Retificação de superligas com rebolos de alto rendimento:
avaliação de desempenho do processo

Adriel Magalhães Souza

SECRETÁRIA DE PÓS-GRADUAÇÃO DO PPGEM

Data de Depósito:

Assinatura: _____

Retificação de superligas com rebolos de alto rendimento:
avaliação de desempenho do processo

Adriel Magalhães Souza

***Orientador:* Prof. Assoc. Eraldo Jannone da Silva**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Escola de Engenharia de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Mecânica. Área de concentração: Manufatura. *ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA VERSÃO CORRIGIDA. A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-SE DISPONIVEL JUNTO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA EESC-USP.*

Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – São Carlos
Novembro de 2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M243r	<p>Magalhães Souza, Adriel</p> <p>Retificação de superligas com rebolos de alto rendimento: avaliação de desempenho do processo / Adriel Magalhães Souza; orientador Eraldo Jannone da Silva. São Carlos, 2018.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto, Materiais e Manufatura -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.</p> <p>1. Rebolo convencional modificado. 2. cBN. 3. Desempenho do rebolo. 4. Superligas. 5. Materiais de difícil retificação. 6. Capacidade de retificação. 7. Indicadores de sustentabilidade. I. Título.</p>
-------	--

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **ADRIEL MAGALHÃES SOUZA.**

Título da dissertação: "Retificação de superligas com rebolos de alto rendimento: avaliação de desempenho do processo".

Data da defesa: 27/11/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Eraldo Jannone da Silva**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Amauri Hassul**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Prof. Dr. **Thiago Vale França**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

*Este trabalho é dedicado aos meus pais, Antônio e Vilma, que, com muita dedicação e esforço,
sempre me incentivaram a seguir meus objetivos.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Antônio e Vilma, pelo amor e incentivo constante.

Ao Prof. Eraldo Jannone da Silva, cuja orientação, paciência e as constantes ajudas proporcionaram o desenrolar deste trabalho.

À minha namorada, Flávia Sanches, que me ajudou nos momentos de estresse, com sua paciência, carinho e amor, desde o início deste trabalho.

À minha madrinha, Vânia Leite, pelo enorme carinho.

Ao grupo do Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS), em especial, aos futuros mestres e doutores: Alex Bottene, Gustavo Marcos, Franco Moro, Ricardo Arai e Rodrigo José, pela colaboração e agradável convivência.

Ao técnico e amigo, Tiago Camponucci, pela ajuda nos procedimentos operacionais.

Aos meus colegas de Medeiros, pelos momentos de descontração.

À Blaser Swissslube do Brasil Ltda, em especial ao Marcelo Kuroda, pela doação do fluido de corte.

À Federal Mogul Sistemas Automotivos Ltda, em especial ao Marcelo Biffi, pela doação das superligas.

Ao *Materials Institute of Brazil* (MIB), em especial ao Marcelo Milan, pela ajuda no corte por eletroerosão a fio e preparação metalográfica do corpos de prova.

À Saint-Gobain, em especial ao Marcelo Sasaki e Fabio Freitas, pela doação do dressador Furioso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 2016/12425-4, pela bolsa.

A todos estes colaboradores, meu sincero agradecimento. Sem eles, este trabalho seria oneroso e, possivelmente, pouco provável de ser concluído da maneira como foi.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

“Wyrð Bið Ful Aræd”

RESUMO

SOUZA, A. M. **Retificação de superligas com rebolos de alto rendimento: avaliação de desempenho do processo.** 2018. 155 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Engenharia Mecânica. Área de concentração: Manufatura) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (PPGEM/EESC/USP), São Carlos – SP.

Superligas são materiais utilizados nas indústrias aeronáuticas, nucleares, metal-mecânicas, petroquímicas, automotivas e biomédicas, sendo considerados de difícil retificação (DTG - *Difficult To Grind*), devido às suas características peculiares. Para a retificação eficiente destes materiais, frequentemente utiliza-se rebolos superabrasivos com grãos de cBN (*cubic boron nitride*) e ligante vitrificado, devido a seu desempenho superior, quando comparado aos rebolos convencionais. Entretanto, é necessária a utilização de periféricos e sistemas auxiliares eficientes, elevando-se, assim, os custos. Visando a redução dos custos operacionais, os rebolos convencionais com grãos cerâmicos e ligantes com alta capacidade de retenção surgem como uma alternativa promissora. Neste cenário de comparação ferramental, torna-se necessário mensurar o desempenho das mesmas, que incluem requisitos técnicos e indicadores de sustentabilidade do processo. Assim, o objetivo desta dissertação é avaliar um rebolo convencional modificado tecnologicamente (grão cerâmico e ligante de alto desempenho), comparando-o com um rebolo de cBN vitrificado, buscando-se mensurar as diferenças de desempenho e critérios de sustentabilidade (econômicos, ambientais e sociais) do processo, quando da retificação de superligas, com diferentes graus de usinabilidade. A metodologia de análise comparativa do desempenho dos rebolos deu-se pela avaliação da influência de parâmetros de entrada (velocidade de corte, material e taxa específica de remoção utilizada) nas variáveis de saída, a serem monitoradas, relativas ao processo (potência; energia específica; desgaste - relação G e força tangencial por grão-; superfície do rebolo; e cavacos), à qualidade final da peça (rugosidade, circularidade e análise superficial - topografia, microestrutura e microdureza) e custos associados ao processo, além dos indicadores de sustentabilidade. Como resultados, em relação ao impacto da velocidade de corte, demonstrou-se que seu aumento é benéfico ao processo, devido à diminuição da espessura de corte e menores forças por grão, acarretando em menores desgastes do rebolo (maior relação G) e melhor qualidade superficial da peça retificada. Tal resultado é inversamente proporcional à taxa de remoção. No tocante aos materiais, comprovou-se que as superligas analisadas possuem diferentes capacidades de retificação, devido às diferentes microestruturas e propriedades químico-mecânicas, que impactam no desempenho da ferramenta abrasiva. O material Inc.751 apresentou a pior capacidade de retificação dentre os materiais analisados, devido, principalmente, à sua matriz austenítica e presença de Alumínio e Titânio na composição química. Pela análise dos cavacos, comprovou-se que os mesmos possuem formatos alongados, típico de materiais dúcteis e ratificou-se a eficiência da refrigeração na região de contato rebolo/peça. Com a curva característica dos rebolos, verificou-se que as ferramentas possuem comportamentos

distintos, com superioridade ao rebolo de cBN, devido à maior capacidade de retenção dos grãos pelo ligante. Pela verificação superficial dos rebolos, não se observou empastamento evidente, constatando a eficiência do sistema de limpeza de alta pressão. Pela análise topográfica das peças, verificou-se que a retificação não induziu danos térmicos às mesmas. A avaliação dos indicadores de sustentabilidade proporcionou uma melhor análise da eficiência do processo, facilitando na tomada de decisão quanto ao desempenho do rebolo e/ou condição ideal. Como conclusão, a aplicabilidade do rebolo convencional em substituição ao rebolo de cBN foi confirmada para a retificação das superligas testadas.

Palavras-chave: Rebolo convencional modificado. cBN. Desempenho do rebolo. Superligas. Materiais de difícil retificação. Capacidade de retificação. Indicadores de sustentabilidade.

ABSTRACT

SOUZA, A. M. **Grinding of superalloys with high performance grinding wheels: process performance evaluation**. 2018. 155 p. Dissertation (Master of Science, Program in Mechanical Engineering Area of concentration: Manufacturing) – Graduate Program in Mechanical Engineering, São Carlos School of Engineering, University of São Paulo (PPGEM/EESC/USP), São Carlos – SP.

Superalloys are materials used in aeronautical, nuclear, metal-mechanical, petrochemical, automotive, and biomedical industries, and they are considered Difficult To Grind (DTG) due to their peculiar characteristics. For efficient grinding of these materials, superabrasive grinding wheels with cBN (cubic boron nitride) grains and vitrified bond are often used because of their superior performance when compared to conventional grinding wheels. However, it is necessary to use efficient peripheral and auxiliary systems, thus raising costs. Aiming to reduce costs, conventional wheels with ceramic grains and binders with high retention capacity appear as a promising alternative. In this tool comparison scenario, it is necessary to measure their performance, which includes technical requirements and process sustainability indicators. Thus, the objective is to evaluate a engineered conventional grinding wheel, comparing it with a vitrified cBN wheel, aiming to measure performance differences and sustainability criteria (economic, environmental, and social) of the process, when grinding superalloys with different degrees of grindability. The methodology of comparative analysis of the performance of the grinding wheels was based on the evaluation of the influence of input parameters (cutting speed, material, and specific removal rate) in the output variables to be monitored related to the process (power, specific energy, roughness - ratio G and tangential force per grain, F_{t1g} , grinding wheel surface, and chips), to the final quality of the piece (roughness, roundness, and surface analysis - topography, microstructure, and microhardness) and costs, in addition to the sustainability indicators. As results, in relation to the impact of the cutting speed, it was demonstrated that its increase is beneficial to the process, due to the reduction of the cutting thickness and lower F_{t1g} , causing less wheel wear and better surface quality of the ground piece. This result is inversely proportional to the removal rate. Regarding the materials, it was verified that the analyzed superalloys have different grinding capacities due to the different microstructures and chemical-mechanical properties that impact the performance of the abrasive tool. The material Inc.751 presented the worst grinding capacity among the analyzed materials, mainly due to its austenitic matrix and the presence of Aluminum-Titanium in its composition. By the analysis of the chips, it was verified that they have elongated formats, typical of ductile materials, and it was ratified the efficiency of the cooling system. With the wheel characteristic curves, it was verified that the tools have different behaviors, superior to the cBN wheel, due to the greater capacity of retention of the grains by the binder. Through the investigation of the grinding wheels, no evident wheel loading was observed, noting the efficiency of the high-pressure cleaning system. By the analysis of the pieces, it was verified that the grinding did not induce thermal damages to

them. The evaluation of the sustainability indicators provided a better analysis of the efficiency of the process, making easier the decision-making on the performance of the grinding wheel and/or ideal condition. Concluding, the feasibility of the conventional wheel in substitution of the cBN wheel was confirmed for the grinding of the tested superalloys.

Keywords: Engineered conventional grinding wheel. cBN. Wheel performance. Superalloys. Difficult to grind (DTG) materials. Grindability. Sustainability indicators.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação das fases de desenvolvimento da bibliometria.	8
Figura 2 – Quantidade de artigos por periódico.	9
Figura 3 – Autores que mais publicaram dentre os artigos analisados.	10
Figura 4 – Número de artigos por país.	11
Figura 5 – Evolução das publicações por ano.	12
Figura 6 – Autores que mais receberam citações dentre os artigos analisados na bibliometria.	13
Figura 7 – Rotas de processamento para o grão de alumina fundida.	18
Figura 8 – Rotas de processamento para o grão de alumina sinterização.	19
Figura 9 – Rotas de processamento para o grão de alumina SG.	20
Figura 10 – Velocidades utilizadas com rebolos de cBN.	25
Figura 11 – Razões para não usar cBN em altas velocidades de retificação.	25
Figura 12 – Espessura do cavaco versus energia específica na retificação.	27
Figura 13 – Temperatura da superfície da peça versus velocidade do rebolo.	27
Figura 14 – Efeito do aumento da velocidade do rebolo nas variáveis de saída do processo: com taxa de remoção (a) constante e (b) aumentando.	29
Figura 15 – Tipos de desgaste do grão e do ligante.	30
Figura 16 – Mecanismos de micro desgaste.	30
Figura 17 – Interações na zona de retificação.	31
Figura 18 – Comportamento da relação G em diferentes Q'_w	37
Figura 19 – Comportamento da relação G em diferentes Q'_w	38
Figura 20 – Relação G e acabamento superficial em função da velocidade do rebolo.	38
Figura 21 – Energia específica e rugosidade em relação à taxa de remoção de material.	39
Figura 22 – Retificadora utilizada no estudo.	42
Figura 23 – Exemplo de estudo de potência.	50
Figura 24 – Dispositivo para medição do desgaste do rebolo.	51
Figura 25 – Representação esquemática da medição do desgaste do rebolo.	51
Figura 26 – Exemplo de perfil de desgaste do rebolo.	51
Figura 27 – Estereomicroscópio acoplado na máquina ZEMA G-800-HS.	53
Figura 28 – Superfície do rebolo de cBN após a dressagem, com zoom de (a) 1,3x; (b) 3,2x e (c) 10x.	53
Figura 29 – Representação gráfica das circularidades.	55
Figura 30 – Discretização dos custos laborais para o (a) 3NQ e (b) cBN.	58

Figura 31 – Fluxograma dos procedimentos.	62
Figura 32 – Espectros de energia dispersiva das amostras: (a) Inc. 751; (b) 21-43 e (c) Sil.1. 66	
Figura 33 – Capacidade de retificação para os diferentes materiais, rebolos e condições de retificação testadas.	67
Figura 34 – Potência líquida de corte versus taxa específica de remoção de material: (a) 3NQ, 45 m/s; (b) 3NQ, 80 m/s e (c) cBN.	69
Figura 35 – Energia específica versus taxa específica de remoção de material: (a) 3NQ, 45 m/s; (b) 3NQ, 80 m/s e (c) cBN.	71
Figura 36 – Número de Dinamização versus taxa específica de remoção de material para todos os rebolos: (a) Inc. 751, (b) 21-43 e (c) Sil. 1.	75
Figura 37 – Relação G dos rebolos versus taxa específica de remoção de material: (a) 3NQ, 45 m/s; (b) 3NQ, 80 m/s e (c) cBN.	76
Figura 38 – Curva característica dos rebolos em termos de relação G versus F_{t1g} para todos os materiais testados.	78
Figura 39 – Logaritmo da curva característica dos rebolos em termos de relação G versus F_{t1g} para todos os materiais testados.	78
Figura 40 – Imagem da superfície do rebolo cBN antes e após a retificação do Inc.751 na maior taxa.	81
Figura 41 – Rugosidade R_a para todos os rebolos, condições e materiais testados.	84
Figura 42 – Circularidades RONT para todos os rebolos, condições e materiais testados.	87
Figura 43 – Exemplos de perfis de circularidade obtidas na peça de Inc. 751, pós retificação com rebolo: (a) 3NQ (45 m/s); (b) 3NQ (80 m/s) e (c) cBN. Escala 2 $\mu\text{m/div}$	88
Figura 44 – Superfície da peça pós retificação com rebolo 3NQ a 45 m/s e maior taxa de remoção, zoom 100 x: (a) Inc. 751, (b) 21-43 e (c) Sil.1.	90
Figura 45 – Microestrutura das peças pós retificação com rebolo cBN, na maior taxa de remoção, zoom 100 x: (a) Inc. 751, (b) 21-43 e (c) Sil. 1.	91
Figura 46 – Valor dos custos rebolos/peça, laborais/peça, máquina/peça e totais/peça: 3NQ (45 e 80 m/s) e cBN.	93
Figura 47 – Influência de Q'_w nos custos laborais/peça.	94
Figura 48 – Influência de Q'_w nos custos totais/peça.	94
Figura 49 – Pontos extremos evidenciados na curva característica dos rebolos.	99
Figura 50 – Gráficos polares dos desvios de circularidade das peças produzidas pelos rebolos 3NQ e cBN (80 m/s).	100
Figura 51 – Micrografia dos cavacos gerados pós retificação com os rebolos 3NQ e cBN (80 m/s).	101
Figura 52 – Superfície dos rebolos 3NQ (esquerda) e cBN (direita), ambos a 80 m/s (zoom 10x).	101
Figura 53 – Análise do desempenho dos rebolos para as diferentes taxas e materiais testados. 103	

Figura 54 – Fator de Impacto dos periódicos em 2015.	119
Figura 55 – Quantidade de citações em 2015 dos periódicos.	120
Figura 56 – Número de documentos publicados pelos principais autores.	122
Figura 57 – Quantidade de citações recebidas pelos principais autores.	123
Figura 58 – Índices Hs dos principais autores.	123
Figura 59 – Diagrama ternário.	126
Figura 60 – Desgaste dos rebolos versus volume de material removido: (a) 3NQ, 45 m/s; (b) 3NQ, 80 m/s e (c) cBN.	131
Figura 61 – Mapa acústico de dressagem do rebolo 3NQ (80 m/s), com $Q'_w = 100$ $\text{mm}^3/\text{mm.min}$, pós retificação do Inc.751: (a) todos passes e (b) zoom nos últimos 4 passes.	132
Figura 62 – Imagem da superfície do rebolo 3NQ (45 m/s) antes e após a retificação do Inc.751 na maior taxa.	133
Figura 63 – Imagem da superfície do rebolo 3NQ (80 m/s) antes e após a retificação do Inc.751 na maior taxa.	134
Figura 64 – Micrografias MEV dos cavacos das superligas gerados pela retificação com rebolo 3NQ (45 m/s).	135
Figura 65 – Micrografias MEV dos cavacos das superligas gerados pela retificação com rebolo 3NQ (80 m/s).	136
Figura 66 – Micrografias MEV dos cavacos das superligas gerados pela retificação com rebolo cBN.	137
Figura 67 – Rugosidade R_z para todos os rebolos, condições e materiais testados.	138
Figura 68 – Rugosidade R_t para todos os rebolos, condições e materiais testados.	139
Figura 69 – Exemplo de perfil de rugosidade obtida da peça de Inc.751, pós retificação com rebolo de cBN, na maior taxa e volume testado.	140
Figura 70 – Circularidades RON_p para todos os rebolos, condições e materiais testados.	141
Figura 71 – Circularidades RON_v para todos os rebolos, condições e materiais testados.	142
Figura 72 – Superfície da peça pós retificação com rebolo 3NQ a 80 m/s e maior taxa de remoção, zoom 100 x: (a) Inc. 751, (b) 21-43 e (c) Sil. 1.	143
Figura 73 – Superfície da peça pós retificação com rebolo cBN na maior taxa de remoção, zoom 100 x: (a) Inc. 751, (b) 21-43 e (c) Sil. 1.	144
Figura 74 – Microestrutura das peças pós retificação com rebolo 3NQ a 45 m/s, na maior taxa de remoção, zoom 100 x: (a) Inc. 751, (b) 21-43 e (c) Sil. 1.	145
Figura 75 – Microestrutura das peças pós retificação com rebolo 3NQ a 80 m/s, na maior taxa de remoção, zoom 100 x: (a) Inc. 751, (b) 21-43 e (c) Sil. 1.	146
Figura 76 – Perfil de microdureza Vickers dos diferentes materiais testados, quando da retificação com (a) 3NQ (45 m/s), (b) 3NQ (80 m/s) e (c) cBN.	147
Figura 77 – Custos totais/peça para todos materiais, condições e rebolos analisados: (a) 3NQ (45 m/s); (b) 3NQ (80 m/s) e (c) cBN.	147

