

Monografia de Graduação

Retificação de Ferro Fundido Branco com Foco na Indústria de Petróleo

Ramon Lopes de Araújo

Natal, junho de 2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RETIFICAÇÃO DE FERRO FUNDIDO BRANCO COM FOCO NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO

RAMON LOPES DE ARAÚJO

Banca Examinadora

Prof. Dr. Adilson José de Oliveira _____

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Orientador

Prof. Dr. Lúcio Ângelo de Oliveira Fontes _____

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Interno

Prof. Dr. Ulisses Borges Souto _____

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Interno

NATAL, 23 de Junho de 2015.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas as quais presto minha homenagem:

Ao Professor Adilson José de Oliveira pela orientação, dedicação, paciência e pelos ensinamentos, tanto para a vida acadêmica como pessoal.

Ao Professor Denis Boing e ao Laboratório de Ensaaios e Desenvolvimento de Produtos do Centro Universitário de Brusque - UNIFEBE, pela micrografia do corpo-de-prova desta pesquisa.

À toda equipe do Laboratório de Manufatura e do Laboratório de Metrologia da UFRN (alunos, técnicos e professores), que sempre estiveram dispostos a ajudar.

À empresa Abrasipa, principalmente a Maria Tanaka, pela atenção e fornecimento dos rebolos desta pesquisa.

À minha família e à minha namorada Stacy Cussen, pelos incentivos.

À Petrobras e ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH ANP-14), pelo apoio financeiro.

Ao Núcleo de Ensino e Pesquisa em Petróleo e Gás (NUPEG), em especial Maria, professor Osvaldo Chiavone, professor José Romualdo e professor Afonso Avelino, pelos conselhos acadêmicos e por sempre estarem de portas abertas para eventuais desafios.

Resumo

Um das etapas da produção de petróleo é a perfuração dos poços petrolíferos. Altos custos estão envolvidos nessa atividade e um dos principais elementos desse processo é a broca de perfuração. A broca está localizada na ponta da coluna de perfuração e é geralmente fabricada de materiais com uma elevada dureza, como os diamantes sintéticos (PDC/TSP), o metal duro, além de aços de elevada dureza. Todos esses materiais empregados na etapa da perfuração possuem uma característica em comum: alta dureza. O material em estudo é o ferro fundido branco alto cromo, possuindo 28% de carbonetos M_7C_3 em sua microestrutura e uma elevada dureza (entre 45 e 60 HRC). O ferro fundido branco alto cromo é uma alternativa aos materiais já empregados na fabricação dos componentes das brocas de perfuração. Podem-se destacar como principais vantagens o emprego do ferro fundido branco alto cromo: menores taxas de remoção do processo de manufatura; não há tratamentos térmicos durante a fase de manufatura e menores valores do preço do material bruto em relações aos materiais empregados atualmente. Esta pesquisa tem como objetivo analisar a viabilidade e o desempenho dos parâmetros de retificação adequados ao acabamento do ferro fundido branco alto cromo. Os ensaios foram realizados com os mesmos parâmetros de usinagem, variando-se apenas o material abrasivo e a granulometria dos rebolos. Essa análise envolve a determinação do tipo de rebolo mais adequado ao processo de retificação, observando-se a rugosidade superficial e a capacidade real de processo quanto ao aspecto dimensional. Observou-se que o material do rebolo SiC proporcionou valores menores de rugosidade e maiores valores do índice de capacidade real de processo quando comparado com o material do rebolo Al_2O_3 . O tamanho de grão teve uma menor influência nos resultados de saída. Grãos 120 apresentaram maiores valores de capacidade real de processo do que os grãos 80.

Palavras-Chave

- retificação, ferro fundido branco, rugosidade, capacidade real de processo.

Abstract

One of the stages of the oil production is the drilling of an oil well. High costs are involved in this activity and one of the main elements of this process is the drill bit. The drill is located at the edge of the drill string and normally it is manufactured from materials which are extremely hard, such as synthetic diamond (PDC/TSP), hard metal, hardened steel or other types of materials. All these materials used in the well drilling stage have one characteristic in common, extreme hardness. The material under study is the high chromium white cast iron, with 28% of M_7C_3 carbide in its microstructure and an extreme hardness (between 45 and 60 HRC). High chromium white cast iron is an alternative to the materials already used in the manufacturing of the components of the drill bit. The following components can be highlighted as the main advantages of this high chromium white cast iron use: lower removal rates of the manufacturing process, no heat treatment during the manufacturing phase, and its raw material price is cheaper than other materials currently used. This research aimed to analyze the feasibility and the performance of the parameters of the adequate grinding to finishing of the white cast iron high chromium. All the tests were carried out with the same machining parameters, only varying the abrasive material and the grain size of the grinding wheels. This analysis involves the determination of the type of wheel most adequate to the grinding process, observing the surface roughness, and the process capability on the dimensional aspect. It was observed that the material of the SiC grinding wheel created less rough surface values and greater values of the process capability index when compared with the material of the Al_2O_3 grinding wheel. The grain size had less influence in the output results. Grain 120 showed greater values of the process capability than grain 80.

Keywords

- grinding, white cast iron, roughness, process capability

Lista de Figuras

Figura 1: Comparação da precisão e da taxa de remoção entre a retificação e outros processos de usinagem.	4
Figura 2: Elementos básicos de um processo de retificação.....	5
Figura 3: Comportamento da rugosidade Ra dos três materiais em função do volume específico de material removido.....	8
Figura 4: Rugosidade Ra em função do passo de dressagem da ida.	9
Figura 5: Modelo descritivo do formato médio de uma aresta de corte.....	10
Figura 6: Processo de formação de cavaco.	11
Figura 7: Tipos de cavaco de uma operação de retificação do aço AISI 1055. a) longo; b) irregular; c) esférico.	12
Figura 8: O sistema de numeração ANSI para seleção do rebolo apresenta sete colunas de informação.	14
Figura 9: Valores da rugosidade Ra obtidos para cada método de lubri-refrigeração.	18
Figura 10: Microestrutura após a retificação de um corpo-de-prova sem queima e retêmpera.....	20
Figura 11: Microestrutura após a retificação de um corpo-de-prova com queima e retêmpera.....	20
Figura 12: Ferro fundido branco hipoeutético. Pelita a parte escura e cementita a parte branca.	21
Figura 13: Classificação do processo, Cp e Cpk em função da dispersão.....	24
Figura 14: Relação entre a capacidade real do processo e a velocidade de avanço (V_f) e a capacidade real de processo (C_p).....	26
Figura 15: Retificadora FerdiMat, modelo TA31 utilizada nos experimentos.	28
Figura 16: Fluxograma de manutenção da máquina-ferramenta.....	29

Figura 17: Rebolos a serem utilizados nos experimentos.	31
Figura 18: Geometria do corpo-de-prova.	32
Figura 19: Placa magnética de fixação.	33
Figura 20: Troca do rebolo. Fixação através de um flange roscado.....	33
Figura 21: a) esquema de crescimento do composto eutético das ligas de ferro fundido branco de alto cromo.....	34
Figura 22: Avaliação da rugosidade durante o processo.	36
Figura 23: Numeração dos pontos do corpo-de-prova.	36
Figura 24: Medição da espessura do corpo-de-prova com o micrômetro Mitutoyo IP 65.	37
Figura 25: Fluxograma do planejamento experimental.	39
Figura 26: Contatores da retificadora Ferdimat, modelo TA31.....	41
Figura 27: Vista superior da mesa transversal.	42
Figura 28: Proteção do fluido de corte com placas de acrílico.	43
Figura 29: Comportamento da rugosidade ao longo do desgaste do rebolo.....	44
Figura 30: Comportamento da rugosidade ao longo do desgaste do rebolo.....	45
Figura 31: Influência do grão abrasivo e da granulometria no valor do Ra – Superfície 4.	46
Figura 32: Influência do grão abrasivo e da granulometria no valor do Ra – Superfície 5.	47
Figura 33: Influência do grão abrasivo e da granulometria no valor do Ra – Superfície 6.	47
Figura 34: Capacidade Real do Processo para Al ₂ O ₃ de grão 80.....	48
Figura 35: Capacidade Real do Processo para Al ₂ O ₃ de grão 120.....	48

Figura 36: Capacidade Real do Processo para SiC de grão 80.....	49
Figura 37: Capacidade Real do Processo para SiC de grão 120.....	49

Lista de Tabelas

Tabela 1: Forças de usinagem em função de diferentes parâmetros de usinagem	6
Tabela 2: Parâmetros relacionados à aplicação do fluido de corte.	17
Tabela 3: Parâmetros de retificação adotados nos ensaios.	18
Tabela 4: Composição Química dos ferros brancos resistentes à abrasão pela norma ASTM A 532.	22
Tabela 5: Relação de Cp e Cpk com a produção de não conformes por milhão.	23
Tabela 6: Intervalos de referência para análise do índice Cp.	25
Tabela 7: Características dos rebolos utilizados nos experimentos.	30
Tabela 8: Acabamento superficial para diferentes tipos de processo de usinagem. .	35
Tabela 9: Planejamento fatorial 2 ²	38
Tabela 10: Parâmetros de usinagem dos experimentos.	38
Tabela 11: Valores de Cp e Cpk dos experimentos.	50

Sumário

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	vii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Introdução	3
2.2 Retificação de Materiais com Elevada Dureza ($\geq 40\text{HRC}$)	3
2.3 Formação do Cavaco	10
2.4 Ferramentas Abrasivas	13
2.5 Fluido de Corte	17
2.6 Temperatura de Retificação	18
2.7 Ferro Fundido Branco	21
2.8 Índices de Capacidade	23
3 Metodologia	27
3.1 Introdução	27
3.2 Máquina-Ferramenta	27
3.3 Manutenção na Máquina-Ferramenta	28
3.4 Rebolos	30
3.5 Geometria do Corpo-de-Prova	31
3.6 Fixação da Peça e do Rebolo na Máquina	32
3.7 Caracterização do Material Usinado	33
3.8 Análise do Processo	35
3.9 Planejamento Experimental	37
4 Resultados e Discussões	40

4.1 Introdução.....	40
4.2 Manutenção da Máquina-Ferramenta.....	40
4.3 Rugosidade.....	44
4.4 Capacidade Real do Processo	47
5 Conclusões.....	52
6 Referências Bibliográficas	53

1 Introdução

A perfuração de poços de petróleo é uma das etapas na qual se encontra um dos maiores custos em toda a produção de petróleo. Um elemento chave do sistema de perfuração é a broca. O material da broca deve possuir uma elevada dureza para permitir cortar os diferentes materiais e compostos existentes nas formações geológicas. A broca necessita de um estudo detalhado e rigoroso para que seja selecionada de forma adequada à aplicação. Portanto, a definição do material e do processo de manufatura da geometria da broca, possibilita uma otimização para casos específicos e uma redução nos custos da etapa da perfuração. A seleção da broca envolve vários parâmetros, como o tipo de formação que se encontra no solo, tipo de corte, taxa de remoção de material entre outros parâmetros. Uma questão pertinente quando se aborda a aplicação de brocas é a capacidade de promover a ruptura e desagregação das rochas ou formações (THOMAS, 2001).

Plácido e Pinho (2009) afirma que as brocas rotativas dividem-se em dois grandes grupos: com e sem partes móveis. Nas brocas que contém partes móveis, podem-se destacar as brocas com três cones e dentes de aço revestidos, e as brocas com três cones e insertos de metal duro, baseado em carbonetos de tungstênio. Em relação às brocas sem partes móveis, destacam-se as brocas que possuem elementos de cortes de diamantes sintéticos policristalinos (PDC). Amorim (2008) mostra a comparação do custo de perfuração de diferentes tipos de brocas. Este estudo evidencia que as brocas com dentes de aço têm um menor custo para pequenas perfurações, sendo as mais indicadas para esse caso. Uma segunda possibilidade da utilização de brocas de aço é para o início da perfuração e depois continuar com uma broca de um material com maior resistência ao desgaste.

O processo de manufatura de brocas em aço requer elevada taxa de remoção do material, pois o material bruto usualmente é um cilindro. Outro desafio são operações de tratamento térmico para aumento da dureza do material, as quais devem ser realizadas em momentos intermediários do processo. Um terceiro desafio é o elevado custo do aço destinado às aplicações de elevada resistência à abrasão. Uma alternativa aos elevados custos de produção de brocas em aço é a substituição pelo ferro fundido branco. O ferro fundido branco tem elevada dureza, pode ser fundido

com dimensões próximas às finais e tem o custo muito inferior ao do aço (COLPAERT, 2008).

Neste sentido, do ponto de vista da manufatura, operações de acabamento tornam-se foco de pesquisas na área de usinagem dos ferros fundidos brancos. Esta pesquisa tem como objetivo analisar a viabilidade e o desempenho dos parâmetros de retificação adequados ao acabamento do ferro fundido branco alto cromo.

Os objetivos específicos são definir:

- a) o tipo de rebolo mais adequado à retificação do ferro fundido branco alto cromo;
- b) a capacidade real do processo considerando o aspecto dimensional;
- c) a rugosidade remanescente na superfície retificada ao longo da vida do rebolo.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

O objetivo desta revisão bibliográfica é analisar os fundamentos teóricos do processo de retificação do ferro fundido branco alto cromo que contém uma elevada fração volumétrica de partículas endurecidas, as quais promovem baixo índice de usinabilidade.

Assim ela está dividida em duas partes. A primeira parte tem como tema a “retificação de materiais com elevada dureza (≥ 40 HRC)”, com foco nos ferros fundidos; a segunda parte aborda os “ferros fundidos branco”, na qual será apresentada as características desse material para auxiliar na compreensão da aplicação. No sub-item retificação serão abordadas as principais características desse processo de usinagem, os parâmetros de usinagem para materiais de elevada dureza, a formação de cavaco e a influência do fluido de corte. Já no sub-item que discorre sobre o material, será abordada a questão da sua composição química, microestrutura e a sua usinabilidade.

2.2 Retificação de Materiais com Elevada Dureza (≥ 40 HRC)

Uma alternativa para a usinagem de materiais com elevada dureza é a utilização de processos de abrasão. O principal processo de abrasão é a retificação, a qual se enquadra na usinagem com ferramentas com aresta de geometria indefinida. A retificação é um processo do qual se obtém usualmente uma superfície com rugosidade inferior a $0,8 \mu\text{m}$, na escala Ra, e que se pretende obter dimensões estreitas, ou seja, com um grau de tolerância-padrão inferior a IT8. Existem alguns tipos de retificação, como: a retificação tangencial, a retificação cilíndrica e a retificação cônica. O tipo de retificação em foco neste estudo é a retificação tangencial plana. O avanço tecnológico nos rebolos, nos grãos abrasivos e nas máquinas-ferramenta viabilizam economicamente uma maior aplicação da retificação, a qual era inicialmente para a fase de acabamento, e tem aplicações em alguns casos com consideráveis volumes de materiais. A figura 1 representa uma simples comparação da retificação com outros processos de usinagem, em que os parâmetros envolvidos são a precisão do processo e a taxa de remoção da peça (ROWE, 2009; KLOCKE, 2009).

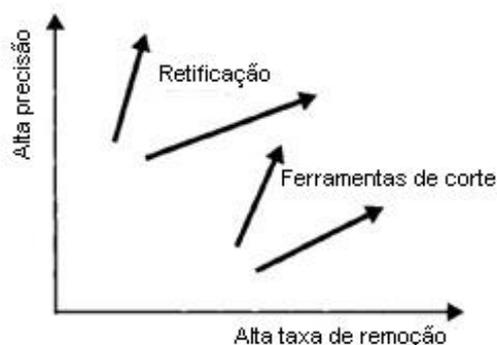


Figura 1: Comparação da precisão e da taxa de remoção entre a retificação e outros processos de usinagem.

Fonte: Adaptado de Rowe, 2009.

Conforme a figura 1, é evidente que a taxa de remoção do material da retificação é menor quando comparada aos principais processos de usinagem. Por outro lado, a alta qualidade do acabamento com elevada precisão dimensional é superior aos outros processos de usinagem. Essas características definem bem um processo de retificação.

Para a manufatura de um componente mecânico, como a broca de perfuração, por exemplo, há a possibilidade de se utilizar vários processos de usinagem. Assim, torna-se importante a comparação entre os processos para avaliar qual é o mais viável de acordo com a finalidade do projeto. Segundo Boing (2010) e Lima (2001), a retificação apresenta algumas vantagens quando comparada ao torneamento, como: precisão de forma e dimensão; baixos valores de rugosidade; maior capacidade real do processo e geração de menores valores de tensões residuais. É importante ressaltar que os valores tensões residuais são menores na retificação do que no torneamento, mas as tensões residuais da retificação são de tração, a qual está relacionada ao efeito térmico no processo de corte. No torneamento se têm as tensões residuais um pouco maiores, no entanto, são tensões residuais de compressão. Essas tensões residuais compressivas proporcionam uma maior vida aos componentes quando submetidos às solicitações cíclicas. O torneamento apresenta outras vantagens, como: uma maior taxa de remoção; um processo mais flexível e possibilita a usinagem de peças mais complexas; menor agressão ao meio ambiente e necessita de um menor tempo para a usinagem. Contudo, a principal dificuldade do torneamento é a usinagem de materiais com elevada dureza em função da restrita vida das ferramentas. Diante desse efeito comparativo e associando ao

objetivo da pesquisa, a retificação se confirma como a opção para aplicação. Este fato deve-se a necessidade de uma baixa taxa de remoção de material pelo motivo que a broca pode ser fundida próxima às suas dimensões finais e a broca de perfuração necessitar de um acabamento superficial em faixas restritas.

A figura 2 apresenta os elementos fundamentais do processo de uma retificação tangencial plana.

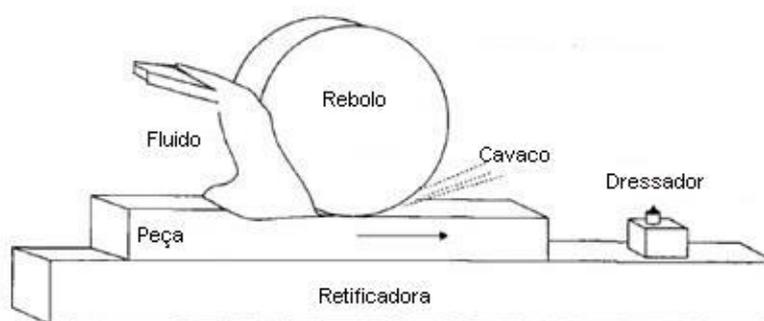


Figura 2: Elementos básicos de um processo de retificação.
Fonte: Adaptado de Rowe, 2009.

