

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

EDUARDO PEREIRA DE BARROS

**DESENVOLVIMENTO DE REBOLO HÍBRIDO CONSTITUÍDO DE
GRÃOS ABRASIVOS ÓXIDO DE ALUMÍNIO (Al_2O_3) E CARBETO DE
SILÍCIO (SiC) PARA RETIFICAÇÃO DE AÇO SAE 1045 E LATÃO
C360**

**VOLTA REDONDA
2018**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO DE REBOLO HÍBRIDO CONSTITUÍDO DE
GRÃOS ABRASIVOS ÓXIDO DE ALUMÍNIO (Al₂O₃) E CARBETO DE
SILÍCIO (SiC) PARA RETIFICAÇÃO DE AÇO SAE 1045 E LATÃO
C360**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Materiais do UniFOA como requisito obrigatório à obtenção do título de Mestre em Materiais, sob a orientação do prof. Dra. Monique Osório Talarico da Conceição, na área de concentração de processamentos e caracterização de materiais, linha de pesquisa de materiais cerâmicos.

Aluno:

Eduardo Pereira de Barros

Orientadora:

Profa. Dra. Monique Osório Talarico da Conceição

Co-Orientadora:

Profa. Dra. Katia Cristiane Gandolpho Candioto

**VOLTA REDONDA
2018**

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

B277d Barros, Eduardo Pereira de.

Desenvolvimento de rebolo híbrido constituído de grãos abrasivos óxido de alumínio (Al₂O₃) e carbeto de silício (SiC) para retificação de aço SAE 1045 e latão C360. / Eduardo Pereira de Barros. - Volta Redonda: UniFOA, 2018. 98 p. II

Orientador (a): Profª Drª Monique Osório Talarico da Conceição

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2018

1. Materiais - dissertação. 2. óxido de alumínio - retificação. 3. carbeto de silício. I. Conceição, Monique Osório Talarico da. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Eduardo Pereira de Barros

**DESENVOLVIMENTO DE REBOLO HÍBRIDO CONSTITUÍDO DE GRÃOS
ABRASIVOS ÓXIDO DE ALUMÍNIO (Al₂O₃) E CARBETO DE SILÍCIO (SiC)
PARA A RETIFICAÇÃO DE AÇO SAE 1045 E LATÃO C360**

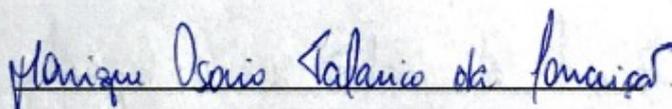
Orientadora:

Profa. Dra. Monique Osório Talarico da Conceição

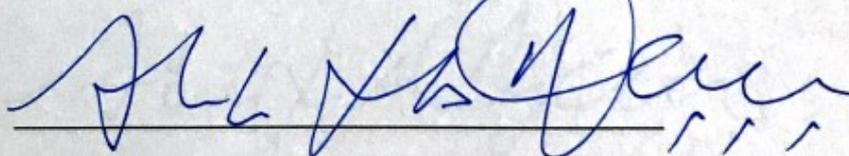
Coorientadora:

Kátia Cristiane Gandolpho Candioto

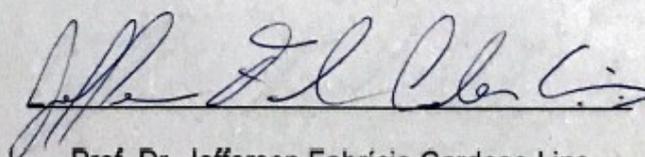
Banca Examinadora



Profa. Dra. Monique Osório Talarico da Conceição



Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe



Prof. Dr. Jefferson Fabrício Cardoso Lins

Dedico este trabalho a meu inesquecível irmão
Rodrigo Gonçalves de Barros, que tão jovem nos
deixou e se juntou a Deus em sua morada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, princípio e fim de todas as coisas.

A Fernanda Andrade Silva Barros, minha linda esposa, Vinicius Andrade Silva Barros e Maria Clara Andrade Silva Barros, meus maravilhosos filhos, que sempre estiveram juntos comigo e me acompanharam nesta trajetória.

Aos meus Pais Oswaldo Gonçalves de Barros e Laurimar Pereira de Barros, que sempre acreditaram e se orgulharam de minhas conquistas.

A Dra. Profa. Katia Gandolpho, minha orientadora, que me ajudou imensamente na elaboração deste trabalho, o qual sem a sua ajuda não seria finalizado.

“Lembre-se de que as pessoas podem tirar tudo de você, menos o seu conhecimento”.

Albert Einstein

Resumo

A necessidade de desenvolvimento de novos processos de manufatura nos últimos 100 anos levou ao desenvolvimento de processos industrializados de produção de grãos abrasivos e conseqüentemente ao desenvolvimento de novos tipos e formatos de ferramentas abrasivas. No estágio atual de desenvolvimento das ferramentas abrasivas é possível ter milhares de combinações entre formatos, grãos abrasivos, ligantes, aditivos e propriedades mecânicas que seria impossível determinar em números absolutos as quantidades de ferramentas abrasivas que teríamos para uso nos processos industriais. O uso de ferramentas abrasivas na indústria de transformação, construção mecânica e em áreas de manutenção, é carente de material técnico que disserte a respeito da melhor interação entre a matéria prima a ser retificada e o grão abrasivo que irá proceder com a ação de corte. O objetivo deste trabalho é desenvolver um rebolo abrasivo composto por dois dos abrasivos mais usados nas indústrias em geral, o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o carbeto de silício (SiC), para retificação de dois tipos de materiais comumente utilizados no setor metal mecânico, aço média dureza (SAE 1045) e latão (C360). Este estudo se baseia na avaliação do acabamento superficial por retificação plana com blendas de rebolos abrasivos resinoides de Al_2O_3 e SiC no aço e no latão. Os parâmetros de análise de desempenho serão rugosidade superficial, temperatura de processo, remoção horária e consumo de potência na retificadora. Com base nos resultados obtidos nos experimentos, o rebolo 25% Al_2O_3 e 75% SiC foi o que apresentou melhor desempenho, pois demonstrou as características de menor geração de calor no processo e menor consumo de energia no processo de retificação.

Palavra chave: Retificação, óxido de alumínio, carbeto de silício.

Abstract

The need to develop new manufacturing processes in the last 100 years has led to the development of industrialized abrasive grain production processes and consequently the development of new types and formats of abrasive tools. At the present stage of development of abrasive tools it is possible to have thousands of combinations of formats, abrasive grains, binders, additives and mechanical properties that it would be impossible to determine in absolute numbers the quantities of abrasive tools that we would have for use in industrial processes. The use of abrasive tools in the manufacturing, mechanical and maintenance industries is devoid of technical material that tells you about the best interaction between the raw material to be rectified and the abrasive grain that will proceed with the cutting action. The objective of this work is to develop an abrasive grinding wheel composed of two of the most commonly used abrasives in the general industries, aluminum oxide (Al_2O_3) and silicon carbide (SiC), for grinding two types of materials commonly used in the mechanical metal sector, medium hardness steel (SAE 1045) and brass (C360). This study is based on the evaluation of surface finishing by flat grinding with blends of resinoid abrasive grinding wheels of Al_2O_3 and SiC in steel and brass. The parameters of performance analysis will be: surface roughness, process temperature, hourly removal and power consumption in the grinder. Based on the results obtained in the experiments, the 25% Al_2O_3 and 75% SiC grinding wheel presented the best performance, as it demonstrated the characteristics of lower heat generation in the process and lower energy consumption in the grinding process.

Key words: Grinding, aluminum oxide, silicon carbide

Sumário

1.	Introdução	18
2.	Referências Bibliográficas	21
2.1.	Usinagem por retificação	21
2.2.	Processos de retificação.....	22
2.2.1.	Retificação circular	23
2.2.2.	Retificação com limas abrasivas.....	23
2.2.3.	Lapidação.....	24
2.2.4.	Polimento	24
2.3.	Ferramentas abrasivas	25
2.4.	Grão Abrasivo.....	26
2.4.1.	carbeto de silício (SiC).....	27
2.4.1.1.	carbeto de silício verde	31
2.4.1.2.	carbeto de silício preto	31
2.4.2.	óxido de alumínio	32
2.4.2.1.	óxido de alumínio marrom.....	36
2.4.2.2.	óxido de alumínio branco	36
2.4.2.3.	óxido de alumínio zirconado.....	37
2.4.2.4.	óxido de alumínio cerâmico.....	38
2.4.3.	Grãos diamantados	42
2.4.4.	Grãos de nitreto cúbico de boro (CBN).....	43
2.5.	Normas utilizadas na fabricação de grãos abrasivos	43
2.5.1.	Norma CAMI.....	43
2.5.2.	Norma FEPA	44
2.5.3.	Comparação entre as normas ASTM (CAMI) e FEPA	44
2.6.	Ligantes.....	47
2.6.1.	Ligas Metálicas.....	48
2.6.2.	Ligas Vitrificadas	48
2.6.3.	Ligas Resinóides.	49
2.7.	Dureza e estrutura de ferramentas abrasivas	50
2.8.	Estruturas geométricas das ferramentas abrasivas	51
2.9.	Materiais metálicos – Peça Obra	51
2.9.1.	Aço SAE/AISI 1045.....	51
2.9.2.	Latão liga C360	52
2.10.	Fundamentos da retificação	52
2.10.1.	Formação do cavaco.....	54
2.10.2.	Uso de refrigerante no processo de retificação	55
2.10.3.	Rugosidade cinemática.....	56
2.10.4.	Distribuição de força e energia.....	58

3.	 Materiais e métodos	60
3.1.	 Materiais	60
3.1.1.	Corpos de prova para retificação	60
3.1.2.	Rebolos	60
3.2.	 Métodos	62
3.2.1.	Preparação dos rebolos	62
3.2.2.	Ensaio de retificação	62
	Todo o processo utilizado neste experimento é demonstrado na Figura 40	62
3.2.3.	Módulo de elasticidade	65
3.2.4.	Temperatura dos corpos de prova retificados	65
3.2.5.	Rugosidade superficial	66
3.2.6.	Potência consumida pela retificação	66
3.2.7.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	67
3.2.8.	Microscópio óptico (MO)	68
4.	 Resultados e discussão	69
4.1.	Resultados de retificação com rebolo 100% Al₂O₃	69
4.2.	Resultados de retificação com rebolo 75% Al ₂ O ₃ 75% SiC	76
4.3.	Resultados de retificação com rebolo 50% Al ₂ O ₃ 50% SiC	79
4.4.	Resultados de retificação com rebolo 25% Al ₂ O ₃ 75% SiC	83
4.5.	Resultados de retificação com rebolo 100% SiC	87
4.6.	Gráfico comparativo de resultados	91
5.	 Conclusão	95
6.	 Proposta de novos trabalhos	96
7.	 Referências bibliográficas	97

Lista de tabelas

Tabela 2 Propriedades físicas e químicas – SiC

Tabela 3 correlação de dureza versus friabilidade dos grãos abrasivos

Tabela 4 Comparativo entre normas FEPA, ISO, ANSI JIS

Tabela 5 Comparativo normas CAMI e FEPA

Tabela 6 Estrutura versus percentual de abrasivo segundo COES

Tabela 7 – Composição dos rebolos utilizados nos experimentos

Tabela 1 Dureza média dos rebolos (Gpa) realizada no Sonelastic.

Tabela 9 Condição de contorno dos testes realizados

Tabela 10 Resultados de rugosidade e temperatura dos corpos de prova C360 e SAE 1045, retificados com rebolos 100% Al₂O₃.

Tabela 11 Resultados de rugosidade e temperatura dos corpos de prova C360 e SAE 1045, retificados com rebolos 75% Al₂O₃ e 25% SiC.

Tabela 12 Resultados de rugosidade e temperatura dos corpos de prova C360 e SAE 1045, retificados com rebolos 50% Al₂O₃ e 50% SiC

Tabela 13 Resultados de rugosidade e temperatura dos corpos de prova C360 e SAE 1045, retificados com rebolos 25% Al₂O₃ e 75% SiC.

Tabela 14 Resultados de rugosidade e temperatura dos corpos de prova C360 e SAE 1045, retificados com rebolos 100% SiC.

Lista de figuras

Figura 2 Constituição da ferramenta abrasiva

Figura 3 Retíficas circulares

Figura 4 Retífica com limas abrasivas

Figura 5 Lapidação por meio de grão abrasivo

Figura 6 Polimento por grão abrasivo

Figura 7 Variação comparativa de durezas entre ferramentas de usinagem e retificação

Figura 8 Montagem forno tipo Acheson

Figura 9 Esquema de montagem forno Acheson

Figura 10 Vista externa da montagem de forno Acheson

Figura 11 Vista externa da desmontagem de forno Acheson

Figura 12 Vista externa desmontagem de forno Acheson

Figura 13 Bloco de carbetto de silício bruto

Figura 14 Carbetto de Silício Verde

Figura 15 carbetto de silício preto

Figura 16 Forno elétrico tipo Higgins para fusão de alumina e zircônia

Figura 17 Modelo esquemático forno Higgins para fusão de alumina

Figura 18 Esquema de carregamento de grãos dentro de forno Higgins

Figura 19 Grãos óxido de alumínio marrom

Figura 20 Grãos óxido de alumínio branco

Figura 21 Grãos óxido de alumínio com tratamento de zircônio

Figura 22 óxido de alumínio cerâmico Seeded Gel – Norton Company

Figura 23 óxido de alumínio cerâmico Cubitron – 3M Company

Figura 24 Grão carbetto de silício preto

Figura 25 Grão óxido de alumínio branco

Figura 26 Grão óxido de alumínio zirconado

Figura 27 óxido de alumínio cerâmico Seeded Gel

Figura 28 Classificador gravitacional de grãos abrasivos

Figura 29 Classificador por via aquosa de grãos abrasivos

Figura 30 Rebolo formato 1A1

Figura 31 Imagens de cavacos obtidas com MEV em aço forjado Ck45N

Figura 32 Imagem esquemática da interação entre o grão abrasivo e a superfície da peça obra

Figura 33 Altura de formação do cavaco em uma peça obra

Figura 34 Penetração de grão abrasivo sem refrigeração

Figura 35 Penetração de grão abrasivo com refrigeração

Figura 36 Imagem esquemática de processo de trituração

Figura 37 Imagem esquemática de processo de moagem

Figura 38 Rugosidade cinemática no movimento de trituração

Figura 39 Rugosidade cinemática no movimento de moagem

Figura 40 Dissipação de calor e energia durante penetração do grão abrasivo

Figura 41 Fluxograma do processo do experimento

Figura 42 Retificadora transversal FERDIMAT TA42

Figura 43 *Sonelastic*® para caracterização de dureza dos rebolos

Figura 44 *Infrared*® DT 8380

Figura 45 Rugosímetro – *Surftest*® SJ-210 série 178 – Mitutoyo

Figura 46 ^{FIS}® (*Field Instrumentation System*)

Figura 47 – Microscópio eletrônico *de varredura* Oxford Instruments modelo LEO-1550VP

Figura 48 Microscópio ótico Leica modelo DM-IRM

Figura 49 Imagem superfície peça obra após retificação com rebolo 100% Al₂O₃

Figura 50 - Imagens de MO da superfície retificadas dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 100% Al₂O₃.

Figura 51 Gráfico do consumo de potência empregado na retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 100% Al₂O₃.

Figura 52 Imagens MEV dos cavacos provenientes da retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 100% Al₂O₃.

Figura 12 EDS MEV Latão C360 - Geradas dos cavacos provenientes da retificação dos corpos de prova C360

Figura 53 EDS MEV Aço SAE 1045 - Geradas dos cavacos provenientes da retificação dos corpos de prova SAE 1045

Figura 54 Imagem superfície após retificação 75% Al₂O₃ e 25% SiC
Figura 55 Imagens de MO da superfície retificadas dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 75% Al₂O₃ e 25% SiC.

Figura 55 Imagens de MO da superfície retificadas dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 75% Al₂O₃ e 25% SiC.

Figura 546 Gráfico do consumo de potência empregado na retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 75% Al₂O₃ e 25% SiC

Figura 557 Imagens MEV dos cavacos provenientes da retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 75% Al₂O₃ e 25% SiC.

Figura 58 Imagem superfície peça obra após retificação com rebolo 50% Al₂O₃ e 50% SiC

Figura 59 Imagens de MO da superfície retificadas dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 50% Al₂O₃ e 50% SiC.

Figura 60 Gráfico do consumo de potência empregado na retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 50% Al_2O_3 e 50% SiC .

Figura 6156 Imagens MEV dos cavacos provenientes da retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 50% Al_2O_3 e 50% SiC

Figura 572 Imagem superfície peça obra após retificação com reboło 25% Al_2O_3 e 75% SiC

Figura 583 - Imagens de MO da superfície retificadas dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 25% Al_2O_3 e 75% SiC

Figura 64 Gráfico do consumo de potência empregado na retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 25% Al_2O_3 e 75% SiC .

Figura 65 Imagens MEV dos cavacos provenientes da retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 25% Al_2O_3 e 75% SiC .

Figura 66 Imagem superfície peça obra após retificação com reboło 100% SiC

Figura 597 Imagens de MO da superfície retificadas dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 100% SiC

Figura 68 Gráfico do consumo de potência empregado na retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 100% SiC .

Figura 69 Imagens MEV dos cavacos provenientes da retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 100% SiC

Figura 70 – Gráfico comparativo do processo de retificação em Aço SAE 1045 com velocidade transversal de 0,15 m/s

Figura 71 Gráfico comparativo do processo de retificação em Aço SAE 1045 com velocidade transversal de 0,07 m/s

Figura 72 Gráfico comparativo do processo de retificação em latão C360 com velocidade transversal de 0,15 m/s

Figura 73 Gráfico comparativo do processo de retificação em latão C360 com velocidade transversal de 0,07 m/s

Lista de siglas

Al_2O_3	óxido de alumínio
SiC	carbeto de silício
CBN	nitreto cúbico de Boro
A	óxido de alumínio marrom
37C	carbeto de silício verde
SiO_2	óxido de silício
TiO_2	óxido de titânio
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	Hidróxido de ferro III
Fe_2O_3	óxido de ferro III
ZrO_2	óxido de Zircônio
CAMI	instituto de fabricação de abrasivos revestidos
FEPA	federação europeia de produtos abrasivos
ASTM	sociedade americana de materiais e testes
ANSI	instituto americano de normas técnicas
ABNT	associação brasileira de normas técnicas
SAE	sociedade de engenharia automotiva
Zn	zinco
Cu	cobre
MEV	microscópio eletrônico de varredura
MO	microscópio ótico
ps	raio do grão
η	ângulo de corte

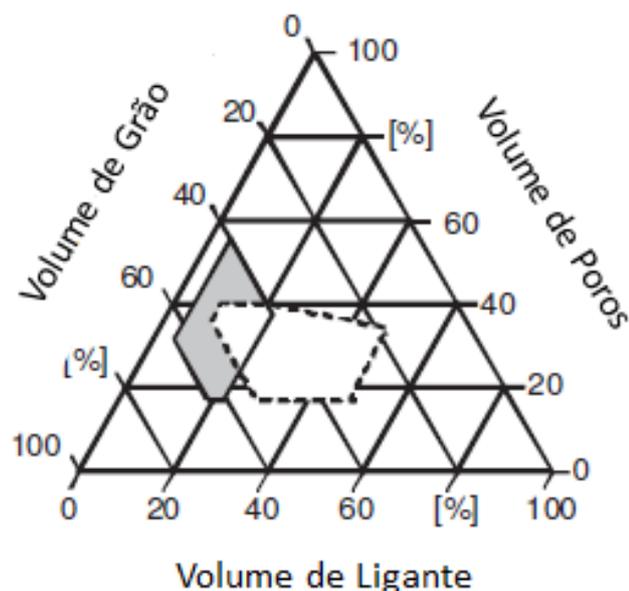
Vc	velocidade de corte
Vw	velocidade da peça obra
Vs	velocidade de rotação do abrasivo
Fts	força de corte – componente da velocidade
Fns	força de corte – componente normal
Qt	calor resultante do processo
EEL / USP	escola de engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo
FIS	sistema de instrumentação de campo
Ra	rugosidade média

1. Introdução

Segundo Malkin e Guo (MALKIN, GUO, 2008) rebolos abrasivos e segmentos abrasivos caem na categoria geral denominada “ferramentas abrasivas ligadas”. Tal ferramenta consiste em grãos abrasivos duros mantidos em uma matriz de ligação mais fraca, e que dependendo do tipo de ligante utilizado, o espaço entre os grãos abrasivos podem ser parcialmente preenchidos, deixando lacunas e porosidade, ou completamente preenchidos, sem nenhum poro na estrutura. As propriedades e o desempenho da ferramenta abrasiva ligada dependem do tipo de grão abrasivo, do tamanho do grão abrasivo, do tipo de material ligante, das propriedades do grão abrasivo e da liga, assim como da sua estrutura, quantidade de materiais e da porosidade.

De uma maneira geral os rebolos podem ser definidos quanto às variações de produção e desempenho, basicamente manipulando três elementos distintos no projeto da ferramenta abrasiva (a ser definida para uma determinada operação de manufatura). Resumidamente, podemos variar o triângulo de produção de um rebolo de maneira que ele se adapte a operação e ao material a ser retificado. A mínima variação de cada um dos elementos abaixo irá determinar o comportamento da ferramenta abrasiva, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2 Constituição da ferramenta abrasiva



Fonte: Klock, Manufacturing process - Cutting – adaptado.

Rebolos abrasivos são produzidos com vários tipos de grãos abrasivos sendo estes considerados ferramentas de arestas cortantes múltiplas não definidas. O tipo e tamanho do grão abrasivo são definidos geralmente levando em conta o tipo de material a ser usinado, assim como o tipo de acabamento demandado pelo projeto da peça manufaturada. Os tipos de grão abrasivos mais comuns e significantes no mercado são os considerados “convencionais” sendo estes o óxido de alumínio (Al_2O_3) e suas variações de pureza, e o carbeto de silício (SiC) e suas variações de dureza. Nos processos modernos de retificação temos de considerar também a utilização de grãos abrasivos de alto rendimento, como os grãos de óxidos de alumínio sinterizado, óxidos de alumínio com tratamento de zircônio, diamantados e o nitreto cúbico de boro (CBN).

Na produção da ferramenta abrasiva, o outro elemento que ajuda a definir a característica de utilização e desempenho da ferramenta abrasiva é o tipo de ligante que é utilizado. Segundo Nussbaum (NUSSBAUM,1988), o ligante deve ser especificado sempre de acordo com a natureza do processo de usinagem, pois interfere diretamente na operação, na segurança da ferramenta abrasiva e no acabamento final. Desde o início do processo de desenvolvimento de ferramentas abrasivas foram utilizados vários tipos de ligantes, como laca, liga mineral a base de óxido de cloreto de Magnésio, borracha e liga cerâmica. Nos processos modernos de confecção de ferramentas abrasivas, o tipo de ligante em linhas gerais define se a ferramenta abrasiva é do tipo “convencional” ou “superabrasiva”. Desta forma, podemos definir como convencional ou superabrasiva a forma que os rebolos são confeccionados e classificados de acordo com o ligante utilizado em sua produção.

De uma maneira geral, utilizamos as ligas vitrificadas em operações de retificação onde se espera um acabamento superior e sobre tudo a manutenção da geometria da peça em toda sua extensão. Ligas resinóides são utilizadas em retificações onde se espera alta remoção de material aliado a velocidades elevadas, acima de 48 m/s. As ligas metálicas são de uso exclusivo em ferramentas abrasivas que possuem diamante ou CBN como grãos abrasivos constituintes.

O terceiro fator de definição de uma ferramenta abrasiva esta ligado diretamente à relação entre volume de grãos abrasivo e ligante. O rebolo em sua definição e confecção precisa que existam poros internos em sua estrutura. Estes poros são responsáveis pela dissipação de resíduo de material da usinagem, assim como a permeabilidade do fluido refrigerante utilizado em operações refrigeradas.

Esta relação de poros, ligantes e grãos, definem também a dureza do rebolo, onde a mesma está ligada diretamente a interação entre rebolo versus peça obra. De uma maneira geral, rebolos macios devem ser especificados para retificação de materiais duros e rebolos duros devem ser especificados para retificação de materiais macios.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um rebolo capaz de retificar materiais com propriedades distintas, ferrosos e não ferrosos, manufaturado partir de grãos abrasivos de óxido de alumínio marrom (A) e carbeto de silício preto (37C), e estudar o acabamento final proporcionado pela operação de retífica plana em aço SAE 1045 e liga de latão C360.

Os rebolos foram caracterizados quanto ao seu módulo de elasticidade. O ensaio de retificação foi realizado com acompanhamento da potência consumida pela retifica, e a temperatura dos corpos de prova foi verificada no último passe de retificação. Após este processo foi obtido os valores de rugosidade superficial, imagens por microscopia ótica, e obtida imagens com microscopia eletrônica de varredura dos cavacos.

2. Referências Bibliográficas

2.1. Usinagem por retificação

Retificação em máquinas operatrizes são técnicas de manufatura a qual empregamos grãos abrasivos com durezas elevadas em ferramentas abrasivas retificando, ou polindo, com o intuito de modificação da superfície ou modificação do acabamento superficial de peças manufaturadas. Os processos de retificação são responsáveis pela produção de materiais com alto acabamento dimensional e superficial, com tolerâncias extremamente apertadas, onde qualquer variação mínima dimensional compromete o produto final acabado. Entres as operações mais usuais de retificação podemos ter extremos de aplicação industrial como ferramentas abrasivas cortando e retificando canais de alimentação em peças fundidas de grande porte, como peças de trator, e em outro extremo, a retificação de acabamento de agulhas de injeção de insulina. Nas operações de retificação podemos ter ranges de aplicabilidade e necessidade de acabamento totalmente diferentes, sendo realizadas com o mesmo tipo de processo operacional, utilizando para isto rebolos produzidos em processos de fabricação totalmente distintos (MARINESCU, 2012).

