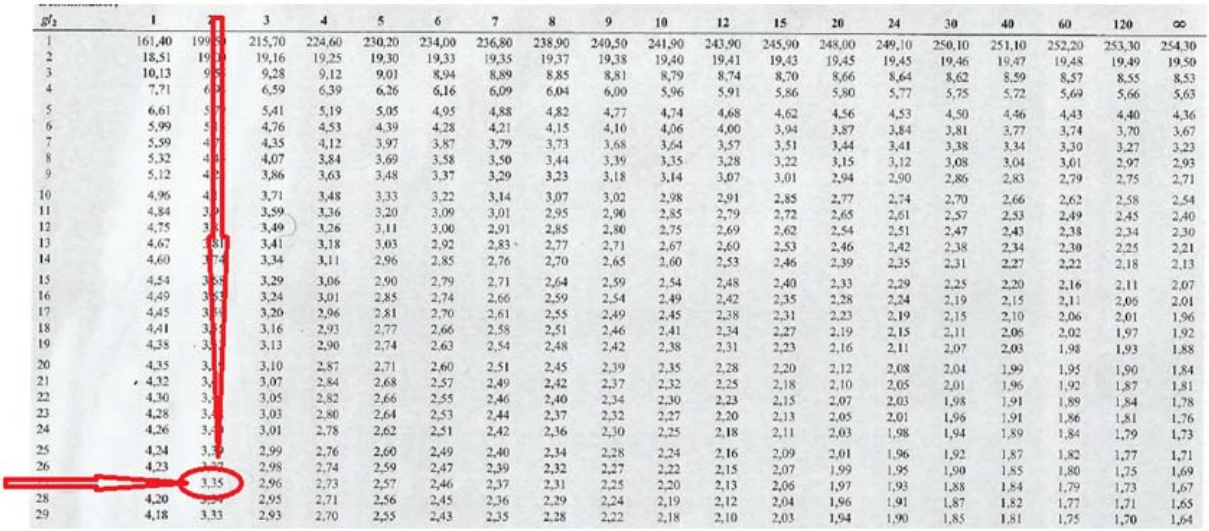
TABELA E.5
Valores Críticos de F

Para uma determinada combinação entre graus de liberdade do numerador e do denominador, a entrada representa os valores críticos de F correspondentes à probabilidade acumulada $(1 - \alpha)$ e uma área cauda superior α.

Probabilidades Acumuladas = 0,95																			
Área da Cauda Superior = 0,05																			
Denominador, gl_2	Numerador, gl_1																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161,40	199,50	215,70	224,60	230,20	234,00	236,80	238,90	240,50	241,90	243,90	245,90	248,00	249,10	250,10	251,10	252,20	253,30	254,30
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,81	1,77	1,71	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00

Fonte: Douglas C. Montgomery e George C. Runger.

Anexo 1 - Tabela de distribuição de ANOVA – Folha 2 de 2.



gl_2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161,40	199,5	215,70	224,60	230,20	234,00	236,80	238,90	240,50	241,90	243,90	245,90	248,00	249,10	250,10	251,10	252,20	253,30	254,30
2	18,51	19,0	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50
3	10,13	9,5	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,9	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,7	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36
6	5,99	5,1	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,7	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
8	5,32	4,4	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,2	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,1	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,9	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,8	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,91	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64

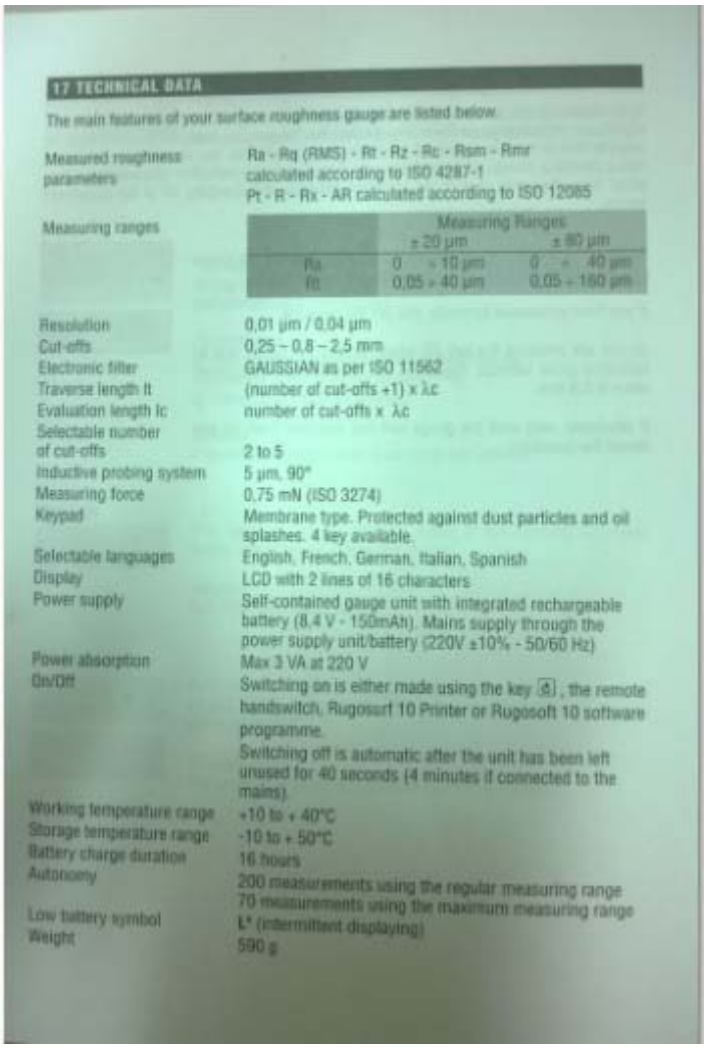
Fonte: Douglas C. Montgomery e George C. Runger.