Conforme a figura 2, observa-se os principais elementos envolvidos na retificação: a retificadora, a peça a ser retificada, o rebolo, o cavaco, o fluido de corte e o dressador. No processo de remoção do material há a ação de forças normais e tangenciais entre o rebolo e a peça. Essas forças fazem com que os grãos abrasivos dos rebolos penetrem na peça, ocasionando a remoção do material (ROWE, 2009).

Du, Tang e Chen (2008) realizaram um estudo atribuindo um novo modelo matemático sobre as forças atuantes na superfície de contato. A pesquisa mostrou a relação que há entre as forças tangenciais e normais do processo, quando se variam os parâmetros de usinagem. Nos experimentos, a força normal sempre se mostrou superior à força tangencial, para os mesmos parâmetros de usinagem. As condições experimentais foram as seguintes:

- Rebolo: A-100-K-5-V com as dimensões 200 x 16 x 32 mm;
- Material retificado: Aço inox 22CrMoH, equivalente ao SAE 30304;
- Velocidade de corte: $v_c = 12 - 20$ m/s;
- Velocidade de avanço longitudinal da mesa: $v_f = 0,05 - 0,2$ m/s;
- Profundidade de usinagem: $a_p = 0,001 - 0,005$ mm e
- Fluido de corte: Emulsão à base de água.

Utilizou-se um dinamômetro piezoelétrico da marca Kistler e os resultados das forças normal e tangencial por unidade de largura estão descritos na tabela 1:

*Tabela 1: Forças de usinagem em função de diferentes parâmetros de usinagem
Fonte: Adaptado de Du, 2008.*

v_c (m/s)	v_f (m/s)	a_p (mm)	F'_t (N/mm)	F'_n (N/mm)
20	0,182	0,001	0,6638	1,1020
20	0,182	0,005	2,5109	4,1669
12	0,2	0,005	6,0035	9,8987
20	0,05	0,005	1,0464	1,8485

Houve uma pequena diferença não mensurável por Du (2008) entre os resultados experimentais mostrados na tabela anterior com os resultados do modelo matemático. As equações desse modelo matemático estão descritas a seguir.

$$F'_t = \left(237.000 - 30.990 \ln \frac{v_c^{15}}{a_p^{0,25} * v_f^{0,5}} \right) \frac{v_f * a_p}{v_c} + \left(0,8367 + 6066 \frac{v_f}{d_e * v_c} \right) (d_e a_p)^{1/2} \quad \text{Equação 2.1}$$

$$F'_n = \left(220.979 - 21.766 \ln \frac{v_c^{15}}{a_p^{0,25} * v_f^{0,5}} \right) \frac{v_f * a_p}{v_c} + 24.175 \frac{v_f}{v_c} \left(\frac{a_p}{d_e} \right)^{1/2} \quad \text{Equação 2.2}$$

Diante dos resultados obtidos, tanto experimentalmente como matematicamente, analisou-se que:

- Com o aumento da velocidade do rebolo, a força de usinagem da retificação diminui;
- Com o aumento da velocidade de avanço longitudinal da mesa, a força de usinagem da retificação aumenta;
- Com o aumento da profundidade de usinagem, a força de usinagem da retificação aumenta.

A força de usinagem envolve, também, outros fatores. Inasaki (1987) estudou sobre a retificação de materiais duros e frágeis, principalmente as cerâmicas avançadas. Para os mesmos parâmetros de usinagem, verificou-se diferenças nas forças tangenciais e normais que se tem durante o processo de retificação. A principal razão é a dureza do material a ser usinado. A retificação de materiais com elevada dureza, faz com que as arestas de corte do grão tenham uma maior dificuldade para

penetrar na peça. Uma característica da retificação de materiais duros e frágeis é que eles possuem uma pequena zona de deformação plástica. Isso significa dizer que a superfície retificada de um material duro e frágil possibilita valores de rugosidades menores quando comparado com a retificação de materiais dúcteis. Isso é causado pela baixa tendência dos materiais duros e frágeis têm do seu cavaco de se acumular nas laterais das arestas de corte.

Wang (2008) realizou experimentos para entender a influência da velocidade de avanço (v_f) do rebolo CBN sobre a rugosidade, circularidade, potência, desgaste do rebolo e mapa de emissão acústica nos três materiais da válvula do motor. A máquina-ferramenta é uma retificadora cilíndrica Zema, modelo – G800 HS. Utilizou-se o rebolo de superabrasivo de CBN, de especificação B181 124 V, com ligante vitrificado, de dimensões 408 x 136 x 23,8 mm e sua camada útil de CBN é 8 mm do fabricante Saint Gobain. Retificou-se os seguintes materiais: Inconel (751), Silcrome 1 (VV45) e 21-2N (VV56). O Silcrome 1 (VV45) é equivalente ao SAE HNV 3 e o 21-2N (VV56) ao SAE EV-12. O Inconel possui a pior usinabilidade dentre esses três materiais, o Silcrome possui a melhor usinabilidade e o SAE EV-12 possui uma usinabilidade intermediária. A rugosidade de uma peça retificada é influenciada por diversos fatores, tais como: tamanho do grão abrasivo, condições de dressagem, taxa de remoção de material, lubri-refrigeração, superfícies/volume retificado, entre outros fatores. A figura 3 mostra os resultados de rugosidade obtidos após a retificação dos três diferentes materiais. Os parâmetros de usinagem foram iguais para todos os experimentos, variando-se apenas a velocidade de avanço (v_f).

- Velocidade de corte: $v_c = 100$ m/s
- Velocidade da peça: $v_w = 200$ rpm
- Profundidade de corte: $a_p = 0,5$ mm

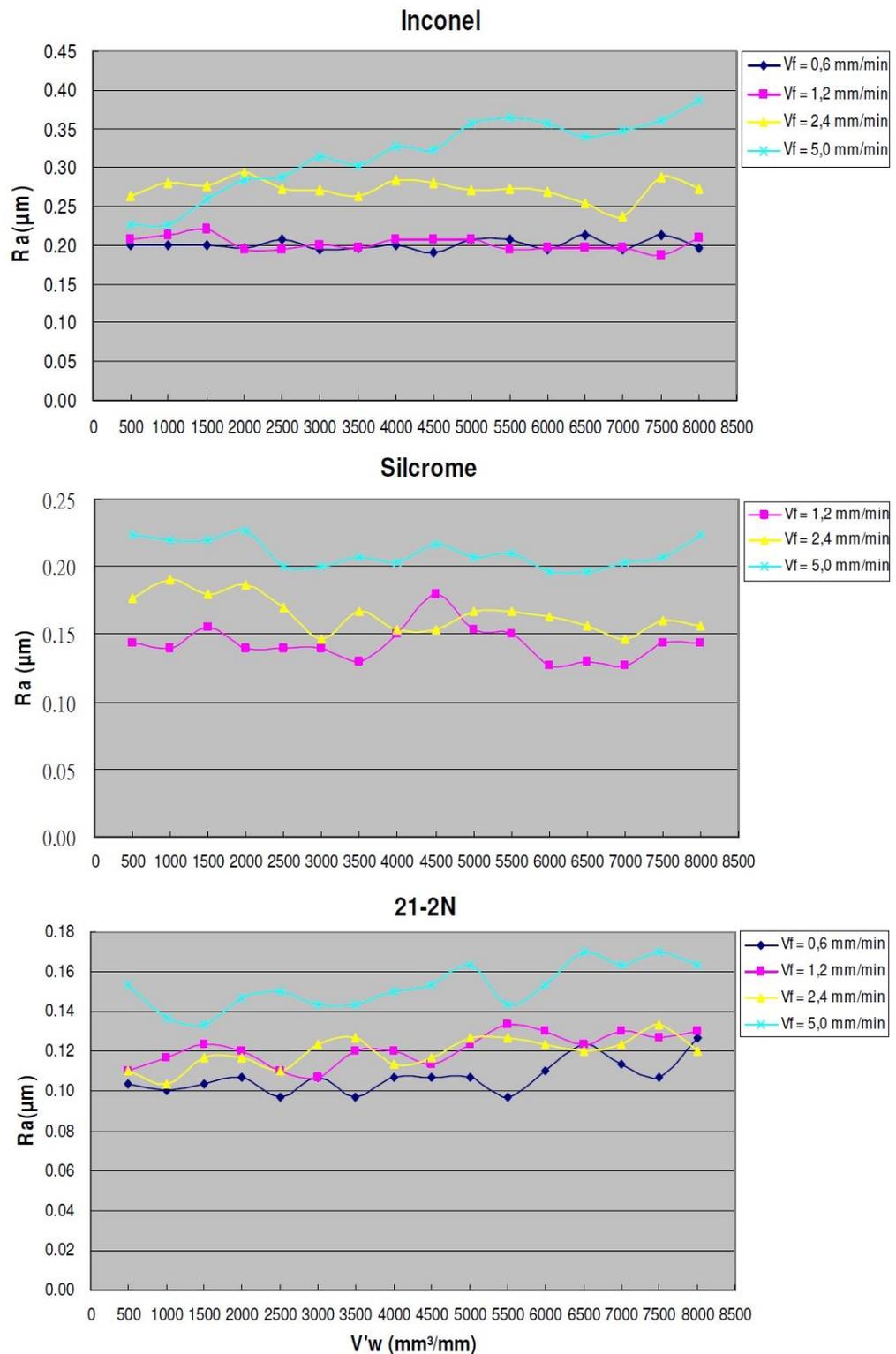


Figura 3: Comportamento da rugosidade Ra dos três materiais em função do volume específico de material removido.
Fonte: Wang, 2008.

Todos os experimentos ocorreram com as mesmas condições de usinagem, com exceção da velocidade de avanço (v_f). Há também o desgaste do rebolo associado ao volume de material removido que ocorre ao longo do processo.

Percebe-se que o aumento da velocidade de avanço (v_f) provoca um aumento no valor da rugosidade, assim como há uma pequena tendência de aumento da rugosidade à medida que se aumente o volume de material removido. Esse aumento na rugosidade indica que para maiores velocidades de avanço (v_f), os grãos abrasivos produzem sulcos com maiores profundidades na peça. Também, observou-se que para condições de retificação mais severas nos materiais com menores usinabilidades, ocorreu um crescimento na rugosidade ao longo dos experimentos. Este efeito foi mais perceptível no Inconel com relação ao 21-2N e praticamente nulo no Silcrome. Pode-se afirmar que materiais com pior usinabilidade produzem modificações na topografia do rebolo que acarreta em aumento de rugosidade.

Dedini (2000) realizou experimentos em uma retificadora cilíndrica de mergulho e uma de suas análises foi estudar o comportamento da rugosidade Ra em função do passo de dressagem da ida do dressador. Os passos de dressagem da ida foram definidos como: 0,22 mm/volta, 0,25 mm/volta e 0,275 mm/volta. O material retificado foi um ferro fundido nodular com uma dureza entre 277-311 HB. Utilizou-se um dressador do tipo fliese e os resultados dos valores de rugosidade Ra em função dos passos de dressagem da ida estão descritos na figura 4:

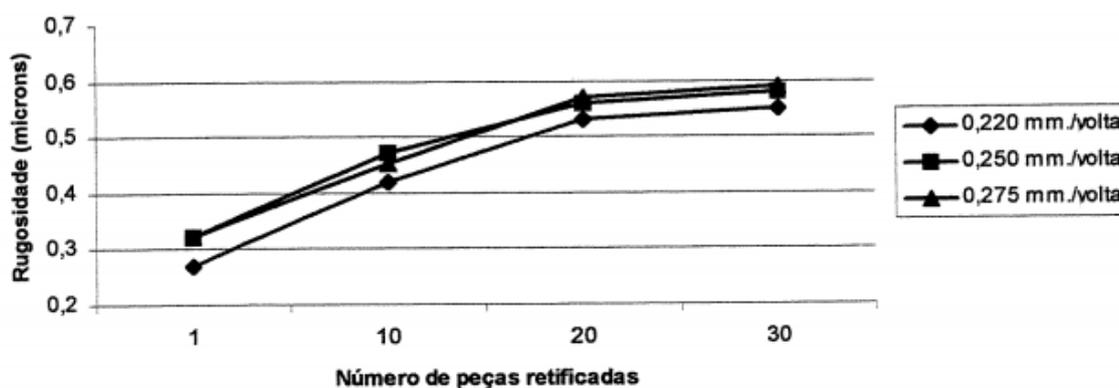


Figura 4: Rugosidade Ra em função do passo de dressagem da ida.
Fonte: Dedini, 2000.

Nota-se que não houve grandes alterações nos valores da rugosidade Ra em função do passo de dressagem da ida, mas há uma pequena tendência de menores valores do passo da ida proporcionar menores valores de rugosidade.

2.3 Formação do Cavaco

O processo de formação de cavaco na retificação ocorre de maneira diferente de outros processos de usinagem, já que a retirada do cavaco tem como maior influência a abrasão. Os rebolos não possuem arestas de cortes definidas em virtude da sua microestrutura híbrida. Os grãos abrasivos formam um grande número de pontos que agem na remoção do material. Um montante de diferentes arestas de corte remove o material da superfície, ocasionando a formação do cavaco. Por se tratar de um processo de alta precisão, os cavacos são na escala de micrômetros. Cada grão que entra em contato com a peça, possibilita a remoção de pequenos cavacos. Klocke (2009) ainda descreve um parâmetro analítico para analisar a afiação das arestas de corte e encontra-se representado na equação 2.3 e conforme a figura 5.

$$S = h_{cu} * \rho_S$$

Equação 2.3

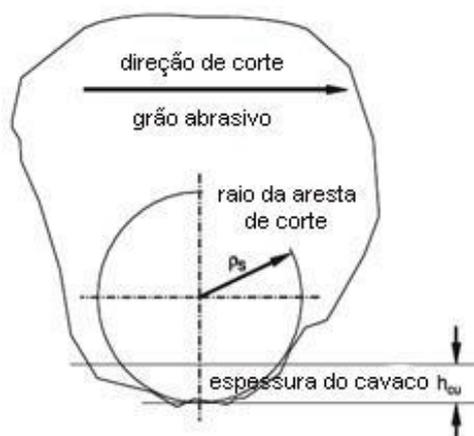


Figura 5: Modelo descritivo do formato médio de uma aresta de corte.
Fonte: Adaptado de Klocke, 2009.

O parâmetro S expressa o quanto as arestas estão afiadas. É calculado entre a relação da espessura do cavaco (h_{cu}) com o raio da aresta de corte (ρ_S). Em processos em que se encontram as arestas indefinidas, como no caso da retificação, esse valor é menor do que 1. Nos demais processos o valor desse parâmetro é maior do que 1 (KLOCKE, 2009). A afiação das arestas depende de um processo que se chama dressagem. Com o incremento no tempo de usinagem, o rebolo vai perdendo essa afiação. A dressagem é realizada através de uma ferramenta, o dressador, e serve para dar forma afiada às arestas, com a finalidade de que ela possua um maior poder de corte, deixando o rebolo mais agressivo.

A formação do cavaco inicia quando o grão abrasivo penetra na peça com uma espessura do cavaco (h_{cu}) igual à penetração de início de corte (T_{μ}). No decorrer do processo uma parte do material da peça continua sendo forçada para as laterais, além de haver a formação de cavaco. A eficiência da remoção de material é determinada através do quanto da espessura de cavaco não deformada (h_{cu}) é transformada em cavaco (ver figura 6).

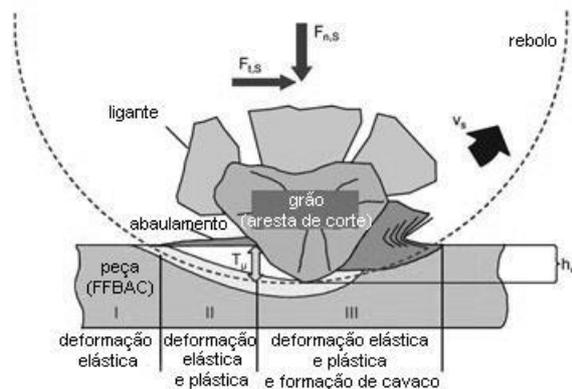


Figura 6: Processo de formação de cavaco.
Fonte: Adaptado de Klocke, 2009.

Como mostra na figura 6, durante o processo de formação do cavaco, Souza (2007) divide esse processo em 3 regiões.

- Região 1: o grão começa a atritar com a peça causando, primeiramente, deformação elástica na pequena porção de material tocada por ele (escorregamento do grão).
- Região 2: ao prosseguir no seu caminho na peça, as tensões vão aumentando e, então, o grão deforma plasticamente a peça em outra pequena porção do material (riscamento).
- Região 3: continuando o crescimento das tensões, a tensão de ruptura do material à frente do grão é ultrapassada e acontece a extração de uma pequena porção de material (remoção do cavaco).

Aliando a alta velocidade do rebolo com esse tipo de formação de cavaco, pode-se gerar alguns casos, como o desenvolvimento de altas temperaturas de corte; as forças normais são bem superiores às forças tangenciais, pois o atrito prevalece

sobre a força de corte e em números gerais, 85% do calor gerado vai para a peça, 5% para o cavaco e 10% para o rebolo (SOUZA, 2007).

De acordo com Wong e Doyle (1999), existem três tipos de cavacos na retificação: a) longo, b) regular e c) esférico. A figura 7 mostra os três tipos de cavacos mencionados.