Segundo Marinescu *et al* (MARINESCU, 2012), retificação é um processo extremamente complexo, pois há diversas variáveis que agem no processo como um todo, fazendo com que estas variáveis criem interdependência no resultado final atingido. Algumas das variáveis do processo e seus resultados podem ser:

- Processo de retificação empregado
 - Forma de retificação

- Ferramenta abrasiva
 - Tipo de grão e propriedades químicas e físicas dos grãos abrasivos
 - Tamanho do grão abrasivo
 - Tipo de liga aglutinante utilizada
 - Dureza e estrutura da ferramenta abrasiva
 - Formato geométrico da ferramenta abrasiva

- Material retificado (peça obra)
 - Tolerâncias dimensionais
 - Acabamento requerido
 - Características químicas e físicas da peça obra

- Tipo de máquinas retificadoras
 - Tipo de equipamento retificador
 - Rigidez do equipamento
 - Precisão

- Parâmetros de usinagem
 - Velocidade periférica dos rebolos
 - Dimensão
 - Velocidade de avanço
 - Velocidades de trabalho (rebolo e peça obra) transversal
 - Profundidade de corte
 - Potencia de corte
 - Rugosidade resultante

- Processo de refrigeração
 - Tipo de fluido refrigerante
 - Pressão de trabalho do fluido
 - Características químicas do fluido

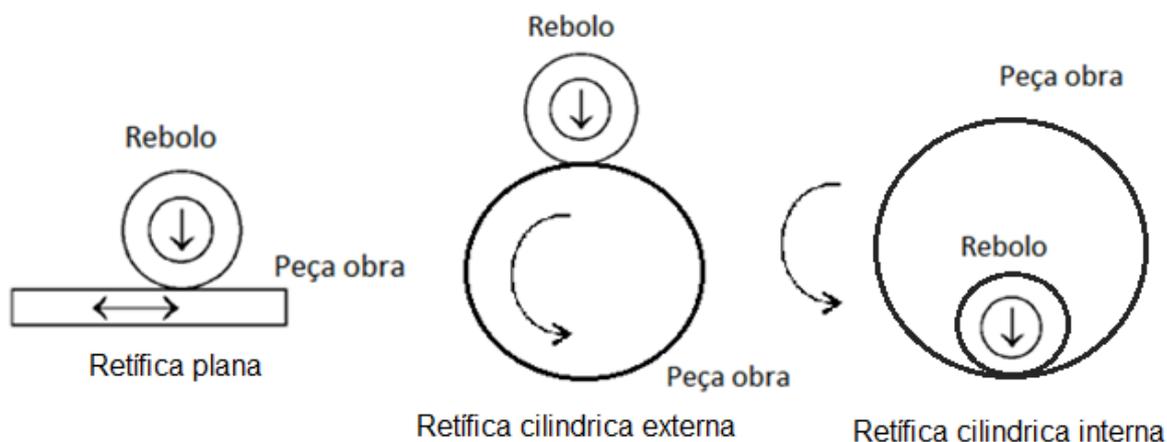
2.2. Processos de retificação

Os processos de retificação podem ser caracterizados em grupos, de acordo com a característica de máquina operatriz utilizada e do tipo de superfície de contato entre ferramenta abrasiva e peça obra. Marinescu *et al* (MARINECU, 2012) classificam as operações de retificação em quatro grupos: (I) retificação circular, (II) retificação com lima abrasiva, (III) lapidação, (IV) polimento.

2.2.1. Retificação circular

Segundo Marinescu *et al* (MARINESCU, 2012) na retificação circular, seja ela externa ou interna, a ferramenta abrasiva se move com grande velocidade superficial quando comparada à velocidade transversal da peça obra. Retificações com movimento circular podem atingir velocidades que variam de 20 a 60 m/s em rebolos convencionais, e mais de 140 m/s em rebolos superabrasivos confeccionados com corpo e ligas metálicas. Neste tipo de processo de retificação podemos ter ou não o uso de lubrificação. O uso de líquido refrigerante em todos os casos pode proporcionar a redução da tensão residual durante o processo de retificação, e melhoria na qualidade do acabamento superficial. A Figura 3 representa os principais tipos de retificação circular existente. Nesta dissertação iremos utilizar o processo de retificação plana.

Figura 3 Retíficas circulares



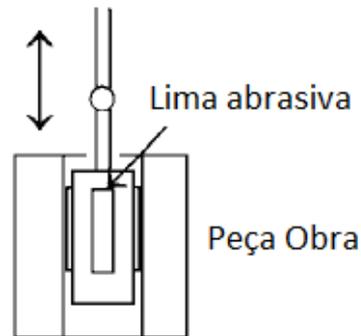
Fonte : Tribology of Abrasives Machining Process (MARINESCU, 2012)

2.2.2. Retificação com limas abrasivas

Na retificação com limas abrasivas,

Figura 4, o abrasivo (grão e ligante) é produzido geralmente em formatos triangulares, trapezoidais ou retangulares, sendo que o formato sempre varia de acordo com a superfície (cabecote) onde o abrasivo irá ficar alojado. Este tipo de processo pode ser usado em retificas plana, todavia é mais comum o uso em retificas cilíndrica internas. (MARINESCU, 2012).

Figura 4 Retífica com limas abrasivas

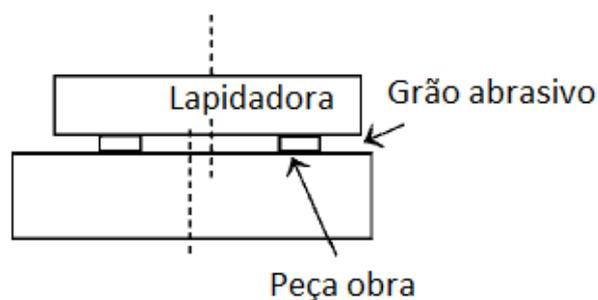


Fonte : Tribology of Abrasives Machining Process (MARINESCU, 2012)

2.2.3. Lapidação

Na lapidação, Figura 5, grãos abrasivos são introduzidos entre a placa lapidadora, a qual geralmente pode ser confeccionada de ferro ou aço fundido, e a superfície da peça obra. O abrasivo neste tipo de operação é introduzido com auxílio de um líquido, geralmente óleo lubrificante, onde a placa lapidadora e a peça obra possuem superfícies paralelas. (MARINESCU, 2012).

Figura 5 Lapidação por meio de grão abrasivo.

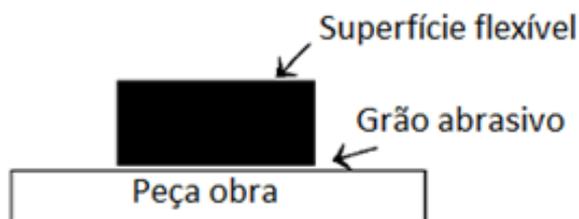


Fonte : Tribology of Abrasives Machining Process (MARINESCU, 2012).

2.2.4. Polimento

Polimento, assim como a lapidação, empregam grãos abrasivos livres, com a diferença que a pressão do abrasivo para retificação na peça obra, é aplicada através de uma superfície flexível que se conforma de acordo com a superfície da peça a ser retificada, conforme Figura 6. (MARINESCU, 2012).

Figura 6 Polimento por grão abrasivo.



Fonte : Tribology of Abrasives Machining Process (MARINESCU, 2012).

2.3. Ferramentas abrasivas

Usualmente as ferramentas abrasivas são classificadas pelos fabricantes de abrasivos em duas categorias distintas:

- Ferramentas abrasivas flexíveis
- Ferramentas abrasivas rígidas

As ferramentas flexíveis são as que em sua constituição são formadas basicamente por grãos abrasivos, resinas e costado. O costado que pode ser de diversos materiais como jeans, papel, fibra. Sua função é conferir a flexibilidade a este tipo de ferramenta. No mercado os abrasivos flexíveis são conhecidos popularmente como lixas, e podem apresentar variações de acordo com o tipo de operação empregado, podendo ser denominados como discos de lixa, "flap disc", rodas de lixa entre outros. As ferramentas abrasivas rígidas são as que em sua constituição são formadas de grãos abrasivos e liga aglutinante, o que confere à mesma rigidez superficial. Estas ferramentas no mercado são popularmente conhecidas e classificadas de acordo com o sua especificação. Temos nesta categoria de abrasivos rígidos os discos de corte e discos de desbaste, usados para corte e desbaste em máquinas elétricas portáteis, pedras de afiar, pontas montadas, e finalmente os

rebolos, também conhecidos como pedra de esmeril, ferramenta abrasiva a qual este estudo é direcionado (NUSSBAUM, 1988).

Os rebolos são ferramentas abrasivas que possuem em sua constituição grãos abrasivos, liga aglutinante e porosidade, formando o triângulo de possibilidade que Klock (KLOCK, 2011) definiu como conhecimento primordial para a produção de ferramentas abrasivas. As variações destes três elementos constituem a forma final de um produto abrasivo utilizado em um processo de retificação.

2.4. Grão Abrasivo

Marinescu (MARINESCU, 2004) coloca que as modernas ferramentas abrasivas são divididas em dois grupos, comumente denominados:

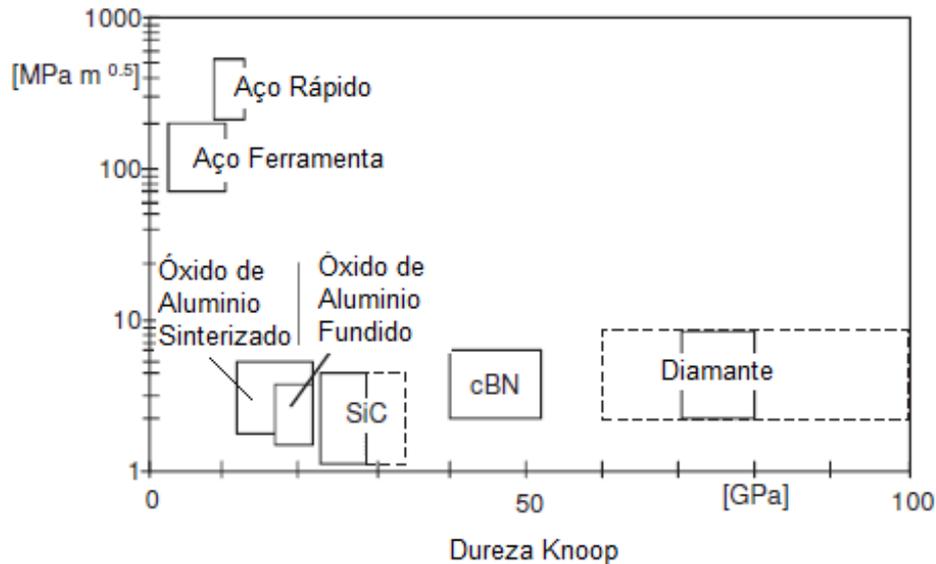
- Abrasivos convencionais, grãos que são baseados no carbetto de silício (SiC) ou no óxido de alumínio (Al_2O_3).
- Superabrasivos grãos baseados no Diamante ou nitreto cúbico de boro (CBN)

Praticamente todas as variações comerciais de grãos abrasivos existentes no mercado mundial são derivados dos quatro tipos de grãos descritos. Os grãos abrasivos seja ele convencional ou superabrasivos, possuem características físicas importantes a respeito da dureza superficial, o que é determinante ao processo de onde o abrasivo será utilizado na operação de retificação.

A dureza de um grão abrasivo também esta correlacionada à capacidade de fratura individual do grão abrasivo. Esta capacidade de fraturar que o grão abrasivo possui o correlaciona a friabilidade que o grão abrasivo exerce na operação de retificação. Determinados tipos de peça obra necessitam que um grão seja mais ou menos friável durante o ciclo de retificação, influenciando diretamente na usinabilidade da peça obra, gerando melhor ou pior rugosidade, aumentando ou diminuindo trincas térmicas superficiais, tendo maior ou menor queima superficial. Podemos classificar a dureza de um grão abrasivo em uma escala denominada Knoop e a friabilidade através de sua dureza, medida em Mpa/m, conforme

Figura 7 (KLOCK, 2011).

Figura 7 Variação comparativa de durezas entre ferramentas de usinagem e retificação.



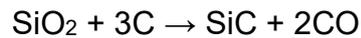
Fonte: Adaptado de “Hardness and fracture toughness of synthetic abrasive grit materials in comparison to a few working materials” (HELL, 1993).

2.4.1. Carbeto de silício (SiC)

O carbeto de silício foi sintetizado pela primeira vez em 1891 pelo Dr. E.G. Acheson, que deu o nome comercial para este produto de “Carborundum”. Inicialmente era produzido em pequenas quantidades em um processo que utilizava um forno elétrico que acabou recebendo o nome do criador do SiC, forno Acheson. Este material foi desenvolvido a época para substituir comercialmente o pó de diamante em processo de lapidação de pedras preciosas. Inicialmente ele considerou este tipo de grão abrasivo como “superabrasivo” onde sua base de comparação eram os abrasivos naturais conhecidos à época, como o Corundum, um tipo de material mineral, utilizado nos primórdios do processo de retificação (NUSSBAUM, 1988).

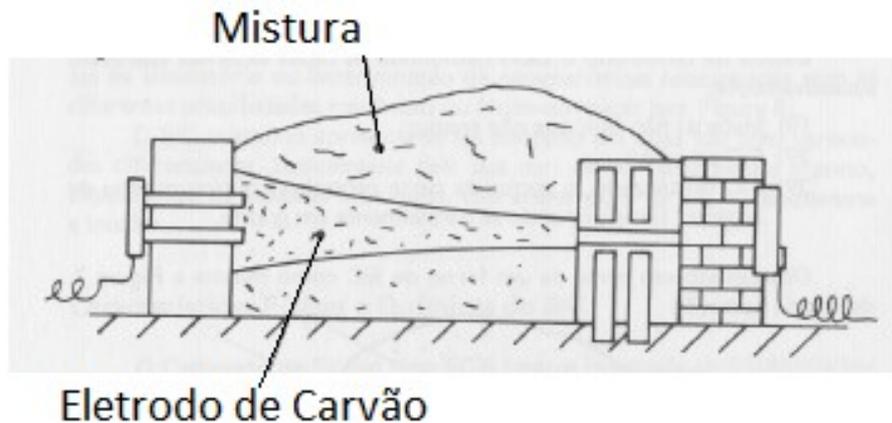
O SiC é produzido em um forno do tipo Acheson usando um processo de arco elétrico através de uma reação de areia silícea (areia de quartzo) e coque mineral a uma temperatura em torno de $2400^{\circ}C$, com uma reação química descrita na Equação 1 demonstrada abaixo:

Equação 1



Uma grande resistência a base de carbono é colocada com uma cama de matéria prima para a formação do SiC, onde uma grande corrente elétrica é fornecida ao processo. É adicionado à mistura uma porção de serragem para ajudar na formação de poros e a eliminação de CO, além de sal para remover impurezas a base de ferro. O processo como um todo leva em torno de 36 horas, em fornos com capacidade que variam entre 10 a 50 toneladas, dependendo do fabricante. A partir da temperatura de 2700°C o SiC permanece sólido e não há derretimento, porém, o SiC sublima a temperatura de 2700°C. Os fornos do tipo Acheson apresentam o formato descrito na Figura 8. (MARINESCU, 2004).

Figura 8 Montagem forno tipo Acheson.



Fonte: Tribology of Abrasives Machining Process (MARINESCU, 2004).

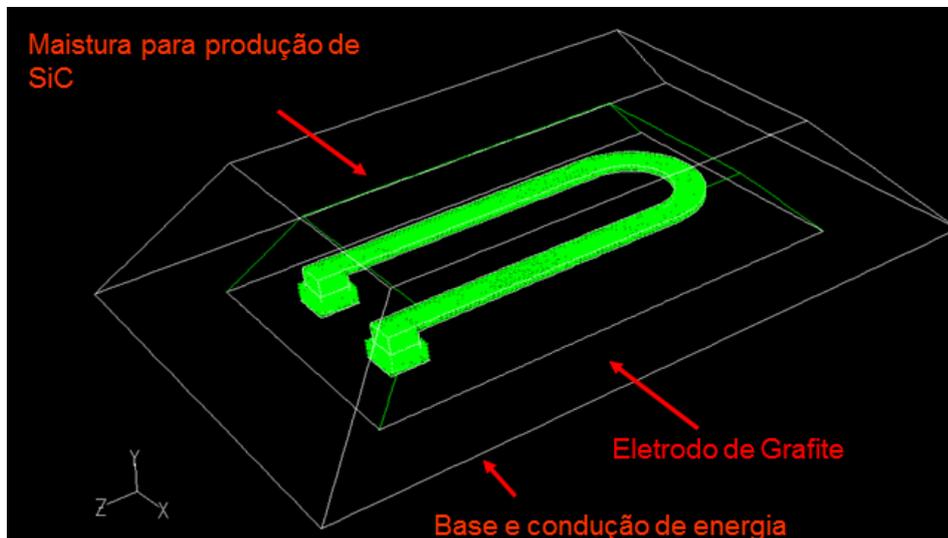
Segundo Nussbaum (NUSSBAUM, 1988), a mistura para uso na produção de SiC utiliza as seguintes percentagens na montagem do forno:

Areia de Quartzo (SiO ₂)	-----	55%
Coque	-----	35%
Antracito (carvão)	-----	8%
Serragem (CINa)	-----	2%

As dimensões do forno para uma produção de 10 toneladas gira em torno de 12 m de comprimento por 4 m de largura e 2 m de altura, consumindo cerca de 1500 KWh.

Nos processos modernos de produção de SiC temos algumas variações do formato original do forno Acheson, para ganho de produtividade. Podemos verificar nas Figura 9 como é atualmente a montagem dos fornos SiC, conforme esquemas e imagens cedidos pela empresa Saint-Gobain Abrasivos.

Figura 9 Esquema de montagem forno Acheson.



Fonte: Adaptado Saint-Gobain do Brasil – Divisão Cerâmica (OLIVEIRA, 2012).

Figura 10 Vista externa da montagem de forno Acheson.



Fonte: Adaptado Saint-Gobain do Brasil Divisão Cerâmica (OLIVEIRA, 2012).

Figura 11 Vista externa da desmontagem de forno Acheson.



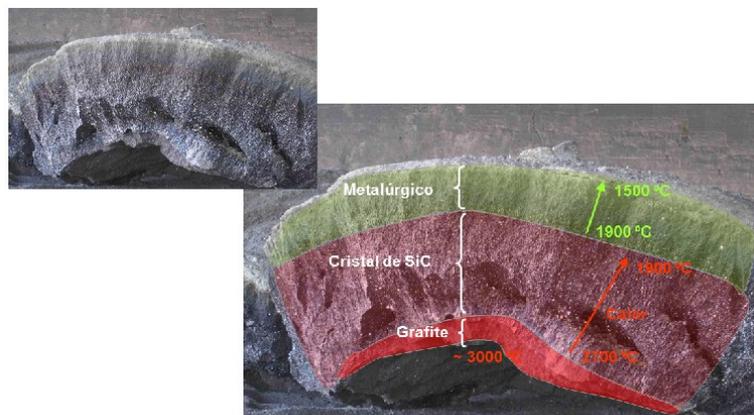
Fonte: Adaptado Saint-Gobain do Brasil Divisão Cerâmica (OLIVEIRA, 2012).

Figura 12 Vista externa desmontagem de forno Acheson.



Fonte: Adaptado Saint-Gobain do Brasil Divisão Cerâmica (OLIVEIRA, 2012).

Figura 13 Bloco de carbetto de silício bruto.



Fonte: Adaptado Saint-Gobain do Brasil Divisão Cerâmica (OLIVEIRA, 2012).

2.4.1.1. Carbeto de silício verde

O carbeto de silício verde (Figura 14) é um grão mais nobre com uma maior pureza, principalmente contra a contaminação de óxido de alumínio proveniente do quartzo, com um teor de contaminação inferior a 0,05% de Al_2O_3 . É utilizado em operações de retificação mais voltadas para o acabamento de superfície, sendo um grão abrasivo com alta dureza e altamente friável. (NUSSBAUM, 1988)

Figura 14 Carbeto de Silício Verde.



Fonte: Adaptado Saint-Gobain do Brasil – Divisão Cerâmica.

2.4.1.2. carbeto de silício preto

O carbeto de silício preto (Figura 15) é um grão com menor pureza, principalmente contra a contaminação de óxido de alumínio proveniente do quartzo, com um teor de contaminação inferior a 0,1% de Al_2O_3 . É utilizado em operações de retificação voltadas para o desbaste de superfície. É um grão abrasivo com alta dureza e alta friabilidade (NUSSBAUM, 1988).

Figura 15 carbeto de silício preto.



Fonte: Adaptado Saint-Gobain do Brasil – Divisão Cerâmica.

Ambos os grãos possuem as seguintes características físicas, descritos na Tabela 2.

Tabela 2 Propriedades físicas e químicas – SiC.

Propriedades SiC	
Propriedade	Valor
Densidade	3,21 g/cm ³
Expansão linear	5 x 10 ⁻⁶
Dureza Knoop	2300
Calor específico	0,15 cal/gC
Resistencia Elétrica	2,13Ω/cm

Fonte: Adaptado Saint-Gobain do Brasil – Divisão Cerâmica.

2.4.2. Óxido de alumínio

A matéria prima mais comum encontrada na natureza para a produção da alumina eletro-fundida é a bauxita, um mineral comum em jazidas ao longo da terra. A bauxita dependendo da jazida onde é produzida é rica em alumina, chegando a conter entre 85% a 90% deste mineral, além de 2% a 5% de óxido de titânio (TiO₂), além de mais de 10% de óxido de ferro, sílica, e demais tipos de óxidos. A composição química típica da bauxita pode conter em torno de 25% de impurezas como o óxido de ferro (Fe₂O₃), hidróxido de ferro (Fe(OH)₃), óxido de titânio (TiO₂), hidróxido de alumínio (Al(OH)₃) e óxido de alumínio hidratado. (NUSSBAUM, 1988)

A invenção do óxido de alumínio é fruto de pesquisas realizada pelo químico alemão Ernest Moyat nos laboratórios da firma Mayer & Schmidt em Offenbach am Main, beneficiando minério com alto teor de alumina. A bauxita é fundida em um forno de arco elétrico a 2600°C usando um processo demonstrado por Charles Jacobs em 1897. Porém, quem trouxe a produção do óxido de alumínio a uma viabilidade comercial pela primeira vez, com o nome de “Alundum”, em adicional com a introdução de um novo tipo de forno desenvolvido por Aldus C. Higgins foi a empresa Norton Company em 1904 (TYMENSON, 1953).

O forno Higgins, Figura 16, consiste em uma fina panela de aço inserida em uma lareira de metal espessa e resistente. A parede da panela de aço possui um sistema de troca de calor interno através de um cooler com passagem de água para manter a integridade física mesmo sob uma temperatura muito acima do ponto de fusão do aço. Dentro da panela de aço é colocada uma cama de bauxita prensada e calcinada (nesta mistura há o acréscimo de coque e limalha de aço para remover impurezas e manter o arco elétrico em funcionamento). Eletrodos de carbono descem do topo do forno (geralmente utiliza-se de dois a três eletrodos por forno) para dentro da panela com a mistura de bauxita, onde uma corrente elétrica altíssima é inserida através dos eletrodos, gerando o início de um processo de fusão por arco elétrico. A bauxita é adicionada continuamente por horas a fim de manter o volume máximo das panelas, que podem chegar até 20 toneladas de bauxita derretida. A corrente de energia do processo é controlada através do ajuste de altura dos eletrodos, podendo ser interrompido o arco elétrico a qualquer momento. A refrigeração que a água da à panela é extremamente eficiente para conter o processo de derretimento da bauxita dentro do recipiente, sem comprometer as paredes de aço, sendo um fator significativo do processo a baixa condutividade térmica da alumina, que ajuda a proteger a camada externa da panela, formando uma sólida incrustação na parede interna da panela (NUSSBAUM, 1988).

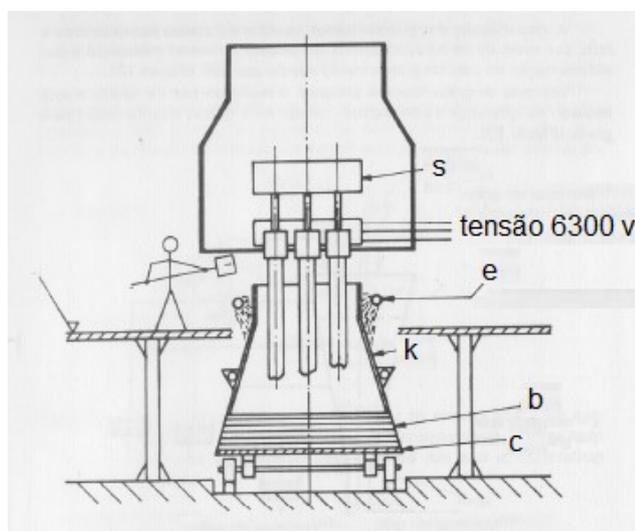
Figura 16 Forno elétrico tipo Higgins para fusão de alumina e zircônia.



Fonte : Tribology of Abrasives Machining Process (MARINESCU, 2012).

Uma vez cessada a corrente elétrica do forno, o processo se encerra e o esfriamento da mistura se inicia. Em alguns fornos modernos, a alumina derretida é jogada dentro de uma estrutura para ser refrigerada com jatos de água, com intuito de melhorar a microestrutura. Porém na maioria dos fornos há o resfriamento a temperatura ambiente como regra, com jatos de água sendo jogado por cima em um campo aberto. A taxa de resfriamento do óxido de alumínio influencia em grande parte no tamanho dos cristais formados. Nos fornos onde o resfriamento acontece após a retirada do tarugo da panela e o conseqüente resfriamento acontece em temperatura ambiente, há o aparecimento de cristais maiores. Nos fornos onde há o processo de resfriamento forçado, os cristais formados são menores. Este tipo de resfriamento aumenta a qualidade do grão abrasivo final. Após o completo resfriamento é iniciado o processo de britagem do Al_2O_3 e a separação por peneiras para classificação do tamanho do grão. O forno Higgins pode ser demonstrado esquematicamente na Figura 17 (NUSSBAUM, 1988).

Figura 17 Modelo esquemático forno Higgins para fusão de alumina.



