CEFET-MG

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Dissertação de Mestrado

Davi Alves da Silva

ESTUDO DOS PARÂMETROS DE SUPERFÍCIE E DA TENSÃO RESIDUAL NO AÇO ABNT 4340 ENDURECIDO APÓS RETIFICAÇÃO UTILIZANDO DIFERENTES FLUIDOS DE CORTE

Belo Horizonte

2018

Davi Alves da Silva

ESTUDO DOS PARÂMETROS DE SUPERFÍCIE E DA TENSÃO RESIDUAL NO AÇO ABNT 4340 ENDURECIDO APÓS RETIFICAÇÃO UTILIZANDO DIFERENTES FLUIDOS DE CORTE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva

Belo Horizonte

2018

Silva, Davi Alves da.
S586e Estudos dos parâmetros de superfície e da tensão residual no aço ABNT 4340 endurecido após retificação utilizando diferentes fluídos de corte / Davi Alves da Silva. - 2018.
135 f. : il., fotos, grafs., tabs.
Orientador: Leonardo Roberto da Silva.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2018.
Bibliografia.

1. Retificação. 2. Fluídos de corte. 3. Rugosidade. 4. Tensão residual. I. Silva, Leonardo Roberto da. II. Título.

CDD: 671.35

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca - Campus I / CEFET-MG
Bibliotecária: Rosiane Maria Oliveira Gonçalves - CRB/6-2660

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

CEFET-MG

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO "ESTUDO DOS PARÂMETROS DE SUPERFÍCIE E DA TENSÃO RESIDUAL NO AÇO ABNT 4340 ENDURECIDO APÓS RETIFICAÇÃO UTILIZANDO DIFERENTES FLUÍDOS DE CORTE"

Autor: Davi Alves da Silva

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Belo Horizonte, 05 de Fevereiro de 2018.

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais Juraci e Rosilene e a minha noiva Mayara pelo amor, carinho, apoio e compreensão que eles me deram.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelo cuidado que tem por mim e por me dar disposição, saúde, sabedoria para vencer todos os obstáculos e realizar este trabalho, a Ele dedico toda honra glória e louvor, pois, sempre foi e será a fonte de todo o conhecimento e sabedoria.

Ao meu pai Juraci de Jesus e Silva e minha mãe Rosilene Alves da Silva referência de vida, de amizade e que me ajudaram transformar esse sonho em realidade. A minha noiva Mayara pela paciência, compreensão e ajuda nos momentos difíceis e a toda minha família.

Agradeço a meu orientador Leonardo Roberto da Silva pelo constante auxílio, amizade e pela confiança em meu potencial.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais DEMAT pela disponibilização dos laboratórios e a todos os funcionários e estagiários dos laboratórios pela atenção e contribuição para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço ao CEFET pela concessão da bolsa de mestrado que foi de fundamental importância para esta pesquisa.

Ao professor Marcelo Araújo Câmara por ter disponibilizado o Laboratório de Recobrimentos Tribológicos da UFMG, ao colega Anderson e as estagiárias por acompanhar os testes, pela atenção e contribuição.

Aos alunos de iniciação científica Clarice Diniz e Diego Amaral pela contribuição que tiveram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu amigo Odilon pela amizade e conselhos durante essa caminhada, e ao meu amigo Francisco Vieira dos Santos pelo grande apoio e contribuição dado a esta pesquisa.

À Silmec pelo fornecimento do fluido de corte sintético utilizado neste estudo.

A todos os professores e amigos que com conselhos e trocas de experiência contribuíram para realização desta pesquisa científica.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a execução desse trabalho meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A caracterização da topografia de superfícies de engenharia é muito importante em aplicações envolvendo atrito, lubrificação e desgaste. Apesar da grande maioria das superfícies ser especificada por parâmetros 2D muitas vezes eles não são suficientes para caracterizar uma superfície. Verifica-se um amplo esforço por parte dos fabricantes e da comunidade científica em desenvolver parâmetros e metodologias com o intuito de caracterizar as superfícies para uma aplicação funcional específica. No processo de retificação as elevadas temperaturas ocorrem devido à remoção de material e são geradas tensões residuais na superfície usinada afetando o comportamento mecânico do material. O desempenho deste processo depende das condições de lubri-refrigeração para prevenir o superaquecimento da peça, que poderá interferir na integridade superficial da peça. Contudo, torna-se essencial que se façam estudos em busca de fluidos alternativos visando à redução destes problemas. Este trabalho visa analisar o desempenho de diferentes fluidos de corte (mix - 50% fluido integral a base de óleo mineral e 50% óleo de soja; fluido integral a base de óleo mineral e fluido de corte sintético), bem como a utilização da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) no processo de retificação do aço ABNT 4340 endurecido, por intermédio do estudo dos parâmetros de superfície a da tensão residual. Por meio dos parâmetros 2D, 3D e da tensão residual foi possível caracterizar a superfície do aço ABNT 4340 contribuindo para o entendimento do comportamento dessa superfície no processo de retificação de mergulho bem como a influência que os parâmetros e fluidos de corte exerceram nesse processo. No geral, os melhores resultados nos parâmetros avaliados foram verificados para o fluido de corte integral, porém, os resultados sinalizam a viabilidade do uso do fluido mix e da técnica de MQL como alternativa ao uso do fluido de corte convencional sintético, podendo colaborar para uma manufatura ecologicamente amigável. As tensões encontradas foram todas de natureza compressiva, sendo estas benéficas para o componente usinado já que elas atuam com inibidora a nucleação e propagação de trincas.

Palavras-chave: retificação, fluidos de corte, caracterização de superfície, tensão residual, mínima quantidade de lubrificante - MQL, formulação biodegradável,

ABSTRACT

The characterization of topography of engineering surfaces is very important in applications involving friction, lubrication and wear. Although the large part of surfaces are specified by 2D parameters, they are often not sufficient to characterize a surface. Note a large effort is made by manufacturers and the scientific community to develop parameters and methodologies in order to characterize the surfaces for a specific functional application. In the grinding process high temperatures occur due to the removal of material and residual stresses are generated on the machined surface, affecting the mechanical behavior of the material. The performance of this process depends on the conditions of lubrication and cooling, preventing overheating of the part may interfere with the surface integrity of the piece. However, it is essential to make studies in search of alternative fluids in order to reduce these problems. This study aims to analyze the performance of different cutting fluids (mix - 50% full fluid mineral oil base and 50% soybean oil; full fluid mineral oil base and synthetic cutting fluid) as well as the use of the technique Minimum Quantity Lubricant (MQL) in the grinding process of AISI 4340 hardened steel, through of the study of the surface parameters a of the residual stress. By means of the 2D, 3D parameters and residual stress, it was possible to characterize the ABNT 4340 steel surface, contributing to the understanding of the surface behavior in the plunge grinding of process as well as the influence that the parameters and cutting fluids exercised on that surface process. In general, the best results in the evaluated parameters were verified for the integral cutting fluid, however, the results indicate the feasibility of the use of the mix fluid and the MQL technique as an alternative to the use of conventional synthetic cutting fluid, and can collaborate for an environmentally friendly manufacture. The tensions were all of a compressive nature, and these are beneficial for the machined component since they act with inhibitor the nucleation and propagation of cracks.

Keywords: grinding, cutting fluids, surface characterization, residual stress, Minimum Quantity Lubricant - MQL, biodegradable formulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos envolvidos na retificação cilíndrica externa. 19
Figura 2 - Desenho esquemático de um sistema de Mínima Quantidade de Lubrificante por pressão. 28
Figura 3 - Desvio médio aritmético (Ra) 34
Figura 4 – Rugosidade total 35
Figura 5 - Curva de Abbott-Firestone 36
Figura 6 - Representação gráfica de Rk. 37
Figura 7 - Representação gráfica de Rpk. 38
Figura 8 - Representação gráfica de Rvk. 39
Figura 9 - Coeficiente de simetria Rsk. 40
Figura 10 - Diferença entre assimetria positivo e negativo. 41
Figura 11 - Curtose Rku. 43
Figura 12 - Assimetria de distribuição de alturas de uma superfície. 45
Figura 13 - kurtosis da curva de distribuição de amplitudes. 46
Figura 14 – Gráfico de construção dos parâmetros Spk, Sk e Svk. 47
Figura 15 - Curva de Abbott–Firestone e parâmetros de volume. 48
Figura 16 - Distribuição da tensão residual de um aço ligado, induzidas termicamente pelo processo de retificação. 51
Figura 17 - Tensão de compressão para o uso de emulsão de base vegetal e fluido sintético para as cinco velocidades de mergulho empregadas. 53
Figura 18 - Tensão residual para os três métodos de lubri-refrigeração: convencional, otimizado e MQL com espessura equivalente de corte heq1, heq2 e heq3; e tensão residual para um corpo de prova não retificado. 54
Figura 19 – Medição da tensão residual em função da temperatura da superfície medida durante a retificação: (a) EN9; (b) EN31; (c) M2 e (d) CPM10V. 55
Figura 20 - Análise das formas de aplicação de fluido de corte na tensão residual 56
Figura 21 - Difração de raios-x em material sem carga (a) e carregado (b). 59
Figura 22 - Gráfico de 2Θ x $sen^2\psi$. 62
Figura 23 - Fluxograma do procedimento experimental. 63
Figura 24 - Detalhamento da técnica de MQL. 65
Figura 25 - Desenho em corte total do bocal MQL. 66

Figura 26 - Desenho esquemático do corpo de prova. 67
Figura 27 – Superfície a ser retificada no corpo de prova. 67
Figura 28 - Montagem do dressador na retificadora. 68
Figura 29 - Rugosímetro e dispositivos utilizados para medição dos parâmetros avaliados. 71
Figura 30 – Medição no Perfilômetro 72
Figura 31 - Equipamento DRX e montagem utilizada para medição de tensão residual 73
Figura 32 - Desvio médio aritmético (Ra) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min. 75
Figura 33 - Desvio médio aritmético (Ra) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min. 76
Figura 34 – Rugosidade total (Rt) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min. 78
Figura 35 – Rugosidade total (Rt) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min. 78
Figura 36 - Coeficiente de vazio Kp em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min. 80
Figura 37 - Coeficiente de vazio Kp em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min. 81
Figura 38 - Profundidade de rugosidade do núcleo (Rk) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min. 82
Figura 39 - Profundidade de rugosidade do núcleo (Rk) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min. 83
Figura 40 - Coeficiente de simetria Rsk em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min. 85
Figura 41 - Coeficiente de simetria Rsk em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min. 85
Figura 42 - Coeficiente de simetria Rku em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min. 87
Figura 43 - Coeficiente de simetria Rku em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min. 88

Figura 44 - Coeficiente de simetria Rpk em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.....90
Figura 45 - Coeficiente de simetria Rpk em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.....90
Figura 46 - Coeficiente de simetria Rvk em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.....92
Figura 47 - Coeficiente de simetria Rvk em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.....93
Figura 48 – Comparação de rugosidade (Sa) x (Ra) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.....98
Figura 49 - Comparação de rugosidade (Sa) x (Ra) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.....102
Figura 50 – Curva de abbott da superfície retificada com fluido: (A) mix, (B) integral, (C) sintético e (D) MQL, na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3. 105
Figura 51 – Curva de abbott da superfície retificada com fluido: (A) mix, (B) integral, (C) sintético e (D) MQL, na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material retificado de 21,82 x 10^3 mm^3. 107
Figura 52 – Curva de abbott da superfície retificada com fluido: (A) mix, (B) Integral, (C) sintético e (D) MQL, na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3. 108
Figura 53 – Curva de abbott da superfície retificada com fluido: (A) mix, (B) integral, (C) sintético e (D) MQL, na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material retificado de 21,82 x 10^3 mm^3. 109
Figura 54 – Topografia da superfície retificada com fluido mix na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 1,93 x 10^3 mm^3.....111
Figura 55 - Topografia da superfície retificada com fluido integral na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 1,93 x 10^3 mm^3.....111
Figura 56 - Topografia da superfície retificada com fluido de corte sintético na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 1,93 x 10^3 mm^3..112
Figura 57 - Topografia da superfície retificada com MQL na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 1,93 x 10^3 mm^3. 112

Figura 58 - Topografia da superfície retificada com fluido mix na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 21,82 x 10^3 mm^3.....113
Figura 59 - Topografia da superfície retificada com fluido integral na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 21,82 x 10^3 mm^3.....114
Figura 60 - Topografia da superfície retificada com fluido de corte sintético na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 21,82 x$10^3$$mm^3$..114
Figura 61 - Topografia da superfície retificada com MQL na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 21,82 x $10^3$$mm^3$. 115
Figura 62 - Topografia da superfície retificada com fluido mix na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 1,93 x 10^3 mm^3.....116
Figura 63 - Topografia da superfície retificada com fluido de corte integral na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 1,93 x 10^3 mm^3..117
Figura 64 - Topografia da superfície retificada com fluido de corte sintético na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 1,93 x 10^3 mm^3..117
Figura 65 - Topografia da superfície retificada com MQL na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 1,93 x 10^3 mm^3. 118
Figura 66 - Topografia da superfície retificada com fluido mix na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 21,82 x 10^3 mm^3.....119
Figura 67 - Topografia da superfície retificada com fluido de corte integral na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 21,82 x $10^3$$mm^3$.120
Figura 68 - Topografia da superfície retificada com fluido de corte sintético na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 21,82 x $10^3$$mm^3$.120
Figura 69 - Topografia da superfície retificada com MQL na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 21,82 x $10^3$$mm^3$. 121
Figura 70 - Tensão Residual em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min. 122
Figura 71 - Tensão Residual em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min. 123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos fluidos de corte e sua relação com a ação desejada...23
Tabela 2 - Comparação dos diferentes fluidos de corte. 24
Tabela 3 - Parâmetros de rugosidade. 33
Tabela 4 - Métodos mais comuns de medição de tensão residual. 58
Tabela 5 - Composição química (% em massa) do aço ABNT 4340. 67
Tabela 6 - Parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios 69
Tabela 7 - Matriz dos corpos de prova ensaiados (a) CDP1 ao CDP24 e (b) CDP25 ao CDP48. 70
Tabela 8 - Parâmetros do perfil de rugosidade das amostras na velocidade de mergulho 0,6 mm/min e volume de material removido de 1,93 x 10^3 mm^3. 95
Tabela 9 - Parâmetros do perfil de rugosidade das amostras na velocidade de mergulho 0,6 mm/min e volume de material removido de 21,82 x 10^3 mm^3. 96
Tabela 10 - Parâmetros do perfil de rugosidade das amostras na velocidade de mergulho 1,2 mm/min e volume de material removido de 1,93 x 10^3 mm^3. 100
Tabela 11 - Parâmetros do perfil de rugosidade das amostras na velocidade de mergulho 1,2 mm/min e volume de material removido de 21,82 x 10^3 mm^3. 101
Tabela 12 - Tensão residual medido nos corpos de prova antes do processo de retificação. 125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	*American Iron and Steel Institute*
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
CDP	Corpo de prova
DIN	*Deutsches Institut für Normung*
DRX	Difração de raios-X
FCBM	Fluidos de corte a base mineral.
FCBV	Fluidos de corte a base vegetal.
HRc	Dureza Rockwell C
ISO	*International Organization for Standardization*
JIS	*Japanese Industrial Standards*
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
SAE	*Society of Automotive Engineers*

LISTA DE NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

a_e	Penetração de trabalho (mm);
a_p	profundidade de mergulho (mm);
Cr	Cromo;
d	Parâmetro do reticulado;
d_s	Diâmetro do rebolo (mm);
d_w	Diâmetro da peça (mm);
$d_{\Phi\psi}$	Espaçamento interplanar da família de planos (h, k, l);
E	Módulo de elasticidade;
Kp	Coeficiente de vazio;
$l\mathrm{m}$	Comprimento de avaliação;
m	Coeficiente angular;
mA	Miliampere;
MPa	Mega Pascal;
n_w	Rotação da peça (Rpm);
pH	Potencial Hidrogeniônico;
Ra	Desvio médio aritmético (μm);
Rk	Profundidade de rugosidade do núcleo (μm);
Rku	Fator de achatamento do perfil;
Rp	Altura máxima do perfil;
Rpk	Altura reduzida do pico (μm);
Rq	Rugosidade média quadrática;
Rsk	Fator de assimetria do perfil;
Rt	Rugosidade total (μm);
Rvk	Profundidade reduzida dos vales (μm);
Rz	Rugosidade máxima (μm);
Sa	Desvio médio aritmético (μm);
Sbi	Índice de rolamento da superfície;
Sci	Índice de retenção de fluido no núcleo;
Sk	Profundidade da superfície do núcleo (μm);
Sku	*Kurtosis*;
Smc	Relação de área do material inverso (μm);
Smr	Relação de área do material (%);
Sp	Altura máxima do pico (μm);

Spc	Média aritmética da curvatura do pico (1/mm);
Spk	Altura de pico de superfície reduzida (μm);
Sq	Raiz quadrado médio da altura (μm);
Ssk	*Skewness*;
St	Altura Total da Superfície (μm);
Sv	Profundidade máxima do vale (μm);
Svi	Índice de retenção de fluido no vale;
Svk	Profundidade de vales de superfície reduzida (μm);
Sz	Altura máxima (μm);
v	coeficiente de Poisson;
v_f	Velocidade de mergulho (mm/min);
v_j	Velocidade do jato de fluido;
Vm	Volume do material (mm^3/mm^2);
Vmc	Volume de material no núcleo (mm^3/mm^2);
Vmp	Volume de material no pico (mm^3/mm^2);
v_s	Velocidade de corte do rebolo (m/s);
Vv	Volume de vazio (mm^3/mm^2);
Vvc	Volume do vazio do núcleo (mm^3/mm^2);
Vvv	Volume de vazio no vale (mm^3/mm^2);
v_w	Velocidade da peça (m/min);
Zi	Amplitudes parciais;
$\varepsilon_{\Phi\psi}$	Deformação;
θ	Ângulo de refração;
λ	Comprimento de onda dos raios-x;
σØ	Tensão Residual;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 15
2. OBJETIVOS 17
2.1 Objetivos específicos 17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
3.1 Processo de retificação 18
3.2 Fluidos de corte 21
3.2.1 Fluido de corte sintético *25*
3.2.2 Fluido de corte integral de base mineral *26*
3.2.3 Óleo vegetal *27*
3.3 Mínima quantidade de lubrificante (MQL) 27
3.4 Parâmetros de superfície 2D 30
3.4.1 Desvio médio aritmético (Ra) *33*
3.4.2 Rugosidade total (Rt) *34*
3.4.3 Coeficiente de vazio (Kp) *35*
3.4.4 Parâmetros de superfície *36*
3.4.5 Coeficiente de simetria Rsk *40*
3.4.6 Coeficiente de simetria Rku *42*
3.5 Parâmetros 3D do perfil de rugosidade 44
3.6 Tensão residual 49
3.6.1 Métodos de medição de tensão residual. 56
3.6.2 Método de difração de raios-x 58
3.6.3 Método do sen$^2\psi$ ou múltipla exposição 60
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 63
4.1 Equipamentos e ferramentas utilizadas na retificação 64
4.2 Fluidos de corte e técnicas de aplicação 64
4.2.1 Lubri-refrigeração convencional *64*
4.2.2 Técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) *65*
4.3 Corpo de prova 66
4.4 Dressagem 68

4.5 Organização dos experimentos 68
4.6 Medição dos parâmetros de superfície 2D 70
4.7 Medição dos parâmetros de superfície 3D 71
4.8 Medição da tensão residual - Método de difração de raios-X 72
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 75
5.1 Desvio médio aritmético (Ra) 75
5.2 Rugosidade total (Rt) 77
5.3 Coeficiente de vazio (Kp) 79
5.5 Profundidade de rugosidade do núcleo (Rk) 82
5.6 Coeficiente de simetria (Rsk) 84
5.7 Coeficiente de simetria (Rku) 87
5.8 Altura reduzida do pico (Rpk) 89
5.9 Profundidade reduzida dos vales (Rvk) 92
5.10 Parâmetros 3D do perfil de rugosidade 94
5.11 Curva de Abbott–Firestone 104
5.12 Textura superficial 110
5.4 Tensão residual 122
6. CONCLUSÃO 126
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 129

1. INTRODUÇÃO

São crescentes as exigências por eficiência e confiabilidade das peças mecânicas, levando os fabricantes de produtos manufaturados a um maior entendimento dos processos de usinagem e dos pares tribológicos presentes no contato entre duas superfícies (SEDLACEK; PODGORNIK; VIZINTIN, 2009). De acordo com Goeke et al. (2014) uma das preocupações da área tribológica e da engenharia de superfície é com as superfícies em contato e com a diminuição da taxa de desgaste. Dessa forma, uma grande gama de processos de usinagem, especialmente os processos de acabamento de retificação e brunimento são analisados quanto ao seu potencial de gerar uma camada superficial que se adapte às questões tribológicas nas quais a peça seja submetida.

O processo de retificação tem como função conferir à peça um acabamento final, com finalidade de minimizar as irregularidades superficiais, por meio da interação entre os grãos abrasivos do rebolo e peça a ser retificada (ALVES; BIANCHI; AGUIAR, 2010). O principal objetivo nas operações de acabamento em materiais de alta dureza é de obter baixa rugosidade e estreitas tolerâncias geométricas e de forma (PUERTO et al., 2013).

Segundo Irani, Bauer e Warkentin (2005) o dano térmico é um dos principais fatores limitantes ao processo de retificação. De acordo com Malkin e Guo (2008) temperaturas elevadas podem causar vários tipos de danos térmicos à peça, tais como: revenimento da camada superficial endurecida, transformação de fases, tensão residual de tração desfavorável, trincas e redução da resistência à fadiga.

As tensões residuais em superfícies de componentes é um fator importante em relação ao comportamento dos materiais em aplicações de engenharia. Quando tensões residuais estão presentes em um componente elas podem impactar positivamente ou negativamente o comportamento do componente em serviço. Os impactos negativos da tensão residual podem incluir trincas ou distorções depois da têmpera e variação dimensional durante a usinagem. No entanto, tensões compressivas podem melhorar significativamente o desempenho em serviços tal como: aumento da vida em fadiga sobre condições cíclicas de carregamento e atuar como inibidora a nucleação e propagação de trincas (MARTELL; LIU; SHI, 2014).

Logo, os fluidos de corte no processo de retificação exercem duas importantes funções: refrigeração e lubrificação, sendo a função lubrificante a mais importante (MALKIN; GUO, 2008). Porém, de acordo com BoubeKri, Shaikh e Foster (2010), existe um alto custo com relação aos fluidos de corte devido ao seu elevado consumo na indústria e ao tratamento desse fluido de corte no momento do descarte de forma a atender as exigências ambientais. Os custos com fluidos de corte segundo Silva e Soares (2009) podem atingir aproximadamente 20% dos custos de produção.

A aplicação de óleos vegetais na forma de fluidos de corte é bastante interessante devido ao seu poder lubrificante e devido à matéria prima abundante que possui o Brasil na produção de soja, milho, amendoim, algodão, babaçu e palma (RUNGE; DUARTE,1990). A maioria dos trabalhos relatados menciona os óleos de soja, milho e de mamona como possíveis candidatos e com um enorme potencial para a utilização como fluidos de corte no setor de fabricação (SINGH, 2006).

Outra forma de lubri-refrigeração é a tecnologia MQL, onde a função lubrificante é garantida pelo óleo e a função de arrefecimento é proporcionada principalmente pelo ar comprimido. Esta pequena quantidade de fluido é suficiente para reduzir atrito no corte, diminuindo a tendência de adesão dos materiais e isso faz da tecnologia uma alternativa vantajosa, uma vez que combina a funcionalidade de arrefecimento com um consumo muito baixo de fluidos (HADAD; SADEGHI, 2013). Dessa forma, a tendência mundial é diminuir a utilização em quantidade dos fluidos de corte ao passar dos anos, exigindo mais pesquisas sobre o assunto, com o objetivo na redução da participação desses fluidos nos processos produtivos e, consequentemente, no meio ambiente, sem que haja alteração na qualidade do componente usinado.

2. OBJETIVOS

O projeto tem como objetivo geral estudar a integridade superficial do aço ABNT 4340 endurecido após retificação por meio da análise dos parâmetros de superfície 2D, 3D e da tensão residual, com variação de diferentes tipos de fluidos de corte verificando o desempenho dos mesmos.

2.1 Objetivos específicos

- Analisar os parâmetros de superfície e tensão residual no aço ABNT 4340 endurecido e retificado;
- Avaliar o desempenho de diversos fluidos de corte e da tecnologia de mínima quantidade de lubrificante na retificação do aço ABNT 4340 endurecido;
- Analisar os possíveis danos causados na integridade superficial da peça através das solicitações térmicas e mecânicas utilizando diferentes fluidos de corte;
- Verificar a influência da variação dos parâmetros de usinagem na integridade superficial do aço ABNT 4340 endurecido;
- Avaliar o desempenho da formulação biodegradável do fluido mix, bem como a tecnologia de mínima quantidade de lubrificante (MQL) no processo de retificação com variação das condições de usinagem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

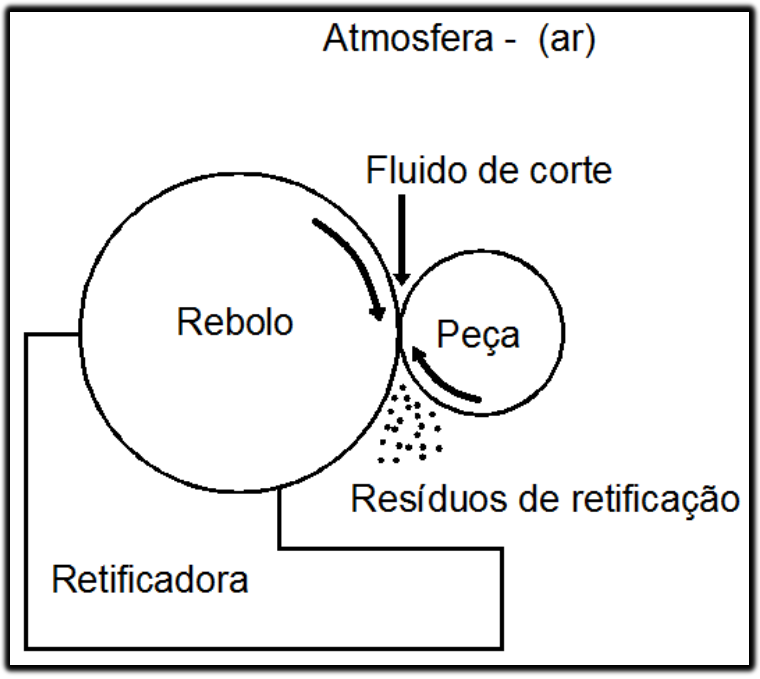
Este capítulo de revisão bibliográfica, objetiva apresentar os assuntos concernentes à pesquisa desenvolvida, sendo estes: processo de retificação, os parâmetros que irão caracterizar o aço ABNT 4340 utilizado na pesquisa (parâmetros de superfície e tensão residual) bem como os elementos de influência na integridade superficial (fluidos de corte, velocidade de mergulho, volume de material retificado).

3.1 Processo de retificação

O processo de retificação é muito utilizado na fabricação de componentes mecânicos que exigem elevada qualidade superficial, dimensional e geométrica. Ocorre por meio da interação entre os grãos abrasivos de uma ferramenta (rebolo) e a peça a ser retificada (ALVES, 2007).

Segundo Marinescu et al. (2007) apud Damasceno (2010) o processo é composto por seis elementos básicos: a atmosfera (ar), fluido de corte, rebolo, peça, resíduos de retificação e a retificadora de acordo com Figura 1.

Figura 1 - Elementos envolvidos na retificação cilíndrica externa.



Fonte: DAMASCENO, 2010, adaptado.

A retificação é de suma importância para indústria metal-mecânica proporcionando aos componentes mecânicos um elevado grau de tolerâncias dimensionais e geométricas quando comparado com as operações de usinagem (fresamento, torneamento, furação dentre outras). No entanto, o processo é de baixa eficiência já que um elevado consumo de energia deve ser revertido em uma baixa taxa de remoção de material se comparado com as operações de usinagem citadas anteriormente (MACHADO et al., 2008).

No processo de usinagem por retificação são utilizados grãos abrasivos de alta dureza para retirada de material. Esse processo é muito complexo, pois diversas variáveis estão envolvidas e essas são muito sensíveis a pequenas alterações (MALKIN; GUO, 2008).

Alguns parâmetros de corte no processo de retificação que se destacaram na pesquisa, em que os mesmos influenciaram nos parâmetros de saída (acabamento superficial e tensão residual) são apresentados como segue:

- Penetração de trabalho (a_e):

A penetração de trabalho é a grandeza que representa o quanto a ferramenta penetra em relação ao plano de trabalho e é medida perpendicularmente à direção de avanço da peça ou rebolo. O emprego de elevada penetração de trabalho se torna responsável por aumentar a área de contato entre peça e ferramenta ampliando assim, o número de grãos em contato com a superfície que esta sendo usinada (DINIZ et al., 2003).

- Velocidade de mergulho (v_f):

Pode-se definir a velocidade de mergulho como a taxa de remoção de material. Esta variável é influenciada pela rigidez da retificadora, da quantidade de material a ser removida, do acabamento desejado, além da quantidade de fluido de corte utilizado no processo e do material da peça (DINIZ et al., 2003).

- Velocidade do rebolo (v_s):

Segundo Graf (2004) a velocidade do rebolo em m/s pode ser expressa por:

$$v_s = \frac{\pi \,.\, d_s \,.n_s}{60 \,.\, 1000} \quad (1)$$

Onde:

- d_s = diâmetro do rebolo
- n_s = rotação do rebolo
- π = 3,1416

A velocidade pode alterar as principais variáveis de saída do processo como a força tangencial de corte e o acabamento superficial. O emprego de altas velocidades de corte se deve principalmente ao desenvolvimento de novas ferramentas abrasivas e retificadoras mais rígidas. Sendo assim, é possível reduzir a espessura do cavaco não deformado e consequente redução das forças de retificação, menores taxas de desgastes do rebolo e menores valores de rugosidade (DAMASCENO, 2010).

A dressagem também conhecida como “dressamento” ou “afiação” consiste em preparar o rebolo através da usinagem da superfície de trabalho, geralmente utilizando uma ferramenta de diamante (dressador). As finalidades são de manter a agressividade do rebolo por meio da remoção dos grãos abrasivos desgastados e os

cavacos de material incrustados entre os grãos, obtenção de concentricidade entre a superfície de trabalho e o eixo de rotação do rebolo, manter as formas geométricas (perfis) do rebolo e produzir peças dentro das dimensões e rugosidades exigidas, além de evitar a ocorrência de altas temperaturas na interface peça/rebolo. (MACHADO et al., 2008).

Quando os grãos abrasivos do rebolo começam a se desgastar tornando incapaz de remover material da superfície retificada ou o perfil do rebolo está desgastado deve ser feito a dressagem do rebolo. É importante saber o momento ideal de se fazer a dressagem, pois se a mesma for executada antecipadamente do ponto de reafiação tem-se uma perda no tempo de trabalho executado e podendo aumentar o custo final do produto (WANG, 2008).

3.2 Fluidos de corte

A usinagem é um dos processos mais utilizados na manufatura. É comum a utilização dos fluidos de corte neste processo devido à melhoria nas condições tribológicas sendo que o emprego do fluido de corte aumenta a vida útil da ferramenta, além, de minimizar a geração de calor durante o processo e remover cavaco (OLIVEIRA; ALVES, 2007).

Os fluidos de corte são normalmente utilizados para melhorar o desempenho do processo de retificação oferecendo lubrificação e arrefecimento na interface rebolo-peça, para retirada de cavaco na interface de corte e para proporcionar a lubrificação na zona de contato entre a peça e o rebolo. Contudo, a eficiência do fluido de corte vai depender de uma aplicação correta na interface rebolo-peça, velocidade do fluido, quantidade de fluxo, direção de aplicação, projeto do bocal e outros fatores (SILVA; BIANCH; AGUIAR, 2001).

De acordo com Runge e Duarte (1990) as funções dos fluidos de corte podem ser resumidas conforme a relação a seguir:

- refrigerar;
- lubrificar;
- beneficiar o acabamento superficial da peça;
- diminuir o desgaste das ferramentas;

- remover os cavacos da área de corte;
- proteger contra a corrosão (a máquina, a ferramenta, a peça).

O fluido de corte, ao agir como lubrificante reduz o atrito e a área de contato entre ferramenta e o cavaco, e sua eficiência irá depender da capacidade de penetrar na interface ferramenta/cavaco no período de tempo disponível para formar um filme que tenha resistência menor que a resistência do material da peça. Em contra partida, como refrigerante, o fluido de corte irá beneficiar a transferência de calor da região de corte, reduzindo a temperatura da ferramenta e da peça, mesmo que a temperatura na interface ferramenta/cavaco não seja significativamente alterada (MACHADO et al., 2008).

Nos processos de usinagem, quando a aplicação dos fluidos de corte for feita de maneira adequada, melhora a produtividade e reduz custos, proporcionando a utilização de velocidades de corte mais altas com maiores profundidades de corte e taxas de remoção (BIANCHI et al., 2012).

Comumente, para um bom desempenho o fluido de corte não deve apenas melhorar a execução do processo de usinagem, mas também cumprir uma série de requisitos de não-toxidade, não ser prejudicial à saúde dos operadores na indústria, e não apresentar risco de incêndio. Uma das desvantagens do uso de fluidos de corte é a eliminação dos resíduos de retificação após o uso (TAZEHKANDI; PILEHVARIAN; DAVOODI, 2014).

Segundo Runge e Duarte (1990) existem algumas propriedades que os fluidos de corte devem possuir além de suas propriedades de refrigerar e lubrificar. A maioria dessas propriedades é conferida aos fluidos de corte pelos aditivos utilizados conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades dos fluidos de corte e sua relação com a ação desejada.

Propriedades dos fluidos de corte	Ação esperada
Anticorrosivas	Proteger a peça, as ferramentas e os componentes da máquina contra a corrosão
Antioxidantes	Evitar a oxidação prematura do fluido devido a ação das elevadas temperaturas
Antidesgastantes	Reforçar as propriedades lubrificantes do óleo mineral. São proporcionadas pela matéria graxa e aditivos
Antiespumantes	Evitar a formação de espumas que possam impedir a visão da operação ou influir negativamente sobre efeito de refrigeração mediante a formação de bolhas de ar na área de corte.
Anti-solda ou EP (Extrema pressão)	Resisitir as elevadas pressões de corte quando o poder lubrificante e os aditivos antidesgastantes não são suficientes. Exemplos: aditivos EP a base de enxofre, cloro e outros
Ausência de odores	Assegurar que o meio ambiente onde a operação é executada esteja livre de odores fortes e/ou desagradaveis
Viscosidade adequada	Ser suficientemente baixa para assegurar fácil circulação pela máquina. Manter um jato de fluxo contínuo na área de corte e permitir rápida decantação dos cavacos e outros resíduos.
Estabilidade	Assegurar que o produto seja homogêneo ao chegar a área de corte.
Transparência	Permitir a observação da área de corte.
Compatibilidade com o meio ambiente	Compatibilidade com a sáude humana. Compatibilidade com o metal que está sendo usinado. Ter alta tratabilidade para descarte e ser de fácil eliminação, evitando danos ao meio ambiente

Fonte: RUNGE e DUARTE,1990.

Fluidos de corte mineral, emulsionáveis, semi-sintéticos e sintéticos quando envolvidos no ciclo ecológico com o ar, com o solo e a água, seu efeito toxicidade danifica o ecossistema. Principalmente quando os fluidos de corte evaporam e estão dispostos como um vapor, as micro-partículas podem ocasionar problemas graves de saúde, como câncer de pulmão, doenças respiratórias, doenças dermatológicas e genéticas. Em contra partida, fluidos de corte a base vegetal e a tecnologia de mínima quantidade de lubrificante (MQL) possuem um enorme potencial de utilização quanto ás limitações citadas anteriormente (CETIN et al., 2011).

Os fluidos de corte possuem características particulares, vantagens e desvantagens conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação dos diferentes fluidos de corte.

FLUIDO	FUNÇÃO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Óleo Vegetal	Excelente Lubrificante	Renováveis. Menos tóxicos. Biodegradáveis.	Menor poder refrigerante.
Integral	Excelente Lubrificante	Longa vida útil. Boas propriedades anticorrosivas.	Menor poder refrigerante. Causa danos a saúde. Não são biodegradáveis.
Sintético	Excelente poder refrigerante.	Vida útil maior. Excelente dissipação de calor.	Baixo poder lubrificante. Poluentes e tóxicos
Tecnologia MQL	Lubrificante	Mínima quantidade de lubrificante. Ambientalmente amigável.	Formação de "borra" e névoa

Fonte: (CETIN, 2011; WANG, 2008; HEISEL et. al 1998) adaptado.

A utilização de fluidos de corte repetidamente ao longo do tempo induz a alterações químicas. Estas alterações são devido aos efeitos ambientais, contaminação a partir de limalhas de metal e a presença de óleos estranhos na emulsão. O crescimento de bactérias e fungos se torna perigoso para o ambiente e também prejudicam os fluidos de corte. Os fluidos de corte degradam gradualmente em qualidade e como eles perdem a sua qualidade a troca deles é obrigatório. A eliminação de resíduos dos fluidos de corte tem um alto custo e além de ter efeitos negativos sobre o meio ambiente (TAZEHKANDI; PILEHVARIAN; DAVOODI, 2014).

Os aditivos químicos utilizados na composição dos fluidos de corte têm uma extensa variedade de funções. As mais importantes destas funções podem ser

consideradas como lubrificação com extrema pressão, emulsionantes, prevenção a corrosão, controle do pH, propriedades anti-espumante, prevenção de odor e melhoria do ponto de inflamação. O desempenho de fluidos de corte com aditivos de extrema pressão são geralmente esperados para um melhor desempenho em termos de redução do desgaste da ferramenta, forças de corte, integridade superficial, precisão da peça e vida útil da ferramenta com relação aos fluidos de corte sem aditivos de extrema pressão (CETIN et al., 2011).

3.2.1 Fluido de corte sintético

Os fluidos de corte sintéticos são soluções químicas isentas de óleo mineral que contém substâncias inorgânicas, além, de outros materiais dissolvidos em água, sendo à maioria refrigerante, mas alguns são lubrificantes (EL BARADIE, 1996).

Estes fluidos constituem de sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidade, biocidas e inibidores de corrosão entre outros adicionados à água. (MORAIS, 2014).

Tais fluidos possuem um bom poder de dissipação rápida de calor, excelente poder detergente e proporcionando boa visibilidade nas regiões de corte, simplicidade no preparo da solução, elevada resistência à oxidação do fluido e à ferrugem. Possui algumas desvantagens sendo que seu baixo poder lubrificante, formação de compostos insolúveis e de espuma para determinas operações de usinagem podem comprometer a integridade superficial do componente usinado (WANG 2008).

Damasceno (2010) afirma que outra desvantagem é a necessidade de controlar a concentração de fluido alterada por fatores como evaporação de água e formação de resíduos e também maiores custos com descarte desse fluido.

A aplicação do fluido a base de água em altas velocidades se torna difícil quando comparada aos óleos puros devido a sua baixa viscosidade favorecer um jato disperso ao se usar bocais com desenho convencional, além de exigir ao operador posicionar o bocal o mais perto possível do arco de retificação para diminuir a dispersão. Um fator que pode levar à dispersão do jato de fluido durante a tentativa de aumentar a velocidade de sua saída é um projeto ineficaz do bocal de aplicação de fluido de corte e das tubulações. Quando o sistema de aplicação

(bomba, tubulações e projeto do bocal) for otimizado o desempenho dos fluidos de corte será aumentado (WEBSTER et al., 1995).