Figura 78 – Indicadores econômicos para eficiência da integridade superficial: (a) $\eta\$ \rightarrow R_a$ e (b) (a) $\eta\$ \rightarrow R_z$	148
Figura 79 – Indicadores econômicos para eficiência da taxa de remoção de material.	149
Figura 80 – Indicadores energéticos para eficiência da integridade superficial: (a) $\eta E \rightarrow R_a$ e (b) (a) $\eta E \rightarrow R_z$	150
Figura 81 – Indicadores energéticos para eficiência da taxa de remoção de material.	151
Figura 82 – Indicadores sociais para eficiência da integridade superficial: (a) $\eta dBA \rightarrow R_a$ e (b) (a) $\eta dBA \rightarrow R_z$	152
Figura 83 – Indicadores sociais para eficiência da taxa de remoção de material.	153
Figura 84 – Superfície das peça pós retificação com rebolo 3NQ e cBN, ambos a 80 m/s.	154
Figura 85 – Perfil de rugosidade das peças produzidas pelos rebolos 3NQ e cBN, ambos a 80 m/s.	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos materiais abrasivos.	14
Tabela 2 – Composição química dos materiais.	43
Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos materiais.	43
Tabela 4 – Propriedades físicas e químicas do fluido Vasco 7.000.	45
Tabela 5 – Condições e parâmetros utilizados no estudo.	46
Tabela 6 – Parâmetros de retificação para o rebolo convencional.	48
Tabela 7 – Parâmetros de retificação para o rebolo cBN.	48
Tabela 8 – Parâmetros utilizados para cálculo dos custos do rebolos/peça.	57
Tabela 9 – Parâmetros utilizados para cálculo dos custos laborais/peça.	59
Tabela 10 – Parâmetros utilizados para cálculo dos custos da máquina/peça.	60
Tabela 11 – Parâmetros utilizados para cálculo dos custos totais/peça.	60
Tabela 12 – Resultado da quantificação da composição química dos materiais.	66
Tabela 13 – Comparação da capacidade de retificação para os diferentes materiais e rebolos testados.	68
Tabela 14 – Comparação das espessuras de corte equivalente para o rebolo 3NQ em 45 e 80 m/s.	73
Tabela 15 – Comparação das forças por grão para o rebolo 3NQ em 45 e 80 m/s.	73
Tabela 16 – Relação entre profundidade de corte e taxa específica de remoção de material.	73
Tabela 17 – Relação das forças tangenciais com o aumento de Q'_w	74
Tabela 18 – Energia de retificação [kJ] para os diferentes materiais, taxas e rebolos testados.	97
Tabela 19 – Índice de Desempenho Global dos Rebolos (IDGR) para todas as condições analisadas.	102
Tabela 20 – Referências mais citadas pelos artigos estudados.	124
Tabela 21 – Características do rebolo convencional 3NQ.	125
Tabela 22 – Características do rebolo superabrasivo cBN VSS.	127
Tabela 23 – Valores normalizados dos fatores analisados, para ambos os rebolos e materiais testados na taxa de $Q'_w = 50 \text{ mm}^3/\text{mm.min.}$	129
Tabela 24 – Valores normalizados dos fatores analisados, para ambos os rebolos e materiais testados na taxa de $Q'_w = 100 \text{ mm}^3/\text{mm.min.}$	130
Tabela 25 – Valores normalizados dos fatores analisados, para ambos os rebolos e materiais testados na taxa de $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min.}$	130

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	5
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	5
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	5
1.3	Estruturação do trabalho	6
2	REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1	Análise bibliométrica	7
2.1.1	<i>Indicadores de produção</i>	8
2.1.2	<i>Indicadores de citações</i>	11
2.2	Ferramenta abrasiva: Rebolo	12
2.2.1	<i>Composições e características dos rebolos convencionais e superabrasivos</i>	13
2.2.2	<i>Evolução da retificação/rebols e possibilidades da utilização de rebols de alto rendimento</i>	15
2.2.2.1	<i>Evolução tecnológica para modificação dos grãos</i>	17
2.2.2.1.1	Grãos de Al ₂ O ₃	17
2.2.2.1.2	Grãos de cBN	22
2.2.3	<i>Velocidade de corte</i>	23
2.3	Mecanismos de desgaste	29
2.4	Retificação de superligas	32
3	METODOLOGIA	41
3.1	Condições de trabalho para o rebolo convencional 3NQ	47
3.2	Condições de trabalho para o rebolo cBN	47
3.3	Critérios de desempenho	49
3.4	Indicadores de sustentabilidade	60
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	65
4.1	Análise química	65
4.2	Indicadores de desempenho	67
4.2.1	<i>Potência de retificação</i>	68
4.2.2	<i>Energia específica</i>	70

4.2.3	<i>Desgaste dos rebolos</i>	72
4.2.3.1	<i>Mapa acústico</i>	74
4.2.3.2	<i>Relação G</i>	75
4.2.3.3	<i>Força tangencial por grão</i>	77
4.2.4	<i>Superfície do rebolo</i>	80
4.2.5	<i>Morfologia dos cavacos</i>	82
4.2.6	<i>Rugosidades</i>	83
4.2.7	<i>Circularidades</i>	86
4.2.8	<i>Análise da superfície da peça</i>	88
4.2.8.1	<i>Análise topográfica</i>	89
4.2.8.2	<i>Análise metalográfica</i>	89
4.2.8.3	<i>Microdureza</i>	92
4.2.9	<i>Custos</i>	92
4.3	<i>Indicadores de sustentabilidade</i>	96
4.3.1	<i>Indicador econômico</i>	96
4.3.2	<i>Indicador energético</i>	96
4.3.3	<i>Indicador social</i>	97
4.3.4	<i>Estratégia combinada para avaliação do rebolo</i>	98
4.3.5	<i>Considerações finais</i>	102
5	CONCLUSÕES	105
5.1	Conclusões	105
5.2	Limitações e propostas de continuidade	108
5.3	Produção bibliográfica	109
REFERÊNCIAS		111
APÊNDICE A	BIBLIOMETRIA	119
APÊNDICE B	CARACTERÍSTICAS DO REBOLO CONVENCIONAL DE ALTO DESEMPENHO	125
APÊNDICE C	CARACTERÍSTICAS DO REBOLO SUPERABRASIVO DE CBN	127
APÊNDICE D	RESULTADOS ADICIONAIS	129

INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma contextualização sobre a temática desta área de pesquisa. Na sequência, são expostos os objetivos almejados durante a elaboração do trabalho. Por fim, apresenta-se a estruturação desta dissertação.

1.1 Contextualização

De acordo com [Malkin e Guo \(2008\)](#), os Processos abrasivos, como retificação, lapidação, brunimento e polimento, são usados na fabricação de quase todos os produtos físicos. Sua finalidade principal é melhorar a qualidade da peça, (por exemplo: componentes automotivos, superfícies funcionais, dispositivos ópticos, moldes e matrizes, entre outros) ou para gerar a forma necessária em materiais de difícil usinabilidade (tais como: pás de turbinas, ferramentas de corte, etc.). Processos de retificação, um subconjunto dos processos abrasivos supracitados, são aplicados ao final da cadeia de processamento, alterando a topografia da superfície da peça e a sua integridade. Portanto, os processos abrasivos têm um forte impacto sobre o desempenho do produto resultante.

Segundo [Oliveira *et al.* \(2009\)](#), desde àquela época, a fabricação está passando por uma rápida mudança, graças ao acesso a recursos a partir de fontes em todo mundo, bem como o fornecimento de componentes manufaturados. Como resultado desta mudança, a investigação e o desenvolvimento na indústria transformadora precisam ser dissociados entre os avanços na tecnologia, recursos humanos e os meios que permitam a repetibilidade dos resultados. Nesse sentido, em consonância com [Klocke *et al.* \(2015\)](#), a busca pela manufatura eficiente, no tocante à qualidade superficial, produtividade e custos, faz com que ocorra uma constante mudança na tecnologia dos materiais, elevando consideravelmente os limites e capacidades dos processos de fabricação, enfatizando, portanto, a necessidade crítica de desenvolver avançadas e robustas técnicas de produção. Além disso, as exigências em alcançar tolerâncias estreitas, excelentes acabamentos na superfície e integridade superficial aumentam os esforços da indústria na direção

da melhoria da eficiência, redução dos custos e na satisfação do cliente.

De acordo com [Reed \(2006\)](#) e [Geddes, Leon e Huang \(2010\)](#), as superligas, foram desenvolvidas primeiramente para a indústria aeronáutica (motores a jato - como uma alternativa para reduzir a massa dos componentes envolvidos), com posteriores aplicações em seções do compressor e combustor, lâminas e discos de turbina, entre outros. Também são utilizadas nas seguintes indústrias: geração de energia em usinas nucleares (reatores); metal-mecânica (fornos industriais e trocadores de calor); petroquímica (equipamentos para produção de petróleo); automotiva (turbocompressores e válvulas); e biomédica (próteses e implantes). Portanto, requerem alto desempenho em elevadas temperaturas (do inglês, *high strength thermal resistant* - HSTR) e são aplicadas em peças de alto valor agregado. Os materiais Inconel® 751, aço 21-43 e Silcrome 1 são utilizados na indústria automotiva (válvulas de motores de combustão interna). As superligas incluem ligas de níquel, níquel-ferro, cobalto, cromo, entre outros elementos; e possuem elevada resistência à abrasão e fluência, com altos valores de ponto de fusão. Além destas propriedades, possuem alta resistência à fratura, resistência à corrosão e à oxidação em elevadas temperaturas e, ainda assim, mantêm sua resistência mecânica sob tais condições ([SINHA et al., 2016](#)). Tais metais são considerados de difícil retificação (do inglês, *difficult to grind* - DTG), pois possuem características peculiares, como baixa condutividade térmica, alta tendência de encruamento e alta afinidade com os materiais da ferramenta, portanto, requerem a utilização de processos de retificação e ferramentas abrasivas de alto desempenho e resistentes ao desgaste.

Com a evolução do conhecimento dos materiais, métodos de usinagem e de novas ferramentas, tornou-se possível o desenvolvimento de ferramentas de corte¹ eficientes e novas estratégias para usinar metais de difícil retificação. Segundo [Silva e Oliveira \(2011\)](#), vários sistemas têm sido desenvolvidos para retificar componentes criados a partir de superligas. Sistemas construídos por rebolos de *cubic boron nitride* (cBN) eletrodepositados (EP) são bem adaptados para a retificação de forma e operações de desbaste. Em consonância com [Webster e Tricard \(2004\)](#), rebolos de cBN EP representam a maior fatia do mercado de retificação com uma camada única de abrasivos, especialmente em aplicações automotivas e aeroespaciais com geometrias complexas. A desvantagem do rebolo cBN EP é a variação do desempenho do rebolo, sendo dependente do volume de material removido, já que a erosão do cavaco/ligante causa uma alteração da rugosidade ativa da ferramenta², com impacto na rugosidade da peça. Consequentemente, para maximizar a produtividade e minimizar custos de produção, sistemas de retificação utilizados na produção de componentes com superligas são frequentemente construídos com rebolos cBN vitrificados, os quais podem ser dressados³ e ter sua rugosidade ativa controlada

¹ O desempenho do rebolo é fortemente influenciado pelas ferramentas e condições utilizadas durante a dressagem ([WEBSTER; TRICARD, 2004](#)).

² Descoberto por [Yonekura e Yokogawa \(1983\)](#), a rugosidade ativa do rebolo, também chamada de “Tsukidashiryo”, é a camada afetada durante a dressagem, onde ocorre a remoção de grãos e do ligante, alterando a concentração de ambos. Para grande parte das aplicações, com o início do processo de usinagem, os cavacos erodem o ligante, aumentando a camada afetada. Como resultado ocorre uma queda nas forças e piora na qualidade superficial das peças, acompanhada pelo aumento do desgaste do rebolo.

³ A combinação de dressagem e o uso de limpadores a alta pressão permitem a remoção dos cavacos alojados nas

(SILVA; OLIVEIRA, 2011).

Os materiais DTG vêm sendo retificados, a priori, com rebolos de ligante metálico. Todavia, a mudança de desempenho do rebolo com o volume de material removido não pode ser facilmente corrigida, já que este rebolo não pode ser dressado de modo convencional para a correção de sua superfície ativa de corte. Todavia, pode ser dressado pela estratégia de *touch-dressing*, que, segundo Klocke (2009), é uma dressagem com pequenas profundidades de corte, entre 1-3 μm^4 , tornando-se possível nivelar os grãos expostos na camada periférica do rebolo, requerendo-se assim um sistema de alta precisão de monitoramento. Por isso, o uso de rebolos de cBN com ligante vitrificado é uma alternativa viável, resultado da possibilidade de dressagem para correção de sua superfície ativa de corte. Entretanto, são necessários periféricos e sistemas auxiliares para a utilização do cBN vitrificado, por exemplo: sistema de dressagem rotativa eficiente e com monitoramento por emissão acústica, visando garantir o sucesso da operação. Conforme Oliveira *et al.* (2009), as limitações para incrementar o uso de rebolos cBN vitrificado são relacionados aos custos ferramentais, 40%, seguido pela necessidade de melhor compreensão do processo de retificação com cBN, 20%, necessidade de melhores sistemas de monitoramento, 10%, sistema de dressagem mais efetivo, 10%, e carência de flexibilidade, 10%. A necessidade da melhoria da porosidade, operadores treinados e instabilidade do processo também foram listados como outros fatores, 10%. Sendo assim, a necessidade do desenvolvimento de tecnologias em relação ao ligante vitrificado (promover uma estrutura mais aberta - maior porosidade) é essencial para promover uma menor interação ligante/peça e, conseqüentemente, redução do atrito e aumento da eficiência do transporte de fluido para o local de retificação, reduzindo a possibilidade de danos superficiais na peça.

Como uma nova alternativa para a retificação de materiais DTG, os rebolos convencionais de grão abrasivo *Seeded-gel* (SG), comumente chamados de “cerâmicos”, ganharam força no mercado nos últimos anos. Os grãos cerâmicos Quantum® são uma evolução produtiva dos abrasivos convencionais SG. Segundo Marinescu *et al.* (2007), os abrasivos convencionais à base de óxido de alumínio (Al_2O_3) são produzidos por eletrofusão com pós-resfriamento. Para os grãos abrasivos de óxido de alumínio, convencionais e SG, a matéria prima mais comum é a bauxita fundida em forno de arco elétrico a 2.600°C. Especificamente, em relação à manufatura do grão abrasivo SG, a precipitação química do óxido de magnésio (MgO) no Al_2O_3 deve ocorrer, inicialmente, para a criação de núcleos de grãos de alumina-magnésia, na ordem de 50 nm de tamanho. Como resultado, a alumina levigada (óxido de alumínio em forma de gel) obtida é seca, de tamanho granulado, onde posteriormente é triturada, amassada e moída e, por fim, é sinterizada a 1.200°C. Os grãos resultantes são compostos por uma estrutura monofásica de alumina- α , com um diâmetro que varia entre 0,2 - 50 μm . Adicionalmente, devido ao maior

porosidades rebolo a remoção dos grãos desgastados e mal ancorados, expondo assim, novas arestas ativas de corte e resgatando a agressividade do rebolo (KLOCKE *et al.*, 2015).

⁴ De acordo com Marinescu *et al.* (2007), vários sensores vêm sendo desenvolvidos com a capacidade de detecção da profundidade de dressagem menor que 0,25 μm .

módulo de elasticidade e força de adesão do ligante, o ligante Vitrium³®, desenvolvido para uso com grãos cerâmicos, permite uma maior protrusão do grão (expondo uma maior área de superfície do grão) e um menor atrito ligante-peça, o que promove menores temperaturas de retificação e consumos de força e energia.

Além disso, vale ressaltar que outra desvantagem dos rebolos convencionais é sua baixa faixa de velocidade de corte, visto que as forças de retificação em altas velocidades são superiores às forças de adesão do ligante/grão em rebolos convencionais, levando, por questões de segurança, à impossibilidade da utilização dos mesmos em altas velocidades. Todavia, com as tecnologias atuais, existe a viabilidade da utilização destes para altas velocidades, obtendo processos compativelmente eficientes em relação à velocidade, quando comparados com os rebolos de cBN.

Neste cenário de introdução e comparação de novas ferramentas abrasivas, torna-se necessário a utilização de ferramentas de avaliação de desempenho comparativo de rebolos. Segundo [Malkin e Guo \(2008\)](#), o parâmetro mais utilizado para avaliar o desempenho dos rebolos quando da retificação de um dado material é a relação G (razão entre o volume de material removido durante a retificação e o volume desgastado do rebolo). Todavia, conforme salientado pelos autores, a resistência do rebolo ao desgaste é apenas um dos fatores a serem levados em consideração quando se deseja determinar a usinabilidade de um dado material. O fim da vida de um rebolo e sua necessidade de dressagem é determinada pelo aumento excessivo das forças de retificação, causada pela perda de capacidade de corte do grão, resultado do arredondamento das arestas de corte do mesmo, gerando o desvio dimensional ou geométrico da peça retificada, devido ao pelo desgaste macrogeométrico do rebolo. Desta forma, além do cálculo da relação G, outros parâmetros, tais como: potência (força e energia específica de retificação), análise da superfície do rebolo/peça, rugosidade, estabilidade dimensional e geométrica da peça, avaliação microestrutural devem ser adicionados à metodologia de análise, no intuito de identificar o mecanismo governante para a usinabilidade daquele material, bem como para avaliar a diferença de desempenho entre especificações distintas de rebolos a serem utilizados. Além dos parâmetros tradicionais de avaliação, a introdução de critérios de sustentabilidade (nos três pilares: econômico, ambiental e social) permite uma melhor tomada de decisão quanto a adoção do tipo de rebolo a ser utilizado quando da retificação de superligas.

Nessa perspectiva, as superligas possuem características peculiares que dificultam a sua retificação, necessitando da utilização de rebolos de cBN para sua usinagem. Os rebolos de cBN EP possuem uma característica transiente de sua superfície ativa de corte dificultando sua utilização ao longo do processo. Como alternativa, a utilização de rebolos cBN vitrificados se destacam, apesar do elevado custo, angariando a possibilidade de correção da rugosidade ativa da superfície por meio da dressagem. Todavia, em relação aos rebolos convencionais, estes tendem a ter piores resultados, devido às suas características físico-químicas, mas com o advento de tecnologias relacionadas aos grãos e ligantes modificados tecnologicamente, existe a hipótese da

utilização destes tipos de rebolo quando da retificação de materiais DTG, levando-se a resultados satisfatórios, dependendo da aplicação. E estas novas tecnologias promoveram a possibilidade de grãos mais friáveis e duros, além de ligantes mais resistentes mecânica e quimicamente, fazendo com que o rebolo adquira uma estrutura aberta (maior porosidade, devido à menor área do ligante), levando a uma redução do atrito pelo melhor fluxo de fluido de corte e menor interação ligante/peça. Como resultado, maximiza-se o desempenho do processo, resultando em uma melhor qualidade superficial da peça e diminuição dos custos associados.

Nesse sentido, com um custo maior do que o de um rebolo convencional de Al_2O_3 e inferior ao de um rebolo de cBN, os rebolos convencionais de grão cerâmico e ligante vitrificado de alto desempenho podem ser dressados com dressadores estáticos, permitindo assim o uso de procedimentos operacionais de maior facilidade de implementação, caracterizando-se como alternativa promissora para retificação de materiais DTG. Neste cenário de introdução de novas ferramentas abrasivas, torna-se necessário a utilização de estratégia de avaliação de desempenho comparativo de rebolos, que possam englobar diferentes aspectos do processo de retificação em estudo e que inclua requisitos técnicos do componente a ser retificado, bem como indicadores de sustentabilidade do processo, em todas as suas dimensões.

Feita esta apresentação do escopo em que se insere este trabalho, procurou-se, durante o desenvolvimento desta dissertação, almejar os objetivos listados na próxima subseção.

1.2 Objetivos

Esta dissertação propõe atender ao objetivo geral e aos objetivos específicos, conforme apresentado abaixo.

1.2.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral desta dissertação é avaliar a utilização do rebolo convencional de alto desempenho quando comparado ao rebolo de cBN vitrificado na retificação de superligas.

1.2.2 *Objetivos específicos*

Derivados e com a finalidade de conduzir ao objetivo geral, os objetivos específicos são:

- Revisar a literatura referente ao tema de retificação de superligas, a fim de construir indicadores bibliométricos; além de pesquisar os requisitos técnicos, científicos e tecnológicos quando da retificação de superligas, buscando-se verificar os meios e métodos para sua usinagem;
- Construir indicadores de desempenho, avaliando-se a influência dos parâmetros de entrada (velocidade de corte, material e taxa específica de remoção utilizada) no processo, por meio

das seguintes métricas: questões energéticas relacionadas ao processo; desgaste/relação G, verificando os mecanismos predominantes de desgaste dos rebolos; superfície do reboło; cavaco; qualidade final da peça (rugosidade, circularidade e análise superficial - topografia, microestrutura e microdureza) e fatores econômicos associados.

- Construir indicadores de sustentabilidade, levando-se em consideração aspectos de comportamento econômico, ambiental e social do processo de retificação de superligas.
- Delinear conclusões, buscando-se compreender o desempenho de cada processo e, nesta perspectiva, contribuir com a área de pesquisa e fomentar a formação de recursos humanos.

1.3 Estruturação do trabalho

A seguir, faz-se uma apresentação da estruturação deste trabalho, o qual foi dividido em 5 capítulos textuais e 3 elementos pós-textuais.