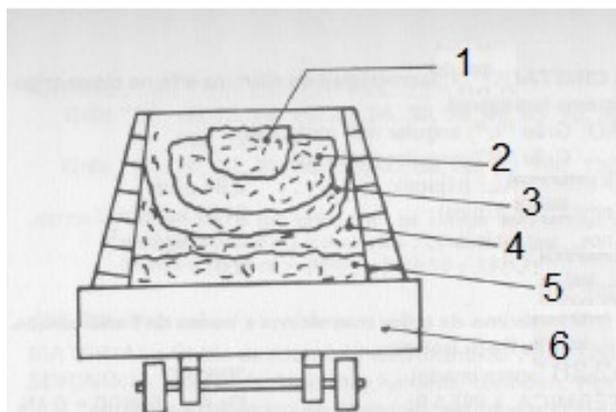
Fonte: Rebolos e Abrasivos – Tecnologia básica (NUSSBAUM, 1988).

No forno Higgins o carro (c) suporta uma base construída com tijolos refratários isolantes e tijolos de grafite (b). A panela de aço (k) é refrigerada constantemente através de uma serpentina (e). Uma vez carregado o forno os eletrodos de carvão descem junto com a cúpula da panela (s). O forno é alimentado através de uma

corrente elétrica em torno de 6300 volts, sendo a tensão elétrica regulada através da subida ou descida da cúpula com os eletrodos.

Segundo Nussbaum (NUSSBAUM, 1988) em sua pesquisa, a composição média dos tipos de grãos abrasivos resultantes do processo de fusão da bauxita são variações que acontecem de acordo com a proximidade do eletrodo de carvão, com a mistura de minerais. Quanto mais próximo à mistura estiver dos eletrodos, Figura 18, de melhor qualidade será o óxido de alumínio obtido, e quanto mais próximo das paredes da panela, ou seja, longe do arco elétrico, de pior qualidade será o produto final. Porém, mesmo com o intuito de produção de maior quantidade de grãos nobres, não se pode aumentar o arco elétrico indiscriminadamente, e nem aproximar o arco da parede de aço da panela, sob o risco do arco voltaico danificar a parede metálica, chegando até mesmo ao ponto de ruptura desta contenção de aço.

Figura 18 Esquema de carregamento de grãos dentro de forno Higgins.



Fonte: Rebolos e Abrasivos – Tecnologia básica (NUSSBAUM, 1988).

- 1- Óxido de alumínio poroso, não sendo útil para fabricação de grão abrasivo.
- 2- Grão óxido de alumínio friável, tonalidade rosa com pureza de 98% de Al_2O_3 .
- 3- Grão óxido de alumínio mais tenaz, tonalidade marrom escuro com pureza de 94% a 96% de Al_2O_3 .
- 4- Parte não fundida, retorna ao forno para outra fusão. Pureza de 94% a 96% de Al_2O_3 .
- 5- Zona de ferro silício.
- 6- Base do carro

De acordo com a aplicação industrial do grão abrasivo óxido de alumínio, e também com a variável resultante de processos físicos e químicos, aliado a processos de produção distintos e cada vez mais eficientes ao uso comercial das indústrias, podemos ter variações de óxido alumínio específicos para cada tipo de operação. Estas alterações físicas e químicas dos grãos permitem classificar os óxidos de alumínio de maneiras distintas. (NUSSBAUM 1988)

2.4.2.1. Óxido de alumínio Marrom

O processo resultante da fusão da bauxita no forno Higgins é um abrasivo monocristalino de cor escura, Figura 19, denominado óxido de alumínio marrom. Esta alumina contém tipicamente em sua composição 3% de TiO_2 e possui dureza Knoop de 2.090 com uma friabilidade considerada média. No processo de produção deste grão, uma variação de TiO_2 para cima pode aumentar a resistência, porém reduzirá a dureza do grão. É considerado um óxido de alumínio impuro, com teor de ferro residual. Este teor de ferro residual limita o uso deste tipo de grão abrasivo em operações onde se espera uma retificação ou corte da peça obra limpo, isento de nenhum elemento contaminante como o ferro (NUSSBAUM 1988).

Figura 19 Grãos óxido de alumínio marrom.



Fonte: Catálogo de produtos empresa ELFUSA.

2.4.2.2. Óxido de alumínio branco

O óxido de alumínio branco consiste na produção de grãos abrasivos com a adição de soda cáustica, denominado método de Bayer. Este processo remove as impurezas da bauxita, produzindo um grão abrasivo com pureza superior a 99%. Em

processos desenvolvidos mais recentemente, a alumina pura Al_2O_3 , vem sendo adicionada diretamente no forno de produção. O óxido de alumínio branco,

Figura 20, possui características distintas do óxido de alumínio marrom, sendo um grão puro, com pureza e friabilidade maiores. Este tipo de característica proporciona uma ação de corte mais fria, isto é, não gera queima superficial na peça obra. O óxido de alumínio branco é especialmente destinado a operações com rebolos com ligas vitrificadas. Porém, devido ao baixo teor de sódio este grão acaba não sendo recomendado para o uso em ligas resinoides devido ao ataque do líquido refrigerante na interface entre o grão e o ligante, quando usado em ligas resinoides (NUSSBAUM 1988).

Figura 20 Grãos óxido de alumínio branco.



Fonte: Catálogo de produtos empresa ELFUSA.

2.4.2.3. Óxido de alumínio zirconado

Segundo Nussbaum (NUSSBAUM, 1988) os óxidos de alumínio zirconados, Figura 21, são grãos de óxido de alumínio onde no processo de produção há a adição de Zircônio, gerando um grão abrasivo com grau de pureza elevado e com uma resistência mecânica altíssima. Existem três diferentes combinações de adição de Zircônio nos grãos de óxido de alumínio puro para a produção de grãos abrasivos zirconados, onde cada uma destas combinações possui uma característica de resistência mecânica e aplicações distintas na indústria. Basicamente a composição dos subprodutos da alumina zirconada podem ser definidas pelas

Equação 2 a Equação 4:

Equação 2

- 75% Al₂O₃ + 25% ZrO₂

Equação 3

- 60% Al₂O₃ + 40% ZrO₂

Equação 4

- 65% Al₂O₃ + 30% ZrO₂ + 5% TiO₂

Figura 21 Grãos óxido de alumínio com tratamento de zircônio.



Fonte: Catálogo de produtos empresa ELFUSA.

2.4.2.4. Óxido de alumínio cerâmico

Um dos mais significativos desenvolvimentos na produção de grãos abrasivos foi a invenção do grão abrasivo sinterizado, realizada pela empresa Norton Company em 1986. Este grão possui a denominação técnica de Seeded Gel pelo fabricante Norton Company, e é basicamente produzido a partir de um método de precipitação química, através do qual o óxido de Magnésio (MgO) é precipitado criando uma alumina com 50nm de tamanho, usando para isto boehmita com matéria prima (MALKIN, 2008).

O grão de alumina sinterizada (sol-gel) é obtido através de um processo que compreende os passos de preparar uma dispersão de mono hidratada de alumina, onde um modificador pode ser introduzido, gelificando a dispersão. Em um segundo passo há uma secagem desta dispersão gelificada, esmagando até a formação de

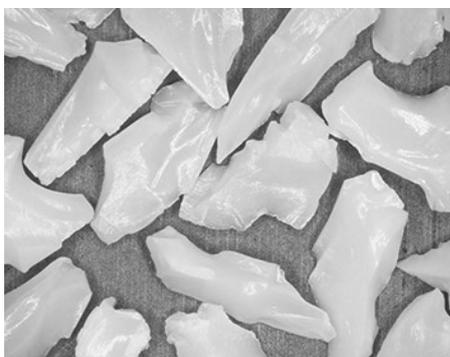
partículas. Após este processo é feito uma calcinação da mistura para a formação de grãos abrasivos (WOOD, YOON, 1994).

O uso do abrasivo cerâmico nas indústrias impulsionou processos de retificação com a conseqüente redução de tempo de máquina e ganho de desempenho nos processos. O grão cerâmico possui uma resistência mecânica tão elevada, que é preciso combinar o uso do grão cerâmico com grãos fundidos regulares, para evitar excesso de forças de abrasão. As combinações mais típicas de uso para os grãos cerâmicos em rebolos são:

- 5SG - 50% de Seeded Gel + 50% de outro grão fundido (Al_2O_3 ou SiC)
- 3SG - 30% de Seeded Gel + 70% de outro grão fundido (Al_2O_3 ou SiC)
- 1SG - 10% de Seeded Gel + 90% de outro grão fundido (Al_2O_3 ou SiC)

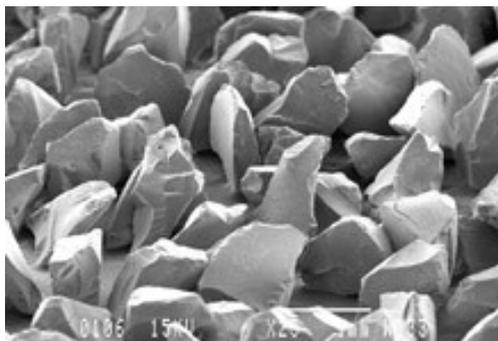
Após o desenvolvimento pela Norton Company do Seeded Gel, figura 21, a empresa americana 3M desenvolveu um grão abrasivo cerâmico, denominado Cubitron, figura 22, com características de retificação semelhantes ao Seeded Gel da Norton. O Cubitron é obtido através de um processo denominado Sol Gel, onde diferentemente do Seeded Gel o Cubitron não usa o controle de tamanho de cristais. No processo Sol Gel a alumina é precipitada com a utilização de óxido de Magnésio, Ítrio, Lantânio e Neodímio para controlar a micro estrutura no processo de sinterização (MALKIN, 2008).

Figura 22 óxido de alumínio cerâmico Seeded Gel – Norton Company.



Fonte: Catálogos de produtos Norton Abrasivos (Saint-Gobain Abrasivos, 2011)

Figura 23 óxido de alumínio cerâmico Cubitron – 3M Company.

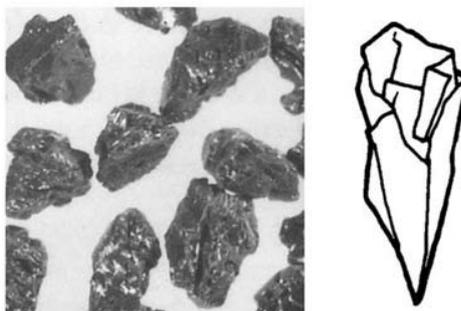


Fonte: Catálogos de produtos 3M Company (3M, 2016).

De uma maneira geral, os grãos abrasivos, possuem características químicas diferentes, que proporcionam maior ou menor dureza superficial, maior ou menor resistência ao desgaste. Um dos fatores que impactam diretamente na qualidade da retificação é a friabilidade (capacidade de corte sem geração de calor). A friabilidade impacta diretamente nas tensões superficiais térmicas que o processo de abrasão gera na peça obra (MARINESCU, 2004).

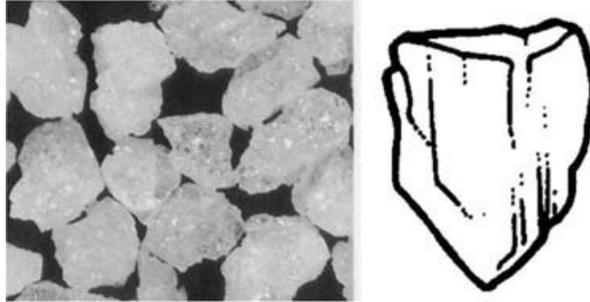
A forma que o grão abrasivo possui em sua constituição (fatores químicos e físicos), devido ao seu processo de fabricação e moagem, determina como serão os ângulos de ataque que o grão abrasivo irá possuir. O grão óxido de alumínio, figura 23, sempre terá ângulos de ataque mais arredondados, o carbeto de silício, figura 24, terá ângulos mais pontiagudos. Os óxidos de alumínio zirconados, figura 25, seguem o mesmo formato dos óxidos normais, porém com maior resistência mecânica superficial, e os cerâmicos, figura 26, sempre terão ângulos de ataque agudos, devido à formação do mesmo com milhares de grãos sinterizados (MARINESCU, 2004).

Figura 24 Grão carbeto de silício preto.



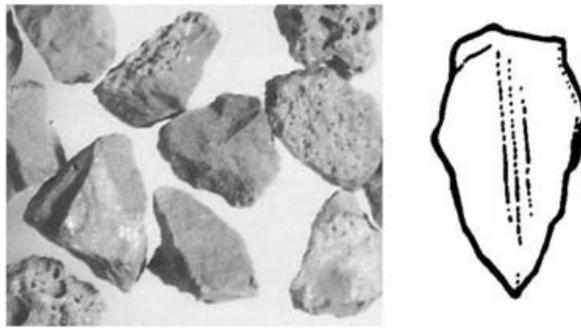
Fonte: Tribology of Abrasives Machining Process (MARINESCU, 2004).

Figura 25 Grão óxido de alumínio branco.



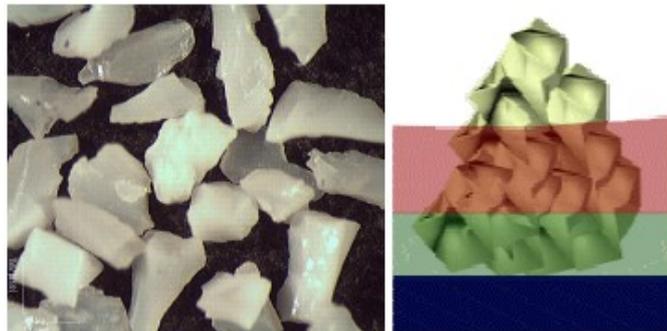
Fonte: Tribology of Abrasives Machining Process (MARINESCU, 2004).

Figura 26 Grão óxido de alumínio zirconado.



Fonte: Tribology of Abrasives Machining Process (MARINESCU, 2004).

Figura 27 óxido de alumínio cerâmico Seeded Gel.



Fonte: Tribology of Abrasives Machining Process (MARINESCU, 2004).

De acordo com Malkin (MALKIN, 2008), os grãos abrasivos convencionais possuem conforme Tabela 3 as seguintes correlações de dureza e friabilidade.

Tabela 3 correlação de dureza versus friabilidade dos grãos abrasivos.

Tipo de Grão	Dureza Knoop (kg/mm²)	Índice de Friabilidade
<u>Óxido de Alumínio</u>		
Modificado (3% Cr)	2260	65.0
Branco	2120	56.6
Monocristalino	2280	47.7
Regular	2040	35.6
Microcristalino	1950	10.9
10% ZrO₂	1960	10.9
40% ZrO₂	1460	7.9
Sinterizado	1370	6.5
<u>Carbeto de Silício</u>		
Verde	2840	62.5
Preto	2680	57.2

Fonte: Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives
(MALKIN, 1989).

2.4.3. Grãos diamantados

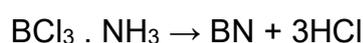
Grãos abrasivos diamantados detêm um lugar especial na indústria produtora de abrasivos. Devido a sua altíssima dureza, sendo o material mais duro conhecido, é naturalmente a primeira escolha para retificar materiais duros. O diamante é o único abrasivo comercial que continua sendo retirado da natureza e utilizado nos processos industriais. Com a evolução dos processos químicos e físicos, o diamante natural conheceu seu par sintético, sendo desenvolvido através de um processo de alta temperatura e alta pressão. O diamante natural é preferido na confecção de dressadores estáticos e dinâmicos, sendo o diamante sintético mais direcionado a fabricação de rebolos. O diamante sintético foi inicialmente desenvolvido pela empresa General Electric Company (GE), a partir de um processo de produção utilizando o grafite como matéria prima. O Grafite a temperatura ambiente possui ligações covalentes onde cada carbono da estrutura é ligado a outros três. Estes átomos são arranjados em camadas, porém, as ligações entre as camadas são fracas, sendo feitas através de forças de Van der Waals. Ao grafite natural é adicionado no processo calor e pressão, onde o diamante começa a se formar industrialmente a

partir de 1600 K e a uma pressão de 60 Kbar. O processo descoberto pela GE utilizava também a adição de metal solvente como o níquel ou cobalto, que ajudam a reduzir a temperatura e a pressão requerida para níveis de maior facilidade de controle do processo. Para o diamante industrial no formato utilizado atualmente é necessário para uma conversão direta do grafite em diamante temperaturas de 2500 K e pressão superior a 100 Kbar (MARINESCU, 2004).

2.4.4. Grãos de nitreto cúbico de Boro (CBN)

A síntese do nitreto cúbico de Boro (CBN – Cubic Boron Nitride) foi realizada pela primeira vez por R. H. Wentorf em 1957 (WENT, 1975). CBN foi produzido para uma atividade industrial pela primeira vez em 1968 e em 1969 foi introduzido no mercado mundial de abrasivos sob o nome Borazon pela empresa General Electric Company. Em contraste com os abrasivos convencionais, o CBN foi desenvolvido para ser utilizado em uma aplicação de um corpo metálico, semelhante ao diamante. Porém, uma das mais importantes diferenciações entre o CBN e o diamante, é a alta estabilidade térmica e a capacidade de usinar ferro e suas ligas. O CBN é produzido através da pirolise do cloreto de boro amoníaco catalisando a uma pressão de 50 a 90 Kbar e a uma temperatura entre 1800°C e 2700°C, e a Equação 5 correspondente a sua formulação química é mostrada abaixo.

Equação 5



O produto resultante da síntese é substância branca escorregadia, com uma estrutura hexagonal chamada HBN, similar ao grafite, porém com átomos de Nitrogênio e Boro. Quando esta mistura é submetida a altas temperaturas inicia-se a fase de transformação, convertendo o HBN em uma estrutura cúbica, similar ao diamante (MARINESCU, 2004).

2.5. Normas utilizadas na fabricação de grãos abrasivos

2.5.1. Norma CAMI

Os Estados Unidos na manufatura dos grãos abrasivos utilizam a norma ANSI B74.16 de 1995, como forma de caracterização do tamanho do grão abrasivo, onde o

tamanho da peneira é determinado por um par de números, onde os números menores correspondem aos grãos mais grossos que caem da peneira. Contudo, no próprio Estados Unidos, nos processos comerciais e de uso industrial, a maneira mais usual de caracterização utilizado pelos fabricantes de abrasivos é a CAMI (Coated Abrasive Manufactures Institute) que em tradução literal significa Instituto de Produtores de Abrasivos Revestidos, uma cópia da norma ANSI (NORTON ABRASIVOS ITNA009, 2012).

2.5.2. Norma FEPA

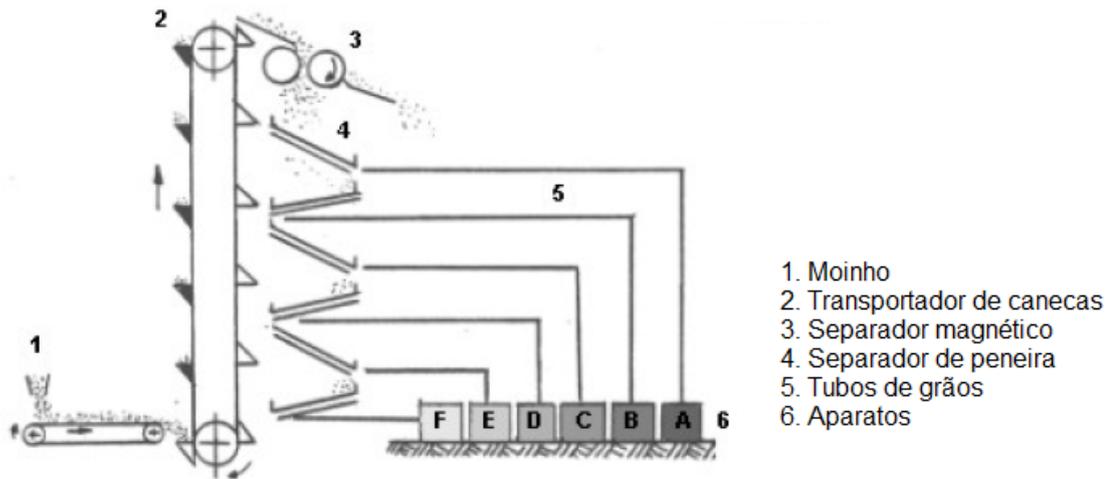
A Europa utiliza a FEPA (Federacion of European Producers of Abrasives) em tradução literal Federação Europeia de Produtores de Abrasivos, como referência de normatização a ISO R 565 de 1990 e também a DIN 848 de 1988, onde o tamanho de abertura das peneiras é dado em microns. (NORTON ABRASIVOS ITNA009, 2012).

2.5.3. Comparação entre as normas ASTM (CAMI) e FEPA

As normas FEPA e ANSI / ASTM (CAMI) são relativamente próximas quanto à classificação do tamanho dos grãos. A norma FEPA possui um limite entre o tamanho de abertura de peneira que permite variar o tamanho do grão entre 5 a 12% e a ANSI possui um limite de tamanho de grão que pode variar entre 8 a 15%. Há também algumas particularidades de uso das normas, onde a norma FEPA é mais direcionada aos produtores de Superabrasivos, principalmente na Europa, e a ANSI mais direcionada para os produtores de abrasivos convencionais. (NORTON ABRASIVOS ITNA009, 2012).

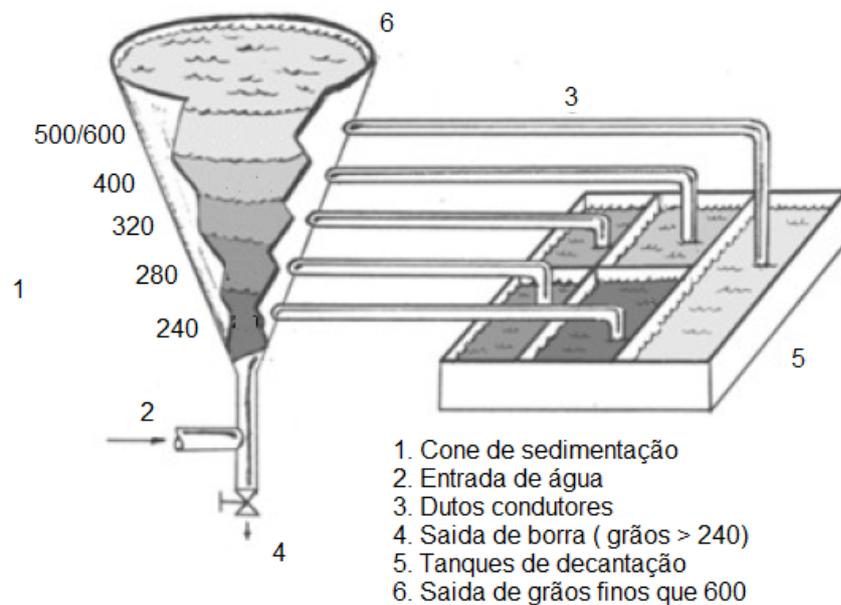
De uma maneira geral, podemos verificar como são feitas as classificações utilizando os dois métodos de separação mais comuns, o método por via gravitacional em peneiras, Figura 28, e a via por sedimentação através de água, Figura 29.

Figura 28 Classificador gravitacional de grãos abrasivos.



Fonte: Saint-Gobain Abrasivos, engenharia de aplicação (ITNA009, 2012).

Figura 29 Classificador por via aquosa de grãos abrasivos.



Fonte: Saint-Gobain Abrasivos, engenharia de aplicação (ITNA009, 2012).

Para fins de normatização de tamanhos de grãos abrasivos, podemos considerar a

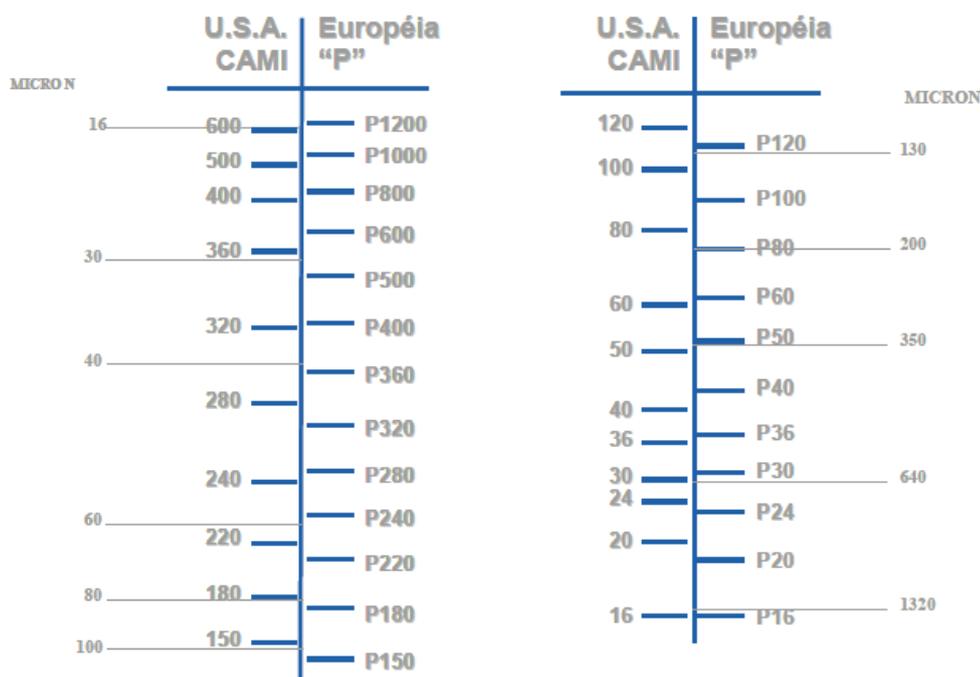
Tabela 4 como referência comparativa entre o tamanho dos grãos abrasivos classificados sob tal normas. Em uma classificação comercial para uso de abrasivos na indústria, podemos utilizar a Tabela 5, que faz referências comerciais aos grãos abrasivos utilizados ao redor do mundo. (NORTON ABRASIVOS ITNA009, 2012).

Tabela 4 Comparativo entre normas FEPA, ISO, ANSI JIS.