3.2.2 Fluido de corte integral de base mineral

Os óleos de corte puros que são utilizados conforme fornecidos, isto é, sem a adição de água, podendo ser integralmente de óleo mineral ou óleo mineral aditivado. Os óleos minerais puros não apresentam boas propriedades lubrificantes quando comparados aos óleos minerais compostos ou aditivados, contudo, apresentam um baixo custo e normalmente se destinam à lubrificação em operações leves, tais como aquelas que ocorrem com alumínio, magnésio e latão. No entanto, é importante a adição de aditivos por que em algumas operações de usinagem as propriedades de transportar cargas são inadequadas para as severas condições experimentadas na zona de corte (El BARADIE, 1996).

Segundo Gonçalves (2008) os fluidos integrais podem ser usados por muito tempo desde que sejam mantidos livres de contaminantes. O acúmulo de contaminação provoca a degradação dos aditivos e das propriedades dos fluidos integrais fazendo com que a vida útil desse fluido seja abreviada.

De acordo com Belinato (2010) os óleos de base mineral são de difícil degradação e podem trazer sérios danos ambientais quando não manuseados adequadamente. O descarte incorreto desses fluidos prejudica o meio ambiente, devido formar uma fina camada sobre a superfície da água que bloqueia a passagem de ar e luz atrapalhando a fotossíntese de algas e plantas, o que impede a respiração dos animais aquáticos.

Os fluidos de corte de base mineral apresentam risco significativo para a saúde, ocasionando doenças aos operadores na indústria, devido ao contato da pele com o fluido de corte. Como fluidos de corte são complexos em sua composição, podem provocar irritações e alergias (SHASHIDHARA; JAYARAM, 2010).

A biodegradabilidade de óleo mineral é baixa, o que pode causar poluição ao longo prazo para o meio ambiente. Além disso, óleo mineral é classificado nos recursos não renováveis (WANG et al., 2016).

3.2.3 Óleo vegetal

Segundo Aluyor, Obahiagbon e Ori-jesu (2009) os óleos vegetais são obtidos de sementes oleaginosas que contenham fruto ou nozes e que possam ser extraídos por métodos que envolva pressão, extração por solventes ou a combinação dos mesmos. Estes óleos são submetidos a uma série de tratamentos físico e químico para seu refino e quando aplicado na ciência da tribologia, se enquadram na classe conhecida como óleos fixos, pois eles não volatilizam sem se decompor.

De acordo com Khan, Mithu e Dhar (2009) alguns fatores importantes tornam os óleos vegetais como uma alternativa viável para fluidos de corte tais como: produzir um filme lubrificante homogêneo e forte que dá a óleo vegetal uma maior capacidade de absorver pressão, melhor qualidade superficial da peça reduzindo o atrito e geração de calor, não são tóxicos para o meio ambiente, são biologicamente inertes não produzindo doença orgânica significativa e efeito tóxico.

Em geral os fluidos de corte a base vegetal têm desempenhos superiores a outros tipos de fluidos de corte o que reduz o desgaste da ferramenta, rugosidade e as forças de corte, melhorando a integridade da superfície, a precisão da peça e vida útil da ferramenta (OZCELIK et al., 2011).

O foco do estudo de lubrificantes tem passado de biodegradabilidade para renovabilidade ao longo dos anos como um resultado das mudanças no pensamento ambiental dos seres humanos. Biodegradabilidade é o aspecto mais importante, colocando em conta o ambiente e a saúde humana. Considerando biodegradabilidade, ésteres e óleos vegetais são mais apropriados para formular fluidos de corte, porque eles são facilmente biodegradáveis em contraste com os fluidos de corte de minerais, sintéticos e semi-sintéticos (TAZEHKANDI; PILEHVARIAN; DAVOODI, 2014).

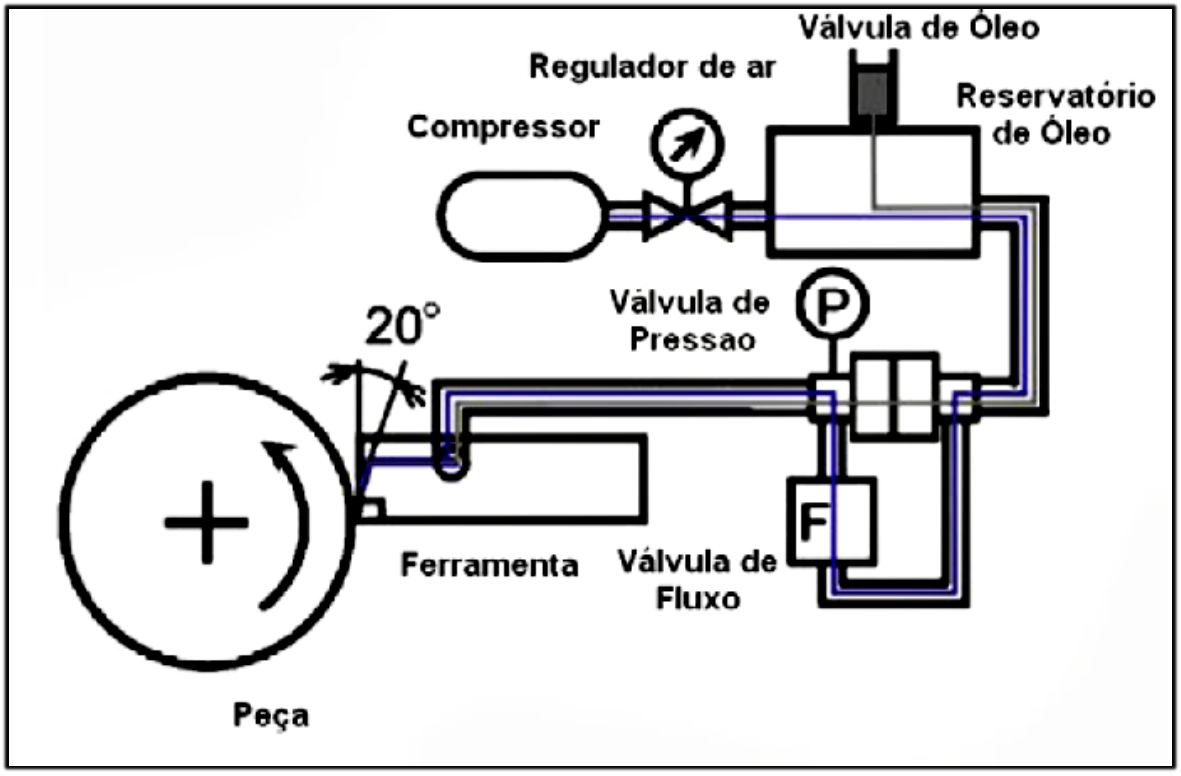
Os fluidos de corte a base vegetal são ambientalmente amigáveis, renovável, menos tóxico e reduzem os custos de tratamento de resíduos deste fluido devido à sua maior biodegradabilidade (CETIN et al., 2011).

3.3 Mínima quantidade de lubrificante (MQL)

A técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) baseia-se em uma mistura de óleo e ar comprimido que tem como característica formar uma névoa

aplicada na região do corte no lugar da lubrificação convencional de fluidos de corte, miscíveis ou imiscíveis em água. O sistema de mínima quantidade de lubrificação mais empregado é o de pressão, conforme ilustrado na Figura 2 (OBIKAWA et al., 2006).

Figura 2 - Desenho esquemático de um sistema de Mínima Quantidade de Lubrificante por pressão.



Fonte: OIKAWA, 2009.

Está técnica já desempenha um papel significativo em um número de aplicações práticas. O sistema MQL refere-se ao uso de uma pequena quantidade de fluidos de corte tipicamente a uma taxa de fluxo de 50 $mL.h^{-1}$ até 500 $mL.h^{-1}$ (KHAN; MITHU; DHAR, 2009).

A névoa que é formada ocorre principalmente devido á mistura ar-líquido que é gerada para a lubri-refrigeração causada pela função dos sistemas de MQL. Os diversos óleos utilizados nessa tecnologia possuem baixa vaporização, sendo assim, as partículas da nevoa produzida pelo fluido de corte, são projetadas na interface peça-ferramenta evitando grandes dispersões da névoa. Os danos que podem

ocorrer no organismo do ser humano são causados por partículas que são capazes de entrar e permanecer nos pulmões, cujo diâmetro varia entre 0,5 μm e 5 μm. Sendo assim, a tecnologia de MQL oferece riscos à saúde do trabalhador, tornando necessário realizar pesquisas mais aprofundadas nesta área (HEISEL et al., 1998).

Nesta tecnologia, a função lubrificante é garantida pelo óleo e a função de arrefecimento é proporcionada principalmente pelo ar comprimido. Pequena quantidade de fluido é suficiente para reduzir atrito no corte diminuindo a tendência de adesão dos materiais e isso faz da tecnologia MQL uma alternativa interessante, uma vez que combina a funcionalidade de arrefecimento com um consumo muito baixo de fluidos (HADAD; SADEGHI, 2013).

Heisel et al. (1998) relata que o fato dos sistemas de mínima quantidade de lubrificante requerer um espaço muito pequeno para instalação ele pode ser fixado em diversas posições. Deste modo, o sistema de MQL torna se flexível podendo ser aplicado tanto na retificação quanto em outros processos de corte.

A minimização de fluido de corte também leva a benefícios econômicos por meio de redução de custos de lubrificantes e peça de trabalho / ferramenta / tempo do ciclo de lavagem da máquina. Por isso, a usinagem utilizando a tecnologia de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) tem sido aceita com sucesso (DHAR; KAMRUZZAMAN; AHMED, 2005).

Existem algumas vantagens da tecnologia MQL, comparado com o sistema convencional (HEISEL et al., 1998).

- Peças usinadas utilizando a tecnologia de MQL ficam quase secas, sendo desnecessária uma operação de lavagem;
- Não é justificável a recuperação do fluido utilizado no processo, devido ao baixo conteúdo de óleo restante no cavaco;
- Em relação ao volume da peça usinada, a quantidade de fluido utilizado no MQL é muitas vezes menor do que na lubri-refrigeração convencional;

Diniz, Marcondes e Coppini (2003) apresentam algumas desvantagens dos processos de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) sendo:

- Consumo – não é possível recuperar o fluido que é aplicado por névoa. O consumo deve ser considerado mesmo a pequenas quantidades de vazão.

Alguns produtos sintéticos podem ter consumo muito inferior, quando utilizados em concentrações normais, como 5%.

- Emissão sonora – As linhas de ar comprimido utilizadas na técnica MQL, produzem muito ruído, normalmente com potência superior as exigidas. Entretanto, esse ruído pode prejudicar a saúde poluindo o ambiente, além de prejudicar a comunicação entre as pessoas no ambiente de trabalho;
- Poluição Ambiental – A névoa que é produzida no ambiente de trabalho devido á pulverização do lubrificante, é composta por muitas partículas de óleo que exigem cuidados especiais. O ideal é que a máquina seja totalmente vedada e possua um sistema de exaustão com controle de partículas;

3.4 Parâmetros de superfície 2D

De acordo com Matos Junior (2009), a rugosidade ou textura primária é formada por um conjunto de irregularidades (pequenas saliências e reentrâncias) que caracterizam uma superfície de um componente, onde foi ocasionada por um agente que atacou a superfície como rebolo, ferramentas, partículas abrasivas, dentro outros.

A rugosidade é utilizada, na maior parte, como parâmetro para controlar um processo de usinagem. Alguns parâmetros influenciam na rugosidade de uma superfície, como máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, operação de usinagem e geometria e material da ferramenta. As contribuições relativas de cada um desses parâmetros podem ser identificadas por métodos estatísticos aplicados ao resultado da medição da rugosidade (MACHADO et al., 2008).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2003), a rugosidade tem uma grande importância no comportamento dos componentes mecânicos e pode influenciar em diversos fatores sendo eles:

- Aparência da peça;
- Vedação da peça;
- Resistência à corrosão e à fadiga;
- Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- Resistência ao desgaste;
- Qualidade de deslizamento entre as peças;

- Possibilidade de ajuste do acoplamento forçado;
- Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes.

De acordo com Winter (2004), a magnitude da rugosidade está diretamente relacionada com:

- coeficiente de atrito;
- uma correta lubrificação;
- desgaste;
- resistência mecânica;
- rigidez do equipamento utilizado no processo de fabricação;
- tipos de abrasivos, dentre outros fatores.

Segundo Malkin e Guo (2008), no processo de retificação a rugosidade de uma peça depende da lubrificação, e é diretamente afetada pelo tamanho do grão abrasivo presente no rebolo, das condições de dressagem, quantidade de material removido, do tempo de centelhamento e condições de lubri-refrigeração.

Machado et al., (2008) indicam que, em geral, uma peça que foi usinada é analisada em termos macrogeométricos (dimensões, forma e orientação) e microgeométricos (rugosidade) depois da usinagem, ou até mesmo durante a usinagem, de acordo com as tolerâncias e rugosidade especificadas no projeto. A rugosidade é influenciada por muitas variáveis e pode ser avaliada por vários parâmetros, podendo esses ser classificados em:

- Parâmetros de amplitude: estabelecidos por alturas dos picos, profundidades dos vales ou por ambos, desconsiderando o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície;
- Parâmetros de espaço: estabelecidos pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície;
- Parâmetros híbridos: estabelecidos pela junção dos parâmetros de amplitude e de espaço.

A operação de retificação é escolhida para o acabamento final no processo de usinagem de um componente mecânico devido esta operação satisfazer os requisitos de rugosidade e tolerâncias (MALKIN; GUO, 2008).

Para medição da rugosidade utiliza-se um instrumento chamado rugosímetro. A medição pode ser feita com ou sem contato entre o apalpador e a peça, sendo que, o mais usual é com contato e além de ser simples de medir, versátil e de baixo custo. O equipamento é composto por um apalpador de diamante que percorre em linha reta, uma distância previamente definida e esse deslocamento do apalpador é convertido em sinal elétrico e então, amplificado. O resultado pode ser apresentado na forma numérica, pelo gráfico do perfil que representa a superfície analisada (SOUZA, 2007).

Diversas organizações, como DIN, JIS e ISO dispõem de normas técnicas para análise da rugosidade de superfícies. Tabela 3 exibe os principais parâmetros utilizados na quantificação da rugosidade de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002).

Tabela 3 - Parâmetros de rugosidade.

Símbolo	Nome	Definição
Ra	Desvio médio aritmético	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem
Rq	Rugosidade média quadrática	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
Rt	Rugosidade total	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
Rz	Rugosidade máxima	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.
Rsk	Fator de assimetria do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e Rq ao cubo, no comprimento de amostragem.
Rku	Fator de achatamento do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de Rq à quarta potência no comprimento de amostragem.

Fonte: DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2003.

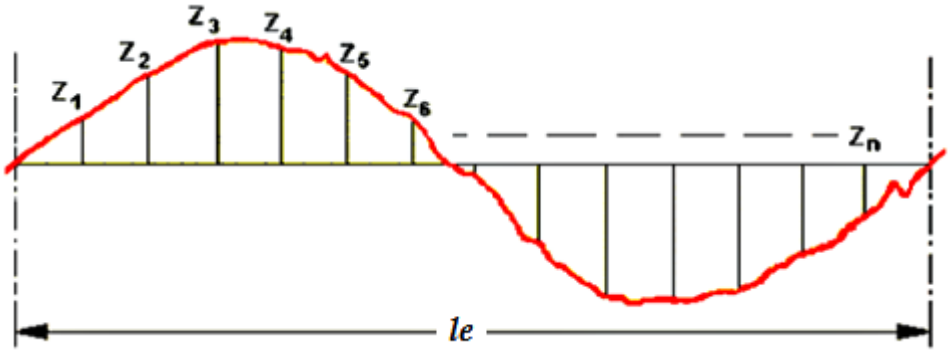
3.4.1 Desvio médio aritmético (Ra)

O parâmetro de rugosidade mais amplamente conhecido e utilizado é a média aritmética, desvio do perfil de Ra; no entanto, não descreve as superfícies de contato totalmente, uma vez que uma superfície completamente diferente pode ter valor semelhante ou mesmo idêntico de desvio médio da superfície e vice-versa (SEDLACEK; PODGORNIK; VIZINTIN, 2011).

Com o objetivo em calcular este parâmetro, é tomado á média aritmética dos desvios do perfil tendo como referência a linha média, e é definido sobre um

comprimento de amostragem (*le) conforme* Figura 3. No entanto, o desvio médio aritmético (Ra) de uma superfície pode variar consideravelmente sem afetar o desempenho da superfície (OLIVEIRA, 2004; LEACH, 2014).

Figura 3 - Desvio médio aritmético (Ra)



Fonte: OLIVEIRA, 2004.

Para o cálculo do desvio médio aritmético, pode-se utilizar a Equação 2.

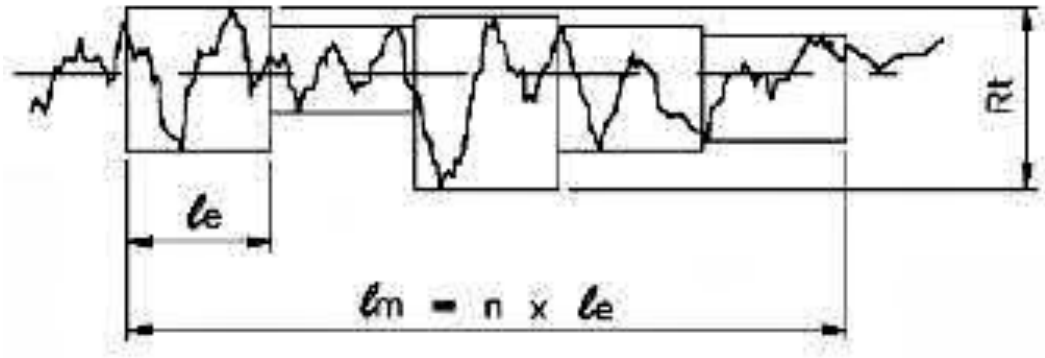
$$R_a = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + \cdots Z_n}{n} \rightarrow R_a = \frac{1}{l}\int_0^1 [Z(x)]dx \quad (2)$$

Segundo Davim (2010), a desvantagem em utilizar valores de desvio médio aritmético Ra, é que não consegue distinguir entre um perfil mais pontiagudo e um perfil com uma ondulação mais suave. Existe a possibilidade, que as superfícies dos perfis muito diferentes com diferentes frequências e formatos possa ter os mesmos valores de Ra.

3.4.2 Rugosidade total (Rt)

A rugosidade total (Rt) é definida como a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação ($l\mathrm{m}$), conforme representado na Figura 4.

Figura 4 – Rugosidade total



Fonte: SOUZA, 2007.

Uma das aplicações desse parâmetro, é que, ele pode ser utilizado em superfícies de vedação, superfícies dinamicamente carregadas, parafusos altamente carregados e superfícies de deslizamento em que o perfil efetivo é periódico. O parâmetro Rt é de fácil obtenção quando o equipamento fornece o gráfico da superfície, tem grande aplicação e fornece informações complementares ao Ra. A desvantagem é a possibilidade de obtenção de resultados enganosos, como a presença de vales profundos, devido á rigidez de avaliação (PIRATELLI, 2011).

3.4.3 Coeficiente de vazio (Kp)

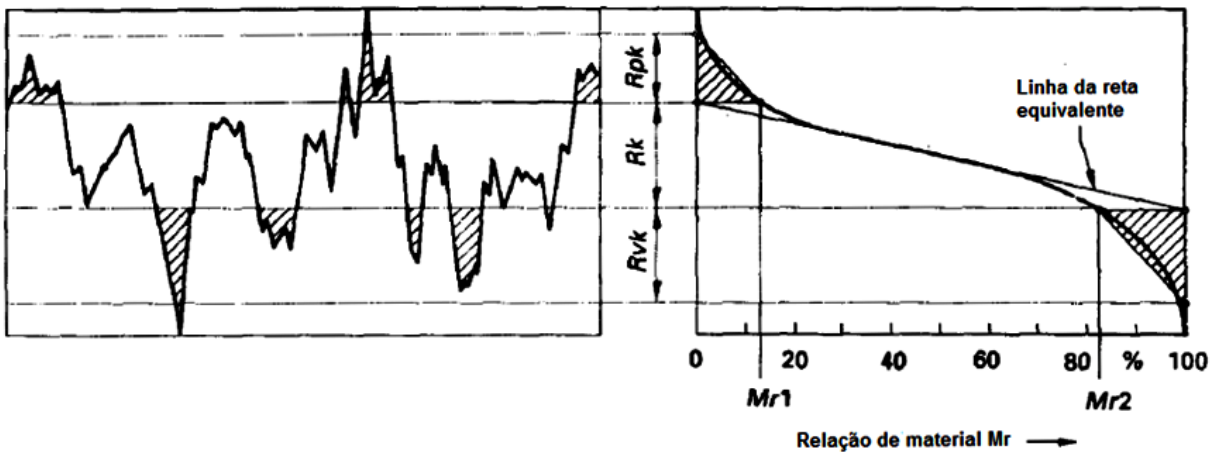
Segundo Matos Junior (2009), o coeficiente de vazio Kp = Rp/Rt é considerado um dos parâmetro mais importantes, no qual Rp é definido como a distância do pico mais elevado até a linha média do perfil e Rt é definido como a distância entre o pico mais elevado e o vale mais profundo.

Pawlus (1994), estudando superfícies de cilindro analisou vários cilindros brunidos com diferentes tipos de pedras de brunimento e ferramentas com diferentes desenhos. Concluiu-se que por meio de parâmetros como o coeficiente de vazio, consegue-se fazer uma descrição precisa de uma superfície de cilindro brunido. Tal parâmetro pode ser considerado um dos mais importantes na avaliação.

3.4.4 Parâmetros de superfície

Faz-se necessário o uso de parâmetros de superfícies com propriedades funcionais estratificadas, para garantir um bom caminho para inspecionar e qualificar a produção de superfícies texturizadas em aplicação industrial. O grupo de parâmetros Rk, definido na DIN 4776 e adotada em ISO 13565-2, é graficamente extraído da curva de Abbott-Firestone da superfície de medição conforme Figura 5, objetivando identificar três principais regiões da curva: profundidade de rugosidade do núcleo Rk; altura reduzida do pico RPK e altura reduzida do vale Rvk. Adicionalmente, as porcentagens de rolamento Mr1 e Mr2 são, respectivamente, os pontos de transição que separam os picos salientes e vales profundos do núcleo da rugosidade perfil (SILVA et al., 2013).

Figura 5 - Curva de Abbott-Firestone

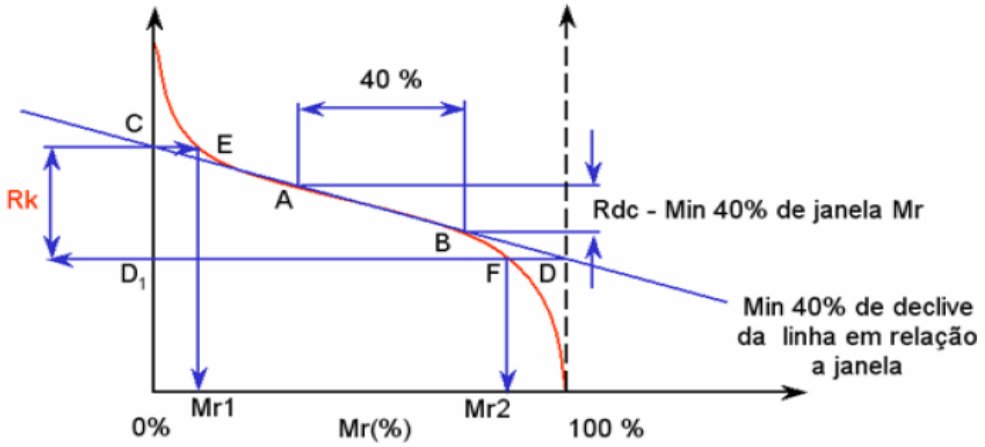


Fonte: Norma ISO 13565, 2003.

- **Profundidade de rugosidade do núcleo (Rk)**

O parâmetro Rk é definido como sendo a parcela central do conjunto de rugosidade. Com o intuito em determinar este parâmetro, é traçada uma secante de menor inclinação possível sobre a curva de Abbott-Firestone, cuja componente horizontal corresponde a 40% dos pontos do perfil medido conforme Figura 6. (ISO 13565-2, 2003).

Figura 6 - Representação gráfica de Rk.



Fonte: OLIVEIRA, 2004.

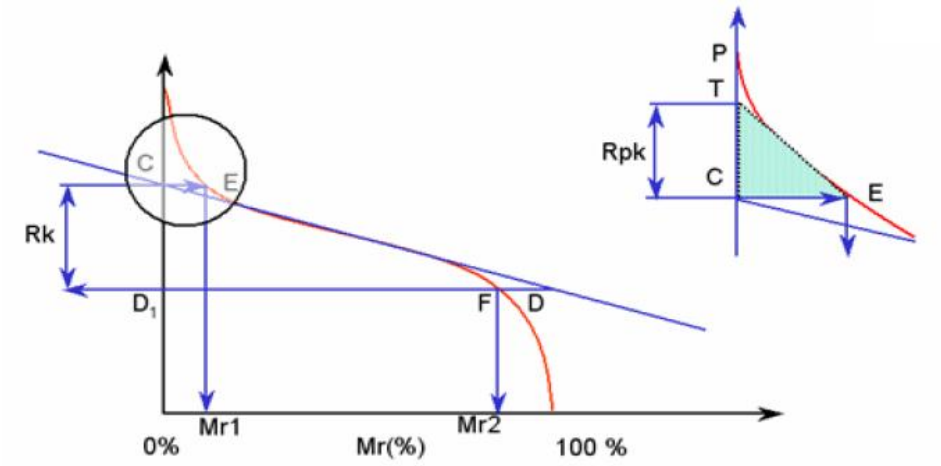
Este parâmetro está associado com a parte intermediária da rugosidade e que influencia no desempenho de certas superfícies. Por meio deste parâmetro é possível medir a taxa de desgaste de uma superfície em contato (OLIVEIRA, 2004).

O parâmetro Rk descreve a diferença de altura entre a intersecção desta reta com o eixo de 100% e o eixo de 0% e os pontos Mr1 e Mr2 (%) que correspondem à intersecção entre o perfil de referência e as retas paralelas ao eixo de porcentagem definindo o parâmetro Rk.

- **Altura reduzida do pico (Rpk)**

Caracteriza a porção do perfil que se encontra acima da rugosidade central. Valor da rugosidade média dos picos que estão acima da área de contato mínima do perfil conforme Figura 7.

Figura 7 - Representação gráfica de Rpk.



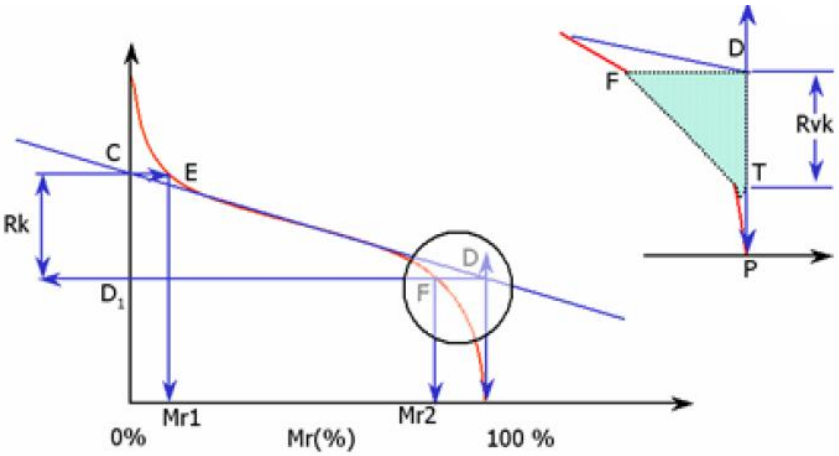
Fonte: OLIVEIRA, 2004.

Este parâmetro está associado à região que se desgasta nos primeiros contatos relativos entre as superfícies que estão trabalhando em contato. Em aplicações onde a intenção é avaliar o amaciamento de motores de combustão interna, o parâmetro Rpk é aplicável (OLIVEIRA, 2004).

- **Profundidade reduzida dos vales (Rvk)**

O parâmetro Rvk caracteriza a porção do perfil que está abaixo da rugosidade central. Valor da rugosidade média dos vales que estão abaixo da área de contato do perfil. O parâmetro Rvk está relacionado com a capacidade de uma superfície em reter algum tipo de fluido. A Figura 8 representa o perfil Rvk (OLIVEIRA, 2004).

Figura 8 - Representação gráfica de Rvk.



Fonte: OLIVEIRA, 2004.

Este parâmetro é muito utilizado na indústria automotiva e aeroespacial, devido os motores de combustão interna, precisarem de pontos intrínsecos de lubrificação e retenção de fluido simultaneamente (OLIVEIRA, 2004).

- **Porção do material (Mr1)**

É o percentual de material correspondente à linha superior da região de rugosidade central e a curva de Abbott, ou seja, taxa em porcentagem que determina a fração de contato mínima no núcleo do perfil de rugosidade (MATOS JUNIOR, 2009).

- **Porção do material (Mr2)**

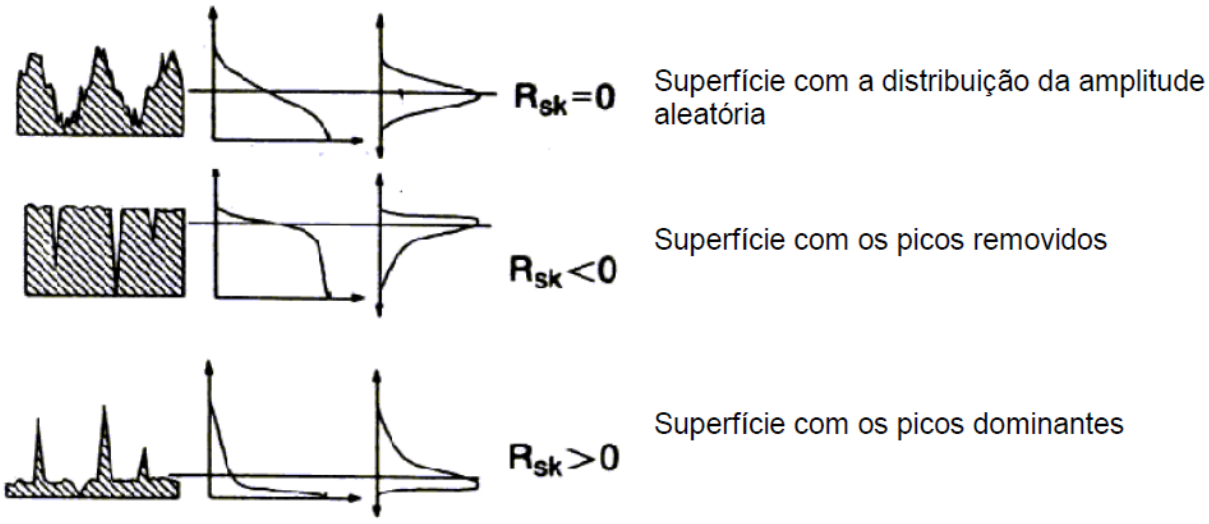
É o percentual de material correspondente á linha inferior da região de rugosidade central e a curva de Abbott, ou seja, taxa, em porcentagem, que determina a maior fração de contato no núcleo do perfil de rugosidade (MATOS JUNIOR, 2009).

3.4.5 Coeficiente de simetria Rsk

A assimetria de distribuição é o critério de avaliação do formato da curva de distribuição das amplitudes das irregularidades em relação á linha de referência, no comprimento de medição conforme Figura 9. O coeficiente de simetria é a expressão pelo terceiro momento central da função de probabilidade de distribuição das amplitudes das irregularidades conforme expresso pela Equação 3 (FREITAS, 2006).

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3}\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} Z_i^3\right] \qquad (3)$$

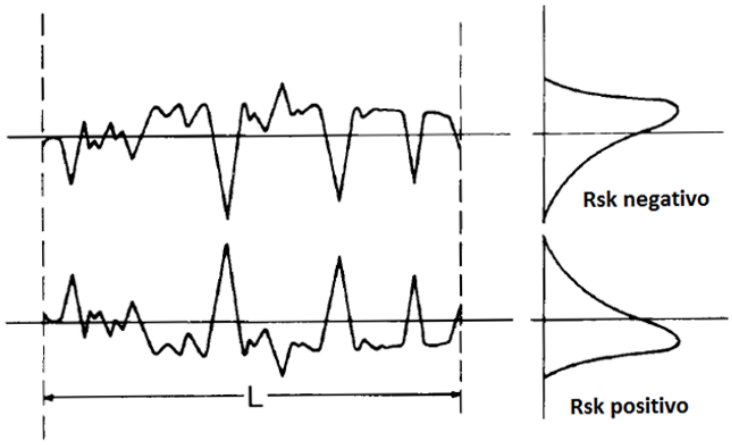
Figura 9 - Coeficiente de simetria Rsk.



Fonte: FREITAS, 2006.

A forma da curva é um parâmetro muito explicativo. Perfil simétrico dá uma curva de distribuição de amplitude, que é simétrico em relação à linha de centro e um perfil não simétrico resulta em uma curva inclinada. O sentido da inclinação da curva dependente se a maior parte do material está acima da linha média (inclinação negativa) ou abaixo da linha média (inclinação positiva) Figura 10. A utilização deste parâmetro pode fazer uma diferenciação entre dois perfis tendo o mesmo valor Ra (LEACH, 2014).

Figura 10 - Diferença entre assimetria positivo e negativo.



Fonte: LEACH, 2014.

Percebe-se, que o parâmetro Rsk é um parâmetro adimensional e depende dos valores de desvio médio Rq e das amplitudes parciais Zi.

Segundo Sedlacek, Podgornik e Vizintin (2011), no caso do deslizamento a seco, as superfícies com um Rsk positivo deve também apresentar boa resistência à adesão. Valores positivos de Rsk proporciona uma maior área de contato real e um grande número de picos de contato, assim como às forças tangenciais e de aderência comparáveis à distribuição de Gauss. Em contrapartida, um Rsk negativo leva a menores valores e maiores desvios de força a partir da distribuição de Gauss.

Uma superfície porosa de ferro sinterizado ou fundido terá um grande valor de assimetria. Uma característica de uma boa superfície de apoio é que ela deve ter uma inclinação negativa, indicando a presença de poucos pontos que podem desgastar-se rapidamente e vales profundos relativos para reter lubrificante. Uma superfície com uma inclinação positiva é propenso a ter característica de pouca retenção de óleo, devido à falta de vales profundos necessários para reter lubrificante. Superfícies com uma assimetria positiva, tais como superfícies torneadas têm elevados picos que se projetam acima da linha média (LEACH, 2014).

Além do mais, Horng, Len e Lee (2002) afirmam que este parâmetro pode dar alguma indicação da existência de características pontiagudas. A assimetria negativa comparativamente grande pode vir a partir de tais superfícies que têm muitos vales (depressões) e boa propriedade de deslizamento. Inversamente, uma

assimetria positiva relativamente grande, pode indicar a presença de elevada superfície pontiaguda que poderia rapidamente desgastar-se em contato com outra superfície.

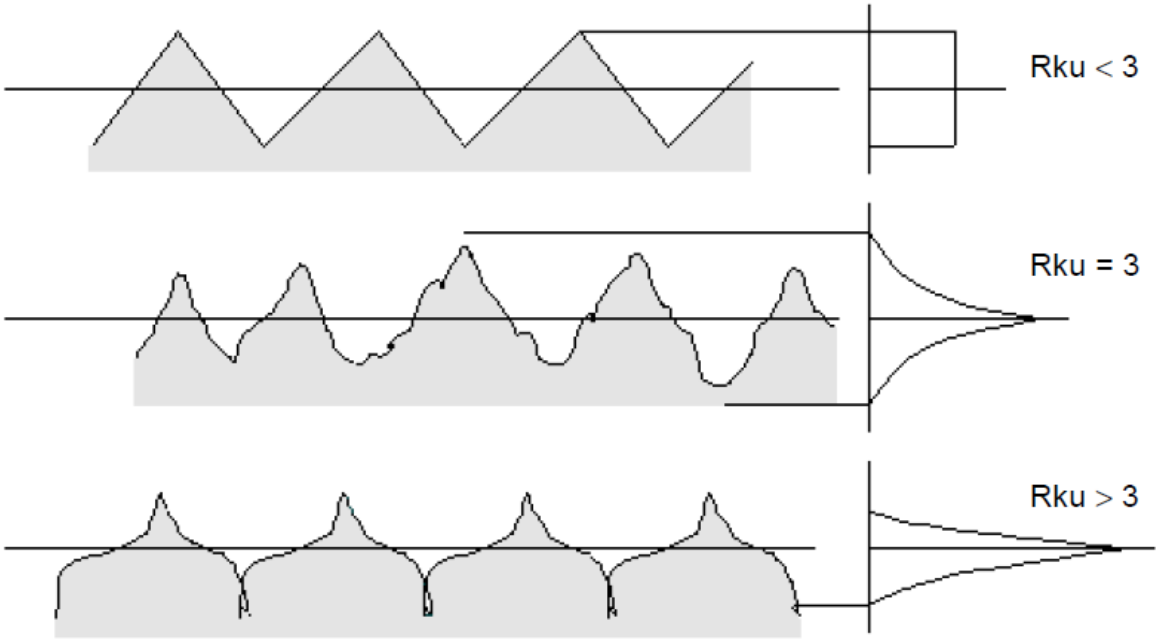
3.4.6 Coeficiente de simetria Rku

A curtose ou coeficiente de simetria é um parâmetro indicativo do formato das irregularidades superficiais. É expresso pelo quarto momento central da função de distribuição das amplitudes das irregularidades conforme Equação 4:

$$Rku = \frac{1}{Rq^4}\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} Z_i^4\right] \qquad (4)$$

Com este parâmetro mede-se a forma da curva de distribuição das amplitudes, ou seja, o afinamento ou achatamento dessa curva conforme Figura 11. Na prática, elevados valores de curtose ou simetria (superiores a K = 3), indicam que as irregularidades superficiais são pontiagudas, ou seja, mais suscetíveis as desgaste prematuro do que superfícies não pontiagudas, com valores de curtoses mais baixos (geralmente menores que K = 3). Desta forma, este parâmetro, juntamente com o percentual do suporte do perfil Mr, conforme item 3.4.4, e assimetria Rsk são complementares e igualmente importantes para a caracterização de superfícies de deslizamento e de mancais (FREITAS, 2006).

Figura 11 - Curtose Rku.



Fonte: FREITAS, 2006.

Superfícies com um alto valor Rku e valor positivo Rsk deve resultar num menor coeficiente de atrito estático. Por outro lado, valores elevados de Rku, o coeficiente de atrito estático diminuiria com carga reduzida, enquanto o aumento nos valores de Rsk resultaria em um aumento no coeficiente de atrito estático (SEDLACEK; PODGORNIK; VIZINTIN, 2011).

Segundo Nunes (2011) valores de Rku próximo de Rku = 3 indica que a distribuição da amplitude de um perfil possui uma forma gaussiana balanceada. Uma superfície irregular e áspera terá um Rku <3 e superfícies com muitos picos terá um Rku>3. Superfícies retificadas com um rebolo dressado, teria um Rku = 3. Parâmetros estatísticos, particularmente curtose, Rku, que é derivado a partir do quarto momento da amplitude função de distribuição, têm sido identificados como indicadores susceptíveis de resistência à fadiga.

Este é um parâmetro útil em prever o desempenho do componente com relação ao desgaste e retenção de lubrificação. Observe que curtose não pode dizer a diferença entre um pico e um vale (LEACH, 2014).

Em processos de usinagem pode utilizar este parâmetro para o controle do estado da ferramenta já que este parâmetro mede a agudez de um perfil. Por

exemplo: em uma ferramenta de corte que vai perdendo a sua afiação na retirada de material, logo á medida que a ferramenta é utilizada, ocorre mudança no seu perfil de corte. Faz-se necessário associar este parâmetro com outro em analises mais rigorosas ou de maior precisão (OLIVEIRA, 2004).

3.5 Parâmetros 3D do perfil de rugosidade

Os parâmetros 3D são nomeados com a letra S (*sufarce*) e os mesmos são avaliados dentro de uma área de amostragem, diferentemente dos parâmetros 2D que são avaliados dentro de uma linha de amostragem. No entanto, o tempo necessário para realização das medidas e o custo dos equipamentos, limitam um pouco da medição e análise 3D (LUCIANO, 2011).