O presente capítulo possui um caráter introdutório, onde se descreve a contextualização do estudo e apresentam-se seus objetivos. No capítulo 2, apresentou-se a revisão da literatura. Por possuir um caráter qualitativo e quantitativo, abordaram-se os seguintes conteúdos: análise bibliométrica do tema – indicadores de produção e citação; rebolos – composições e características dos rebolos convencionais e superabrasivos; evolução da retificação/rebolo e a possibilidade da utilização de rebolos convencionais de alta performance quando comparada à de cBN; por fim, apresentou-se as características e dificuldades da retificação de superligas. No capítulo 3 expõe-se a metodologia empregada no trabalho, descrevendo-se os materiais, métodos e meios científicos utilizados. No capítulo 4 abordam-se os resultados encontrados a partir dos experimentos realizados. No 5 encontram-se as conclusões pertinentes a este estudo, juntamente com algumas sugestões para trabalhos futuros e produção bibliográfica. Por fim, encontram-se os elementos pós textuais: Referências; Apêndice A; apresentando análises adicionais sobre a bibliometria; Apêndice B, contendo características do reboło convencional de alto desempenho; C, contendo características do reboło de cBN; e Apêndice D, expondo ilustrações e tabelas adicionais provenientes deste estudo.

REVISÃO DA LITERATURA

Esta etapa possui um caráter quantitativo e qualitativo, que visa exprimir conhecimento sobre o assunto. O referencial teórico foi dividido em três principais tópicos: primeiramente, (a) apresenta-se uma análise bibliométrica com o intuito de quantificar, analisar e construir indicadores sobre o tema. Em seguida, (b) visa-se a exposição acerca das composições e características dos rebolos e expressa-se sobre a evolução dos rebolos (convencional de alto desempenho e superabrasivo cBN) e, conseqüentemente, diferenças e desafios tecnológicos. Por fim, apresenta-se uma abordagem sobre a influência da velocidade de corte no desempenho do processo de retificação. Como resultado, será possível, através de uma revisão da literatura, indicar as possíveis viabilidades técnicas da utilização do rebolo de alto desempenho quando comparado ao cBN. Na sequência, (c) busca-se exprimir conhecimento sobre superligas, materiais DTG, e, conseqüentemente, o entendimento das dificuldades e desafios de sua retificação e a utilização de rebolos de alto desempenho como alternativa.

Como resultado desta etapa, definem-se os fundamentos teóricos para correlacionar e evidenciar os mecanismos e condições que governam o processo, verificando a influência das velocidades de corte, materiais e taxa de remoção utilizados.

2.1 Análise bibliométrica

As fases de desenvolvimento adotadas nos procedimentos da bibliometria estão representadas na Figura 1. Avaliaram-se dois tipos de indicadores bibliométricos: produção e citação. Primeiramente, analisando publicações que possuem alguma relação de interesse com este estudo, construíram-se os indicadores de produção, em que se analisaram os periódicos mais prolíficos de impacto da área. Ulteriormente, avaliaram-se os autores mais produtivos e a caracterização dos artigos por país de origem dos estudos. Por fim, verificou-se a evolução da produção científica por ano. Em seguida, geraram-se os indicadores de citação, nos quais quantificaram-se: número de citações dos periódicos e dos artigos analisados, citações dos principais autores e as referências

mais citadas. Adicionalmente, apresenta-se uma análise do número de documentos publicados, citações recebidas e índices Hs dos principais autores.

Figura 1 – Representação das fases de desenvolvimento da bibliometria.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A fim de se identificar publicações sobre o tema compreendido nesta dissertação, efetuou-se uma consulta junto às seguintes bases de dados: Scopus®¹ da Elsevier B. V. (ELSEVIER, 2017) e Web of Science^{TM2} da Thomson Reuters^{TM3} (REUTERS, 2017b).

Utilizou-se os seguintes critérios de busca: tipo de documento – artigo, idioma – inglês, título (*title*), resumo (*abstract*) e palavras-chave (*keywords*). Pesquisou-se no campo assunto as subsequentes palavras-chave: *grinding* e *superalloy*. Ulteriormente, outras palavras-chave foram inseridas na busca: *ceramic grain*, *Nortom Vitrium* e *Nortom Quantum*, sendo a adição destas justificada pela similaridade dos termos com a atual pesquisa.

Para a filtragem dos resultados, utilizou-se o InCitesTM Journal Citation Reports®⁴ da Thomson ReutersTM (REUTERS, 2017a), a fim de se encontrar apenas os periódicos com Fator de Impacto (do inglês, *Journal Impact Factor* - JIF) maior que um ($JIF > 1$).

2.1.1 Indicadores de produção

A Figura 54 do Apêndice A apresenta os JIF de 2015 dos 30 periódicos analisados. Os 3 periódicos com maiores fatores de impacto são: *Journal of Cleaner Production* (4,959), *Materials and Design* (3,997) e *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (3,315). Sendo todos estes considerados periódicos qualis⁵ A1 na área de Engenharia III (atualização de classificação de periódicos quadriênio 2013-2016) (COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR, 2017).

¹ Disponível em: <<https://www.scopus.com/>>.

² Disponível em: <<http://apps.webofknowledge.com>>.

³ Atualmente, chama-se Clarivate Analytics.

⁴ Disponível em: <<https://jcr.incites.thomsonreuters.com/>>.

⁵ Disponível em: <<https://sucupira.capes.gov.br>>.

Após a triagem dos periódicos obteve-se um montante de 177 resultados (135 artigos da Scopus® e 42 artigos da Web of Science™), que possuem as palavras-chave supracitadas em seu escopo. Utilizou-se o software bibliométrico Vantage Point⁶ para extração dos dados dos artigos, a fim de facilitar e esclarecer os relacionamentos e encontrar padrões entre eles (POINT, 2017).

A Figura 2 discrimina a quantidade de artigos por periódico analisado. Observa-se que os quatro primeiros colocados: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (46); CIRP⁷ Annals - Manufacturing Technology (26); *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (17) e *Journal of Materials Processing Technology* (16), são os mais prolíficos e representam 59,32% dos periódicos examinados, corroborando a importância desses periódicos no cenário mundial. Dentre estes 4 periódicos supracitados, apenas o primeiro é considerado como periódico qualis⁸ B1 na área de Engenharia III (atualização de classificação de periódicos quadriênio 2013-2016), sendo os outros 3 considerados como qualis A1 (COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR, 2017).

Figura 2 – Quantidade de artigos por periódico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

⁶ Disponível em: <<https://www.thevantagepoint.com/>>.

⁷ College International pour la Recherche en Productique - Academia Internacional de Engenharia de Produção. (CIRP)

⁸ Disponível em: <<https://sucupira.capes.gov.br/>>.

Dentre os 427 autores, destes 177 artigos analisados, identificou-se os 10 autores que mais publicaram, conforme apresentado na Figura 3. Os autores Ding, W. F., Xu, J. H., Fu, Y. C., Chen, Z. Z. e Su, H. H. são professores chineses da Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, demonstrando a alta quantidade de publicações da China. Jawahir, I. S. é professor da University of Kentucky, EUA. Ezugwu E. O. foi professor/pesquisador que atuou na Air Force Institute of Technology (AFIT), Nigéria. Chen X. é professor da Liverpool John Moores University, Inglaterra. Gindy N. foi professor da University of Nottingham Ningbo China (UNNC) e Sarhan A.A.D. é professor da Assiut University, Egito. Os autores mais produtivos, em termos da quantidade de publicações, não receberam uma análise mais profunda. Já para os autores que mais receberam citações dentre os artigos analisados, avaliou-se as citações recebidas e índices Hs, conforme descrito no Item 2.1.2. Esta análise foi feita apenas para os autores que receberam maior número de citações, pois o número de citações recebeu um peso maior de importância do que o número de publicações. Por isso, apenas estes receberam uma análise mais profunda.

Figura 3 – Autores que mais publicaram dentre os artigos analisados.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Elaborou-se um gráfico para identificar os países em que se encontram os autores dos artigos analisados, conforme apresentado na Figura 4. Foram identificados 35 países. Nota-se a China, Estados Unidos, Reino Unido, Alemanha e Japão nas cinco primeiras colocações, respectivamente. Pode-se associar o destaque destes países, com algumas exceções, com a realidade fabril, produção de produtos em geral e ao nível tecnológico elevado e moderno de suas indústrias, fortalecendo a realização de pesquisas na área. O Brasil se encontra na 17ª posição do ranking, com apenas 4 artigos na amostra, caracterizando sua baixa representatividade na área. Esta dissertação corrobora sobre a importância em estudos a respeito de retificação de superligas

no Brasil.

Figura 4 – Número de artigos por país.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir do número de artigos levantados na busca (177), elaborou-se um gráfico com a evolução do número de publicações por ano, no período de 1980-2017 (37 anos), conforme Figura 5. A quantidade máxima de publicações ocorridas foi de 23 artigos em 2015. Nota-se uma crescente tendência nos últimos anos, sendo que os últimos 5 e 10 anos representam 44,63 e 66,67%, respectivamente, do total avaliado. Portanto, caracteriza-se a tendência na utilização e estudos em retificação de superligas, indicando o atual escopo em que se encontra esta dissertação.

2.1.2 Indicadores de citações

Na Figura 55 do Apêndice A encontra-se a quantidade de citações em 2015 dos 30 periódicos analisados, totalizando 475.229 citações. Os periódicos que mais receberam citações foram o *Journal of Alloys and Compounds* (60.798), *Materials Science and Engineering A-Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing* (54.005) e *Applied Surface Science* (52.411). Sendo todos estes considerados periódicos qualis A2 na área de Engenharia III (atualização de classificação de periódicos quadriênio 2013-2016).

Os 177 artigos estudados receberam, até a data da coleta, 6.562 citações.

Figura 5 – Evolução das publicações por ano.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 6 apresenta os autores que receberam, até a data da coleta, mais citações e representam os 10 primeiros colocados no ranking. O número de citações recebidos pelos autores supracitados são referentes apenas às citações dos artigos aqui analisados. No Apêndice A, encontram-se maiores informações sobre esses autores, tais com: onde atuam, ano e local de obtenção do título de doutor, principais áreas de pesquisa, entre outras. As Figuras 56, 57 e 58 do Apêndice A exibem o número de documentos publicados, citações recebidas e os Índices Hs, respectivamente, destes autores.

A Tabela 20 do Apêndice A apresenta as 10 principais referências citadas mais vezes pelos 177 estudados. A pesquisa limitou-se somente às 10 primeiras, uma vez que existem mais de 6.000 referências nos artigos analisados.

Por fim, vale ressaltar que a adoção das duas principais palavras-chaves nas bases de dados resultou, obrigatoriamente, que elas estejam juntas no título ou resumo dos artigos analisados.

A seguir, serão apresentadas algumas peculiaridades sobre os diferentes tipos de rebolos e seus materiais abrasivos.

2.2 Ferramenta abrasiva: Rebolo

Este tópico foi dividido em 3 sub-itens. O primeiro: exposição das composições e características dos rebolos convencionais e superabrasivos; segundo: a evolução dos rebolos e a possibilidade da utilização de rebolos convencionais em processos de alto rendimento e; o último: a influência das velocidades de corte na retificação.

Figura 6 – Autores que mais receberam citações dentre os artigos analisados na bibliometria.

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.1 Composições e características dos rebolos convencionais e superabrasivos

De acordo com Malkin e Guo (2008), a eficiência e efetividade de um processo de retificação estão entranhadamente ligadas com o rebolo utilizado e seu condicionamento, caracterizado por ser uma ferramenta multicortante, composta por grãos abrasivos e aglomerante. O rebolo é a ferramenta de corte utilizada na retificação e é formado basicamente por um sistema ternário: ligante, grãos abrasivos⁹ e poros. As propriedades e desempenho do rebolo dependem de cinco principais fatores: grão abrasivo, tamanho do grão, material ligante, grau (dureza) e estrutura (porosidade).

Segundo Klocke (2009) e Groover (2010), as características desejadas para o grão abrasivo são: alta dureza e tenacidade¹⁰, resistência ao desgaste¹¹, alta resistência térmica e química e friabilidade (capacidade de expor novas arestas ativas durante o corte). Dentre os materiais abrasivos, destacam-se: Al_2O_3 e SiC como abrasivos convencionais, diamante e cBN como superabrasivos (WEGENER *et al.*, 2011). Jackson e Davim (2011) e Marinescu *et al.* (2007) descrevem detalhadamente o método de manufatura para cada tipo. A Tabela 1 apresenta

⁹ O tamanho do grão abrasivo tem influência significativa nas forças e energias de retificação, taxa de desgaste, integridade da superfície/subsuperfície final, entre outros (WEBSTER; TRICARD, 2004).

¹⁰ Amplamente dependente das propriedades do grão abrasivo: tamanho do grão, morfologia, impureza, inclusão e presença de poros (JACKSON; DAVIM, 2011).

¹¹ O desgaste por atrito ocorre de átomo por átomo, pela interação do grão e o material retificado. Esta interação físico-química é bastante complexa (JACKSON; DAVIM, 2011).

algumas propriedades dos materiais abrasivos supracitados.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais abrasivos.

	Material			
	Al ₂ O ₃	SiC	cBN	D
Estrutura cristalina	Hexagonal	Hexagonal	Cúbica	Cúbica
Densidade (ρ) [g/cm ³]	3,98	3,22	3,48	3,52
Temperatura de fusão (T_f) [°C]	2040	2830	3200 (pressão de 105 kbar – ponto triplo)	3700 (pressão de 130 kbar – ponto triplo)
Dureza Knoop* (HK)[GPa]	20,6	23,5	46,1	78,5
Condutividade (k) [W/m.K]	35	100	240-1300	600-2000
Calor específico (c) [J/kg.K]	765	710	506	511
Estabilidade térmica [°C]	1750	1500	1400	511
Difusidade (D) [mm ² /s]	11,5	44	136-738	333-1110
Afinidade química	Cerâmicas, óxidos, vidros e rocha	Materiais que assimilam carbono	Raro	Materiais que assimilam carbono
Recomendado para:	Aços em geral, aço rápido, temperados, cementados, inoxidáveis e ligas aeronáuticas	Não metálicos, vidro, ferros fundidos e concreto de tungstênio	Aços temperados, ligas aeronáuticas e ferrosos de alta dureza	Cerâmicas duras, não metálicos, não ferrosos e metal duro brasado

*Valor aproximado: depende da orientação cristalina, microestrutura e pureza.

Fonte: Adaptada de [Malkin e Guo \(2008\)](#); [Rowe \(2009\)](#) e [Machado et al. \(2015\)](#).

De acordo com [Jackson e Davim \(2011\)](#), o formato e tamanho do grão têm um enorme impacto em sua própria resistência, desempenho da retificação e nas características da formulação e manufatura do rebolo. Adicionalmente, o tamanho do grão é responsável por determinar as tolerâncias finais do material retificado e a taxa de remoção utilizada na retificação. Menores grãos produzem melhores acabamentos¹², enquanto que grãos maiores permitem maiores taxas de remoção de material ([GROOVER, 2010](#)).

De acordo com [Wegener et al. \(2011\)](#) e [Machado et al. \(2015\)](#), os rebolos são classificados de acordo com seu sistema de ligação e, basicamente, dividem-se em: elástico, vitrificado, orgânicos ou resinoides e metálicos. Em, aproximadamente 1850, surgiram os elásticos; em 1870, os vitrificados; no início do século XX, os silicatos; com a descoberta das resinas de

¹² Alta razão entre as velocidade do rebolo/peça também contribuem para a redução da rugosidade ([MACHADO et al., 2015](#))

fenol-formaldeído (baquelite), surgiram os ligantes fenólicos, em 1923 e, por fim, os ligantes metálicos em 1940 (MALKIN; GUO, 2008).

Segundo Zheng *et al.* (2016), o superabrasivo de cBN possui excelentes propriedades, como: alta dureza (um dos materiais mais duros conhecidos, após o diamante), alta condutividade térmica, alta resistência ao desgaste e alta inércia química, fornecendo, assim, possíveis soluções para a retificação de superligas.

Baseando-se neste exposto, de acordo com as propriedades físico-químicas dos grãos superabrasivos, estes materiais apresentam um desempenho superior quando comparados aos abrasivos convencionais. Isto reflete diretamente no processo de retificação, visto que o rebolo é formado basicamente por grãos abrasivos e ligante. Em relação ao ligante, vale ressaltar que a escolha do tipo de ligante está relacionada com o tipo de aplicação desejada e às características do processo. Por fim, destaca-se a necessidade e conhecimento da relação rebolo/peça para a escolha adequada dos parâmetros e estratégias do processo, a fim de otimizar a relação qualidade/custo.

2.2.2 Evolução da retificação/rebolos e possibilidades da utilização de rebolos de alto rendimento

Segundo Lynch e Rowland (2009), a história dos processos abrasivos começa no início da agricultura, por volta de 8.000 a.C. e refere-se apenas às atividades dos Homo sapiens. Em consonância com Malkin e Guo (2008) e Rowe (2009), o uso de processos abrasivos é provavelmente um dos mais antigos e primitivos, datando de eras pré-históricas, onde o homem Neandertal esculpia suas ferramentas e armas. Todavia, a redução do tamanho dos componentes foi muito antes disso, por exemplo: os chimpanzés, em algumas regiões da África Ocidental, tiveram a cultura de quebrar nozes e castanhas há 2,6 milhões de anos. A redução de tamanho – processo de engenharia mais antigo – teve seu começo nos tempos pré-históricos, quando os primeiros humanos quebravam grãos com pedras para liberar as partes internas comestíveis das cascas duras protetoras (LYNCH; ROWLAND, 2009).

Sendo assim, fazendo-se uma analogia com o processo abrasivo de retificação, percebe-se que a redução do tamanho dos componentes (nesse caso, dos grãos abrasivos) é essencial. Pode-se notar que, com a evolução dos meios científicos e tecnológicos, foi capaz de manufaturar grãos abrasivos em escala micrométrica para o rebolo e, conseqüentemente, conseguiu-se maior qualidade superficial da peça.

A retificação bruta de metais data de aproximadamente 2.000 a.C. e teve elevada importância nas habilidades de sobrevivência e no desenvolvimento da sociedade. Além disso, a técnica rudimentar de retificação foi essencial para a construção das pirâmides no antigo Egito (GROOVER, 2010).

De acordo com Lynch e Rowland (2009), atualmente, à medida que o século XXI começa se a desenrolar, as questões econômicas, ambientais e sociais – tripés da sustentabilidade – dos

processos de retificação, mudaram e ganharam importância, tais como: questões energéticas; novos materiais com razões ótimas entre massa/performance; dentre outros. Com o desenvolvimento de tecnologias para computadores, possibilitou-se a criação de simulações, que favorecem a manufatura e minimizam perdas associadas ao processo. [Thakur e Gangopadhyay \(2016\)](#) citam que o controle da retificação em tempo real, com tecnologias avançadas baseadas em sensores é uma metodologia emergente que possibilita a efetiva avaliação e controle online da qualidade dos componentes. Em consonância com [Brinksmeier et al. \(2006\)](#), em relação aos avanços em modelagem e simulação no processo de retificação, aumentou-se as estratégias relacionadas ao processo de retificação com o intuito de otimizar a relação qualidade superficial/tempo de manufatura, resultando em um processo economicamente eficiente. Para tal otimização, o conhecimento da interação peça/rebolo e o desenvolvimento de modelos dos processos físicos (fundamentos analíticos, elementos finitos, cinemática, dinâmica e modelos de regressão), empíricos (regressão e redes neurais artificiais) e heurísticos foram essenciais.

Como visto, o paradigma da manufatura vem sendo constantemente alterado, de acordo com a sociedade e seus requisitos técnicos e funcionais. Atualmente, nota-se uma visão sustentável dos processos abrasivos, visando a diminuição de custos, desperdícios e impactos ao meio ambiente.

A melhoria dos processos de retificação vem sendo possibilitada pelo constante desenvolvimento de grãos abrasivos, rebolos, fluidos e máquinas. A expansão do conhecimento na física e química do processo proporcionam maiores confiabilidades no processo ([KLOCKE, 2009](#)). Em consonância com [Marinescu et al. \(2007\)](#), algumas modernas máquinas de retificação possuem algoritmos incorporados, sistemas de monitoramento e controle, estabilidade estática e dinâmica, entre outras. Estas características, quando incorporadas, possibilitam maior eficiência, produtividade e confiabilidade ao processo, além de elevada precisão e qualidade superficial da peça. Por isto, os processos abrasivos continuam sendo incrementados e utilizados em diversas aplicações da manufatura.

Segundo [Malkin e Guo \(2008\)](#), com o aumento da demanda de produtos de alta qualidade superficial e elevada precisão geométrica, a retificação torna-se uma alternativa bastante viável. Àquela época, a retificação corresponde a cerca de 20-25% do total de gastos em operações de usinagem.