FEPA Designation	ISO R 5665—1990 Aperture Range (µm)	ANSI Grit Size	US Grit Number	Japanese (JIS) Size	Particles Per Carat
		Standard			
1181	1,180/1,000	16/18			
1001	1,000/850	18/20			
851	850/710	20/25			
711	710/600	25/30			
601	600/500	30/35			
501	500/425	35/40		35	
426	425/355	40/45			
356	355/300	45/50			
301	300/250	50/60	50	50	2,000
251	250/212	60/70	60		
213	212/180	70/80	80		
181	180/150	80/100	100	80	10,000
151	150/125	100/120	120	100	17,000
126	125/106	120/140	150	120	21,000
107	106/90	140/170	180	140	49,000
91	90/75	170/200	220	170	88,000
76	75/63	200/230	240	200	140,000
64	63/53	230/270	280	230	250,000
54	53/45	270/325	320	270	280,000
46	45/38	325/400	400	325	660,000
Wide range					
1182	1,180/850	16/20			33
892	850/600	20/30		20	
602	600/425	30/40		30	282
502	500/355	35/45			
427	425/300	40/50		40	770
252	250/180	60/80		60	3,000

Fonte: Saint-Gobain Abrasivos, engenharia de aplicação (ITNA009, 2012).

Tabela 5 Comparativo normas CAMI e FEPA.



Fonte: Saint-Gobain Abrasivos, engenharia de aplicação (ITNA009, 2012).

2.6. Ligantes

Segundo Marinescu (MARINESCU, 2004) quanto ao tipo de ligante, os rebolos podem ser divididos em dois tipos: Rebolos que possuem uma única camada fina de ligante acima do grão abrasivo depositada em um corpo geralmente de aço, e rebolos montados com uma camada própria produzida como uma estrutura monolítica sólida. Os rebolos produzidos com uma única camada montada em um corpo de aço, alumínio ou outro material são destinados unicamente para uso com grãos abrasivos do tipo diamantado ou CBN. Os rebolos produzidos de forma a se ter uma estrutura única, monolítica, chamados "vitrificados" podem ser produzidos com ligantes a base de pó de vidro, argila e fluxos químicos como feldespato e bórax. Rebolos montados a base de resina fenólica e produzidos (curados) a temperaturas relativamente baixas são denominados "resinoides".

Segundo Klock (KLOCK, 2011), podemos descrever os três principais ligantes existentes no mercado, de acordo com suas características e suas aplicações: Ligas metálicas para uso em rebolos diamantados ou CBN, ligas vitrificadas utilizadas em operações de precisão e utilizada principalmente com grãos convencionais e ligas

resinoides, utilizadas em operações de desbaste e grandes remoções, e em alguns casos em rebolos com grãos superabrasivos.

2.6.1. Ligas metálicas

As ligas metálicas possuem como contraste das ligas convencionais, a grande capacidade de condutividade térmica. Conforme descrito por Klock (KLOCK, 2011), as propriedades das ligas metálicas podem ser sumarizadas da seguinte forma:

- Alta resistência ao desgaste
- Dificuldade para dresser ou até mesmo não dresserável em alguns casos.
- Alta condutividade térmica
- Alta geração de calor durante processo de retificação.

As ligas metálicas geralmente são produzidas em ligas de cobre e estanho ou cobre e cobalto, porém, em aplicações especiais podemos ter ligas de ferro, cobre e estanho. A característica principal das ligas metálicas é a fixação dos grãos abrasivos no corpo do rebole com uma ligação extremamente forte.

2.6.2. Ligas vitrificadas

Ligas vitrificadas são formadas por uma mistura de silicatos naturais vermelhos e brancos, além de argila, caulim, feldespato e quartzo. Como aditivo é usado uma mistura denominada frits, que é formado por misturas orgânicas e inorgânicas vítreas previamente fundidas e pulverizadas. Uma das finalidades do frits é diminuir a temperatura de queima da mistura. As misturas dos componentes usuais e as suas variações volumétricas determinam a força de ligação na liga aglutinante. As misturas são feitas de acordo com o objetivo e desejo do produto final, o rebole. Uma liga bem balanceada influencia diretamente no resultado esperado de uma operação de retificação (KLOCK, 2011).

Segundo Klock (KLOCK, 2011), podemos ter variações de tempo da mistura na fase vítrea e modificações nas proporções de matéria prima, como:

- Ligações fundidas com uma grande fase vítrea
- Ligações com uma quantidade média de fase vítrea
- Ligações sinterizadas com uma pequena fase vítrea

Nas ligações fundidas, a ligação do grão abrasivo com a liga ocorre por meio de uma fase vítrea com baixa viscosidade, já nas ligações sinterizadas, a força adesiva é o resultado de rearranjo ou de reações sólidas. O ponto de sinterização e o ponto de derretimento da mistura ligante são informações importantes na preparação da liga, pois esta informação irá determinar a temperatura de queima da ferramenta abrasiva nos fornos. (KLOCK, 2011)

2.6.3. Ligas resinóides.

As ligas resinóides são constituídas de resinas sintéticas em sua totalidade, ou uma combinação de resina sintética com enchimento de liga (material que ajudam a dar propriedades mecânicas diferenciadas ao ligante). Há diversas ligas resinóides no mercado que são desenvolvidas de acordo com o tipo de abrasivo, aplicação e método de fabricação da ferramenta abrasiva. No caso de fabricação de ferramentas abrasivas para operação a seco, é comum utilizar phenol resol, assim como é comum utilizar resina fenólica em pó baseada em novolak hexamethylenetetramine (MARINESCU, 2004).

Segundo Marinescu (MARINESCU, 2004), ligas resinóides fenólicas são a segunda liga mais usada na indústria, ficando atrás apenas das ligas vitrificadas. As ligas resinóides são representadas pela letra “B” pois remetem ao primeiro nome reconhecido para ligas fenólicas, a baquelite.

As ligas resinóides são utilizadas em regimes de pressão controlada, onde podemos encontrar variações grandes de esforços aplicados, além do benefício de operarem com velocidades muito superiores as ligas vitrificadas. Ligas resinóides devido à alta velocidade de trabalho, acima de 60 m/s, geralmente são associadas ao uso de reforço mecânico para prevenir quebras devido ao excesso de força centrífuga. Os reforços podem ser internos na forma de fibras de vidro orientadas e ou externas na forma de fibra de poliéster (KLOCK, 2011).

Segundo Marinescu (MARINESCU, 2004), as ligas resinoides também são utilizadas em aplicações de retificação de precisão, onde a capacidade de resiliência da liga é extremamente útil. Estas características da liga são muito exploradas em operações onde é necessária a manutenção do corte nas arestas por períodos longos de contato e com significantes forças resistentes de corte. Ligas resinoides também são utilizadas na produção de rebolos para uso com grãos superabrasivos, particularmente para operações com grãos diamantados, porém, também em tecnologias recentes de formulação de ligas, foram adaptadas para uso em grãos CBN.

2.7. Dureza e estrutura de ferramentas abrasivas

Dureza e estrutura de ferramentas abrasivas estão diretamente ligas entre si. A dureza é o resultado esperado na aplicação de peças obras, mediante a uma percentagem entre grãos abrasivos e ligas aglutinantes, sendo que a estrutura interage nesta equação quando mensuramos o volume de grão e o volume de liga, atrelado aos espaços vazios (poros) resultantes do processo final de prensagem e eventual cura ou queima da ferramenta abrasiva. A estrutura e dureza das ferramentas abrasivas são consideradas segredos industriais dos fabricantes de ferramentas e podem variar sensivelmente os valores de fabricantes para fabricante. (MARINESCU, 2004)

Segundo Coes (COES, 1971), o fabricante Norton abrasivos, classificava a relação de estrutura conforme a numeração:

Tabela 6 Estrutura versus percentual de abrasivo segundo COES.

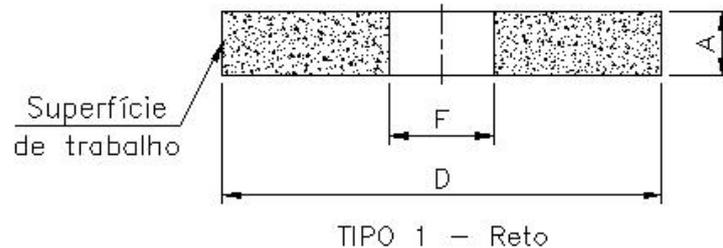
Estrutura	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Percentual de abrasivo	68	64	60	58	56	54	52	50	48

Fonte: Applied Mineralogy 1–Abrasives. Springer-Verlag (COES, 1971).

2.8. Estruturas geométricas das ferramentas abrasivas

Os formatos das ferramentas abrasivas são definidos de acordo com a necessidade da operação. Elas podem variar em formatos geométricos e em unidades dimensionais e são definidas pela norma de fabricação ABNT NBR 15230 e ANSI B7.1. A forma geométrica utilizada neste trabalho é definida abaixo Figura 30

Figura 30 Rebolo formato 1A1.



Fonte: Catálogo de formatos de rebolos – engenharia de aplicação Norton Abrasivos (NORTON, 2015).

2.9. Materiais metálicos – Peça obra

No que tange a respeito da peça obra utilizada nos processos de retificação, é sempre necessário a definição de qual material será retificado, qual a rugosidade superficial final requerida e qual a variação dimensional que este material deverá sofrer.

2.9.1. Aço SAE/AISI 1045

Segundo Callister e Rethwisch (CALLISTER e RETHWISCH, 2016), aços são ligas ferro-carbono que contém concentrações variáveis de outros elementos de liga, além de ferro e carbono. As propriedades mecânicas do aço são extremamente sensíveis ao percentual de carbono da liga (geralmente são menores que 1,0%). O aço SAE/AISI 1045 é considerado um aço comum com médio teor de carbono, contendo também manganês em sua formulação, sendo um dos materiais mais utilizados na indústria em geral.

Característica do AÇO SAE 1045 utilizado no corpo de prova:

- Teor de carbono (%) 0,45
- Limite de escoamento (MPa) 310
- Resistência a tração (MPa) 560
- Alongamento (%) 17
- Dureza média encontrada: 202 HB

2.9.2. Latão liga C360

Segundo Callister e Rethwisch (CALLISTER e RETHWISCH, 2016), latão é uma liga comum, obtido pela adição do zinco (Zn) ao cobre puro (Cu), sendo estável até uma concentração máxima de 35% de zinco. Uma das ligas mais comuns do latão é a C360, utilizada em aplicações onde se espera principalmente uma resistência elevada à oxidação.

Característica do Latão C360 utilizado no corpo de prova:

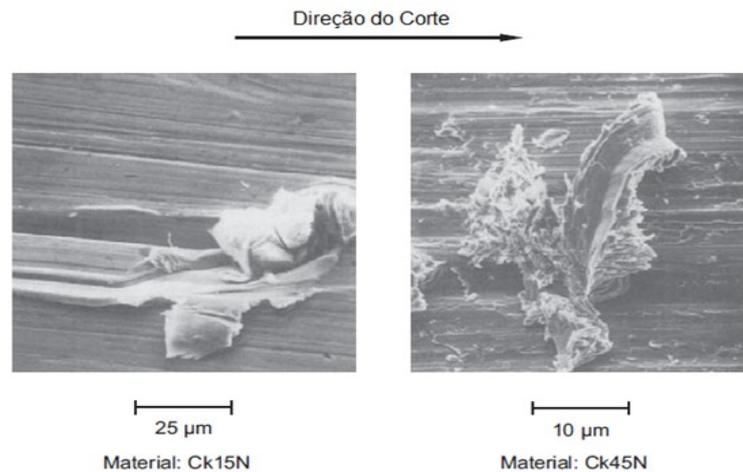
- Cobre - 60% a 63%
- Chumbo - 2,50% a 3,00%
- Ferro – 0,35% máximo
- Zinco – Restante
- Limite de escoamento (MPa) 120
- Resistência a tração (MPa) 310
- Alongamento (%) 25
- Dureza média encontrada: 125 HB

2.10. Fundamentos da retificação

O conhecimento dos princípios fundamentais do processo de retificação é essencial para atingir o potencial máximo de um processo de retificação. É necessário considerar todos os componentes que se interagem no instante da retificação, como o rebolo abrasivo, os parâmetros do processo de retificação, o tipo de refrigerante utilizado, o tipo de material da peça obra, e os esforços atuantes. Este conhecimento

é primordial para a definição do abrasivo utilizado no processo versus a peça obra a ser retificada. A determinação das arestas cortantes usadas no processo é amparada pela complexa microestrutura de um rebolo abrasivo. Devido a grande quantidade de grãos abrasivos que interagem com a superfície da peça obra, além da diversidade de grãos abrasivos (formulação física e química) podemos ter a formação de cavacos totalmente distintos para cada processo (KLOCK, BARTHA, PATRICK , 2016).

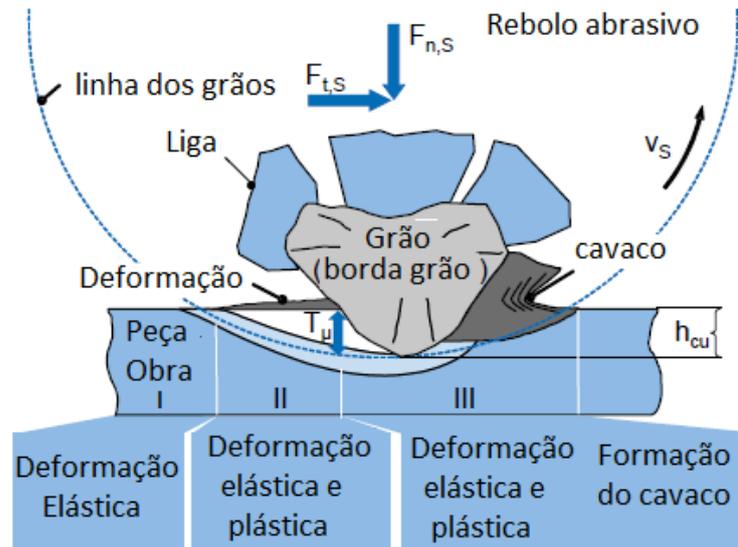
Figura 31 Imagens de cavacos obtidas com MEV em aço forjado Ck45N.



Fonte: Manufacturing process – Cutting (KLOCK, 2011).

Durante o processo de interação de um único grão abrasivo com o material retificado, acontece em um primeiro momento a deformação do grão abrasivo contra a peça obra. Com este esforço realizado pelo grão abrasivo sobre superfície da peça obra, ocorre que a peça obra primeiro atinge seu limite elástico seguido do atingimento do limite plástico, gerando a deformação definitiva da superfície, formando assim o cavaco que é expelido da peça obra após o esforço de cisalhamento final. Este processo é realizado incontáveis vezes por segundo, e é demonstrado esquematicamente na Figura 32 (FRITZ KLOCKEA, SEBASTIAN BARTHA, PATRICK MATTFELDA ,2016).

Figura 32 Imagem esquemática da interação entre o grão abrasivo e a superfície da peça obra.



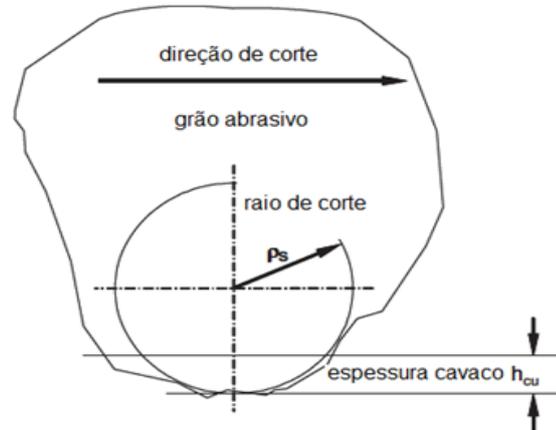
Fonte: Manufacturing process – Cutting (KLOCK, 2011).

O processo de interação profunda entre a superfície do grão abrasivo exatamente no ponto de contato, a abrasão e a penetração da peça obra é chamado de cinemática da superfície do grão abrasivo (KLOCK, 2011).

2.10.1. Formação do cavaco

Durante o processo de retificação o grão abrasivo penetra na superfície da peça obra em um caminho plano, e depois de uma fase de deformação elástica, desencadeia o início da fase de deformação plástica. Devido à forma da aresta de corte o contorno à superfície da peça obra, não há formação do cavaco inicial, o material removido em um primeiro momento é simplesmente deslocado para o lado, somente quando há a penetração profunda do grão abrasivo é que começa a formação do cavaco, Figura 33, (LORTZ, 1975; MASSLOW, 1952; STEFFENS, 1978).

Figura 33 Altura de formação do cavaco em uma peça obra.

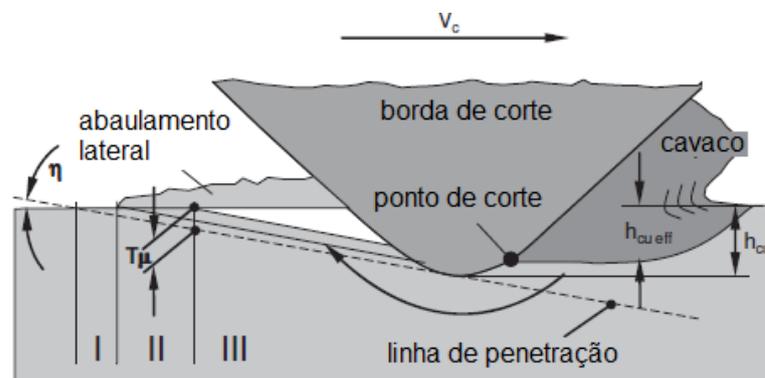


Fonte: Manufacturing process – Cutting (KLOCK, 2011).

2.10.2. Uso de refrigerante no processo de retificação

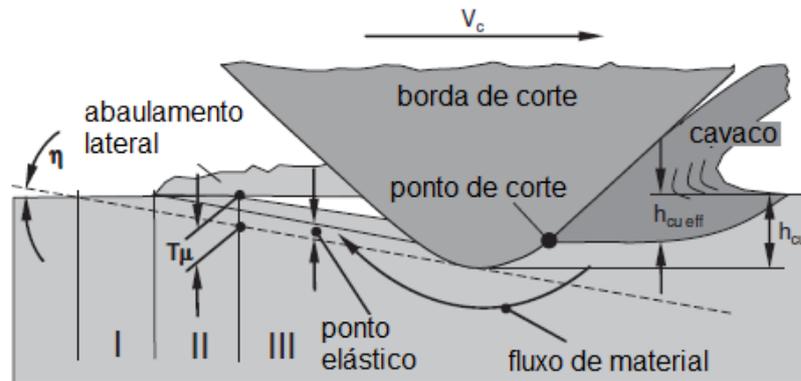
Para entender melhor a formação do cavaco é preciso entender a diferenciação de trabalhar a retificação do material com o uso de refrigerante (com atenção a proporção de lubrificante na emulsão de água) e o não uso destas substâncias, isto é um ponto importante na definição de retificação com via úmida ou retificação a seco. Como regra geral o uso de refrigerante aumenta a profundidade de corte da operação devido a um aumento da penetração do grão abrasivo, gerando uma deformação plástica mais profunda e duradoura. Porém, o aumento de lubrificante (proporção na mistura com água) nos refrigerantes diminui a eficiência de corte e material removido, reduzindo com isto o tamanho do cavaco, conforme Figura 34 e Figura 35 (KLOCK, 2011).

Figura 34 Penetração de grão abrasivo sem refrigeração.



Fonte: Manufacturing process – Cutting (KLOCK, 2011).

Figura 35 Penetração de grão abrasivo com refrigeração.



Fonte: Manufacturing process – Cutting (KLOCK, 2011).

Segundo Klock (KLOCK, 2011), investigações mais recentes indicam que além do uso do refrigerante, as variações abaixo no processo, influenciam nos parâmetros de $h_{cu\ eff}$ e T_{μ} .

- Raio da borda do grão ρ_s
- Ângulo efetivo de corte η
- Velocidade de corte V_c
- Propriedades do fluxo do material

O uso do refrigerante permite um controle maior da temperatura da peça obra, uma vez que com o aumento da temperatura no ponto de intercessão do grão abrasivo com a peça obra, há também um aumento da penetração deste grão, devido o material se tornar mais dúctil naquele ponto. Porém há um aumento limitado devido ao endurecimento por deformação ter o efeito mais forte neste ponto (KLOCK, 2011).

2.10.3. Rugosidade cinemática

Quando consideramos o processo como um todo, a velocidade de corte V_c é uma vetorização entre a velocidade da peça obra V_w e a velocidade periférica do abrasivo V_s . Devido a isto, teremos variação da rugosidade cinemática quando consideramos em que estágio o processo de retificação se encontra, com isto temos

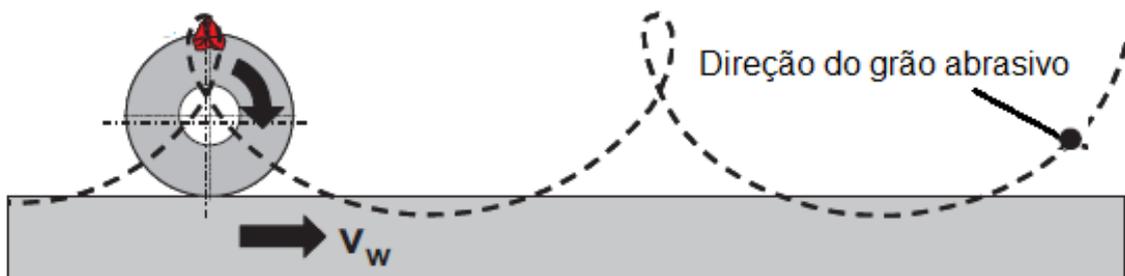
variações entre moagem e trituração, dependendo da posição de avanço da peça obra com relação à direção de giro do rebolo, conforme Figura 36 e Figura 37 (EICH, 1997).

Figura 36 Imagem esquemática de processo de trituração.



Fonte: Manufacturing process – Cutting (KLOCK, 2011).

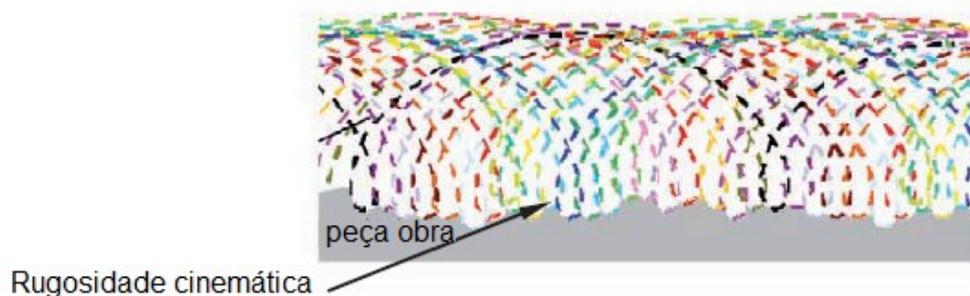
Figura 37 Imagem esquemática de processo de moagem.



Fonte: Manufacturing process – Cutting (KLOCK, 2011).

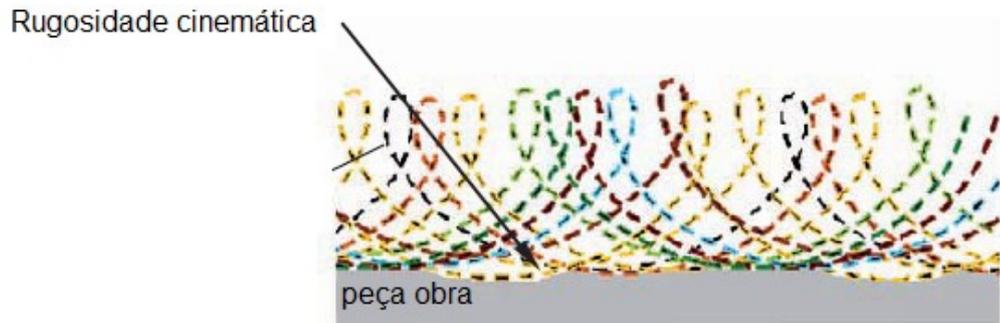
A rugosidade cinemática se modifica dependendo do estágio em que a retificação se encontra, conforme Figura 38 e Figura 39 podemos entender como esta modificação do sentido de corte altera a característica superficial da peça obra. (KLOCK, 2011)

Figura 38 Rugosidade cinemática no movimento de trituração.



Fonte: Manufacturing process – Cutting (KLOCK, 2011).

Figura 39 Rugosidade cinemática no movimento de moagem.



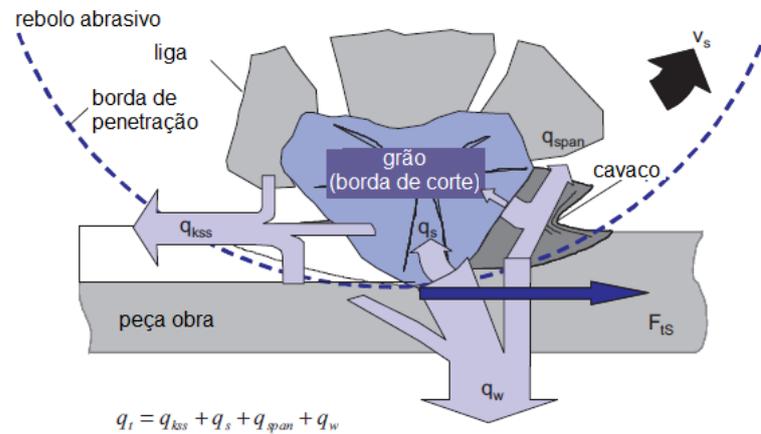
Fonte: Manufacturing process – Cutting (KLOCK, 2011).

2.10.4. Distribuição de força e energia

A distribuição de força e energia pode ser considerada ambas microscópicas quando comparadas a um único grão abrasivo. Desta forma é mais fácil de entender o que acontece microscopicamente antes de analisar o processo com um todo. A força de corte sobre um grão individual durante o processo de retificação pode ser derivada em duas componentes, F_{ts} em direção a componente da velocidade, e a F_{ns} em relação a componente normal. O quociente entre F_{ts} / F_{ns} é chamado de raio da força de corte μ . Durante a fase de deformação do material puro, Figura 40, a força F_{ns} , com a qual a borda de corte deve ser pressionada na peça obra é consideravelmente maior que a força F_{ts} , conforme o cavaco começa a se formar a força F_{ts} aumenta, superando a força F_{ns} (RUBENSTEIN 1967).