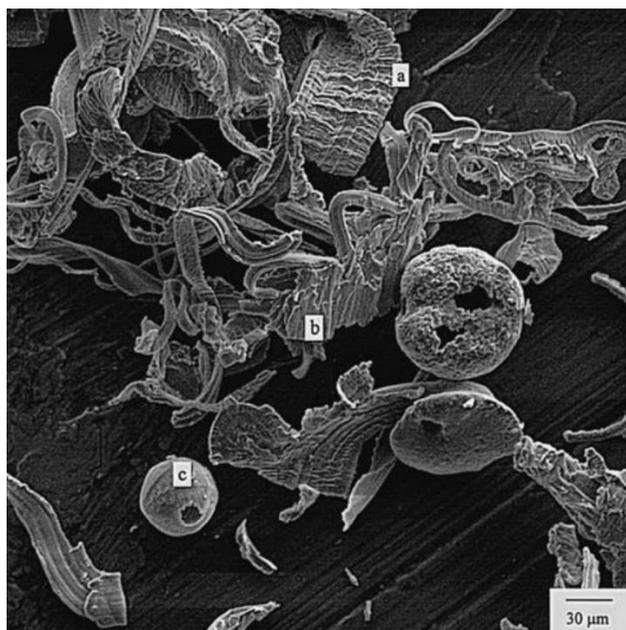


Figura 7: Tipos de cavaco de uma operação de retificação do aço AISI 1055. a) longo; b) irregular; c) esférico.

Fonte: Adaptado de Wong e Doyle, 1999.

A remoção do cavaco da região de corte se dá através das porosidades do rebolo e é auxiliado pelo fluido de corte. Esse processo ocorre imediatamente após a formação do cavaco. Em seguida, esse cavaco é expulso da ferramenta através do fluxo do fluido de corte e da ação da força centrífuga. É muito importante a remoção desse cavaco dos poros do rebolo, pois se eles não forem eficientemente removidos, o poder de remoção do rebolo irá diminuir, aumentando o atrito do processo. Isso resultará no aumento de temperatura na região de corte e também nos valores de rugosidade superficial da peça (CHEN e ROWE, 1996).

Tso (1995) estudou sobre os tipos de cavacos no processo da retificação do material Inconel 718, com dureza de 40 HRC. O Inconel 718 é uma liga de níquel, cromo, molibdênio projetada para resistir a uma ampla gama de ambientes severamente corrosivos, corrosão por pite e em fresta. Esta liga metálica também exibe rendimento excepcionalmente alto quanto à: tração, fluência e ruptura por

propriedades em altas temperaturas. Utilizou-se três diferentes materiais de rebolos: CBN, carboneto de silício e óxido de alumínio branco. Os parâmetros de usinagem foram os seguintes: $v_c = 650 - 1320$ m/min; $v_w = 2 - 5$ m/min e $d = 5 - 15$ mm. Detectou-se vários tipos de cavacos em função do material de rebole, dos parâmetros de usinagem e da presença ou não de fluido de corte. O autor dividiu os cavacos em 5 grupos: a) em fatia (*slice*); b) rasgado (*ripping*); c) contínuo (*flowring*); d) cisalhante (*shearing*); e) regular (*knife*). As conclusões foram: retificando com o rebole de carboneto de silício, os cavacos serão do tipo rasgado, independentemente da quantidade de fluido de corte aplicado. O cavaco contínuo aparece quando se tem baixa força de usinagem e apresentou a melhor qualidade superficial da peça dentro todos os tipos de cavacos. O cavaco que apresentou o pior acabamento superficial foi o tipo em fatia. Esse tipo de cavaco é gerado na presença de alta força de usinagem, acelerando o desgaste do rebole. Este tipo de cavaco foi detectado apenas na retificação com os rebolos de óxido de alumínio e CBN, sem a presença do fluido de corte.

2.4 Ferramentas Abrasivas

Segundo Shaw (1996), as ferramentas abrasivas podem ser divididas em dois grupos: o primeiro grupo com os produtos ligados e o segundo grupo com os produtos revestidos. Os produtos ligados possuem esse nome porque há a presença de um elemento ligante que mantém os grãos abrasivos unidos, formando a estrutura da ferramenta. Essa estrutura possui uma porosidade que tem a função de prover espaço para o cavaco e o fluido de corte durante o processo de retificação. Os principais exemplos desse grupo são os rebolos vitrificados e os resinóides com grãos abrasivos convencionais ou superabrasivos. Todos os rebolos utilizados nessa pesquisa compreendem ao grupo dos produtos ligados. Já os grupos dos produtos revestidos têm como base os materiais como papel, polímero, aço e são revestidos por uma camada única de partículas abrasivas. Há um espaçamento maior entre as partículas abrasivas em relação ao grupo anterior, o qual tem o objetivo de acomodação do cavaco. Geralmente este tipo de produto é utilizado para aplicações que exigem altas taxas de remoção de material. Ferramentas revestidas são geralmente lixas, rebolos eletrodepositados entre outros.

Os grãos abrasivos, um dos elementos mais importantes que constituem o rebolo, devem ser duros, termicamente e quimicamente estáveis (STEMMER, 1995). Os principais tipos de abrasivos são: o coríndon (óxido de alumínio Al_2O_3 cristalino), o nitreto cúbico de boro, o carboneto de silício e o diamante sintético policristalino (PCD). Klocke (2009) refere à especificação do rebolo quando o material a ser retificado se trata de um ferro fundido. Os grãos abrasivos que são indicados e que possuem afinidades com peças que contenham carbono, são: o carboneto de silício e o diamante sintético policristalino. O mesmo autor sugere que para a utilização do PCD como grão abrasivo ao invés do carboneto de silício, só deve ser feito após a realização de um cálculo de rentabilidade, pelo fato do alto valor do material de ferramenta. O uso do referido material na retificação é mais comum na dressagem, uma operação que serve para manter um bom desempenho no rebolo, limpando seus poros e dando uma melhor afiação dos grãos abrasivos. Dentro dos rebolos que são feitos por carboneto de silício, tem-se tipos diferentes em virtude da variação de sua composição química. Os mais comuns são os rebolos de cor preta e de cor verde, sendo o verde utilizado na retificação de ferramentas de metal duro e o preto possui uma maior tenacidade. O grão abrasivo óxido de alumínio (Al_2O_3) com aditivo de óxido de cromo (Cr_2O_3) faz com que aumente sua tenacidade mantendo a sua dureza (STEMMER, 1995).

Quanto ao tamanho do grão, recomenda-se para um grão com um diâmetro maior para a operação de desbaste. O grão com o diâmetro menor é mais utilizado para acabamentos. A escala adotada para se retirar essa especificação, é a ANSI, a qual é utilizada para os rebolos convencionais (ROWE, 2009). Por se tratar de uma retificação de um material duro (FFBAC), Nussbaum (1988) recomenda um grão fino, o qual compreende um valor acima de 70 na norma ANSI.

O material ligante serve para unir os vários grãos abrasivos e assim formar o rebolo. Quando se trata de rebolos convencionais, ou seja, os que possuem grãos abrasivos de óxido de alumínio ou carboneto de silício, Nussbaum (1988) e Stemmer (1995) indicam que o material ligante seja o ligante cerâmico ou vitrificado. Esse é o material mais comum e adotado para este tipo de caso, a retificação de ferros fundidos. O seu símbolo representativo é o “V”.

A dureza do rebolo está relacionada à resistência oposta à extração do grão. Quanto menor a dureza, maior a facilidade de o rebolo soltar o grão e de se desgastar mais rapidamente. Normalmente, para a retificação de materiais com alta dureza, utiliza-se rebolo com uma menor dureza (SOUZA, 2007). De acordo com a norma ANSI, indica-se uma dureza que abranja da letra A até a letra M.

A estrutura refere-se ao espaçamento entre os grãos. Quanto maior a estrutura, maior será o espaçamento para a alojação dos cavacos. Uma estrutura fechada, os grãos estarão mais próximos um dos outros e o rebolo terá um maior número de arestas cortantes atuantes. Para a retificação de materiais mais duros, indica-se uma estrutura mais fechada (SOUZA, 2007). A estrutura varia de 1 a 15. Quanto maior for esse número, maior será a porosidade

Um outro fator importante característico dos rebolos de retificação é a friabilidade. Fitzpatrick (2013) define a friabilidade como a capacidade de se quebrar em pequenos flocos para se autoafiar em novas arestas antes que seja arrancado do aglomerante. A friabilidade de um material está relacionado ao seu poder de ruptura. Esse comportamento é oposto à tenacidade. Um material muito friável tem facilidade de sofrer ruptura. Essa característica é frequentemente importante na retificação, pois é desejável que grãos cortantes sofram fraturas para expor novas e afiadas arestas de corte (PEREIRA, 2013 *apud* GARMO, BLACK E KOHSER, 1984). O óxido de alumínio apresenta dureza menor que o carboneto de silício. Isto indica que o óxido de alumínio possui uma friabilidade menor que o carboneto de silício o que implica em uma resistência maior a fratura ou fragmentação devido ao impacto ou quando do engajamento do rebolo com a peça (RASCALHA, 2011 *apud* NUSSBAUM, 1988).

A relação G é uma das formas de avaliar a performance de um rebolo. Ela é uma grandeza adimensional e relaciona o volume usinado com o volume gasto do rebolo. Isso significa dizer que quanto maior for a relação G de um rebolo, maior será o volume usinado para um dado volume de rebolo gasto. Rebolos que apresentam altos valores de relação G possuem uma melhor performance do que rebolos que apresentam baixos valores de relação G. Taborga, Taborga e Weingaertner (2003) estudaram o desgaste na retificação do ferro fundido nodular empregando rebolos de SiC e Al₂O₃. Para as mesmas condições de ensaios, constatou-se que a relação G do SiC foi de 63 enquanto a relação G do Al₂O₃ foi de 41.

2.5 Fluido de Corte

A retificação do FFBC é um processo desafiador por causa da presença de uma alta fração volumétrica do carboneto M_7C_3 em sua estrutura. Como descreve Bianchi, Aguiar e Piubeli (2003), o fluido de corte pode facilitar a remoção do material pelas seguintes maneiras: minimizando a quantidade de afiações feitas no rebolo, o que diminui o desgaste do topo dos grãos abrasivos e, com a redução do coeficiente de atrito entre o grão e a peça, convertendo o atrito em menos energia térmica e além de facilitar a sua dissipação.

Alves *et al.* (2010) avaliou propostas alternativas ao método convencional de lubri-refrigeração retificando cerâmica. Estudou-se a viabilidade da técnica de refrigeração otimizada, na qual o fluido é aplicado na mesma velocidade periférica do rebolo, penetrando na região de corte com menos turbulência. O outro método avaliado foi a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL), na qual o volume convencional utilizado de fluido de corte é substituído por um jato de ar contendo quantidade ínfima de lubrificante. A rugosidade foi um dos parâmetros para a análise das três diferentes técnicas de utilização de fluido de corte. O fluido de corte utilizado nas condições convencional e otimizado foi uma emulsão sintética à base de éster de poliglicol, com concentração entre 4% e 6% e pH entre 8,5 e 9,5. Na condição de MQL foi utilizada fluido de corte integral (óleo) sem diluição. Os parâmetros de aplicação de cada fluido encontram-se na tabela 2.

*Tabela 2: Parâmetros relacionados à aplicação do fluido de corte.
Fonte: Alves et al., 2010.*

Método de lubri-refrigeração	Convencional	Otimizado	MQL Ar	Óleo
Vazão [L/min]	27,5	17	450	0,0 013
Pressão [kgf/cm ²]	< 0,2	6	8	
Velocidade do fluido [m/s]	3	30	30	30

Os parâmetros de corte foram os mesmo para as três diferentes técnicas de lubri-refrigeração. A profundidade de usinagem (a_p) foi 0,01 μm , a velocidade de corte (v_c) 30 m/s e a velocidade da mesa retificadora (v_w) 2,3 m/min. Os demais parâmetros estão descritos na tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de retificação adotados nos ensaios.
Fonte: Alves et al., 2010.

a (mm)	h_{eq} (μm)	l_c (mm)	Q_w (mm^3/min)	Q'_w ($\text{mm}^3/\text{mm.s}$)
0,01	0,77	1,87	207	0,38

Os valores da rugosidade Ra encontram-se na figura 9.

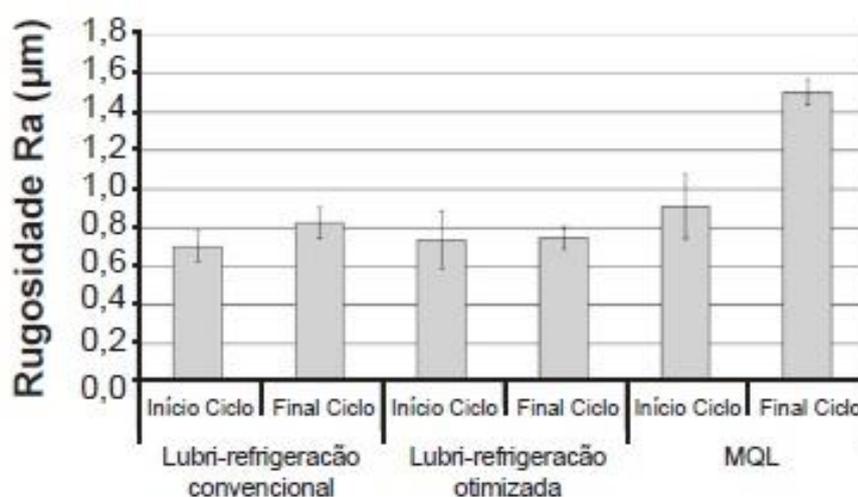


Figura 9: Valores da rugosidade Ra obtidos para cada método de lubri-refrigeração.
Fonte: Alves et al., 2010.

Conforme a figura 9, os resultados da rugosidade Ra apurados pelo método MQL apresentaram acentuado acréscimo comparado os valores obtidos antes e depois da retificação. O aumento da rugosidade pode ser explicado pela degradação do rebolo em função de danos térmicos ao ligante e de possíveis tensões induzidas por choque térmico devido à baixa condutividade térmica da cerâmica e da corrente de ar.

2.6 Temperatura de Retificação

A ação simultânea de centenas de grãos abrasivos gera um atrito alto na superfície da peça. Somando isso com a deformação plástica associada à produção do cavaco, contribuirão para a elevação da temperatura na interface rebolo/peça. Mais outros fatores podem contribuir para a elevação da temperatura, como: dificuldade do acesso do fluido de corte; má dissipação de calor pelos rebolos por possuírem materiais refratários em sua confecção; má dissipação do calor por parte do cavaco,

onde o mesmo possui pequena massa e uma natureza descontínua (MACHADO, 2011).

Elevação excessiva da temperatura da peça não é interessante para o processo, pois, segundo Machado (2011), isso pode gerar alguns problemas, como:

- Alterações microestruturais da peça;
- Indução de tensões residuais de tração;
- Alterações dimensionais relacionadas ao coeficiente de expansão térmica do material;
- Surgimento de trincas.

Durante o processo de retificação, pode ocorrer alguns fenômenos não desejáveis em virtude da temperatura de retificação, tais como: alterações microestruturais, conhecidas como “queima de superfície” e retêmpera.

Samulewski (2006) estudou a retificação em peças prismáticas. O material retificado foi o aço SAE 5160, o qual na condição de temperado apresentou uma dureza média de 57,5 HRc. Os parâmetros de usinagem se deu da seguinte maneira:

- Especificação dos rebolos: 38-A-46-L-6-V e 38-A-60-L-6-V;
- Avanço transversal: 0,2 e 0,002 mm e
- Profundidade de usinagem: $a_p = 0,04$ e 0,08 mm.

Outros parâmetros de usinagem não foram mensurados pelo autor, como por exemplo a velocidade de avanço longitudinal da mesa (v_w) e a velocidade de dressagem. Ambos parâmetros foram divididos como rápido e lento.

Após os experimentos, alguns corpos-de-prova não apresentaram queima combinado com retêmpera (ver figura 10) e outros corpos-de-prova apresentaram a queima combinado com a retêmpera (ver figura 11).

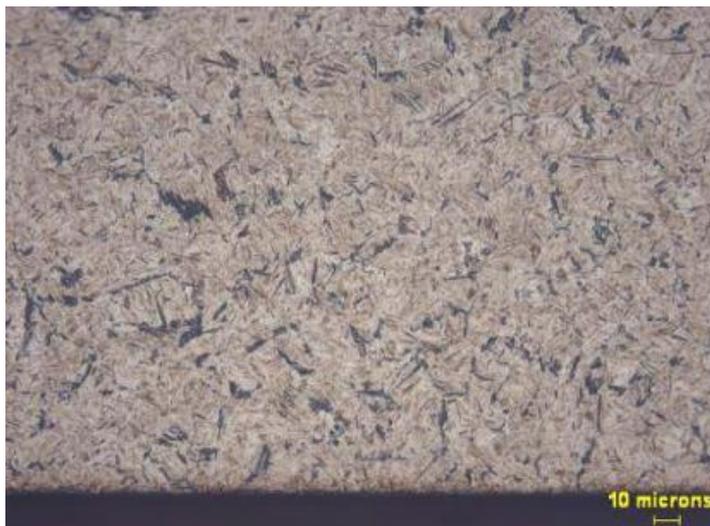


Figura 10: Microestrutura após a retificação de um corpo-de-prova sem queima e retêmpera.
Fonte: Samulewski, 2006.



Figura 11: Microestrutura após a retificação de um corpo-de-prova com queima e retêmpera.
Fonte: Samulewski, 2006.

O autor concluiu que para a obtenção de uma superfície com melhores acabamentos superficiais sem danos metalúrgicos ao material deve-se dresser o rebolo com altas velocidades de dressagem associadas com grãos abrasivos mais finos possíveis.

2.7 Ferro Fundido Branco

Os ferros fundidos brancos são empregados em locais onde há a necessidade de uma elevada dureza e resistência ao desgaste alta, boas características para o seu uso em uma broca de perfuração de poços de petróleo. De acordo com o seu processo de fabricação, uma rápida velocidade de resfriamento que acarreta uma solidificação metaestável e favorece a formação da cementita, não havendo a formação da grafita. A sua estrutura é composta de bastões de perlita e uma matriz de cementita (COLPAERT, 2008 e AMORIM, 2008).