Como mencionado por Cheape¹³ (1985 apud ([WEBSTER; TRICARD, 2004](#))), a evolução da retificação deu-se da seguinte forma: até o século XVIII, a retificação foi realizada manualmente e, no século XIX, foram introduzidas as máquinas de retificação, inicialmente meras modificações de tornos. O primeiro rebolo sólido com ligante foi produzido na Índia para afiar gemas, um importante comércio na época ([GROOVER, 2010](#)). A primeira máquina universal de retificação surgiu em 1875, seguida em 1880 e 1890 por um número de máquinas de

¹³ CHEAPE, C. W. **Family Firm to Modern Multinational**: Norton Company. New England Enterprise. Cambridge: MA, Harvard University Press, 1985.

precisão especializadas. Em 28 de janeiro de 1957, Wentorf R. H., do laboratório de pesquisas da General Electric (GE) publicou um dos mais significativos avanços no campo de abrasivos: a invenção do cBN (WENTORF¹⁴, 1957, 1961 apud (WEBSTER; TRICARD, 2004). Desde então, surgiram melhorias em grãos, estruturas, formas, durezas e preços, o que tem movido firmemente o mercado de abrasivos (WEBSTER; TRICARD, 2004).

Segundo Marinescu *et al.* (2007), a evolução dos rebolos convencionais, por exemplo, em relação aos grãos, surgiram as seguintes técnicas: eletrofusão; sinterização; sol-gel e precipitação química; procedimentos de seleção e refinamento dos grãos; tem permitido utilizar rebolos convencionais de grãos modificados em velocidades de corte superiores, tornando-os, portanto, uma alternativa viável e competitiva em relação ao cBN, requerendo uma maior investigação sobre sua utilização.

Com o exposto acima, nota-se que a evolução da retificação vem ocorrendo juntamente com seus componentes (rebolos, fluidos, máquinas, processos, entre outros) e vem sendo norteadada para atender a principal funcionalidade do processo: manufaturar peças com elevada qualidade superficial, a fim de diminuir posteriores gastos durante toda a vida útil do produto. Com o intuito de aumentar a qualidade e produtividade das peças, aos longo dos anos foram desenvolvidas tecnologias para alterar as propriedades dos grãos abrasivos, conforme será apresentado a seguir.

2.2.2.1 Evolução tecnológica para modificação dos grãos

A seguir são resumidamente descritas algumas técnicas relacionadas à manufatura dos grãos, com foco no óxido de alumínio para o abrasivo convencional e no cBN para o superabrasivo.

2.2.2.1.1 Grãos de Al_2O_3

Segundo Linke (2016), a manufatura do grãos de Al_2O_3 é realizada em diferentes tipos, concentrações e processos, dependendo da sua aplicação na indústria, conforme apresentado a seguir:

1. Alumina fundida

- Marrom, branca, rosa, rubi, zircônia, mono e micro cristalina e esferoidal oca.

2. Alumina sinterizada

3. Alumina Sol-Gel

¹⁴ WENTORF, R. H. Cubic Form of Boron Nitride. *The Journal of Chemical Physics*. 26/4:956, 1957. WENTORF, R. H. The Synthesis of the Cubic Form of Boron Nitride. *The Journal of Chemical Physics*. 34/3:809-812, 1961.

A seguir, será apresentado uma descrição sobre os três itens supracitados.

1. Manufatura do Al_2O_3 por eletrofusão

Segundo [Marinescu et al. \(2007\)](#), matéria-prima mais comum para a alumina fundida por eletricidade é a bauxita, que, depende da origem, contém 85 a 90% de Al_2O_3 , 2 a 5% de óxido de titânio (TiO_2) e até 10% de óxido de ferro (Fe_2O_3), sílica e óxidos básicos. A bauxita é fundida em um forno de arco elétrico, com temperaturas entre 2.200-2.600°C. O processo foi desenvolvido por Charles B. Jacobs, em 1.897.

Segundo [Jackson e Davim \(2011\)](#), a bauxita bruta, contendo alumina na forma de minerais gibbsita, $\text{Al}(\text{OH})_3$, boemita, $\lambda\text{-AlO}(\text{OH})$, e diaspório, $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$, são colocadas juntas com os óxidos de ferro, caulinita, anatásio e TiO_2 . A Figura 7 apresenta algumas rotas de processamento para o grão de Al_2O_3 fundido.

Figura 7 – Rotas de processamento para o grão de alumina fundida.

Fonte: Adaptada de [Linke \(2016\)](#) e [Jackson e Davim \(2011\)](#).

De acordo com [Linke \(2016\)](#), a alumina marrom (do inglês, *Brown Fused Alumina* – BFA) é feita pelo processo de calcinação¹⁵ e depois fundida (conforme Figura 7). A alumina branca (do inglês, *White Fused Alumina* – WFA) é feita com matéria-prima bauxita com >99% de pureza, sendo as impurezas removidas da bauxita pelo Processo Bayer¹⁶ (Figura 7). A alumina rosa e rubi são feitas como a WFA, porém óxidos de cromo, Cr_2O_3 , são adicionados na quantidade de 0,3 ou 2%, respectivamente, no processo de fusão. A alumina zircônia¹⁷ é gerada pela adição de até 40% de dióxido de zircônia, ZrO_2 , no processo de fusão. A alumina monocristalina é produzida como a WFA, mas sulfeto de ferro é adicionado antes da fusão, resultando em formas de alumina monocristalina na matriz de sulfeto de ferro. Por fim, a manufatura da alumina esferoidal oca pode ser feita de modo que após a eletrofusão da matéria-prima, esta é despejada através de uma corrente de ar de alta pressão, transformando as partículas em esferas ocas.

¹⁵ O processo de calcinação ocorre na temperatura de 950°C para desidratar a bauxita ([LINKE, 2016](#)).

¹⁶ O processo de purificação Bayer foi inventado em 1.887 por Karl Bayer, na Rússia ([JACKSON; DAVIM, 2011](#)).

¹⁷ Com nomes comerciais de NZPlus, NZ®, NZP® e Norzon® ([JACKSON; DAVIM, 2011](#)).

Segundo Klocke (2009), após a fusão completa da mistura ocorre o resfriamento, dependendo do tamanho dos cristais desejados, a uma taxa de resfriamento que pode variar de 10-14 dias. Em seguida, as partículas são esmagadas, trituradas e/ou moídas e então crivadas, onde ocorre a separação pelo seu tamanho (peneiração, sedimentação ou separação por ar). Em consonância com Marinescu *et al.* (2007), o modo como as partículas são reduzidas tem impacto direto na forma do grão, e consequentemente, na formação do cavaco. Adicionalmente, o desempenho do grão pode ser alterado por tratamentos térmicos.

2. Manufatura do Al_2O_3 por sinterização

Segundo Jackson e Davim (2011), a alumina sinterizada faz parte de uma família de grãos produzidos primeiramente em 1.950, sem a fusão da matéria-prima, sendo utilizada de forma bruta ou purificada pelo processo Bayer e então calcinada. Inicialmente, segundo Malkin e Guo (2008) e Klocke (2009), a alumina sinterizada é fabricada por meio de pressão e extrusão de uma fina pasta ($1\text{-}5\ \mu\text{m}$) de bauxita misturada com água, ligantes e agentes auxiliares de pressão. Esta pasta é então descompactada, onde ocorre a separação (corte) do material em pequenos cilindros¹⁸. Em seguida, ocorre a sinterização em fornos rotativos, com a adição de alguns agentes, em valores de temperatura abaixo da temperatura de fusão ($1.350\text{-}1.500^\circ\text{C}$) do material. A produção do grão de Al_2O_3 sinterizado é apresentada pela rota de processamento da Figura 8.

Figura 8 – Rotas de processamento para o grão de alumina sinterização.

Fonte: Adaptada de Linke (2016) e Jackson e Davim (2011).

3. Manufatura do Al_2O_3 por Sol-Gel

Segundo Malkin e Guo (2008), a manufatura deste tipo de material não é feita por eletrofusão nem por sinterização, mas sim por uma conversão de uma dispersão coloidal de hidrosol (“sol”), para um semissólido “gel”. Em consonância com Linke (2016) e Jackson e Davim (2011), inicialmente, a bauxita é purificada e refinada pelos processos Bayer e Hall-Héroult, respectivamente; então, com a adição de álcool no Processo Ziegler, a bauxita é transformada em boehmita, $\lambda\text{-AlO(OH)}$. Neste produto são adicionados: água, dispersantes – para promover a separação uniforme das partículas – e agentes modificantes, como inibidores do crescimento de grãos (MgO , ZrO_2 , TiO_2 , Lantânio...) ou agentes de nucleação (chamados de “Seeds”). A boehmita é finamente dispersa e homogeneamente distribuída; desidratada

¹⁸ As partículas extrudadas, pelo seu formato característico, também são conhecidas por “Espaguetes” (LINKE, 2016)

(pelo processo de calcinação); laminada em finas camadas ou linhas, a cerca de 80-100°C, se necessário, as partículas são moídas e crivadas; e, por fim, ocorre a sinterização do produto final, entre 1.200-1.500°C. A produção do grão de Al_2O_3 Sol-Gel (conforme dito anteriormente, comumente conhecidos por grãos cerâmicos) é apresentada pela rota de processamento da Figura 9.

Figura 9 – Rotas de processamento para o grão de alumina SG.

Fonte: Adaptada de Linke (2016) e Jackson e Davim (2011).

Segundo Marinescu *et al.* (2007), a otimização do desempenho dos grãos produzidos pelo processo Sol Gel pode ser alterada pela formulação química e especialmente na fase de proporcionar forma ao grão, onde ocorre a manipulação de sua geometria para maximizar a eficiência do corte. Em 1.981, a 3M Company lançou um abrasivo chamado de Cubitron, vendido até hoje, que possui a tecnologia do grão microrreplicado (*Precision-Shaped Grain* – PSG), onde o grão é eletrostaticamente orientado¹⁹ para formar o ângulo de corte. Já em 1.986, a The Norton Company, atualmente integrante do grupo Saint-Gobain, adicionou aos grãos SG a química de adição dos agentes de nucleação “Seeds”, pelo processo químico de precipitação. Em 1.999, o processo de extrusão foi adicionado aos grãos SG, introduzindo os grãos Targa (TG, TG2™, TGE). Em 2.007, segundo Kiss (2013)²⁰, a Norton lançou o grão abrasivo cerâmico Quantum®, sendo desenvolvida a partir da química e forma desenvolvida para os grãos SG, possuindo a mesma dureza do SG, porém com maior friabilidade.

Sendo assim, a evolução das tecnologias para geração de grãos cerâmicos ganha estímulo e impulsiona a produtividade dos rebolos convencionais, visando alta qualidade do produto final com menores custos quando comparados aos rebolos superabrasivos. Para a utilização dos grãos cerâmicos em operações de alto rendimento necessita-se de ligantes com forças de adesão suficientes para evitar que os grãos se soltem durante a retificação. Pensando nisso, a empresa Norton Abrasivos lançou o ligante Vitrium³® que, segundo Technology (2013) ainda é uma patente pendente, possui as seguintes características: (I) proporciona maior aderência do grão,

¹⁹ A influencia da orientação destes grãos no corte ainda precisa ser melhor compreendida (WEGENER *et al.*, 2017).

²⁰ Sandor Kiss é funcionário da Saint-Gobain Construction Product da Divisão de Abrasivos da Hungria (KISS, 2013).

onde mesmo se utilizando uma menor razão ligante-abrasivo, expõe-se de maneira efetiva a área de contato entre grão/peça; (II) permite um corte frio, em virtude da redução da área de contato ligante/peça promove-se menor geração de calor durante a formação do cavaco. Além de menores espessuras de ligante nas tiras de ligação entre os grãos permitirem melhor fluxo de fluido de corte na região do corte, reduzindo a possibilidade de queima na peça e melhorando a qualidade superficial da peça; (III) favorece a manutenção do perfil, pela maior força de adesão de grãos no ligante, com consequente redução de custos devido à menor frequência de dressagens; por fim, (IV) destaca-se a possibilidade de altas velocidades de corte ([SAINT-GOBAIN ABRASIVES INC, 2016](#)).

Em relação ao último item supracitado, as velocidades utilizadas na retificação com rebolos convencionais são, usualmente, menores quando comparadas com rebolos de cBN. Por isso, a importância em pesquisas para o desenvolvimento de produtos que possam ser alternativas promissoras para a retificação, utilizando rebolos convencionais em altas velocidades de corte. Maiores informações sobre as velocidades de corte serão detalhadas, posteriormente, no subitem 2.2.3.

Nessa perspectiva, nota-se que para atender a demanda de qualidade/produtividade e, possivelmente, aumentar a competitividade dos rebolos convencionais em relação ao cBN, vêm sendo desenvolvidas tecnologias com o intuito de modificar os processos, características, formas e propriedades físico-químicas dos grãos abrasivos. Sendo assim, em relação aos grãos abrasivos, para o futuro espera-se que as técnicas de produção (eletrofusão, sinterização, sol-gel + precipitação química) e técnicas de seleção e refinamento dos grãos sejam aprimoradas ou mesmo desenvolvidos outros procedimentos.

Segundo Klocke²¹ (2003 apud ([LINKE, 2016](#))), em operações com altas taxas de remoção e elevadas velocidades de corte, os grãos SG possuem uma performance superior quando comparados aos abrasivo convencionais, com menor custo do que o cBN. Àquela época, os grãos cerâmicos eram de 15-20 vezes mais caros para serem produzidos do que os grãos abrasivos de alumina branca. Entretanto, comparado-os aos superabrasivos, os grãos cerâmicos possuem um custo de produção muito menor.

Nesse sentido, as novas gerações de grãos cerâmicos ganham estímulo e impulsionam a produtividade dos rebolos convencionais, visando alta qualidade do produto final com menores custos quando comparados aos rebolos superabrasivos de cBN. O rebolo de cBN, pelas suas propriedades físico-químicas, apresentam desempenhos superiores, porém com um custo elevado e a necessidade de sistemas periféricos na máquina para a otimização do processo. Sendo assim, buscar-se-á verificar até que ponto é vantajoso quando da retificação superligas, comparando-se um rebolo convencional de alto desempenho ao de cBN.

A seguir, será apresentado o processo de fabricação para os grãos do superabrasivo de

²¹ Klocke, F. **Flexible Hochgeschwindigkeitsbearbeitung mit Schleifscheiben aus mikrokristallinem Aluminiumoxid**. End report, Project S 498 Stiftung Industrieforschung, 2003.

cBN.

2.2.2.1.2 Grãos de cBN

A invenção do cBN ocorreu em 1.957 nos laboratórios da GE, porém este foi comercialmente introduzido 12 anos depois, em 1.969, sob o nome comercial de Borazon® (JACKSON; DAVIM, 2011). Segundo Malkin e Guo (2008), o cBN emergiu como uma alternativa superabrasiva importante para a retificação de aços, superligas e ferrosos de alta dureza, possuindo alta estabilidade térmica quando comparado ao superabrasivo de diamante, segundo Rowe (2009), por ser o segundo material mais duro (medição pelo Método de Knoop), perdendo apenas para o diamante.

Segundo Klocke (2009), o cBN é manufaturado através da pirólise da amônia e o tricloreto de boro²² utilizando um catalisador (com adição de outros elementos) com pressão de 50-90 kbar e temperaturas entre 1800-2700°C. Depois do processo de prensagem, o produto da estequiometria é tratado quimicamente, onde os resíduos do processo são dissolvidos em banhos de ácidos. Em seguida, o material é cortado (esmagado ou moído) e, então, os grãos são crivados (separados pelos mesmos processos dos grãos de alumina, peneirados ou sedimentados).

De acordo com Linke (2016), a morfologia do grão de cBN é complexa, variando entre estrutura cristalina octaédrica e cúbica e entre octaédrica e tetraédrica. As condições de síntese ajustam a morfologia do grão até um certo nível.

Em contraste aos abrasivos convencionais, o cBN é vantajoso quando da retificação de materiais considerados de difícil retificação, como as superligas (devido às características peculiares destes materiais, as superligas tendem ao empastamento do rebolo, promovem elevados desgastes ferramentais e aumentam a possibilidade de danos térmicos, conforme descrito no Item 2.4), e de materiais com durezas superiores a 55 HRC. Adicionalmente, os rebolos de cBN, por possuir baixos níveis de desgaste, também podem acarretar em alta acurácia dimensional na peça retificada por este tipo de rebolo e alta vida útil. Ao mesmo tempo, provoca menores influências negativas na superfície da peça, quando comparados aos rebolos convencionais (KLOCKE, 2009).

Baseando-se nos fatos supracitados, o rebolo convencional de alto desempenho surge como alternativa para a retificação de superligas, sendo necessária a verificação se este rebolo terá um desempenho satisfatório, se comparado a um rebolo de cBN vitrificado, ambos sendo testados em velocidades de corte típicas de um rebolo superabrasivo. Outra vantagem associada ao uso dos rebolos convencionais de alto desempenho está ligada à possibilidade de utilização de técnicas de dressagem²³ e de condicionamento tradicionais, com o uso de dressadores estáticos,

²² Dependendo do nível e do tipo de dopantes presentes na estequiometria a cor do grão resultante varia, passando de âmbar, para marrom/preto (JACKSON; DAVIM, 2011).

²³ A dressagem de rebolos abrasivos convencionais e de cBN é tradicionalmente utilizada de forma intermitente. No entanto, devido à integridade superficial e dimensional elevada, muitas máquinas de retificação incorporam a

reduzindo assim os requerimentos quanto ao ferramental de dressagem. É necessário avaliar se os benefícios de uma melhor tecnologia de grão e ligante resultarão num desempenho superior quanto aos parâmetros de processo e qualidade da peça, no caso da retificação de materiais DTG.

A seguir, será apresentado um subcapítulo sobre a influência da velocidade de corte nas operações de retificação.

2.2.3 Velocidade de corte

A velocidade de corte utilizada é outro tópico que merece destaque nos processos abrasivos, especificamente nos processos de retificação. Após uma reunião organizada em 2014, no *CIRP Workshop on Manufacturing at Double the Speed*, Cambridge, Reino Unido, dezesseis pesquisadores responderam ao desafio: “é possível manufaturar com o dobro de velocidade?”, com apresentações baseadas na experiência e conhecimento desses processos. Posterior às palestras, cerca de 40 participantes da reunião trabalharam para desenvolver uma estrutura na qual a resposta à pergunta seria respondida. Como resultado, surgiu o *Keynote* apresentado no *Journal of Materials Processing Technology*, de [Allwood et al. \(2016\)](#).

Segundo [Allwood et al. \(2016\)](#), a intenção de verificar a manufatura com o dobro de velocidade desenvolve uma maior necessidade da compreensão dos limites dos processos atuais, inclusive a retificação. Tais limites são: o material em si – a resposta do material aos parâmetros e condições de contorno aplicadas no processo; o sistema – os limites da máquina/dispositivos utilizados para o processamento/análise; e a coordenação – a coordenação do processo com o restante do sistema, pois o processo só pode ser realizado quando carregados, corretamente, as condições, parâmetros e programas. Esses limites são considerados os gargalos que inibem a manufatura em altas velocidades.

De acordo com [Allwood et al. \(2016\)](#), atualmente, as principais barreiras para altas velocidades de corte na manufatura são: limitação pela vibração e capacidade de aceleração dos motores das máquinas; qualidade da peça e o desgaste das ferramentas. Para a retificação, destaca-se como principal limitante a geração de calor entre rebolo/material, pois uma ineficiente retirada desse calor, na região de formação do cavaco, pode levar a danos térmicos (deformações plásticas, alterações da dureza, trincas, tensões residuais); transformações metalúrgicas (transformações de fase, distribuição do tamanho de grão, distribuição do tamanho dos precipitados, recristalização, martensita não temperada ou martensita demasiadamente temperada); químicas (ataque intergranular, corrosão); térmicas (zona termicamente afetada, camada refundida); e elétricas (condutividade e magnética). Essa partição de energia para o material depende do tipo de material e condições de operação, incluindo o fornecimento de fluido lubri/refrigerante na região de formação do cavaco²⁴.

capacidade de dressagem contínua ([KLOCKE et al., 2015](#)).

²⁴ Segundo [Klocke \(2009\)](#), o cavaco produzido pelo processo de retificação pode ficar fixado (empastado) no rebolo, reduzindo-se assim o espaço livre para os cavacos e fluidos. Resultando-se em possíveis queimas e

No tocante à retificação no dobro de velocidade, segundo [Allwood et al. \(2016\)](#), exigirá o dobro de frequência de limpeza e dressagem do rebolo. No entanto, uma retificação eficiente também depende da seleção do abrasivo correto (como discutido por Savington (2001²⁵ apud ([ALLWOOD et al., 2016](#)))), entre os quais os abrasivos de cBN têm sido particularmente importantes.