A principal parcela de energia envolvida no processo é convertida em calor, sendo assim, todo o sistema envolvido na retificação experimenta estresse térmico e dissipação de calor. Conforme Figura 40 a taxa de calor resultante do processo qt , se espalha na zona de contato da usinagem pelo rebolo (qs), pela peça obra (qw) pelo cavaco formado ($qspan$) e pelo lubrificante ($qkss$) no caso de operações refrigeradas (JAEGER, 1942).

Figura 40 Dissipação de calor e energia durante penetração do grão abrasivo.



Fonte: Manufacturing process – Cutting (KLOCK, 2011).

É importante entender o mecanismo de energia e geração de calor de uma operação abrasiva, pois dependendo da magnitude da pressão aplicada, do tempo de retificação, o calor residual que é transferido para a peça obra pode produzir mudanças estruturais significativas na superfície do material usinado (KLOCK, 2011).

3. Materiais e métodos

Neste item estaremos descrevendo os materiais utilizados neste projeto, e as metodologias realizadas para seu respectivo desenvolvimento.

3.1. Materiais

Foi produzido cinco diferentes blendas de ferramentas abrasivas (rebolo resinoide), com diferentes combinações de grãos abrasivos em óxido de alumínio marrom e carbeto de silício preto. Os corpos de prova utilizados para retificação (peça obra) foram em aço SAE 1045 e latão C360

3.1.1. Corpos de prova para retificação

Foram utilizados dois tipos de material como corpo de prova para a retificação, um ferroso (aço) conforme especificação SAE 1045 e um não ferroso (latão) conforme especificação C360. Os corpos de prova foram cortados no comprimento de 100 mm provenientes de uma barra de secção 12,4mm x 50mm utilizando um disco de corte de 115mm de diâmetro por 1,0mm de espessura. Utilizou-se um total de dez corpos de prova de cada material. Todos os corpos de provas foram retirados de uma única barra, de forma a não termos nenhuma variação de material proveniente de produções diferentes. A dureza média verificada nos corpos de provas foram 202HB para o SAE 1045 e 125HB no latão C360.

3.1.2. Rebolos

Os rebolos utilizados nos experimentos foram todos produzidos pela empresa Saint-Gobain Abrasivos, de forma a atender a norma ABNT NBR 15230 que versa sobre fabricação de ferramentas abrasivas. As ferramentas abrasivas utilizadas nos experimentos foram produzidas em cinco combinações distintas conforme Tabela 7, utilizou-se para todos os rebolos a mesma estrutura, dureza e liga.

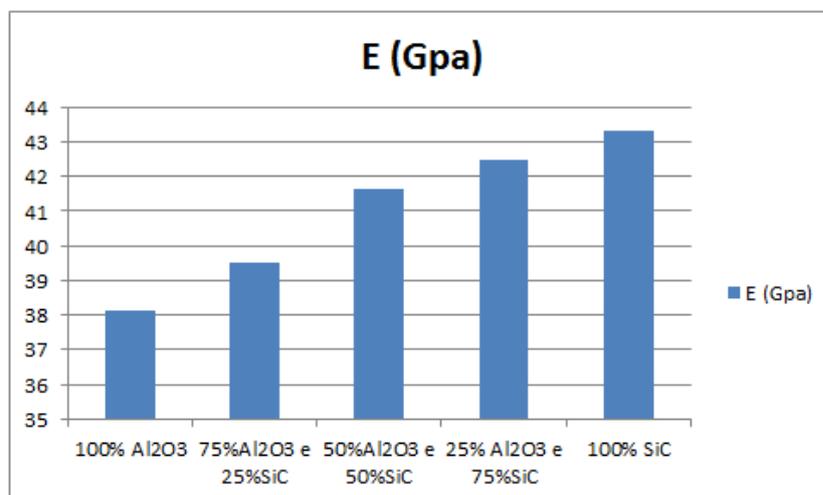
Os rebolos foram produzidos em uma granulometria média correspondente a 46 *mesh*, com ligante a base de resina fenólica e cura de 24 horas. Suas dimensões foram 203 mm de diâmetro, 19 mm de altura e furo 32 mm.

Tabela 7 – Composição dos rebolos utilizados nos experimentos.

Nome dos rebolos	Al ₂ O ₃	SiC
1R1	100%	0%
1R2		
1R3		
1R4		
1R5		
2R1	75%	25%
2R2		
2R3		
2R4		
2R5		
3R1	50%	50%
3R2		
3R3		
3R4		
3R5		
4R1	25%	75%
4R2		
4R3		
4R4		
4R5		
5R1	0%	100%
5R2		
5R3		
5R4		
5R5		

Fonte: Do autor.

Tabela 8 Dureza média dos rebolos (Gpa) realizada no Sonelastic.



Fonte: Do autor.

3.2. Métodos

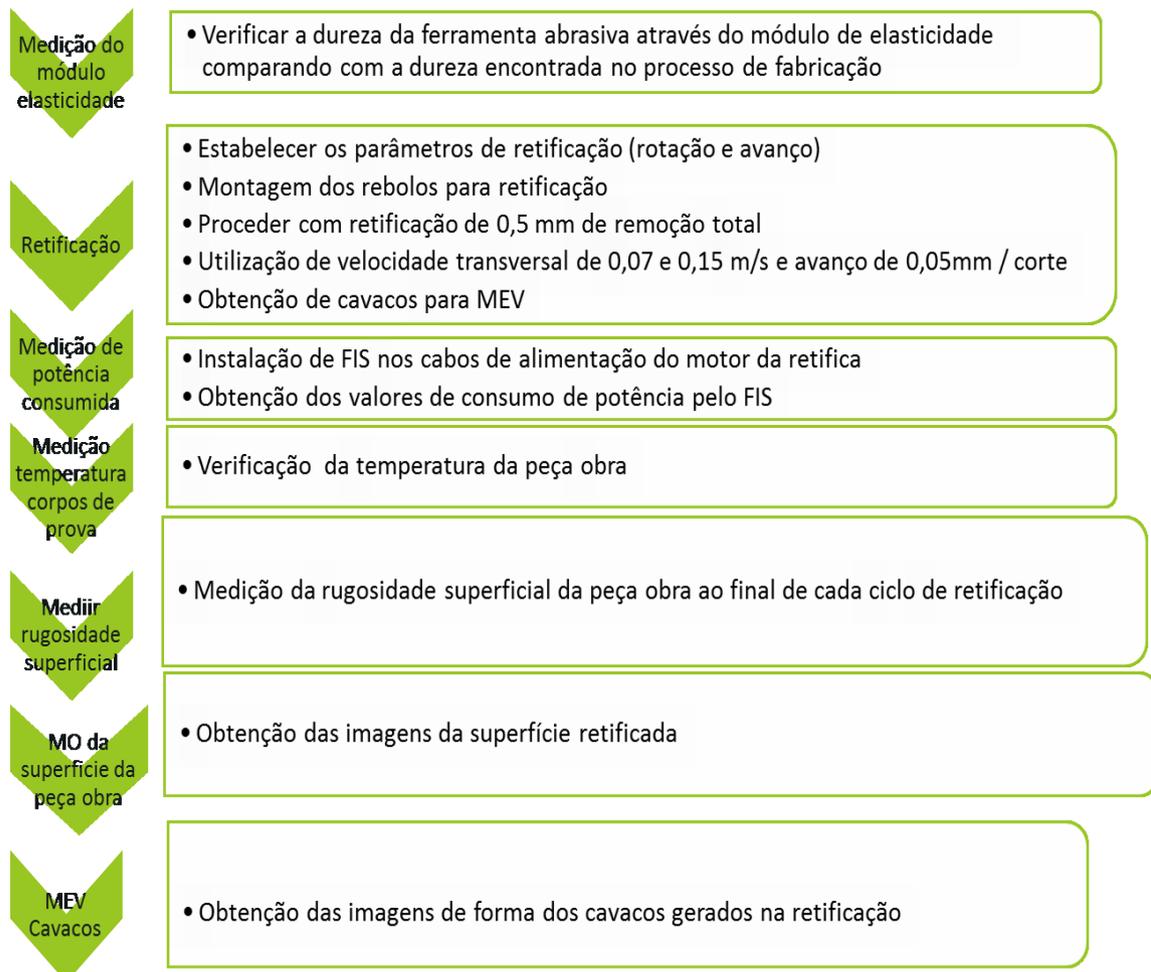
3.2.1. Preparação dos rebolos

Conforme mencionado no item 3.1.2 todos os rebolos foram produzidos pela empresa Saint-Gobain Abrasivos sendo os mesmos confeccionados sob cartas de fabricação interna de mistura e tempo de queima, obedecendo parâmetros de produção para rebolos comerciais do fabricante. Todos os rebolos foram confeccionados na faixa “R” de dureza, (esta informação de dureza “R” é sigilosa da Saint-Gobain Abrasivos não sendo permitido discutir mais sobre a mesma).

3.2.2. Ensaios de retificação

Todo o processo utilizado neste experimento é demonstrado na Figura 41

Figura 41 Fluxograma do processo do experimento.



Os processos de retificação das amostras foram realizados utilizando uma retificadora transversal marca Ferdimat, modelo TA42, pertencente ao laboratório de retificação da Escola de engenharia de Lorena (EEL/USP) conforme apresenta a

Figura 42.

Figura 42 Retificadora transversal FERDIMAT TA42.



Fonte: Catálogo fabricante FERDIMAT TA42.

A velocidade periférica dos rebolos em todos os testes foi de aproximadamente 35 m/s (3200 rpm), sem alterações durante todo o processo, e o avanço por passe de 0,005 mm. O desbaste total realizado por operação em cada uma das amostras foi de 0,5 mm. Para cada tipo de rebolo, foram realizados duas repetições de ensaios de retificação, para cada corpo de prova (SAE 1045 e latão C360). Utilizou-se as velocidades de avanço transversal de 0,07 m/s e 0,15 m/s.

Os valores de temperatura apurada no processo através de termometria à distância foram obtidas utilizando-se termômetro a laser *Infrared*® modelo DT 8380, e foi realizada para todos os experimentos no exato momento do último passe de desbaste na superfície do corpo de prova retificado.

Durante todo o processo de retificação dos ensaios foi feito o acompanhamento em tempo real da potência requerida pela retificadora, pelo equipamento de monitoração remota FIS®, pertencente à Saint-Gobain Abrasivos.

Para cada condição de ensaio, utilizou-se um corpo de prova e um rebolo com as condições iniciais de produção, sendo a retifica pertencente a EEL/USP (Escola de Engenharia de Lorena).

Abaixo temos a tabela 8 com as condições de cada teste, considerando o rebolo, o corpo de prova e as velocidades empregadas.

Tabela 9 Condição de contorno dos testes realizados.

Rebolo	Peça obra	Velocidade Transversal	Condição
1R1	Não considerado		T1R1
1R2	Aço	0,15 m/s	T1R2
1R3	Latão	0,15 m/s	T1R3
1R4	Latão	0,07 m/s	T1R4
1R5	Aço	0,07 m/s	T1R5
2R1	Latão	0,15 m/s	T2R1
2R2	Aço	0,15 m/s	T2R2
2R3	Latão	0,07 m/s	T2R3
2R4	Aço	0,07 m/s	T2R4
2R5	Não considerado		T2R5
3R1	Latão	0,15 m/s	T3R1
3R2	Aço	0,15 m/s	T3R2
3R3	Aço	0,07 m/s	T3R3
3R4	Latão	0,07 m/s	T3R4
3R5	Não considerado		T3R5
4R1	Não considerado		T4R1
4R2	Aço	0,15 m/s	T4R2
4R3	Latão	0,07 m/s	T4R3
4R4	Aço	0,07 m/s	T4R4
4R5	Latão	0,15 m/s	T4R5
5R1	Latão	0,15 m/s	T5R1
5R2	Aço	0,15 m/s	T5R2
5R3	Latão	0,07 m/s	T5R3
5R4	Aço	0,07 m/s	T5R4
5R5	Não considerado		T5R5

Fonte: Do autor.

3.2.3. Módulo de elasticidade

Foi utilizado o equipamento *Sonelastic*® para caracterizar as durezas dos rebolos através dos módulos de elasticidade dinâmicos (GPa) utilizando a técnica de excitação por impulso. Esta caracterização complementa o modelo tradicional de caracterização de dureza através de faixas de dureza utilizado pelos fabricantes. A Figura 43 apresenta o equipamento *Sonelastic*® utilizado para a determinação do módulo de elasticidade. Equipamento pertencente a EEL/USP (Escola de Engenharia de Lorena)

Figura 43 *Sonelastic*® para caracterização de dureza dos rebolos.



Fonte: Folder do fabricante ATCP engenharia Física.

3.2.4. Temperatura dos corpos de prova retificados

Para a leitura da temperatura final do processo de retificação em cada um dos corpos de prova foi utilizado o termômetro por infravermelho guiado a laser do fabricante *Infrared*® modelo DT 8380 com capacidade de medição de -50°C a +380°C. É muito importante o controle da variação da temperatura em um material retificado, pois altas temperaturas residuais podem causar modificações estruturais na superfície do material retificado.

Figura 44 *Infrared*® DT 8380.

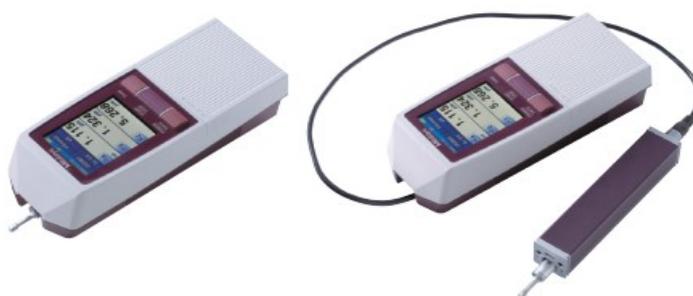


Fonte: Página do fabricante na internet, acessado em 14/10/2017.

3.2.5. Rugosidade superficial

Para a determinação da rugosidade das superfícies retificadas utilizou-se o rugosímetro portátil modelo *Surftest*® SJ-210 série 178, marca Mitutoyo com a calibração de 0,75mN. A análise da retificação permite verificar o resultado do acabamento deixado pela ferramenta abrasiva na peça obra, e pode variar devido a diversos fatores, como tamanho do grão abrasivo, velocidade do rebole, velocidade transversal da peça obra e pressão de corte.

Figura 45 Rugosímetro – *Surftest*® SJ-210 série 178 – Mitutoyo.



Fonte: Catálogo do Fabricante Mitutoyo.

3.2.6. Potência consumida pela retifica

O FIS® (*Field Instrumentation System*) é um equipamento desenvolvido pela empresa Saint-Gobain Abrasivos para monitoramento autônomo de processos de retificação. Este dispositivo faz uma análise da potência consumida durante a

retificação versus o avanço que a ferramenta abrasiva faz contra a peça retificada. A

Figura 46 apresenta o equipamento.

Figura 46 FIS® (*Field Instrumentation System*).



Fonte: Saint-Gobain Abrasivos – engenharia de aplicação.

A análise dos dados e gráficos deste equipamento permite determinar qual parte do processo está demandando mais energia, permitindo comparar ferramentas abrasivas diferentes em um mesmo processo, identificar excesso de carga de retificação e outras análises importantes.

3.2.7. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O microscópio da marca *Oxford Instruments* modelo LEO-1550VP com EDS acoplado (Figura 47) foi utilizado para as análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em amostras de grãos abrasivos constituintes dos rebolos confeccionados para os experimentos e análise dos cavados residuais de cada operação de retificação. Equipamento pertencente a EEL/USP (Escola de engenharia de Lorena).

Figura 47 – Microscópio eletrônico de varredura *Oxford Instruments* modelo LEO-1550VP.



Fonte: Catálogo do fabricante.

3.2.8. Microscópio ótico (MO)

O microscópio da marca Leica modelo DM-IRM foi utilizado para as análises por microscopia ótica das superfícies das peças obras após o processo de retificação. Equipamento pertencente a EEL/USP (Escola de engenharia de Lorena), Figura 48

Figura 48 Microscópio ótico Leica modelo DM-IRM.



Fonte: catálogo do fabricante.

4. Resultados e discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com os ensaios de retificação realizados.

4.1. Resultados de retificação com rebolo 100% Al_2O_3

A Figura 49 apresenta imagens das superfícies dos corpos de prova C360 e SAE 1045 após processo de retificação. Nota-se uma tendência de um acabamento mais grosseiro na condição T1R3 e T1R2 devido à utilização de velocidades tangenciais maiores. Nota-se um aspecto de queima superficial muito mais intenso na amostra T1R2. Segundo Deonísio *et al* (DEONÍSIO, 1999), o aumento da velocidade de deslocamento transversal influencia diretamente na redução da rugosidade final e na geração de calor devido a um aumento das forças atuantes na retificação e das deflexões geradas.

Figura 49 Imagem superfície peça obra após retificação com rebolo 100% Al_2O_3 .



Fonte: Do autor, 2017.

A tabela 9 apresenta os resultados de rugosidade, e temperatura obtida para os corpos de prova C360 e SAE1045 após o processo de retificação. Observa-se que o rebolo, apesar de operar nas mesmas condições de tamanho de grão, não consegue manter o mesmo nível de acabamento quando comparamos o acabamento no aço e latão. Observa-se uma variação térmica grande nas amostras de SAE 1045 quando há aumento da velocidade transversal o que não ocorre nas amostras de C360. A

variação do acabamento mensurado pela variação da rugosidade encontrada nos corpos de provas em C360 e SAE 1045 é explicada pela diferença de velocidade transversal de 0,07 m/s e 0,15 m/s e pelos esforços de retificação no SAE 1045 superiores ao C360. Esta variação de esforços de corte entre os corpos de prova também leva a geração de calor superior nos corpos em SAE 1045 quando comparados ao C360.

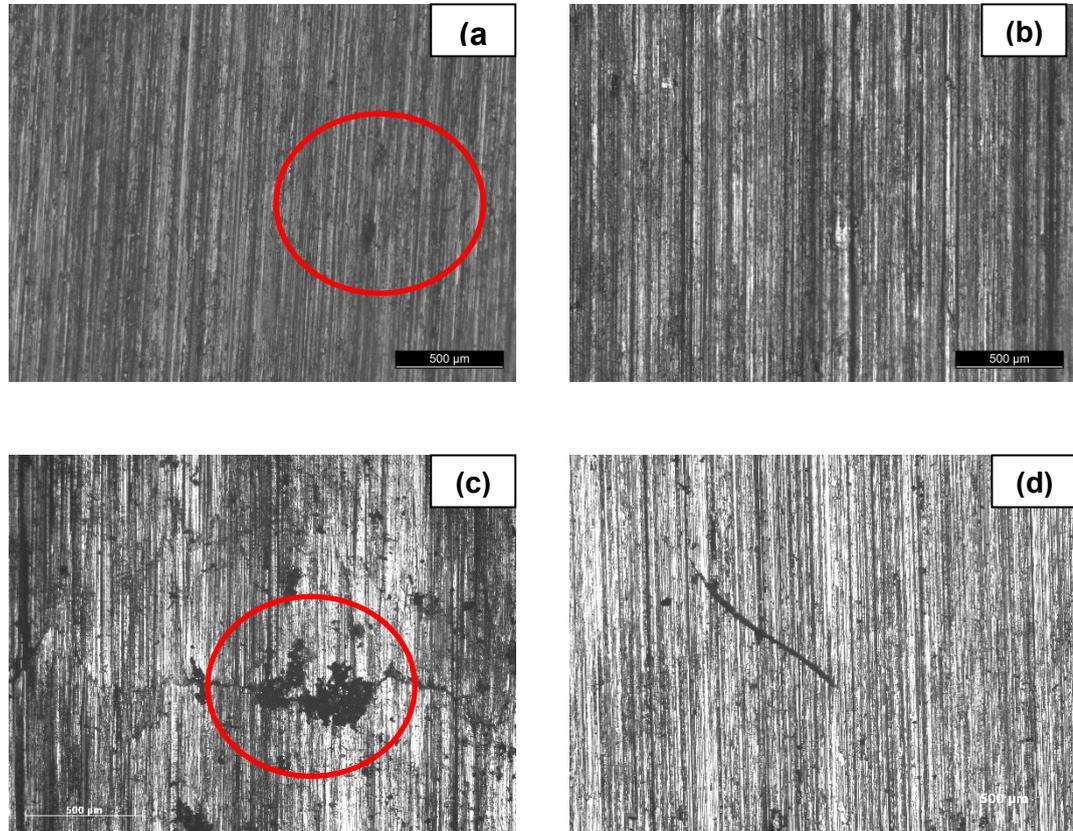
Tabela 10 Resultados de rugosidade e temperatura dos corpos de prova C360 e SAE 1045, retificados com rebolos 100% Al₂O₃.

Corpos de prova	Condição	Velocidade transversal	Rugosidade Ra (μm)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
C360	T1R3	0,15 m/s	3,67	51
	T1R4	0,07 m/s	4,88	53
SAE 1045	T1R2	0,15 m/s	1,88	221
	T1R5	0,07 m/s	5,39	145

Fonte: do autor, 2017

A Figura 50 apresenta as imagens obtidas por MO da superfície dos corpos de provas de C360 e SAE 1045 após retificação. As imagens não apresentam diferenças significativas de acabamento superficial e todos os riscos se encontram paralelos. Observa-se uma tendência a um arrancar maior de material quando se utiliza velocidades maiores, figura 49 (a) e (c), conforme grafados em vermelho.

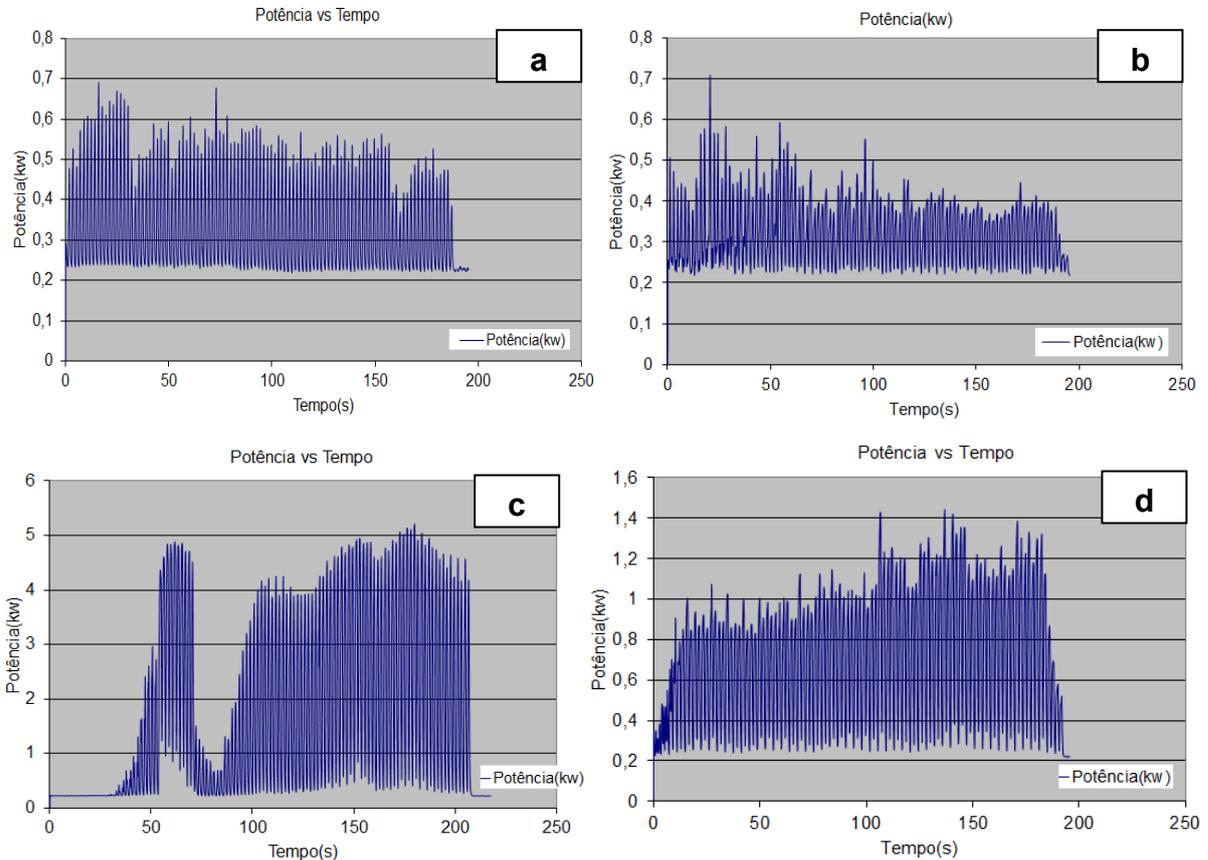
Figura 50 - Imagens de MO da superfície retificadas dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 100% Al_2O_3 .



Fonte: Autor, 2017.

A Figura 51 apresenta os resultados de consumo de potência durante à retificação obtidos com a utilização do FIS. Observa-se um consumo muito maior de potência do equipamento na retificação do SAE 1045 quando consideramos o aumento de velocidade transversal, o que não acontece na mesma proporção com o C360, que demanda menor avanço e menor consumo de potência, mesmo com condições diferentes de velocidade transversal.