Alguns parâmetros utilizados para caracterização dos principais aspectos topográficos são:

- **Parâmetros de amplitude**

  - ✓ *Rugosidade média (Sa)* - O parâmetro Sa é definido como a média aritmética dos valores absolutos das distâncias acima e abaixo do plano médio da área varrida (SERUP; JEMEC; GROVE, 2006);

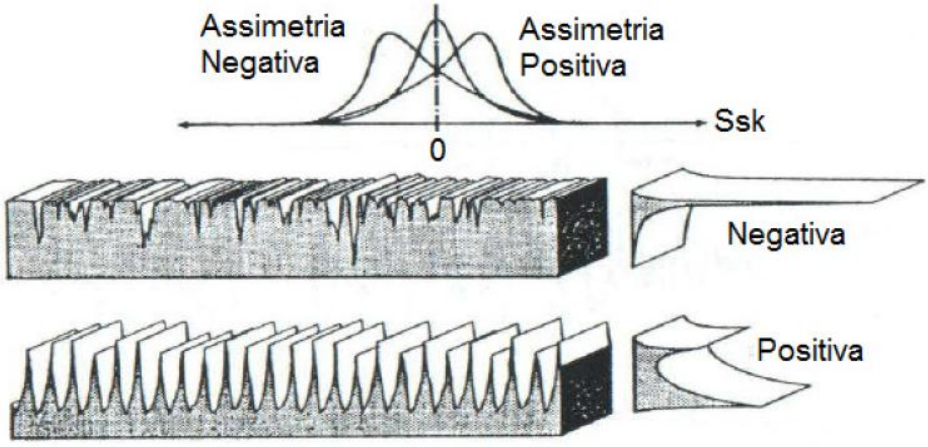
  - ✓ *Altura máxima (Sz)* - O parâmetro Sz é a altura máxima da superfície, isto é, a soma dos valores absolutos de Sp e Sv. Os parâmetros de altura máxima devem ser utilizados com cautela, pois são sensíveis a picos e vales isolados que podem não ser significativos (LEACH, 2013);

  - ✓ *Altura máxima do pico (Sp)* - O parâmetro Sp representa a altura máxima do pico, ou seja, a altura do ponto mais alto da superfície (LEACH, 2013);

  - ✓ *Profundidade máxima do vale (Sv)* – O parâmetro Sv representa a altura máxima do vale, isto é, a altura do ponto mais baixo da superfície (LEACH, 2013);

- ✓ *O parâmetro skewness (Ssk)* – Esse parâmetro é uma medida da assimetria dos desvios de uma superfície em relação ao plano médio. Portanto, ele descreve a forma da distribuição topográfica das alturas. Uma concentração de material próxima à superfície (superfície do tipo platô), seu valor é negativo. A concentração de material, quando não é próxima à superfície, (superfície com picos altos) o valor de Ssk é positivo. Já uma distribuição simétrica de altura indica um valor de Ssk próximo de zero, conforme Figura 12 (MUMMERY, 1992).

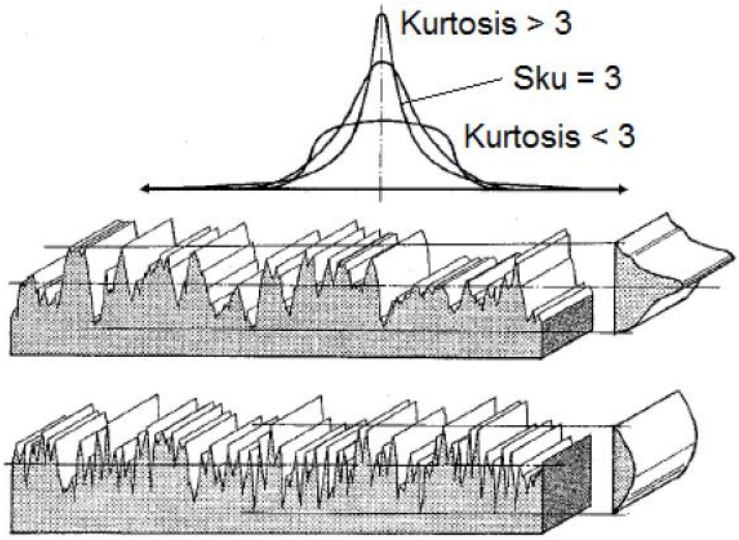
Figura 12 - Assimetria de distribuição de alturas de uma superfície.



Fonte: MUMMERY, 1992.

- ✓ *O parâmetro kurtosis (Sku)* – Representa o formato da curva, que pode ser tanto pontiaguda quanto mais plano Figura 13. Sku = 3 indica uma superfície gaussiana; Sku > 3 indica superfície com distribuição de alturas centralizada; Sku < 3 indica uma superfície com distribuição de alturas mais espalhadas (MUMMERY, 1992).

Figura 13 - kurtosis da curva de distribuição de amplitudes.



Fonte: (MUMMERY, 1992).

- **Parâmetros Funcionais**

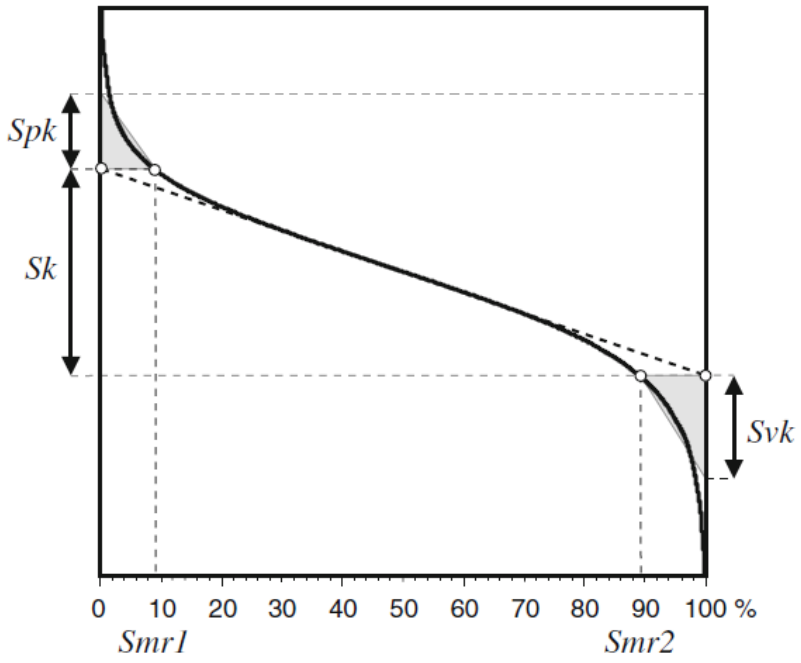
  - ✓ *Profundidade da superfície do núcleo (Sk)* - Esse parâmetro mede a altura de uma parte do material do núcleo. Descreve a parte mais plana da curva de relação do material, isto é, a região com maior aumento de material (SERUP; JEMEC; GROVE, 2006).

  - ✓ *Altura de pico de superfície reduzida (Spk)* - O parâmetro Spk, denota a altura do pico de superfície, que se projeta para além da superfície do núcleo. Um valor baixo de Spk indica que a superfície não inclui muitos sulcos e pode estar livre de picos extremos (SERUP; JEMEC; GROVE, 2006).

  - ✓ *Profundidade de vales de superfície reduzida (Svk)* - O parâmetro Svk indica a proporção de vales de uma superfície que se estendem no material abaixo do núcleo. Ele fornece informações úteis sobre sulcos e vales na superfície. Geralmente pode-se dizer que os elevados valores de Svk indicam que a superfície contém uma grande quantidade de rugosidade (SERUP; JEMEC; GROVE, 2006).

Basicamente estes parâmetros divide uma superfície em três categorias: núcleos, picos e vales conforme Figura 14 (SERUP; JEMEC; GROVE, 2006).

Figura 14 – Gráfico de construção dos parâmetros Spk, Sk e Svk.



Fonte: LEACH, 2013.

- **Parâmetros funcionais de volume**

  - ✓ *Volume de material no pico (Vmp)* – Esse parâmetro caracteriza o volume de material localizado nos picos mais altos da superfície que é removido durante um processo de desgaste (LEACH, 2013).

  - ✓ *Volume de vazio no vale (Vvv)* – Esse parâmetro caracteriza o volume de retenção de líquidos nos vales mais profundos da superfície. O mesmo não é afetado pelos processos de desgaste aplicados na superfície (LEACH, 2013).

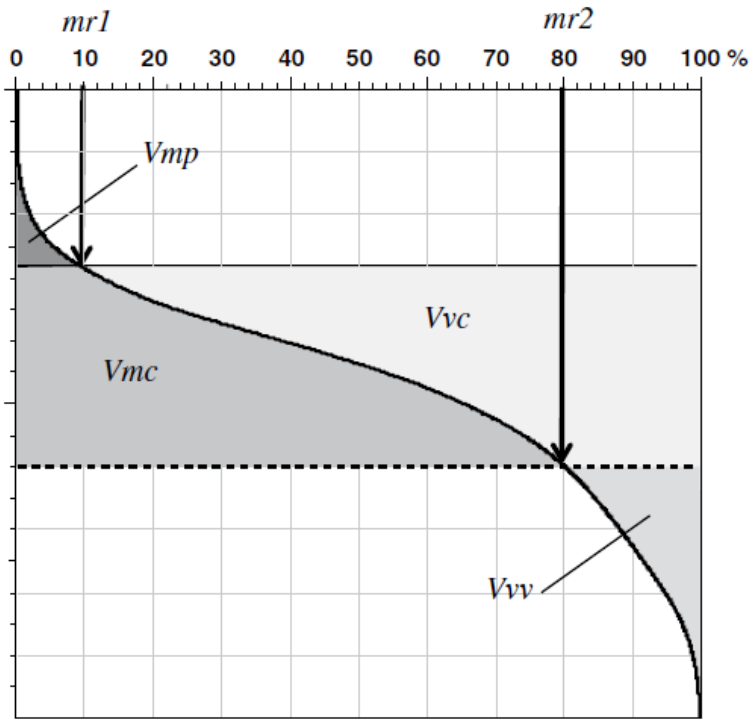
  - ✓ *Volume de material no núcleo (Vmc)* - O parâmetro Vmc representa a parte do material de superfície que não interage com outra superfície

em contato e que não desempenha qualquer papel na lubrificação (LEACH, 2013).

- ✓ Volume de vazio no núcleo (Vv) - Volume de vazios são muitas vezes úteis para avaliar a textura superficial de componentes mecânicos que são usados em contato com outras superfícies (LEACH, 2013).

A Figura 15 representa graficamente por meio da curva Abbot-Firestone os quatro parâmetros de volume calculados a partir de dois níveis de razão de rolamentos mr1 e mr2, sendo: volume de material do pico (Vmp), volume vazio abaixo do núcleo (Vvv), volume de material dentro do núcleo (Vmc) e volume vazio dentro do núcleo (Vvc), representado graficamente pela curva de Abbot-Firestone (LEACH, 2013).

Figura 15 - Curva de Abbott–Firestone e parâmetros de volume.



Fonte: LEACH, 2013.

3.6 Tensão residual

As tensões residuais envolvem deformações plásticas do material e são produzidas durante os processos de fabricação, usinagem, tratamento térmicos dentre outros processos. Podem estar presentes na fabricação do material não transformado, podem ser inseridas durante um processo de fabricação ou aparecem em serviço de carregamento (ROSSINI et al., 2011).

Segundo Lu (1996), as tensões residuais concentram no componente usinado quando todas as forças externas ou gradientes de temperaturas são removidos. Estas tensões são originadas pelo estado de tensão internas do material, que se mantem equilibrados quando livre de forças externas.

De acordo com Carmo (2006) uma das relevantes causas do aparecimento de tensões residuais, é a ocorrência de deformações plásticas não uniformes ao longo de uma secção da peça originadas por influência térmica e mecânica. Logo, para que estas tensões permaneçam na estrutura após a retirada dos esforços externos, alguma zona do componente, por menor que seja, foi solicitada além do limite elástico do material.

Dentre os fatores que podem alterar as tensões residuais pode-se citar: temperatura, tempo, tensão, deformação e microestrutura. Características do material também exercem influência nas tensões residuais sendo: o calor específico, condutividade térmica, coeficiente de dilatação, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, plasticidade, termodinâmica, mecanismos de transformações e transformações plásticas (BAHDESHIA, 2002 apud LEMOS, 2012).

Tensões residuais estão diretamente ligadas à nucleação e propagação de trincas. Geralmente tensões residuais compressivas são benéficas para o componente usinado, pois, elas atuam como inibidoras desse fenômeno. Tensões residuais de tração tendem a ser prejudiciais ao componente usinado, de tal modo que esses venham a falhar prematuramente, pois, existirá uma superposição entre tensão de serviço e tensão residual de tração, e isso favorece a instabilidade e a ruptura do material (BIANCH et al., 2001; SOUZA, 2012).

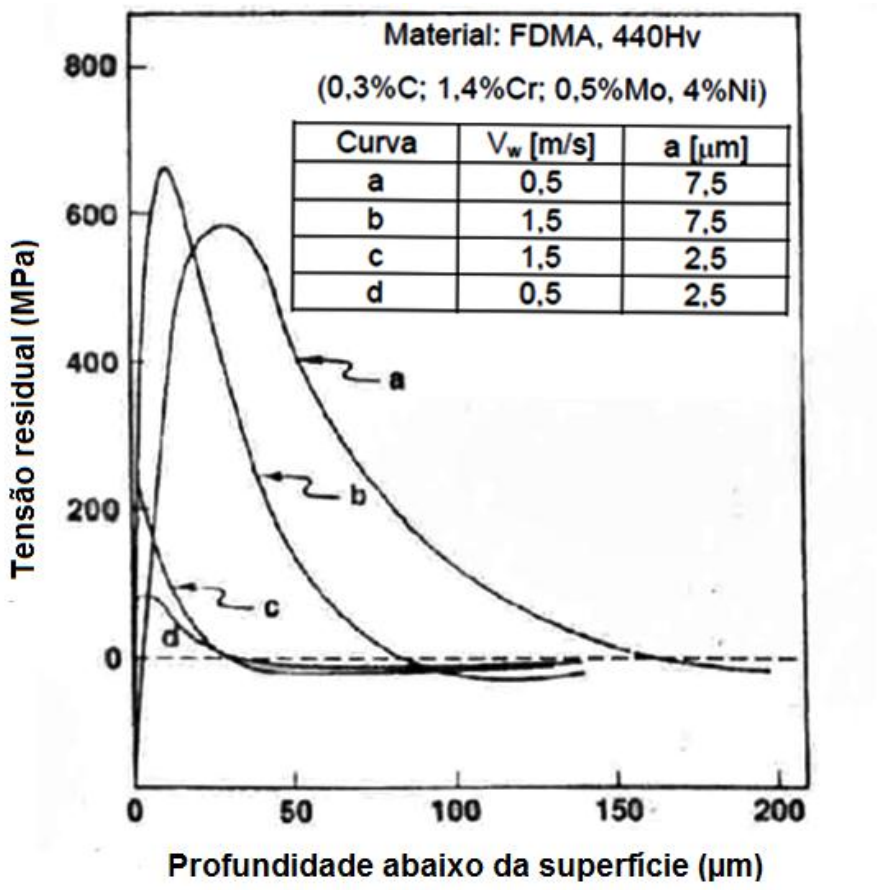
Segundo Martell, Liu e Shi (2014), as tensões residuais em superfícies de componentes é um fator importante em relação ao comportamento dos materiais em aplicações de engenharia. Quando tensões residuais estão presentes em um componente, elas podem impactar positivamente ou negativamente o

comportamento do componente em serviço. Os impactos negativos da tensão residual podem incluir trincas ou distorções depois da têmpera e variação dimensional durante a usinagem. No entanto, tensões compressivas podem melhorar significativamente o desempenho em serviços tal como: aumento da vida em fadiga sobre condições cíclicas de carregamento.

Na superfície de um material que contém tensões de tração e o mesmo sofrer um carregamento de tração, as tensões se somarão e este material ficará sobrecarregado localmente pelas tensões residuais de tração. Ao contrário, um material com tensões residuais compressivas em sua superfície sofrer um carregamento trativo, as tensões residuais compressivas irão subtrair as tensões trativas aumentando seu desempenho (NUNES, 2008).

As tensões residuais de tração se originam, sobretudo por deformações associadas com as tensões induzidas termicamente e temperaturas de retificação. Na zona de retificação de um material, a expansão térmica da parte mais quente do material retificado, ou seja, próximo à superfície da peça, é em partes reprimida pela porção mais fria do material na subsuperfície da mesma. Consequentemente, vão surgir tensões de compressão de origem térmica próximo a superfície do material, as quais, se suficientemente grandes, podem acarretar em um escoamento plástico em compressão. Durante o resfriamento subsequente, após a passagem da fonte calor da retificação, o material deformado plasticamente tende a contrair mais que o material da subsuperficie. Para que ocorra um equilíbrio mecânico da peça a tensão residual de compressão deve surgir nas profundidades mais elevadas da peça. Todavia, tensões residuais de compressão são inferiores quando comparadas com as tensões residuais de tração em ordem de magnitudes. O desenvolvimento de tensões termicamente induzidas é basicamente acompanhadas por transformações de fases sólidas as quais podem ocorrer durante o ciclo de aquecimento e resfriamento, pois, estas resultam em variações volumétricas. A Figura 16 mostra alguns exemplos da distribuição de tensão residual ao longo da direção de retificação para um aço ligado (MALKIN; GUO, 2008).

Figura 16 - Distribuição da tensão residual de um aço ligado, induzidas termicamente pelo processo de retificação.



Fonte: MALKIN e GUO 2008.

As tensões residuais podem ser classificadas em três tipos principais: tensões residuais macroscópicas ou do tipo I, tensões residuais microscópicas do tipo II e tensões residuais microscópicas do tipo III. Analisando as tensões macroscópicas, deve observar a sua intensidade que é maior e afeta uma porção maior de material, em contra partida as tensões residuais microscópicas desenvolve-se em pequenas escalas sendo essa de ordem atômica (NUNES, 2008).

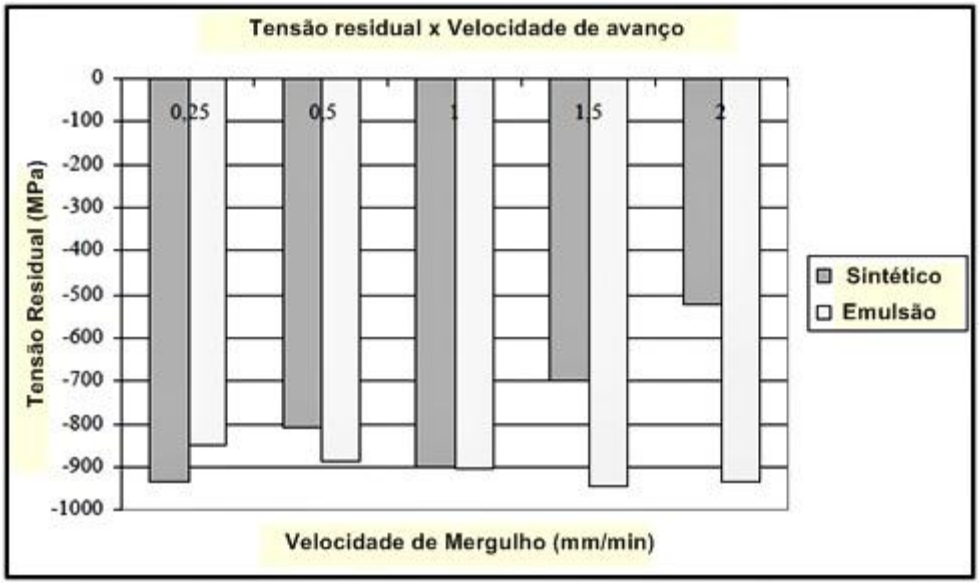
- Tensões residuais macroscópicas tipo I: estas se estendem ao longo de vários grãos do material. As tensões residuais macroscópicas originam principalmente de fontes ou condições mecânicas, térmicas ou químicas estendendo na dimensão do equipamento e afetando parte do volume do material. Elas adquirem um estado de equilíbrio e qualquer alteração como a retirada do material ou mudança de forma do componente, demanda que as

tensões se organizem para que uma nova configuração de equilíbrio seja alcançada (SUTÉRIO 2005; SOUZA 2012);

- Tensões residuais microscópicas tipo II: São formadas pela não homogeneidade da estrutura cristalina do material. Essas tensões quando atuam em pequenas distâncias (distância de um grão ou parte do grão) a região de influência no equilíbrio destas tensões se limitam a um pequeno número de grãos. Ocorre pelo processo de orientação dos grãos. Elas estão relacionadas ao balanço entre diferentes grãos ou fases presentes no material (SOUZA 2012; SANTOS 2012);
- Tensões residuais submicroscópicas tipo III: esta tem um alcance em pequenas distâncias atômicas no interior do grão do material a ser medido. São resultantes de imperfeições da rede cristalina, ocorrendo principalmente em regiões próximas às discordâncias (SUTÉRIO 2005);

Um estudo feito por Alves, Bianchi e Aguiar (2008) no processo de retificação por mergulho, verificou-se que as condições testadas resultaram em valores de tensão residual de compressão conforme Figura 17, sendo estas benéficas às propriedades mecânicas do material, proporcionando assim uma melhoria na integridade superficial. No geral, as menores tensões de compressão em todas as velocidades de mergulho foram para o fluido sintético exceto na velocidade de mergulho de 0,25 mm/min.

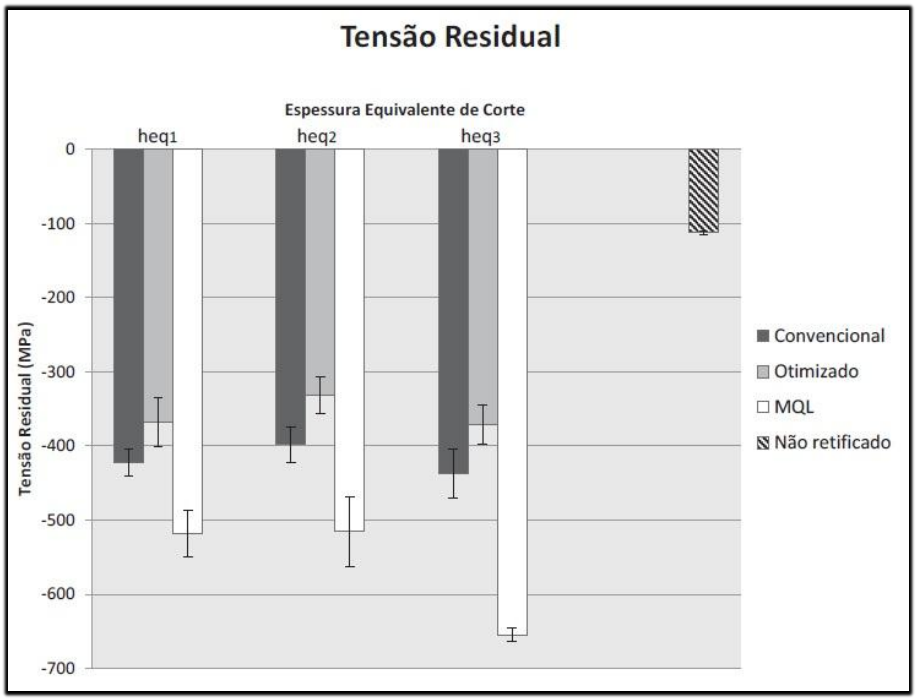
Figura 17 - Tensão de compressão para o uso de emulsão de base vegetal e fluido sintético para as cinco velocidades de mergulho empregadas.



Fonte: ALVES, BIANCHI E AGUIAR (2008), adaptado.

Simões (2012) mediu tensão residual por meio da técnica de difração de raios-X no processo de retificação externa de mergulho utilizando diferentes métodos de lubri-refrigeração e os resultados mostraram que todas as tensões obtidas para todas as técnicas de lubri-refrigeração foram de compressão sendo as maiores tensões para o MQL conforme Figura 18.

Figura 18 - Tensão residual para os três métodos de lubri-refrigeração: convencional, otimizado e MQL com espessura equivalente de corte heq1, heq2 e heq3; e tensão residual para um corpo de prova não retificado.

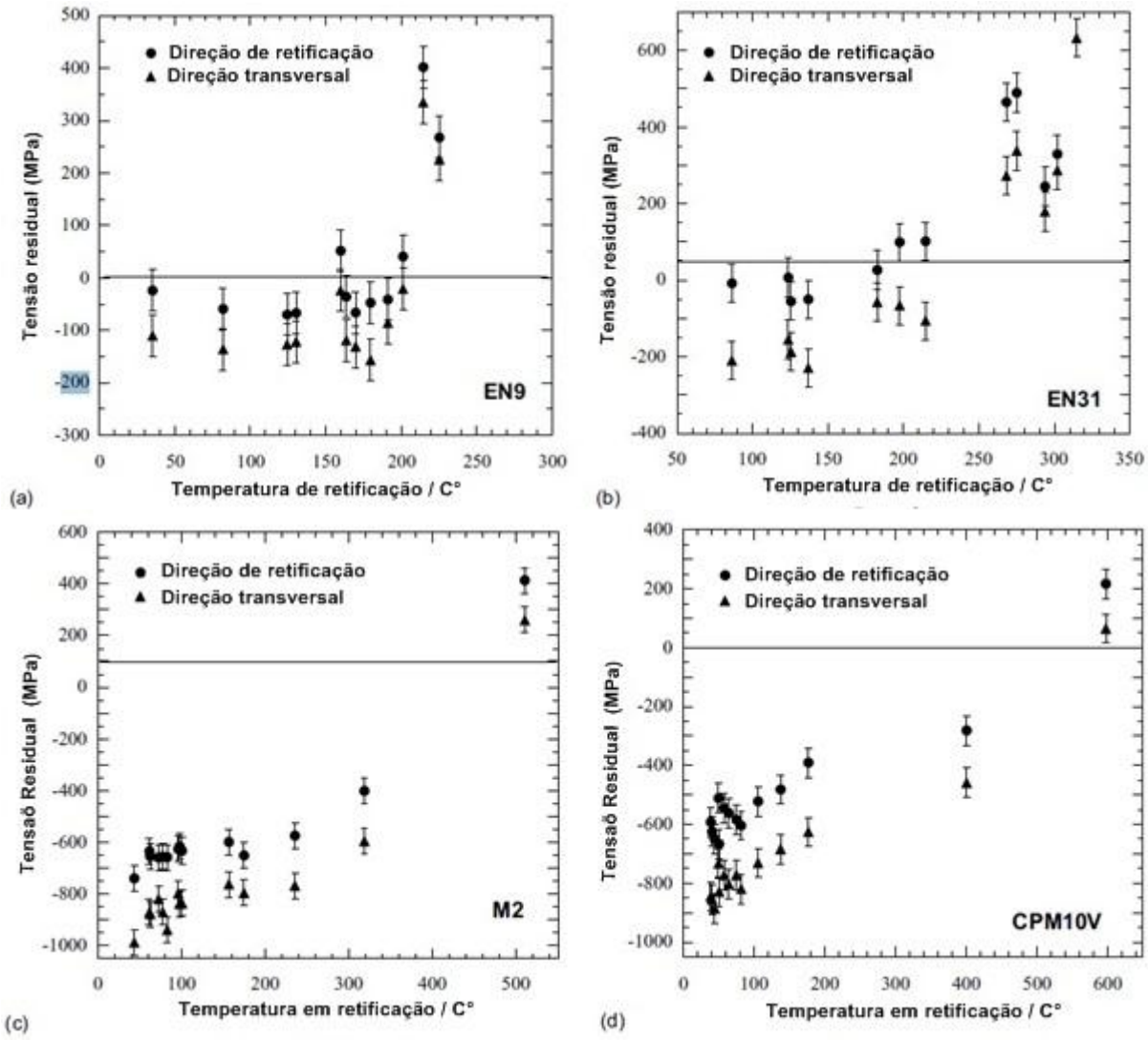


Fonte: SIMÕES 2012.

Foi verificado em um estudo de medição de tensão residual pelo método de difração de raios-x no processo de torneamento em material endurecido ABNT 8620, e foram verificadas tensões compressivas em todos os parâmetros analisados com valores médios de -150 MPa a -520 MPa com grande dispersão nos resultados de algumas amostras (FARIAS, 2009).

Balart et al. (2004) mediu tensão residual no processo de retificação em quatro aços endurecidos com composições químicas diferentes usando difração de raios-x e verificou-se que existe uma temperatura de transição crítica de 200, 200, 500 e 600°C, respectivamente para as amostras Figura 19 (a), (b), (c) e (d) na qual as tensões residuais mudam de compressiva para trativa.

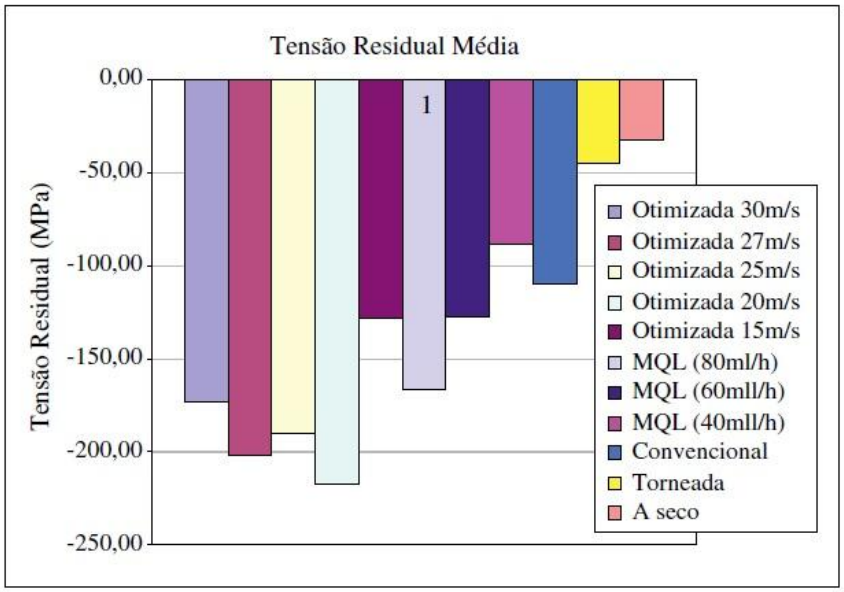
Figura 19 – Medição da tensão residual em função da temperatura da superfície medida durante a retificação: (a) EN9; (b) EN31; (c) M2 e (d) CPM10V.



Fonte: BALART et. al, 2004, adaptado.

Outro estudo feito por Alves, Bianchi e Aguiar (2010), verificou-se a tensão residual no processo de retificação com influencia das técnicas MQL, refrigeração otimizada e refrigeração convencional. As tensões obtidas foram compressivas conforme Figura 20, e as mesmas estavam diretamente ligadas á característica dos grãos do rebolo de CBN. A condição otimizada apresentou maiores tensões de compressão e o menor valor foi verificado para a condição a seco.

Figura 20 - Análise das formas de aplicação de fluido de corte na tensão residual



Fonte: ALVES, BIANCHI e AGUIAR, 2010.

Martell, Liu e Shi (2014) investigaram a variação da tensão residual no processo de torneamento e retificação de um aço AISI 1053 e observaram que as tensões residuais na superfície do aço em ambos os processos foram compressivas. Para o torneamento a tensão superficial média torna-se mais compressiva quando o número de passes ou profundidade de corte aumenta. Para o processo de retificação o aumento de passes conduz a uma tensão residual superficial mais compressiva e menor variação dessa tensão.

3.6.1 Métodos de medição de tensão residual.

Os estudos sobre tensões residuais ganhou importância relevante devido á necessidade de inspeção de componentes mecânicos ao longo dos anos. As primeiras medições de tensão residual eram feitas por técnicas destrutivas apenas. Além do mais, havia a necessidade muita das vezes de introdução de tensões residuais durante os testes. Sabe-se que as técnicas para medir tensões residuais estão sendo aperfeiçoadas cada vez mais (SOUZA, 2012).

A tensão residual tem influências significativas sobre as propriedades e confiabilidade de componentes mecânicos tornando-se muito importante compreender e quantificar as tensões residuais (SOUZA, 2012).

Para selecionar o método de medição de tensão residual deve levar em consideração diversos fatores que são influenciados pelas características do componente e o tipo de medida que deseja efetuar (FARIAS, 2009):

- A geometria do componente que deseja medir;
- Gradiente de tensões residuais;
- A natureza do componente;
- Tipos de tensões residuais presentes no componente a ser ensaiado;
- Precisão e repetibilidade do método;
- Custo final para efetuar as medições;
- Tempo para medir o componente e apresentar os resultados;
- O local que será realizado as medidas (no campo ou em laboratório);
- No tipo de intervenção ou seja: se o método a ser utilizado será destrutivo ou não-destrutivo;

Os métodos de medição de tensão residual podem ser classificados em semidestrutivos, destrutivos e não-destrutivos.

Os semidestrutivos e destrutivos estão fundamentados na alteração do estado de equilíbrio das tensões residuais provocando alívio destas tensões no ponto ou na região de análise. Mede-se nesses métodos as deformações causadas pelo alívio de tensões utilizando-se em maior parte dos testes “*strain gage*” para medir tais deformações e com o apoio modelos matemáticos, é possível estipular as tensões residuais. Entretanto, é possível analisar apenas tensões residuais macroscópicas (SUTÉRIO, 2005).

Os métodos não-destrutivos têm por fundamento as variações de parâmetros físicos ou cristalográficos do material que está sob análise, relacionados com as tensões residuais com o qual são responsáveis por causar estas alterações. Utilizando esse método é possível determinar de maneira combinada todas as tensões existentes na peça analisada, sejam elas microscópicas, sub-microscópicas ou macroscópicas, porém, é impossível fazer distinção entre elas (SUTÉRIO, 2005).

A Tabela 4 mostra de forma sintetizada os principais métodos de medição de tensão residual conforme citado nos parágrafos anteriores. O método não-destrutivo via difração de raios-X foi escolhido para ser utilizado no presente trabalho.

Tabela 4 - Métodos mais comuns de medição de tensão residual.

CLASSIFICAÇÃO	PRINCIPAIS MÉTODOS	CONSIDERAÇÕES
Semidestrutivos	Método do furo cego	Execução de um furo, Ø 0,8 a 3,2 mm, Método normalizado pela ASTM-E-837
Destrutivos	Método da remoção de camadas (Método da deflexão)	Camadas retiradas por ataque químico. Pode estar aliada ao Método Difração de Raios X
	Método do seccionamento	Cortes parciais longitudinais ou transversais ao eixo de peças axisimétricas, ex.: cilindros
Não-destrutivos	Difração de raios X	Variação das distâncias entre os planos atômicos. Técnica normalizada pela SAE-J784a
	Difração de nêutrons	Semelhante ao método de Raios X, no entanto, com inspeção em todo o volume
	Método ultrassônico	Variação da velocidade de ondas ultrassônicas no interior do material
	Método magnético	Relação entre propriedades magnéticas, permeabilidade, indução e efeito Barkhausen

Fonte: SUTERIO, 2005).

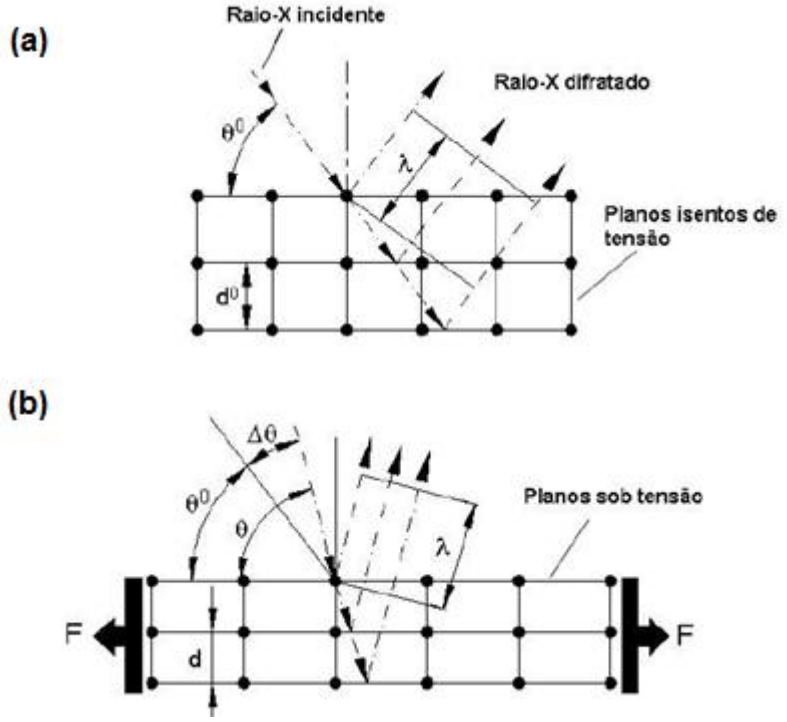
3.6.2 Método de difração de raios-x

Para medir tensões residuais o método não destrutivo mais utilizado é o método de difração de raios-X. Calcula-se a tensão residual tomando medidas de deformação no cristal do material em análise comparado aos parâmetros de rede do cristal deste mesmo material sem sofrer deformação. Quando um feixe de raios-X é direcionado para a superfície do material em análise, uma parte desses raios é

absorvida pelos átomos enquanto outra parte é enviada de volta em todas as direções da área irradiada. Mede-se a intensidade máxima de raios difratados para um determinado ângulo de varredura. Tomando como referência nesse ângulo é possível obter o espaçamento interplanar dos planos de difração (PREVÉY, 1986 apud SOUZA, 2012).

Nesse método mede-se o parâmetro “d” do reticulado do corpo de prova em análise e calcula as respectivas deformações existentes conforme Figura 21. Entretanto, mede-se somente a parte elástica do campo de deformações já que as deformações plásticas não prejudicam os parâmetros cristalinos (FARIAS, 2009).

Figura 21 - Difração de raios-x em material sem carga (a) e carregado (b).



Fonte: BORDINASSI, 2006.

A difração de raios-x é descrita como uma reflexão seletiva segundo certos planos cristalográficos, de acordo com a Equação 5 conhecida como a lei de Bragg (BRINKSMEIER, 1982 apud BORDINASSI, 2006).

$$\lambda = 2d\,\mathrm{sen}\theta \qquad (5)$$

Onde:

- d = parâmetro do reticulado.
- θ = ângulo de refração.
- λ = comprimento de onda dos raios-x.

Cabido às limitações da profundidade de penetração de raios-X o método de difração de raios-X pode ser apenas utilizado para camadas superficiais geralmente na ordem de 10 μm de espessura (LIU; ZHANG, 2002).

3.6.3 Método do sen²ψ ou múltipla exposição

Quando se deseja elevada exatidão nas medidas de tensão residual e em amostras que apresentam certo grau de textura é aconselhável utilizar o método do sen^2 ψ (BORDINASSI, 2006).

De acordo com Simões (2012) a tensão residual de uma peça pode ser calculada por meio do coeficiente angular da função correspondente a variação interplanar entre os planos cristalográficos e o sen^2 ψ, conforme Equação 6.

$$\sigma_{\emptyset} = \frac{E}{(1+v)(sen^2\psi)}\left(\frac{d_{\Phi\psi} - d_{\Phi 0}}{d_{\Phi 0}}\right) \quad (6)$$

Onde:

- E e v são módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson respectivamente;
- $d_{\Phi\psi}$ é o espaçamento interplanar da família de planos (h, k, l) orientados na direção da deformação $\varepsilon_{\Phi\psi}$;
- Em muitas situações práticas $d_{\Phi 0}$ é utilizado em substituição a d_0 (espaçamento entre planos de uma amostra livre de tensão) com muita precisão, devido o valor de d_0 não ser conhecido.