No que diz respeito às questões de segurança, segundo [Wegener et al. \(2017\)](#), atualmente, as máquinas de retificação tornaram-se seguras, devido à proteção contra peças ejetadas ou quebradas e/ou possíveis colisões do rebolo. Além disso, a utilização de ventiladores de exaustão e dispositivos de proteção contra explosões, elevaram as condições de segurança do operador. Ligadas às questões de segurança também estão atreladas as questões ergonômicas do operador, Interface Homem-Máquina (do inglês, *Human Machine Interface* - HMI), que foram incrementadas com a adoção de alavancas de comando, *joysticks*, telas sensíveis ao toque e sistemas de suporte para configuração do processo de retificação e dressagem, tais como simulações, calibração, balanceamento, aquisição de dados, entre outros. Todavia, com o aumento da velocidade de corte, aumenta-se a energia cinética do processo e, caso ocorra um acidente/falha, os resultados podem ser destrutivos para a máquina-ferramenta e apresentam riscos ao operador. Por isso, as questões de segurança, principalmente envolvendo altas velocidades de corte, são essenciais.

Sendo assim, por questões metalúrgicas e/ou de segurança, a utilização de altas velocidades de corte ainda é um desafio para a indústria, principalmente em relação aos rebolos convencionais, visto que os rebolos de cBN apresentam maiores condições de atingir uma maior velocidade, sem causar danos à peça. O custo da ferramenta associado à utilização de rebolos de cBN também é uma limitação.

A fim de identificar a percepção dos fabricantes de máquinas ferramenta sobre a aplicação de retificação utilizando cBN, principalmente em altas velocidades, uma pesquisa foi realizada durante duas das principais exposições de fabricantes de máquinas de retificação: *Exposition Mondiale de la Machine-Outil* (EMO), em 2007, e *International Manufacturing Technology Show* (IMTS), em 2008. Essa pesquisa foi apresentada no *keynote* de [Oliveira et al. \(2009\)](#), com a participação de fabricantes de diferentes nacionalidades. Através de questionários realizados, obtiveram-se os resultados sobre as velocidades máximas típicas, utilizadas na retificação, utilizando rebolos de cBN, conforme apresentado na Figura 10: 39% dos fabricantes utilizam velocidades entre 40-80 m/s, seguidos por 26% que indicam velocidades entre 100-120 m/s como limite. Três outras variações foram identificadas: 121-140 m/s, 170-180 m/s e 200 m/s.

Segundo [Oliveira et al. \(2009\)](#), àquela época, as razões para não se usar o rebolo de cBN em altas velocidades de retificação (Figura 11), de acordo com os fabricantes de retificadoras, foram: o principal fator (33%) era a complexidade requerida da retificadora e necessidade de sistemas adicionais periféricos, como por exemplo: Emissão Acústica (EA), dressadores rotativos,

alterações metalúrgicas indesejadas na superfície da peça.

²⁵ Savington, D. Maximizing the grinding process. In: **SME Technical Paper**. p. 1–12, 2001.

Figura 10 – Velocidades utilizadas com rebolos de cBN.

Fonte: Adaptada de Oliveira *et al.* (2009).

balanceamento e sistemas de refrigeração eficientes, entre outros. O segundo fator apontado foi econômico, 24%. Problemas térmicos e segurança representaram juntos, 22%. A falta de interesse dos consumidores e da indústria representou apenas 7% das respostas. As outras razões citadas pelos fabricantes foram: questões de qualidade da peça, vibração, manutenção, e uma pequena porcentagem acredita que o cBN é inviável com a presente tecnologia.

Figura 11 – Razões para não usar cBN em altas velocidades de retificação.

Fonte: Adaptada de Oliveira *et al.* (2009).

De acordo com o contexto exposto, apesar dos rebolos superabrasivos de cBN terem desempenhos superiores aos rebolos convencionais, ainda existem limitantes em relação ao seu uso em altas velocidades de corte. O futuro ainda é incerto em relação a estas aplicações, mas o conhecimento do processo, principalmente da interação rebolo/peça, é a principal chave para o desenvolvimento científico e tecnológico da retificação, buscando atender a satisfação do cliente.

O cenário atual de redução de custos e a necessidade de aumento de produtividade colocam a retificação a alta velocidade de corte como alternativa competitiva. Segundo Hood *et al.* (2015) e Oliveira *et al.* (2009), operações em alta velocidade de corte reduzem a espessura

do cavaco indeformado (h_m) – conforme Malkin e Guo (2008), h_m é definido pela Equação 2.1. Nota-se que a velocidade de corte e h_m são inversamente proporcionais, ou seja, quando se aumenta a velocidade de corte, reduz-se h_m , o que, segundo Jackson *et al.* (2001), leva à redução do desgaste do rebolo e melhora da integridade da superfície do material retificado.

$$h_m = 2L \left(\frac{v_w}{v_s} \right) \sqrt{\frac{a}{d_e}} \quad (2.1)$$

Onde: L é o espaçamento entre dois grãos ativos, v_w é a velocidade periférica da peça, v_s a velocidade periférica do rebolo, a a profundidade de corte e d_e o diâmetro equivalente (parâmetro utilizado apenas para retificação cilíndrica). Sendo d_e , conforme Malkin e Guo (2008), definido pela Equação 2.2:

$$d_e = \frac{d_s}{1 + \frac{d_s}{d_w}} \quad (2.2)$$

Onde: d_s é o diâmetro do rebolo e d_w o diâmetro da peça. O sinal de “+” é para a retificação cilíndrica externa.

Segundo Machado *et al.* (2015), outro fator importante é espessura de corte equivalente (h_{eq}), que representa a espessura do material removido pelo rebolo. Em consonância com Rowe, Ebbrell e Morgan (2004), a Equação 2.3 representa as variáveis envolvidas para o cálculo de h_{eq} , sendo que quanto maior o h_{eq} mais severo é o processo de retificação, portanto maiores esforços são requeridos, além de prejudicar a qualidade superficial da peça.

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{v_s} = \frac{v_w}{v_s} a_e \quad (2.3)$$

Onde: a_e é a profundidade de corte real.

Entretanto, segundo Aurich *et al.* (2013) e Brinksmeier *et al.* (2006), a diminuição da espessura do cavaco leva a um aumento da energia específica, conforme apresentado na Figura 12 (em relação à nota de rodapé²⁶). Segundo estes autores, o aumento da energia específica possui implicações nas características térmicas do processo, resultando em um maior fluxo de temperatura para a peça, consequentemente, aumenta-se a possibilidade de danos térmicos na superfície da peça. Porém, em elevadas velocidades de corte consegue-se uma menor espessura do cavaco com menor energia específica, diminuindo assim a possibilidade de danos térmicos.

Em consonância com Silva (2004), outros benefícios de se aumentar a velocidade periférica do rebolo, além de reduzir o desgaste do mesmo e melhorar o acabamento superficial, são: redução das forças por grão; menores temperaturas na superfície da peça e, consequentemente, diminuição da probabilidade do aparecimento de danos térmicos.

²⁶ HASHIMOTO, F. Specific Energy Comparasion between Hard Turning and Grinding. **STC G Meeting**. Paris: 2010.

Figura 12 – Espessura do cavaco versus energia específica na retificação.

Fonte: Adaptada de Hashimoto²⁶ (2010 apud Aurich *et al.* (2013)).

A Figura 13 (em relação à nota de rodapé²⁷) apresenta a relação da temperatura da superfície da peça em função da velocidade periférica do rebolo convencional e cBN. Observa-se que em velocidades de corte acima de 100 m/s ocorre uma redução da temperatura da peça, sendo este fato provocado pelo rápido corte do material, que, minimiza o tempo de contato e diminui a propagação de calor para a peça (SILVA, 2004).

Figura 13 – Temperatura da superfície da peça versus velocidade do rebolo.

Fonte: Adaptada de Tawakoli²⁷ (1993 apud Silva (2004)).

Assim, do ponto de vista térmico, nota-se que o rebolo de cBN é superior quando comparado ao rebolo convencional, devido às suas propriedades físico-químicas. Em relação

²⁷ TAWAKOLI, T. *High Efficiency Deep Grinding*, Mechanical Engineering. Pub. 1. London. 1993, ISBN 0 85298 820 6

às velocidades de corte alcançadas, ainda é um desafio da engenharia fazer com que os rebolos convencionais alcancem velocidades superiores a 120 m/s.

De acordo com [Silva \(2004\)](#), entretanto, alguns malefícios da retificação em altas velocidades são inexoráveis para os rebolos convencionais: primeiro, estas ferramentas não são possíveis em aplicações acima de 120 m/s, salvo algumas exceções e algumas operações especiais, acima de 100 m/s, mas o custo envolvido é muito elevado. Segundo, operações com rebolos convencionais acima de 80 m/s apresentam desgaste elevado e o rebolo fica cego rapidamente, levando-se a um incremento das forças. Em consequência, aumenta-se a possibilidade de erros relacionados à vibração, bem como a temperatura da superfície da peça. Sendo assim, pode-se levar ao surgimento de danos térmicos²⁸. Estes problemas relacionados a altas velocidades de retificação utilizando rebolos convencionais são menos frequentes quando da aplicação de rebolos superabrasivos de cBN, pois estes possuem características físico-químicas adequadas que ajudam na propagação do calor (descritas no Item [2.2.1](#)), e estruturas de corpo metálicos, que favorecem tais aplicações.

Conforme citado anteriormente, o aumento da velocidade de corte tem efeitos nas variáveis de saída do processo. De acordo com [Rowe \(2009\)](#), tomando-se o aumento da velocidade do rebolo com a taxa de remoção de material constante, tem-se uma redução na espessura do cavaco e, conseqüentemente, menores forças de retificação, o que leva a redução de possíveis erros geométricos da peça e, com isto, geralmente, uma melhora da rugosidade e menor desgaste do rebolo, conforme exibido na Figura [14 \(a\)](#). O aumento da velocidade do rebolo e da taxa de remoção de material resulta em forças de retificação, rugosidade e relação G constantes, conforme apresentado na Figura [14 \(b\)](#).

Além dos parâmetros supracitados, o aumento da velocidade de corte tem influência na potência total consumida, principalmente no aumento da potência requerida para a rotação do rebolo, refrigeração e limpeza do rebolo ([JACKSON et al., 2001](#)).

Desta forma, busca-se verificar se o rebolo convencional de alto desempenho funcionará bem em velocidades de corte tradicionais ou apenas em velocidades de corte compatíveis com as de cBN. Espera-se comprovar que a dificuldade de retificar materiais DTG é enfraquecida quando se eleva a velocidade de corte e que o desempenho será melhorado de forma significativa quando se aumenta a velocidade de corte para uma mesma taxa de remoção, investigando-se alternativas e viabilidades para a retificação de superligas.

Conforme dito preliminarmente, o aumento da velocidade de corte reduz o desgaste do rebolo, que está intimamente ligado à interação rebolo-peça na zona de contato e ocorre da seguinte maneira: devido às altas temperaturas e pressões, inicia-se a oxidação e o processo

²⁸ De acordo com [Oliveira et al. \(2009\)](#) e [Zheng et al. \(2016\)](#), durante a retificação, uma grande parte da energia é convertida em calor entre ferramenta e peça, na zona de contato, sendo transferida para o material retificado, causando transformações mecânicas, metalúrgicas, químicas, térmicas e elétricas. Tais alterações devem ser controladas.

Figura 14 – Efeito do aumento da velocidade do rebolo nas variáveis de saída do processo: com taxa de remoção (a) constante e (b) aumentando.

Fonte: Adaptada de Rowe (2009).

de difusão, que decrescem a resistência à abrasão do material abrasivo, levando ao desgaste mecânico, microtrincas ou trincas do grão, que por sua vez são intensificados pelas reações tribológicas do processo. A seguir, será apresentado um capítulo sobre os mecanismos de desgaste do rebolo.

2.3 Mecanismos de desgaste

Segundo Klocke (2009), a região de contato entre rebolo/peça é submetida a altas temperaturas e pressões, resultando no desgaste microscópico do grão e do ligante, conforme Figura 15. As extremas condições supracitadas iniciam o processo de oxidação (pela presença de oxigênio no ambiente) e difusão²⁹ na superfície do grão, levando ao decréscimo da resistência à abrasão do material abrasivo. Além disso, por meio de reações triboquímicas na superfície do grão, a resistência mecânica pode ser alterada, intensificando o desgaste. Adicionalmente, a alternância de tensão mecânica e térmica pode acarretar à fadiga do material, levando à desintegração da superfície pela separação de partículas individuais de grãos ou iniciando a formação de trincas/rachaduras.

Wegener *et al.* (2011) citam que os efeitos destas cargas mecânicas, térmicas e químicas são os desgastes macro e micro do rebolo. O macro desgaste implica na deterioração da macro geometria do rebolo (desgaste radial e de borda), levando à alteração do perfil, erros de forma e excentricidade. Já o micro desgaste se refere ao desgaste a nível dos grãos, dividindo-se basicamente em quatro tipos, conforme Figura 16 (em relação à nota de rodapé³⁰).

²⁹ A difusão é responsável por uma ativação térmica de átomos únicos, que, como resultado, mudam de lugar, levando à perda de material e átomos de impureza que estão inseridos na superfície do grão, o que pode levar a uma perda de dureza e, conseqüentemente, diminuição da resistência à abrasão (MARINESCU *et al.*, 2007).

³⁰ KÖNIG W, SCHULZ A (1994) Abrichten von CBN-Schleif-scheiben mit Diamantformrollen. Industrie Diaman-

Figura 15 – Tipos de desgaste do grão e do ligante.

Fonte: Adaptada de Klocke (2009).

Figura 16 – Mecanismos de micro desgaste.

Fonte: König and Schulz³⁰(1994 apud Wegener *et al.* (2011)).

De acordo com Subramanian, Ramanath e Tricard (1997), as interações microscópicas na zona de contato entre grão/ligante/cavaco/peça (Figura 17) são:

1. Interação grão abrasivo/peça;
 - Corte;
 - Deformação lateral;
 - Atrito;
2. Interação cavaco/ligante – atrito;
3. Interação cavaco/peça – atrito; e
4. Interação ligante/peça – atrito.

Em relação ao primeiro item, a interação abrasivo/peça corresponde a como o grão abrasivo realiza o corte na peça. Dependendo das condições de dressagem e de corte, as forças e potência de retificação ficam divididas entre corte, deformação lateral e atrito. A segunda interação, cavaco/ligante, ocorre quando o cavaco colide com o ligante durante o processo de

ten Rundschau (IDR) Band 28(4):234–240).

usinagem, causando danos a este. Para a terceira interação, cavaco/peça, ocorre a colisão entre o cavaco gerado com a superfície da peça retificada, resultando em aumento da rugosidade superficial devido ao atrito do cavaco com a peça. A segunda e a terceira interação dependem do tipo de material a ser retificado e da forma como o cavaco é gerado durante a retificação. Por fim, a última interação, ligante/peça, ocorre quando grão abrasivo já perdeu seu corte afiado e protuberante e, após o corte, o ligante toca na peça, resultando em um piora da qualidade superficial devido ao atrito entre estes.

Figura 17 – Interações na zona de retificação.

Fonte: Adaptada de Subramanian, Ramanath e Tricard (1997).

Segundo Rowe (2009), a taxa de desgaste do rebolo ou do dressador aumenta com o incremento da penetração do grão. Para condições suaves de retificação, o desgaste tende a seguir as leis do desgaste da adesão, conforme proposto por Archard em 1953. Com o incremento da penetração do grão, o desgaste do grão abrasivo aumenta progressivamente, levando a remoção de pequenas partes do grão (micro fratura) para remoção grandes partes por macro fratura ou remoção total do grão.

De acordo com Webster e Tricard (2004) e Wegener *et al.* (2011), todos estes tipos de desgaste aparecem simultaneamente no rebolo e podem ser minimizados de acordo com os parâmetros de usinagem, escolha do fluido refrigerante, cinemática do processo e a escolha adequada do rebolo para a aplicação³¹. Inovações em materiais abrasivos, ligantes, estruturas e forma do rebolo vêm sendo desenvolvidos com o intuito de maximizar a ação de corte, reduzir os efeitos do atrito e, conseqüentemente, reduzir o desgaste. Em consonância com Rowe (2009), a utilização de fluidos com aditivos projetados ajudam a reduzir o atrito e as taxas de desgaste.

Entender esses mecanismos de desgaste quando da retificação de superligas com rebolos convencionais e de cBN é um dos objetivos do presente trabalho. A seguir, serão apresentadas as dificuldades e desafios da retificação desse tipo de material.

³¹ Segundo Klocke *et al.* (2015) e Wegener *et al.* (2011), rebolos com poros em seu interior criam o espaço intergranular quando dressados, e são responsáveis pelo transporte do fluido através da zona de formação do cavaco, minimizando-se assim os efeitos indesejados da temperatura do processo.

2.4 Retificação de superligas

Segundo [Reed \(2006\)](#), durante a última década do século XX, um período com bastante desenvolvimento em ligas e processos (solidificação unidirecional, monocristal - sem contorno de grão na microestrutura, metalurgia do pó, dentre outros) permitiu-se melhorar drasticamente o desempenho das superligas e suas aplicações. É possível considerar as pressões tecnológicas, econômicas e sociais que incentivaram essa evolução àquela época. Durante e após a guerra fria, o desenvolvimento de superligas foi estimulado por questões militares (motores de aeronaves) – principalmente nos Estados Unidos da América (EUA), Europa e na antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS). Atualmente, vem sendo desenvolvidas técnicas para uma eficiente retificação de superligas, com a necessidade da redução de custos e questões sustentáveis, sendo acompanhada pela evolução da globalização e da computação, como ferramenta para otimização e modelagem de processamento dos componentes.

De acordo com [Ezugwu \(2005\)](#), as indústrias que utilizam superligas são as seguintes: aeroespacial (70%), médica (10%) química (10%) e estrutural (10%). A indústria aeroespacial apresenta a maior porcentagem do consumo de superligas, dois terços (2/3), para a manufatura de motores e componentes, principalmente em locais com elevadas temperaturas de trabalho. A habilidade deste tipo de material na retenção de suas propriedades mecânicas e químicas em elevadas temperaturas faz com que seja ideal para este tipo de aplicação. Além da ótima relação massa/desempenho que reduz a massa do produto final e, conseqüentemente, economiza combustível. Estima-se que a cada quilograma reduzido, a economia de combustível é de US\$ 150.000,00 ao longo da vida do produto. O restante do consumo, um terço (1/3), é utilizado nas indústrias médicas, químicas e estruturais, em aplicações que requerem propriedades em altas temperaturas e/ou resistência à corrosão, excepcionais.

Assim, do ponto de vista econômico, as superligas são utilizadas em aplicações com alto valor agregado. Tais aplicações merecem destaque devido ao seus altos níveis de desempenho e elevada qualidade superficial. Todavia, estes materiais são difíceis de se manufaturar, tornando necessário o uso de sistemas e ferramentas de alto desempenho para o processamento destas.

De acordo com [Ezugwu \(2005\)](#), as superligas possuem as seguintes características:

- Alta resistência mecânica e capacidade de manter suas propriedades físico-químicas em elevadas temperaturas;
- Elevados pontos de fusão;
- Resistência à corrosão e ao desgaste;
- Presença de matriz austenítica e carbeto na microestrutura, aumentando-se a dureza;
- Tendência à reatividade com os materiais das ferramentas sob as condições atmosféricas na usinagem; e

- Baixa condutividade térmica.

De acordo com [Reed \(2006\)](#), outra característica importante é a resistência substancial à degradação química e mecânica. Sendo assim, possuem uma vida útil extensa. Um levantamento da fluência dos materiais de engenharia disponíveis confirma a superioridade das superligas para aplicações a altas temperaturas, além da tolerância de suas propriedades em ambientes operacionais severos, por exemplo: o querosene é utilizado como combustível de aeronaves, pois a poluição tende a ser minimizada. Porém, as impurezas presentes neste tipo de combustível aceleram a corrosão dos componentes durante a operação. Nesses casos, altas temperaturas aceleram a oxidação e, conseqüentemente, a degradação da superfície, reduzindo a vida útil dos componentes. Por isso, as superligas surgem como alternativa para utilização em tais condições.