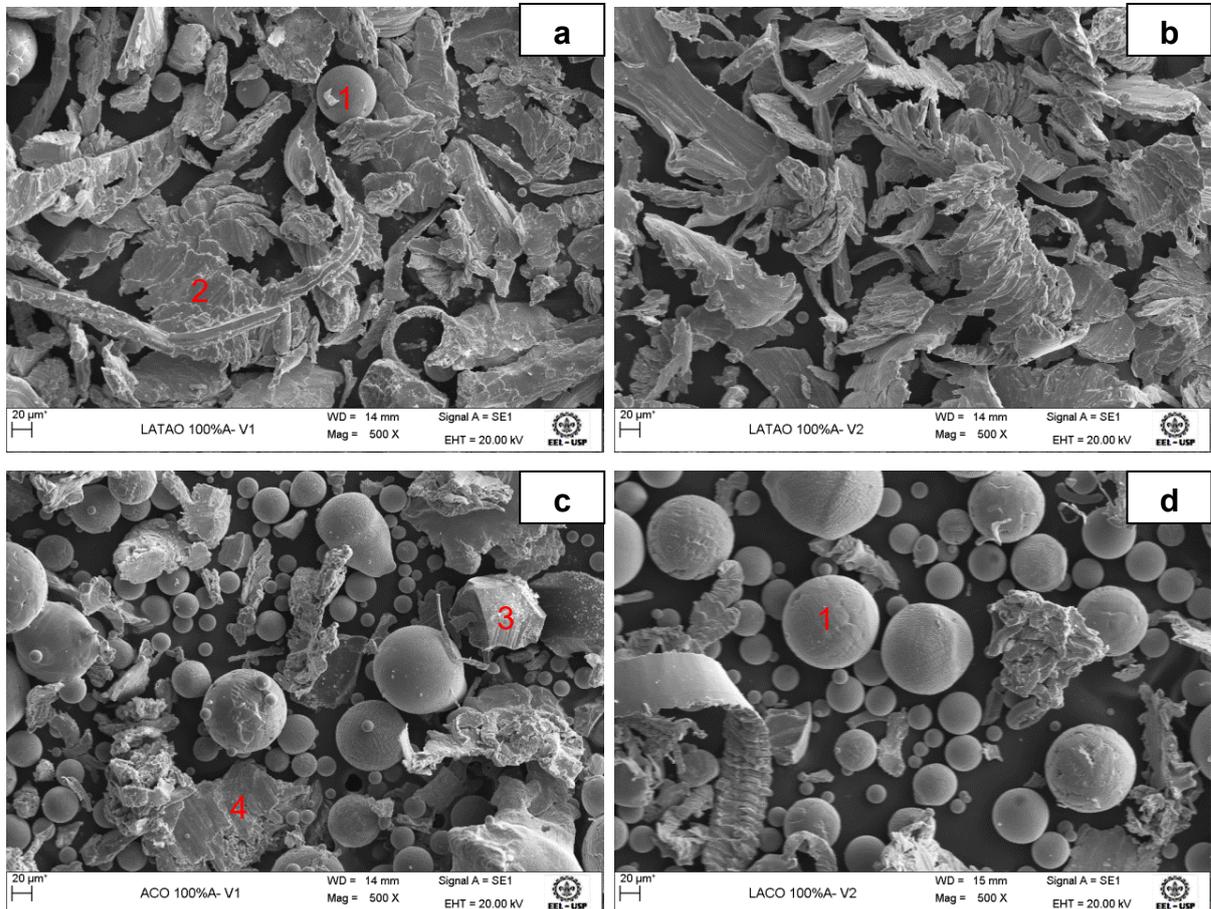
Figura 51 Gráfico do consumo de potência empregado na retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t= 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t= 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t= 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t= 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 100% Al_2O_3 .



Fonte: Do autor, 2017.

Na, Figura 52 observamos imagens obtidas pelo MEV dos cavacos resultantes do processo de retificação. Na figura 51(a) nota-se o aparecimento de Fe (1), provavelmente devido ao Fe residual da bauxita, matéria prima para a produção do Al_2O_3 , o que não percebemos na figura 51(b). Para as figuras 51(a) e (b) observa-se que o cavaco se torna mais longo (2) com velocidade menor. Nas figuras 51(c) e (d) observamos a mesma formação de Fe, porém com intensidade muito maior, na figura 51(c) notamos o cavaco do aço retificado (4). Na mesma nota-se também partes de grãos abrasivos (3), provenientes do grande esforço de retificação que gera soltura precoce do grão abrasivo do ligante.

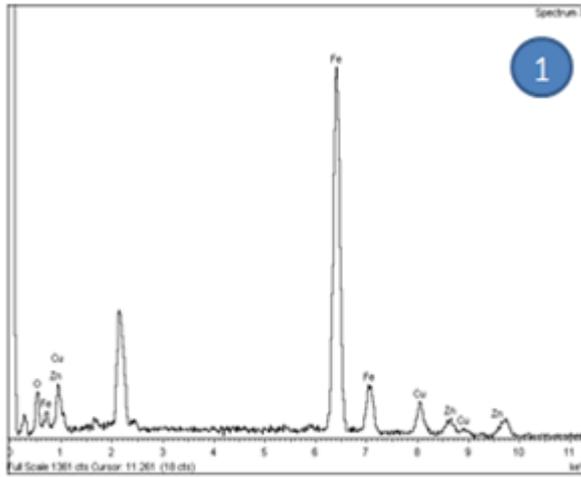
Figura 52 Imagens MEV dos cavacos provenientes da retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 100% Al_2O_3 .



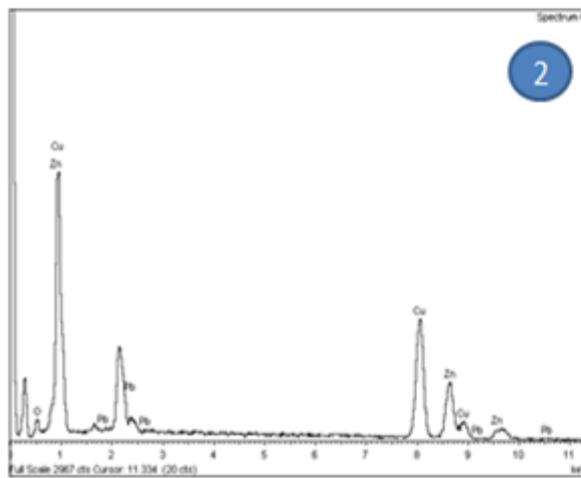
Fonte: Do Autor, 2017

Os dados dos elementos químicos encontrados pela análise por EDS dos cavacos estão demonstrados nas figuras 52 e 53. O resultado desta análise mostra que o ponto 1 identificado na imagem 51(a) é uma partícula de ferro provinda do próprio rebole uma vez que o corpo de prova é um latão do tipo C360. A figura 53 mostra que todos os pontos que foram realizados o EDS no cavaco gerado pela retificação do aço SAE 1045 apresenta uma quantidade elevada de ferro, provindo principalmente do material do corpo de prova.

Figura 532 EDS MEV Latão C360 - Geradas dos cavacos provenientes da retificação dos corpos de prova C360.



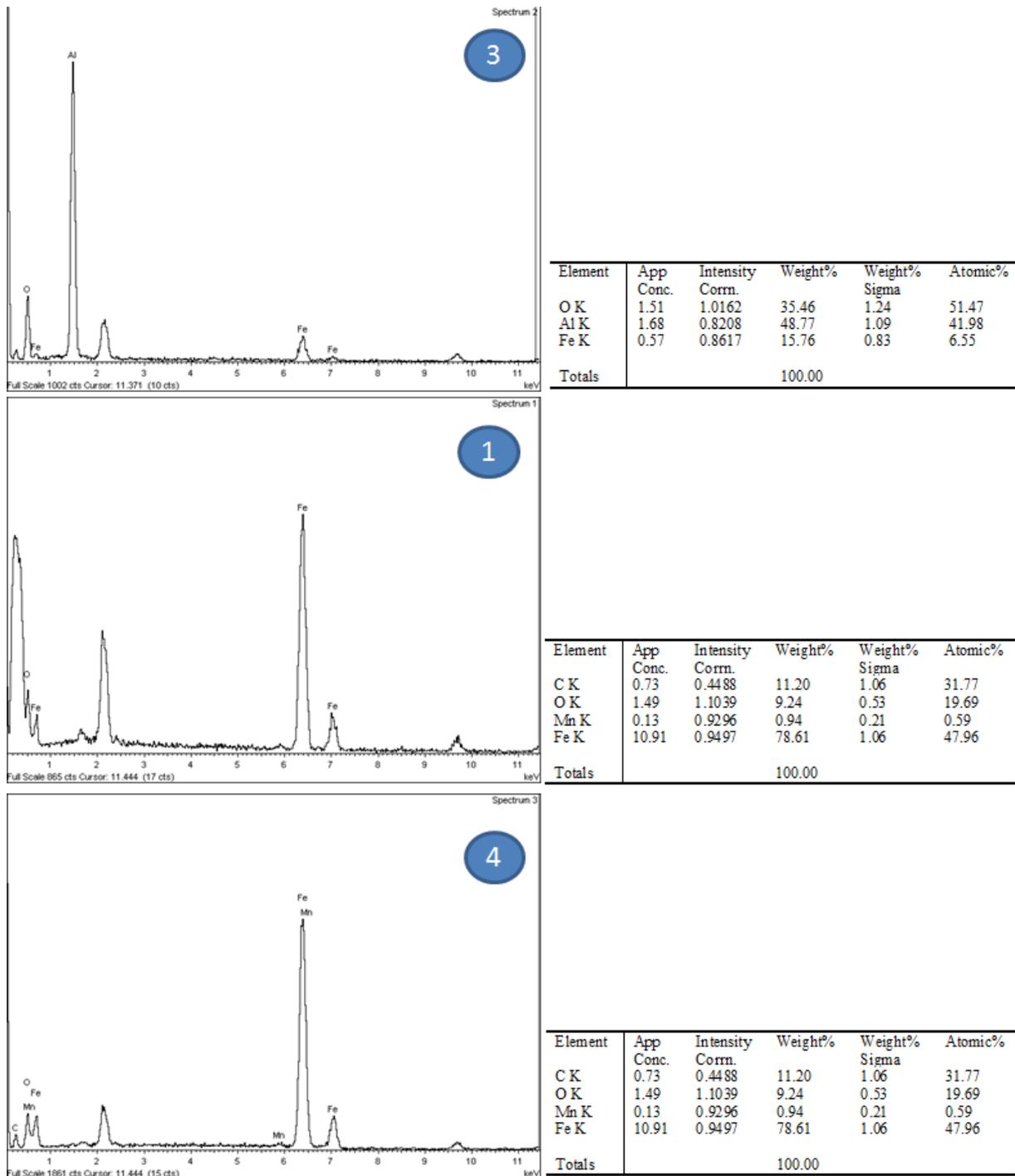
Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	1.13	1.2911	6.47	0.42	19.89
Fe K	10.08	1.0059	74.34	0.83	65.42
Cu K	1.47	0.8665	12.54	0.60	9.70
Zn K	0.79	0.8839	6.64	0.67	4.99
Totals			100.00		



Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	0.24	0.9536	3.76	0.57	20.02
Cu K	2.50	0.9856	58.09	1.70	50.82
Zn K	1.44	0.9891	33.43	1.53	28.42
Pb M	0.08	0.6893	2.72	1.44	0.73
Totals			100.00		

Fonte: Do Autor, 2017.

Figura 53 EDS MEV Aço SAE 1045 - Geradas dos cavacos provenientes da retificação dos corpos de prova SAE 1045.



Fonte: Do Autor, 2017.

4.2. Resultados de retificação com rebolo 75% Al₂O₃ 25% SiC

A figura 54 apresenta as imagens dos corpos de provas de C360 e SAE 1045 após processo de retificação. Observa-se uma tendência de um acabamento mais grosseiro na retificação T2R1 e T2R2 devido à utilização de velocidades tangenciais maiores, com um aspecto de queima superficial muito acentuado na condição T2R2.

Figura 54 Imagem superfície após retificação 75% Al₂O₃ e 25% SiC.



Fonte: Autor, 2017.

A Tabela 1110 apresenta os resultados de rugosidade, e temperatura aferidos para os corpos de prova C360 e SAE1045 após o processo de retificação. Observa-se que o rebolo, apesar de operar nas mesmas condições de tamanho de grão, não consegue manter o mesmo nível de acabamento quando comparamos o acabamento no aço e latão. Observa-se uma variação térmica grande nas amostras de SAE 1045 quando há aumento da velocidade transversal, e uma ligeira variação para o C360. A variação do acabamento mensurado pela variação da rugosidade encontrada nos corpos de provas em C360 e SAE 1045 é explicada pela diferença de velocidade transversal de 0,07 m/s e 0,15 m/s e pelos esforços de retificação no SAE 1045 superiores ao C360. Esta variação de esforços de corte entre os corpos de prova também leva a geração de calor superior nos corpos em SAE 1045 quando comparados ao C360.

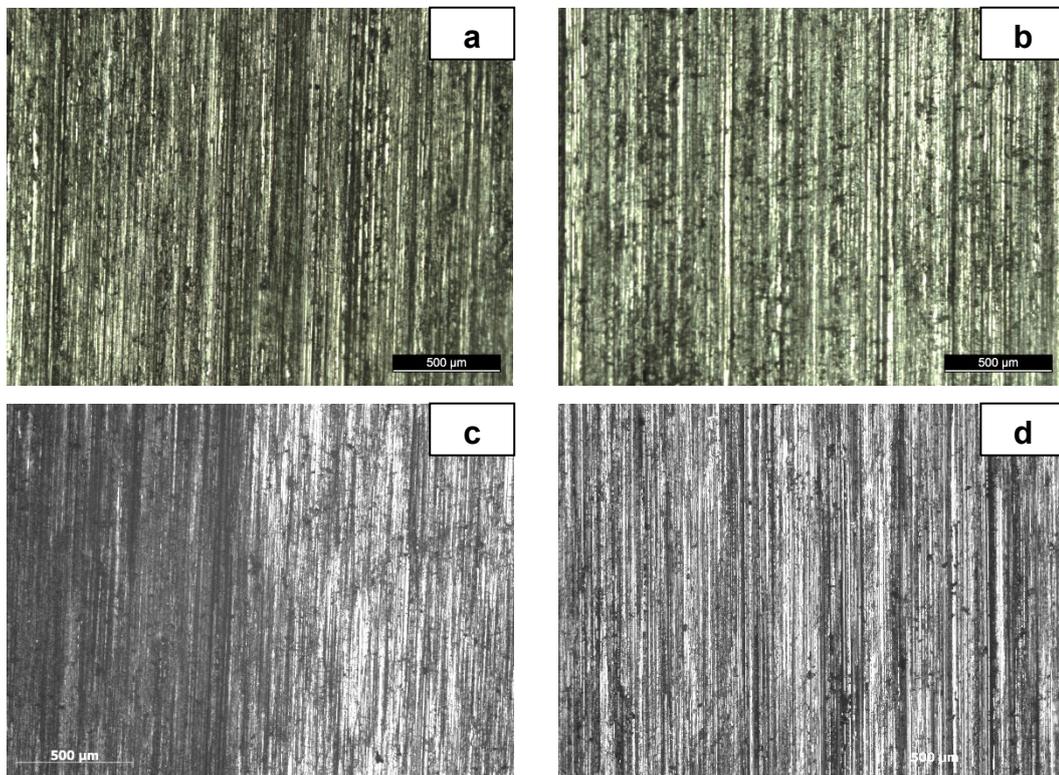
Tabela 11 Resultados de rugosidade e temperatura dos corpos de prova C360 e SAE 1045, retificados com rebolos 75% Al₂O₃ e 25% SiC.

Corpos de prova	Condição	Velocidade transversal	Rugosidade Ra (μm)	Temperatura (°C)
C360	T2R1	0,15 m/s	3,84	57
	T2R3	0,07 m/s	2,98	65
SAE 1045	T2R2	0,15 m/s	1,87	187
	T2R4	0,07 m/s	3,29	160

Fonte: Autor, 2017.

A figura 55 apresenta as imagens obtidas por MO da superfície dos corpos de provas de C360 e SAE 1045 após retificação. As imagens não apresentam diferenças significativas de acabamento superficial e todos os riscos se encontram paralelos. Não se nota o arrancar prematuro na superfície nas condições mostradas na figura 55(a) e (b).

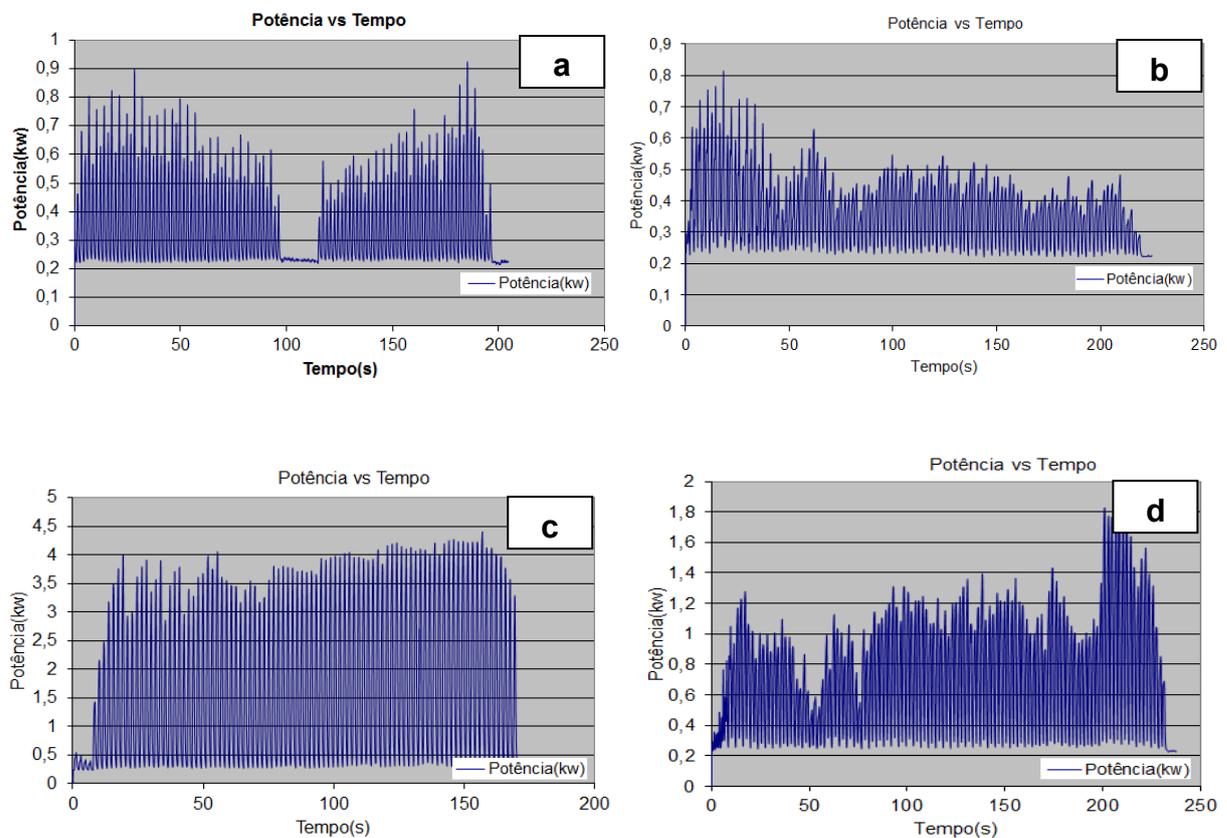
Figura 55 Imagens de MO da superfície retificadas dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 75% Al₂O₃ e 25% SiC.



Fonte: Autor, 2017.

A figura 56 apresenta os resultados de consumo de potência durante a retificação, obtidos com a utilização do FIS. Observa-se um consumo muito maior de potencia do equipamento na retificação do SAE 1045 quando consideramos o aumento de velocidade transversal, o que não acontece na mesma proporção com o C360, que demanda menos consumo de potência, mesmo com condições diferentes de velocidade transversal, fato este devido à ductilidade dos materiais.

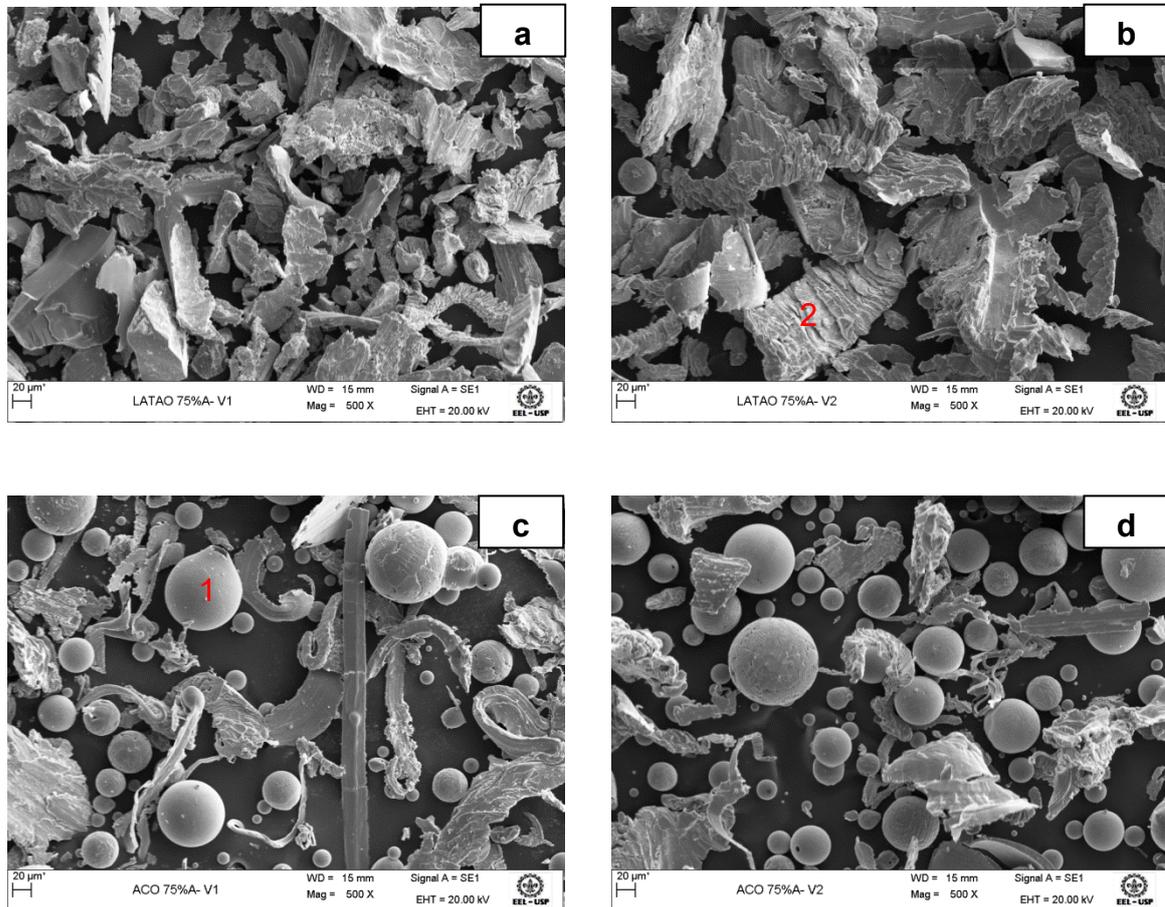
Figura 546 Gráfico do consumo de potência empregado na retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t= 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t= 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t= 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t= 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 75% Al_2O_3 e 25% SiC



Fonte: Do autor, 2017

Na figura 57 observamos imagens obtidas pelo MEV dos cavacos resultantes do processo de retificação. Para as figuras 57(a) e (b) observa-se que o cavaco formado por Latão torna-se mais longo (2) com velocidade menor, o que caracteriza uma deflexão menor, conseqüente de esforços menores de retificação. Nas figuras 57(c) e (d) observamos a mesma formação de Fe (1), com bastante intensidade, principalmente na figura 57(a) onde há a incidência maior de velocidade transversal.

Figura 557 Imagens MEV dos cavacos provenientes da retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 75% Al_2O_3 e 25% SiC.



Fonte: Do autor, 2017.

4.3. Resultados de retificação com rebole 50% Al_2O_3 50% SiC

A figura 58 apresenta as imagens dos corpos de provas de C360 e SAE 1045 após retificação, onde se observa queima superficial na peça T3R2 em grande escala. Este acabamento grosseiro, também é visível em T3R1.

Figura 58 Imagem superfície peça obra após retificação com rebolo 50% Al₂O₃ e 50% SiC.



Fonte: Do autor, 2017.

A tabela 11 apresenta os resultados de rugosidade, e temperatura aferidos para os corpos de prova C360 e SAE1045 após o processo de retificação. Observa-se que o rebolo, apresenta uma maior proximidade de resultados de rugosidade quando comparamos o acabamento no aço e latão, o que é um resultado melhor do processo devido a um princípio de uniformidade de grãos abrasivos no momento do corte. Observa-se uma variação térmica nas amostras de SAE 1045 quando há aumento da velocidade transversal o que ocorre em menor quantidade nas amostras de C360.

Tabela 12 Resultados de rugosidade e temperatura dos corpos de prova C360 e SAE 1045, retificados com rebolos 50% Al₂O₃ e 50% SiC

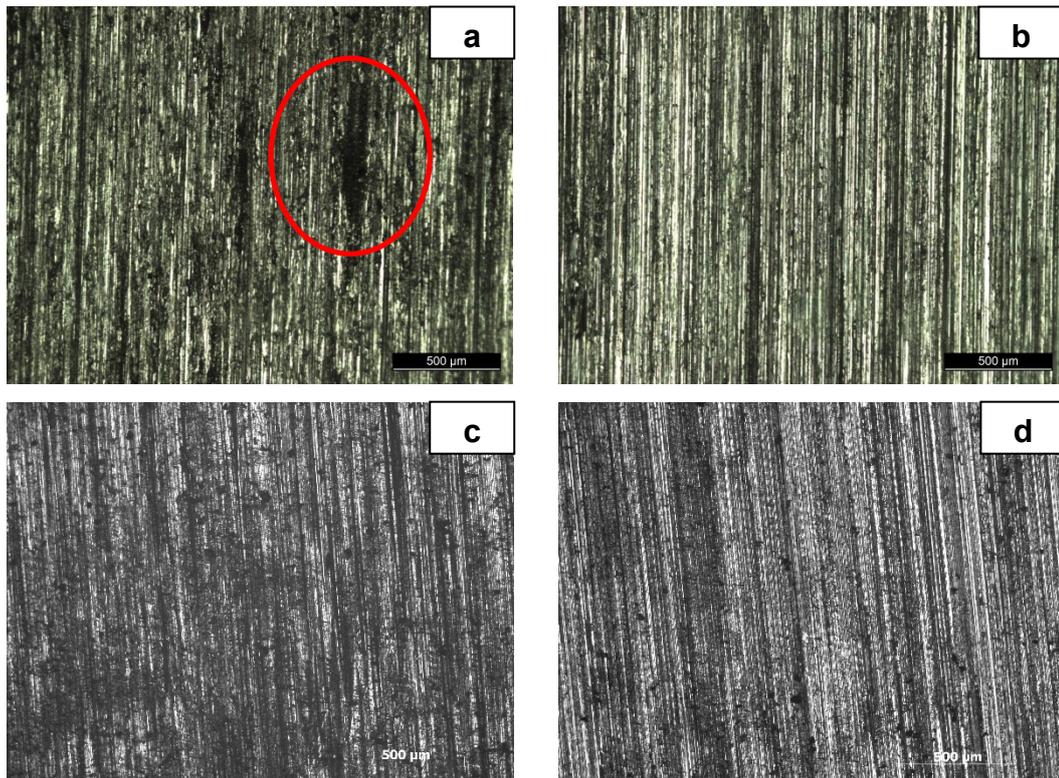
Corpos de prova	Condição	Velocidade transversal	Rugosidade (μm)	Temperatura (°C)
C360	T3R1	0,15 m/s	2,46	55
	T3R4	0,07 m/s	3,72	50
SAE 1045	T3R2	0,15 m/s	2,35	202
	T3R3	0,07 m/s	3,43	139

Fonte: Do autor, 2017.