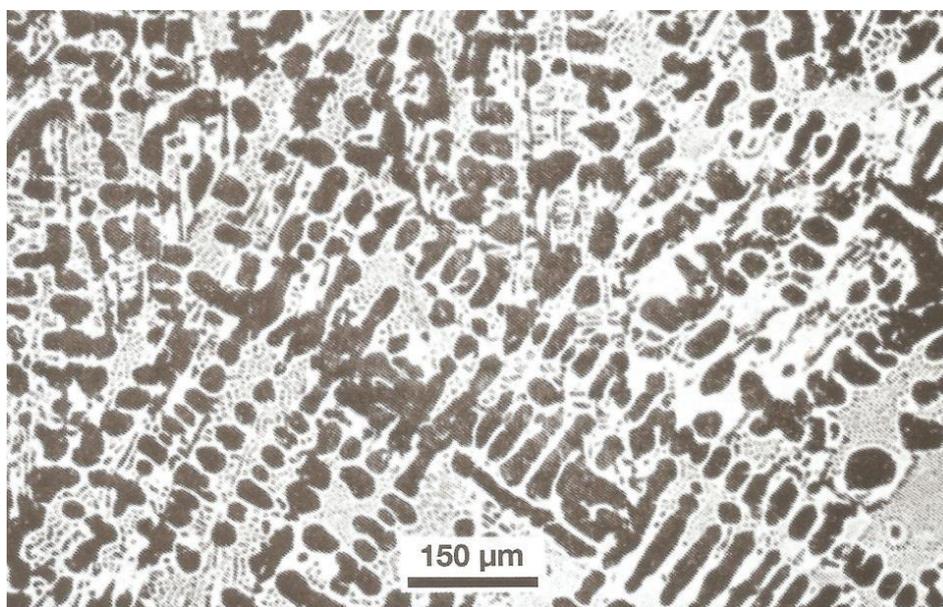


Figura 12: Ferro fundido branco hipoeutético. Perlita a parte escura e cementita a parte branca. Fonte: Colpaert, 2008.

A presença em grande proporção do cromo no ferro fundido branco, em teores que variam entre 12 a 35%, aumenta a sua resistência ao desgaste e torna resistente à corrosão e à oxidação em altas temperaturas. O cromo também proporciona a formação de carbonetos complexos e muito estáveis durante a fase da solidificação. Durante a reação eutetóide há uma forte tendência à formação da perlita. (CHIAVERINI, 2005).

Segundo a norma ASTM A 532, há uma divisão em três classes em virtude da composição química dos ferros fundidos brancos resistentes à abrasão, são elas: classe I) ferros brancos ligados ao níquel-cromo ou Ni-Hard (designação comercial); classe II) ferros brancos ligados ao cromo e ao molibdênio; e por último, classe III)

ferros brancos de alto cromo. A tabela 4 apresenta as composições químicas da norma ASTM A532 (DAVIS, 1996).

Tabela 4: Composição Química dos ferros brancos resistentes à abrasão pela norma ASTM A 532. Fonte: Davis, 1996.

Classe	Tipo	Designação	Composição Química, (% em peso)						
			C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
I	A	Ni-Cr-HiC	2,8-3,6	≤2,0	≤0,8	3,3-5,0	1,4-4,4	≤1,0	...
I	B	Ni-Cr-LoC	2,4-3,0	≤2,0	≤0,8	3,3-5,0	1,4-4,4	≤1,0	...
I	C	Ni-Cr-GB	2,5-3,7	≤2,0	≤0,8	≤4,0	1,0-2,5	≤1,0	...
I	D	Ni-HiCr	2,5-3,6	≤2,0	≤2,0	4,5-7,0	7,0-11,0	≤1,5	...
II	A	12% Cr	2,0-3,3	≤2,0	≤1,5	≤2,5	11,0-14,0	≤3,0	≤1,2
II	B	15% Cr-Mo	2,0-3,3	≤2,0	≤1,5	≤2,5	14,0-18,0	≤3,0	≤1,2
II	D	20% Cr-Mo	2,0-3,3	≤2,0	1,0-2,2	≤2,5	18,0-23,0	≤3,0	≤1,2
III	A	25% Cr	2,0-3,3	≤2,0	≤1,5	≤2,5	23,0-30,0	≤3,0	≤1,2

Os ferros brancos de alto cromo são distinguidos pela presença de duros e descontínuos carbonetos primários e/ou eutéticos do tipo M_7C_3 . Em oposição, há os carbonetos menos frágeis e mais contínuos do tipo M_3C , presentes nos ferros ligados de baixo cromo e nos ferros brancos não ligados (DODD E PARKS, 2003). Esses carbonetos presentes no FFBC torna a usinagem bastante difícil, em razão da dureza desses carbonetos serem bem elevadas quando se comparada com a matriz do FFBC.

Çetinkaya (2006) menciona que o ferro fundido branco com um alto teor de cromo tem uma tenacidade maior em relação ao que contém baixo cromo. Esse aumento de tenacidade é importante na usinagem pelo fator de evitar acidentes. O FFBC apresenta uma alta fragilidade e uma tendência na formação e propagação de trincas. Isso pode limitar o seu uso quando submetidos a fortes impactos. Para minimizar essa possível falha, HOU, HUANG e WANG (2009) sugeriram uma alteração na matriz através de tratamento térmico. Já TANG *et al.* (2011) mostra outra alternativa para a melhoria da fragilidade do FFBC, trata-se do aumento prolongado do teor de cromo (45% em peso de cromo).

2.8 Índices de Capacidade

O controle estatístico da qualidade tem como uma de suas ferramentas o estudo da capacidade de processos, a qual tem como principal objetivo verificar se a média e a variabilidade do processo estão de acordo com o alvo e os limites de especificação de projeto. A verificação permite o ajuste do processo de maneira que se reduzam as chances da fabricação de produtos defeituosos. Esta produção de produtos defeituosos é calculada com a utilização de índices desenvolvidos para medir a capacidade de processos, onde os mais utilizados são C_p e C_{pk} . Estes índices são calculados estimando-se a média e o desvio padrão de dados coletados de amostras do processo, portanto não se sabe com certeza o seu valor real (MIRANDA, 2005).

Na tabela 5 são apresentados alguns valores de C_p e C_{pk} e a quantidade de não conformes por milhão (ppm).

*Tabela 5: Relação de C_p e C_{pk} com a produção de não conformes por milhão.
Fonte: Adaptado de Miranda, 2005.*

$C_p \backslash C_{pk}$	1,00	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60
1,00	2700										
1,15	1398	561									
1,20	1363	369	318								
1,25	1353	306	207	177							
1,30	1351	287	172	114	96						
1,35	1350	282	163	95	61	51					
1,40	1350	281	160	90	51	32	27				
1,45	1350	280	159	89	49	27	17	14			
1,50	1350	280	159	88	48	26	14	8	7		
1,55	1350	280	159	88	48	26	14	7	4	3	
1,60	1350	280	159	88	48	26	13	7	4	2	2

A capacidade de um processo pode ser classificada através dos valores de C_p e C_{pk} . A combinação desses dois índices que qualifica o quão capaz é o processo. Pode-se estimar a quantidade de peças defeituosas através dos valores obtidos do C_p e C_{pk} de um processo.

A figura 13 mostra uma simulação de possíveis diferentes processos que podem ser obtidos em uma análise estatística. Além da importância dos valores obtidos estarem dentro do limite superior e inferior, é importante e desejável que a dispersão esteja entre os limites para se obter resultados de um processo capaz.

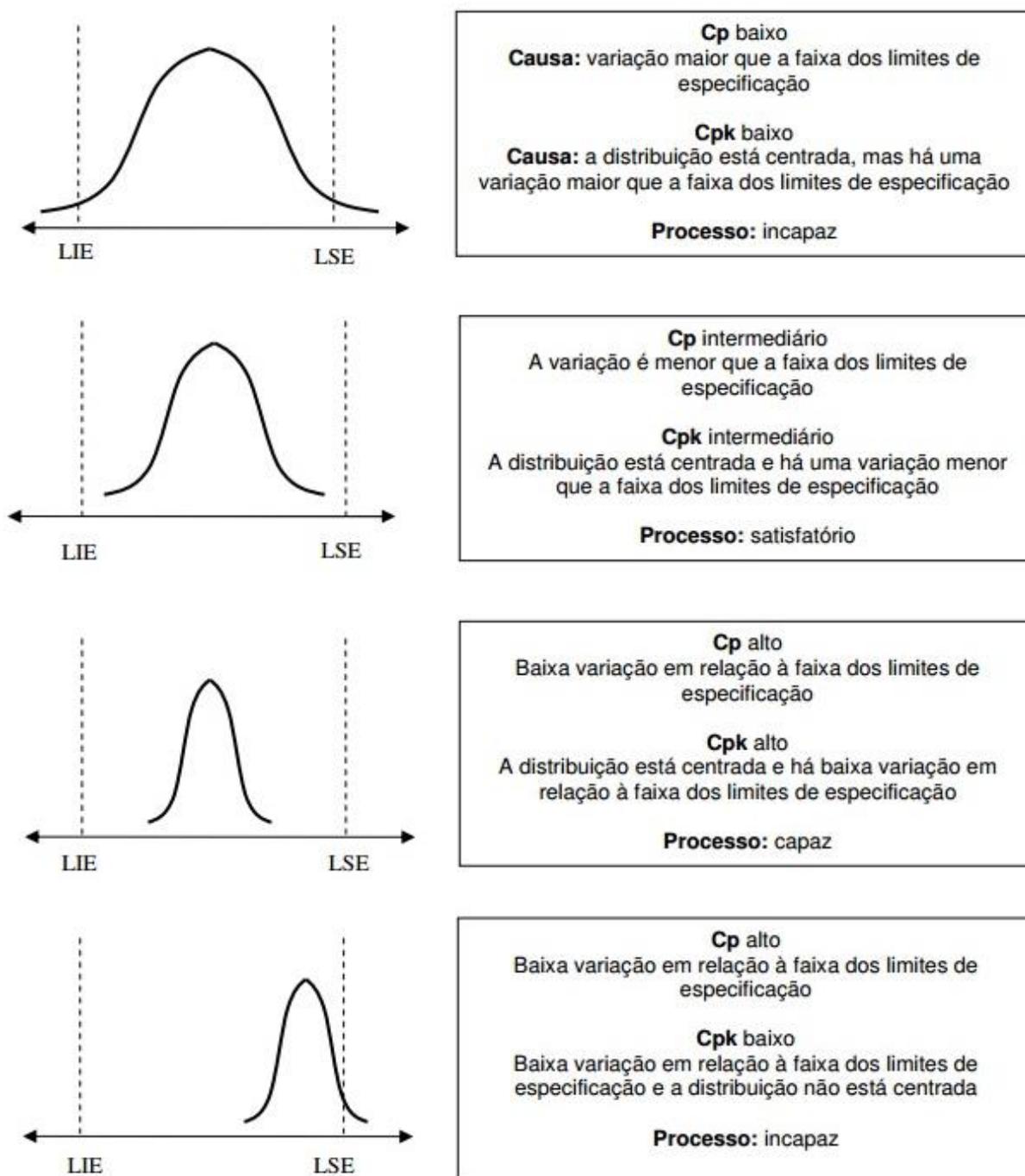


Figura 13: Classificação do processo, C_p e C_{pk} em função da dispersão.

Fonte: Adaptado de Datalyzer, 2006.

Quando os dados seguem uma distribuição normal, o índice C_p e C_{pk} são definidos por:

$$C_p = \frac{\text{Variabilidade Permitida do Processo}}{\text{Variabilidade Inerente}} = \frac{\text{LSE} - \text{LIE}}{6\sigma} \quad \text{Equação 3.1}$$

$$C_{pk} = \text{MIN} \left(\frac{\text{LSE} \cdot \bar{X}}{3 \cdot \sigma}, \frac{\bar{X} \cdot \text{LIE}}{3 \cdot \sigma} \right) \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

LSE = Limite Superior de Especificação.

LIE = Limite Inferior de Especificação.

σ = desvio-padrão calculado a partir da amostragem de medições.

\bar{X} = mediana da característica medida.

O valor do C_{pk} será definido como o menor valor dos dois valores calculados, como mostra na equação 3.2 (SILVEIRA, 2012).

Para Montgomery (2004), o índice C_p pode ser analisado dividindo-se em três intervalos de referência conforma a tabela 6.

Tabela 6: Intervalos de referência para análise do índice C_p .

Fonte: Montgomery, 2004.

C_p	Interpretação
$C_p < 1$	Processo Incapaz
$1 \leq C_p \leq 1,33$	Processo Aceitável
$C_p \geq 1,33$	Processo Potencialmente Capaz

O índice C_p leva em consideração apenas a dispersão dos valores em quanto aos limites inferiores e superiores do processo. Enquanto o índice C_{pk} leva em conta a dispersão e centralização do processo quanto aos limites inferiores e superiores do processo.

De maneira geral, diz-se que C_p mede a capacidade potencial do processo, enquanto C_{pk} mede a capacidade atual do processo. Assim, C_p informa que quando o processo for colocado no centro terá a capacidade indicada por C_p (JESUS, BECKER E SEBLEN, 2010).

Sabe-se que os parâmetros de usinagem estão relacionados com os valores dos índices C_p e C_{pk} . Rossi (2009) estudou um método para otimização do processo de retificação transversal de precisão. Em uma de suas análises, ele relacionou a influência da velocidade de avanço com o índice C_p . Nota-se que valores de velocidade de avanço (v_f) maiores do que 1,05 mm/min, resultará C_p menores que 1,3.

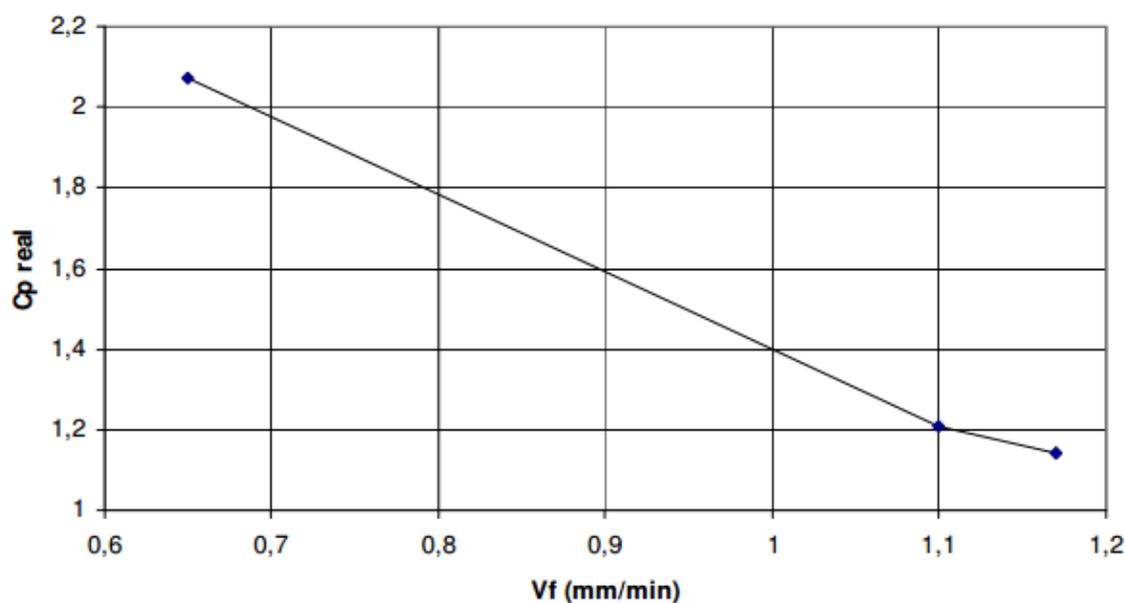


Figura 14: Relação entre a capacidade real do processo e a velocidade de avanço (v_f) e a capacidade real de processo (C_p).

Fonte: Rossi, 2009.

Embora este projeto de pesquisa não analise a relação dos índices C_p e C_{pk} com os parâmetros de usinagem, é relevante abordar e destacar que esses índices estatísticos possam ser influenciados pelos parâmetros de usinagem. Dessa maneira, os índices de C_p e C_{pk} podem ser usados como uma ferramenta para otimização do processo quanto ao número de peças fabricadas fora do limite de especificação.

3 Metodologia

3.1 Introdução

O principal objetivo desta pesquisa é avaliar a viabilidade e o desempenho diferentes rebolos na retificação do ferro fundido branco alto cromo. Para atingir este objetivo, ensaios de retificação tangencial foram realizados. Este capítulo aborda as condições em que os ensaios foram realizados, a máquina-ferramenta utilizada, o critério de seleção dos rebolos, a definição do fluido de corte, a definição de corpos-de-prova, a caracterização do material usinado, a análise da rugosidade e a capacidade real do processo. O capítulo também descreve sobre o planejamento experimental e os tipos de análises realizadas.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Manufatura, no Núcleo de Tecnologia Industrial (NTI), da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

3.2 Máquina-Ferramenta

Os experimentos foram realizados em uma retificadora FerdiMat, modelo TA31, conforme a figura 15. A máquina-ferramenta apresenta as seguintes características: rotação no eixo do rebole de 3.200 rpm com uma potência de 1,5 kW. O comprimento e largura máxima retificável são de 300 mm e 220 mm, respectivamente. A divisão do avanço transversal e vertical é de 0,02 mm e 0,005 mm, respectivamente. As dimensões máximas do rebole são $\varnothing 203 \times 31,7 \times 19$ mm, (diâmetro externo, diâmetro do furo e largura do rebole). A placa magnética possui comprimento e largura de 254 e 127 mm. A massa admissível sobre a mesa magnética é 40 kg. A máquina-ferramenta conta também com um sistema de bombeamento de fluido de corte, o qual é fundamental durante o processo de retificação.



Figura 15: Retificadora FerdMat, modelo TA31 utilizada nos experimentos.

3.3 Manutenção na Máquina-Ferramenta

Antes da realização dos experimentos desta pesquisa, a retificadora FerdMat, modelo TA31, apresentava alguns problemas, os quais impediam o funcionamento adequado. Esses problemas eram de ordem elétrica, mecânica e geométrica da máquina-ferramenta. A figura 16 mostra um diagrama com os detalhes a respeito dos problemas técnicos.

O problema elétrico estava relacionado ao acionamento do eixo-árvore e do movimento de avanço vertical. Apesar de a máquina-ferramenta estar adequadamente ligada à rede elétrica, os referidos movimentos não eram realizados ao acionar a botoeira. A metodologia de solução envolve a análise do circuito e teste dos componentes por um técnico especializado do setor de manutenção da UFRN.