Devido a estas características das superligas, na retificação, estes materiais são denominados de DTGs. Segundo [Rowe \(2009\)](#) e [Webster e Tricard \(2004\)](#), este tipo de material possui uma tendência ao empastamento do rebolo³², reduzindo o espaço do cavaco e impedindo que o fluido de corte atinja pontos necessários do par rebolo/peça. Em consonância com [Schmaltz³³ \(1979 apud \(KLOCKE, 2009\)\)](#), existem três tipos de empastamento do rebolo: com cavacos emaranhados, aderidos ou em camadas. Os cavacos emaranhados são definidos por estarem empastados apenas em alguns lugares (de forma isolada). Já os cavacos aderidos são vários grãos individuais ou grupos de grãos empastados, totalizando uma extensa área. Por fim, os cavacos empastados em camadas são partículas maiores que podem cobrir grandes áreas do rebolo.

Nesse sentido, vale ressaltar que a condição de dressagem do rebolo é importante para manter o corte e a limpeza da ferramenta de modo adequado. Sendo, às vezes, necessária a utilização de jatos a alta pressão para a retirada de cavacos alojados no rebolo.

Segundo [Klocke \(2009\)](#) e [Jackson e Davim \(2011\)](#), o rebolo possui falhas macro geométricas (desvios de circularidade, ondulações, macro degaste, perda do perfil, entre outros) que conduzem a problemas durante o processo de retificação, como deficiência de alta tolerância dimensional dos componentes manufaturados. Além disto, possui falhas micro geométricas que acarretam em alterações na topografia do rebolo (perda de corte das arestas), fazendo com que as forças e potência necessárias para o corte sejam aumentadas. Sendo assim, aumenta-se a possibilidade de danos na superfície e subsuperfície da peça. Tendo em vista estes problemas, para se obter um desempenho elevado na retificação, torna-se necessário preparar (balancear e condicionar – dressar e limpar) o rebolo.

De acordo com [Jackson e Davim \(2011\)](#), o processo de condicionamento pode ser classificado em dois grupos: através da remoção mecânica (contato) ou não-mecânica (sem

³² As características do empastamento são influenciadas pelo material manufaturado (observa-se frequentemente o empastamento do rebolo quando se retifica materiais dúcteis, ligas de alumínio e titânio e ainda mais acentuado em superligas de níquel e cromo), design do rebolo, fluidos de lubrificação/refrigeração e os parâmetros da retificação ([KLOCKE, 2009](#)).

³³ SCHMALTZ, L. H. *Zusatzung von Schleifscheiben*. PhD-thesis. RWTH Aachen University. 1979.

contato – não convencional) do material. No primeiro grupo, os grãos, cavacos e/ou ligantes aglomerados são removidos pela ação de corte de uma ferramenta de diamante (dressador estacionário ou rotativo). No segundo, o processo é feito sem contato usando-se apenas formas de energia (térmica ou elétrica). Dressadores estacionários, de acordo com [Marinescu et al. \(2007\)](#), são as ferramentas que não exibem nenhum movimento na direção periférica do rebolo e são as mais simples e apresentam um formato de ponta única de diamante, várias pontas alinhadas em uma lâmina (placa) ou múltiplas pontas de diamante. Em consonância com [Rowe \(2009\)](#), estes apresentam performances consideráveis quando usados corretamente. Segundo [Malkin e Guo \(2008\)](#), os dressadores rotativos consistem em um corpo com formato predeterminado (de perfil, forma de rolo ou copo) com partículas de diamante impregnadas em uma matriz de metal ou fixas por eletrodeposição na superfície. Para a maioria das aplicações, o dressador gira com uma velocidade periférica (V_r) enquanto está sendo avançado radialmente (V_i) contra o rebolo, com certa profundidade por revolução (a_r).

Fundamentalmente, o condicionamento do rebolo é feito através da dressagem e limpeza. A dressagem é dividida entre o perfilamento e o avivamento³⁴ dos grãos abrasivos. O perfilamento é responsável pela macrogeometria do rebolo (correção de concentricidade, planicidade ou geração de perfil dos mais diversos possíveis, eliminação de erros geométricos). No avivamento, ocorre o reavivamento dos grãos e reativa-se a habilidade requerida de corte, expõe-se as arestas de corte e cria-se espaço para o transporte de cavaco e fluidos. A limpeza³⁵ do rebolo remove os grãos, cavacos e resíduos do aglomerante empastados nos poros do rebolo ([KLOCKE, 2009](#)). Caso o condicionamento do rebolo seja feito de maneira inadequada, aumenta-se a possibilidade do surgimento de falhas nas peças retificadas, principalmente relacionadas aos problemas térmicos, sendo este ainda mais acentuado quando se trata da retificação de superligas.

Nessa perspectiva, para amenizar os problemas térmicos, além da correta utilização dos parâmetros de dressagem e refrigeração, os rebolos com alta porosidade são utilizados para a retificação de superligas, com a vantagem de transportar o fluido para o local de retificação, reduzindo os danos superficiais na peça. Todavia, rebolos com alta porosidade tendem a um maior desgaste, devendo-se utilizar maiores velocidades de corte, visando reduzir a espessura do cavaco. Em consonância com [Ezugwu \(2005\)](#), a manufatura eficiente e econômica de materiais DTGs, sob altas velocidades, requer um bom entendimento dos materiais da ferramenta (sendo de geometria defina ou não), condições de corte, tempo de processamento e a funcionalidade do componente. Avanços nos materiais de ferramenta e técnicas de manufatura e refrigeração resultaram em um aumento significativo na taxa de remoção desse tipo de material.

Em relação às técnicas de lubrificação e refrigeração, visando uma manufatura eficiente-

³⁴ De acordo com [Wegener et al. \(2011\)](#), rebolos com ligantes vitrificados com Al_2O_3 e SiC podem ser perfilados e reavivados simultaneamente. Já rebolos com ligantes resinoides e metálicos utilizam os dois processos separadamente e requerem ferramentas diferentes para o perfilamento e o reavivamento.

³⁵ Segundo [Jackson e Davim \(2011\)](#), a limpeza do rebolo serve principalmente para remover os cavacos empastados dos poros, mas sem qualquer intenção de alterar a geometria ou topografia do rebolo.

mente sustentável, os procedimentos de retificação e dressagem a seco, Mínima Quantidade de Lubrificante - MQL (com ou sem aditivos) e criogenia para retificação de superligas vem sendo avaliada por pesquisadores, apresentando uma tendência de sua utilização para o futuro. Todavia, segundo [Thakur e Gangopadhyay \(2016\)](#), o resultado final, em relação à integridade superficial, da peça retificada por estas técnicas de operação ainda precisa ser avaliado criticamente.

No tocante a retificação a seco, segundo [Barczak, Batako e Morgan \(2010\)](#), há uma tendência de defeitos na superfície, tais como microfissuras, queima da peça e tensões residuais de tração, afetando severamente a vida em fadiga e desgaste do componente. Entretanto, de acordo com estes autores, àquela época, eram necessários outros estudos para explorar plenamente o potencial desta técnica. O recente estudo de [Guerrini et al. \(2018\)](#), comprovou a eficácia e viabilidade da produção sustentável de engrenagens, utilizando retificação (rebolo convencional de alumina e ligante vitrificado) a seco. Tal resultado indica sinergia com resultados do estado da arte.

De acordo com [Cearsolo et al. \(2016\)](#), devido aos rigorosos regulamentos ambientais da atualidade, a operação de dressagem a seco também foi analisada para uma possível e efetiva implementação pelas indústrias, apresentando resultados favoráveis ao procedimento pela facilidade de implementação e redução de custo. Neste caso, como o desgaste do dressador está relacionado diretamente aos efeitos térmicos da operação de dressagem, os autores verificaram que a utilização de porta-ferramentas de cobre em vez de aço reduziram em 37% a temperatura da ferramenta de dressagem, consequentemente menor desgaste do dressador também foi verificado. Além disso, ainda propuseram a utilização de um tubo de vórtice com ar refrigerado (- 20°C), resultando em um método simples e de baixo custo de implementação na indústria que atende aos quesitos de retificação sustentável.

[Goind e Sarkar \(2017\)](#) citam que a retificação utilizando a técnica de MQL, para rebolos de cBN, foi realizada com sucesso por muitos pesquisadores. [Hadad et al. \(2012\)](#) investigaram a distribuição de calor em operações de reficação a seco e com MQL, com rebolos de cBN. Estes autores observaram que a operação de retificação com MQL induz uma menor geração de energia térmica para a peça do que a retificação a seco. Segundo [Hadad et al. \(2012\)](#) e [Wang et al. \(2017\)](#), a utilização apropriada de aditivos especiais no fluido de refrigeração da operação de retificação pode gerar menor impacto ambiental, trazer benefícios econômicos e melhorar as propriedades tribológicas, levando a uma melhor lubrificação da zona de contato, diminuindo as forças de retificação e, consequentemente, menor geração de calor entre rebolo/peça, quando comparado a operações de retificação com fluidos sem aditivos.

Diversas pesquisas vem sendo desenvolvidas sobre a utilização de aditivos para melhorar os resultados da técnica de MQL. [Setti et al. \(2015\)](#) estudaram a retificação (rebolo convencional de SiC, especificações: GC60K5V) da superliga de titânio, Ti-6Al-4V, com a técnica de MQL alterado com aditivos (nanofluidos de Al₂O₃ e CuO). O nanofluido CuO não mostrou nenhum efeito significativo nas condições observadas, entretanto a adição de nanofluidos de alumina

reduziram significativamente a fricção, temperatura, favorecendo a fratura do grão e promovendo a formação e retirada dos cavacos de modo ideal na região de contato rebolo/peça.

Wang *et al.* (2017) examinaram o desempenho do processo de retificação (rebolo convencional de alumina branca e ligante vitrificado, especificações: WA80H12V), da superliga à base de níquel, GH4169 (Inconel® 718), utilizando a técnica de refrigeração MQL com diferentes concentrações nanofluidos de Al_2O_3 . Os resultados mostraram que a adição dos nanofluidos forma uma película de óleo lubrificante na região de contato rebolo/peça, reduzindo significativamente o atrito, consequentemente, o calor gerado. As condições ótimas em relação à rugosidade da peça e formação ideal de cavacos foram obtidos quando a concentração volumétrica de 2% de nanofluidos no óleo de palma foram atingidos.

Jia *et al.* (2017) avaliaram a energia específica e a integridade superficial da superliga à base de níquel, Inconel® 718, obtida pela retificação (rebolo WA80H12V) e com refrigeração de MQL, contendo sete tipos de óleos vegetais, com nanofluidos (MoS_2) adicionados em diferentes concentrações. Seis tipos de óleos vegetais: óleo de soja, colza (couve-nabiça - planta cuja semente se extrai óleo, com nome científico de *Brassica napus*), milho, palma (ou azeite de dendê), amendoim e girassol; onde foram misturados em uma proporção de 1:1 com óleo de rícino³⁶. Os resultados mostraram que as peças retificadas pela MQL com óleo de rícino puro apresentaram uma rugosidade média aritmética (R_a) superior aos demais, $0,502 \mu\text{m}$. A mistura de óleo de soja/rícino apresentou o menor valor de R_a , $0,325 \mu\text{m}$. As demais misturas não apresentaram diferenças significativas de R_a . Em relação à energia específica (u) do processo, a condição de MQL com óleo de rícino puro apresentou o maior valor ($108,45 \text{ J}^3$). A energia específica para as outras misturas se mostrou ligeiramente inferior. A mistura de óleo de soja/rícino apresentou o menor valor, $83,27 \text{ J/mm}^3$. Em relação às nanopartículas de MoS_2 adicionadas, estas geraram melhores resultados de refrigeração e lubrificação que o óleo puro. À medida que a concentração de nanopartículas aumentou, obteve-se melhores desempenhos de refrigeração e lubrificação, até a ótima concentração de 8%. Como os resultados da mistura óleo de soja/rícino apresentaram desempenhos superiores aos demais analisados, Guo *et al.* (2018) analisaram as condições da relação volumétrica, cujos resultados ótimos foram para relação 1:2.

Balan *et al.* (2016) examinaram o desempenho do processo de retificação da superliga Inconel® 751, utilizando-se um rebolo resinoide de diamante, especificações D126C75, sob diferentes técnicas de lubrificação (seco, MQL e criogenia+MQL). Os resultados indicaram que a combinação de nitrogênio líquido com MQL apresentaram menores temperaturas, forças de corte/energia específica e rugosidades, quando comparados com a técnica MQL e retificação a seco. As temperaturas de operação para o crio-MQL foram 66-81% e 82-89% a menos quando comparadas a MQL e retificação a seco, respectivamente. Com a queda das forças de corte, a energia específica da crio-MQL foi reduzida entre 50-65% quando comparada as outras técnicas. A R_a com crio-MQL foi menor em 20 e 28% para as condições de MQL e a seco, respectivamente.

³⁶ Cujá extração é feita da mamona.

Nesta perspectiva, observa-se que por questões econômicas e ecológicas as técnicas de retificação e dressagem a seco, MQL e criogenia vem sendo incorporadas na retificação de superligas, gerando resultados satisfatórios. Entretanto, mais pesquisas nesta área precisam ser desenvolvidas.

Em relação à retificação de superligas com a utilização de fluido refrigerante de modo convencional, de acordo com [Oliveira, França e Wang \(2008\)](#), quando comparada a relação G obtida em três materiais DTGs: Inconel® 751, 21-2N (VV56) e Silcrome 1 (VV45), com rebolo de cBN vitrificado (especificação B181 VSS Q V 320), em diferentes taxas específicas de remoção de material (Q'_w), percebeu-se uma abrupta redução da relação G , quando Q'_w foi aumentado de 60 para 120 mm³/mm.min, conforme Figura 18. Segundo os autores, esses resultados indicaram a detecção de um ponto de transição na resistência ao desgaste para o rebolo testado, para o qual as forças que atuam sobre o grão excederam a força de retenção imposta pelo ligante, com o consequente desgaste acentuado da ferramenta. Para corroborar esta afirmação, [Silva e Oliveira \(2011\)](#) utilizaram dois rebolos de cBN (especificações JB126 K150 VSS e 8B126 K150 VT2) e os três materiais supracitados para os testes. Observou-se que o incremento de Q'_w leva a um decréscimo da relação G e, consequentemente, maior desgaste da ferramenta abrasiva, conforme apresentado na Figura 19.

Figura 18 – Comportamento da relação G em diferentes Q'_w .

Fonte: Adaptada de [Oliveira, França e Wang \(2008\)](#).

No tocante à relação G , esta é associada ao índice de desempenho e à resistência ao desgaste do rebolo, sendo calculada a partir do desgaste do rebolo (V_s em mm³) em cada operação de corte para a remoção do volume de material removido (V_w) em mm³, conforme a Equação 2.4:

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (2.4)$$

Figura 19 – Comportamento da relação G em diferentes Q'_w

Fonte: Adaptada de Silva e Oliveira (2011).

Segundo Machado *et al.* (2015), uma baixa relação G indica desgaste elevado do rebolo. No entanto, elevada relação G indica que a perda de grãos é menor, com uma perda da agressividade do rebolo durante a operação, levando a uma menor capacidade de remoção.

A Figura 20 apresenta a relação G e o acabamento superficial em função da velocidade periférica do rebolo (v_s). A relação G aumenta com o aumento de v_s . Contudo, quando v_s é alta, o desgaste por atrito e as temperaturas de retificação aumentam, diminuindo assim a relação G e aumentando a rugosidade (GROOVER, 2010).

Figura 20 – Relação G e acabamento superficial em função da velocidade do rebolo.

Fonte: Adaptada de Groover (2010).

Adicionalmente, segundo Hahn³⁷ (1962 apud (AURICH *et al.*, 2013)) e Aurich, Carrella e Steffes (2012), em relação ao aumento da taxa de remoção de material, o resultado, além da redução da relação G, é uma diminuição da energia específica do processo e aumento da

³⁷ HAHN, R. S. On the nature of grinding process. **Proceedings 3rd Machine Tool Design and Research Conference**. p. 129-154, 1962.

rugosidade da peça, conforme apresentado na Figura 21, sendo que o aumento da taxa de remoção de material aumenta a espessura do cavaco e minimiza os mecanismos de deslocamento lateral e atrito dos grãos abrasivos, resultando em menor energia específica e menor qualidade superficial.

Figura 21 – Energia específica e rugosidade em relação à taxa de remoção de material.

Fonte: Adaptada de Groover (2010).

De acordo com Malkin e Guo (2008), a relação G é o parâmetro mais utilizado para avaliar o desempenho dos rebolos quando da retificação de um dado material. Todavia, conforme salientado pelos autores, a resistência do rebolo ao desgaste é apenas um dos fatores que pode ser levado em consideração quando se deseja determinar a usinabilidade de um dado material. O fim da vida de um rebolo e sua necessidade de dressagem é determinada pelo aumento excessivo das forças de retificação, causada pelo cegamento do rebolo, resultado do arredondamento das arestas de corte de seus grãos ou pelo desvio dimensional ou geométrico da peça retificada, causado pelo desgaste macrogeométrico do rebolo. Desta forma, além do cálculo da relação G , outros parâmetros, tais como: potência (força e energia específica de retificação), análise da superfície do rebolo/peça, rugosidade, estabilidade dimensional e geométrica da peça, avaliação microestrutural, entre outros, terão de ser adicionados à análise, no intuito de identificar o mecanismo governante para a usinabilidade do material.

A energia específica, segundo Klocke (2009) e Marinescu *et al.* (2007), é considerada um importante parâmetro, representado por e_c ou u , equivale à energia necessária para remover uma unidade de volume do material. A unidade usualmente utilizada é J/mm^3 . Por sua vez, a energia específica de retificação será calculada de acordo com a Equação 2.5, utilizando-se os dados de potência e condições de retificação:

$$u = \frac{P}{Q'_w b_w} \quad (2.5)$$

Onde: P (W) é a potência de retificação, Q'_w (mm³/mm.s) é a taxa específica de remoção de material e b_w ou b (mm) é a largura de retificação.

De acordo com Groover (2010), a energia específica da retificação é muito maior quando comparado àquela obtida nos processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, devido aos seguintes efeitos: tamanho da espessura de corte³⁸, ângulos de inclinação e saída negativos³⁹ e grãos ineficientes durante o corte⁴⁰. Todos esses efeitos fazem o processo de retificação tornar-se ineficiente em termos de consumo de energia por volume de material removido.

As características das superligas proporcionam problemas no processo de retificação quando se utilizam rebolos convencionais, tais como: empastamento do rebolo e transformações metalúrgicas indesejadas na superfície da peça, podendo levar ao descarte de peças. Para superar tais problemas, os rebolos de cBN e a utilização de grãos cerâmicos com ligantes de alta porosidade em rebolos convencionais estão se tornando cada vez mais predominantes para a retificação de superligas (MARINESCU *et al.*, 2007). Em consonância com Aurich *et al.* (2013), os rebolos superabrasivos, como os de cBN, são superiores em desempenho e tempo de vida quando comparados aos rebolos convencionais, como os de Al₂O₃.

Neste sentido, devido às características dos materiais DTG, a utilização de rebolos superabrasivos de cBN mostram-se com desempenho superiores quando comparados aos rebolos convencionais. Todavia, o custo ferramental e os sistemas adicionais necessários para a utilização dos rebolos superabrasivos são limitações do processo. Sendo assim, a necessidade e viabilidade da utilização de um rebolo convencional de alto desempenho para a retificação de superligas é fundamental.

Tendo em vista todo o escopo apresentado, busca-se verificar se o rebolo convencional de alto desempenho (grão Quantum® e ligante Vitrium³®) terá um desempenho efetivo na retificação de superligas, se comparado ao rebolo de cBN, ambos sendo utilizados em velocidades de corte típicas de um rebolo superabrasivo.

A próxima seção apresenta a metodologia adotada, descrevendo os materiais, métodos e meios científicos utilizados nesta dissertação.

³⁸ Pequenas remoções de material requerem altas energia para removerem cada unidade de volume do material (GROOVER, 2010).

³⁹ Ângulos negativos resultam em redução do ângulo de cisalhamento, portanto altas tensões de cisalhamento, sendo que ambos geram níveis mais elevados de energia para retificação (GROOVER, 2010).

⁴⁰ Devido à posição e orientação randômica dos mesmos no rebolo (GROOVER, 2010).