A figura 59 apresenta as imagens obtidas por MO da superfície dos corpos de provas de C360 e SAE 1045 após retificação. As imagens não apresentam diferenças significativas de acabamento superficial e todos os riscos se encontram paralelos.

Observa-se uma tendência a um arrancar maior de material quando se utiliza velocidades maiores, figura 59 (a) somente na amostra em C360, conforme grafados em vermelho.

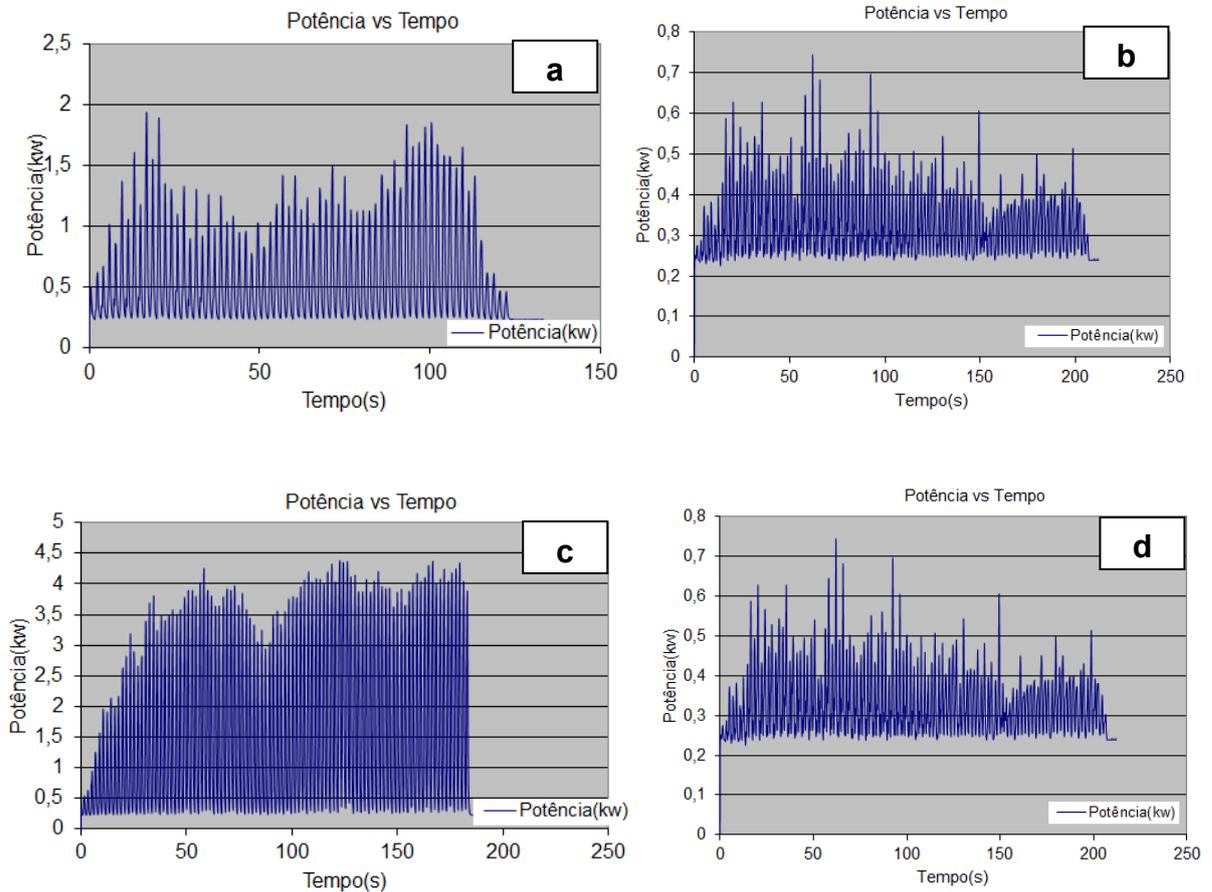
Figura 59 Imagens de MO da superfície retificadas dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 50% Al_2O_3 e 50% SiC.



Fonte: Do autor, 2017.

A figura 60 apresenta os resultados de consumo de potência durante à retificação obtidos com a utilização do FIS. Observa-se um consumo muito maior de potencia do equipamento na retificação do SAE 1045 quando consideramos o aumento de velocidade transversal, o que não acontece na retificação do latão C360 que se mantém estável, demandando o mesmo consumo de potencia, mesmo com condições diferentes de velocidade transversal.

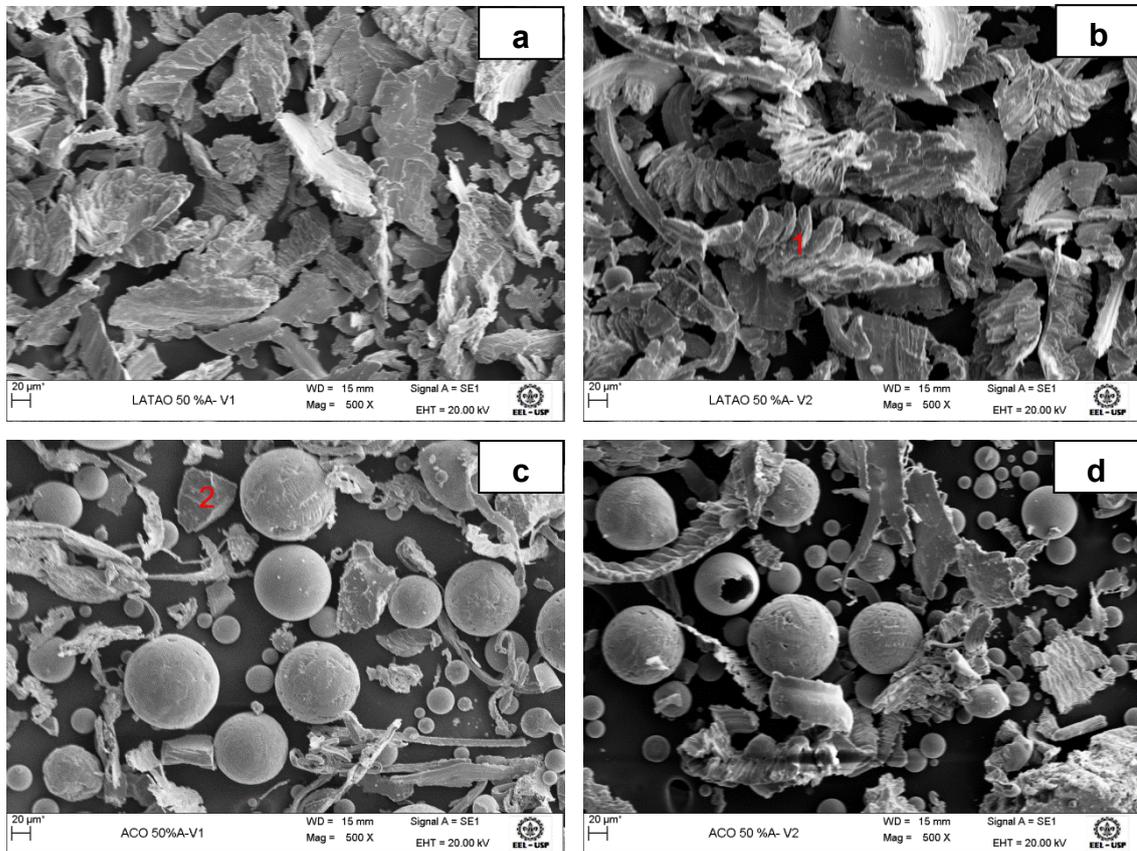
Figura 60 Gráfico do consumo de potência empregado na retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 50% Al_2O_3 e 50% SiC .



Fonte: Do autor, 2017.

Na figura 61 observamos imagens obtidas pelo MEV dos cavacos resultantes do processo de retificação. Para as figuras 61(a) e (b) observa-se que o cavaco torna mais longo (1) com velocidade menor. Nas figuras 61(c) e (d) observamos a mesma incidência de Fe com grande intensidade, principalmente na figura 61(a) onde se tem maior de velocidade transversal. Na mesma figura 61(a) nota-se também partes de grãos abrasivos (2), provenientes do grande esforço de retificação que gera soltura precoce do grão abrasivo do ligante. Este resultado também foi percebido nos rebolos com 100% Al_2O_3 .

Figura 6156 Imagens MEV dos cavacos provenientes da retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 50% Al_2O_3 e 50% SiC .



Fonte: Do autor, 2017.

4.4. Resultados de retificação com rebolo 25% Al_2O_3 75% SiC

A figura 62 apresenta imagens das superfícies dos corpos de prova C360 e SAE 1045 após processo de retificação. Observa-se uma tendência melhor na aparência superficial com relação ao aspecto de queima, pois apresentou rugosidade alta das peças obra nos rebolos T4R1 e T4R2 quando comparado a outros experimentos com velocidades tangenciais elevadas.

Figura 572 Imagem superfície peça obra após retificação com rebolo 25% Al₂O₃ e 75% SiC



Fonte: Do autor, 2017.

A tabela 12 apresenta os resultados de rugosidade, e temperatura aferidos para os corpos de prova C360 e SAE1045 após o processo de retificação. Observa-se que o rebolo apresenta uma tendência de rugosidades próximas quando comparamos o acabamento no aço e latão. Observa-se uma variação térmica pequena nas amostras de SAE 1045 mesmo quando há aumento da velocidade transversal, ocorrendo o mesmo nas amostras de C360.

Tabela 13 Resultados de rugosidade e temperatura dos corpos de prova C360 e SAE 1045, retificados com rebolos 25% Al₂O₃ e 75% SiC.

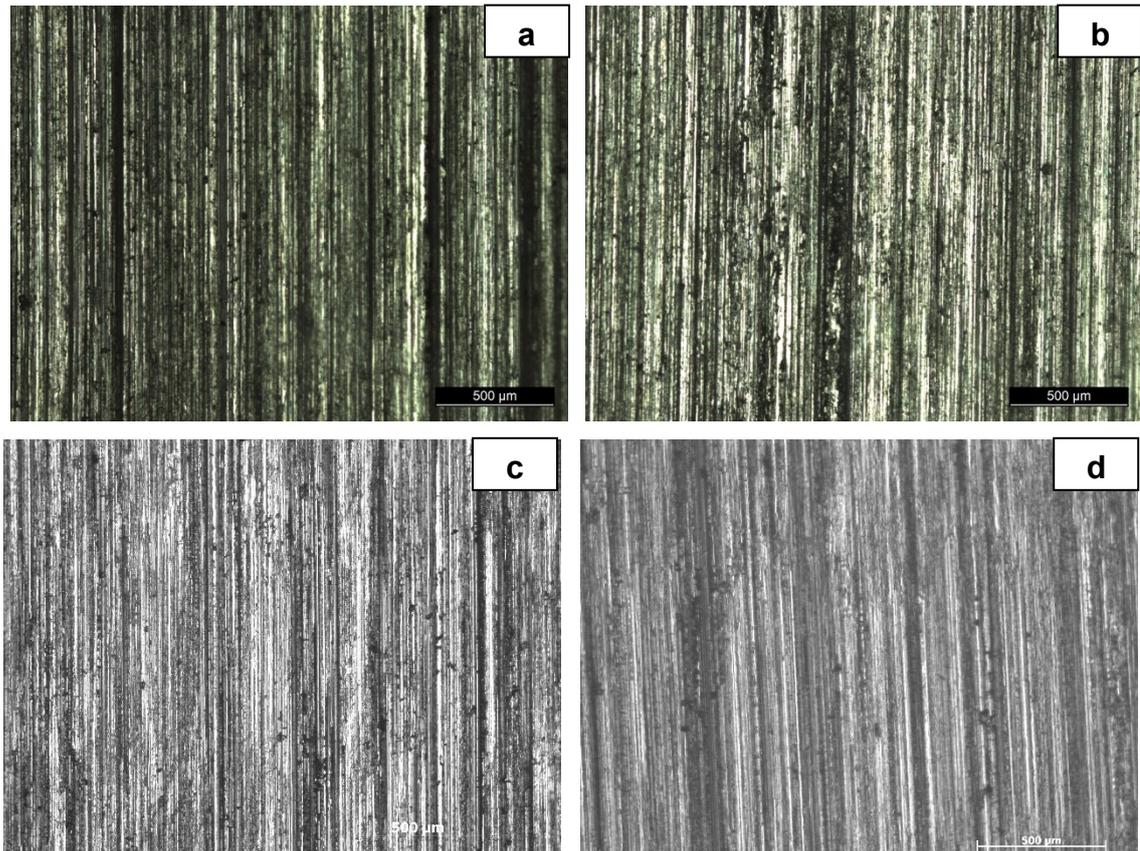
Corpos de prova	Condição	Velocidade transversal	Rugosidade Ra (μm)	Temperatura (°C)
C360	T4R1	0,15 m/s	4,03	50
	T4R3	0,07 m/s	3,69	51
SAE 1045	T4R2	0,15 m/s	4,12	108
	T4R4	0,07 m/s	3,20	134

Fonte: Do autor, 2017.

A Figura 583 apresenta as imagens obtidas por MO da superfície dos corpos de provas de C360 e SAE 1045 após retificação. As imagens não apresentam diferenças significativas de acabamento superficial e todos os riscos se encontram paralelos. Não

se observa tendência de arranque prematuro da superfície, onde é perceptível uma boa qualidade superficial.

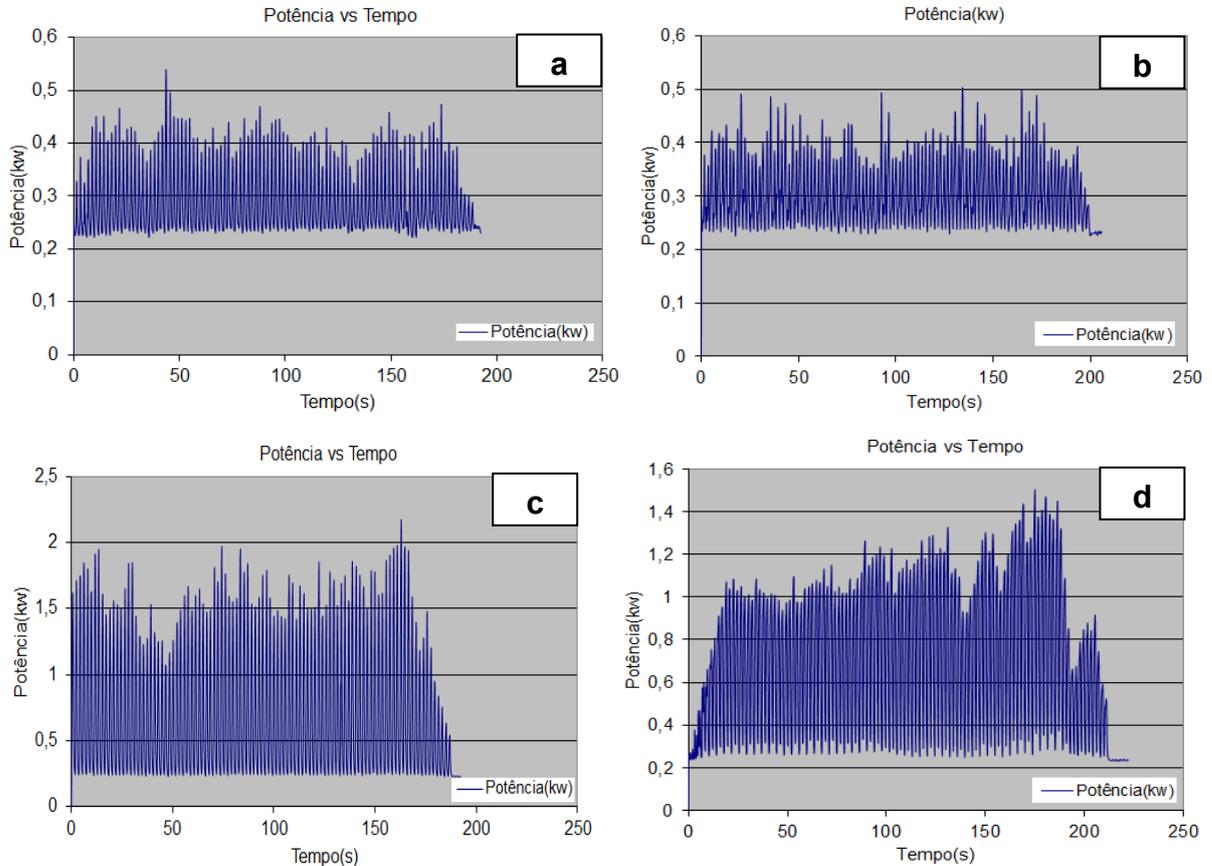
Figura 583 - Imagens de MO da superfície retificadas dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 25% Al_2O_3 e 75% SiC .



Fonte: Do autor, 2017.

A figura 64 apresenta os resultados de consumo de potência durante à retificação obtidos com a utilização do FIS. Observa-se um consumo de potência muito semelhante nas condições de maior e menor velocidade transversal do equipamento na retificação do SAE 1045. O mesmo resultado é percebido na retificação do latão C360, consumindo mesma potência, mesmo com condições diferentes de velocidade transversal.

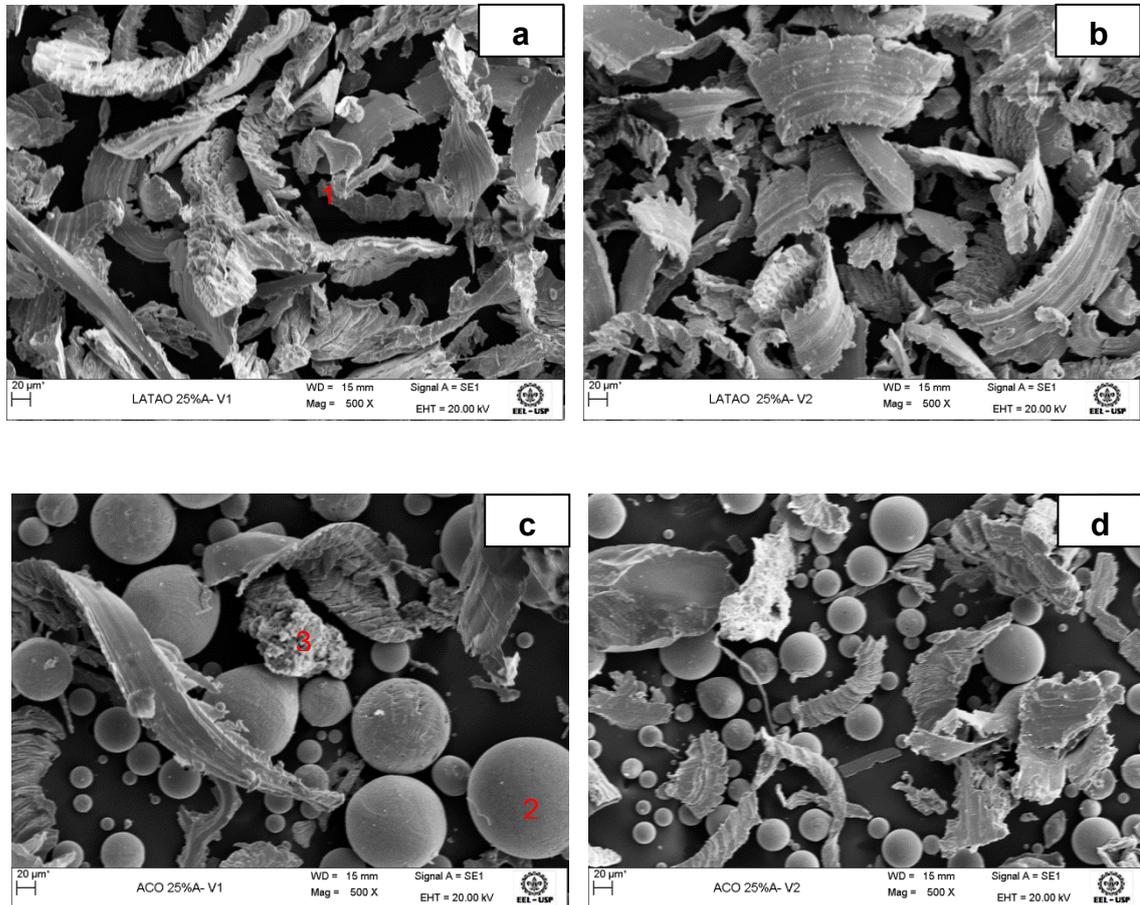
Figura 64 Gráfico do consumo de potência empregado na retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t= 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t= 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t= 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t= 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 25% Al_2O_3 e 75% SiC .



Fonte: Do autor, 2017.

Na, figura 65 observamos imagens obtidas pelo MEV dos cavacos resultantes do processo de retificação. Para as figuras 65(a) e (b) observa-se que o cavaco torna mais longo (1) com velocidade menor. Nas figuras 65(c) e (d) observamos a mesma intensidade de Fe (2), porém com intensidade muito maior, principalmente na figura 65 (a) onde há a incidência maior de velocidade transversal. Na mesma figura nota-se também partes de grãos abrasivos (3), provenientes do grande esforço de retificação que gera soltura precoce do grão abrasivo do ligante.

Figura 65 Imagens MEV dos cavacos provenientes da retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 25% Al_2O_3 e 75% SiC .



Fonte: Do autor, 2017.

4.5. Resultados de retificação com rebolo 100% SiC

A figura 66 apresenta imagens das superfícies dos corpos de prova C360 e SAE 1045 após processo de retificação. Observa-se uma tendência de um acabamento mais grosseiro nos rebolos T5R1 e T5R2 devido à utilização de velocidades tangenciais maiores.

Figura 66 Imagem superfície peça obra após retificação com rebolo 100% SiC



Fonte: Do autor, 2017.

A Tabela 1413 apresenta os resultados de rugosidade, e temperatura para os corpos de prova C360 e SAE1045 após o processo de retificação. Observa-se que o rebolo, apesar de operar nas mesmas condições de tamanho de grão, não consegue manter o mesmo nível de acabamento quando comparamos o acabamento no aço e latão. Observa-se uma variação térmica grande nas amostras de SAE 1045 quando há aumento da velocidade transversal o que ocorre ligeiramente nas amostras de C360.

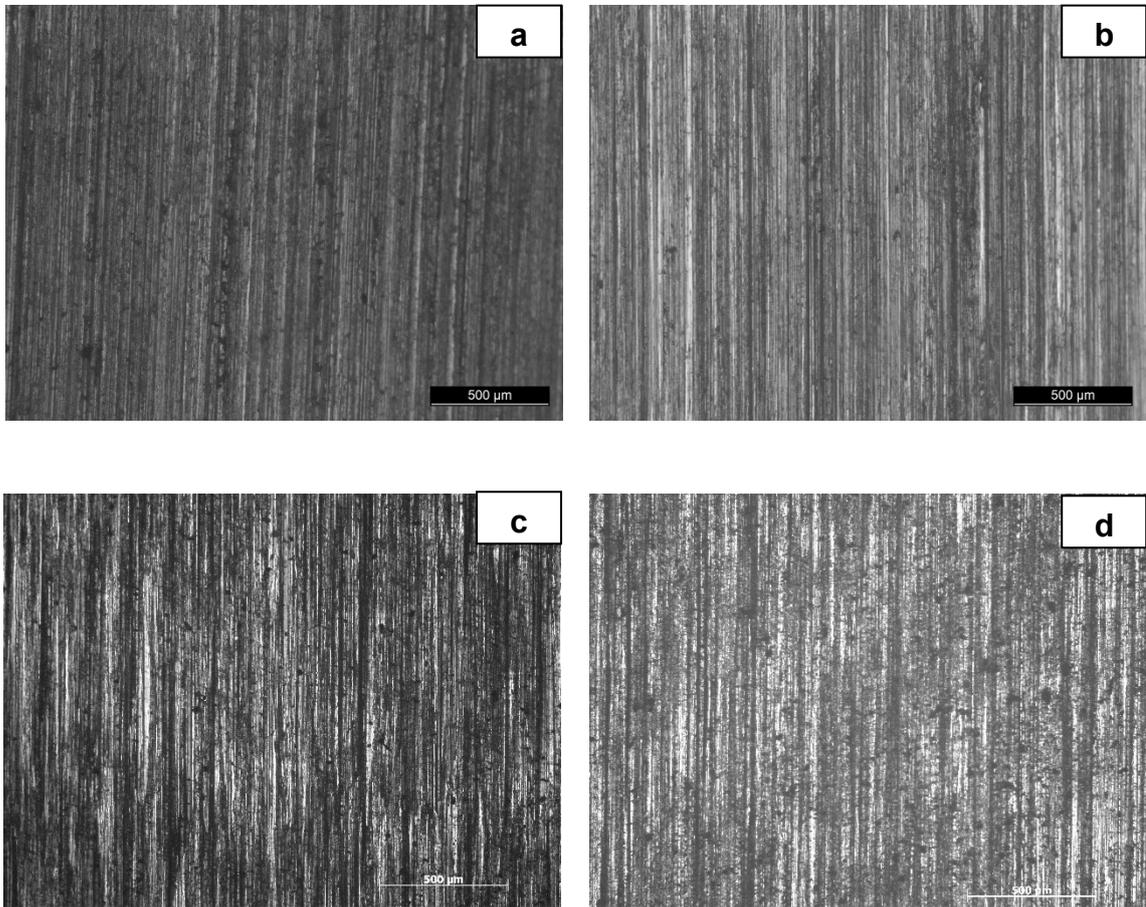
Tabela 14 Resultados de rugosidade e temperatura dos corpos de prova C360 e SAE 1045, retificados com rebolos 100% SiC.