Os problemas mecânicos estavam relacionados ao elevado carregamento do acionamento dos eixos horizontal e transversal, além da oscilação da mesa em um determinado ponto do curso. Com o auxílio do técnico do laboratório, o sistema de acionamento mecânico da mesa foi desmontado para análise das causas das avarias mencionadas.

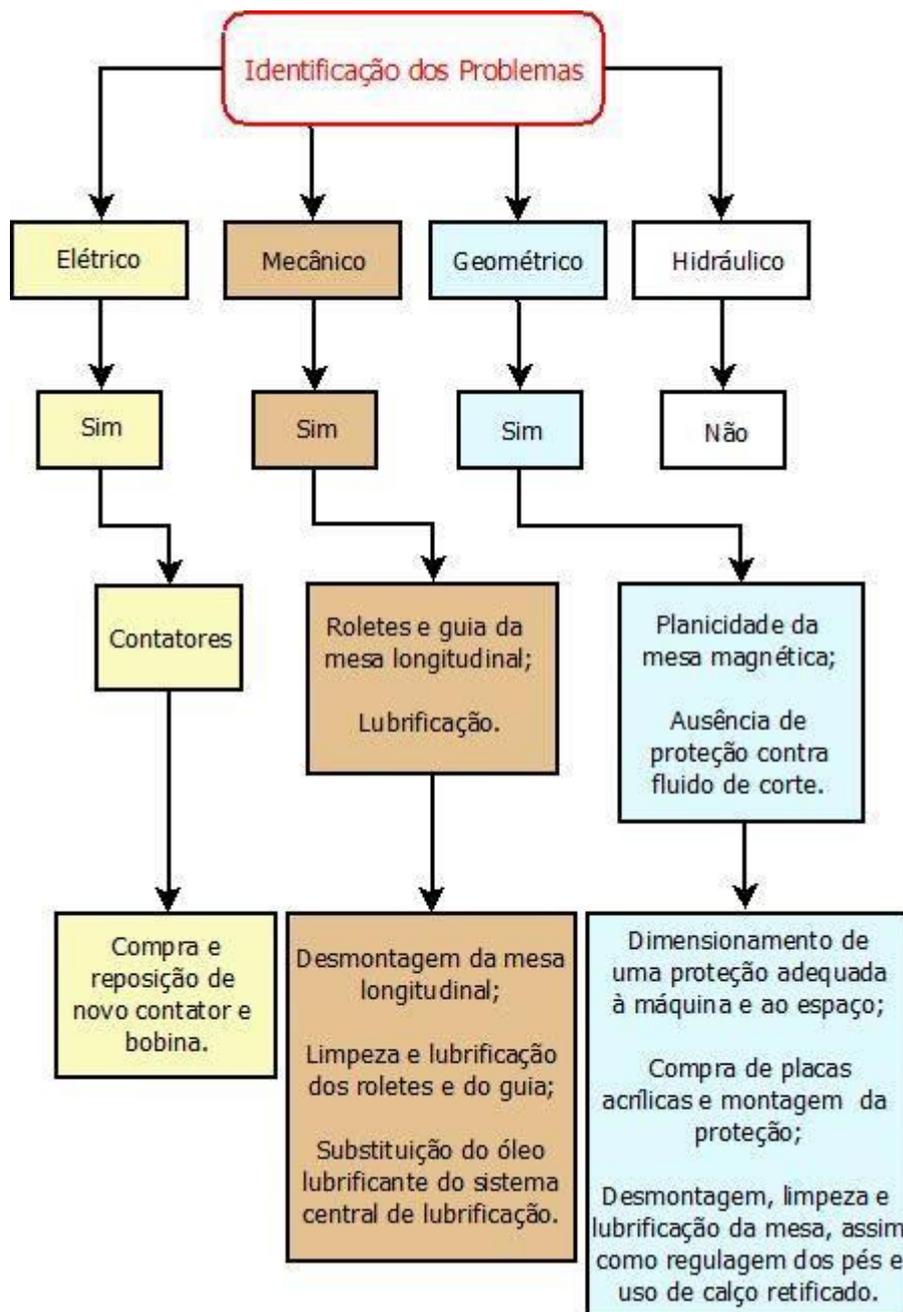


Figura 16: Fluxograma de manutenção da máquina-ferramenta.

Os problemas geométricos estavam relacionados com a planicidade das superfícies retificadas, além do vazamento do fluido de corte. A planicidade da mesa foi analisada, assim como a regulagem dos pés de apoio da máquina-ferramenta. Estudou-se, também, uma maneira de controlar o vazamento do fluido de corte.

3.4 Rebolos

As especificações dos rebolos são elementos fundamentais para o experimento, pois ela tem influência direta na rugosidade da peça, na afinidade com a peça e no desgaste. Para o experimento, foram selecionados quatro (4) rebolos, sendo dois tipos de grãos abrasivos diferentes e duas granulometria diferentes. O objetivo é avaliar o desempenho dos tipos de materiais abrasivos e tamanho de grão.

As características dos rebolos utilizados nos experimentos estão descritas na tabela 7.

Tabela 7: Características dos rebolos utilizados nos experimentos.

Propriedades Ferramenta	Abrasivo	Dimensões (diâmetro X furo X espessura)	Grão	Dureza	Estrutura	Liga
Rebolo	Al ₂ O ₃	200 X 19 X 30,1 (mm)	120	J	8	Vitrificado
Rebolo			80			
Rebolo	SiC		120	K	5	
Rebolo			80			

A decisão de utilizar rebolos com abrasivos de Óxido de Alumínio Branco (Al₂O₃) e de Carboneto de Silício Verde (SiC) está associada à máxima rotação e, consecutivamente, a velocidade de corte disponível no equipamento. Os rebolos com grãos abrasivos de Nitreto Cúbico de Boro e de Diamante Policristalino usualmente são utilizados para velocidades superiores a 40 m/s. Seguindo a ordem do esquema da tabela 7, a figura 17 apresenta os rebolos, fornecidos pela empresa Abrasipa, para a realização dos experimentos.



Figura 17: Rebolos a serem utilizados nos experimentos.

3.5 Geometria do Corpo-de-Prova

A geometria do corpo-de-prova, conforme a figura 18, proporciona uma grande área na seção transversal que permite uma adequada fixação do corpo-de-prova na mesa magnética. Esse ponto é fundamental, pois o corpo-de-prova deve permanecer fixo à mesa magnética com elevada rigidez para que não ocorram movimentos relativos durante a retificação e não comprometa a integridade superficial do corpo-de-prova. Além disso, a questão da segurança também exige uma fixação rígida.

Com o objetivo de minimizar os choques na entrada e saída do rebolo, foram confeccionados chanfros no diâmetro externo e interno do corpo-de-prova (dimensão de $3 \times 45^\circ$). A geometria do corpo-de-prova utilizada neste trabalho é similar ao do corpo-de-prova utilizado por Boing (2010).

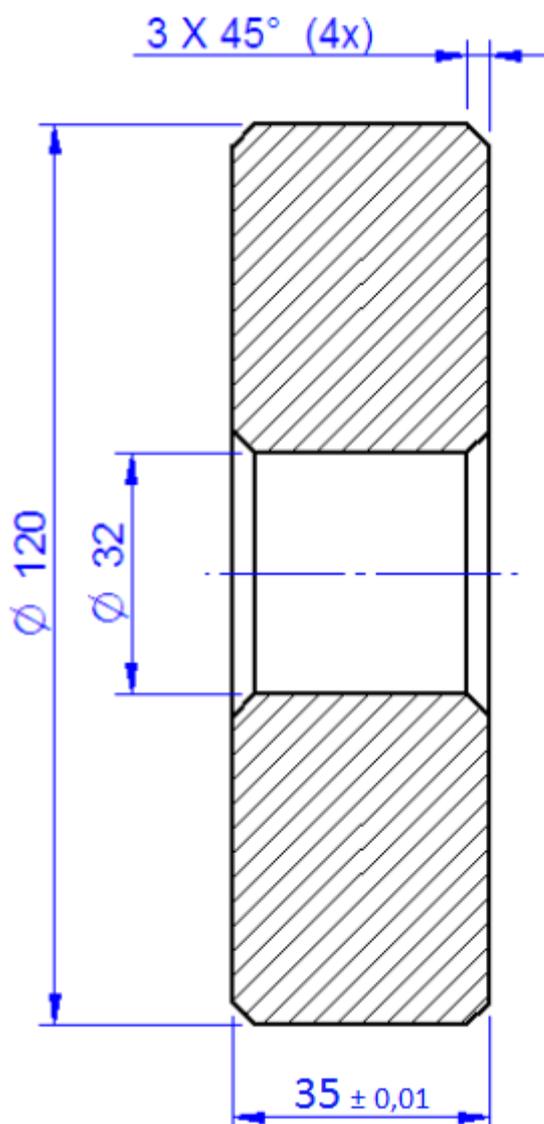


Figura 18: Geometria do corpo-de-prova.
Fonte: Adaptado de Boing (2010).

3.6 Fixação da Peça e do Rebolo na Máquina

A fixação da peça é realizada com o auxílio de uma placa magnética. A fixação ocorre com o acionamento manual de um parafuso na lateral, da mesa magnética. A mesa magnética é composta por um conjunto interno de ímãs permanentes, responsáveis pela criação do campo magnético. A figura 19 mostra a placa magnética de fixação.

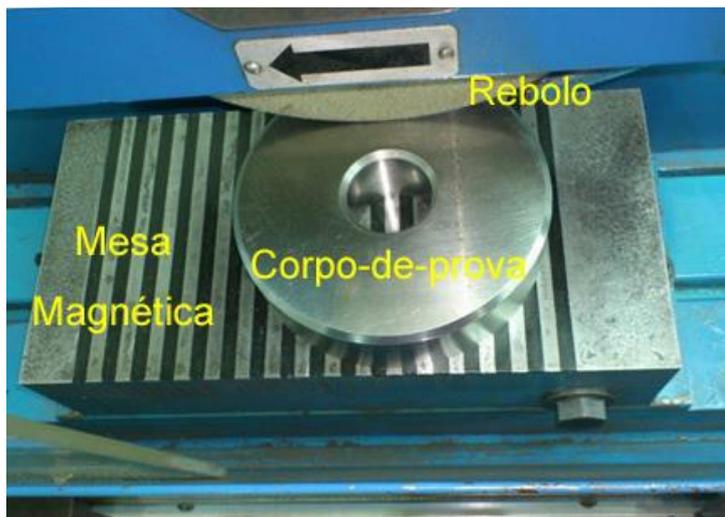


Figura 19: Placa magnética de fixação.

A fixação do rebolo na máquina é através de um flange roscado. Por medida de segurança, há também uma porca de segurança no sistema de fixação. A troca do rebolo se faz com a chave de serviço, conforme a figura 20.



Figura 20: Troca do rebolo. Fixação através de um flange roscado.

3.7 Caracterização do Material Usinado

Os corpos-de-prova foram obtidos a partir de um material fundido. Para o processo utilizaram-se moldes de areia verde. A etapa de fundição foi realizada na Fundição de SOCIESC (Sociedade Educacional de Santa Catarina). Com o objetivo de conhecer detalhadamente as características microestruturais do corpo-de-prova,

ensaios de dureza e de micrografia foram realizados. A figura 21 mostra a micrografia do material.

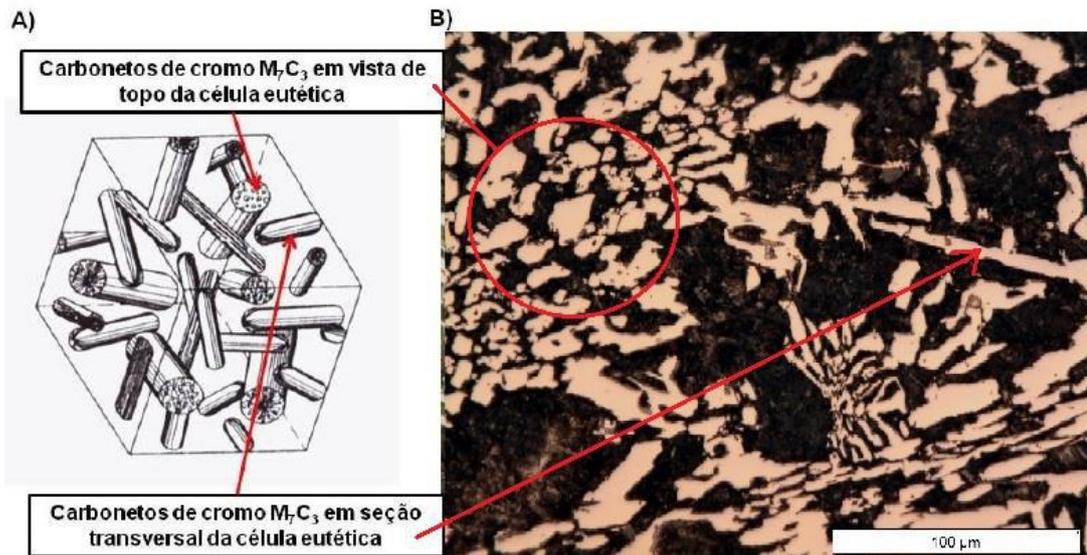


Figura 21: a) esquema de crescimento do composto eutético das ligas de ferro fundido branco de alto cromo

b) micrografia do ferro fundido alto cromo.

Fonte: Adaptado de Laird, Gundlach e Rohrig, 2000 apud Boing 2010.

Utilizou microdurômetro PANTEC modelo MV-1000B para os ensaios de microdureza nos corpos-de-prova. As endentações foram realizadas com uma carga de 0,5 kg durante 15 segundos. Foram realizadas 10 indentações, das quais 5 foram realizadas nos carbonetos e outras 5 na matriz do material. Os resultados foram os seguintes: dureza média de 1362 HV e desvio padrão de 109 HV para os carbonetos; e para a matriz dureza média de 501 HV com desvio padrão de 8 HV. As medições foram realizadas no Laboratório de Ensaio e Desenvolvimento de Produtos do Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE

Segundo Poulachon *et al.* (2003) *apud* Boing (2010), a microestrutura do material é um fator que está relacionado com a sua usinabilidade, principalmente quando se tem a presença de partículas duras. A diferença média entre as fases constituintes do ferro fundido branco (matriz e carbonetos) de 861 HV é um fator que dificulta a usinagem.

3.8 Análise do Processo

Antes do início de cada ensaio, é necessário que seja feito a dressagem do rebolo. O processo de dressar o rebolo é uma variável que possui grande influência nos resultados de saída, como rugosidade e dimensão nominal. Desse modo, os parâmetros de dressagem foram iguais para todos os rebolos. Foram 30 passes com uma profundidade de 20 μm .

Durante os ensaios de retificação, duas variáveis foram monitoradas: a rugosidade da superfície usinada e a dimensão nominal. A rugosidade média (R_a) teve como limite superior o valor de 0,8 μm , de modo a não ultrapassar a classe N6 da norma NBR 8404/1984 (equivalente à norma ISO 1302 (2002)). Para a dimensão nominal, foi estabelecida uma tolerância de $\pm 0,01$ mm, considerada uma tolerância dimensional estreita. A tolerância dimensional está situada entre IT4 e IT6 e a rugosidade da superfície R_a pode variar de 0,02 a 1,6 μm (MALKIN, 1989). A tabela 8 possui o valor do R_a para o processo de retificação tangencial.

Tabela 8: Acabamento superficial para diferentes tipos de processo de usinagem.
Fonte: Adaptado de Janeiro, 2013.

ACABAMENTOS SUPERFICIAIS												
SÍMBOLOS DE RUGOSIDADE												
TIPOS DE USINAGEM (ISO 1302)												
Tipo de usinagem	Grossoiro			Médio			Fino			Finissimo		
Símbolo	N12, N11, N10			N9, N8, N7			N6, N5, N4			N3, N2, N1		
	(▽)	▽		(▽▽)	▽		(▽▽▽)	▽		(▽▽▽▽)	▽	
Grupos de rugosidade	N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1
R_a em micron	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025
Retifica vertical							██████████	██████████	██████████			
Retifica tangencial							██████████	██████████	██████████	██████████		
Brunidura				██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████			
Super retifica								██████████	██████████	██████████		
Esmerilhamento						██████████	██████████	██████████	██████████			
Polimento										██████████	██████████	

Rugosidade para esboço
 Rugosidade obtida na prática normal
 Rugosidade obtida com cuidados especiais

Para analisar a rugosidade, utilizou-se um rugosímetro portátil da marca Taylor-Hobson, modelo Surtronic 3, ajustado para medir um comprimento de amostragem (λ_c) de 0,8 mm. Foram realizadas medições em dois pontos do corpo-de-prova com 5 réplicas em cada ponto. As medições foram realizadas sobre a superfície usinada na direção transversal às marcas deixadas pelo rebolo. A calibração era verificada diariamente com o auxílio de um padrão de calibração. A figura 22 mostra como foi realizado o posicionamento do rugosímetro para as medições.

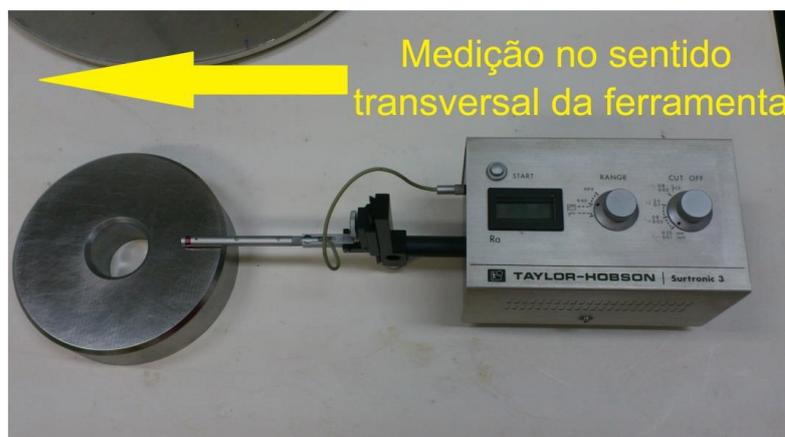


Figura 22: Avaliação da rugosidade durante o processo.