Observa-se que quanto maior o valor do ângulo 2θ, maior será a variação da distância interplanar conforme Equação 7, obtida pela diferenciação da lei de Bragg.

$$\frac{\Delta d}{\mathrm{d}} = -\frac{(\cot\theta)\Delta 2\theta}{2} \quad (7)$$

Deve-se plotar os valores de deformação 2Θ x sen^2 ψ em um gráfico, a fim de encontrar uma reta cujo coeficiente angular m será (SANTOS, 2012):

$$m = \sigma_{\emptyset} \frac{(1+v)}{E} \quad (8)$$

Entretanto, a tensão residual poderá ser calculada pela Equação 9:

$$\sigma_{\emptyset} = m \frac{E}{(1+v)} \quad (9)$$

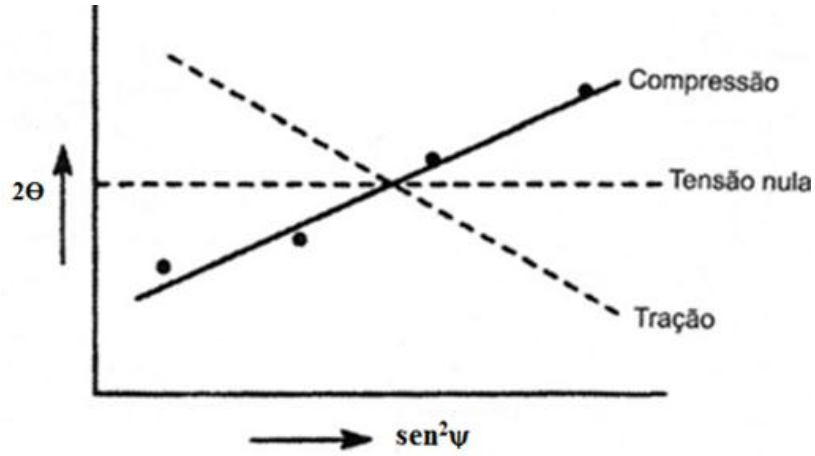
Onde:

- m é o coeficiente angular da reta
- E é o módulo de elasticidade
- v é o coeficiente de Poisson

Segundo Bordinassi (2006), existem alguns procedimentos para determinar a tensão residual utilizando o método sen^2 ψ sendo eles:

- Definir a posição do pico de difração de um determinado conjunto de planos (h, k, l) nas diferentes orientações ψ da peça;
- Plotar a deformação 2Θ versus sen^2 ψ por regressão conforme Figura 22;
- Determinar a inclinação “m” da reta obtida;
- Utilizar a Equação 9 para obtenção da tensão;

Figura 22 - Gráfico de 2Θ x $sen^2\psi$.



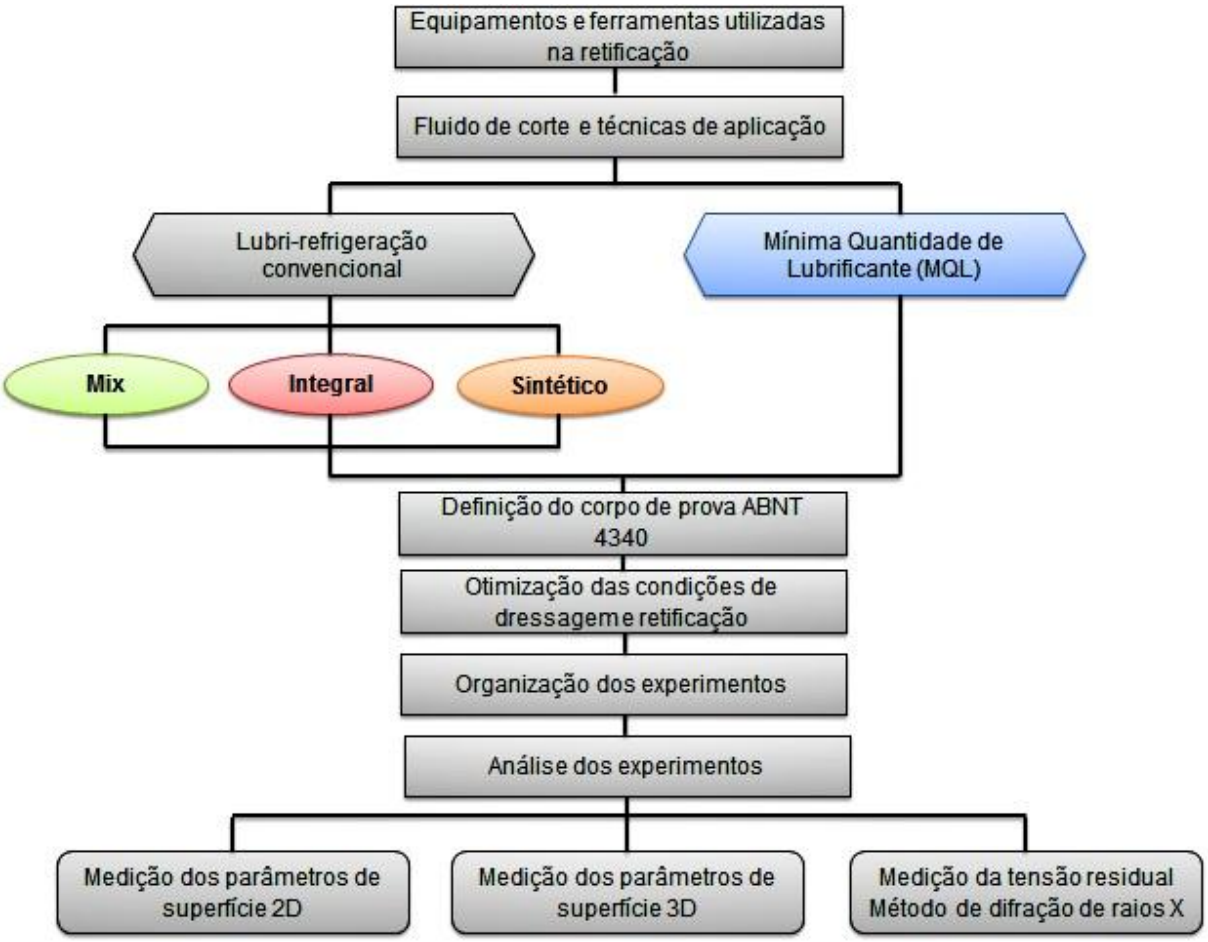
Fonte: BORDINASSI, 2006, adaptado.

O procedimento utilizado nesse método consistiu em variar o ângulo ψ de 0° a 45°, em incrementos de 5°, obter os respectivos ângulos de difração e traçar uma reta por regressão, pelo método dos mínimos quadrados, por meio destes 8 pontos.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada uma descrição de todos os equipamentos e materiais utilizados nesta pesquisa, bem como a regulagem dos parâmetros da retificadora cilíndrica, montagem e regulagem dos bancos de ensaios e metodologia utilizada durante os ensaios conforme mostrado no fluxograma Figura 23. A pesquisa foi desenvolvida nos Laboratórios de Processos de Retificação e de Caracterização de Materiais do curso de Engenharia de Materiais do CEFET-MG e no laboratório de Recobrimentos Tribológicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Mecânica da UFMG.

Figura 23 - Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: próprio autor.

4.1 Equipamentos e ferramentas utilizadas na retificação

Os ensaios foram executados na retificadora cilíndrica universal marca *TosHostivar*, com potência equivalente a 9 kW, por meio da retificação por mergulho.

Foi utilizado um rebolo convencional de óxido de alumínio (Al_2O_3), com as seguintes dimensões e características: 355,6 x 50,8 x 127 mm - FE 38A60KV. Este rebolo é utilizado para aços que possuem alta resistência à tração e elevada dureza e na retificação de ferramentas de aço rápido.

4.2 Fluidos de corte e técnicas de aplicação

Os subtópicos a seguir, apresentam as técnicas de lubri-refrigeração convencional e de mínima quantidade de lubrificante (MQL), bem com os fluidos de corte utilizados na retificação dos corpos de prova.

4.2.1 Lubri-refrigeração convencional

No método de lubri-refrigeração convencional foram utilizados três tipos de fluidos de corte:

- Fluido integral a base de óleo mineral MecaFluid 14 SC do fabricante Petronas Lubrificante. Este fluido é de base parafínica contendo aditivos sulfoclorados inativos indicados para operações de corte em geral. Apresenta boas propriedades lubrificantes, anticorrosivas e longa vida útil.
- Fluido mix, sendo uma mistura feita no próprio laboratório de 50% fluido integral à base de óleo mineral (MecaFluid 14 SC) e 50% óleo de soja.
- Fluido de corte sintético Southcool RU 20 do fabricante Southquin. É um lubrificante e refrigerante para todas as operações de trabalho mecânico. Sua ação química resfria e lubrifica ao mesmo tempo. Recomenda-se concentração de 5% em água. Possui uma forma translúcida e levemente amarelada.

A vazão dos fluidos de corte na lubri-refrigeração convencional foi de 12 $L.min^{-1}$ sendo medida a cada troca de fluido. Para fazer as medições, o registro do bocal foi totalmente aberto, foram feitas três medições e calculou-se a média.

Quando o fluido de corte sintético foi adicionado ao reservatório da máquina, a bomba ficou ligada durante 5 min de forma a homogeneizar o fluido.

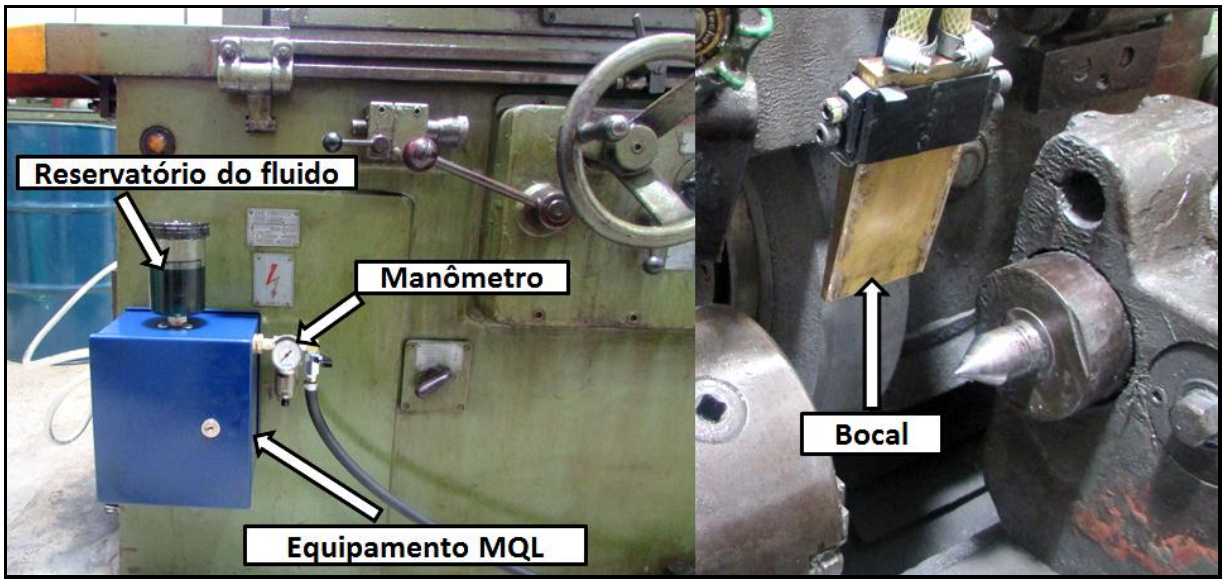
Utilizou-se também o refratômetro, instrumento de óptico para medir o índice de refração de uma substância translúcida, sendo possível, avaliar a concentração do fluido de corte sintético. O fluido sintético foi utilizado na proporção de 1:20, o que equivale a uma concentração de 5% de fluido de solução. O refratômetro utilizado foi o portátil ATAGO série MASTER–α, Brix 0.0 a 33,0%.

4.2.2 Técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)

Para a técnica de mínima quantidade de lubrificante MQL foi utilizado o fluido LB 1000 fornecido pelo fabricante do equipamento.

Utilizou-se um equipamento aplicador *Accu-Lube,* Figura 24, fornecido pela *ITW – Chemical Products Ltda*, sendo que a vazão do fluido foi regulada para 105 $mL.h^{-1}$ a uma pressão de 5 $kgf.cm^{-2}$.

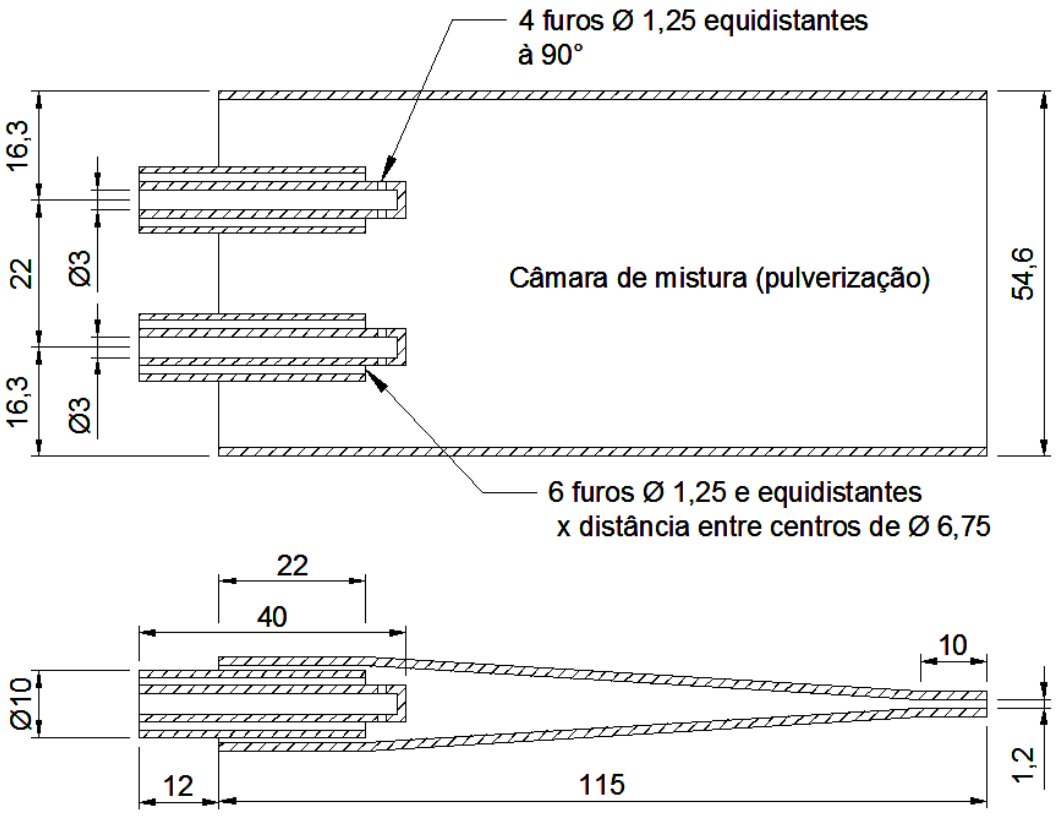
Figura 24 - Detalhamento da técnica de MQL.



Fonte: próprio autor.

O bocal utilizado para a utilização de mínima quantidade de lubrificante tem as seguintes dimensões conforme desenho de fabricação Figura 25.

Figura 25 - Desenho em corte total do bocal MQL.



Fonte: próprio autor.

4.3 Corpo de prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram confeccionados em formato cilíndrico de aço ABNT 4340 temperado e revenido com dureza de 52 +/- 2 HRc.

Trata-se de um aço de construção mecânica que possui alta temperabilidade, mas é de difícil usinabilidade e soldabilidade e apresenta boa forjabilidade. Tem várias aplicações na indústria sendo utilizado na fabricação de virabrequins para aviões, tratores e veículos em geral, usado em engrenagens, bielas, eixos muito solicitados e componentes com boas propriedades mecânicas (ALVES, 2010).

Observa-se na Tabela 5 a composição química do aço ABNT 4340. As informações sobre este aço foram obtidas por meio do certificado de análise do material, fornecido pela empresa Açocon, no momento da compra do material.

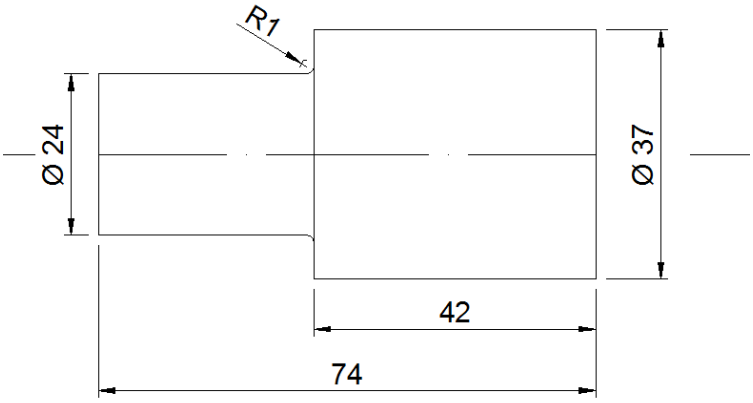
Tabela 5 - Composição química (% em massa) do aço ABNT 4340.

C	Mn	P	Si	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co	V	Fe
0,4	0,7	0,007	0,35	0,001	0,78	1,74	0,24	0,015	0,05	0,01	0,01	Balanço

Fonte: VILLARES METALS, 2013.

As dimensões do corpo de prova são apresentadas conforme Figura 26, sendo a dimensão útil de retificação de diâmetro inicial de 37 mm e comprimento retificado de 42 mm.

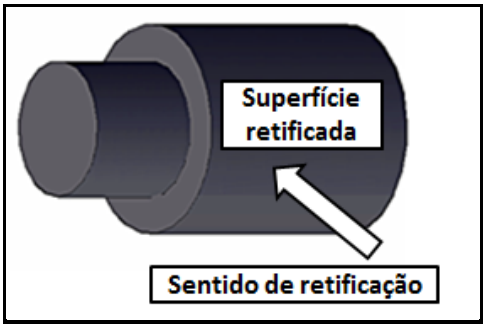
Figura 26 - Desenho esquemático do corpo de prova.



Fonte: próprio autor.

A Figura 27 apresenta o sentido de penetração do rebolo, pois, é uma retificação por mergulho no qual o rebolo possui sua espessura de (50,8 mm) maior que a superfície útil retificada.

Figura 27 – Superfície a ser retificada no corpo de prova.



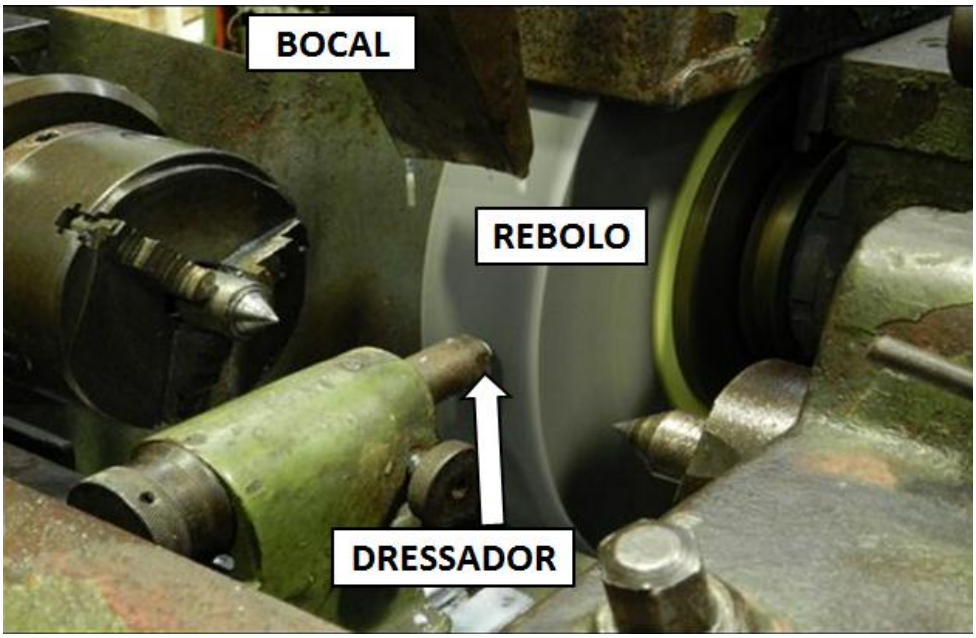
Fonte: Próprio autor.

4.4 Dressagem

A operação de dressagem do rebolo foi realizada no início de cada ensaio. Utilizou-se um dressador conglomerado de diamante fixado a um suporte, que faz parte dos acessórios da retificadora conforme ilustrado na Figura 28.

A dressagem foi realizada com uma velocidade longitudinal da mesa de 2,7 mm/s, num total de 10 passes, retirando 0,05 mm em cada passe, totalizando 0,5 mm na operação. Após os 10 passes, repetiu-se 2 passes livres sem retirada de material visando assegurar melhor topografia superficial do rebolo.

Figura 28 - Montagem do dressador na retificadora.



Fonte: próprio autor.

4.5 Organização dos experimentos

Os ensaios foram divididos em três condições descritas na Tabela 6. Para cada etapa tem-se a variação dos parâmetros de corte, a fim de verificar a influência de cada um na integridade da superfície do corpo de prova retificado utilizando diferentes fluidos de corte.

Tabela 6 - Parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios

Parâmetros	Condição experimental 1	Condição experimental 2	Condição experimental 3
Velocidade de mergulho	0,6 e 1,2 ($mm.min^{-1}$)	0,6 e 1,2 ($mm.min^{-1}$)	0,6 e 1,2 ($mm.min^{-1}$)
Spark out	6 s	10 s	10 s
Sobre metal	0,4 mm	2,8 mm	5,2 mm
Volume de material retificado	1,93 x 10^3 mm^3	12,64 x 10^3 mm^3	21,82 x 10^3 mm^3
Vazão dos fluidos (mix, integral e sintético)	12 $L.min^{-1}$	12 $L.min^{-1}$	12 $L.min^{-1}$
Vazão do MQL	105 $mL.h^{-1}$	105 $mL.h^{-1}$	105 $mL.h^{-1}$

Fonte: Próprio autor.

A rotação da peça foi calculada conforme Equação 10, a mesma foi mantida constante em todas as etapas ensaiadas. A principal variação nos parâmetros pré-definidos foram à velocidade de mergulho e a quantidade de material removido (volume de material retificado).

$$n_w = \frac{V_w.1000}{d.\pi} \tag{10}$$

A matriz de experimentos foi organizada de acordo com os quarenta e oito corpos de prova. A retificação dos corpos de prova foi feita, variando os quatro diferentes fluidos de corte, duas velocidades de mergulho e três valores diferentes de volume de material retificado conforme Tabela 7. O critério para a seleção dos parâmetros de retificação utilizados na pesquisa foi por meio de revisão bibliográfica e testes preliminares.

Tabela 7 - Matriz dos corpos de prova ensaiados (a) CDP1 ao CDP24 e (b) CDP25 ao CDP48.

(a)

	FLUIDOS DE CORTE							
	MIX				INTEGRAL			
Velocidade de mergulho (mm/min)	**1,2**		**0,6**		**1,2**		**0,6**	
Volume de material retificado (10^3 x mm^3)	Teste	Réplica	Teste	Réplica	Teste	Réplica	Teste	Réplica
1,93	CDP1	CDP4	CDP7	CDP10	CDP13	CDP16	CDP19	CDP22
12,64	CDP2	CDP5	CDP8	CDP11	CDP14	CDP17	CDP20	CDP23
21,82	CDP3	CDP6	CDP9	CDP12	CDP15	CDP18	CDP21	CDP24

(b)

	FLUIDOS DE CORTE							
	SINTÉTICO				MQL			
Velocidade de mergulho (mm/min)	**1,2**		**0,6**		**1,2**		**0,6**	
Volume de material retificado (10^3 x mm^3)	Teste	Réplica	Teste	Réplica	Teste	Réplica	Teste	Réplica
1,93	CDP25	CDP28	CDP31	CDP34	CDP37	CDP40	CDP43	CDP46
12,64	CDP26	CDP29	CDP32	CDP35	CDP38	CDP41	CDP44	CDP47
21,82	CDP27	CDP30	CDP33	CDP36	CDP39	CDP42	CDP45	CDP48

Fonte: próprio autor.

4.6 Medição dos parâmetros de superfície 2D

Para medição dos parâmetros de superfície 2D dos corpos de prova retificados, foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-301 conforme Figura 29 de acordo com as normas JIS 2001 e DIN 4776 apud Manual do Usuário SJ-301 Mitutoyo selecionada no equipamento com comprimento de amostragem "*cut-off*" de 0,8 mm.

As medições dos parâmetros de superfície foram realizadas em quatro posições radiais do corpo de prova e equidistantes a 90º aproximadamente. Foram

analisados os parâmetros: desvio médio aritmético (Ra), rugosidade total (Rt), coeficiente de vazio (Kp), profundidade de rugosidade do núcleo (Rk), coeficiente de simetria (Rsk), coeficiente de simetria (Rku), altura reduzida do pico (Rpk) e profundidade reduzida dos vales (Rvk).

Figura 29 - Rugosímetro e dispositivos utilizados para medição dos parâmetros avaliados.

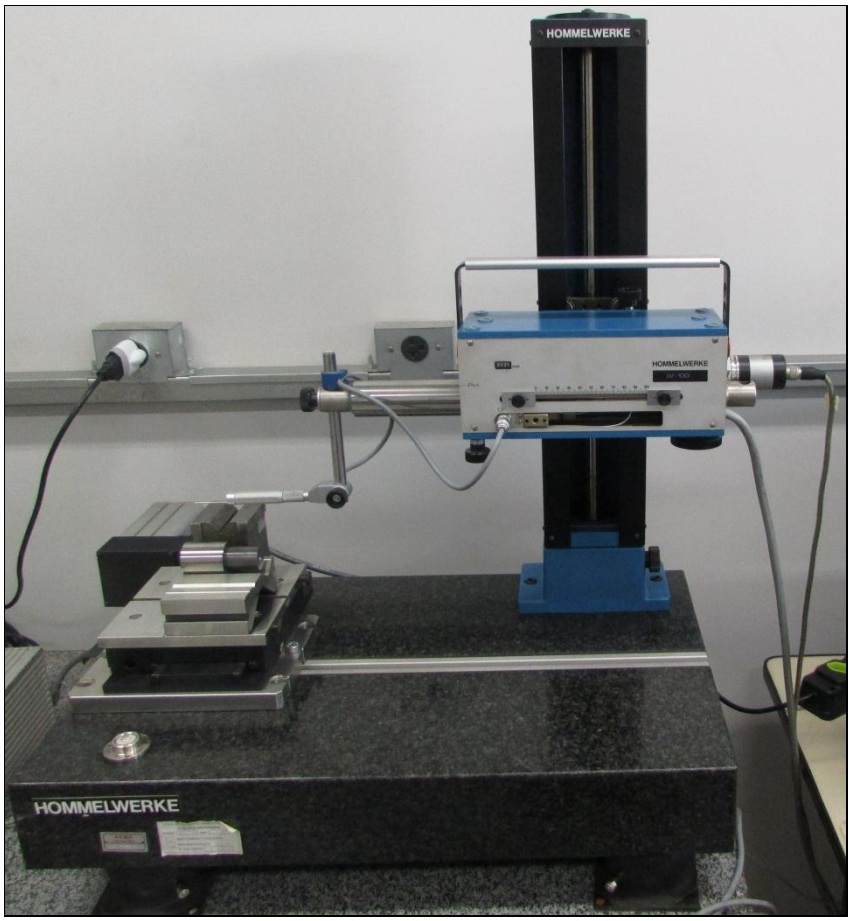
Fonte: próprio autor.

4.7 Medição dos parâmetros de superfície 3D

Utilizou-se um perfilômetro da HOMMELWERKE D-78056-VS-Schwenningen, do Laboratório de Recobrimentos Tribológicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e da Mecânica da UFMG, para medir os parâmetros de superfície 3D. Foi utilizado o apalpador móvel HOMMELWERKE TKU 300/600. As dimensões da área varrida foram: (comprimento de 4 mm no eixo X na direção longitudinal do corpo de prova com 4001 pontos e espaçamento de 1 µm) e no eixo y sentido da circunferência do corpo de prova o apalpador varreu (5 linhas com espaçamentos de 0,5 mm entre cada uma delas). Os parâmetros do perfil de rugosidade e as imagens foram realizados por meio do Software Turbo Wave e Homnelmap Expert 6.2

Pode ser visto na Figura 30 o equipamento perfilômetro utilizado para as medições dos parâmetros do perfil de rugosidade.

Figura 30 – Medição no Perfilômetro

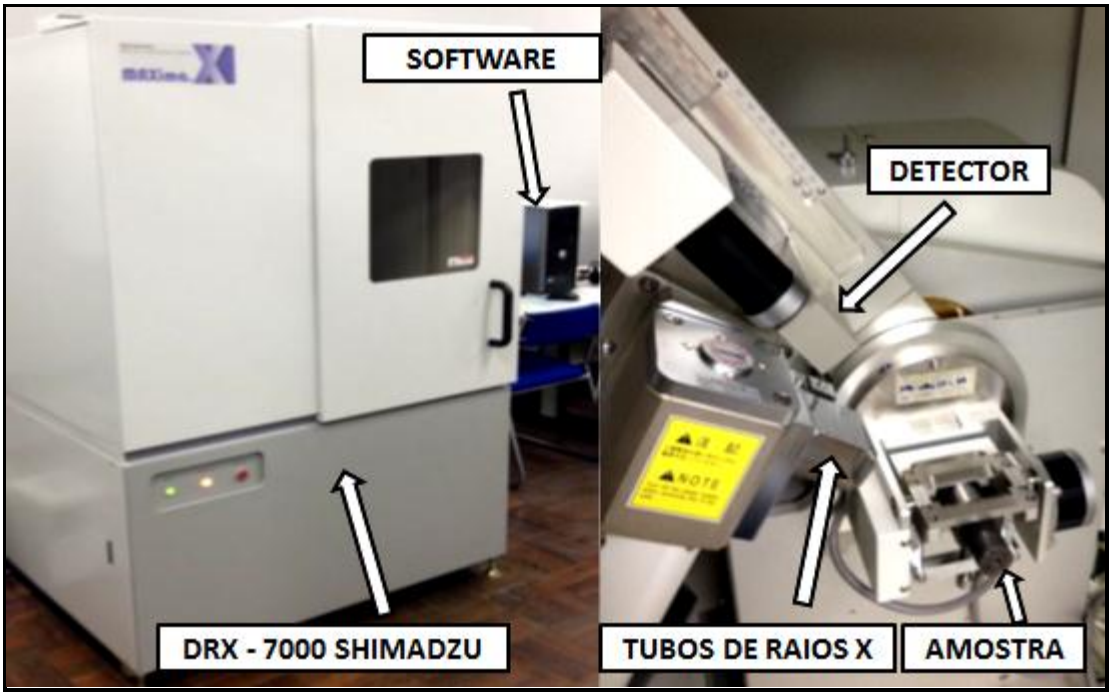


Fonte: próprio autor.

4.8 Medição da tensão residual - Método de difração de raios-X

Foi realizada a medição de tensões residuais por meio da técnica de múltiplas exposições ou método do $sen^2\psi$ por difração de raio-X utilizando um difratômetro de Raios X (RDX-7000) da fabricante SHIMADZU Figura 31, com tubo de Raios X (Alvo de Cromo).

Figura 31 - Equipamento DRX e montagem utilizada para medição de tensão residual



Fonte: próprio autor.

De acordo com a norma ASTM E2860-12 (2012) Método de teste padrão para medição de tensão residual por difração de raios X**,** ao realizar medições de tensão residual em aços martensíticos, o alvo Cr Kα é tipicamente usado com o plano {211} com um ângulo 2θ de aproximadamente 154 a 157º.

Após o ajuste da amostra, foi realizado o ajuste do *software* que comanda o equipamento DRX com os seguintes parâmetros:

- Comprimento de onda 2,291 A;
- Tensão 30 KV;
- Corrente 40 mA;
- Pico de difração utilizado (211) do plano de ferrita-martensita com ângulo 2θ: 156,1°;
- Variação do ângulo ψ de 0 a 40° sendo (0, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40°) os ângulos utilizados;
- Variação do ângulo de difração 2θ: (150 a 160°)
- Velocidade de varredura 2° C/min;

- Passos de 0,1 graus;
- Exposição de 3 segundos;
- Os valores do módulo de elasticidade (E) e do coeficiente de Poisson (v) para o aço ABNT 4340 foram: E: 210 GPa e coeficiente de Poisson v: 0,3, respectivamente.

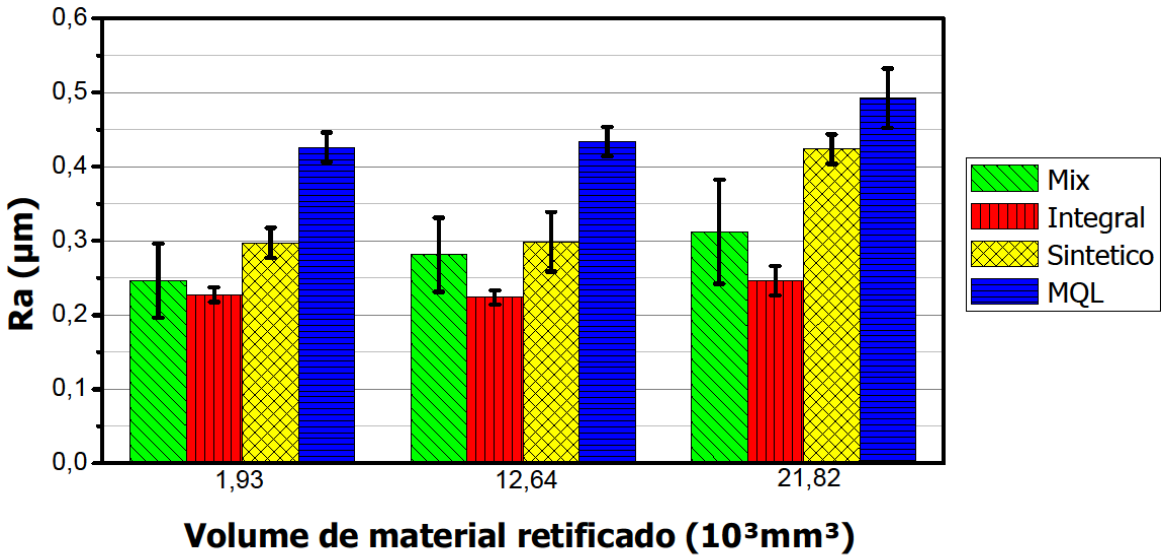
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados a seguir, referem-se às condições de corte e de lubri-refrigeração encontrados na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 temperado e revenido para os parâmetros 2D avaliados [desvio médio aritmético (Ra), rugosidade total (Rt), coeficiente de vazio (Kp), profundidade de rugosidade do núcleo (Rk), coeficiente de simetria (Rsk), coeficiente de simetria (Rku), altura reduzida do pico (Rpk) e profundidade reduzida dos vales (Rvk)], parâmetros 3D do perfil de rugosidade, curva de Abbott-Firestone, textura superficial e tensão residual.

5.1 Desvio médio aritmético (Ra)

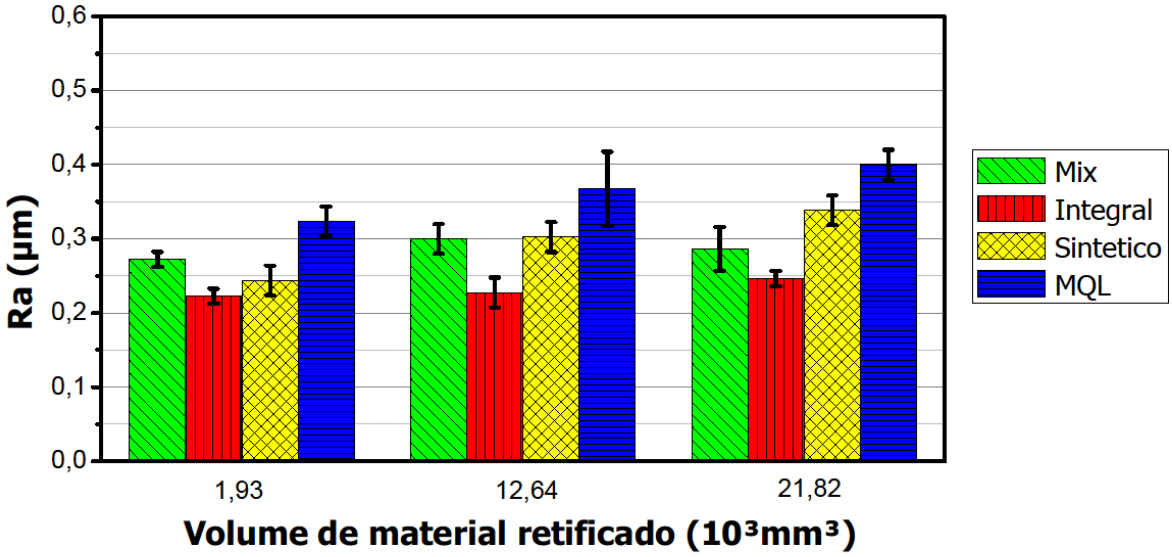
Nas Figuras 32 e 33 são apresentados os valores médios de rugosidade (Ra) e seus respectivos desvios padrão com diferentes fluidos de corte para velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min e volume de material retificado da peça de 1,93 x 10^3 mm^3, 12,64 x 10^3 mm^3 e 21,82 x 10^3 mm^3, respectivamente.

Figura 32 - Desvio médio aritmético (Ra) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Figura 33 - Desvio médio aritmético (Ra) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Observa-se nas Figuras 32 e 33 que o fluido integral apresentou menor Desvio médio aritmético (Ra) em relação aos demais fluidos de corte em todos os três diferentes volumes de material retificado, devido ao excelente poder lubrificante desse fluido. Isto faz com que o coeficiente de atrito seja reduzido e proporcione melhor acabamento superficial.

Para volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3 nas velocidades de mergulho de 0,6 mm/min 1,2 mm/min em termos de valores médios de Ra, o fluido integral apresentou menor valor.

Os menores valores de Ra encontrados para os diferentes fluidos de corte foram verificados para o volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3 mostrando que baixo volume de material removido menor o Ra, ou seja, melhor acabamento superficial. Levando em consideração o desvio padrão não houve diferença em relação ao volume de material removido. Alves et al., (2009), afirma que menores taxas de remoção de material, menor será a rugosidade.

Para a mínima quantidade de lubrificante (MQL) encontrou-se nos três volumes de material retificado os maiores valores de Ra, provavelmente pelo fluido não ter sido eficiente quanto à retirada de cavaco da zona de corte em relação aos

demais fluidos de corte e não ter ocorrido uma lubri-refriegeração eficiente. Segundo Oikawa et al., (2009) na técnica MQL, o ar comprimido não é eficiente para a retirada de cavaco na zona de corte, ocorrendo a formação de uma “borra” com cavaco de difícil remoção e afetando os valores de rugosidade da peça.

Cabe ressaltar que, por motivos técnicos, a vazão e a pressão do ar comprimido utilizado nos experimentos foram inferiores a indicação do fabricante do equipamento de MQL. Hadad et al., (2011) afirmam que a névoa de óleo deve depositar-se na superfície do rebolo, sendo que maiores efeitos de lubrificação na área de contato dos grãos do rebolo com a peça resultam em menor atrito e consequentemente menores forças tangenciais no processo de retificação e uma melhor rugosidade.