Corpos de prova	Condição	Velocidade transversal	Rugosidade Ra (μm)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
C360	T5R1	0,15 m/s	5,12	45
	T5R3	0,07 m/s	3,19	57
SAE 1045	T5R2	0,15 m/s	2,36	210
	T5R4	0,07 m/s	2,22	267

Fonte: Do autor, 2017

A figura 67 apresenta as imagens obtidas por MO da superfície dos corpos de provas de C360 e SAE 1045 após retificação. As imagens não apresentam diferenças significativas de acabamento superficial e todos os riscos se encontram paralelos.

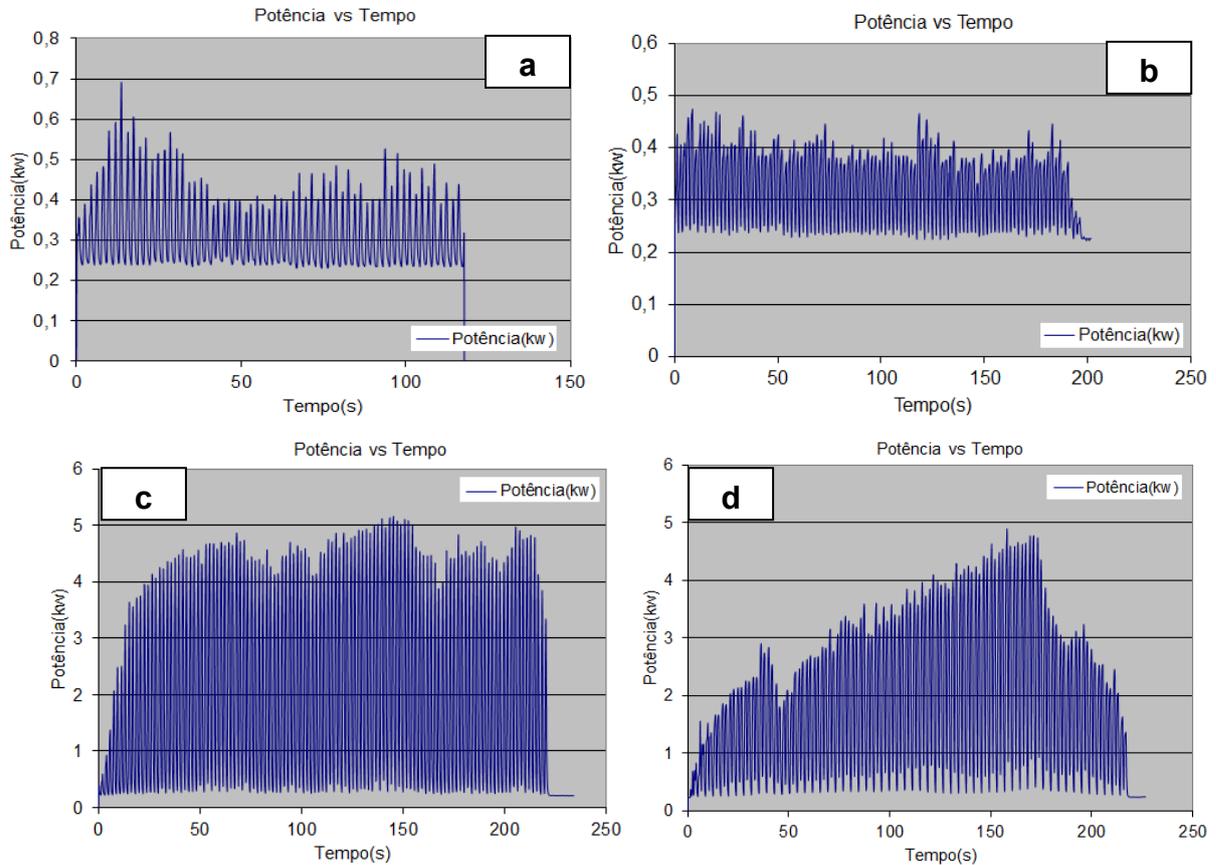
Figura 597 Imagens de MO da superfície retificadas dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 100% SiC



Fonte: Do autor, 2017

A figura 68 apresenta os resultados de consumo de potência durante à retificação obtidos com a utilização do FIS. Observa-se um consumo igual de potência do equipamento na retificação do SAE 1045 quando consideramos o aumento de velocidade transversal. A mesma tendência se observa com o C360, que demanda o mesmo consumo de potência, mesmo com condições diferentes de velocidade transversal.

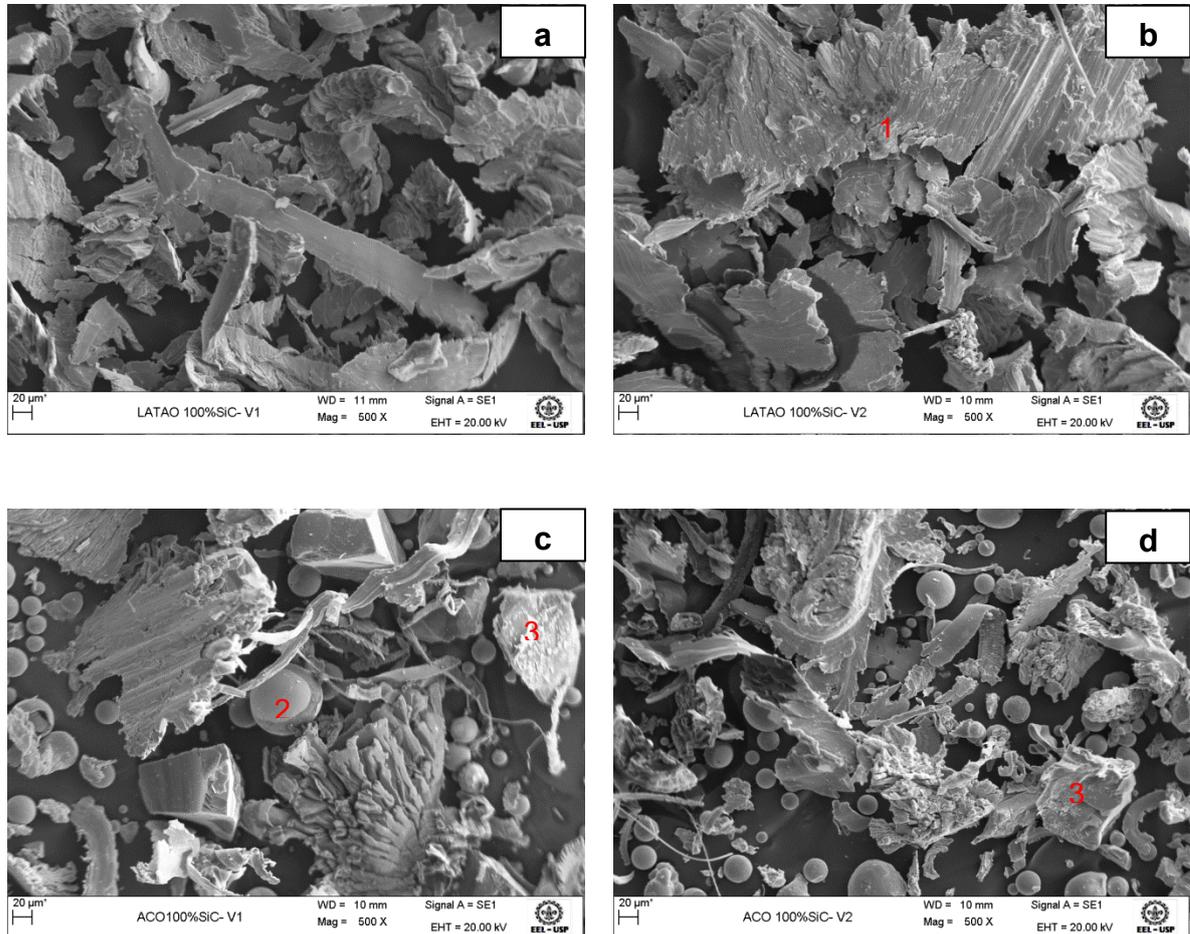
Figura 68 Gráfico do consumo de potência empregado na retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t= 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t= 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t= 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t= 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 100% SiC.



Fonte: Do autor, 2017.

Na, Figura observamos imagens obtidas pelo MEV dos cavacos resultantes do processo de retificação. Para as figuras 69(a) e (b) observa-se que o cavaco se torna mais longo (1) com velocidade menor. Nas figuras 69(c) e (d) observamos a formação de Fe (2), com grande intensidade tanto na figura 69(a) quanto na figura 69(b) onde há a incidência menor de velocidade transversal. Na mesma figura 69(a) e (b) nota-se também partes de grãos abrasivos (3), provenientes do grande esforço de retificação que gera soltura precoce do grão abrasivo do ligante. Esta foi a única condição onde se observou a presença de grão solto na velocidade de 0,07 m/s, este fenômeno somente havia aparecido na velocidade de 0,15m/s. Este evento deve estar associado à amostragem, mas demonstra constante para retificações com SAE 1045.

Figura 69 Imagens MEV dos cavacos provenientes da retificação dos corpos de prova C360 com (a) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (b) $V_t = 0,07\text{m/s}$ e SAE 1045 com (c) $V_t = 0,15\text{m/s}$ e (d) $V_t = 0,07\text{m/s}$, utilizando rebolos 100% SiC.



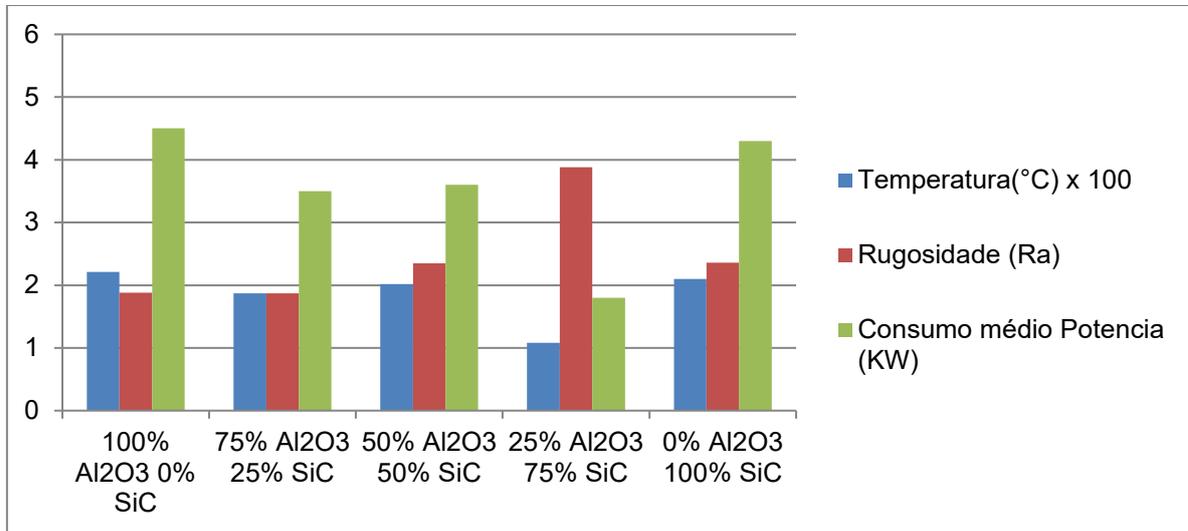
Fonte: Do autor, 2017.

4.6. Gráfico comparativo de resultados

Os resultados obtidos em todos os experimentos foram separados pelas velocidades de $0,15\text{ m/s}$ (Desbaste) e $0,07\text{ m/s}$ (acabamento), e pelo tipo de material retificado, aço SAE 1045 e latão C360.

Na figura 70 nota-se que o rebolo na condição 25% Al_2O_3 e 75% SiC e velocidade transversal de $0,15\text{ m/s}$ possui a menor geração de calor de todo os ciclos de retificação, e o menor consumo de energia. Nota-se, porém, uma piora na rugosidade, com a média Ra subindo com relação a outras condições

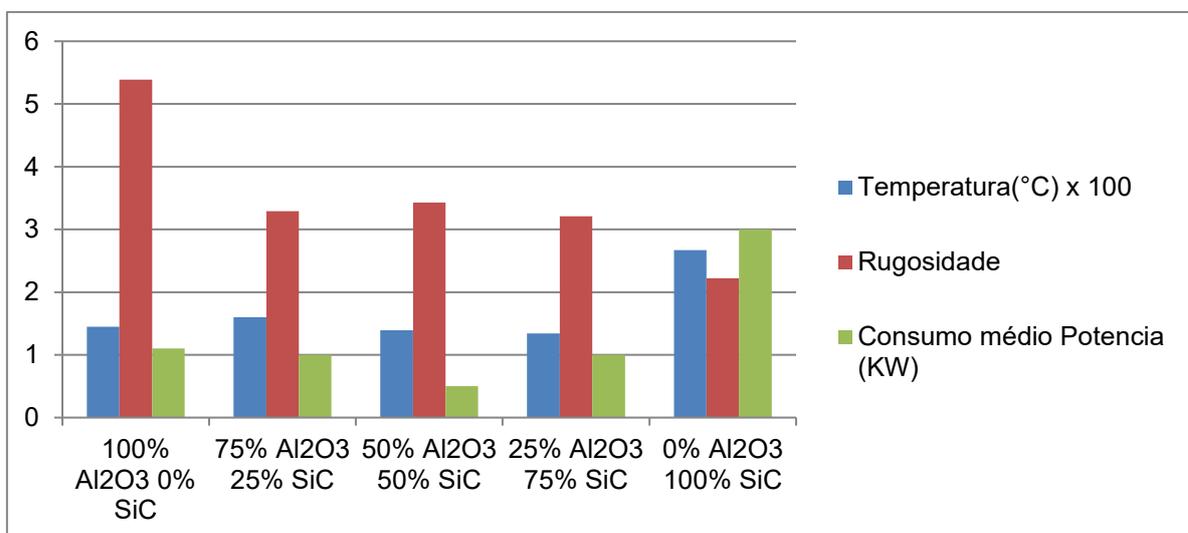
Figura 70 – Gráfico comparativo do processo de retificação em Aço SAE 1045 com velocidade transversal de 0,15 m/s.



Fonte: Do autor, 2017.

Na figura 71 nota-se que o rebolo na condição 25% Al₂O₃ e 75% SiC e velocidade transversal de 0,07 m/s possui uma geração de calor e consumo de energia próximo do rebolo da condição 50% Al₂O₃ e 50% SiC, considerado o melhor desempenho. A rugosidade Ra melhor conforme há o aumento da concentração de grão SiC.

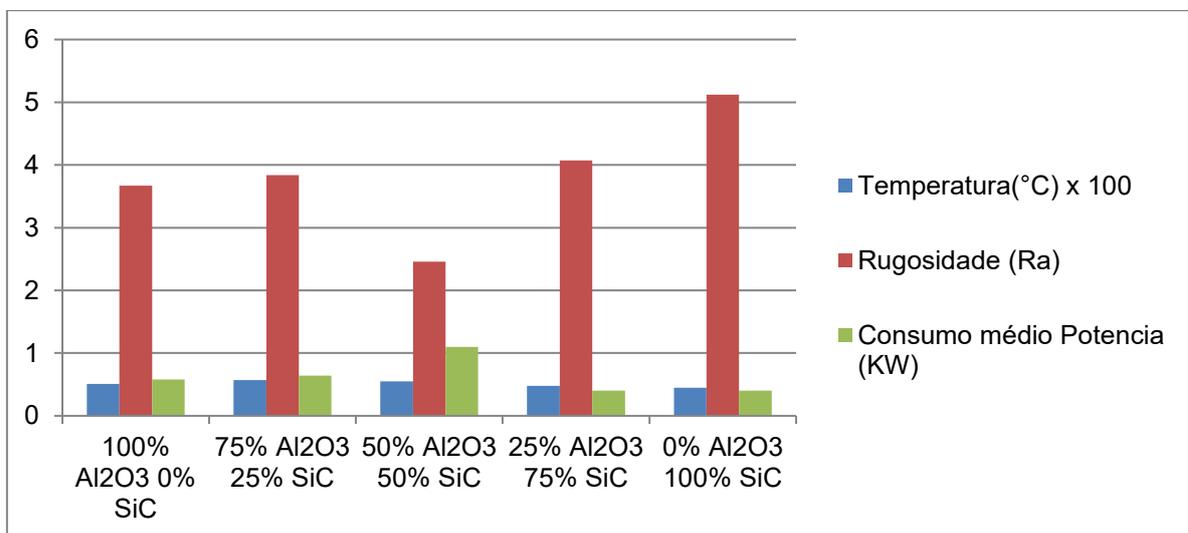
Figura 71 Gráfico comparativo do processo de retificação em Aço SAE 1045 com velocidade transversal de 0,07 m/s.



Fonte: Do autor, 2017.

Na figura 72 observa-se a mesma tendência de piora da rugosidade no rebolo da condição 75% Al_2O_3 e 25% SiC apresentado para a retificação de aço SAE 1045 com velocidade de 0,15 m/s. Nesta mesma análise, a condição de rebolo 25% Al_2O_3 e 75% SiC apresenta a menor geração de calor e o menor consumo de potência, quando comparado as outras condições.

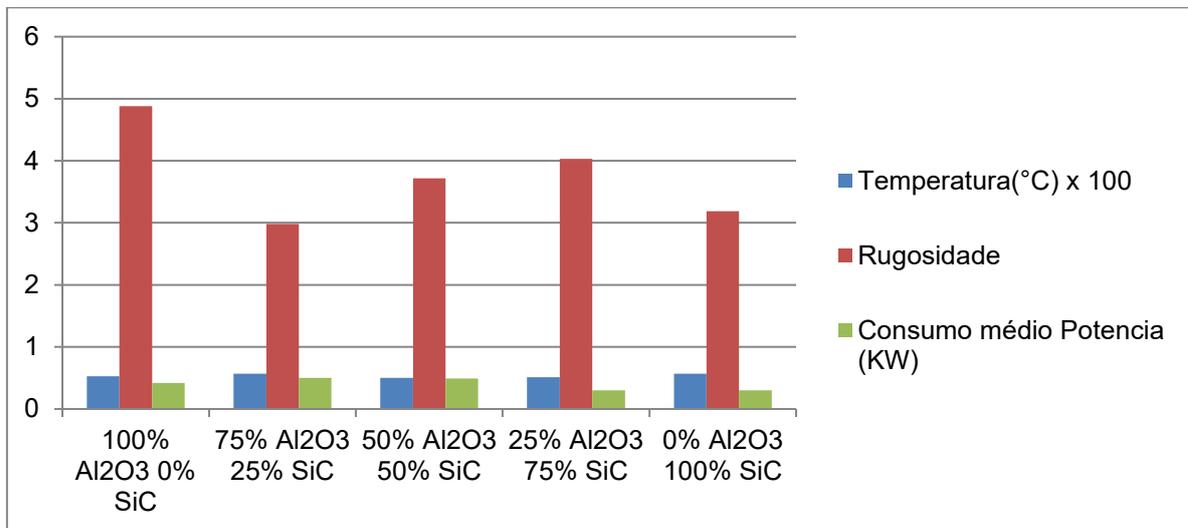
Figura 72 Gráfico comparativo do processo de retificação em latão C360 com velocidade transversal de 0,15 m/s.



Fonte: Do autor, 2017.

Na figura 73 nota-se que o rebolo na condição 25% Al_2O_3 e 75% SiC e velocidade transversal de 0,07 m/s possui uma geração de calor e consumo de energia similar a todas os outros rebolos. A exceção fica para o rebolo da condição 100% SiC que gerou uma temperatura final maior quando comparado as demais condições de rebolo. A rugosidade Ra melhora conforme há o aumento da concentração de grão SiC.

Figura 73 Gráfico comparativo do processo de retificação em latão C360 com velocidade transversal de 0,07 m/s.



Fonte: Do autor, 2017.

Com os resultados encontrados nos experimentos, é possível notar que o rebolo com a condição 25% Al₂O₃ e 75% SiC apresentou a menor geração de calor, o que caracteriza menor esforço de retificação, comprovado pelos resultados do FIS de menor demanda de energia consumida.

Conforme Klock (KLOCK, 2011) descreve em seu trabalho sobre geração de calor em processos de retificação, a geração de calor é ligada diretamente ao maior esforço de retificação, pois parte desta energia gerada é transferida para a peça obra, sendo outra parte dissipada pelo cavaco.

5. Conclusão

O objetivo deste estudo foi identificar um rebolo que fosse híbrido na operação de retificação de matérias metálicas, no caso o aço SAE 1045 e não metálicos, neste caso o latão C360.

Analisando os resultados apresentados de rugosidade, formação do cavaco, geração de temperatura e consumo de energia, e tendo o conjunto destes dados como fator conclusivo de índice de desempenho dos rebolos sujeitos as condições dos experimentos, é possível determinar que o rebolo da condição 25% Al_2O_3 e 75% SiC apresentou o melhor resultado final.

É possível considerar este rebolo como melhor resultado devido ao fato destes parâmetros analisados serem usuais nas indústrias que utilizam estes produtos. A geração de temperatura menor nesta condição de rebolo se transcreve diretamente no consumo menor de energia durante o processo de retificação. Menor geração de temperatura na operação garante uma manutenção da qualidade superficial do material trabalhado, não alterando suas características, e o menor consumo de energia é ligado diretamente a uma economia no processo, gerando ganhos tangíveis as indústrias.

Consumo menor de energia de retificação gera um consumo menor da ferramenta abrasiva o que se traduz em menor consumo da ferramenta e menor troca de set up de máquina, gerando no fim economia no processo.

6. Proposta de novos trabalhos

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros é interessante evoluir com o estudo da interação de outros grãos abrasivos (Seeded Gel, Cubitron, Quantum, Targa, Norzon e etc.) com os diversos materiais utilizados em construção mecânica.

A comparação dos processos de retificação e o uso dos diversos tipos de líquidos de refrigeração é uma área a ser explorada para os estudos de performance e desempenho das ferramentas abrasivas.

7. Referências bibliográficas

48th annual symposium of refractories; “Silicon carbide, process and proprieties”, **Saint-Gobain Ceramics**, St. Louis, MO, 2012

CALLISTER, Bill; RETHWISCH, David. G., “Ciência e engenharia de materiais, uma introdução”, **LTC – Livros técnicos e científicos**, 2016

COES, L; “Abrasives”, **Spring – Verlag**, Berlin, 1971

DEONISIO, Carlos; NOVASKI, Olivio; KRABBE, Daniel; DAMIÃO, Alvaro. “A influência da velocidade de avanço na textura superficial de componentes usinados” **XV Congresso Brasileiro de engenharia Mecânica, 1999**

EICHHORN, H.; “Drehzahlsynchronisation der Wirkpartner beim Abrichten und Schleifen”, **PhD-thesis IPK Berlin**, 1997

HELLETSBERGER, H; NOICHEL, J: “Grenzwerte und wirtschaftlichkeit von koruund, sinterkorund und CBN”, **Einsatzbereiche von schleifscheiben, Technische Rundschau**, 1993, p21

JAEGER, J. C.; “Moving Sources of Heat and the Temperature at Sliding Contacts” **Proc. of the Royal Society of New South Wales 76**, 1942, p203 – 224

KINIK n.d. “Grinding Wheels Catalog”, **Trade Catalog**, 1972

KLOCKE, Fritz. “Manufacturing processes 1 – Cutting”, Editora Springer, 1ª edição, 2011, p1 – 65

KLOCKE, Fritz; BARTHA, Sebastian; MATTFELDA, Patrick, “7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting” - **Procedia CIRP 46** (2016) p266 – 271

LORTZ, W.; “Schleifscheibentopographie und Spanbildungsmechanismus beim Schleifen”, **PhD-thesis RWTH Aachen University**, 1975

MALKIN, Stephen ; GUO, Changsheng. “Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives”, **Industrial Press Inc**, 2ª edição, 2008, p12 – 40

MALKIN, Stephen, “Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives”, **Ellis Horwood Limited**, 1989

MARINESCU, Ioan D; HITCHINER, Mike; UHLMANN, Eckart; ROWE, W. Brian; INASAKI, Ichiro, “Handbook of machining with grinding wheels”, **CRC Press**, 1ª edição, 2006, p3 – 123

MARINESCU, Ioan D; ROWE, W. Brian; DIMITROV, Boris; OHMORI, Hitoshi “Tribology of Abrasive Machining Process”, **Elsevier**, 2ª edição, 2012, p3 – 49

MASSLOW, E. N.; “Grundlagen der Theorie des Metallschleifens”, **Verlag Technik, Berlin**, 1952

NORTON ABRASIVOS.; “Informativo técnico ITN046”, **engenharia de aplicação**, 2009

NUSSBAUM, Gillaume Ch. “Rebolos e abrasivos: Tecnologia básica” **Livraria e editora Jacomo Ltda**, VOLUME 1 Edição especial, 1988, p1 – 50

RUBENSTEIN, C.; GROSZMANN, F. K.; “Industrial Diamond Information. Force Measurements during Cutting Tests with Single Point Tools simulating the Action of a Single Abrasive Grit”, **London - Bureau**. 1967

STEFFENS, K.; “Spanbildung und Trennpunktlage beim Schleifen”, **Industrie-Anzeiger 100**, edição 73, p49-50

TYMESON, M. M.; “The Norton Story”, **Norton Corporation, Worcester, MA**, 1953
WILKS, E.M.; WILKS, J. “The resistance of diamond to abrasion”, **J Phys. D:Appl Phys**, 5ª edição, 1972, p1902 - 1919

WENTORF, R. H.: “Cubic Boron Nitride”, **Journal Chem. Phys.** Edition 4, 1975, p956

WOOD, William P.; YOON, Soo C, High density sol-gel alumina-based abrasive, US patent 5282875 A, Minnesota Mining and Manufacturing Company