METODOLOGIA

Com uma natureza quantitativa, o objetivo desta etapa do trabalho será a abordagem da metodologia utilizada para avaliação do desempenho para o rebolo convencional de alto desempenho e o de cBN, quando da retificação de superligas.

Foi utilizada uma retificadora com Comando Numérico Computadorizado (CNC) de alta velocidade, marca Zema, modelo Numérika G 800-HS (Figura 22), com alimentação elétrica trifásica de 220 V e alimentação de ar comprimido a 7 bar; com cabeçote porta-rebolo com motor de acionamento direto de 37 kW, mancal hidrostático no eixo porta-rebolo, sistema de monitoramento de emissão acústica, localizada no Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP). Para a medição do consumo de potência global, a retificadora está equipada com um medidor multivariável elétrico (transdutor de estado sólido) UPD 600, da Ciber do Brasil, integrado ao sistema de coleta de dados utilizando o protocolo de comunicação MTConnect^{TM1}. A retificadora conta ainda com um sistema de monitoramento por emissão acústica, composto por unidade condicionadora de sinais DM-42 (Sensis – Scenario) e sensores de emissão acústica instalados no eixo porta-rebolo, mancais e no cabeçote dressador. A retificadora dispõe ainda de medidor em processo (Marposs Unimar S10 com amplificador E9) e sistema de balanceamento dinâmico do rebolo. Dispõe também de todos os sistemas e acessórios para operação com rebolos de cBN, com velocidade de corte nominal de 80 m/s.

Os materiais estudados foram as superligas: Inconel® 751 (Inc. 751)² e o aço 21-43³, materiais austeníticos usados principalmente para as válvulas de escape de motores de combustão

¹ A fim de medir as grandezas elétricas do sistema, como a potência instantânea, a aquisição de dados baseou-se no padrão MTConnectTM. Com a possibilidade de interligação e coleta dos dados, a partir das unidades de processamento, os mesmos são gerenciados, normalizados e armazenados, além de os disponibilizar via Web (FILLETI, 2015).

² Também referenciado como UNS N07751, Alloy 751 e WNR 2.4694, mas será doravante referenciado apenas pela abreviação, Inc. 751.

³ Também referenciado como DIN 1.4882, X50CrMnNiNbN21-9 e VV50, mas será doravante referenciado pelo nome comercial 21-43.

Figura 22 – Retificadora utilizada no estudo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

interna; liga de aço Silcrome 1 (Sil. 1)⁴, metal martensítico também utilizado em válvulas. Para os três materiais, foram manufaturados corpos de prova de formato cilíndrico, com diâmetro externo igual a 42,5, 28,4 e 24,5 mm, respectivamente, e 150 mm de comprimento.

Como premissa do projeto, os materiais utilizados no estudo foram submetidos a um ensaio para verificar sua composição química. Empregou-se a Análise de Energia Dispersiva (EDS) por raios-X para medição quantitativa da composição química dos materiais. Utilizou-se um equipamento EDX LINK ANALYTICAL, (Isis System Series 300), com detetor de SiLi Pentafet, janela ultrafina II (do inglês, *Atmosphere Thin Window - ATW II*), de resolução de 133 eV à 5,9 KeV e área de 10 mm², acoplado a um Microscópio Eletrônico ZEISS LEO 440 (Cambridge, England). Utilizou-se padrão de Co para calibração, feixe de elétrons de 20 kV, distância focal de 25 mm, “dead time” de 30%, corrente de 2,82 A e I probe de 2,5 nA. A área da amostra analisada foi de 320x320 μm. Os testes foram realizados na Central de Análises Químicas Instrumentais (CAQI) do Instituto de Química de São Carlos (IQSC/USP).

As Tabelas 2 e 3 trazem os valores de referência quanto à composição química e às propriedades mecânicas dos três materiais, respectivamente.

A operação de retificação analisada foi a cilíndrica externa de mergulho com velocidades de corte (v_s) de 45 m/s e 80 m/s para o rebolo convencional de alto desempenho (especificação 3NQ80L10VS3, doravante referenciado apenas como 3NQ – outras informações no Apêndice B) e 80 m/s para o rebolo de cBN (especificação JB126-K150-VSS, doravante referenciado apenas como cBN – outras informações no Apêndice C). Não foi testada a velocidade de corte de 45 m/s para o rebolo superabrasivo, já que não é uma velocidade de corte recomendada para esse tipo de ferramenta.

⁴ Também referenciado como VV45.

Tabela 2 – Composição química dos materiais.

Composição química (%)	Inc. 751	21-43*	Sil. 1
Alumínio, <i>Al</i>	0,90 - 1,5	-	-
Carbono, <i>C</i>	$\leq 0,10$	0,45 - 0,55	0,40 - 0,50
Cromo, <i>Cr</i>	14 - 17	20 - 22	7,5 - 9,5
Cobalto, <i>Co</i>	-	-	-
Cobre, <i>Cu</i>	$\leq 0,50$	-	-
Ferro, <i>Fe</i>	5,0 - 9,0	≥ 57	$\geq 85,3$
Manganês, <i>Mn</i>	$\leq 1,0$	08 - 10	$\leq 0,60$
Molibdênio, <i>Mo</i>	-	-	-
Níquel, <i>Ni</i>	≥ 70	3,5 - 5,5	$\leq 0,60$
Fósforo, <i>P</i>	-	$\leq 0,04$	-
Nióbio, <i>Nb</i>	0,70 - 1,2	$1,8 < Nb + Ta \leq 2,5$	-
Silício, <i>Si</i>	$\leq 0,50$	$\leq 0,04$	3,0 - 3,5
Enxofre, <i>S</i>	$\leq 0,01$	$\leq 0,03$	-
Titânio, <i>Ti</i>	2,0 - 2,6	-	-
Tungstênio, <i>W</i>	-	0,8 - 1,5	-
Nitrogênio, <i>N</i>	-	0,4 - 0,6	-

§ Tântalo

Fonte: Adaptada de [Matweb \(2017\)](#) e [*EUROPEAN STEEL & ALLOY GRADES \(2017\)](#).

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos materiais.

Material	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Alongamento na fratura (%)	Dureza HV (HRC)	Condutividade térmica (W/mK)
Inc. 751	875	1.275	22-25	461±16§ (46)	12
21-43*	950-1.150	-	12	378±9§ (39)	14,5**
Sil. 1	686	932	15	285±16§ (28)	20

§ Valores médios de dureza obtidos nos corpos de prova.

Fonte: [Matweb \(2017\)](#); [*EUROPEAN STEEL & ALLOY GRADES \(2017\)](#) e [**SPECIAL STEEL \(2017\)](#).

De acordo com [Wang \(2008\)](#), os valores limites de rugosidade aritmética média (R_a) para a sede da válvula é $0,8 \mu\text{m}$ e para a haste é $0,4 \mu\text{m}$. Para ambos os casos foi visado um limite inferior aos valores supracitados para os processos de retificação em estudo. Durante os ensaios preliminares, foi verificado que os critérios limites para as condições em estudo foi atingido. A seguir será descrito as condições de dressagem para cada rebolo, visando atingir os limites supracitados. Ao início de cada mergulho, foram efetuados os ensaios de dressagem, de modo a garantir as mesmas condições iniciais para todos os testes.

O rebolo convencional 3NQ foi dressado com uma única condição de dressagem, utilizando-se um dressador estático tipo Fliese FBS 115 Furioso⁵, adotando-se um grau de recobrimento⁶ (U_d) igual a 4 – conforme [Hassui e Diniz \(2003\)](#), U_d é definido pela Equação 3.1;

⁵ Durante a dressagem, de modo a minimizar o calor gerado na região de contato rebolo/dressador e diminuir o desgaste prematuro do dressador utilizou-se um bico de fluido refrigerante extra e exclusivo para esta região.

⁶ Quando o grau de recobrimento é baixo, as forças de retificação e agressividade do rebolo são menores,

a largura de atuação do dressador (b_d) é igual 1 mm; profundidade de dressagem (a_d) de 22 μm ; velocidade de passagem (v_t), 382 mm/min; passo de dressagem (S_d) de 0,25 mm/rot – conforme Malkin e Guo (2008), S_d é determinado pela Equação 3.2; e número de passes (Z_d), 6.

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (3.1)$$

Onde: b_d é a largura de atuação do dressador.

$$S_d = \frac{\pi \cdot d_s \cdot v_t}{v_s} \quad (3.2)$$

Onde: d_s é o diâmetro do rebolo e v_d a velocidade transversal de passagem do rebolo ao longo do dressador.

Já para o rebolo de cBN, foi utilizado um disco dressador diamantado acoplado a um dressador rotativo, adotando-se as seguintes condições de dressagem: velocidade de corte (v_s), 80 m/s; velocidade do disco (v_d), 32 m/s; relação de velocidades⁷ (q_d), +0,4 (dividindo-se a velocidade do disco pela velocidade do rebolo), conforme Klocke (2009), q_d é definido pela Equação 3.3; a largura de atuação do dressador (b_d) é igual 0,6 mm - apenas para demonstração comparativa das duas condições de agressividades dos rebolos, neste caso o valor do grau de recobrimento (U_d) do rebolo de cBN é o mesmo que o rebolo 3NQ ($U_d = 4$), apesar da razão de esmagamento ser o principal fator influenciador para o rebolo de cBN -; profundidade de dressagem (a_d), 2 μm ; velocidade de passagem (v_t), 300 mm/min; passo de dressagem (S_d), 0,15 mm/rot e número de passes (Z_d), 5.

$$q_d = \frac{v_r}{v_s} \quad (3.3)$$

Onde: v_r é velocidade periférica do dressador rotativo.

Após a etapa de dressagem, realizou-se a limpeza do rebolo com um bocal extra de um sistema de alta pressão. A bomba para tal aplicação é da marca Graco Inc., modelo 208-356, misturando ar comprimido (6 bar) e fluido de corte (60 bar). O bico do sistema possui um conjunto basculante, acionado pelo CNC da máquina, que é alterado pelo acionamento de dois sensores indutivos, jorrando a mistura fluido/ar contra a superfície do rebolo, com o intuito de limpar possíveis cavacos empastados no mesmo.

Para a operação utilizou-se o fluido de corte Vasco 7.000 (emulsão base vegetal semissintética, miscível em água), sendo este recomendado para este tipo de aplicação, com uma vazão

consequentemente, a rugosidade para o rebolo/peça é maior. Já para um grau de recobrimento maior, as forças de retificação e agressividade do rebolo são maiores, consequentemente, baixas rugosidades são esperadas para o processo (HASSUI; DINIZ, 2003).

⁷ Um valor de q_d positivo indica que o movimento rebolo/peça é concordante, já o valor de q_d negativo indica o movimento discordante (KLOCKE, 2009).

de 50 l/min, empregando-se dois bocais otimizados, proposto por [Silva \(2004\)](#), e velocidade de jato (v_j) de 15 m/s. A concentração do fluido foi mantida entre 3-5%, sendo este valor designado pelo fabricante do produto de modo a maximizar os resultados de lubrifi-refrigeração. Esta concentração foi monitorada ao início dos testes, utilizando-se um Refratômetro de Mão, marca Quimis®, modelo Q-767-1, devidamente calibrado. Destaca-se que de modo a evitar contaminações no fluido de corte, antes de ser colocado o fluido Vasco 7.000 no reservatório da máquina, este foi esvaziado e cuidadosamente limpo. A Tabela 4 apresenta algumas propriedades físicas e químicas do fluido utilizado.

Tabela 4 – Propriedades físicas e químicas do fluido Vasco 7.000.

Propriedade	Descrição/valor
Descrição	Vasco 7000: fluido de corte miscível em água, de base ester vegetal, isento de óleo mineral
Aspecto	Líquido castanho
PH	<10,5
Densidade relativa	0,9830 (20°C)
Ponto de ebulição inicial e faixa de T de ebulição	>250°C
Ponto de fulgor	134°C
Viscosidade	74 mm ² /s (40°C)
Concentração	3-5% (leitura refratômetro 2,1-3,6)

Fonte: Adaptada de [BLASER SWISSLUBE \(2016\)](#).

Todas as condições e parâmetros utilizados estão apresentados resumidamente na Tabela 5. A Equação Matricial 3.4 apresenta a Matriz de Experimentos.

$$\left\{ \begin{array}{ccccccc}
 \text{Rebolos} & v_s & \text{Materiais} & Q'_w & V_w & \text{Desempenho} & \text{Susten.} \\
 & [m/s] & & [mm^3 / mm.min] & [mm^3] & & \\
 & & & & & P & \\
 & & & & & u & \\
 & & & & & \text{Desgaste} & \\
 3NQ & 45 \setminus 80 & Inc.751 & 50 & 5.000 & Superf. & Econôm. \\
 cBN & 80 & 21 - 43 & 100 & 9.000 & Cavacos & Ambien. \\
 & & Sil.1 & 150 & 12.000 & Rugosi. & Social \\
 & & & & & Circul. & \\
 & & & & & Peças & \\
 & & & & & Custos &
 \end{array} \right\} \quad (3.4)$$

Tabela 5 – Condições e parâmetros utilizados no estudo.

Tipo - modelo da máquina	Retífica cilíndrica externa de mergulho - Zema G-800-HS	
Rebolos	3NQ 80 L 10 VS3 (convencional)	JB126 K150 VSS (cBN)
Dressadores	Dressador Fliese FBS 115 Furioso	Disco diamantado SG71P 250 0,6 (D602)
Condições de dressagem	Velocidade do rebolo (v_s), 80 m/s; rotação do rebolo (N_s), 3.088 rpm; grau de recobrimento (U_d), 4; profundidade de dressagem (a_d), 22 μ m; passo de dressagem (S_d), 0,25 mm/rot; velocidade de passagem (v_t), 382 mm/min; número de passes (Z_d), 6;	Velocidade do rebolo (v_s), 80 m/s; rotação do rebolo (N_s), 3.088 rpm; velocidade do disco (v_r), 32 m/s; rotação do disco (N_d), 4.560 rpm; relação de velocidades (q_d), +0,4; profundidade de dressagem (a_d), 2 μ m; passo de dressagem (S_d), 0,15 mm/rot; velocidade de passagem (v_t), 300 mm/min; número de passes (Z_d), 5
Condições de corte	Velocidade do rebolo (v_s), 45 e 80 m/s; diâmetro do rebolo (d_s), 500 mm; rotação do rebolo (n_s), 1.737 e 3.088 rpm;	Velocidade do rebolo (v_s), 80 m/s; diâmetro do rebolo (d_s), 400 mm; rotação do rebolo (n_s), 3.800 rpm;
	largura de retificação (b_w), 15 mm; rotação da peça (n_w), 250 rpm; tempo de <i>spark-out</i> (t_{spark}), 5 s (20,8 voltas); taxas específicas de remoção de material (Q'_w), 50, 100 e 150 mm ³ /mm.min; volumes de material removido (V_w), 5.000 , 9.000 e 12.000 mm ³	
Fluido de corte	Vasco 7.000, óleo sintético, 50 l/min, concentração 3-5%, pH 9 $\pm$ 1, Temp. 24 $\pm$ 1°C, dureza 25-35 °dGH	
Materiais, durezas: geometria	Inconel®751, 46 HRC: 150 mm comprimento (L) x 42,5 diâmetro ($\varnothing$) / 21-43, 39 HRC: 150 mm de L x 28,4 ($\varnothing$) / Silcrome 1, 28 HRC: 150 mm de L x 24,5 ($\varnothing$)	

Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir, serão apresentados detalhadamente as condições de trabalho para o rebolo convencional 3NQ e para o rebolo de cBN, respectivamente.

3.1 Condições de trabalho para o rebolo convencional 3NQ

Para o rebolo convencional 3NQ, foram testadas duas velocidades de corte, $v_s = 45$ e 80 m/s para a realização dos testes de retificação cilíndrica externa de mergulho. A rotação da peça (n_w) de 250 rpm foi mantida constante para todas os testes. A largura de retificação (b_w) de 15 mm foi adotada. As velocidades de avanço radial, v_f , foram calculadas tomando-se como base valores de taxa específica de remoção de material (Q'_w), conforme Equação 3.5.

$$Q'_w = \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (3.5)$$

Onde: Q'_w (mm³/mm.s) é a taxa específica de remoção de material; d_w (mm) diâmetro da peça e v_f (m/s) velocidade de avanço radial.

Foram utilizados corpos de prova de formato cilíndrico, com diâmetro externo (d_w) igual a 42,5, 28,4 e 24,5 mm, para o Inc.751, 21-43 e Sil.1, respectivamente. O volume de material removido (V_w) em cada teste foi igual a 12.000 mm³, com intervalos em 5.000, 9.000 e 12.000 mm³ para a realização dos testes de desempenho (citados doravante no Item 5.3) em cada ensaio. Foi realizado uma réplica para cada teste. Foram realizados três mergulhos na peça para a remoção dos três V_w , em diferentes posições no eixo axial da peça (eixo Z), tendo como origem a face direita da peça. Após a dressagem, inicialmente, removeu-se 5.000 mm³ de material na posição Z, do CNC, em -15 mm. Após o mergulho na peça o rebolo foi impresso em uma placa de aço SAE 1020 para medição do desgaste (doravante descrito no Item 3.3-d). Em seguida, na posição Z = -30 mm, removeu-se mais 4.000 mm³, com posterior impressão na placa. Por fim, na posição Z = -45 mm, removeu-se mais 3.000 mm³, totalizando-se um $V_w = 12.000$ mm³, e repetiu-se o procedimento da impressão, com posterior dressagem. De modo a minimizar os efeitos do empastamento do rebolo durante o processo de usinagem, a cada intervalo de 1.000 mm³ de material removido, o sistema de limpeza por alta pressão foi acionado, jorrando a mistura fluido/ar para remoção de cavacos empastados na superfície do rebolo. A Tabela 6 apresenta os parâmetros variáveis de retificação para o rebolo convencional.

3.2 Condições de trabalho para o rebolo cBN

Visando a racionalização dos recursos disponíveis e o conhecimento técnico consolidado na literatura para o uso de rebolos de cBN (Jackson *et al.* (2001) e Oliveira *et al.* (2009)), para os testes com o rebolo supracitado, será testada apenas a v_s 80 m/s. Foram testadas as mesmas taxas específicas de remoção de material e os mesmos volumes de material removido utilizados nos testes com rebolo convencional. As amostras e a estratégia de mergulho utilizadas foram as mesmas dos testes para o rebolo convencional, porém para o cBN o corpo de prova foi rotacionado de modo a utilizar sua outra extremidade. Também realizou-se uma réplica para cada

Tabela 6 – Parâmetros de retificação para o rebolo convencional.

3NQ	Nº	v_s [m/s]	Q'_w [mm ³ / mm.min]	v_f [mm/ min]	$\varnothing_i$ d_w [mm]	$\varnothing_f$ {5000mm ³ } [mm]	$\varnothing_f$ {9000mm ³ } [mm]	$\varnothing_f$ {12000mm ³ } [mm]
Inc.751	1.a	45	50	0,37	42,5	39,4	38,3	37,2
Inc.751	1.b	45	100	0,74				
Inc.751	1.c	45	150	1,11				
Inc.751	1.d	80	50	0,37				
Inc.751	1.e	80	100	0,74				
Inc.751	1.f	80	150	1,12				
21-43	2.a	45	50	0,56	28,4	23,6	21,6	19,6
21-43	2.b	45	100	1,12				
21-43	2.c	45	150	1,68				
21-43	2.d	80	50	0,56				
21-43	2.e	80	100	1,12				
21-43	2.f	80	150	1,68				
Sil.1	3.a	45	50	0,65	24,5	18,6	16,1	13,3
Sil.1	3.b	45	100	1,30				
Sil.1	3.c	45	150	1,95				
Sil.1	3.d	80	50	0,65				
Sil.1	3.e	80	100	1,30				
Sil.1	3.f	80	150	1,95				

Fonte: Elaborada pelo autor.

ensaio. Assim como no rebolo convencional o sistema de limpeza por alta pressão foi acionado a cada 1.000 mm³ de material removido. Um resumo dos demais parâmetros de teste é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de retificação para o rebolo cBN.

cBN	Nº	v_s [m/s]	Q'_w [mm ³ / mm.min]	v_f [mm/ min]	$\varnothing_i$ d_w [mm]	$\varnothing_f$ {5000mm ³ } [mm]	$\varnothing_f$ {9000mm ³ } [mm]	$\varnothing_f$ {12000mm ³ } [mm]
Inc.751	1.a	80	50	0,37	42,5	39,4	38,3	37,2
Inc.751	1.b	80	100	0,74				
Inc.751	1.c	80	150	1,11				
21-43	2.a	80	50	0,56	28,4	23,6	21,6	19,6
21-43	2.b	80	100	1,12				
21-43	2.c	80	150	1,68				
Sil.1	3.a	80	50	0,65	24,5	18,6	16,1	13,3
Sil.1	3.b	80	100	1,30				
Sil.1	3.c	80	150	1,95				

Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir, serão detalhadamente apresentados como foram avaliados os indicadores de desempenho. Por fim, será exposto como foram construídos os indicadores de sustentabilidade.