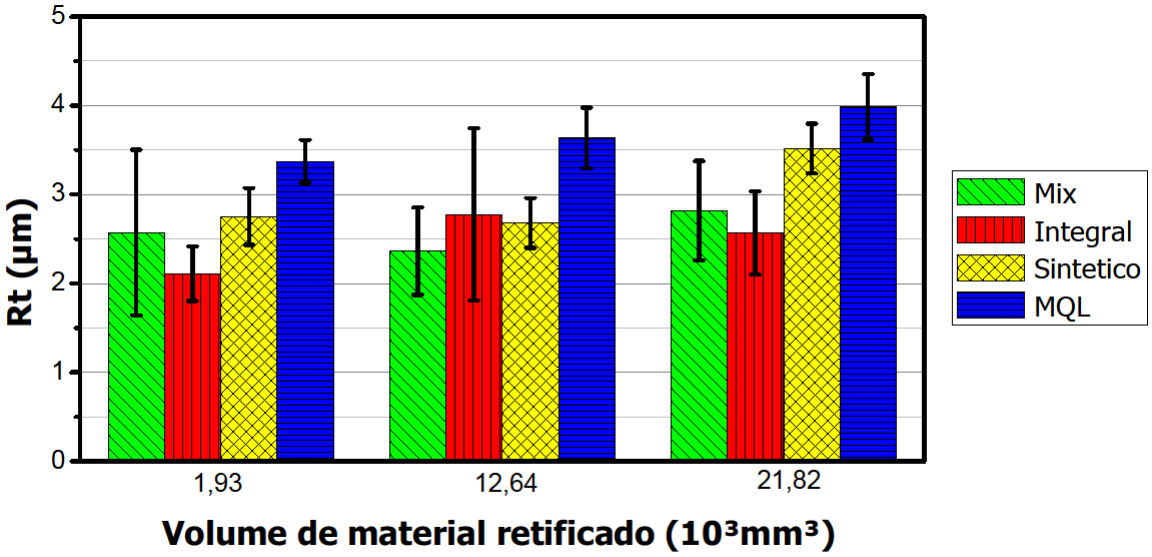
No geral, o fluido de corte integral apresentou menor dispersão dos valores de rugosidade e menor variação com a mudança de volume de material removido se comparado aos demais fluidos corte e o melhor acabamento é proporcionado principalmente na maior velocidade de mergulho onde temos os menores valores de rugosidade.

Todos os valores de desvio médio aritmético obtido para os diferentes fluidos de corte, velocidade de mergulho e volumes de material retificado, estão dentro da faixa de tolerância para o processo de retificação de acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2003), no qual esses valores compreende uma faixa de 0,2 e 1,6 μm, sendo que os maiores valores de Ra de acordo com Figura 32 foram verificados para o MQL com valor de Ra de aproximadamente 0,5 μm.

5.2 Rugosidade total (Rt)

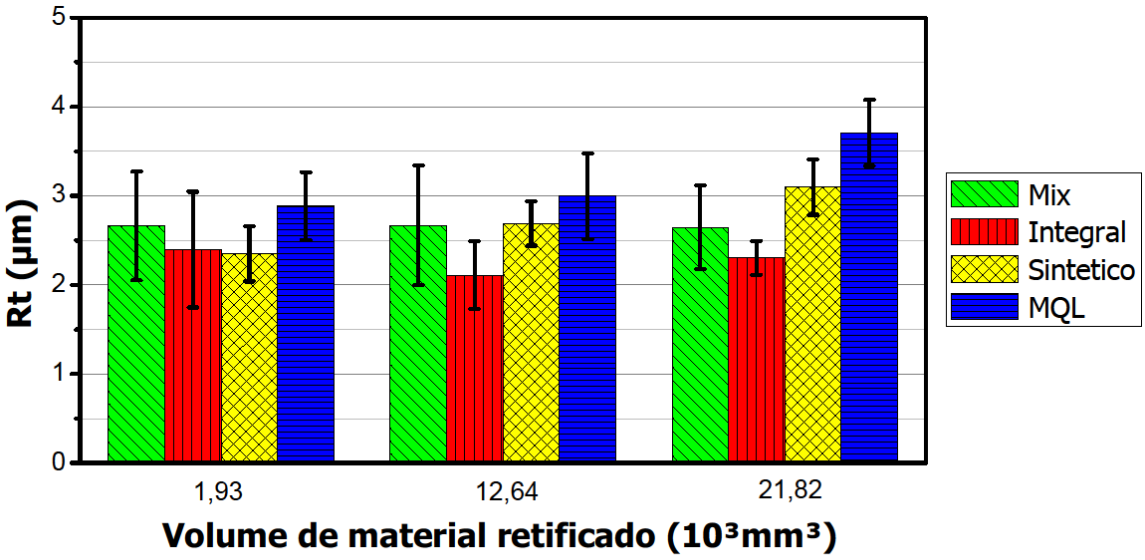
As Figuras 34 e 35 apresentam os resultados de rugosidade Rt para os diferentes fluidos de corte para as velocidades de mergulho de 0,6 e 1,2 mm/min, nos diferentes volumes de material retificado.

Figura 34 – Rugosidade total (Rt) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Figura 35 – Rugosidade total (Rt) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Observa-se por meio da Figura 34 que o menor valor médio de Rt para todos os fluidos de corte utilizados não levando em consideração o desvio padrão, foi no volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3, velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e com aplicação do fluido integral. Por outro lado, o maior valor de rugosidade média Rt foi no volume de material retificado de 21,82 x $10^3 mm^3$, velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e com aplicação de MQL Figura 34.

Percebe-se uma menor eficiência da lubri-refrigeração com MQL comparado ao fluido integral e sintético no volume de material removido de 1,93 x $10^3 mm^3$ Figura 34 devido ao maior valor de Rt.

Houve uma tendência de aumento dos valores médios de Rt desconsiderando o desvio padrão à medida que se aumenta o volume de material retificado com aplicação de MQL. Ainda em relação à MQL, os resultados mostraram melhor rugosidade média Rt com o aumento da velocidade de mergulho de 0,6 mm/min para 1,2 mm/min, provavelmente ocorreu uma maior interação dos grãos abrasivos do rebolo com a peça aumentando a capacidade do grão fraturar-se fenômeno conhecido como “friabilidade”, ou seja, o grão perde o poder de corte, surgindo novas arestas de corte, obtendo menor geração de calor e consequentemente conseguindo um melhor acabamento superficial.

Analisando os resultados para o parâmetro Rt e comparando-o com o parâmetro Ra, observa-se um comportamento semelhante para ambos, na qual, os menores valores médios foram verificados no menor volume de material removido, além do mais os fluidos com característica de maior poder lubrificante tais como o integral e o mix obtiveram menores valores médios também para os parâmetros avaliados. Deste modo, tem-se uma boa opção a utilização do fluido mix em comparação ao fluido sintético convencional, contribuindo assim para uma produção mais sustentável, devido à presença de 50% de óleo de soja na mistura do fluido mix.

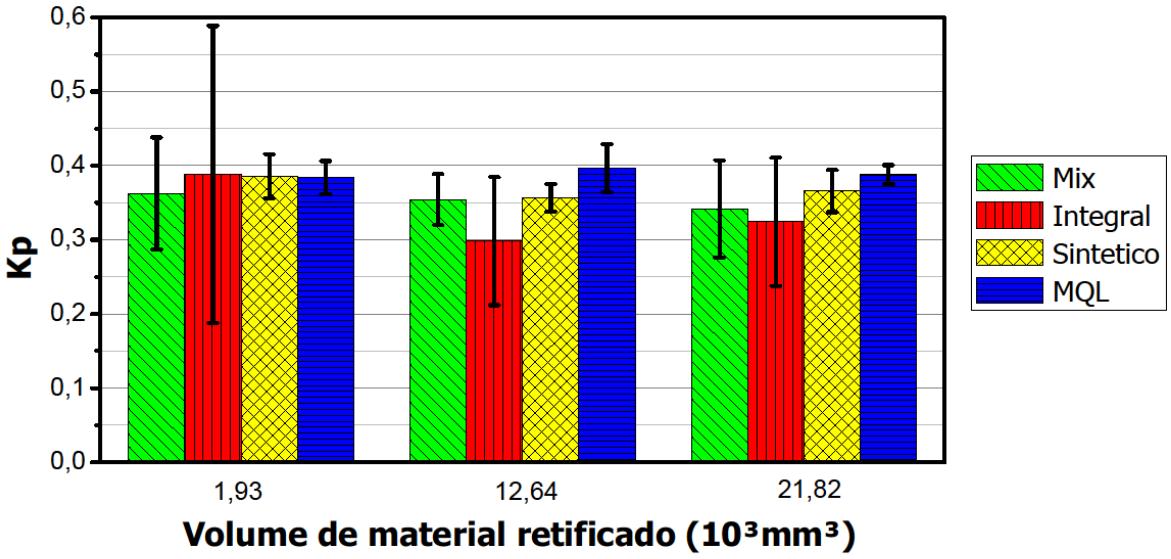
5.3 Coeficiente de vazio (Kp)

As Figuras 36 e 37 mostram as médias das rugosidades Rp/Rt das quatro análises feitas para cada condição de lubri-refrigeração mix, integral, sintético e MQL em função do volume de material retificado.

Pawlus e Michalski (1992) afirmam que, o desgaste linear e acabamento podem ser relacionados através do coeficiente de vazio que é um importante parâmetro tribológico usado para avaliar o desgaste ocorrido na superfície da peça. Quanto menor o valor do coeficiente de vazio, menor será o desgaste na superfície da peça e melhor o acabamento superficial. Esse coeficiente Kp relaciona os parâmetros de amplitude Rp (altura máxima do perfil) e Rt (altura total do perfil) que foi calculado pela Equação 11.

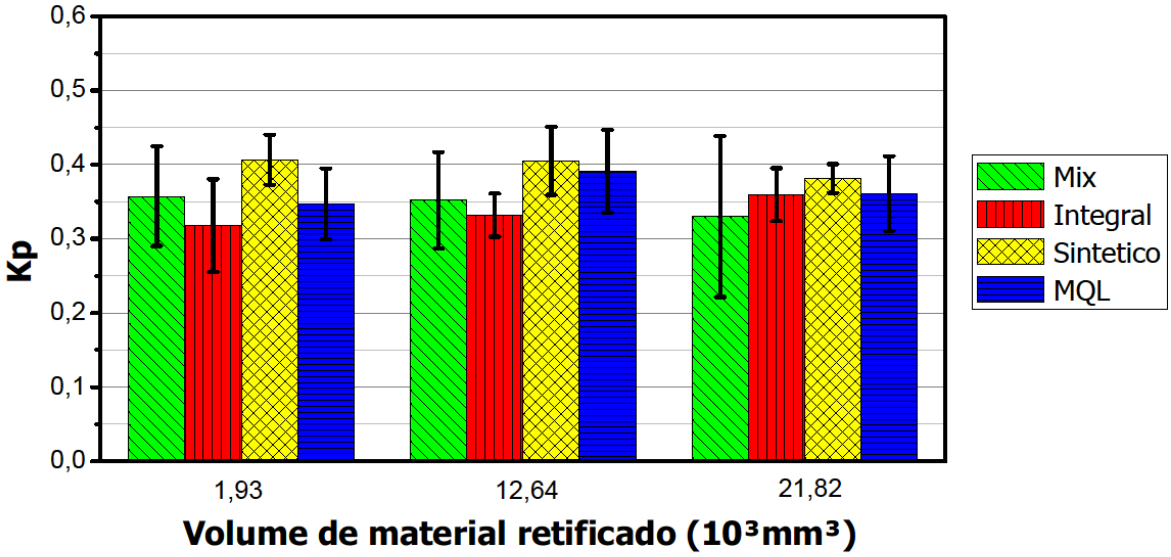
$$Kp = \frac{Rp}{Rt} \tag{11}$$

Figura 36 - Coeficiente de vazio Kp em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Figura 37 - Coeficiente de vazio Kp em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Analisando o coeficiente de vazio na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min Figura 36 observa-se que os maiores valores médios de Kp foram verificados no volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3 para os fluidos mix, sintético e integral, ao contrário do desvio médio aritmético (Ra) e Rt onde verifica-se os maiores valores no maior volume de material removido de 21,82 x 10^3 mm^3. Considerando o desvio padrão não houve diferença nos valores de Kp. Espera-se que maior valor de Rt resulta em um baixo coeficiente de vazio o que ocorreu nessa situação, exceto para o MQL.

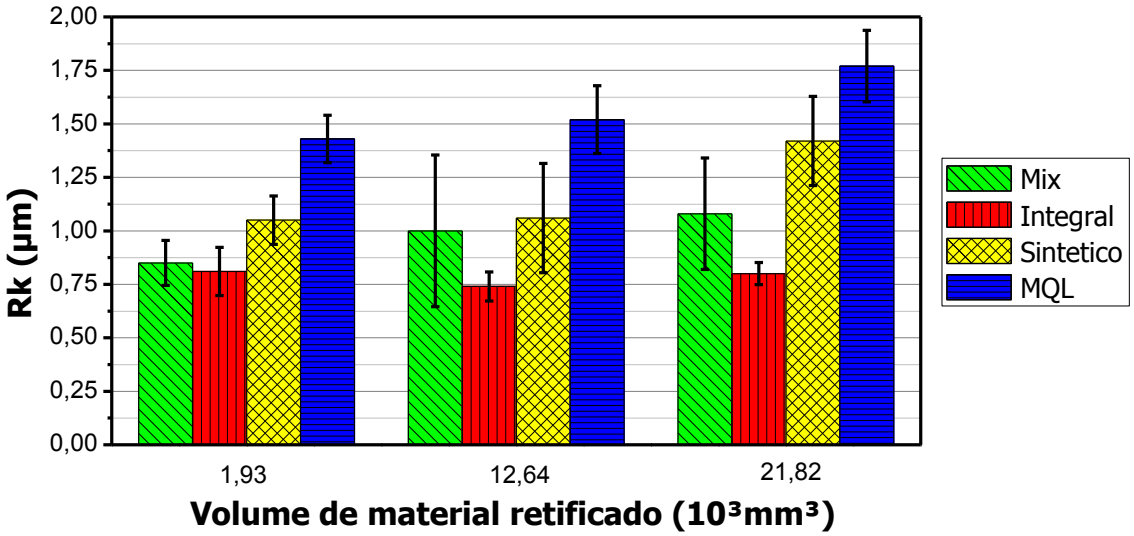
O menor valor médio encontrado para o coeficiente de vazio ocorreu para a condição do fluido integral com velocidade de mergulho de 0,6 mm/mim, volume de material retificado de 12,64 x 10^3 mm^3 de acordo com a Figura 36. O maior valor médio obtido para o coeficiente de vazio ocorreu para as condições do fluido sintético na velocidade mergulho de 1,2 mm/min e volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3 e 12,64 x 10^3 mm^3. Esse comportamento ocorreu devido o fluido de corte integral permitir maior poder de lubrificação em relação aos demais fluidos, uma vez que, sob baixa velocidade de mergulho onde as temperaturas são baixas, o

poder de refrigeração é menos solicitado, à medida que a lubrificação é essencial para reduzir o atrito.

5.5 Profundidade de rugosidade do núcleo (Rk)

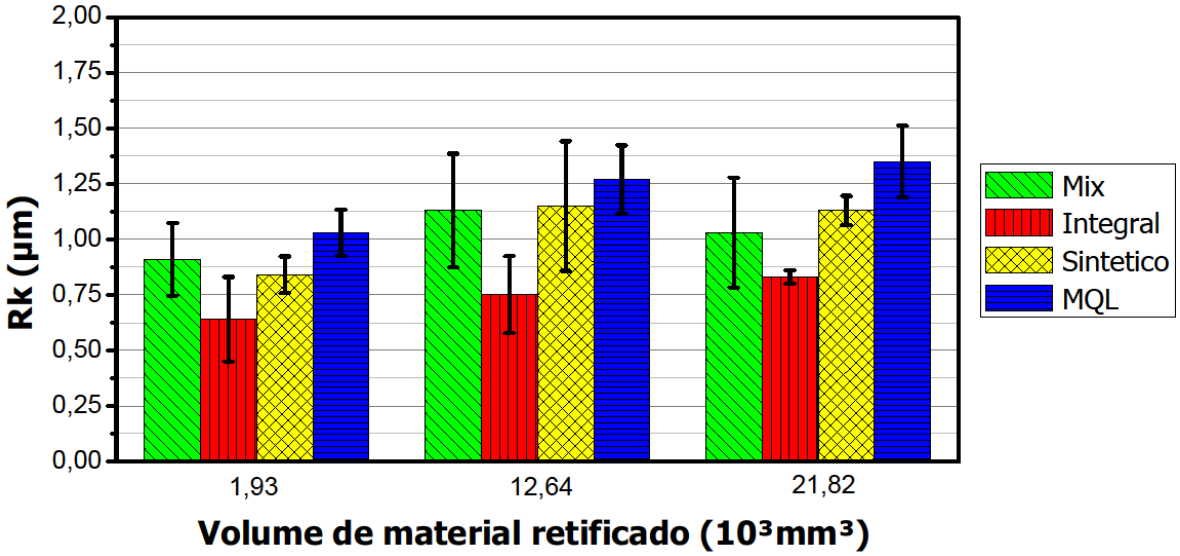
Nas Figuras 38 e 39 são apresentados a profundidade de rugosidade do núcleo Rk das análises feitas para cada condição de lubri-refrigeração mix, integral, sintético e MQL em função do volume de material retificado.

Figura 38 - Profundidade de rugosidade do núcleo (Rk) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Figura 39 - Profundidade de rugosidade do núcleo (Rk) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Nota-se que houve um aumento crescente do valor médio de Rk á medida que se aumenta o volume de material removido para ambas as velocidades de mergulho.

Ao analisar o parâmetro Rk, pode-se associá-lo a parte intermediária da rugosidade e que o mesmo vai influenciar tanto o desempenho da superfície quanto aos valores de Rpk e Rvk conforme a curva de Abbott-Firestone Figura 5.

Na menor velocidade de mergulho Figura 38, os menores valores médios de Rk foram verificados na retificação utilizando o fluido integral. Os baixos valores de Rk indicam menor volume de vazios, sendo maior o contato entre duas superfícies.

MQL obteve maior valor médio de Rk na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e nos diferentes volumes de material removido conforme Figura 38 comparado aos demais fluidos de corte. Se a superfície de duas peças retificadas utilizando MQL, estiverem trabalhando em contato uma com a outra, o volume de vazios entre essas duas superfícies provavelmente será maior em relação aos demais fluidos de corte, propiciando um desgaste mais acentuado devido a esse menor contato.

O volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3, é condição mais usual no processo industrial já que a profundidade de penetração do rebolo nessa condição é

de 0,4 mm. Sendo assim, as condições normais de retificação oferecem menores valores de médios de Rk consequentemente uma superfície com um perfil mais achatado. Já os volumes de material retificado de 12,64 e 21,82 x 10^3 mm^3, são condições mais extremas de elevado volume de material removido e menos usuais, onde temos uma penetração do rebolo de 2,8 e 5,2 mm respectivamente. Superfícies em contato e que foram retificadas nessas condições, apresentarão um maior volume de vazios, podendo apresentar maior desgaste inicial (amaciamento), devido a maiores valores médios de Rk nessas condições.

No volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3 condição normal de retificação, houve uma tendência na diminuição do Rk com o aumento da velocidade de mergulho. Observando esse fator em operações de contato, consegue-se superfícies com perfil mais achatado e com capacidade maior de suportar cargas.

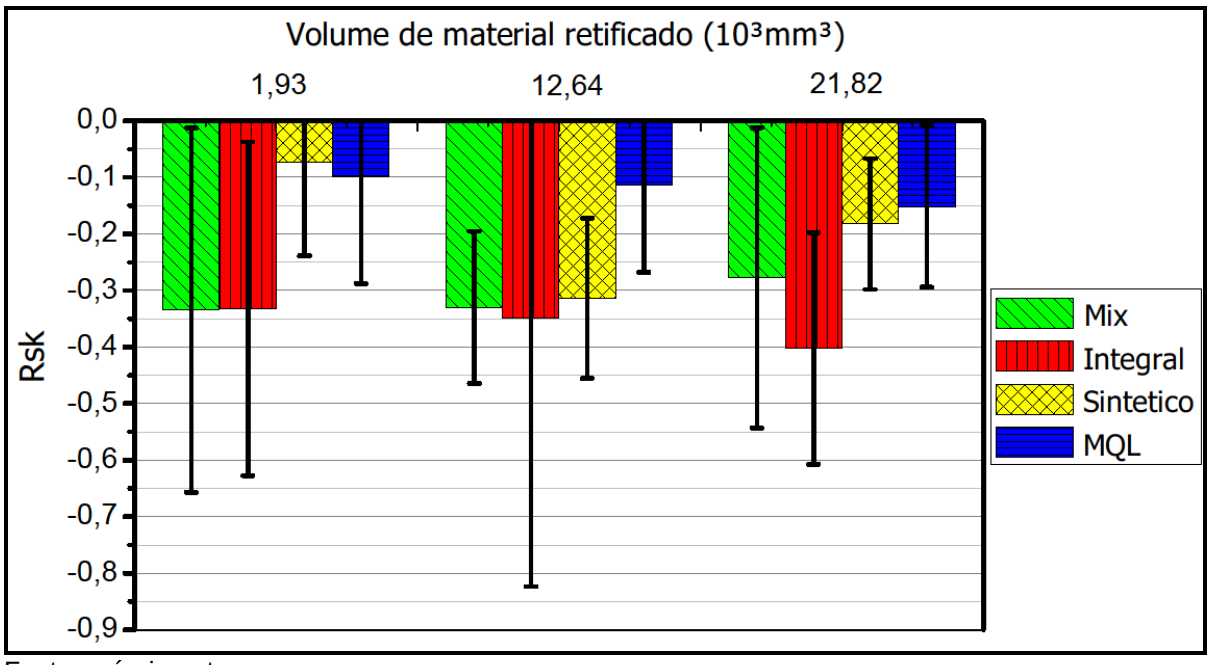
Comparando os valores de Rk e Rpk item 5.8, nota-se que o fluido de corte integral obteve os melhores resultados, ou seja, os menores valores. Os resultados obtidos, estão de acordo com Petropoulos et al., (2003) que analisaram a influência do processo de usinagem na relação dos parâmetros Rk e Rpk na curva de rolamento. Os resultados encontrados pelos autores mostram que quanto menor o valor de Rk, menor será o valor de Rpk, com isso menor será o desgaste na fase inicial de contato entre duas superfícies.

Foi possível comparar os valores de Kp com Rk, no entanto, percebe-se que os menores valores de Rk são também para o fluido integral, e que os menores valores de Rk garantem os menores valores para o coeficiente de vazio. Os resultados obtidos, vão de encontro com Mattos (2009), que ao analisar uma superfície cilíndrica de motores a combustão interna, no qual é exigido excelente acabamento superficial, os menores valores de Rk resultam uma superfície com menor volume de vazios (Kp).

5.6 Coeficiente de simetria (Rsk)

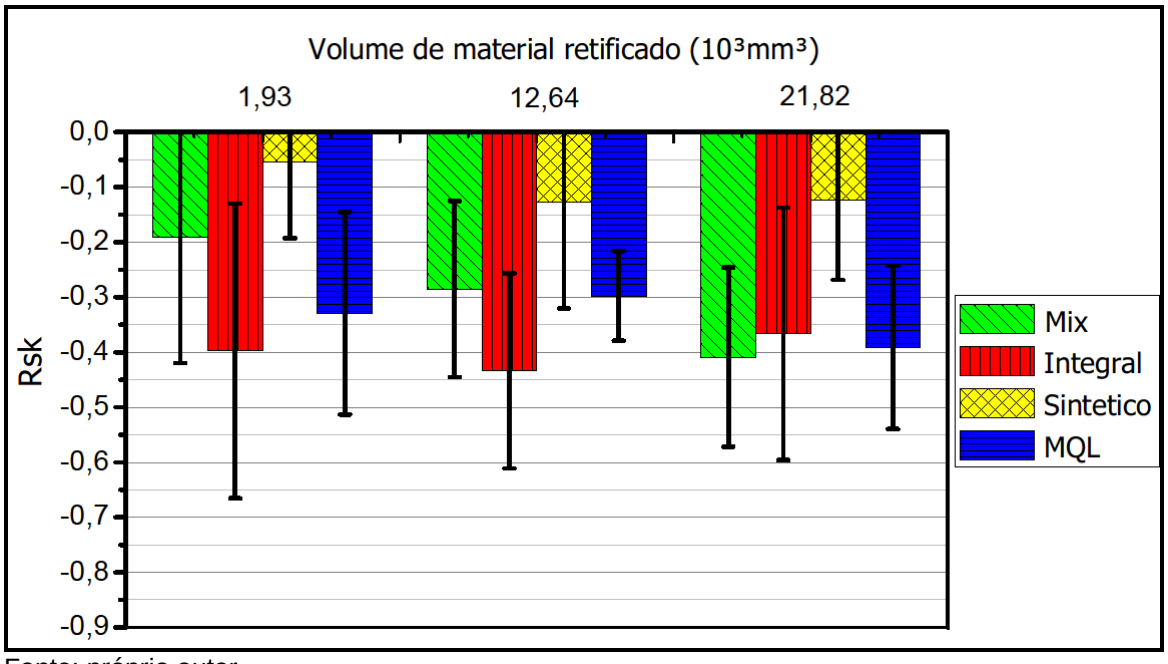
Nas Figuras 40 e 41 são apresentados os resultados do coeficiente de simetria com diferentes fluidos de corte para velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min e volume de material retificado da peça de 1,93 x 10^3 mm^3, 12,64 x 10^3 mm^3 e 21,82 x 10^3 mm^3.

Figura 40 - Coeficiente de simetria Rsk em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Figura 41 - Coeficiente de simetria Rsk em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor.

A retificação cilíndrica por mergulho utilizando os quatros diferentes fluidos de corte assegurou uma superfície com os picos removidos, pois os valores encontrados de Rsk para os diferentes fluidos de corte, quanto para as duas diferentes velocidades de mergulho são valores negativos. Esse tipo de perfil é característico de uma boa superfície de apoio, indicando poucos pontos que podem desgastar-se rapidamente.

Observa-se nas Figuras 40 e 41 que, em ambas as velocidades de mergulho e volume de material retificado, de uma maneira em geral, o fluido integral apresentou maior valor médio negativo de Rsk. Este é um indicativo de bom resultado em superfícies com características desejadas de picos removidos. Os resultados podem ser comparados também com desvio médio aritmético (Ra) em que, os menores valores médios de Ra foram verificados utilizando o fluido integral, devido este fluido oferecer um maior poder lubrificante em relação aos demais fluidos de corte utilizados na pesquisa.

Os menores valores médios negativos de Rsk na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min de acordo com a Figura 41 são para o fluido sintético. Nota-se que esses valores estão bem próximos de zero no volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3 em ambas as velocidades de mergulho. Estes resultados podem indicar que utilizando o fluido sintético, a capacidade em remover os picos em uma superfície retificada é menor e consequentemente a característica dessa superfície é de reter pouco lubrificante devido à característica de elevado poder de refrigeração e pouca capacidade de lubrificação deste fluido.

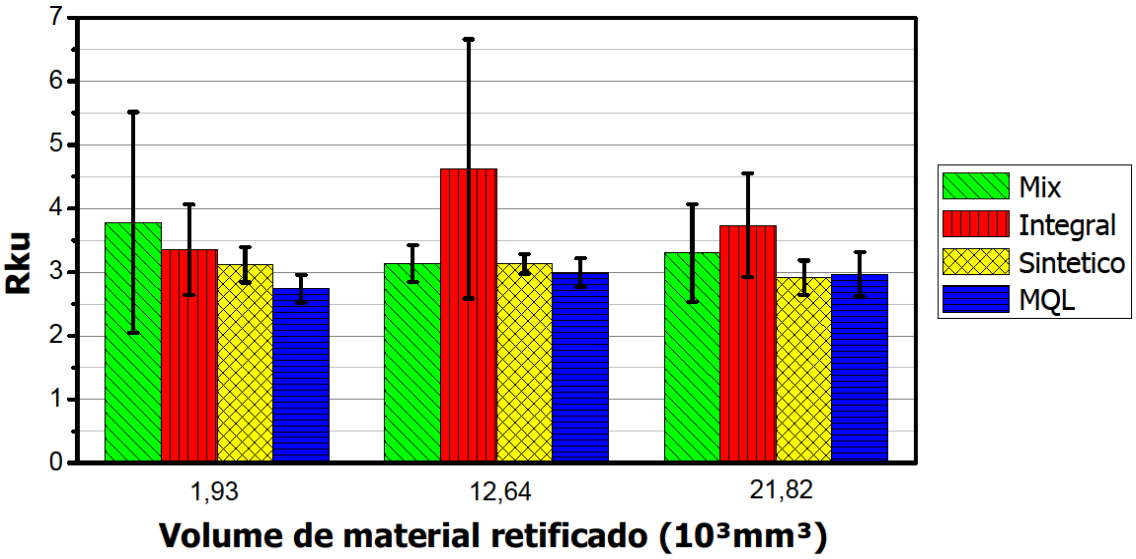
Na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min conforme Figura 40, os menores valores médios negativos de Rsk encontrados foram verificados na retificação utilizando o fluido MQL indicando uma superfície com picos mais elevados. Os resultados estão em acordo também com os resultados encontrados de desvio médio aritmético (Ra), em que os maiores valores médios de Ra em ambas as velocidades de corte são para o MQL. O MQL não foi eficiente quanto ao poder de lubri-refrigeração proporcionando uma superfície com característica de poucos picos removidos em relação aos demais fluidos de corte .

Vale ressaltar que, para todos os fluidos de corte ocorreu elevada dispersão nos valores medidos, sendo estes valores não muito confiáveis. Porém, em quesito de comparação esses valores seguiram comportamento de acordo com cada característica e desempenho dos diferentes fluidos de corte.

5.7 Coeficiente de simetria (Rku)

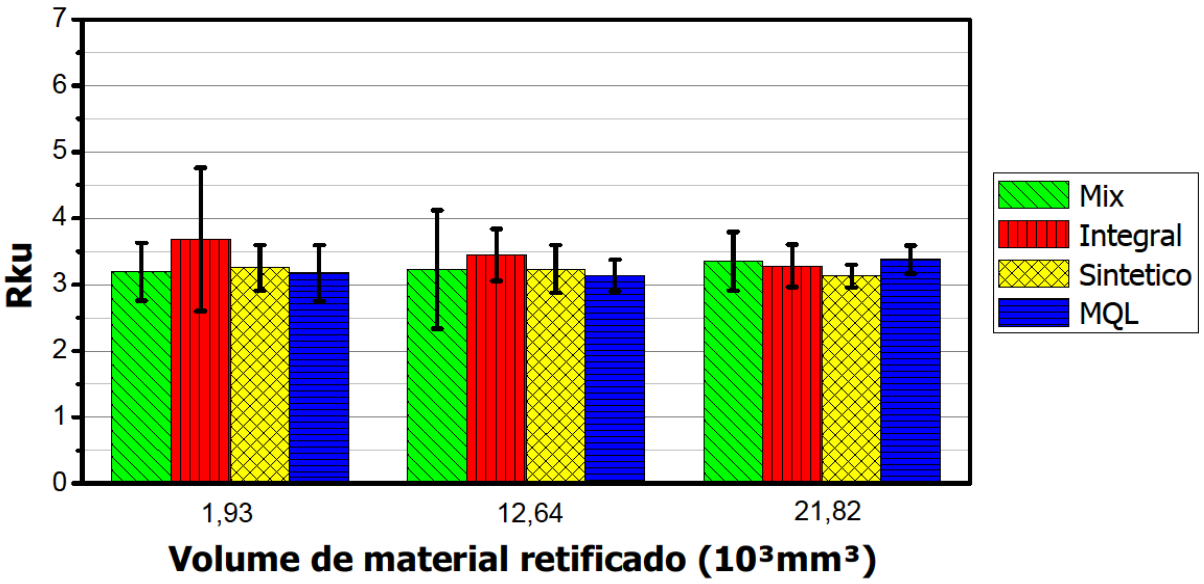
As Figuras 42 e 43 apresentam os resultados do coeficiente de simetria com diferentes fluidos de corte para velocidades de mergulho de 0,6mm/min e 1,2mm/min e volume de material retificado da peça de 1,93 x 10^3 mm^3, 12,64 x 10^3 mm^3 e 21,82 x 10^3 mm^3.

Figura 42 - Coeficiente de simetria Rku em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Figura 43 - Coeficiente de simetria Rku em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min o maior valor médio de Rku encontrado é de 4,6 para o fluido integral e volume de material retificado de 12,64 x 10^3 mm^3. Observa-se que os maiores valores médios de Rku encontrados foram verificados para o fluido integral e os menores para o MQL em ambas as velocidades e volume de material retificado, desconsiderando o desvio padrão.

Verifica-se que na velocidade de mergulho 1,2 mm/min conforme Figura 43, para as três condições de volume de material retificado e ambos o fluidos de corte os valores médios de Rku estão bem próximos de Rku = 3. De acordo com a literatura superfícies retificadas teria um Rku igual a três e além do mais um perfil com uma gaussiana balanceada, ou seja, teríamos uma superfície não áspera e uma superfície com poucos picos.

No geral, não houve uma tendência linear do aumento Rku com o aumento da velocidade de mergulho e com o aumento do volume de material removido, sendo necessário associar este parâmetro a outros parâmetros de rugosidade. Observa-se por meio das Figuras 42 e 43 que os fluidos com características lubrificante (integral e mix) obtiveram maiores valores de Rku comparados ao fluido com característica refrigerante (sintético).

Percebe-se que a dispersão nos valores de Rku utilizando o fluido sintético foi menor comparado aos demais fluidos de acordo com as Figuras 42 e 43, e é provável que em ambas as velocidades de mergulho e volume de material retificado, o fluido sintético manteve-se o mesmo desempenho acarretando poucas variações nos valores de Rku.

De acordo com Figura 42, percebe-se que o valor médio de Rku para o fluido de corte integral aumento no maior volume de material removido de 1,93 x 10^3 mm^3 para 12,64 x 10^3 mm^3 e em seguida o valor de Rku diminuiu com o aumento do volume de material removido de 12,64 x 10^3 mm^3 para 21,82 x 10^3 mm^3 além de ocorrer uma grande dispersão dos valores medidos. Em contrapartida, na Figura 43 observa-se um comportamento padrão para o fluido integral onde os valores médios de Rku foram decrescendo com o aumento de volume de material removido e o mesmo comportamento foi observado para o fluido sintético.

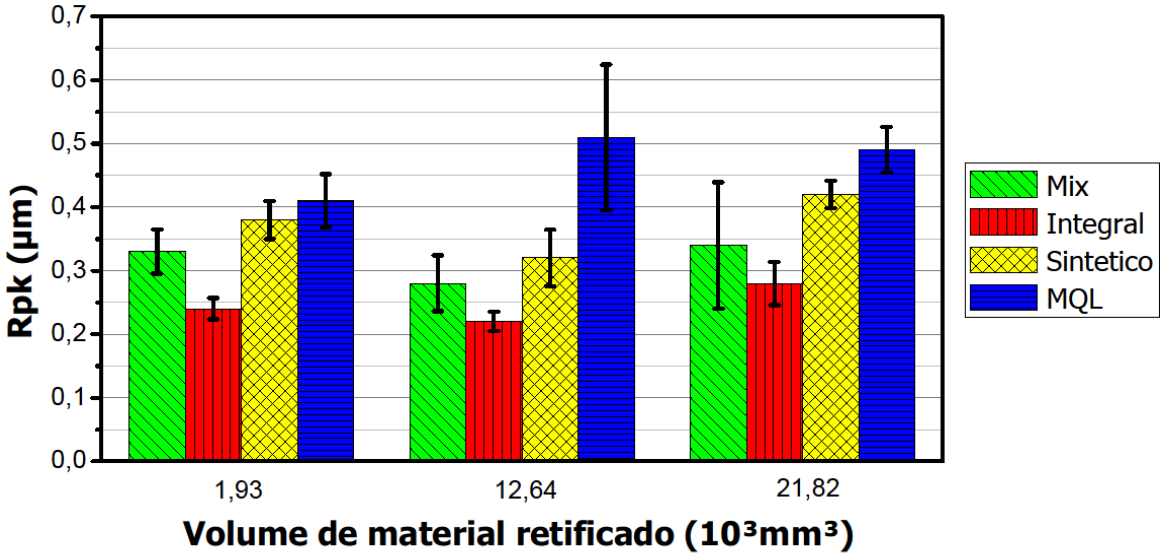
Analisando a Figura 42, o valor de Rku para fluido de corte mix diminui e depois aumentou do menor para o maior volume de material retificado. Ao contrário, na Figura 43 os valores médios de Rku aumentaram com o aumento volume de material retificado seguindo um comportamento padrão, além de ocorrer menores dispersões nos valores medidos.

Verifica-se a velocidade de mergulho 1,2 mm/min Figura 43 que, para as três condições de volume de material retificado e ambos o fluidos de corte, os valores médios de Rku estão próximos de 3,0.

5.8 Altura reduzida do pico (Rpk)

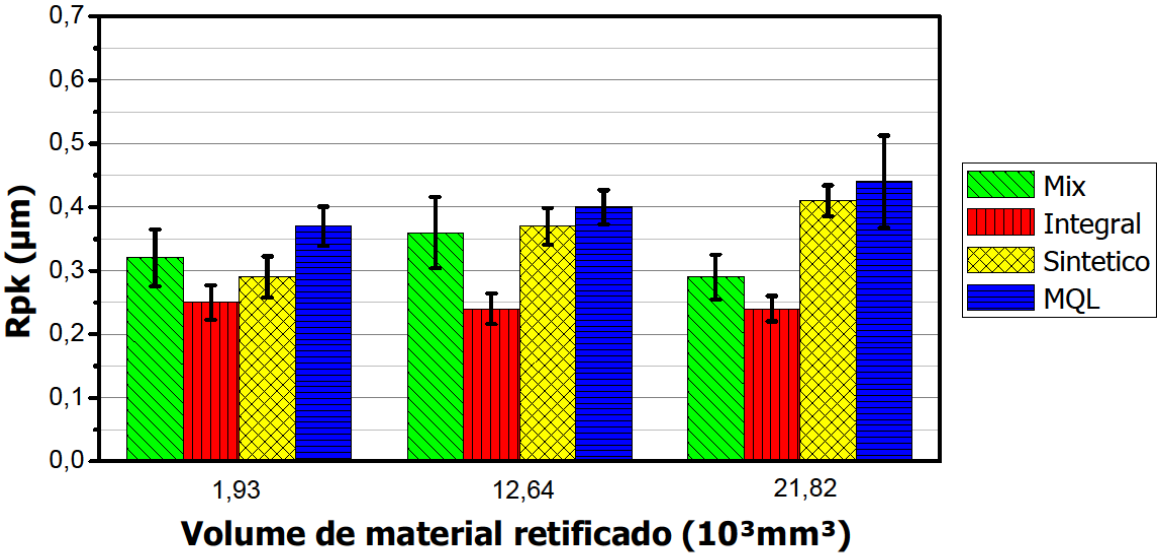
As Figuras 44 e 45 mostram os resultados de Rpk para os diferentes fluidos de corte e velocidades de mergulho de 0,6 e 1,2 mm/min respectivamente, nos diferentes volumes de material retificado.

Figura 44 - Coeficiente de simetria Rpk em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor

Figura 45 - Coeficiente de simetria Rpk em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Analisando a Figura 44 velocidade de mergulho 0,6 mm/min, os maiores valores Rpk foi utilizando MQL e o menor valor médio no volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3. Comparando MQL com os demais fluidos de corte, presume-se que uma superfície retificada utilizando este fluído terá um desgaste inicial mais acentuado devido à superfície possuir picos mais elevados. Na analise de Rk item 5.5 os maiores valores encontrados também foram para MQL, e conforme a curva de Abboutt nas literaturas, à medida que o valor de Rk aumenta o valor de Rpk tende a aumentar. Retificar peças utilizando MQL é interessante usar o menor volume de material removido de 1,93 x 10^3 mm^3, pois nessa condição ganha-se em tempo já que o sobremetal é 0,4 mm, com menor calor produzido conseguindo menor valor de Rpk.

O fluido integral obteve-se os menores valores de Rpk. Na retificação por mergulho utilizando este fluido, a superfície gerada terá picos menos acentuados em relação aos demais fluidos de corte e provavelmente superfícies que vão trabalhar em contato o desgaste inicial será menor. Segundo Oliveira (2004) pequenos valores de Rpk são adequados para obter boas propriedades de amaciamento. Portanto, é recomendável retificar utilizando o fluido integral pensado em propriedades de amaciamento de uma superfície.