A dimensão nominal do corpo-de-prova foi medida em quatro pontos pré-determinados. Esses pontos podem ser vistos na figura 23. Vale ressaltar que se mantinha sempre uma referência fixa na mesa da máquina, conforme mostrado na figura 24, com o objetivo de entender sobre as eventuais variações no processo.

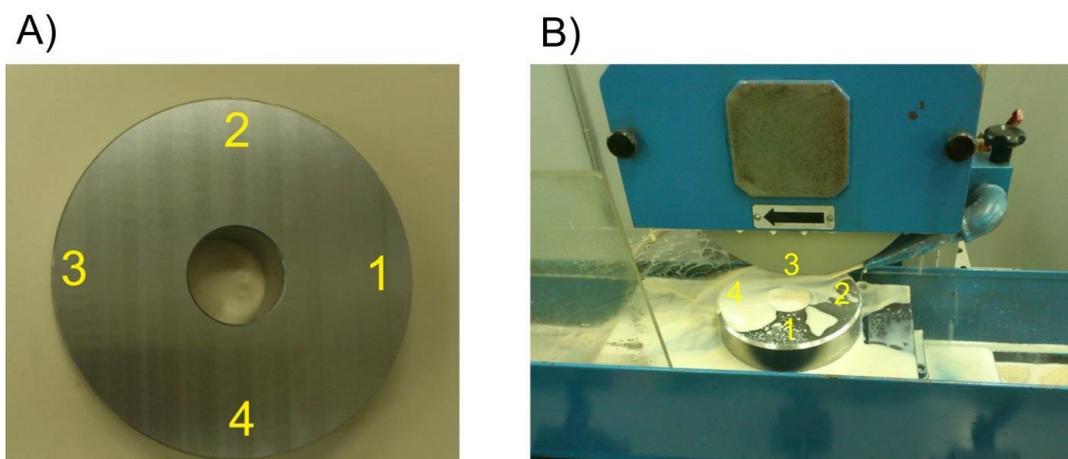


Figura 23: Numeração dos pontos do corpo-de-prova.

A medição da dimensão nominal da peça era verificada em cada ensaio e em cada um dos pontos mencionados anteriormente. A espessura do corpo-de-prova era medida por um micrômetro da marca Mitutoyo, modelo IP 65 com resolução de 0,001 mm e com capacidade de medição de 25 a 50 mm, como mostra a figura 24.



Figura 24: Medição da espessura do corpo-de-prova com o micrômetro Mitutoyo IP 65.

Para cálculo da capacidade real de processo, utilizou-se uma tolerância dimensional de $\pm 0,01$ mm. Com os valores da dimensão nominal a cada superfície retificada e com o valor da tolerância dimensional estabelecida, a capacidade real de processo pode ser calculada. Utilizou-se o *software* Minitab v17. Essa ferramenta foi utilizada no cálculo da capacidade real de processo e na análise da rugosidade.

3.9 Planejamento Experimental

Para a análise do processo, alguns procedimentos foram adotados. Inicialmente o rebolo é dressado através de 30 passes com uma profundidade de 20 μm em cada passe. Em seguida se dá início a retificação do ferro fundido branco alto cromo. Em cada superfície retificada é removida 50 μm do material. Limitou-se até sete o número de superfícies retificadas ou até o momento em que a rugosidade (R_a) atingisse um valor igual ou superior a 0,80 μm ou se a dimensão nominal excedesse a tolerância estabelecida de valor igual a $\pm 0,01$ mm. A cada superfície retificada, foi feita a medição da rugosidade (R_a) e da dimensão nominal.

As variáveis de resposta do planejamento experimental foram a rugosidade média e a capacidade real de processo. Para executar essa avaliação, aplicou-se um

planejamento fatorial 2^2 (duas variáveis em dois níveis) com 2 réplicas, apresentado na tabela 9.

Tabela 9: Planejamento fatorial 2^2 .

Fator	Nível Baixo	Nível Alto
Abrasivo	Al_2O_3	SiC
Granulometria	80	120

Os parâmetros de usinagem foram mantidos constantes durante o experimento. Os referidos parâmetros estão mencionados na tabela 9.

Tabela 10: Parâmetros de usinagem dos experimentos.

Parâmetro	Valor
Velocidade de corte (v_c)	33 m/s
Profundidade de usinagem (a_p)	0,050 mm
Velocidade de avanço da mesa longitudinal (v_f)	250 mm/min
Avanço transversal da mesa	12 mm

O eixo-árvore da retificadora tem uma rotação fixa de 3.200 rpm e o diâmetro externo inicial do rebolo tem 200 mm. Todos os ensaios experimentais foram realizados com 4 passes e da seguinte maneira:

- 1º passe: $a_p = 0,015$ mm.
- 2º passe: $a_p = 0,015$ mm.
- 3º passe: $a_p = 0,010$ mm.
- 4º passe: $a_p = 0,010$ mm.

Os valores de (v_f) e do avanço transversal da mesa foram definidos com o objetivo de diminuir o tempo de usinagem e de minimizar o desgaste do rebolo, tendo em vista que a retificação é uma atividade bastante lenta em virtude da baixa taxa de remoção de material.

Com o objetivo de facilitar a compreensão do planejamento experimental, elaborou-se o fluxograma mostrado na figura 25.

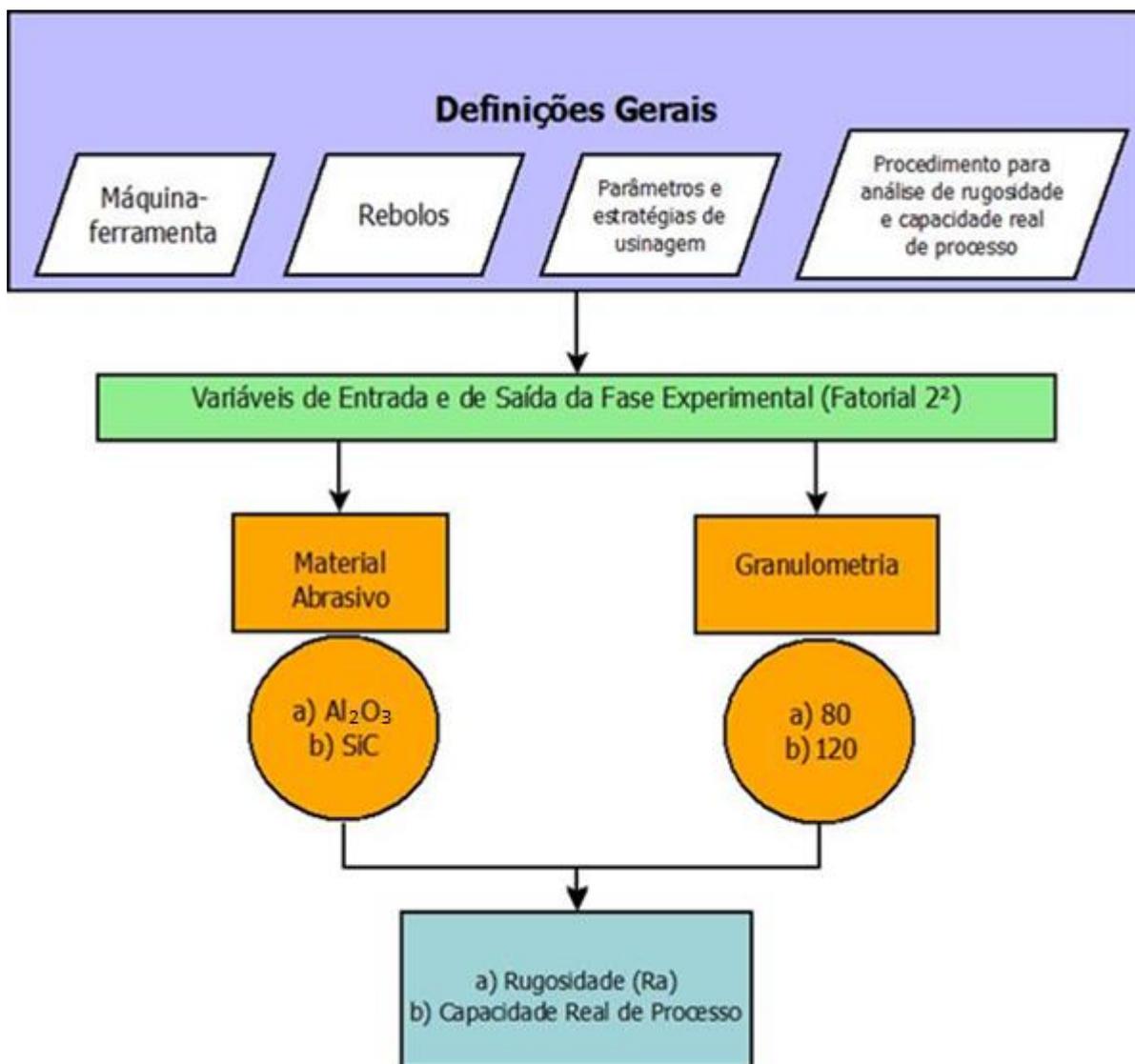


Figura 25: Fluxograma do planejamento experimental.

4 Resultados e Discussões

4.1 Introdução

Neste capítulo serão descritos os resultados dos ensaios de retificação com rebolos convencionais, citados no item 3.4, do ferro fundido branco alto cromo. As análises compreendem a integridade superficial e a capacidade real de processo.

4.2 Manutenção da Máquina-Ferramenta

Após a identificação de uma série de limitações, apresentadas no item 3.3, a máquina-ferramenta passou por manutenção corretiva e, posteriormente, mostrou-se capaz de realizar operações de retificação, conforme as necessidades do processo.

O processo de manutenção corretiva foi dividido em três etapas: elétrica, mecânica e geométrica. Essas etapas são explicadas a seguir.

A manutenção elétrica consistiu na análise do circuito elétrico e dos componentes pelo técnico especializado da universidade. O técnico identificou o problema elétrico: dois contatores e uma bobina com defeitos. O contator é um tipo de relé especial que pode lidar com altas cargas que estão além de um relé de controle (PETRUZELLA, 2014).

Comprou-se, com recursos do projeto PRH-14, novos contatores e uma bobina necessários para a manutenção. Após a compra do contator com base nas especificações dadas pelo técnico eletromecânico, o mesmo substituiu o contator defeituoso pelo novo contator. A figura 26 mostra os contatores que estão localizados dentro da caixa de energia da máquina-ferramenta.

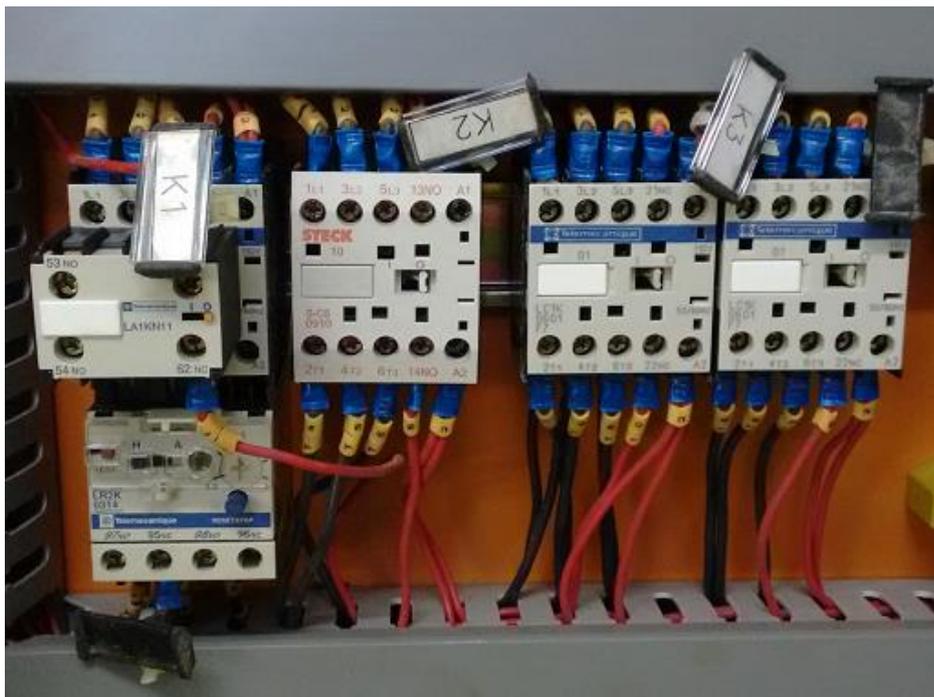


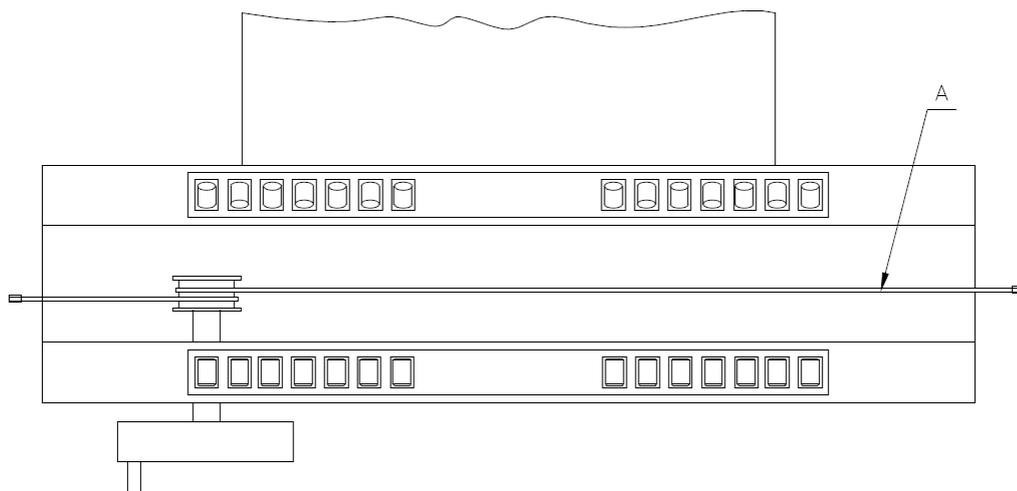
Figura 26: Contatores da retificadora Ferdimat, modelo TA31.

Com a finalidade de comprovar o funcionamento da máquina-ferramenta conforme as suas expectativas, realizou-se testes de acionamento dos comandos elétricos e retificação de peças no período de uma semana.

Do ponto de vista da manutenção corretiva mecânica, o fuso da mesa transversal apresentava problemas de lubrificação. Após a desmontagem, conforme descrito no item 3.3, um processo de limpeza de guias com solvente da marca Duplicopy/Eurostar, modelo DUPLISOLV 1207 foi realizado. Uma lubrificação do sistema com óleo VG-68 (o qual também necessitou ser comprado) foi feita. Verificou-se que o problema da mesa continuava quanto ao aspecto do movimento longitudinal. Em uma segunda análise, verificou-se que o cabo de aço (ver figura 27), que transmite o movimento longitudinal à mesa, estava desgastado. Na figura 27, o cabo de aço é representado pela letra “A”. Verificou-se um desgaste em um trecho do cabo de aço. A parte do cabo de aço que é acoplada ao eixo do volante que transmite o movimento longitudinal à mesa estava desgastada. Inverteu-se a posição do cabo de aço, de modo que a parte não danificada fizesse o contato com o eixo do volante. Após o reparo no cabo de aço, não se constatou mais esse tipo de problema. Testes de funcionamento também foram realizados com o objetivo de entender o efeito da nova

lubrificação. Após duas horas de trabalho, os esforços para movimentação foram reduzidos a patamares aceitáveis para um turno de trabalho.

A figura 27 mostra a posição dos roletes e a montagem do cabo de aço no sistema de acionamento da mesa da retificadora.



*Figura 27: Vista superior da mesa transversal.
Fonte: Ferdimat, 2000.*

Ainda do ponto de vista de manutenção corretiva mecânica, o percurso da mesa longitudinal apresentava perturbações, as quais provocavam alta interferência nos resultados de rugosidade da superfície retificada. Para solucionar esse problema, desmontou-se a mesa, limpou-se os roletes e o guia, desempenou-se o guia, lubrificou-se ambos e foi feita a montagem de volta.

A manutenção corretiva geométrica corresponde a planicidade da mesa magnética e ao vazamento de fluido. A mesa magnética não estava paralela com o eixo-árvore, ocasionando um problema de planicidade nas peças retificadas. Para solucionar esse problema, retirou-se a placa magnética, fez-se uma limpeza minuciosa com os devidos cuidados e aplicou-se um novo lubrificante na base da placa de fixação magnética. Em seguida, ajustou-se os pés da máquina-ferramenta com o auxílio de um nível de superfície e fez-se o uso de calços retificados para garantir uma diferença milesimal nas extremidades da mesa magnética.

Ainda do ponto de vista de manutenção corretiva geométrica, o design da máquina-ferramenta permitia que houvesse vazamento do fluido de corte quando a máquina-ferramenta estivesse em operação. O fluido de corte atingia a peça com uma certa velocidade, o suficiente para que parte do fluido de corte fosse lançada na vizinhança da máquina-ferramenta. O desperdício do fluido de corte se dava, principalmente, pelas laterais da mesa. Buscou-se uma maneira de reduzir o desperdício de fluido de corte, o qual prejudicava o nível de fluido de corte no tanque reservatório, o ambiente de trabalho e a saúde do operador. Modelou-se uma proteção em polimetil-metacrilato (PMMA), ou acrílico, com a finalidade de reduzir o vazamento do fluido de corte. A figura 28 mostra a proteção acrílica que foi fixada através de parafusos com porcas e cantoneiras de alumínio.