Anexo 2 - Manual do rugosimetro mecânico – Folha 1 de 2.



Fonte: Manual do rugosímetro tesa technology

Anexo 2 - Manual do rugosimetro mecânico – Folha 2 de 2.



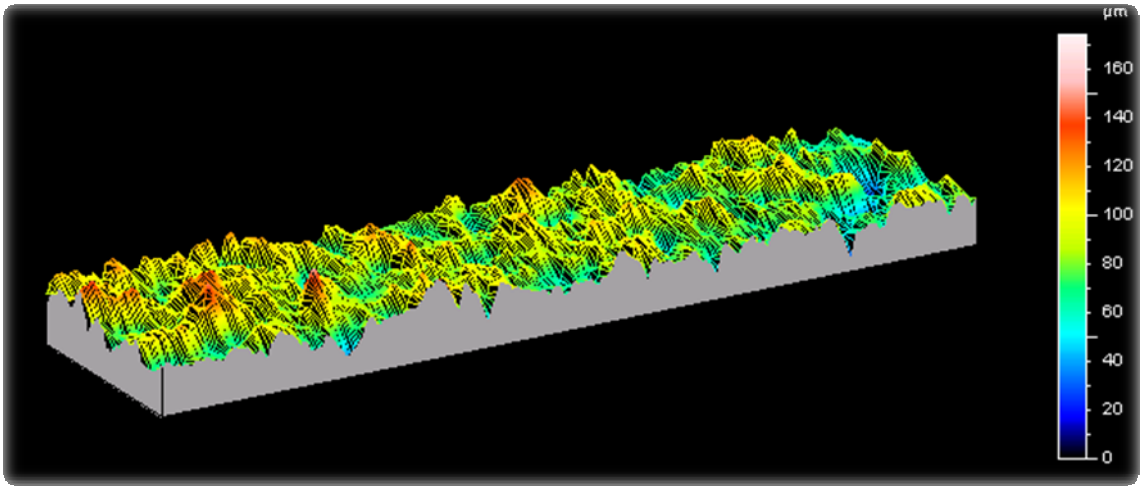
17 TECHNICAL DATA

The main features of your surface roughness gauge are listed below.

Measured roughness parameters	Ra - Rq (RMS) - Rt - Rz - Rc - Rsm - Rmr calculated according to ISO 4287-1 Pt - R - Rx - AR calculated according to ISO 12085
Measuring ranges	Measuring Ranges: ± 20 µm / ± 80 µm Ra: 0 ... ± 10 µm / 0 ... ± 40 µm Rt: 0,05 ... 40 µm / 0,05 ... 160 µm
Resolution	0,01 µm / 0,04 µm
Cut-offs	0,25 – 0,8 – 2,5 mm
Electronic filter	GAUSSIAN as per ISO 11562
Traverse length lt	(number of cut-offs +1) x λc
Evaluation length lc	number of cut-offs x λc
Selectable number of cut-offs	2 to 5
Inductive probing system	5 µm, 90°
Measuring force	0,75 mN (ISO 3274)
Keypad	Membrane type. Protected against dust particles and oil splashes. 4 key available.
Selectable languages	English, French, German, Italian, Spanish
Display	LCD with 2 lines of 16 characters
Power supply	Self-contained gauge unit with integrated rechargeable battery (8,4 V - 150mAh). Mains supply through the power supply unit/battery (220V ±10% - 50/60 Hz)
Power absorption	Max 3 VA at 220 V
On/Off	Switching on is either made using the key ⏻, the remote handswitch, Rugosurf 10 Printer or Rugosoft 10 software programme. Switching off is automatic after the unit has been left unused for 40 seconds (4 minutes if connected to the mains).
Working temperature range	+10 to + 40°C
Storage temperature range	-10 to + 50°C
Battery charge duration	16 hours
Autonomy	200 measurements using the regular measuring range 70 measurements using the maximum measuring range
Low battery symbol	L* (intermittent displaying)
Weight	590 g

Fonte: Manual do rugosímetro tesa technology

Anexo 3 - Perfil tridimensional de uma superfície com tratamento jateamento G-40.



Anexo 4 - Perfil tridimensional de uma superfície com tratamento jateamento por areia.