Na retificação utilizando o fluido sintético e velocidade de mergulho de 1,2 mm/min, observa-se um aumento do valor de Rpk da menor para a maior quantidade de volume de material retificado. Os valores médios de Rpk para o fluido sintético são menores apenas do que o MQL. Verifica-se na análise de Rpk uma tendência de maiores valores de Rpk para os fluidos com menor eficiência em lubrificar, provavelmente o desgaste gerado nessa condição ser maior e consequentemente o perfil produzido na superfície retificada apresentar picos mais pontiagudos.

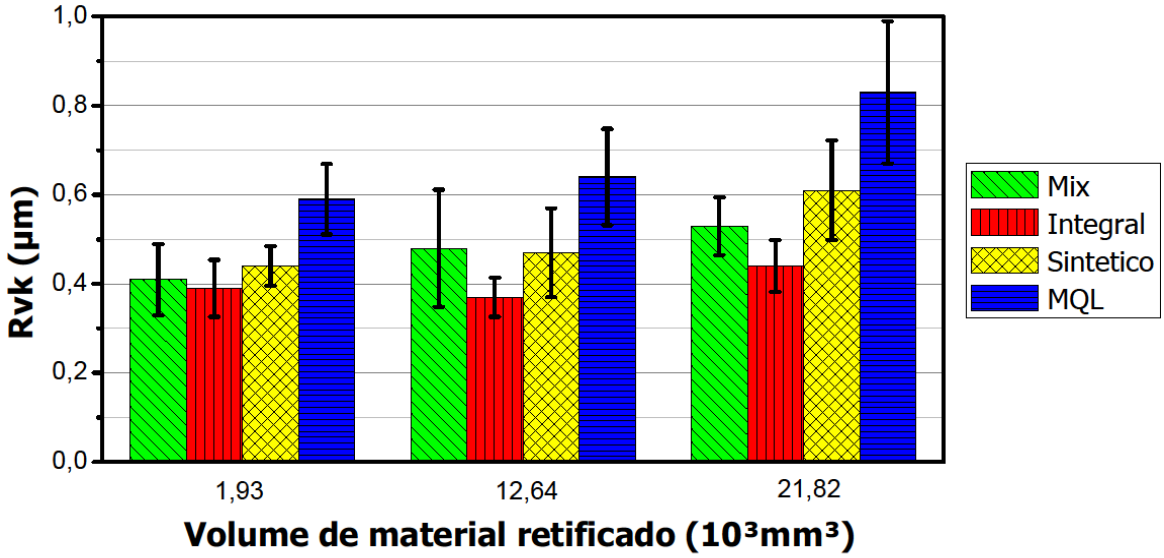
Relacionando os resultados obtidos do parâmetro estatístico Rku e do parâmetro funcional Rpk, uma vez que, esses dois parâmetros analisam a presença de picos na superfície, observa-se que MQL obteve melhores resultados para Rku, no entanto, o fluido de corte integral alcançou melhores resultados para Rpk.

5.9 Profundidade reduzida dos vales (Rvk)

As Figuras 46 e 47 apresentam o parâmetro funcional Rvk para os diferentes fluidos de corte nas velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min.

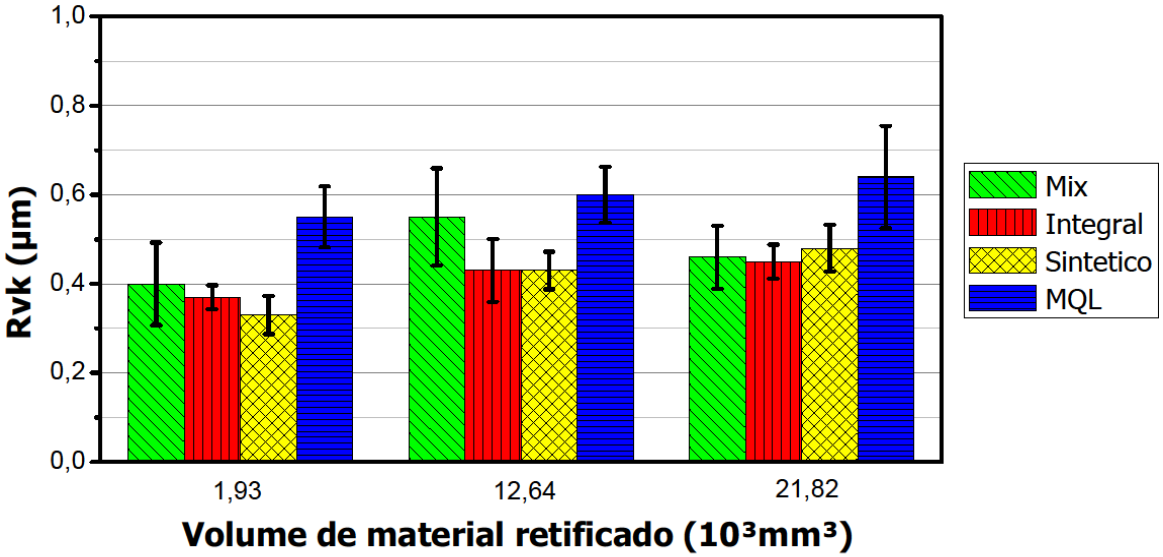
Observa-se nas Figuras 46 e 47 que no geral o comportamento do Rvk tendeu ao aumento crescente do menor para o maior volume de material retificado com pequenas dispersões nos desvios padrões para os diferentes fluidos de corte.

Figura 46 - Coeficiente de simetria Rvk em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Figura 47 - Coeficiente de simetria Rvk em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 46 velocidade de mergulho de 0,6 mm/min, verifica-se que os menores valores médios de Rvk são para o fluido integral. Logo, valores baixos de Rvk indicam que a superfície é de poucos vales e menor capacidade de reter lubrificante.

Observa-se nas Figuras 46 e 47 que, MQL obteve elevados valores de Rvk e, possivelmente uma superfície retificada utilizando esta técnica vai ter maior capacidade de reter lubrificante do que uma superfície retificada utilizando um fluido integral. Logo, altas taxas de material removido propiciam uma superfície com mais vales e consequentemente maior capacidade de reter lubrificante. Por outro lado, maiores taxas de remoção de material produzirão maiores forças de corte e um pior acabamento superficial.

Nota-se uma redução no valor médio de Rvk para os fluidos (sintético e MQL) com o aumento da velocidade de mergulho de 0,6 mm/min para 1,2 mm/min em todos os volumes de material retificado não levando e, consideração o desvio padrão. O mesmo ocorreu no fluido mix exceto no volume de material retificado de 12,64 x 10^3 mm^3. Para o fluido integral a redução no valor médio de Rpk com o

aumento da velocidade de mergulho ocorreu apenas no volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3.

Relacionando o parâmetro Rvk com o parâmetro Rpk item 5.8 pode-se obter informações sobre o atrito entre duas superfícies em contato. Observa-se no geral que os valores médios de Rvk são maiores que todos os valores médios de Rpk nas duas velocidades de mergulho e nos volumes de material retificado para os diferentes fluidos de corte. Contudo, a diferença entre Rvk e Rpk é mais acentuada para MQL seguido pelo fluido de corte integral, e quanto maior for o valor de Rvk em relação à Rpk menor será a fricção, o atrito e o desgaste entre duas superfícies em contato. Sedlacek et al., (2009) relacionaram o desgaste da superfície do aço AISI 52100 com os parâmetros funcionais e descobriram que quanto maior for o valor de Rvk em relação ao Rkp menor será a fricção, o atrito e o desgaste entre duas superfícies em contato.

5.10 Parâmetros 3D do perfil de rugosidade

Os parâmetros 3D de rugosidade das peças retificadas na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material removido de 1,93 x 10^3 mm^3 e 21,82 x 10^3 mm^3 com diferentes fluidos de corte são mostrados na Tabela 8 e 9.

Tabela 8 - Parâmetros do perfil de rugosidade das amostras na velocidade de mergulho 0,6 mm/min e volume de material removido de 1,93 x 10^3 mm^3.

Parâmetros	Mix	Integral	Sintético	MQL
Sa (µm)	0,317	0,262	0,505	0,613
Sz (µm)	2,820	2,740	3,790	4,090
Sv (µm)	1,550	1,590	1,800	2,070
Sp (µm)	1,280	1,150	1,990	2,020
Sku (--)	2,920	3,200	2,640	2,370
Ssk (--)	-0,049	-0,076	0,201	-0,081
Sq (µm)	0,393	0,331	0,618	0,745
Smr (%)	25,100	32,600	6,410	8,590
Smc (µm)	0,517	0,420	0,854	0,970
Spc (1/mm)	19,000	23,300	43,900	21,700
Vm (mm^3/mm^2)	1,64E-05	1,54E-05	2,66E-05	2,62E-05
Vv (mm^3/mm^2)	0,000533	0,000435	0,000881	0,000996
Vmp (mm^3/mm^2)	1,64E-05	1,54E-05	2,66E-05	2,62E-05
Vmc (mm^3/mm^2)	0,000353	0,000291	0,000567	0,000742
Vvc (mm^3/mm^2)	0,000489	0,000396	0,000824	0,000918
Vvv (mm^3/mm^2)	4,37E-05	3,96E-05	5,75E-05	7,75E-05
St (µm)	2,820	2,740	3,790	4,090
Sk (µm)	0,496	0,484	0,905	0,927
Spk (µm)	0,179	0,167	0,317	0,259
Svk (µm)	0,218	0,252	0,386	0,395
Sbi (--)	0,627	0,538	0,673	0,871
Sci (--)	1,560	1,510	1,660	1,480
Svi (--)	0,111	0,120	0,093	0,104

Fonte: próprio autor.

Tabela 9 - Parâmetros do perfil de rugosidade das amostras na velocidade de mergulho 0,6 mm/min e volume de material removido de 21,82 x 10^3 mm^3.

Parâmetros	Mix	Integral	Sintético	MQL
Sa (µm)	0,365	0,281	0,535	0,752
Sz (µm)	3,030	3,560	4,420	5,240
Sv (µm)	1,520	2,010	2,240	2,780
Sp (µm)	1,510	1,550	2,180	2,470
Sku (--)	2,890	3,620	2,920	2,490
Ssk (--)	-0,202	-0,585	-0,131	-0,117
Sq (µm)	0,456	0,359	0,671	0,922
Smr (%)	13,300	3,820	3,390	5,250
Smc (µm)	0,579	0,423	0,850	1,230
Spc (1/mm)	22,400	20,500	19,400	21,700
Vm (mm^3/mm^2)	1,79E-05	1,25E-05	2,88E-05	3,05E-05
Vv (mm^3/mm^2)	0,000597	0,000436	0,000879	0,00126
Vmp (mm^3/mm^2)	1,79E-05	1,25E-05	2,88E-05	3,05E-05
Vmc (mm^3/mm^2)	0,000411	0,000314	0,000608	0,000875
Vvc (mm^3/mm^2)	0,00054	0,000382	0,000798	0,00115
Vvv (mm^3/mm^2)	5,74E-05	5,39E-05	8,03E-05	0,000106
St (µm)	3,030	3,560	4,420	5,240
Sk (µm)	0,639	0,498	1,240	1,040
Spk (µm)	0,237	0,178	0,412	0,277
Svk (µm)	0,278	0,226	0,526	0,505
Sbi (--)	0,582	0,348	0,606	0,937
Sci (--)	1,480	1,310	1,500	1,510
Svi (--)	0,126	0,150	0,120	0,115

Fonte: próprio autor.

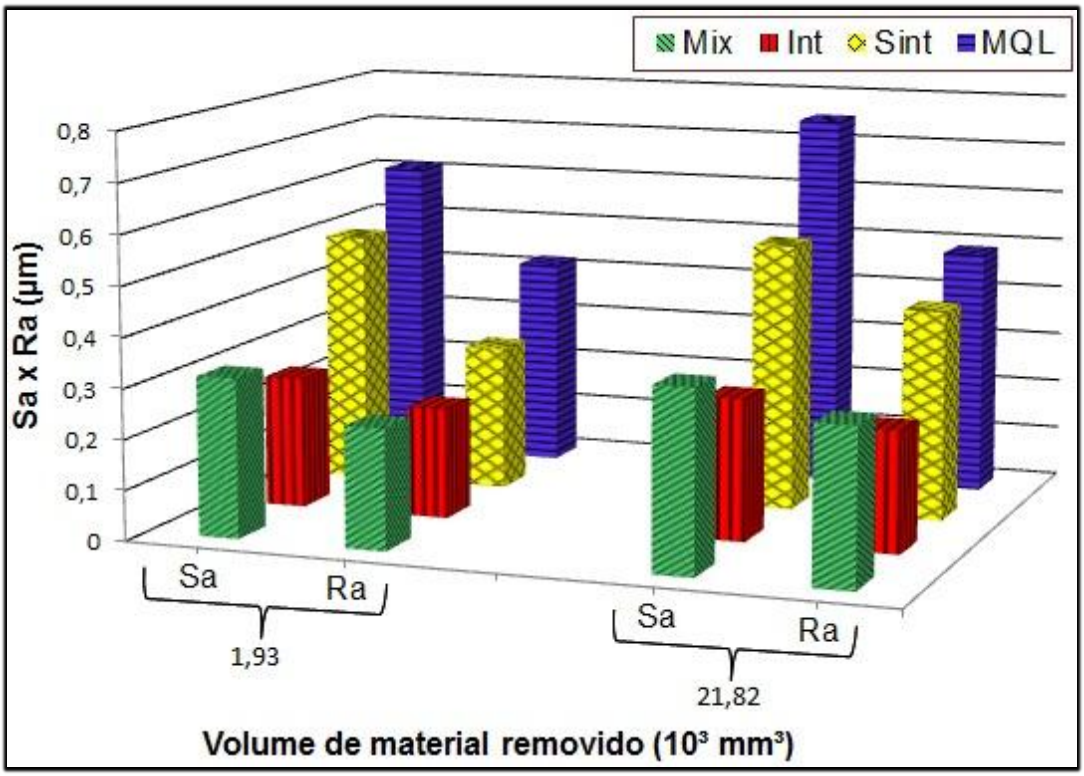
Em termos de parâmetros de amplitude 3D sendo estes (Sa, Sq, Ssk, Sku, Sp, Sv, Sz), pode-se analisar as características das superfícies retificadas e compará-los com os resultados obtidos dos parâmetros 2D oferecendo maior confiabilidade nos resultados medidos. Os valores de rugosidade média (Sa) seguiu o mesmo comportamento dos resultados de Ra conforme Figura 48, onde fluidos com características semelhantes tais como, mix e integral em que sua principal característica é lubrificar obtiveram baixos valores de rugosidade média se comparado com fluidos sintético e MQL de baixo poder lubrificante, devido o coeficiente de atrito ser reduzido e proporcionar um melhor acabamento superficial.

Observa-se em relação á quantidade de volume de material removido, que o comportamento seguiu a mesma tendência em que maiores volumes removidos tende a maiores valores de (Sa) e um pior acabamento superficial.

Utilizando MQL na lubri-refrigeração verifica-se maiores rugosidades em todos os volumes de material removido. O fluido e o ar comprimido no MQL provavelmente não foram eficiente na lubri-refrigeração e remoção do cavaco na zona de corte em relação aos outros fluídos, ocorrendo uma formação de "borra" com cavaco de difícil remoção, prejudicando a interação do rebolo com a peça e consequentemente prejudicando o acabamento superficial da peça.

Sabe-se que, os aspectos funcionais de uma superfície usinada não dependem apenas da rugosidade Sa, mas também de muitos outros aspectos importantes, como a distribuição de picos, a nitidez da superfície, a relação da área de rolamento e outros parâmetros espaciais (WAIKAR e GUO, 2007). No entanto, as Tabelas 8 e 9 nos dão informações sobre a superfície, por meio de vários parâmetros oferecendo uma melhor análise e conclusões sobre a superfície retificada.

Figura 48 – Comparação de rugosidade (Sa) x (Ra) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.



Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros Ssk e Sku tenderam ao mesmo comportamento encontrados para os parâmetros 2D seção 5.6 e 5.7. Verifica-se, menores valores de Sku para MQL e maiores valores para os fluidos integral e mix. Os valores de Ssk encontrados são valores negativos exceto para o fluido sintético no volume de 1,93 x 10^3 mm^3, indicando uma boa superfície de apoio, poucos pontos que podem se desgastar rapidamente e vales profundos relativos para reter o lubrificante, e os mesmos aumentaram no maior volume de material removido, sendo os mais elevados. De acordo com Dong, Sullivan e Stout (1994), a distribuição de altura Ssk basicamente mede a assimetria de desvios de superfície sobre o plano médio, sendo que um valor de desvio negativo representa maior capacidade de retenção de líquidos.

Os parâmetros funcionais (Sk, Spk e Svk) seguiram a mesma tendência dos parâmetros 2D (Rk, Rpk e Rvk). Fluidos mix e integral de mesmas características lubrificante tenderam a menores valores de Sk comparado aos fluidos sintético e

MQL. Observa-se também um aumento no valor de Sk com o aumento de volume de material removido. Os baixos valores de Sk indicam menor volume de vazios no contato entre duas superfícies, e isso pode ser verificado associando este parâmetro ao parâmetro funcional de volume (Vv) em que menores valores de (Vv) foram verificados para os fluidos com menor valor de Rk (mix e integral) e os maiores valores de (Vv) para os fluidos sintético e MQL. Logo, menor valor de Rk indica menor volume de vazios entre duas superfícies proporcionando uma maior área de apoio e maior capacidade de suportar carga.

Ainda em relação às Tabelas 8 e 9, observa-se, maiores valores de Svk para MQL e fluido sintético e valores mais baixos para Mix e fluido integral, e os mesmo tenderam a maiores valores na maior quantidade de volume de material removido de 21,82 x 10^3 mm^3, visto que, altas taxas de material removidas proporcionaram uma superfície com valores elevados de Svk. Logo, as superfícies com valores Svk mais baixos provavelmente terão menores quantidades de vales e menor capacidade de retenção de líquidos lubrificantes.

Verifica-se nas Tabelas 8 e 9, valores elevados de Spk para o fluido sintético, sendo assim, uma superfície retificada utilizando este fluido provavelmente obterá picos mais altos. Os menores valores foram verificados no fluido integral obtendo uma superfície com característica de picos removidos, contudo, superfícies que funcionarão em contato o desgaste inicial será menor. Observa-se que os valores de Spk foram maiores no maior volume de material removido e é aconselhável trabalhar com menores taxas de remoção de material.

Nas Tabelas 10 e 11, são apresentados os parâmetros 3D de rugosidade das peças retificadas na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material removido de 1,93 x 10^3 mm^3 e 21,82 x 10^3 mm^3 com diferentes fluidos de corte.

Tabela 10 - Parâmetros do perfil de rugosidade das amostras na velocidade de mergulho 1,2 mm/min e volume de material removido de 1,93 x 10^3 mm^3.

Parâmetros	Mix	Integral	Sintético	MQL
Sa (µm)	0,340	0,337	0,480	0,508
Sz (µm)	2,590	2,760	3,790	4,120
Sv (µm)	1,240	1,300	1,800	1,990
Sp (µm)	1,350	1,460	1,990	2,130
Sku (--)	2,970	2,870	2,620	2,820
Ssk (--)	0,225	0,400	-0,038	-0,104
Sq (µm)	0,427	0,421	0,594	0,636
Smr (%)	20,800	15,100	4,490	3,260
Smc (µm)	0,562	0,608	0,780	0,798
Spc (1/mm)	23,300	18,200	22,500	17,600
Vm (mm^3/mm^2)	2,35E-05	2,03E-05	2,37E-05	2,83E-05
Vv (mm^3/mm^2)	0,000585	0,000629	0,000804	0,000826
Vmp (mm^3/mm^2)	2,35E-05	2,03E-05	2,37E-05	2,83E-05
Vmc (mm^3/mm^2)	0,000373	0,000376	0,000563	0,000595
Vvc (mm^3/mm^2)	0,000542	0,000593	0,000738	0,000751
Vvv (mm^3/mm^2)	4,33E-05	3,59E-05	6,58E-05	7,48E-05
St (µm)	2,590	2,760	3,790	4,120
Sk (µm)	0,707	0,539	0,641	1,250
Spk (µm)	0,221	0,148	0,250	0,323
Svk (µm)	0,266	0,229	0,285	0,562
Sbi (--)	0,724	0,609	0,580	0,568
Sci (--)	1,700	1,770	1,540	1,500
Svi (--)	0,101	0,085	0,111	0,118

Fonte: próprio autor.

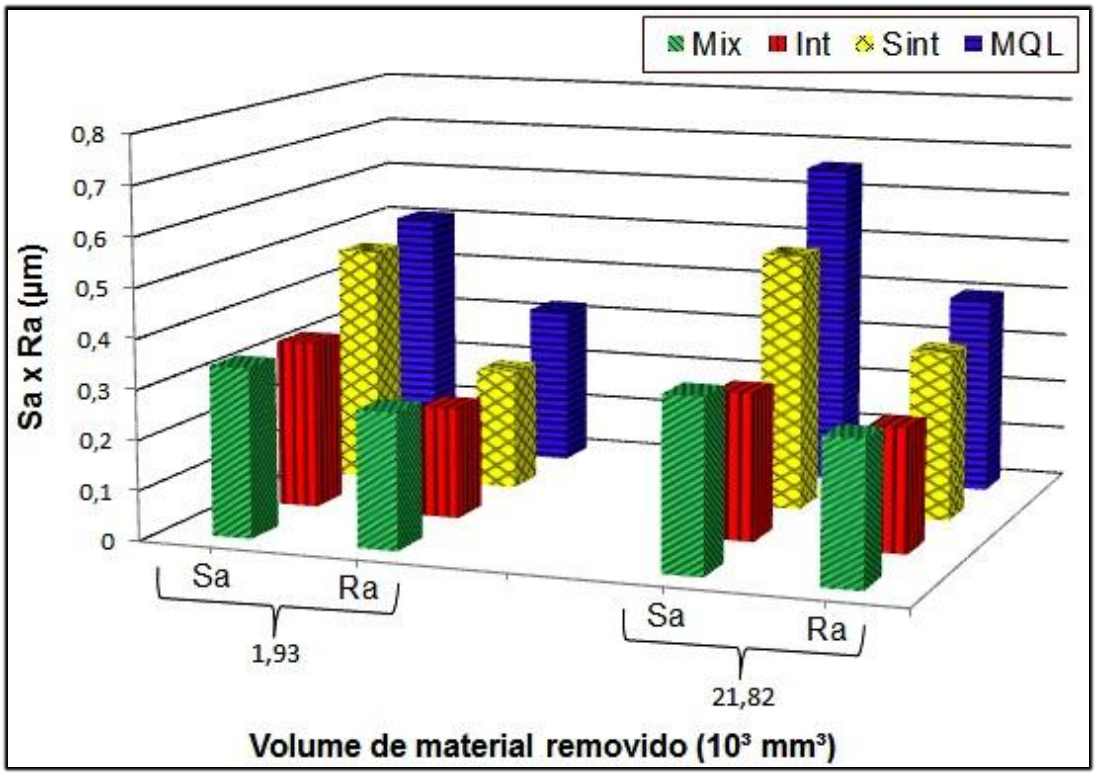
Tabela 11 - Parâmetros do perfil de rugosidade das amostras na velocidade de mergulho 1,2 mm/min e volume de material removido de 21,82 x 10^3 mm^3.

Parâmetros	Mix	Integral	Sintético	MQL
Sa (µm)	0,345	0,294	0,519	0,658
Sz (µm)	3,280	4,270	4,850	5,300
Sv (µm)	1,870	1,420	2,180	3,170
Sp (µm)	1,420	2,850	2,670	2,140
Sku (--)	3,300	4,550	2,800	3,500
Ssk (--)	-0,339	0,084	0,126	-0,741
Sq (µm)	0,437	0,375	0,638	0,843
Smr (%)	15,900	0,070	0,480	5,360
Smc (µm)	0,525	0,458	0,855	0,955
Spc (1/mm)	19,400	20,000	23,400	19,900
Vm (mm^3/mm^2)	1,81E-05	1,87E-05	2,77E-05	2,62E-05
Vv (mm^3/mm^2)	0,000543	0,000477	0,000883	0,000981
Vmp (mm^3/mm^2)	1,81E-05	1,87E-05	2,77E-05	2,62E-05
Vmc (mm^3/mm^2)	0,000392	0,000328	0,00059	0,000737
Vvc (mm^3/mm^2)	0,000485	0,000433	0,000821	0,000843
Vvv (mm^3/mm^2)	5,81E-05	4,46E-05	6,21E-05	0,000137
St (µm)	3,280	4,270	4,850	5,300
Sk (µm)	0,681	0,692	0,938	1,170
Spk (µm)	0,242	0,319	0,269	0,389
Svk (µm)	0,289	0,301	0,419	0,464
Sbi (--)	0,567	0,167	0,400	0,855
Sci (--)	1,370	1,490	1,610	1,220
Svi (--)	0,133	0,119	0,097	0,163

Fonte: próprio autor.

Verifica-se na análise para a velocidade de 1,2 mm.mm^{-1} que os valores de rugosidade média (Sa) seguiram o mesmo comportamento dos resultados de Ra conforme Figura 49, onde fluidos com características semelhantes tais como, mix e integral que tem como sua principal característica lubrificante obtiveram baixos valores de rugosidade média se comparado com fluidos sintético e MQL de baixo poder lubrificante. Com o aumento da velocidade de mergulho conforme Figura 48 para Figura 49, observa-se uma diminuição no valor da rugosidade (Sa) no volume de material de 21,82 x 10³ mm³ exceto para o fluido integral, assim sendo, maiores velocidades de mergulho provavelmente proporcionarão um melhor acabamento superficial.

Figura 49 - Comparação de rugosidade (Sa) x (Ra) em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor.

O comportamento para o parâmetro Sku manteve o mesmo padrão para as duas velocidades de mergulho, onde fluidos de característica lubrificante obteve maior valor em relação a fluidos com característica refrigerante e tendeu ao aumento

do menor para o maior volume de material removido. No volume de material removido de 21,82 x 10^3 mm^3 Sku tendeu ao aumento da menor para a maior velocidade de mergulho. Os valores de Ssk não seguiram um comportamento padrão, sendo encontrados valores negativos e positivos.

Na análise dos parâmetros funcionais, o parâmetro Sk tendeu a maiores valores para fluidos com baixo poder lubrificante (sintético e MQL). Este parâmetro seguiu a tendência em aumentar com o aumento da velocidade de mergulho conforme Tabelas 8 e 9 para Tabelas 10 e 11, exceto o fluido sintético que não seguiu esse comportamento. Associando os parâmetros Sk e Vv, percebe-se comportamento semelhante a velocidade de 0,6 mm/min, no qual baixos valores de Sk tenderam a baixos valores de Vv para fluidos de características lubrificante e maiores valores para os fluidos com característica refrigerante. Em relação ao parâmetro S_{bi}, o mesmo não seguiu um comportamento padrão, porém verifica-se que no geral os maiores valores de S_{bi} são para MQL.

O parâmetro Svk tendeu ao mesmo comportamento da velocidade de 0,6mm/min em que, maiores valores foram verificados para o fluido sintético e MQL e menor valor para os fluidos mix e integral, sendo que, superfícies com valores Svk mais baixos provavelmente terão vales menos profundos e menor capacidade de retenção de fluidos lubrificantes.

Dong, Sullivan e Stout (1994), afirmam que um S_{vi} maior indica uma boa capacidade de retenção de fluido na zona de vale. Logo, associando o parâmetro Svk ao parâmetro de índice funcional S_{vi} (índice de retenção de fluido no vale), percebe-se que alguns valores estão coerentes como exemplo, para MQL em que os valores Svk e S_{vi} foram maiores em relação aos demais fluidos de corte nos dois volumes de material removidos conforme Tabelas 10 e 11.

De acordo com Tabelas 10 e 11, valores elevados de Spk para MQL indicam uma superfície com picos mais elevados em comparação aos demais fluidos de corte. Os menores valores foram verificados para o fluido integral Tabela 10 volume de material removido de 1,93 x 10^3 mm^3 e fluido mix Tabela 11 volume de material removido de 21,82 x 10^3 mm^3 obtendo uma superfície com característica de picos removidos, sendo que, superfícies que funcionarão em contato, provavelmente o desgaste inicial será menor.

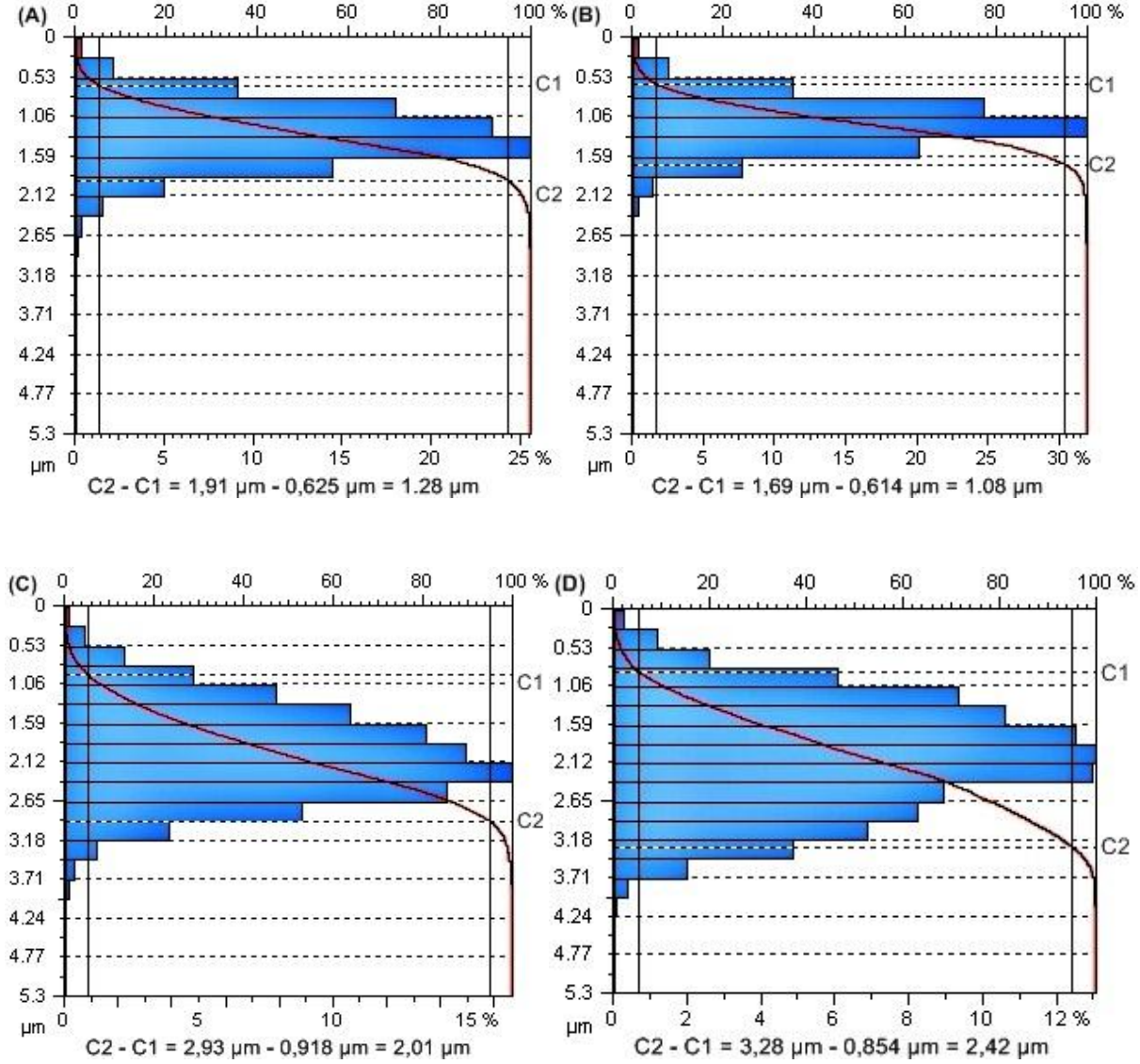
5.11 Curva de Abbott–Firestone

As Figuras 50 a 53 apresentam as curvas de Abbott–Firestone das superfícies retificadas para os diferentes fluidos de corte, velocidade de mergulho e volume de material removido, representando os volumes (Vmp, Vmc, Vvc e Vvv) conforme apresentado na revisão bibliográfica item 3.5 Figura 15. Logo, é possível fazer uma análise dos parâmetros de volume e relacioná-los com os parâmetros funcionais (Sk, Spk e Svk).

Percebe-se nas Figuras 50 a 53 que quanto maior inclinação da curva de Abbott-firestone na área central do gráfico, maior a distância entre C1 e C2 e consequentemente o volume de vazios no núcleo (Vvc) e volume de material no núcleo (Vmc) tende a aumentar. É possível identificar a mudança geral na forma das curvas onde os fluidos, integral e mix apresentam menor inclinação em relação aos fluidos sintético e MQL.

O fluido mix e integral obtiveram menor volume de vazios no núcleo (Vvc) e menor volume de material no núcleo (Vmc) de acordo com a Figura 50 (A) e (B), quando comparado com os fluidos sintético e MQL conforme Figura 50 (C) e (D). Isso pode ser confirmado por meio dos resultados desses parâmetros apresentado na Tabela 8 onde o menor valor de Vvc nessa condição apresentada foi de 0,000396 mm^3/mm^2 para o fluido integral e o maior valor de Vvc foi para MQL valor esse de 0,000918 mm^3/mm^2 apresentando um aumento de 132%. Associando Vvc e Vmc ao parâmetro profundidade de rugosidade do núcleo (Sk), esse comportamento se confirma, pois os menores valores de Sk foram para os fluidos integral e mix e os maiores valores para os fluidos sintético e MQL.

Figura 50 – Curva de abbott da superfície retificada com fluido: (A) mix, (B) integral, (C) sintético e (D) MQL, na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3.



Fonte: próprio autor.

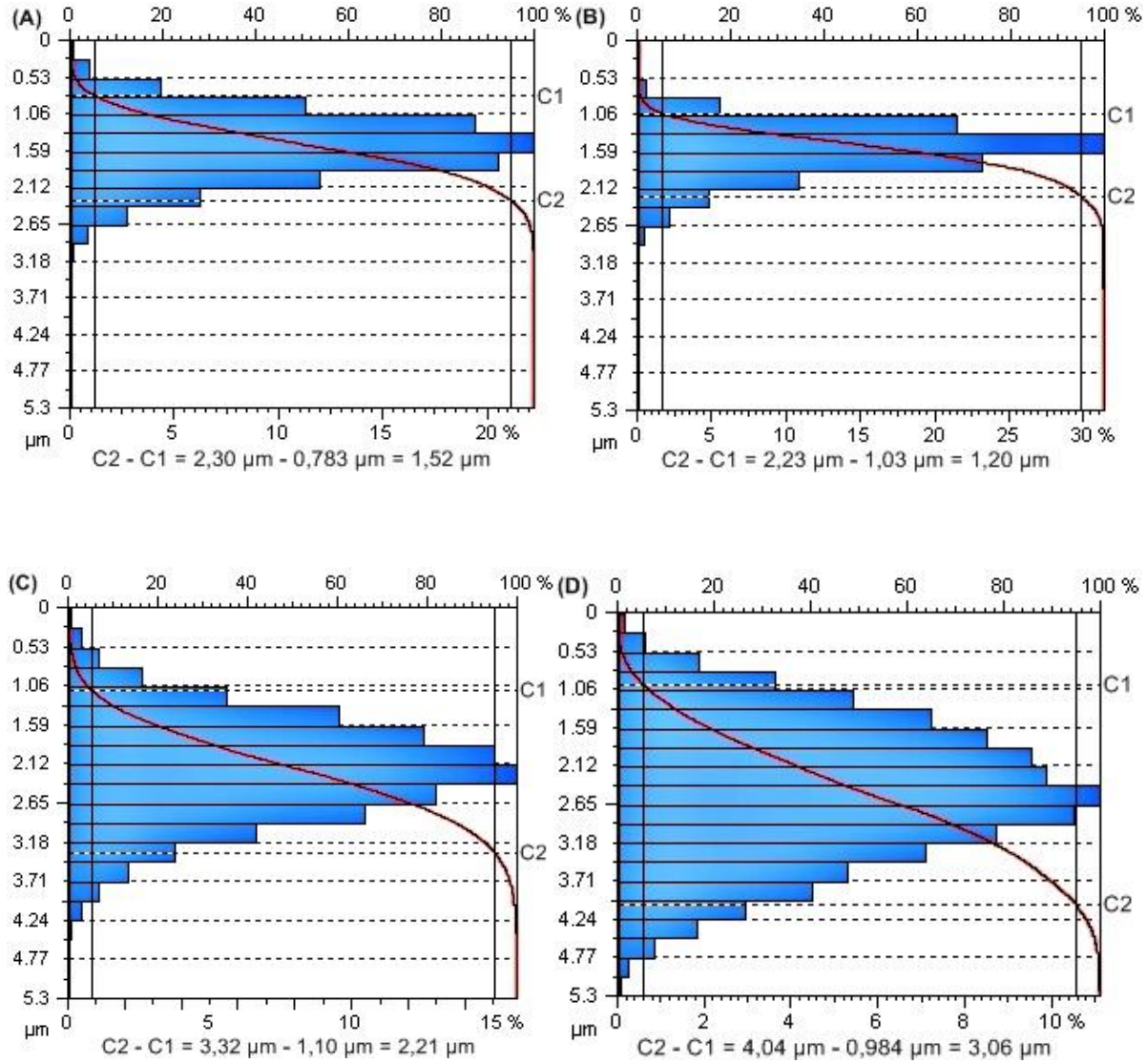
Associando os parâmetros volume de material no pico (Vmp) e altura reduzida dos picos Spk, o comportamento segue coerente com a característica dos fluidos em que os menores valores de Spk e menores valores de Vmp conforme Figura 50 e Tabela 8, foram verificados para os fluidos com caraterísticas lubrificante (mix e integral), e os maiores valores para os fluidos com características refrigerante (sintético e MQL). Da mesma forma, associando o parâmetro volume de vazio nos vales (Vvv) e profundidade reduzida dos vales (Svk) percebe-se pela Figura 50 e Tabela 8 o mesmo comportamento anteriormente analisado.

A Figura 51 mostra o comportamento dos parâmetros de volumes (Vmp, Vmc, Vvc e Vvv) para os diferentes fluidos de corte na velocidade de 0,6 mm/min e volume de material retificado de 21,82 x 10^3 mm^3.

Observa-se nas 4 curvas da Figura 51 que os parâmetros de volume seguiram o mesmo comportamento da Figura 50, sendo as menores inclinações das curvas de Abbott para os fluidos com características lubrificante (mix e integral) e as maiores inclinações para os fluidos com baixo poder lubrificante (sintético e MQL). Consequentemente, a distância entre (C1-C2) conforme calculado nas figuras são menores para os fluidos Integral e mix e maiores valores do sintético e MQL.

Percebe-se também que, com o aumento do volume de material removido de 1,93 x 10^3 mm^3 Figura 50 para 21,82 x 10^3 mm^3 Figura 51, as inclinações das curvas e a distância entre C1 e C2 para todos os fluidos de corte aumentaram e consequentemente os parâmetros de volumes (Vmc, Vvc) aumentaram. É provável que, maior retirada de cavaco no processo de retificação por se tratar de uma situação mais crítica, os fluidos perdem eficiência quanto à função lubrificante e de refrigeração, e fatores como aumento de forças de corte e problemas com afiação do rebolo podem vir a prejudicar a integridade superficial do material retificado.

Figura 51 – Curva de abbott da superfície retificada com fluido: (A) mix, (B) integral, (C) sintético e (D) MQL, na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material retificado de 21,82 x 10^3 mm^3.