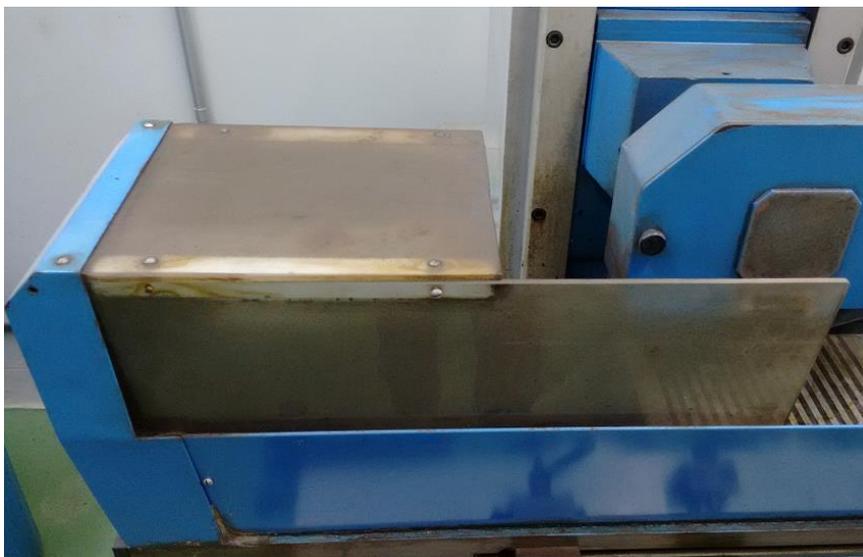


Figura 28: Proteção do fluido de corte com placas de acrílico.

Após a realização das manutenções citadas, os problemas elétricos, mecânicos e geométricos foram sanados. As peças retificadas passaram a possuir um baixo valor de diferença dimensional quando medidas em extremidades opostas. A média da diferença dimensional nas extremidades da mesa magnética é de aproximadamente 5 μm .

4.3 Rugosidade

O comportamento da rugosidade pode ser influenciado por diversos fatores, entre eles a velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade de penetração, vazão do fluido de corte, tipo de rebolo, dressagem do rebolo. Como em todos os ensaios foram mantidos constante todas as variáveis, exceto o tipo de grão abrasivo e a granulometria do rebolo, a rugosidade estará em função dessas duas variáveis.

Os resultados apresentados são referentes ao comportamento da rugosidade média (Ra) ao longo do processo, ou seja, à medida que os rebolos forem sendo desgastados. A figura 29 mostra os valores da rugosidade Ra em função do número de superfícies retificadas da primeira réplica.

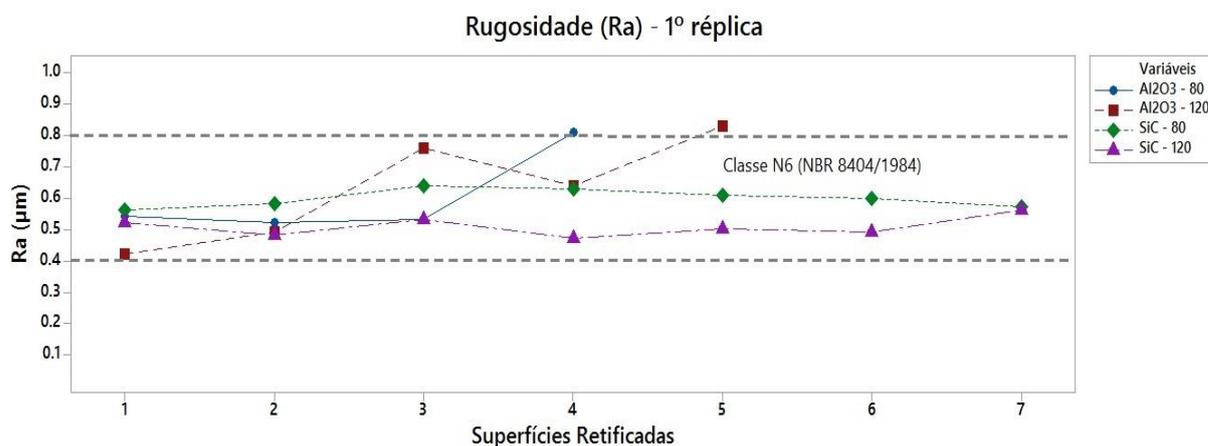


Figura 29: Comportamento da rugosidade ao longo do desgaste do rebolo.

Nota-se que a tendência da rugosidade média (Ra) é aumentar com o incremento do número de superfícies retificadas. A visualização desse efeito é mais clara nas superfícies retificadas pelo rebolo de Al₂O₃. Embora o valor da rugosidade seja menor para os rebolos de Al₂O₃ na retificação da primeira superfície, as superfícies retificadas terão um aumento acentuado no valor do Ra, necessitando um novo processo de dressagem. Lembrando que todos os valores de rugosidade obtidos até a terceira superfície retificada pertencem a classe N6, ou seja, não há diferença entre esses valores de rugosidade para a norma NBR 8404/1984. Os rebolos de SiC possuem, nas primeiras superfícies, o valor do Ra um pouco maior, mas esse valor é praticamente constante à medida em que o rebolo de SiC for retificando mais superfícies. Entre a quarta e quinta superfícies retificadas pelos rebolos de Al₂O₃, o

uso do rebolo Al_2O_3 já estava inadequado ao objetivo do experimento, pois superou a rugosidade média de $0,80 \mu\text{m}$, pré-estabelecida como o fim do ensaio. Os resultados descritos nas figuras 29 e 30 apontam os valores da rugosidade Ra para o rebolo de SiC até a sétima superfície retificada. Contudo, em experimentos preliminares, foram realizados ensaios com mais de 10 superfícies retificadas e o Ra se manteve ainda abaixo de $0,80 \mu\text{m}$.

A figura 30 apresenta os valores da rugosidade Ra em função do número de superfícies retificadas da segunda réplica.

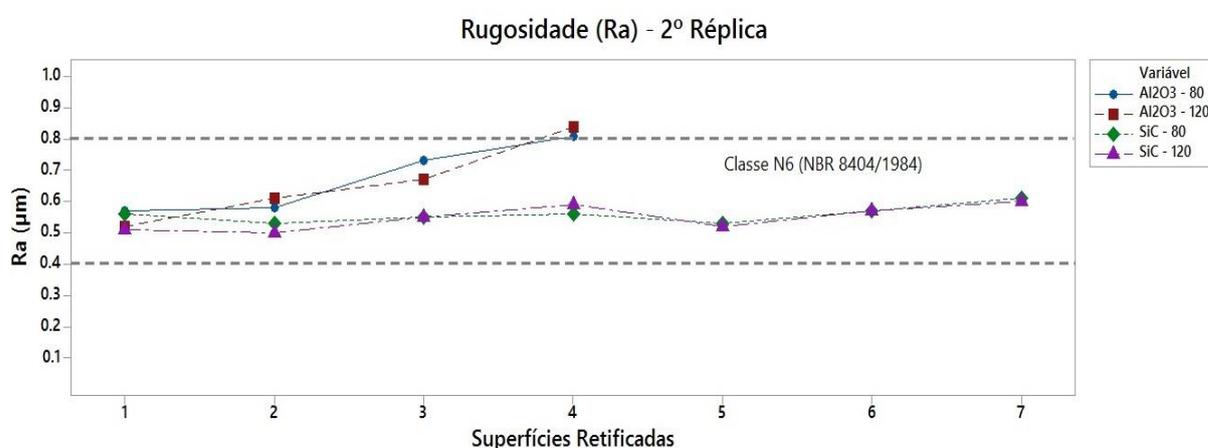


Figura 30: Comportamento da rugosidade ao longo do desgaste do rebolo.

Esses diferentes valores de Ra quanto ao tipo de grão abrasivo podem ser explicados pelos seus diferentes valores de friabilidade, relação G e dureza. Nussbaum (1988) afirma que a friabilidade do SiC é maior do que a do Al_2O_3 . Dessa maneira, espera-se que os rebolos de SiC tenha um processo de autoafiação mais intenso que os rebolos de Al_2O_3 , explicando um maior número de superfícies retificadas sem a necessidade do dressamento. Como a relação G, definida como a razão entre o volume de material removido da peça e o volume do rebolo desgastado (FUJITA *et al.*, 2006), dos rebolos de SiC são maiores comparado aos rebolos de Al_2O_3 . Os rebolos de SiC sofrem um menor desgaste radial e por consequência podem retificar um maior número de superfícies, conforme afirmam Taborga, Taborga e Weingaertner (2003). Outra explicação pode ser dada por Klocke (2009), no qual é discutido sobre a aplicação dos diferentes tipos de material abrasivo dos rebolos. Os rebolos de SiC tem uma aplicação mais adequada ao ferro fundido branco alto cromo do que os rebolos de Al_2O_3 . Enquanto os rebolos de SiC são indicados para ferro

fundido cinzento, metal duro, vidro, os rebolos de Al_2O_3 são indicados para materiais que possuem uma dureza menor, como ligas sem têmperas e aços temperados e revenidos com dureza de até 63 HRC.

Uma análise estatística dos resultados de rugosidade permite determinar a influência das variáveis de entrada nos resultados. As figuras 31 a 33 mostram a influência das variáveis de entrada (material abrasivo e tamanho de grão) em relação a rugosidade Ra.

A figura 31 apresenta resultados esperados de acordo com a literatura apresentada nesta pesquisa. Grão mais fino (120) proporcionando menores valores de rugosidade Ra do que o mais grosso (80) e o material abrasivo SiC proporcionando menores valores do que o do Al_2O_3 .

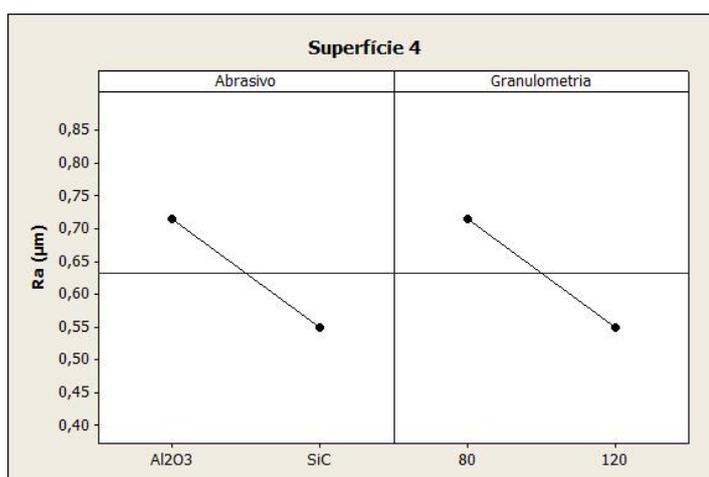


Figura 31: Influência do grão abrasivo e da granulometria no valor do Ra – Superfície 4.

Observando-se a inclinação das duas retas da figura 32, afirma-se que a influência do material abrasivo é maior do que a influência do tamanho de grão quanto ao valor da rugosidade. O desgaste acelerado nos rebolos de Al_2O_3 fez com que o valor da rugosidade Ra extrapolasse o valor limite preestabelecido de Ra, 0,80 µm. Após a quinta superfície retificada, os rebolos de Al_2O_3 necessitaram de uma dressagem.

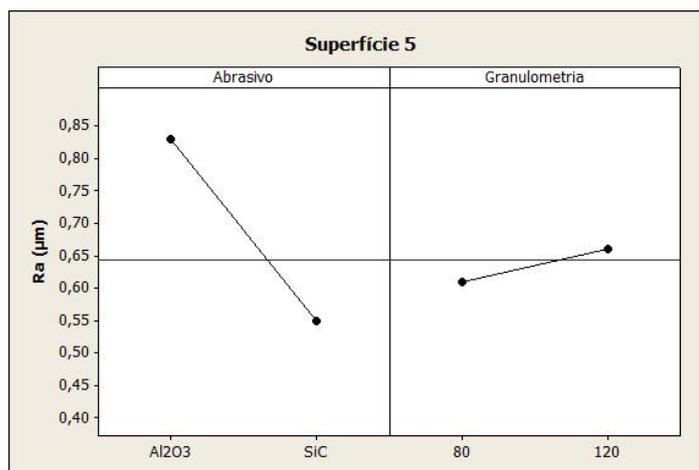


Figura 32: Influência do grão abrasivo e da granulometria no valor do Ra – Superfície 5.

Na superfície 6, observa-se que não há mais resultados de rugosidades obtidos do material Al₂O₃, em virtude dos seus valores Ra ultrapassarem o valor de 0,80 µm na superfície 5. Embora os dois valores de Ra da figura 33 pertençam a mesma classe (N6), há uma tendência do tamanho de grão 120 proporcionar menores valores de rugosidade do que o do 80.

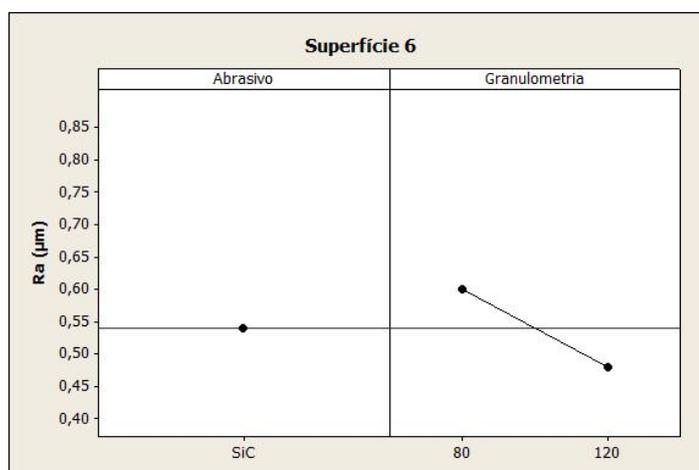


Figura 33: Influência do grão abrasivo e da granulometria no valor do Ra – Superfície 6.

4.4 Capacidade Real do Processo

Com a finalidade de verificar as capacidades reais de processo obtidas nos experimentos, determinou-se os valores de C_p e C_{pk} . Esses são os principais indicadores utilizados pela indústria. As figuras 34 a 37 mostram uma distribuição normal no intervalo de confiança de 95% dos valores da espessura do corpo-de-prova retificado. Os indicadores referem-se a espessura do corpo-de-prova e o limite de especificação é $\pm 10 \mu\text{m}$.

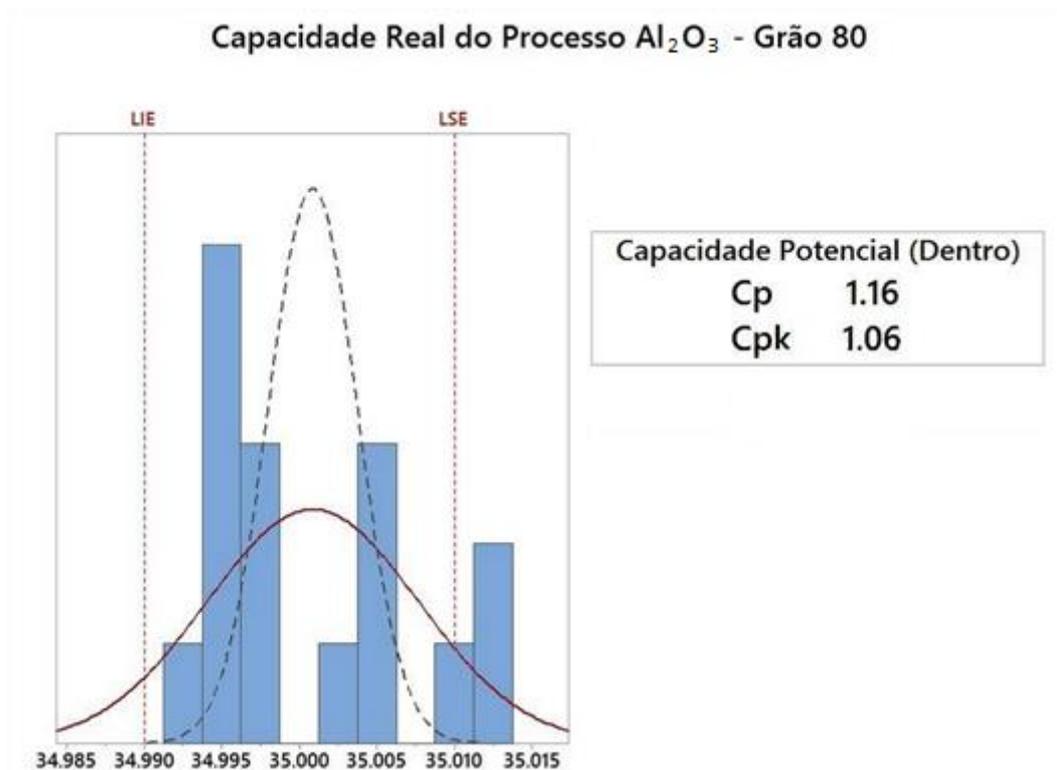


Figura 34: Capacidade Real do Processo para Al_2O_3 de grão 80.

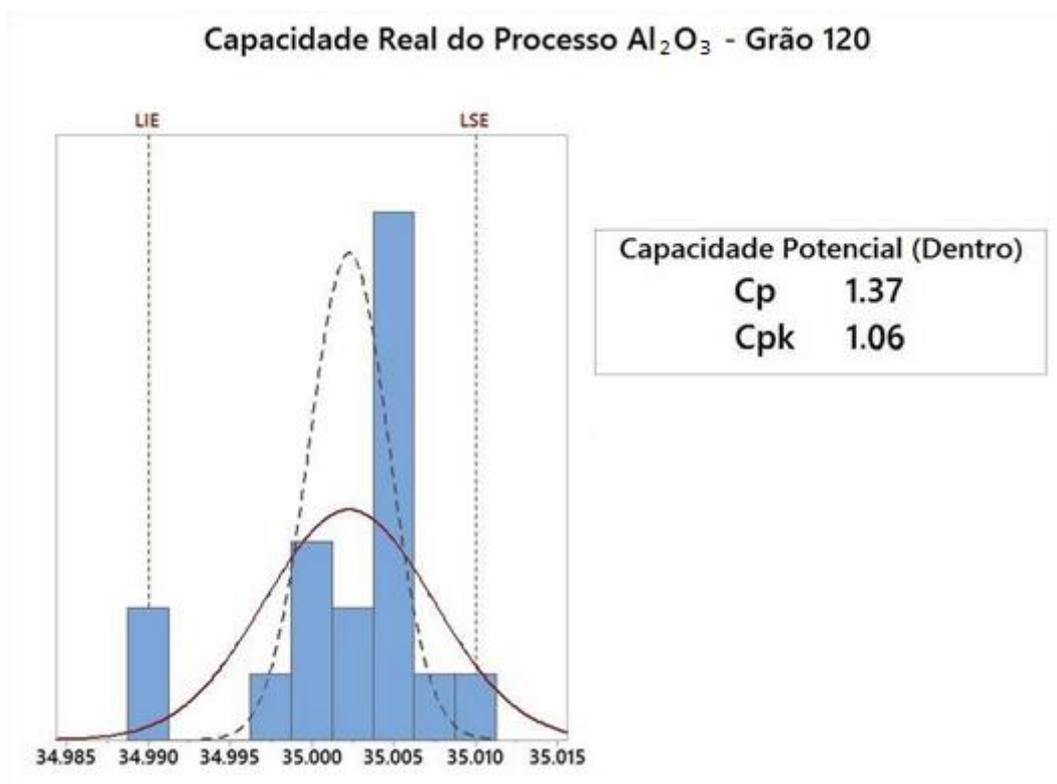


Figura 35: Capacidade Real do Processo para Al_2O_3 de grão 120.