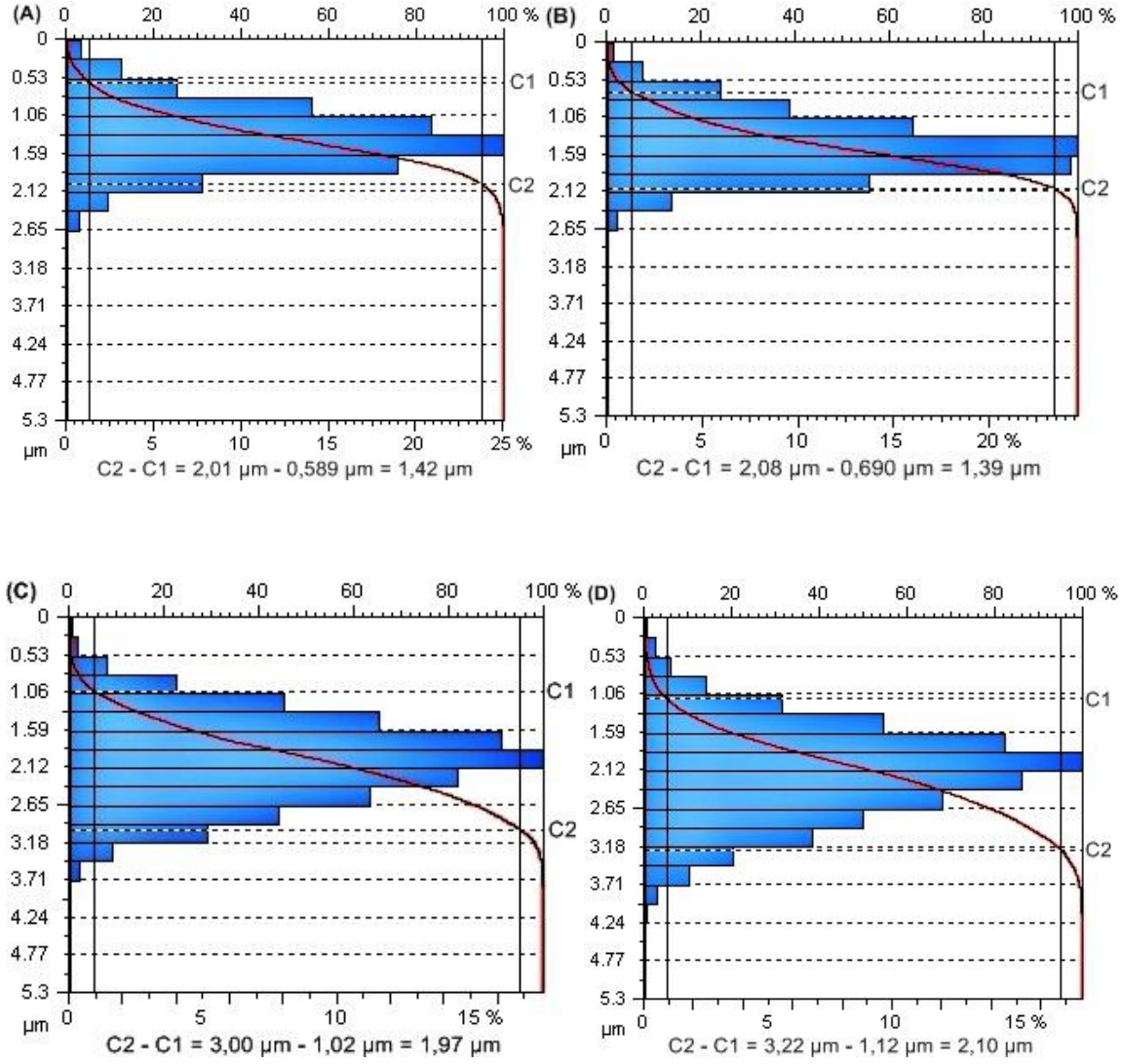
Fonte: próprio autor.

As Figuras 52 e 53 mostram o comportamento dos parâmetros de volumes (Vmp, Vmc, Vvc e Vvv) para os diferentes fluidos de corte na velocidade de 1,2 mm/min e volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3 e 21,82 x 10^3 mm^3 respectivamente.

Os parâmetros de volume seguiram o mesmo comportamento da velocidade de mergulho de 0,6 mm/min, sendo os menores valores para os fluidos com características lubrificante (mix e integral) e os maiores valores para os fluidos com caracteristicas refrigerante (sintético e MQL), já que (C2-C1) conforme calculado nas

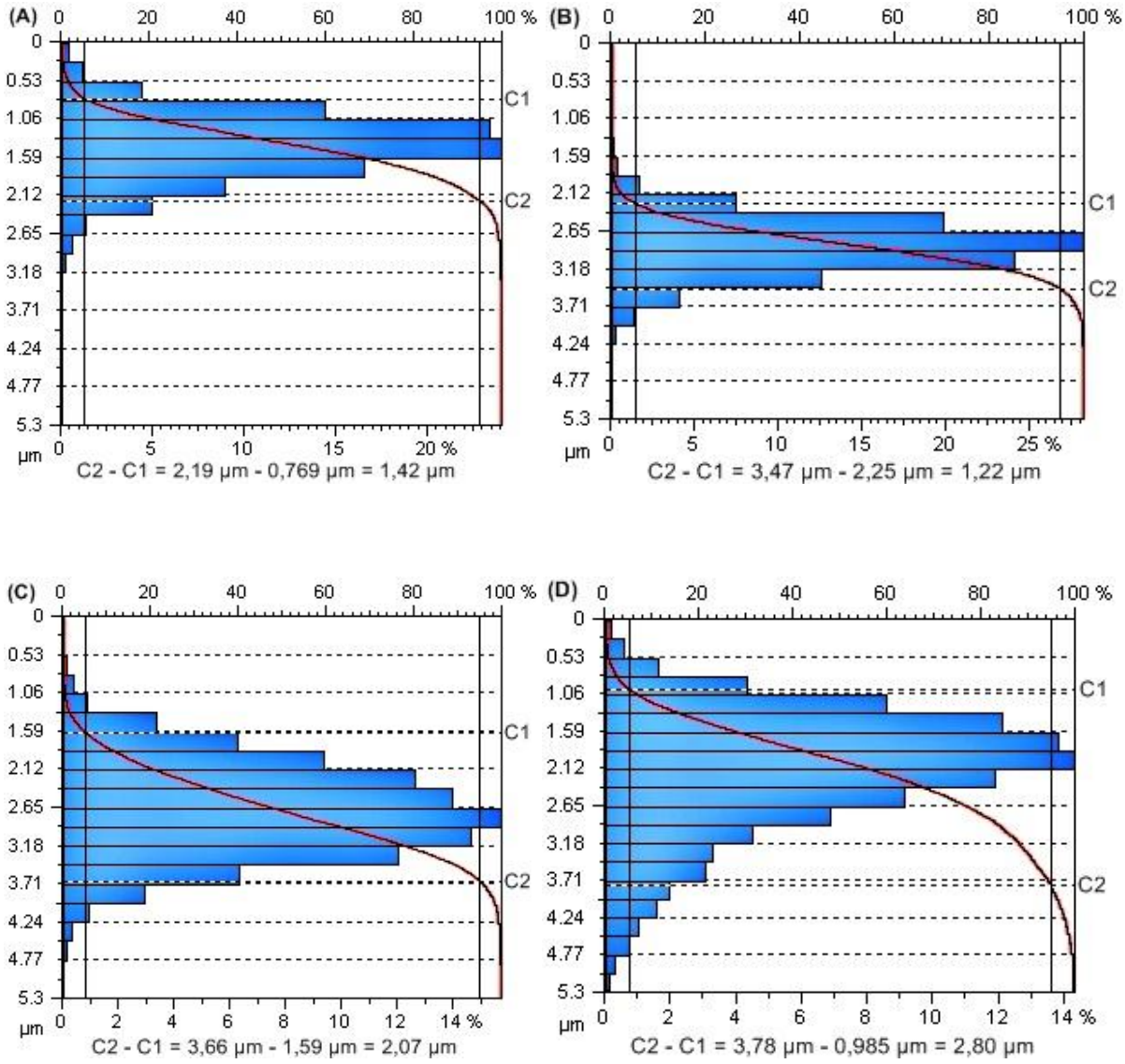
figuras também são menores para os fluidos integral e mix, seguido pelos maiores valores do sintético e MQL.

Figura 52 – Curva de abbott da superfície retificada com fluido: (A) mix, (B) Integral, (C) sintético e (D) MQL, na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material retificado de 1,93 x 10³ mm³.



Fonte: próprio autor.

Figura 53 – Curva de abbott da superfície retificada com fluido: (A) mix, (B) integral, (C) sintético e (D) MQL, na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material retificado de 21,82 x 10³ mm³.



Fonte: próprio autor.

Associando os parâmetros Sk, Spk e Svk com os parâmetros de volume “Vmp, Vmc, Vvc e Vvv” vide Tabelas 10 e 11 e com os gráficos das Figuras 52 e 53, nota-se comportamento semelhante à velocidade de 0,6 mm/min, Figuras 50 e 51 para as duas condições de volume de material removido, ou seja, no geral o comportamento segue coerente com a característica e funções dos fluidos em que os menores valores de Sk, Spk e Svk e os menores valores de Vmp, Vmc, Vvc e Vvv

foram verificados para os fluidos com caraterísticas lubrificante (mix e integral), e os maiores valores para os fluidos com características refrigerantes (sintético e MQL).

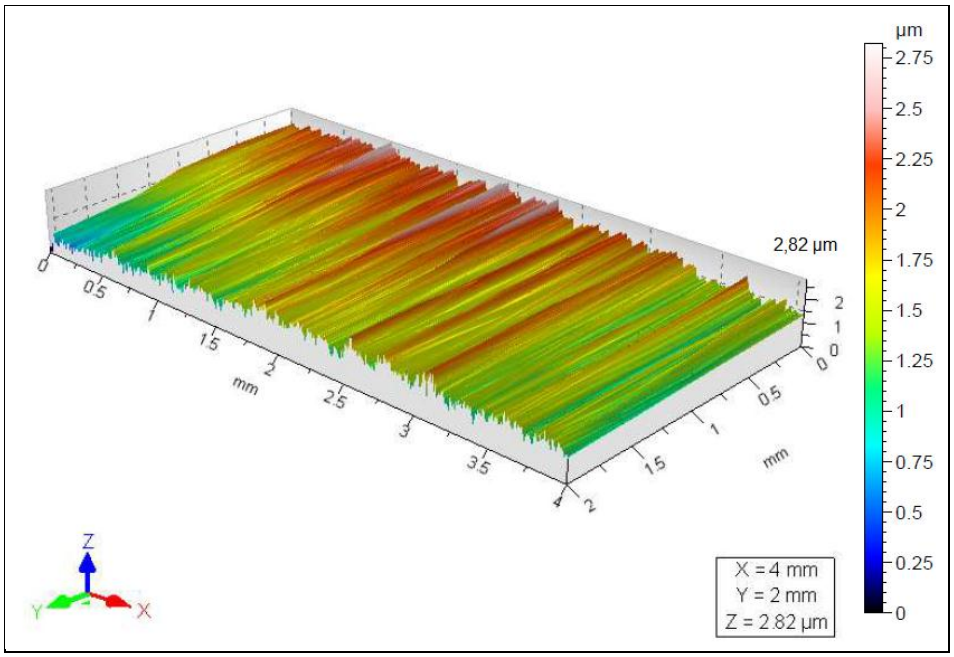
Percebe-se que o fluido integral se comportou de maneira contrária ao esperado. Com o aumento do volume de material removido Figura 52 para Figura 53 na velocidade de 1,2 mm/min, a distância entre C1 e C2 diminuiram e consequentemente os parâmetros 3D de volume de material no núcleo (Vmc) e volume de vazios no núcleo (Vvc) também diminuíram.

Na análise das curvas de Abbott foi possível verificar a influencia da lubri-refrigeração e dos parâmetros de usinagem no comportamento das superfícies, por meio da mudança na forma da curva associado aos parâmetros de rugosidade, dando ao estudo maior precisão e confiabilidade aos resultados e tendo várias aplicações. Por exemplo, Matos Junior (2009) analisou a topografia da superfície de cilindros de motores de combustão interna e verificou-se mudança na forma da curva à medida que ocorre a evolução do desgaste, sendo este responsável por indicar o amaciamento da superfície, ou seja, a remoção dos picos do perfil. Outro estudo feito por Kundrak, Gyani e Bana (2007) onde avaliaram uma superfície retificada, associaram-se as curvas de Abbott com a textura de rugosidade verificando as topografias das superfícies, na qual, foi possível observar uma distribuição diferente do tamanho do grão do rebolo e obviamente os sulcos foram mais ásperos de uma amostra x em relação à outra amostra y devido aos menores grãos que participaram do corte.

5.12 Textura superficial

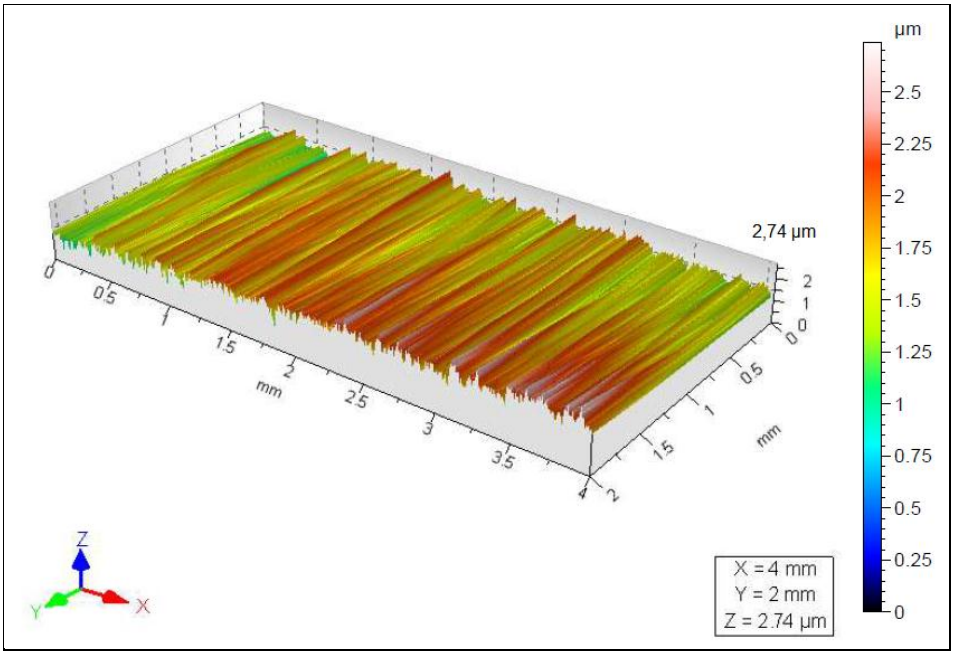
As Figuras 54 a 57 mostram as imagens topográficas das superfícies retificadas na velocidade de 0,6 mm/min e volume de material de 1,93 x 10^3 mm^3 para os diferentes fluidos de corte utilizados na pesquisa.

Figura 54 – Topografia da superfície retificada com fluido mix na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 1,93 x 10³ mm³.



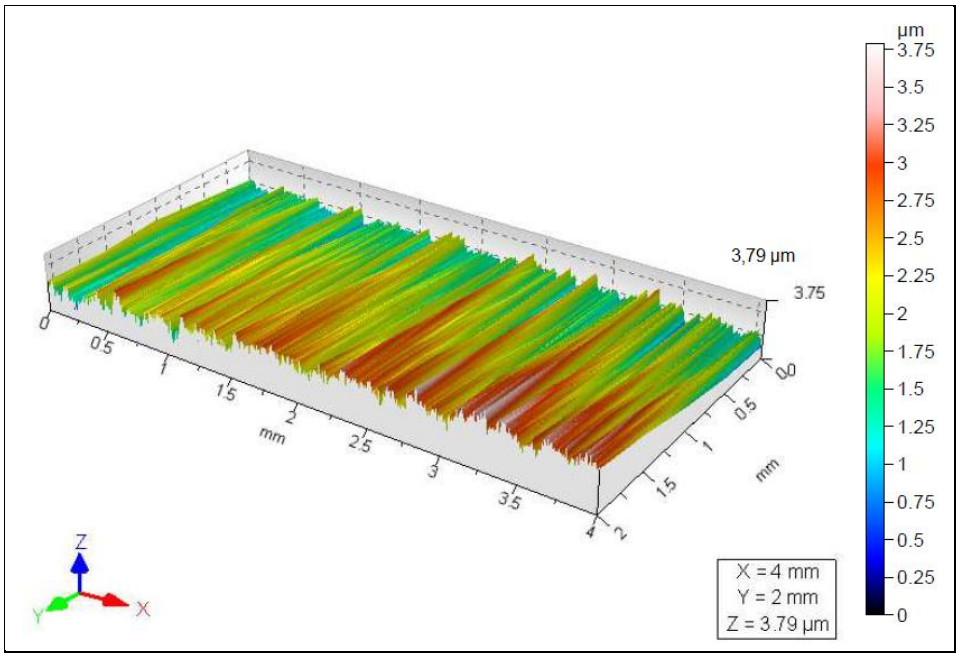
Fonte: próprio autor.

Figura 55 - Topografia da superfície retificada com fluido integral na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 1,93 x 10³ mm³.



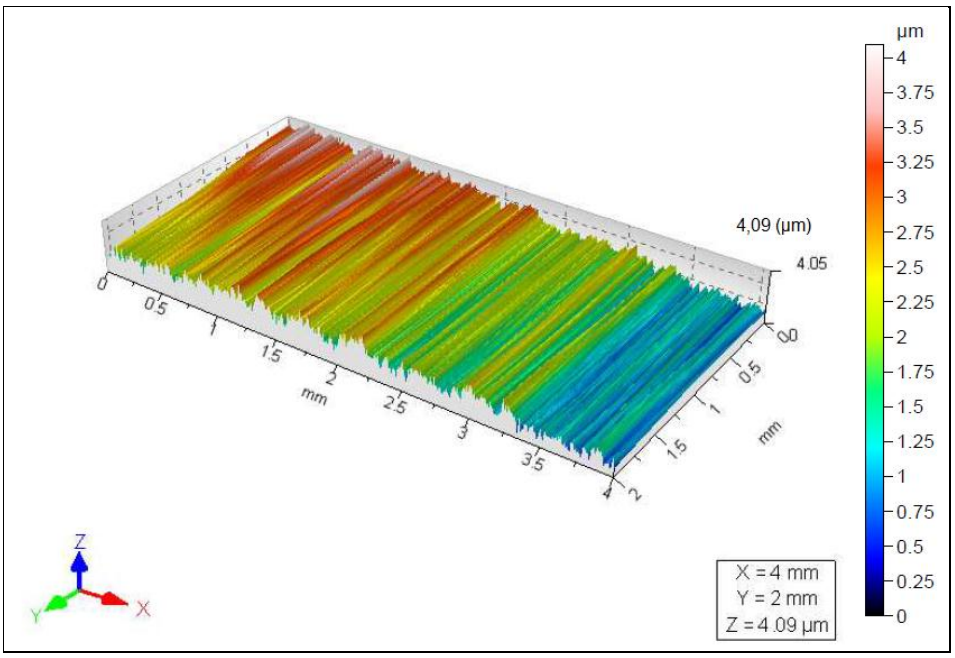
Fonte: próprio autor.

Figura 56 - Topografia da superfície retificada com fluido de corte sintético na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 1,93 x 10³ mm³.



Fonte: próprio autor.

Figura 57 - Topografia da superfície retificada com MQL na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 1,93 x 10³ mm³.

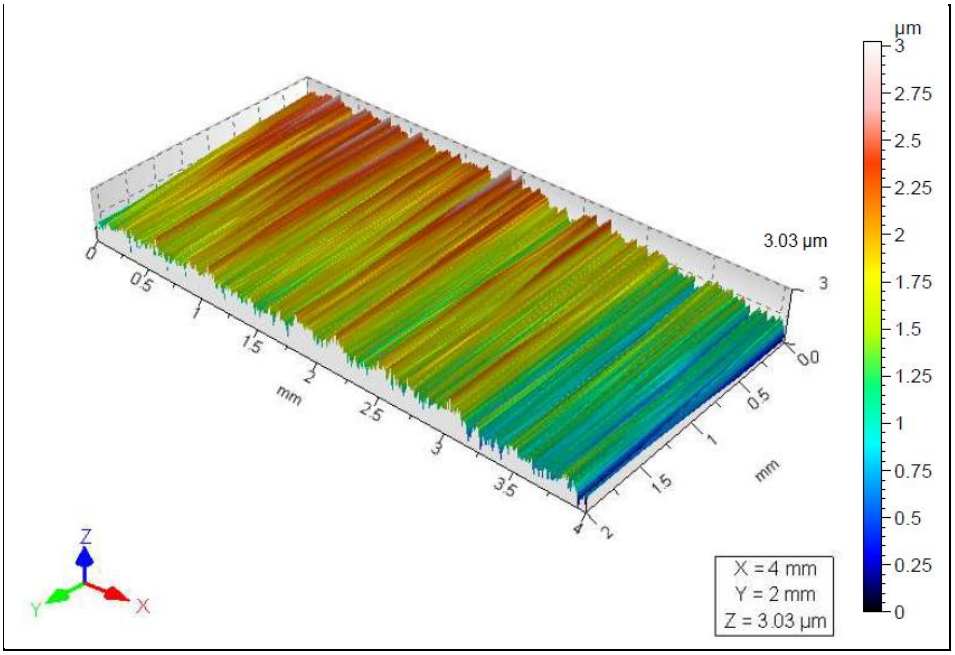


Fonte: próprio autor.

De acordo com as imagens obtidas verifica-se que o fluido integral apresentou menor amplitude total do perfil de rugosidade de (2,74 µm) seguido pelo mix (2,82 µm), sintético (3,79 µm) e por último MQL (4,09 µm), indicando uma variação percentual de aproximadamente 49% da menor para a maior amplitude total do perfil de rugosidade. No entanto os fluidos com características lubrificantes proporcionaram menor amplitude total (distância entre o maior pico e o vale mais profundo) do seu perfil de rugosidade, se comparado com os fluidos com característica em refrigerar, e também os sulcos do perfil da rugosidade são menos intensos para os fluidos mix e integral se comparado com o sintético e MQL. Tal observação já foi confirmada na análise dos parâmetros de rugosidade nas seções anteriores.

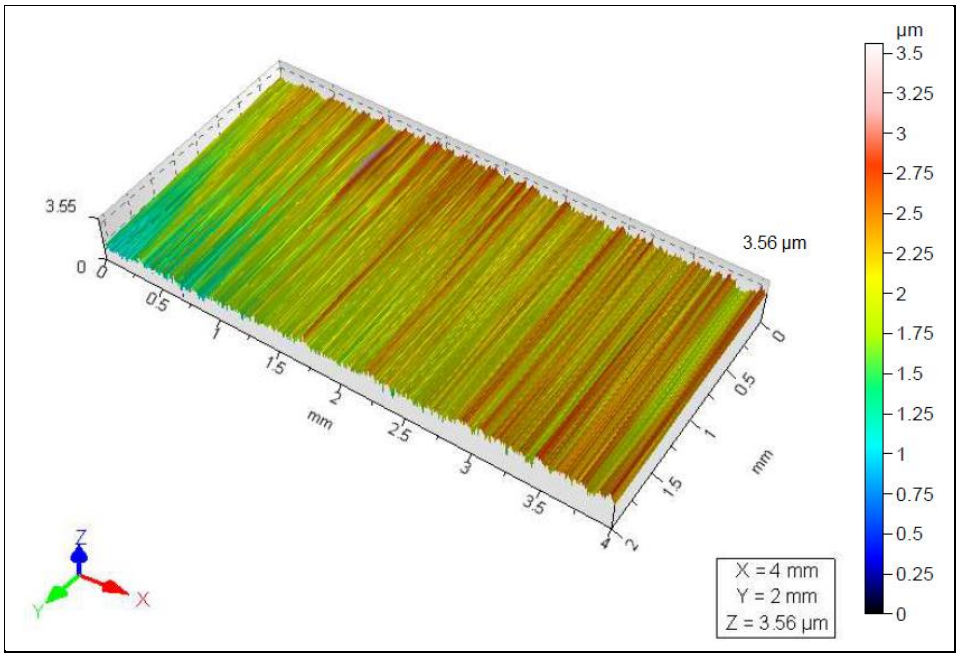
As Figuras 58 a 61 mostram as imagens topográficas do perfil de rugosidade das superfícies retificadas na velocidade de 0,6 mm/min e volume de material de 21,82 x 10^3mm³ para os diferentes fluidos de corte utilizados na pesquisa.

Figura 58 - Topografia da superfície retificada com fluido mix na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 21,82 x 10^3 mm³.



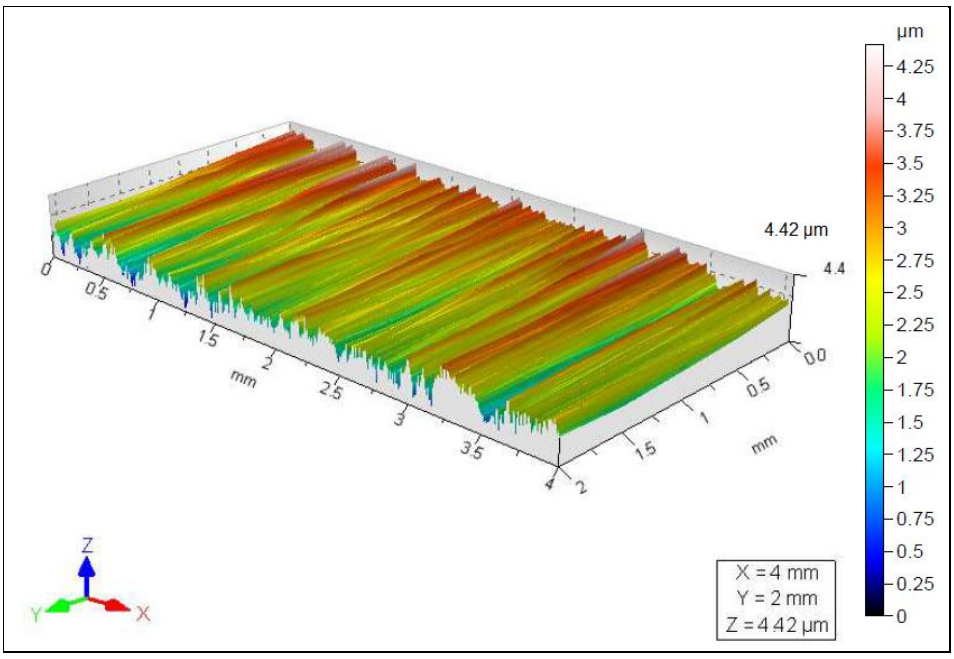
Fonte: próprio autor.

Figura 59 - Topografia da superfície retificada com fluido integral na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 21,82 x 10³ mm³.



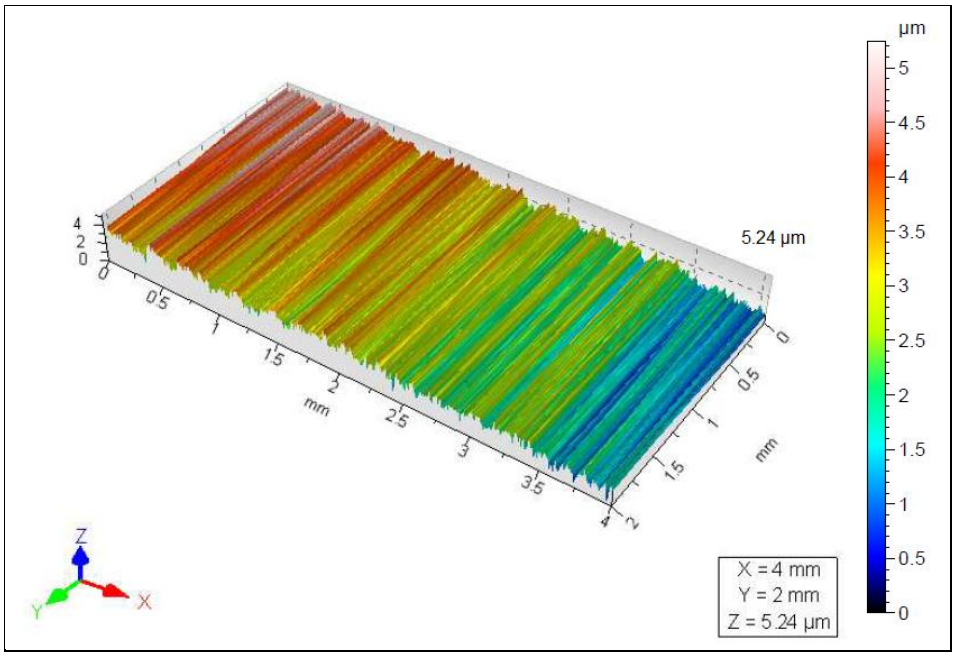
Fonte: próprio autor.

Figura 60 - Topografia da superfície retificada com fluido de corte sintético na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 21,82 x10³mm³.



Fonte: próprio autor.

Figura 61 - Topografia da superfície retificada com MQL na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min e volume de material de 21,82 x $10^3 mm^3$.



Fonte: próprio autor.

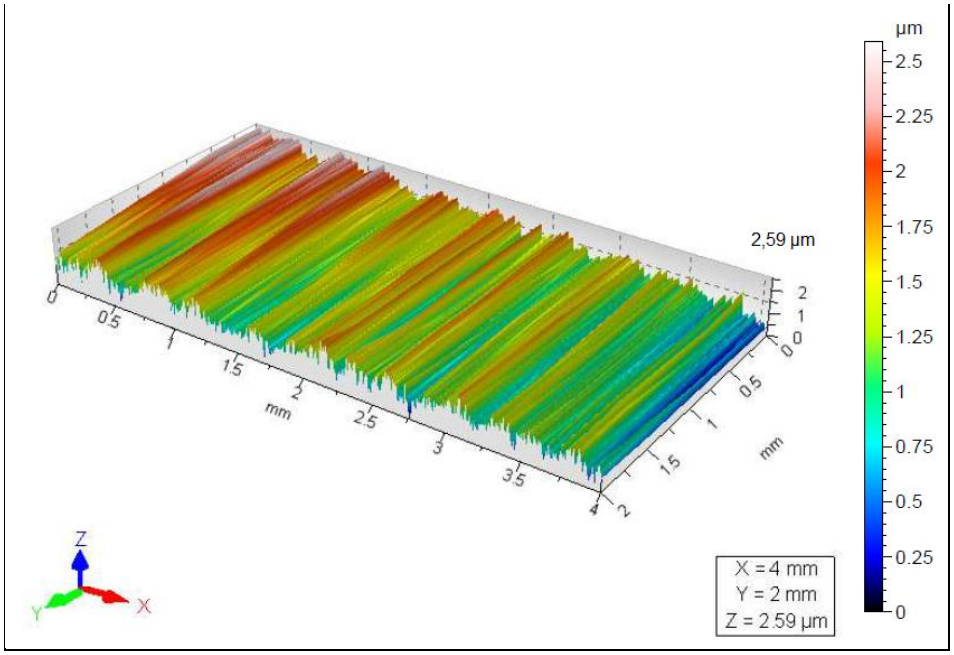
Percebe-se pelas Figuras 58 a 61 que, a menor amplitude total do perfil de rugosidade foi obtida para o fluido mix (3,03 µm), seguido pelo integral (3,56 µm), sintético (4,42 µm) e MQL (5,24 µm), apresentando uma variação percentual de aproximadamente 73% da menor para a maior amplitude total do perfil de rugosidade.

Comparando os dois volumes de material removidos na velocidade de 0,6 mm/min, verifica-se que a amplitude total do perfil de rugosidade para o fluido mix, aumentou de (2,82 µm) Figura 54 para (3,03 µm) Figura 58 ocorrendo uma variação percentual de aproximadamente 7%. O mesmo comportamento ocorreu para o fluido integral com uma variação percentual de aproximadamente 29%, fluido sintético com uma variação percentual de aproximadamente 16% e MQL com uma variação percentual de aproximadamente 28%. No processo de retificação, maiores volumes de material removido a amplitude total do perfil de rugosidade tende a ser maior, visto que, nessa condição o rebolo tende a ser mais solicitado ocorrendo maiores esforços devido a maior penetração e maior retirada de material na superfície do corpo de prova. É provável que ocorra um aumento da temperatura de trabalho, já que, nessa condição o rebolo é mais solicitado e podendo ocasionar uma variação

no tamanho dos grãos levando a perda de parte da sua afiação se comparado com o volume de 1,93 x 10^3 mm^3 na qual o rebolo é menos solicitado. De acordo com Kundrak, Gyani e Bana (2007) onde avaliaram amostras torneadas e retificadas por meio dos parâmetros 3D, essa variação na amplitude total do perfil de rugosidade ocorre em razão de menor quantidade de grãos do rebolo, participarem do corte na retirada de material. Na maioria das aplicações práticas isso não é desejável já que fatores como picos mais elevados proporcionam um desgaste mais acentuado e uma serie de outros problemas como analisado nas seções anteriores.

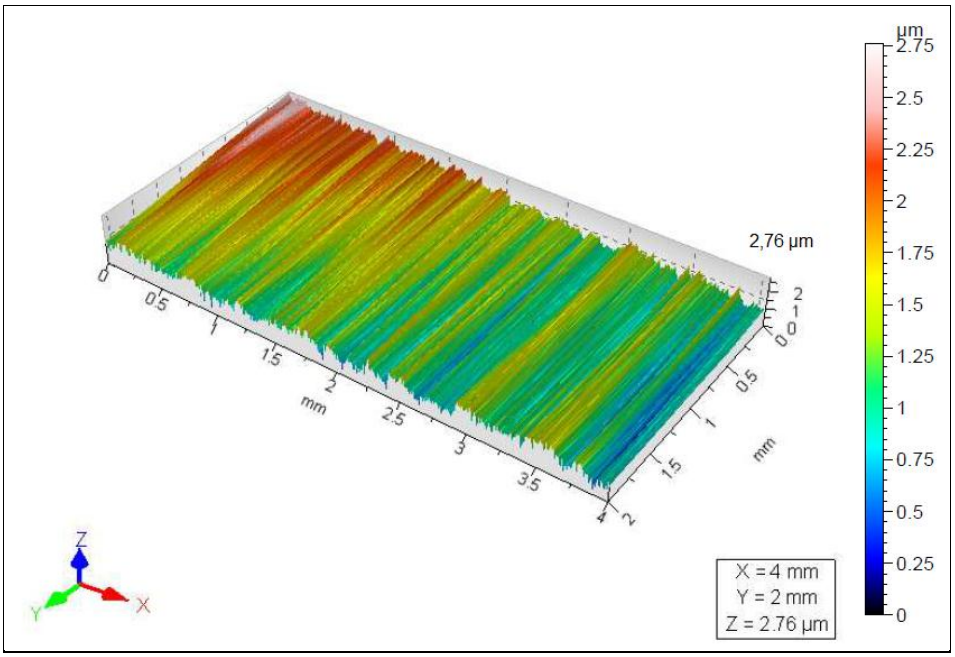
As Figuras 62 a 65 mostram as imagens topográficas do perfil de rugosidade das superfícies retificadas na velocidade de 1,2 mm/min e volume de material de 1,93 x 10^3 mm^3 para os diferentes fluidos de corte utilizados na pesquisa.

Figura 62 - Topografia da superfície retificada com fluido mix na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 1,93 x 10^3 mm^3.



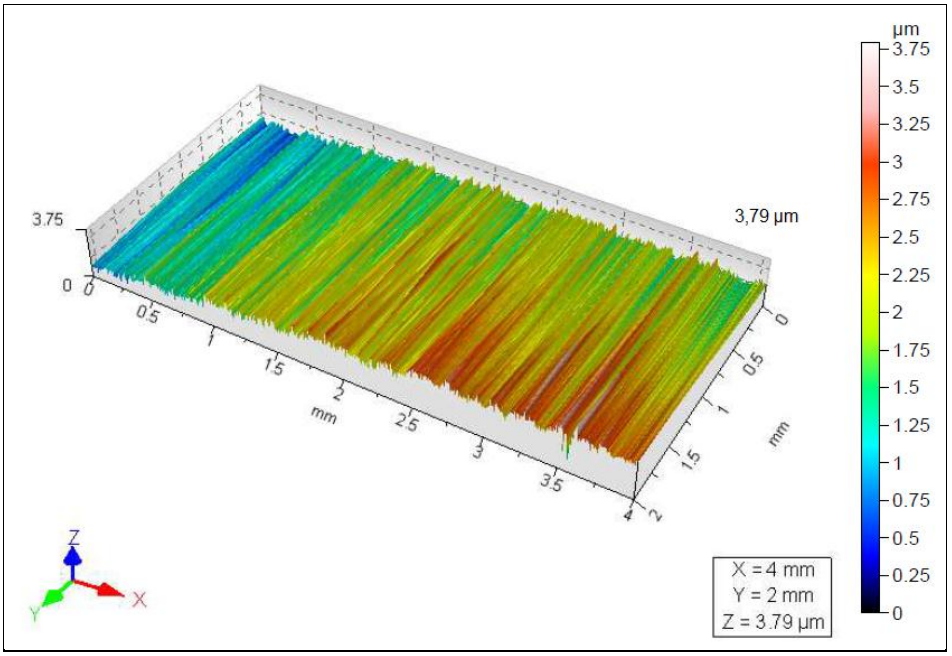
Fonte: próprio autor.

Figura 63 - Topografia da superfície retificada com fluido de corte integral na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 1,93 x 10³ mm³.



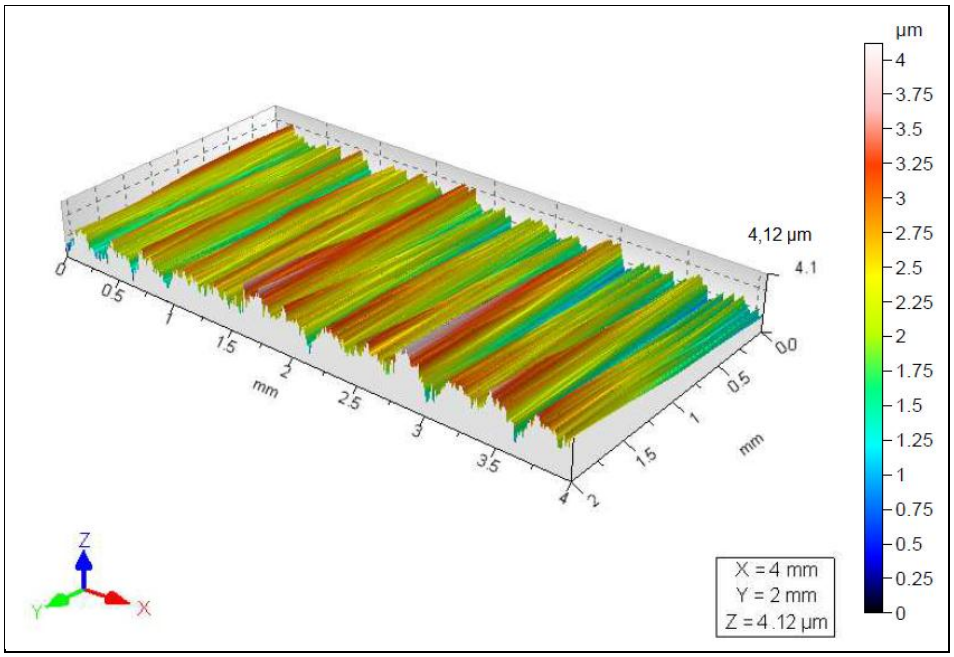
Fonte: próprio autor.

Figura 64 - Topografia da superfície retificada com fluido de corte sintético na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 1,93 x 10³ mm³.



Fonte: próprio autor

Figura 65 - Topografia da superfície retificada com MQL na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 1,93 x 10³ mm³.



Fonte: próprio autor.

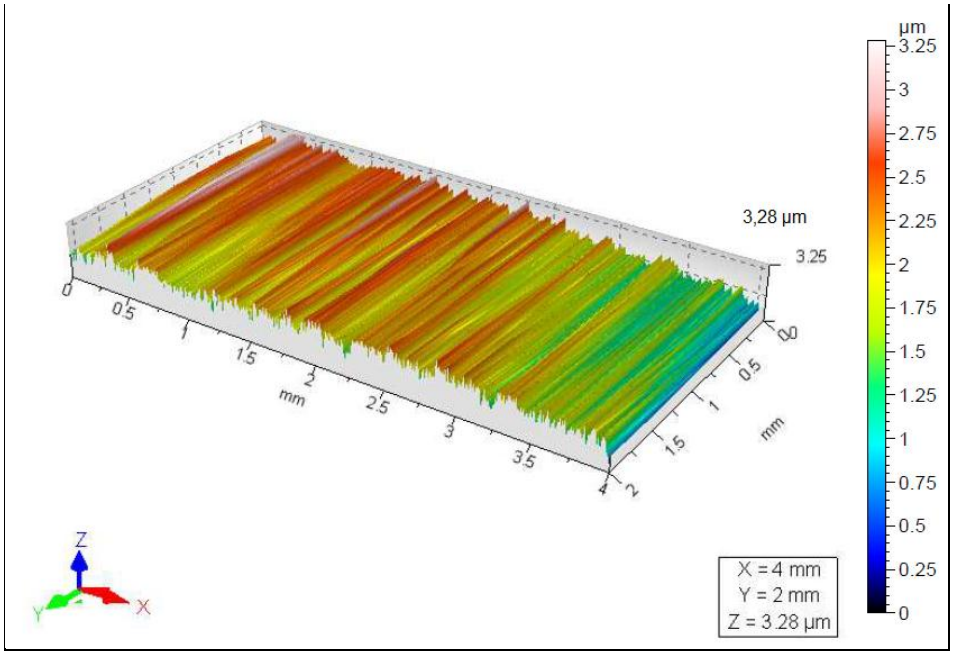
Conforme Figuras 62 a 65, nota-se que o fluido mix apresentou menor amplitude total do perfil de rugosidade de (2,59 µm), na sequencia temos fluido integral (2,76 µm), sintético (3,79 µm) e por último MQL (4,12 µm), o que indica uma variação percentual de aproximadamente 59% da menor para a maior amplitude total do perfil de rugosidade. A amplitude total do perfil de rugosidade das amostras na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min, seguiu o mesmo comportamento da velocidade de mergulho de 0,6 mm/min, em que menor valor da amplitude foi verificado para os fluidos com características lubrificantes (mix e integral) e maiores valores para os fluidos com características refrigerantes (sintético e MQL).

Comparando a velocidade de mergulho de 0,6mm/min, Figuras 54 a 57 com a velocidade de 1,2 mm/min Figuras 62 a 65 que é a mesma condição de material removido de 1,93 x 10³ mm³ não houve uma diferença significativa na amplitude total do perfil de rugosidade. Com o aumento da velocidade de mergulho de 0,6 para 1,2 mm/min, percebe-se uma variação percentual de aproximadamente -8% para o fluido mix, 0,7% para o fluido Integral, 0% para o fluido sintético e 0,7% para o MQL. Visto que houve pequenas diferenças no perfil de rugosidade em relação às duas velocidades de mergulho, é vantajoso utilizar a velocidade de 1,2 mm/min devido

conseguir maior rapidez no processo de retificação das peças e ganhando em produtividade.

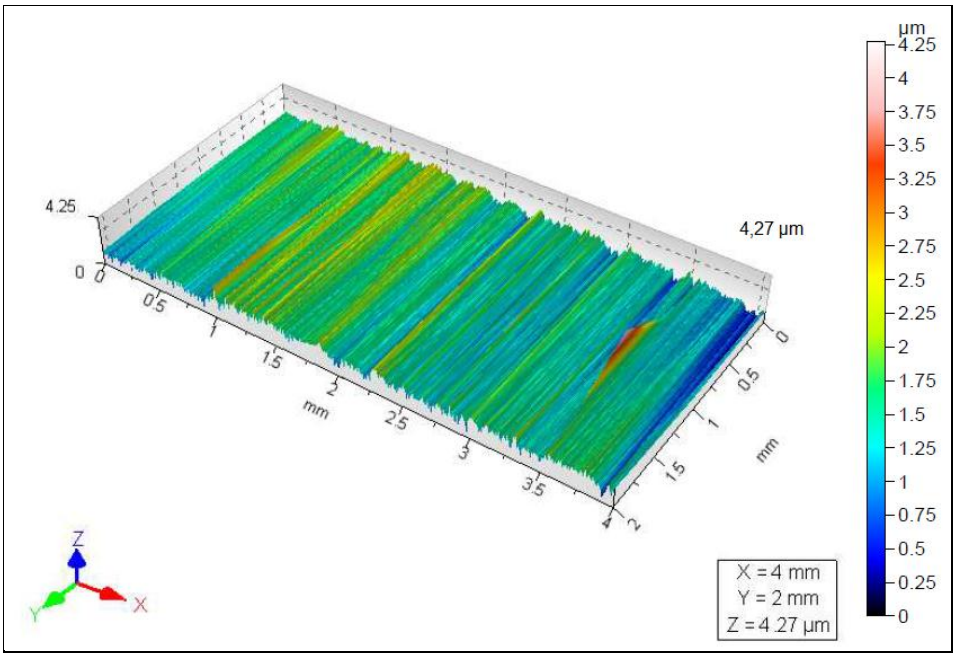
As Figuras 66 a 69 mostram as imagens topográficas do perfil de rugosidade das superfícies retificadas na velocidade de 1,2 mm/min e volume de material de 21,82 x $10^3 mm^3$ para os diferentes fluidos de corte utilizados na pesquisa.

Figura 66 - Topografia da superfície retificada com fluido mix na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 21,82 x 10^3 mm^3.



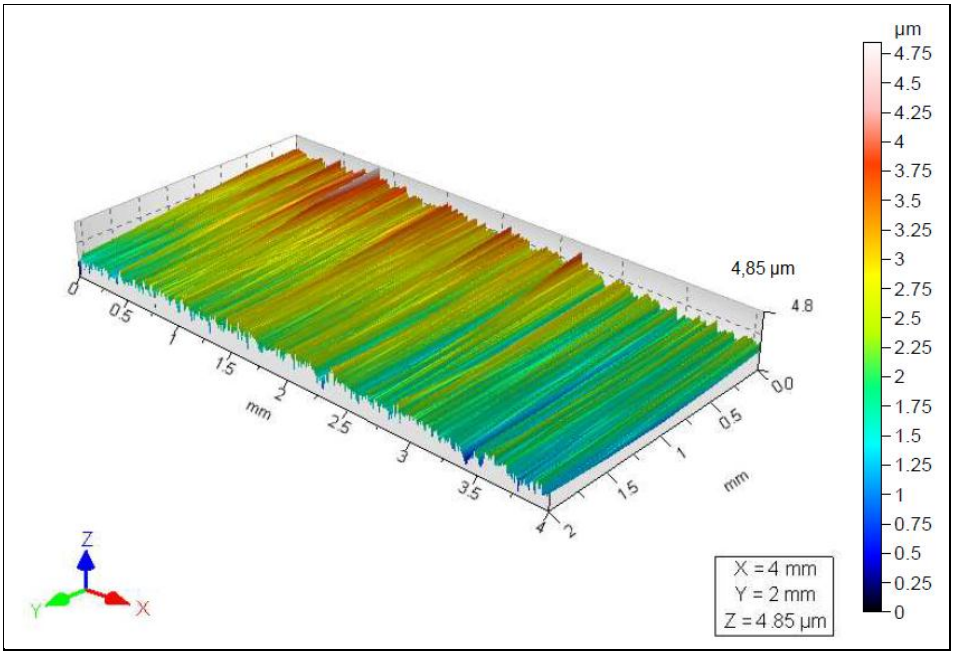
Fonte: próprio autor.

Figura 67 - Topografia da superfície retificada com fluido de corte integral na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 21,82 x 10³mm³



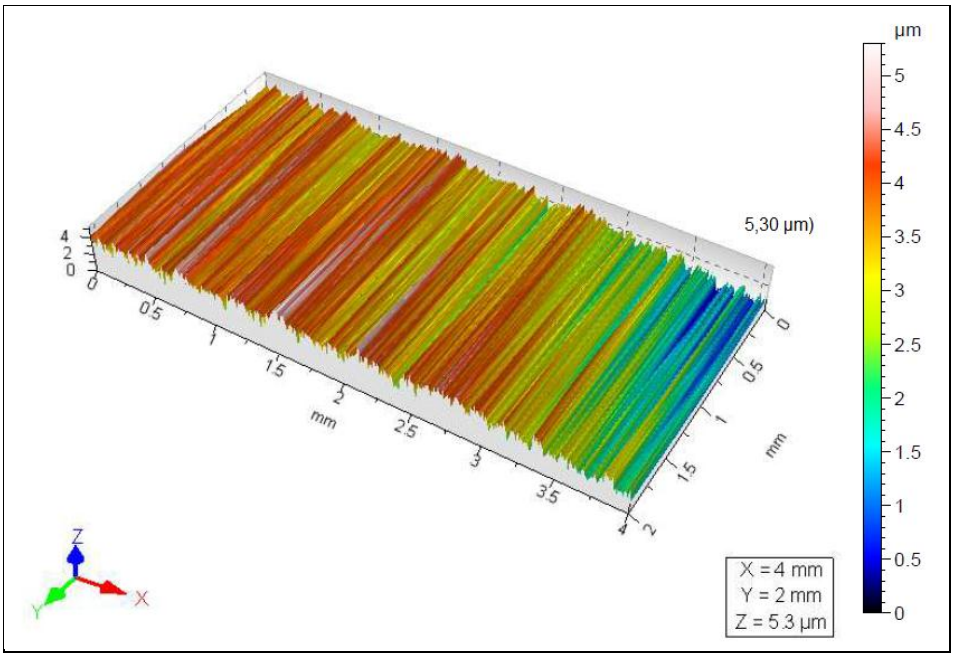
Fonte: próprio autor.

Figura 68 - Topografia da superfície retificada com fluido de corte sintético na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 21,82 x 10³mm³



Fonte: próprio autor.

Figura 69 - Topografia da superfície retificada com MQL na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e volume de material de 21,82 x $10^3 mm^3$.



Fonte: próprio autor.

Observa-se nas Figuras 66 a 69 que, o fluido mix demostrou menor amplitude total do perfil de rugosidade de (3,28 µm), seguido pelo integral (4,27 µm), sintético (4,85 µm) e MQL (5,30 µm). A variação percentual da menor para a maior amplitude total do perfil de rugosidade foi de aproximadamente 62%. Verifica-se que os fluidos com características lubrificantes proporcionaram menor amplitude total (distância entre o maior pico e o vale mais profundo) do seu perfil de rugosidade, se comparado com os fluidos com característica em refrigeração.

Na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min pode-se calcular a variação percentual com o aumento do volume de material removido. Percebe-se que a variação percentual para o fluido mix Figura 62 comparado com Figura 66 foi de aproximadamente 26% com o aumento do volume de material removido, para o fluido integral Figura 63 comparado com 67 foi de aproximadamente 55%, para o fluido sintético Figura 64 comparado com 68 foi de aproximadamente 28% e para MQL Figura 65 comparado com Figura 69 foi de aproximadamente 29%.

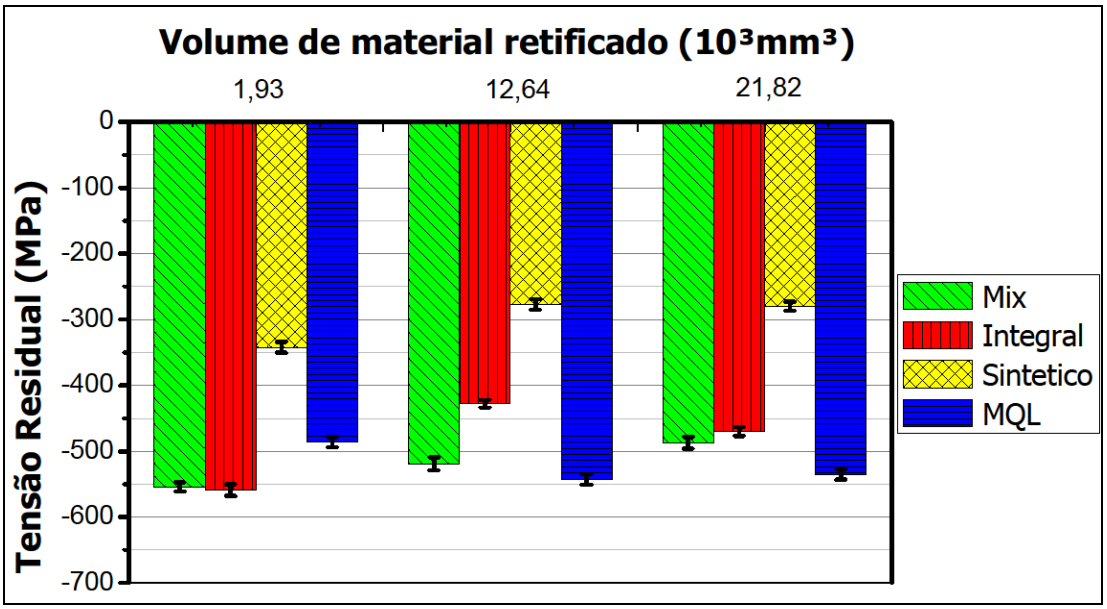
Comparando a velocidade de mergulho de 0,6 mm/min Figuras 58 a 61 com a velocidade de mergulho de 1,2 mm/min Figuras 66 a 69 na mesma condição de material removido de 21,82 x $10^3 mm^3$, não houve uma diferença significativa na

amplitude total do perfil de rugosidade. Com o aumento da velocidade de mergulho de 0,6 para 1,2 mm/min, percebe-se uma variação percentual de aproximadamente -8% para o fluido mix, 19% para o fluido de corte integral, 10% para o fluido de corte sintético e 1% para MQL.

5.4 Tensão residual

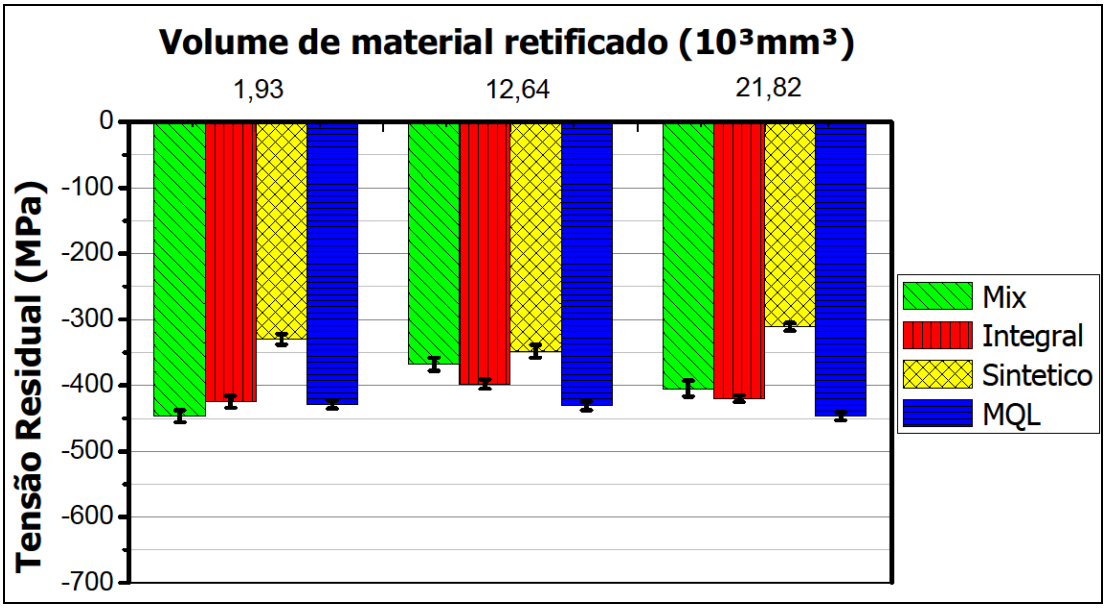
As Figuras 70 e 71 apresentam os valores de tensão residual com diferentes fluidos de corte para velocidades de mergulho de 0,6 mm/min e 1,2 mm/min e volume de material retificado da peça de 1,93 x 10^3 mm^3, 12,64 x $10^3 mm^3$ e 21,82 x 10^3 mm^3 com seus respectivos desvios padrão.

Figura 70 - Tensão Residual em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min.



Fonte: próprio autor

Figura 71 - Tensão Residual em função do volume de material retificado utilizando diferentes fluidos de corte na velocidade de mergulho de 1,2 mm/min.



Fonte: próprio autor.

Todas as tensões encontradas para as amostras retificadas foram tensões de compressão e estão de acordo com diversas literaturas. Reis et al., (2010) estudou tensões residuais geradas na usinagem do aço AISI 4340 e para as amostras retificadas as tensões encontradas em seu estudo foram compressivas (-168 MPa) na direção transversal.

Observa-se na Figura 70, que MQL apresentou valor da tensão residual de compressão de maior magnitude em comparação aos demais fluidos de corte nos volumes de material retificado de 12,64 e 21,82 x 10^3 mm^3 e no volume de material de 1,93 x 10^3 mm^3, a tensão de maior magnitude foi para o fluido de corte integral, levando somente em consideração a média. Tensões residuais de compressão são benéficas, pois atuam como inibidoras a nucleação e propagação de trincas e aumenta a resistência à fadiga e à vida útil dos componentes.

Verifica-se nas Figuras 70 e 71, que em ambas as velocidades de mergulho e volume de material retificado, os menores valores de tensão residual de compressão foram encontrados para o fluido de corte sintético. O fluido sintético tem um maior poder de refrigeração e dissipação de calor, e possivelmente menores temperaturas foram geradas no processo utilizando esse fluido comparado aos demais fluidos de

corte. De acordo com Fusse (2005), as dilatações térmicas na retificação são proporcionais às temperaturas geradas no processo e as tensões de compressão são geradas pela maior dilatação das camadas externas em relação às camadas mais internas. Essa diferença de dilatação entre as camadas se deve a exposição a temperaturas mais elevadas sobre as camadas mais externas.

No geral, as maiores tensões residuais de compressão são verificadas no menor volume de material retificado de 1,93 x 10^3 mm^3, sendo que o maior valor de tensão foi de -559 MPa para o fluido de corte integral na velocidade de 0,6 mm/min. Esta observação é interessante já que na prática, este volume de material retificado é o mais usual no processo de retificação, sendo o sobremetal de 0,4 mm e portanto as elevadas tensões compressivas são benéficas ao processo. Silva et al. (2007) encontrou maiores tensões compressiva para a técnica MQL com valor de aproximadamente -375 MPa.

Percebe-se que em ambas as velocidades de mergulho e volume de material retificado, os fluidos mix e integral por possuir mesma característica de poder lubrificante, tenderam a valores de tensão mais próximos uns dos outros e seguiram comportamento parecido. Já o fluido sintético e MQL com baixo poder em lubrificar, não seguiram comportamentos parecidos e os valores de tensão de um em relação ao outro foram dispersos. Uma série de fatores podem ter ocorridos, além do mais a técnica de mínima quantidade de lubrificante tende a formar uma borra de fluido com cavaco, entupindo os poros do rebolo, prejudicando a interação do rebolo/peça e aumentando as forças de corte. Com o aumento de volume de material retificado, vazão e pressão do ar-comprimido da técnica MQL provavelmente não foi suficiente para reduzir o calor gerado no processo e isso ocasiona aumento da temperatura gerando elevada tensão residual se comparado com o fluido de corte sintético que tem por característica poder refrigerante e consequentemente gerando baixas tensões de compressão.

Conforme Figura 70 na velocidade de mergulho de 0,6 mm/min, verifica-se que para o fluido mix houve um decréscimo da tensão residual com o aumento do volume de material retificado. Nessa velocidade o menor valor de tensão residual encontrado, foi de -277 MPa verificado no fluido sintético volume de 12,64 x 10^3 mm^3.

Analisando dois corpos de prova antes de realizar os ensaios na retificadora para quesito de comparação aos demais corpos retificados, temos os resultados de

tensão residual conforme Tabela 12. Ela apresenta os valores de tensão residual para dois corpos de prova de mesmo material (ABNT 4340) dos corpos de prova retificados, porém, antes de passar pelo processo de retificação. Um CDP foi torneado e não temperado e outro foi temperado, mas não retificado.

Tabela 12 - Tensão residual medido nos corpos de prova antes do processo de retificação.

Corpo de prova	Processo	Tensão residual de tração (MPa)
CDP 49	Torneado/não temperado	33
CDP 50	Têmperado/não retificado	262

Fonte: próprio autor.

Ambas as tensões residuais para os corpos de prova torneados apresentados na Tabela 12 são de tração, diferentes das tensões nos corpos de prova retificados que foram todas de compressão. Leppert e Peng (2012) encontraram na camada superficial de um aço AISI 316L no processo de torneamento, todas as tensões residuais de natureza trativa. Navas, Gonzalo e Bengoetxea (2012), também encontraram tensões residuais de tração no torneamento de um aço AISI 4340 e nas condições de usinagem em que o calor gerado foi mais elevado, à magnitude das tensões de tração tenderam a aumentar.

Observa-se na Tabela 12 tensão residual de tração de maior magnitude para o corpo de prova temperado/não retificado, e isso não é desejável já que tensão residual de tração é prejudicial para o componente mecânico, pois elas tendem a acelerar o processo de nucleação e propagação de trincas.

6. CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta as principais conclusões obtidas pelo estudo e análise comparativas de todos os parâmetros medidos no processo de retificação de mergulho com variação dos parâmetros de usinagem e dos fluidos de corte.

- Para os diferentes fluidos de corte utilizados nessa pesquisa, os menores valores de rugosidade tanto do parâmetro 2D (Ra) quanto do parâmetro 3D (Sa) foram obtidos para os fluidos com características lubrificante (Mix e Integral);
- Devido a pequenas diferenças nos valores de rugosidade (Ra) e (Sa) e os mesmos estarem dentro de faixas recomendadas no processo de retificação, MQL é uma alternativa considerável em relação a este parâmetro, diminuindo o uso de fluidos de corte na indústria e além da redução no impacto de seu descarte;
- Com o fluido mix, obteve-se um bom desempenho em muitos parâmetros avaliados, sendo também uma fonte alternativa viável, devido 50% na sua composição conter óleo vegetal (soja), ter facilidade para degradar, apresentar boas propriedades lubrificantes, ser de fonte renovável e contribuir para o desenvolvimento de fluido ambientalmente amigável;
- MQL levou a maiores tensões de compressão no processo de retificação, sendo esta benéfica ao componente usinado uma vez que atuam como inibidora a nucleação e propagação de trinca. O fluido mix e integral obtiveram desempenho parecidos com valores próximos de tensão residual;
- Os valores de Rku estão bem próximos de três, condição normal para uma superfície retificada com um rebolo dressado, além de seguir o mesmo comportamento para o parâmetro Sku;
- Os maiores valores para o parâmetro Rk foram alcançados na condição utilizando MQL apresentando uma menor eficiência se comparado ao fluido integral. Foi possível relacionar os resultados de Rk e Rpk;
- Os maiores valores de Rvk foram alcançados utilizando MQL e os menores valores utilizando o integral, bem como, foi possível relacionar os resultados de Rvk e Rpk;

- Os parâmetros 3D (Sk, Spk e Svk) do perfil de rugosidade seguiu o mesmo comportamento dos parâmetros 2D (Rk, Rvk e Rpk). Conseguiu-se também, associar o parâmetro Svk com o índice S_{vi}, e associar SK com Vv e S_{bi} proporcionando uma análise mais confiável;
- O coeficiente de vazio (Kp) não apresentou um comportamento padrão diante do volume de material retificado e da velocidade de mergulho. No entanto, foi possível relacionar os resultados de Rk com Kp;
- Por meio da curva de Abbot–Firestone, foi possível associar os parâmetros Vvc e Vmc ao parâmetro Sk, bem como o parâmetro Vmp ao parâmetro Spk e o parâmetro Vvv ao parâmetro Svk, sendo que as curvas com menor inclinação oferecem um melhor desempenho e melhores resultados nos parâmetros avaliados;
- Na análise feita das imagens de textura superficial, foi possível verificar dentre os diferentes fluidos de corte, volume de material removido e velocidade de mergulho, as diferenças das amplitudes total do perfil de rugosidade, e as variações percentuais de cada uma, sendo possível identificar os fluidos que propiciaram melhor desempenho nesse quesito avaliado, sendo os fluidos de característica lubrificante (mix e integral) de melhor desempenho;
- No geral, os melhores resultados nos parâmetros medidos, foram verificados utilizando o fluido de corte integral. Alternativo a este fluido tem-se o fluido mix com resultados satisfatórios nos parâmetros avaliados já que possuem características e comportamento parecido com o integral e além de possuir uma formulação biodegradável;
- Os resultados sinalizam a viabilidade do uso do fluido mix e da técnica de MQL como alternativa ao uso de fluido de corte convencional (sintético). Características significativas como menor toxicidade, fontes renováveis e biodegradáveis, vem a somar sua utilização no processo de retificação, contribuindo assim para uma manufatura ecologicamente amigável e sustentável e também possuindo menor custo.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se novos estudos com mudanças nos diversos parâmetros de usinagem e condições de retificação para posterior análise e comparação dos resultados obtidos.

- Analisar o comportamento dos diferentes fluidos de corte em outro material com composição química diferente do aço ABNT 4340, para verificar a influencia da composição química e propriedades mecânicas do material em relação aos parâmetros avaliados de caracterização da superfície e condições de corte utilizadas;
- Variar a vazão do lubrificante e ar comprimido para a técnica de mínima quantidade de lubrificante, verificando a influencia dos mesmos sobre a caracterização da superfície;
- Avaliar os custos com aquisição, aplicação e descarte da utilização dos diferentes fluidos de corte;
- Verificar o desempenho das variáveis analisadas com rebolo de Nitreto Cúbico de Boro (CBN), já que esse rebolo possui alta dureza e tem alta capacidade de reter calor o que poderá interferir na caracterização da superfície do produto final;
- Medir força de corte e energia específica de retificação nos diversos fluidos analisados, com o intuito em comparar com os resultados obtidos nessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALUYOR, E. O.; OBAHIAGBON, K. O.; ORI-JESU, M. Biodegradation of vegetable oils: A review. **Scientific Research and Essay,** p. 543-548. June. 2009.

ALVES; M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Influência da velocidade de avanço do rebolo nos danos de aços endurecidos retificados. **Revista Matéria**, v. 13, n. 4, p.636-642. 2008.

ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Influência das técnicas de mínima quantidade de lubrificante, refrigeração otimizada e refrigeração convencional na qualidade das peças produzidas com aços endurecidos no processo de retificação. **Revista chilena de engenharia;** v. 18, n. 2, p.228-234, agosto. 2010.

ALVES, M. C. S. **Influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN.** 2007. 155f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2007.

ALVES. et al. Influência na qualidade final de metais retificados através da variação da velocidade de mergulho. **Revista metalurgia e materiais,** v. 62, n. 1, p.65-71, março. 2009.

ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Influência das técnicas de mínima quantidade de lubrificante, refrigeração otimizada e refrigeração convencional na qualidade de peças produzidas com aços endurecidos no processo de retificação. **Revista Chilena de Engenharia,** São Paulo, v. 18, n. 2, p.228-234, agosto. 2010.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E2860-12**: Standard Test Method for Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction for Bearing Steels. West Conshohocken, 2012.

BALART, M.J. et al. The onset of tensile residual stresses in grinding of hardened steels. **Materials Science And Engineering.** Walton Hall, p. 132-142, september. 2004.

BELINATO, G. **Estudo da oxidação dos óleos de soja e dendê aditivado com antioxidantes, para uso em tratamento térmico em têmpera**. 2010. 160f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo – São Carlos, 2010.

BIANCH, C. E. et al. Análise do Comportamento da Microestrutura de Materiais Endurecidos Retificados com Rebolos de CBN. **Materials Research,** v. 3, n. 4, p.147-154, 2001.

BIANCHI, C. E. et al. Limpeza da superfície de corte de rebolos por um sistema de ar comprimido na retificação cilíndrica externa de mergulho de materiais cerâmicos refrigerados com a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL). **Cerâmica**, v. 58, n. 346, p.270-274, junho. 2012.

BORDINASSI, É. C. **Contribuição ao estudo da integridade superficial de um aço inoxidável super-duplex após usinagem.** 2006. 221 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BOUBEKRI, N., SHAIKH, V., FOSTER, P. R. A technology enabler for green machining: Minimum quantity lubrication (MQL). **Journal of Manufacturing Technology Management**, v.21, n. 5, p.556-566, 2010.

CARMO, D.C. **Análise de tensões por ultra-som em barra de ação sob flexão.** 2006. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CETIN, M. H. et al. Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. **Journal of Cleaner Production,** p. 2049-2056. April. 2011.

DAMASCENO, R. F. **Análise da influência da profundidade de corte e de diferentes métodos de lubrirefrigeração na retificação plana de aço ABNT 4340.** 2010. 165f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru, 2010.

DAVIM, J. P. **Tribology for Engineers:** A practical guide. Aveiro: Woodhead Publishing, 2010. 296p.

DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M.; AHMED, M. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 299-304. September. 2005.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L., 2003, **"Tecnologia da usinagem dos materiais"**, Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 4ª Edição.

DONG, W.P.; SULLIVAN, P.J.; STOUT, K.J. Comprehensive study of parameters for characterising threedimensional surface topography: Parameters for characterising amplitude and some functional properties. **Wear,** Birmingham, v. 178, p.29-43, July. 1994.

EL BARADIE, M. A. Cutting fluids: Part II - Recycling and clean machining. **Journal of Material Processing Technology** n. 56, 798-806. Dublin, 1996.

FARIAS, A. **Análise da tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em material endurecido.** 2009. 191f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FREITAS, E. S. R. **Parâmetros topográficos para avaliação, caracterização e controle tribológicos de superfícies de engenharia.** 2006. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, USP, São Paulo, 2006.

FUSSE, R. Y. **Estudo comparativo entre a lubri-refrigeração convencional e a MQL no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.** 2005. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Industrial, Faculdade de Engenharia da UNESP, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2005.

GRAF. W. **Cylindrical Grinding**. Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG. Schweiz, 2004. 87p.

GOEKE, S. et al. Enhancing the Surface Integrity of Tribologically Stressed Contacting Surfaces by an Adjusted Surface Topography. 2014. **Procedia** CIRP 13, p.214 – 218.

GONÇALVES, P. S. C. **Boas práticas ambientais na utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem**. 2008. 150f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, São Paulo, 2008.

HADAD, M.J. et al. Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal Of Machine Tools & Manufacture.** Schwenningen, p. 54-55. December. 2011.

HADAD, M.; SADEGHI, B. Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy. **Cleaner Production,** p. 332-343. May. 2013.

HEISEL, U.; LUTZ, D.; WASSMER, R., Walter, U. “A Técnica da Quantidade Mínima de Fluidos e sua Aplicação nos Processos de Corte”. **Revista Máquinas e Metais**, n.386, p. 22-38, 1998.

HORNG, J. H.; LEN, M. L.; LEE, J. S. The contact characteristics of rough surfaces in line contact during running-in process. **Wear**, n. 253, p.899-913, February. 2002.

INDIAN STANDARD. **ISO 13565-2**: Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface Texture: Profile Method - Surfaces Having Stratified Functional Properties. India, 2003.

IRANI, R.A., BAUER, R.J., WARKENTIN, A. A review of cutting fluid application in the grinding process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**,Vol. 45, pp.1696–1705, 2005.

KHAN, M. M. A.; MITHU, M. A. H.; DHAR, N. R. Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 15-16, p.5573-5583, agosto. 2009.

KUNDRAK, J.; GYANI, K.; BANA, V. Roughness of ground and hard-turned surfaces on the basis of 3D parameters. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 38, n. 1-2, p.110-119, june. 2007.

LEACH, R. **Of Surface Texture Using Stylus Instruments:** Engineering Measurement Division National Physical Laboratory. Hampton: Hmso, 2014. 112 p.

LEACH, R. **Characterisation of Areal Surface Texture.** Uk: Springer, 2013. 355 p.

LEMOS, G. V. B. **Análise de tensões residuais em eixos automotivos do aço DIN 38B3 temperados por indução.** 2012. 156f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia de Minas, Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

LEPPERT, T.; PENG, R. L., 2012, "Residual stresses in surface layer after dry and MQL turning of AISI 316L steel", **Production Engineering**, vol. 6, n. 4-5, p.367-374.

LIU, X.; ZHANG, B. Effects of grinding process on residual stresses in nanostructured ceramic coatings. **Journal of Materials Science,** v. 37, n. 15, p. 3229-3239, 2002.

LU, J. **Handbook on measurement of residual stresses**. SEM - Society for Experimental Mechanics, The Fairmont Press, Lilburn, GA, USA, 1996.

LUCIANO, M. A. **Avaliação da corrosão do aço carbono ASTM A-36 quando em contato com biodiesel de variadas matrizes e diesel aditivado com 5% de biodiesel.** 2011. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais.** São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2008. 371p.

MALKIN, S., GUO, C. **Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives**. New York, USA: Industrial Press, 2008. 372p.

MARTELL, J. J.; LIU, C. R.; SHI, J. Experimental investigation on variation of machined residual stresses by turning and grinding of hardened AISI 1053 steel. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology,** [S.l.], v. 74, n. 9-12, p.1381-1392, 1 july. 2014.

MATOS JUNIOR, R. F. **Análise topográfica da superfície de cilindro de motores a combustão interna.** 2009. 82f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais, Departamento de Pesquisa e Pós-graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MORAIS, H. L. O. **Análise da viabilidade e das propriedades físico-químicas de formulações de fluido de corte integral utilizando óleos vegetais e minerais no processo de retificação.** 2014. 138f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

MATTOS, R.F.J. **Análise Topográfica da Superfície de Cilindro de Motores a Combustão Interna**. Dissertação (Mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2009.

MUMMERY, L. **Surface Texture Analysis – The Handbook**. Hommelwerke GmbH, 1992.

NAVAS, V. G.; GONZALO, O.; BENGOETXEA, I. Effect of cutting parameters in the surface residual stresses generated by turning in AISI 4340 steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, p. 48-57. 2012.

NUNES, L. T. **Análise estatísticas da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiV55.** 2011. 144f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

NUNES, R. M. **Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada do aço AISI 1048 visando minimizar distorções pós processamento.** 2008. 110f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2008.

OBIKAWA T., KAMATA Y., SHINOZUKA, J. High-speed grooving with applying MQL, International. **Journal of Machine Tools & Manufacture,** n. 46 p.1854–1861. 2006.

OIKAWA, M. H. et al. Utilização da mínima quantidade de lubrificação (MQL) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho em cerâmicas com rebolos diamantados. In: Congresso brasileiro de engenharia de fabricação, 2009, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte: COBEF, 2009.

OLIVEIRA, C. J. **Avaliação da Influência de Sistemas de Filtragem Aplicados a Topografia de Superfície em Usinagens.** 2004. 135f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

OLIVEIRA, J. F. G.; ALVES, S. M. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. **Produção**, v. 1, n. 17, p.129-138, Janeiro. 2007.

OZCELIK, B. et al. Experimental investigations of vegetable based cutting fluids with extreme pressure during turning of AISI 304L. **Tribology International,** n. 44, p.1864-1871, July. 2011.

PAWLUS, P.; MICHALSKI, J. Characterization of the shape of the roughness profile ordinate distribution of honed cylinder surfaces. **Wear**, vol. 161, p. 135-143.1992.

PAWLUS, P. A Study of the Functional Properties of Honed Cylinders Surface During Running-in. **Wear,** vol. 176, p. 247-254. 1994.

PETROPOULOS, G. et al. Is the Rk group of roughness parameters suitable to describe turned surfaces. In: International Scientific Conference, 2003, Gabrovo. **Proceedings.** Gabrovo: ISC, 2003.

PIRATELLI, A. F. **Rugosidade Superficial.** Brasília: Universidade de Brasília, 2011.

PUERTO, P. et al. “Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear”. **Procedia Engineering**, p. 174-182. 2013.

REIS, W. P. dos et al. Estudo das Tensões Residuais Geradas na Usinagem de Aço AISI 4340. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2010,** Campos do Jordão. **Anais**…Campos do Jordão: CBECIMAT, 2010. p. 2-3.

ROSSINI, N. S.; BENYOUNIS, K. Y.; OLABI, A. G. Methods of measuring residual stresses in components. **Materials and Design**, v. 35, p. 572-588, December. 2011.

RUNGE, D. G. "Lubrificantes nas indústrias - produção, manutenção e controle", Cotia, SP, Brasil, Triboconcept Edições Técnicas, 323p. 1990.

SANTOS, C. Z. **Estudo da tensão residual através de difração de raios x em aço inoxidável duplex submetido a diferentes tratamentos térmicos.** 2012. 94f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

SEDLACEK, M.; PODGORNIK, B.; VIZINTIN, J. Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear", **Wear,** vol. 266, p. 482–487. 2009.

SEDLACEK, M.; PODGORNIK, B.; VIZINTIN, J. Correlation between standard roughness parameters skewness and kurtosis and tribological behaviour of contact surfaces. **Tribology International,** p. 102-112. October. 2011.

SERUP, J.; JEMEC, Gregor B. E.; GROVE, Gary L.. **Handbook of Non-invasive Methods and the Skin.** 2. ed. Taylor & Francis, 2006.

SHASHIDHARA, Y. M.; JAYARAM S. R. Vegetable oils as a potential cutting fluid—an evolution. **Tribology International,** n. 43, p.1073-1081, January. 2010.

SILVA, E. J. et al. Strategies for production of parts textured by grinding using patterned wheels. **Manufacturing Technology,** p.355-358, 2013.

SILVA, E. J.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. A Review of Grinding Fluids – performaces and management: Uma Revisão de Fluidos de Corte-Desempenho e Manutenção. **Revista de Ciência & Tecnologia,** v. 18, n. 8, p.67-77, december. 2001.

SILVA, L. R.; SOARES, C. B. Performance of the minimum quantity lubrication technique in turning Inconel 718 at high cutting speed. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, v. 5, n. 4, p. 401-416, 2009.

SILVA, L. R. da et al. Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant—MQL in grinding. **International Journal Of Machine Tools & Manufacture.** p. 412-418. March. 2007.

SIMÕES, R. P. **Utilização de diferentes métodos de lubri-refrigeração na retificação cilíndrica externa de mergulho de cerâmica avançada com rebolo diamantado.** 2012. 159f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

SINGH, A. K. et al. Metal working fluids from vegetable fluids", **Journal Synthetic Lubrication**, p.123-76. 2006.

SOUSA, D. A. **Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por meio de Ensaio de Dureza.** 2012. 140f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2012.

SOUZA, A. J. **Fundamentos da usinagem de acabamento por abrasão mecânica.** Rio Grande do Sul: Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, 2007.

SUTERIO, R. **Medição de tensões residuais por indentação associada à holografia eletrônica.** 2005. 169f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TAZEHKANDI, A. H.; PILEHVARIAN, F.; DAVOODI, B. Experimental investigation on removing cutting fluid from turning of Inconel 725 with coated carbide tools. **Journal of Cleaner Production,** p. 271-281. May, 2014.

WAIKAR, R. A.; GUO, Y. B. A comprehensive characterization of 3D surface topography induced by hard turning versus grinding. **Journal Of Materials Processing Technology**. Tuscaloosa, p. 189-199. 2007.

WANG, Y. et al. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils. **Journal of Cleaner Production,** p. 487-499. March. 2016.

WANG, J. P. **Avaliação da retificação com rebolo de CBN vitrificado aplicada em ligas de alto desempenho.** 2008. 123f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

WEBSTER, J. A,; CUI, C.; MINDEK Jr, R. B. Grinding fluid application system desing. **Anais**…v. 44, p. 333-338, 1995.

WINTER-GRUPO SAINT GOBAIN. **Retificação**. Apostila de treinamento da empresa Winter. Jundiaí, SP, Brasil, 2004.