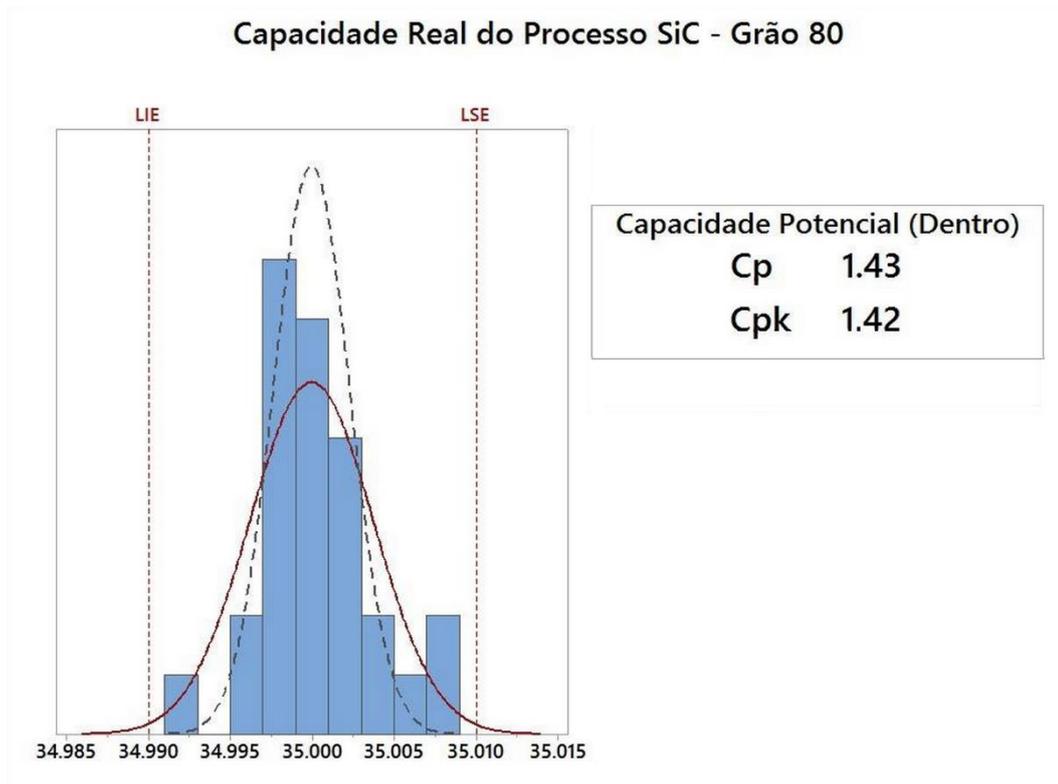


Figura 36: Capacidade Real do Processo para SiC de grão 80.

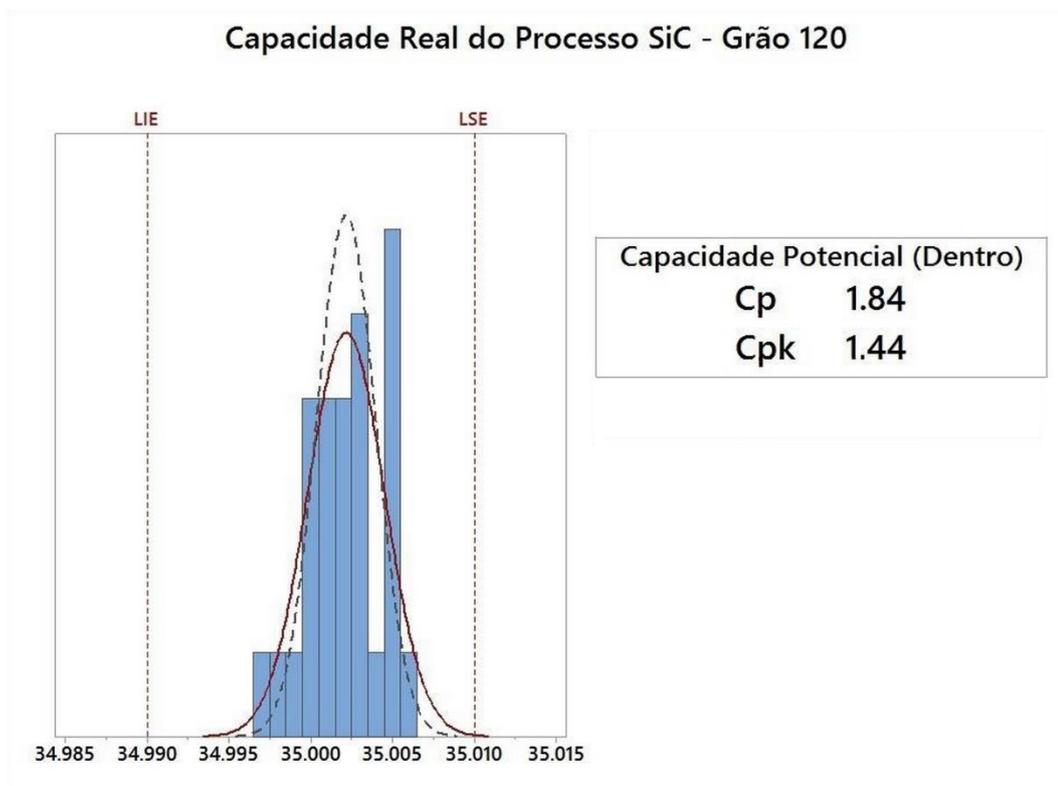


Figura 37: Capacidade Real do Processo para SiC de grão 120.

Extraindo apenas os valores de C_p e C_{pk} dos ensaios realizados, obteve-se os valores da tabela 11.

Tabela 11: Valores de C_p e C_{pk} dos experimentos.

Índice de Capacidade Rebolo	C_p	C_{pk}
Al ₂ O ₃ – Grão 80	1,16	1,06
Al ₂ O ₃ – Grão 120	1,37	1,06
SiC – Grão 80	1,43	1,42
SiC – Grão 120	1,84	1,44

Observando-se os valores dos índices C_p e C_{pk} das duas amostras quanto ao aspecto dimensional, verificou-se que o material SiC apresenta um melhor desempenho quando comparado ao material. Utilizando o material SiC, em nenhum momento os valores dimensionais extrapolaram os limites de especificação, ao contrário do material Al₂O₃. Obter resultados de saída dentro dos limites de especificação é primordial para atingir valores de C_{pk} igual a 1,33, valor considerado um valor de um processo capaz.

Os valores de C_p indicaram que houve uma variabilidade, considerada de um processo aceitável, no aspecto dimensional quando se utilizou o material Al₂O₃, em virtude do C_p obtido igual a 1,16. Quanto ao material SiC, os valores de C_p apresentaram uma baixa variabilidade. Os valores de C_p são, também, influenciados pelo tamanho de grão do rebolo. Obteve-se maiores valores de C_p para grãos mais finos, como mostra a tabela 11.

O C_{pk} nos indicou que a média dos valores dimensionais obtidos após a retificação do ferro fundido branco não está no centro para o material Al₂O₃ e está em uma região bem próxima do centro para o material SiC. Houve uma pequena influência do número de grão quanto ao valor do C_{pk} .

Classificando os processos de acordo com Montgomery (2004), pode-se dizer que o material Al₂O₃ comportou-se como um processo aceitável e o material SiC comportou-se como um processo potencialmente capaz. Houve uma menor influência

do número de grão quanto a classificação do processo, sendo o material abrasivo o maior fator de influência.

O número de peças defeituosas quanto ao aspecto dimensional pode ser estimado com base em Miranda (2005). Os números de peças defeituosas apresentadas serão para cada 1 milhão de peças produzidas. Calculando o número de peças defeituosas quanto ao aspecto dimensional, tendo como base a tabela 5 e os experimentos realizados, obteve-se os seguintes números:

- Al_2O_3 - Grão 80 → 1398 peças defeituosas.
- Al_2O_3 - Grão 120 → 1350 peças defeituosas.
- SiC - Grão 80 → 27 peças defeituosas.
- SiC - Grão 120 → 13 peças defeituosas.

Com base nos valores de peças defeituosas para cada tipo de rebolo, observa-se que o material abrasivo tem, novamente, maior influência na capacidade real de processo quando comparado com o tamanho do grão.

Para obter os valores de peças defeituosas para cada tipo de rebolo, aproximou-se os valores de C_p e C_{pk} para valores ligeiramente inferiores que estão contidos na tabela 5.

5 Conclusões

Fundamentado nos resultados obtidos durante os experimentos de retificação do ferro fundido branco alto cromo, utilizando rebolos com material abrasivo composto de Al_2O_3 (grãos 80 e 120) e rebolos com material abrasivo composto de SiC (grãos 80 e 120), apontam-se as seguintes conclusões:

- a) O material do rebolo SiC proporcionou a maior área retificada.
- b) O material do rebolo SiC proporcionou os menores valores de rugosidade ao longo da vida.
- c) Para um mesmo tamanho de grão, os rebolos baseados em SiC proporcionou maior índice de capacidade real de processo.
- d) O tamanho de grão e o material abrasivo utilizados nos experimentos influenciam na capacidade real de processo.
- e) O material abrasivo possui maior influência nos resultados de rugosidade e capacidade real de processo do que o tamanho do grão do rebolo.
- f) Sugere-se as seguintes especificações do rebolo para se obter os menores valores de rugosidade e os maiores valores de capacidade real de processo. Material abrasivo sendo o carboneto de silício (SiC) e o tamanho de grão 120.

6 Referências Bibliográficas

[1] ALVES, M. S. C.; NETO, L. D.; BIANCHI E. C.; AGUIAR, P. R.; FUJITA, H.; SILVA, E. J. **Retificação da alumina com rebolo diamantado utilizando-se diferentes métodos de lubri-refrigeração**. v. 56, no. 338, São Paulo, 2010.

[2] AMORIM JÚNIOR, D. S. **Metodologia para a redução de custos na perfuração de poços de petróleo e gás**. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2008.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8404:1984; **Indicações do estado de superfícies em desenhos técnicos. Procedimentos**. Rio de Janeiro, ABNT. 1984.

[4] BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; PIUBELI, B. A. **Aplicação e utilização dos fluidos de corte nos processos de retificação**. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2003.

[5] BOING, D. **Análise da vida de ferramentas de PcBN no torneamento de ferro fundido branco com alto teor de cromo**. Dissertação (Mestrado), Instituto Superior Tupy, Joinville, 2010.

[6] CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. ampl. e rev. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

[7] ÇETINKAYA, C. An Investigation of the wear behaviours of white cast irons under different compositions. **Materials & Design**. v. 27, p. 437-445, 2006.

[8] CHEN, X.; ROWE, W. B. Analysis and simulation of the grinding process. Part II: Mechanics of grinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, Research and Application**. Vol. 36, pp.883-896, 1996.

[9] COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

[10] DAMASCENO, R. F. **Análise da influência da profundidade de corte e de diferentes métodos de lubri-refrigeração na retificação plana de aço ABNT 4340**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2010.

[11] DATALYZER: C_p e C_{pk} – "Série: Índices de Capacidade e Performance do Processo". São Paulo, ano 3, n. 33, set. 2006. Disponível em: <<http://www.datalyzercom.br/site/suporte/administrador/info/arquivos/info57/57.html>>. Acesso em: 26 fev. 2015.

[12] DAVIS, J. P. Cast Iron (ASM International). **Materials Park, OH**. 5-8, p. 107-113, 1996.

[13] DEDINI, R. **Otimização de um ciclo de retificação cilíndrica de mergulho de virabrequins na produção**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

[14] DODD J.; PARKS J. L. **Factors affecting the production and performance of thick section high chromium-molybdenum alloy iron castings** (Climax Molybdenum Company), Greenwich, 2, 3 e 6, 2003.

[15] DU, J.; TANG, J.; CHEN, Y. Modeling and experimental study of grinding forces in surface grinding. **Journal of materials processing technology**. v. 209, p. 2847-2854, 2008.

[16] FERDIMAT. **Manual de instruções da retificadora Ferdimat**, modelo TA31. São José dos Campos: 2000. 28p.

[17] FITZPATRICK, M. **Introdução aos processos de usinagem**. 1. ed. São Paulo: AMGH Editora Ltda., 2013.

[18] FUJITA, H.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; SANCHEZ, L. E. A.; SILVA, C. E. Contribuição ao estudo da retificação abrasiva de materiais cerâmicos. **Cerâmica**. v. 52, p. 269-275, 2006.

[19] GARMO, E. P.; BLACK, J. T.; KOHSER, R. A. **Materials and processes in manufacturing**. 6th ed. New York: Mac Millan Publishing Company, 1984.

[20] HOU, Q.; HUANG, Z.; WANG, J. Application of rietveld refinement to investigate the high chromium white cast iron austempered at different temperatures. **Journal of Iron and Steel Research. International**. v. 16, n. 4, p. 33-38, 2009.

[21] INASAKI, I. Grinding of hard material and brittle materials. **Annals of the CIRP**. n. 36, p. 463-471, 1987.

[22] JANEIRO, J. FT22 P- Acabamento de Superfícies. **Portfólio do curso de Téc. Tratamento de metais (Aeronáutica)**. Jan, 2013. Disponível em: <http://elietetratamentodemetais007.blogspot.com.br/2013/01/blog-post_6634.html>. Acesso em: 04 mar. 2015.

[23] JESUS, B. S.; BECKER, A. A.; SEBLEN, V. C. Aplicando os índices de capacidade de processo C_p e C_{pk} em análises tocológicas. **Controle Estatístico do Processo**. p. 64-75, 2010.

[24] KLOCKE, F. **Manufacturing processes 2: grinding, honing and lapping**. 1. ed. Berlim: Springer, 2009.

[25] LAIRD, G.; GUNDLACH, R.; ROHRIG, K. **Abrasion - resistant cast iron handbook**: American Foundry Society, 2000.

[26] LIMA, F. E. **Características do processo de torneamento de materiais endurecidos**. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, 2001.

[27] MACHADO, Á. R. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

[28] MALKIN, S. **Grinding mechanisms, grinding temperatures and thermal damage**. In: MALKIN, S. Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.

[29] MIRANDA, R. G., **Um modelo para a análise da capacidade de processos com ênfase na transformação de dados**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

[30] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. **Estatística aplicada à engenharia**. 2.ed.Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2004

[31] NUSSBAUM, G. C. **Rebolos e abrasivos: tecnologia básica**. 1. ed. São Paulo: Ícone Editora, 1988.

[32] PEREIRA, F. B. **Monitoramento do acabamento superficial da peça através de emissão acústica na retificação centerless de passagem.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São João Del-Rei, São João del-Rei, 2013.

[33] PETRUZELLA, F. D. **Eletrotécnica I.** 1 ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2014.

[34] PLÁCIDO, J.C.R.; PINHO, R. **Apostila de brocas de perfuração de poços de petróleo.** Rio de Janeiro: MSO, 2009.

[35] POULACHON, G.; BANDYOPADHYAY B. P.; JAWAHIR I. S.; PHEULPIN, S.; SEGUIN, E. The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. **International Journal of Machine tools & Manufacture**, v. 43, p. 139-144, 2003.

[36] RASCALHA, A. **Otimização e monitoramento da dressagem no processo de retificação centerless.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São João Del-Rei, 2011.

[37] ROSSI, M. A. **Método prático para otimização do ciclo de retificação transversal de precisão.** Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

[38] ROWE, W. B. **Principles of modern grinding technology.** 1. ed. Oxford: William Andrew, 2009.

[39] SAMULEWSKI, G. **Otimização do processo de retificação de peças prismáticas.** Dissertação (Mestrado), Centro Universitário Positivo, Curitiba, 2006.

[40] SHAW, M. C. **Principles of abrasives processing.** Oxford Science on Advanced Manufacturing, New York, USA, 1996.

[41] SILVEIRA, C. B. C_p e C_{pk} – Índices de capacidade de um processo. **Citisystems**, São Paulo, nov. 2012. Disponível em: <<http://www.citisystems.com.br/cpk-indice-capacidade-performance-processo/>>. Acesso em: 23 jun. 2015.

[42] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II.** 2. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.

[43] SOUZA, A. J. Fundamentos da usinagem de acabamento por abrasão mecânica. **Processos de usinagem II**. Santo Ângelo: Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - URI, 2007.

[44] TABORGA, A. R. M.; TABORGA, J. D. M.; WEINGAERTNER, W. L. **Análise da rugosidade obtida na retificação de ferro fundido nodular utilizando rebolos de SiC e Al₂O₃**. 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Uberlândia, 2003.

[45] TANG, X. H.; CHUNG, R.; PANG, C. J.; LI, D. Y.; HINCLEY, B.; DOLMAN, K. Microstructure of high (45 wt.%) chromium cast irons and their resistances to wear and corrosion. **Wear**. v. 271, p. 1426-1431, 2011.

[46] THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2001.

[47] TSO, P. L. An investigation of chip types in grinding. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 53, p. 521-532, 1995.

[48] WANG, J. P. **Avaliação da retificação com rebolo CBN vitrificado aplicada em ligas de alto desempenho**. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

[49] WONG, Y. C.; DOYLE, E. D. Implications of high strain deformation in grinding. **Wear**. v. 233-235, p.395-401, 1999.