3.3 Critérios de desempenho

A priori, de modo a avaliar a capacidade de retificação dos diferentes materiais, calculou-se o *Grindability Index*, S_o , com unidade em $\text{mm}^5/\text{J.s}$, segundo König e Messer (1981), de acordo com a Equação 3.6:

$$S_o = \frac{Q'_w \cdot G \cdot V'_w}{R_z \cdot u'} \quad (3.6)$$

Onde: Q'_w ($\text{mm}^3/\text{mm.s}$) é a taxa específica de remoção de material; G (-) a relação G ; V'_w (mm^3/mm) o volume específico de material removido; R_z (mm) a rugosidade correspondente à média dos cinco maiores picos e vales e u' ($\text{J}/\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1}$) a energia específica dividida pela largura de retificação (b_w).

Em seguida, será descrito como foi realizada a avaliação de desempenho do processo, sendo esta realizada pelos seguintes critérios:

1. **Variáveis de saída do processo:** (a) potência de retificação; (b) energia específica; (c) desgaste do rebolo (relação G e força tangencial por grão); (d) superfície do rebolo e (e) morfologia dos cavacos;
2. **Qualidade final da peça:** (f) rugosidades; (g) circularidades e (h) análise superficial da peça (topografia, microestrutura e microdureza); e
3. **Fator econômico:** (i) custos associados ao processo.

Os nove critérios supracitados para análise do desempenho dos rebolos serão detalhados a seguir.

a) Potência de retificação: A medição da potência de corte consumida pelo motor do rebolo durante a retificação foi realizada subtraindo-se o valor a potência elétrica em vazio para acionamento do rebolo. Utilizou-se-se uma unidade de controle SINAMICS G120 - CU320, da Siemens AG, onde os dados de saída da unidade foram transmitidos via cabo *crossover* para um PC de apoio da retífica e então coletados através do *software* STARTER, também da Siemens AG. Este *software* de aquisição de dados foi configurado para fazer a obtenção de uma amostra a cada 100 ms (10 Hz).

Para o cálculo do consumo energético durante a operação (critério utilizado em um dos fatores adotados para o cálculo do custo do processo), a medição de potência total consumida durante a retificação foi realizada utilizando-se um medidor multivariável elétrico (transdutor de estado sólido UPD 600, da Ciber do Brasil), conforme apresentado na Figura 23. Os dados de saída do medidor são coletados através de sistemas de aquisição de dados já desenvolvidos, utilizando-se o programa LabView®(National Instruments) e o padrão de comunicação

MTConnect™ (MTConnect Institute), conforme já realizado por pesquisas anteriores: Silva *et al.* (2010); Silva *et al.* (2012) e Afonso, Filleti e Silva (2013).

Figura 23 – Exemplo de estudo de potência.

Fonte: Filleti (2015).

b) Energia específica: Foi avaliada a energia específica⁸ do processo de retificação após a obtenção das potências de corte para os dois rebolos, de acordo com a Equação 2.5.

c) Desgaste do rebolo: O desgaste dos rebolos foram avaliados quantitativamente pelo método de impressão. Da largura total do rebolo ($3NQ-b_s = 50 \text{ mm}$ /cBN- $b_s = 20 \text{ mm}$), somente 15 mm foram utilizados na retificação ($b_w = 15 \text{ mm}$). A parcela não empregada foi admitida como referência. Ao fim de cada processo de retificação, com volume de material removido igual a 5.000, 9.000 e 12.000 mm³ e cada taxa específica de remoção de material, o rebolo foi retificado em mergulho em uma chapa de aço SAE 1020, de dimensões 65x30x10 mm (exemplificado na Figura 24), utilizando-se fluido de corte em abundância e velocidade de mergulho minimizada, conforme se observa na Figura 25, com dimensões para melhor visualização do esquema.

Ao fim desta etapa, a placa retificada, o qual possui o perfil “impresso” da ferramenta abrasiva, foi analisada em um perfilômetro, modelo Talysurf 50, da marca Taylor Hobson, com o intuito de se obter o perfil completo do rebolo. Um exemplo desse perfil é apresentado na Figura 26.

A distância medida entre duas regiões do perfil da Figura 26 representa a redução radial do rebolo (Δ_{rs}) devido ao desgaste da retificação. O desgaste diametral do rebolo (Δ_d) é a multiplicação de Δ_{rs} por dois. O volume desgastado do rebolo (V_s) pode ser calculado através da Equação 3.7:

$$V_s = \frac{\pi \cdot b_w \cdot d_s^2}{4} - \frac{\pi \cdot b_w \cdot (d_s - \Delta_d)^2}{4} = \frac{\pi \cdot b_w}{4} (2d_s \Delta_d - \Delta_d^2) \quad (3.7)$$

⁸ Energia específica de retificação inclui energia consumida na formação do cavaco, remoção do cavaco e deformação elástica do material, que depende, particularmente, das propriedades mecânicas do metal (WENFENG *et al.*, 2014).

Figura 24 – Dispositivo para medição do desgaste do rebolo.

Fonte: Silva (2004).

Figura 25 – Representação esquemática da medição do desgaste do rebolo.

Fonte: Filleti (2015).

Figura 26 – Exemplo de perfil de desgaste do rebolo.

Fonte: Filleti (2015).

Por meio de testes preliminares, avaliou-se que não ocorreu desvios significativos no perfil do rebolo impressos ao longo da placa. Sendo assim, ao final de cada mergulho, o desgaste radial da placa retificada, que contém o perfil do rebolo, foi medido em um ponto central da placa.

De modo a verificar a consistência destas medidas, ao final de cada ensaio da réplica, o rebolo 3NQ foi dressado com uma profundidade de dressagem (a_d) de $5\ \mu\text{m}$ e o de cBN com a_d de $1\ \mu\text{m}$, de modo a monitorar a topografia do rebolo via mapa gerado pela Emissão Acústica (EA). Para a medição da EA do rebolo 3NQ utilizou-se um sensor em contato acoplado perto do dressador e para o rebolo cBN recorreu-se a sensor sem contato acoplado na porta de troca do

rebolo, fabricados pela SENSIS, conectados a uma unidade de tratamento de sinal, modelo MSM, e uma placa de aquisição de dados do fabricante *National Instruments*TM, modelo USB-6341. Para se obter uma resposta adequada do sinal utilizou-se os seguintes critérios para o 3NQ: Ganho de Sinal (GS), 11; Redução de Ruído (RR), 25; Ganho de Entrada (GE), 5; Filtro Passa Alta (FPA), com frequência de corte de 10 kHz. Já para o cBN utilizou-se os seguintes valores: GS, 25; RR, 11; GE, 3; FPA, com frequência de corte de 25 kHz e Filtro Passa Baixa (FPB), com frequência de corte de 100 kHz. Realizou-se a aquisição e análise dos sinais oriundos do sensor no *software* LabVIEW 2013. O desgaste do rebolo foi calculado qualitativamente por meio do número de passes necessários para a limpeza da superfície. Assim como Wang (2008), utilizou-se os valores obtidos pelo método de impressão pela sua maior precisão, todavia os mapas gerados pela EA foram úteis para a validação dos resultados.

Adicionalmente, o método de impressão permitiu monitorar o desgaste do rebolo durante todo o processo (medições em 5.000, 9.000 e 12.000 mm³ de material removido). Visto que a geração do mapa acústico via EA foi realizada apenas no final do processo (durante a dressagem), em 12.000 mm³ de material removido, desta forma não foi possível acompanhar o desgaste ao longo do processo por este método.

Sendo assim, após a medição dos desgastes pelo método de impressão analisou-se a relação G, definida pela Equação 2.4.

Por fim, de modo de avaliar o desempenho de ambos os rebolos e verificar o modo predominante de desgaste do rebolo avaliou-se a força tangencial por grão, F_{t1g} , sendo calculada, segundo Bianchi (1992), de acordo com a Equação 3.8:

$$F_{t1g} = \frac{F_t}{b_w l_c D} \quad (3.8)$$

Onde: F_{t1g} é a força tangencial em um grão abrasivo (N), F_t a força tangencial de retificação (N) (calculado com base no consumo de energia no fuso do motor do rebolo durante os experimentos), b_w a largura de retificação (mm), l_c comprimento de contato (mm) - definido pela Equação 3.9 - e D a densidade de grão (grãos/mm²). O valor teórico da densidade de grãos para o rebolo 3NQ e para o cBN é de 12,00 e 17,32 grãos/mm², respectivamente.

$$l_c = \sqrt{ad_e} \quad (3.9)$$

Onde: a é a profundidade de corte (mm) e d_e o diâmetro equivalente (mm) - Equação 2.2.

d) Superfície do rebolo: Com o objetivo de avaliar a tendência de empastamento, analisou-se a superfície dos rebolos antes e após a retificação das superligas. Utilizou-se uma câmera do fabricante Sony, modelo DSC-H50, com 9,1 Mega Pixels e possibilidade de zoom óptico de até 15x. O zoom digital foi mantido em 2x para todos os testes. Acoplou-se um estereomicroscópio na máquina (Figura 27), fabricante Carl ZeissTM, modelo Stemi 2000-C,

com possibilidade de zoom entre 0,65 e 5x. Optou-se pela utilização das ampliações de 0,65, 1,6 e 5x para as análises. A ampliação do estereomicroscópio multiplicada pelo zoom da câmera resultou na ampliação total das imagens, 1,3, 3,2 e 10x. As áreas da superfície analisadas do rebolo 3NQ, para estas ampliações, foram de 1.320,25, 122,27 e 12,57 mm², respectivamente. Já para o rebolo de cBN, as áreas analisadas foram de 493,86, 122,27 e 12,57 mm², respectivamente. A Figura 28 apresenta um exemplo da superfície do rebolo de cBN após a dressagem. Utilizou-se uma lanterna de *Light Emitting Diode* (LED) como fonte de luz externa.

Figura 27 – Estereomicroscópio acoplado na máquina ZEMA G-800-HS.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 – Superfície do rebolo de cBN após a dressagem, com zoom de (a) 1,3x; (b) 3,2x e (c) 10x.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para todas as medições, a distância focal entre a lente do estereomicroscópio e os rebolos foram mantidas em 90 mm. Os rebolos foram posicionados via CNC sempre na mesma posição

em X e Z (170,0000; -51,0000). Utilizou-se a mesma posição angular para todas as medições, sendo o rebolo posicionado manualmente. Como referência utilizou-se o sinal do *Trigger*, onde este sinal de posição é exibido em uma aplicação no software LabVIEW 2013 para o correto posicionamento do rebolo. Para o rebolo de cBN, utilizou-se os segmentos do mesmo como referências nas imagens.

e) Morfologia dos cavacos: Os cavacos gerados nos testes de retificação para os diferentes materiais, taxas de remoção e rebolos foram coletados por um feltro colocado em um reservatório posicionado embaixo da região de contato rebolo/peça. Ao final de cada teste os feltros com os cavacos aderidos em sua superfície foram retirados e trocados por novos. Os cavacos recolhidos foram analisados em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) ZEIS LEO 440, com detector OXFORD, modelo 7060, operando com feixe de elétrons de 20 kV, corrente de 2,82 A e I probe de 200 pA. Os testes foram realizados na Central de Análises Químicas Instrumentais (CAQI) do Instituto de Química de São Carlos (IQSC) da USP.

f) Rugosidades: Associados ao acabamento superficial, foram avaliados os seguintes aspectos: rugosidade média (R_a), rugosidade máxima (R_t) e rugosidade correspondente à média dos cinco maiores picos/vales (R_z) (R_z – ISO), conforme International Organization for Standardization⁹ (1997 apud (TAYLOR HOBSON PRECISION, 2003a)). A escolha destes parâmetros é justificada pela sua importância/facilidade para o controle de produção de peças na indústria. Por meio de resultados preliminares foi possível avaliar que os valores de rugosidades dos corpos de prova possuem baixa variabilidade ao longo do mesmo colo retificado. Sendo assim, os resultados experimentais foram obtidos pela média aritmética de 3 medições de rugosidade em cada mergulho, sendo estas realizadas paralelas ao eixo longitudinal da peça, cada uma rotacionada 120° em relação à outra. As medições de R_a , R_t e R_z foram examinadas em conjunto durante cada varredura, utilizando-se um rugosímetro Taylor Hobson, modelo Talysurf 50, com filtro Gaussiano e *cut-off* de 0,8 mm. De acordo com Wang (2008), os valores limites de R_a para a sede da válvula é 0,8 μm . Tais valores foram utilizados como limites nos processos de retificação em estudo, para ambos os rebolos analisados.

g) Circularidades: Considerou-se os seguintes aspectos: circularidade RONp (maior desvio local positivo), circularidade RONv (maior desvio local negativo) e circularidade RONT (desvio pico-vale), conforme indicado na Figura 29. Por meio de testes preliminares, foi possível avaliar que o rebolo não gerou peças ovalizadas ou com erros geométricos consideráveis e os perfis de circularidade não apresentaram desbalanceamento do rebolo. Observou-se que não houve diferença significativa de circularidades ao longo do colo retificado, resultando em baixos desvios de cilindridade. Sendo assim, fez-se uma medição de circularidade para cada volume. As medições de RONp, RONv e RONT foram feitas em conjunto durante a varredura, utilizando-se um medidor de circularidade Taylor Hobson, modelo Taylround 131, com filtro Gaussiano, 1-150

⁹ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4287**: Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters. [s.l], ISO, 25 p. 1997.

UPR (*Undulations Per Revolution*) para o Inc.751 e 1-50 UPR para o 21-43 e Sil.1¹⁰, conforme International Organization for Standardization¹¹ (2003, apud (TAYLOR HOBSON PRECISION, 2003b)). De acordo com Wang (2008), os valores limites de RONt para a sede da válvula é 6 μm . Tais valores foram utilizados como limites nos processos de retificação em estudo, para ambos os rebolos analisados.

Figura 29 – Representação gráfica das circularidades.

Fonte: Adaptada de TAYLOR HOBSON PRECISION (2003b).

h) Análise da superfície da peça: Avaliou-se a incidência de danos térmicos, oriundos do processo, por meio da análise da alteração superficial da peça pós-retificação. Para tal finalidade, foram realizadas as seguintes avaliações: (i) análise da topografia da superfície (verificação qualitativa); (ii) análise metalográfica da superfície (verificação qualitativa) e (iii) microdureza (verificação quantitativa). Para a análise qualitativa (i) da superfície da peça, utilizou-se um microscópio confocal laser 3D, marca Olympus, modelo Lext OLS4000, de modo a avaliar principalmente a presença ou não de trincas e queima superficial. Para a análise qualitativa (ii) microestrutural da superfície dos materiais, com o intuito de verificar alterações microestruturais como queima ou formação de camada branca, foram utilizados os seguintes equipamentos: embutidora marca Buehler, modelo Simplimet XPS1; lixadeira/politriz Buehler Base Ecomet 250, cabeçote AutoMet 250; e foi empregado um microscópio óptico Zeiss Axio Scope.A1 com sistema integrado para análise microestrutural. A análise quantitativa (iii) foi realizada no durômetro do fabricante Leica, modelo UHL VHMT, com o objetivo de medir possíveis alterações de dureza na peça provocadas pelo processo de retificação.

O procedimento de preparo das amostras seguiu as recomendações de Voort, Manilova e Lucas (2004) e Voort, Lucas e Manilova (2004). Os corpos de prova foram seccionados por eletroerosão a fio. O modo de embutimento ocorreu na embutidora com baquelite. O processo de lixamento ocorreu em via úmida com lixas d'água de granulometria variando entre 80, 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1200 e 2000. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao procedimento de polimento grosso com giz de cromo. Em seguida, todas as amostras foram submetidas à

¹⁰ Esta variação da faixa de medição do filtro ocorreu devido à diferença entre os diâmetros finais das peças.

¹¹ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12180-2**: Geometrical product specifications (GPS) - Cylindricity - Part 2: Specification operators. Genebra: ISO, 2003.

técnica de polimento fino com pastas de diamante, com granulometrias entre 9, 6, 3 e 1 μm . Por fim, os espécimes foram limpos em ultrassom com álcool Isopropílico. A metodologia de ataque químico para revelação da microestrutura seguiu a norma [AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS \(2015\)](#). Para revelar a microestrutura do Inc. 751, utilizou-se um ataque químico da solução “12”, denominada de Água Régia: 1 parte de ácido nítrico (HNO_3) para 3 partes de ácido clorídrico (HCl). As amostras foram submetidas por imersão na solução por 10 segundos. Para os materiais 21-43 e Sil. 1, empregou-se o ataque denominado “88”: 1 parte de ácido nítrico (HNO_3), 2 partes de ácido clorídrico (HCl) e 3 partes de água. Os espécimes foram mantidos por imersão na solução por 45 segundos. Adicionalmente, utilizou-se o método ocular para medição dos tamanhos grãos, baseando-se na norma [AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS \(2013\)](#).

O procedimento para medição de microdureza dos corpos de prova seguiu as normas [AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS \(2007\)](#) e [AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS \(2011\)](#). Mediu-se a microdureza Vickers, utilizando-se um identador com ponta piramidal e 25 g de carga, sendo aplicada por 15 s. Em média, a diagonal (d) impressa pelo identador piramidal nos corpos de prova foi de aproximadamente 10 μm . Sendo assim, definiu-se que as identações fossem espaçadas 30 μm entre elas, de modo a não interferir uma na outra, iniciando 30 μm a partir da borda retificada até 150 μm na subsuperfície seccionada (5 medições). A réplica e a tréplica foram realizadas 50 μm a esquerda e a direita destas medições, totalizando 15 medições de microdureza para cada amostra.

i) Fator econômico: Adotou-se a metodologia proposta por [Rowe, Ebbrell e Morgan \(2004\)](#), onde mensurou-se os custos associados para cada operação, levando-se em consideração os custos pelos seguintes itens: rebolos/peça, laborais/peça, máquina/peça e totais/peça. A seguir será descrito como foi analisado os custos para cada item.

1. Custos dos rebolos/peça (C_s):

Baseando-se na Equação 3.10 calculou-se os custos dos rebolos/peça para cada operação.

$$C_s = \frac{2c_s(\Delta r_s + a_d n_d)}{(d_{smax} - d_{smin}) N_d} \quad (3.10)$$

Onde: c_s é custo do reboło, Δr_s desgaste radial, a_d profundidade de dressagem, n_d número de passes, d_{smax} diâmetro máximo do reboło, d_{smin} diâmetro mínimo do reboło e N_d número de peças por dressagem. Em relação ao N_d , para os ensaios aqui realizados, foi considerada uma unidade funcional (peça) um corpo de prova após remoção de 12.000 mm^3 de material, visto que foi realizada uma operação de dressagem antes e após a remoção deste volume, implicando teoricamente na mesma condição inicial de agressividade aos rebolos. Sendo assim, o valor desta variável foi de apenas uma peça por dressagem, valor este igual para ambos os rebolos.

A Tabela 8 apresenta os valores utilizados para o cálculo de C_s , sendo utilizados na Equação 3.10.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados para cálculo dos custos do rebolos/peça.

Parâmetro	Valor		Unidade
	3NQ	cBN	
d_{smax}	500	400	mm
d_{smin}	350	390	mm
$\Delta r_s^\dagger$	0,0708 (70,8078)§; 0,0945 (94,5197)§§; 0,1287 (128,6945)§§§; 0,0707 (70,7435)*; 0,0748 (74,7737)**; 0,0837 (83,6634)***	0,0027 (2,7494)*; 0,0035 (3,5643)**; 0,0084 (8,4586)***	mm (μ m)
a_d	0,022 (22)	0,002 (2)	mm (μ m)
n_d	6	5	-
N_d	1	1	-
c_s	2.049,65	12.717,00	R\$

† Valores médios referentes aos três materiais para o $V_w = 12.000 \text{ mm}^3$.

§Referente à $Q'_w = 50 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$; §§ $Q'_w = 100 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$; e §§§ $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$ para $v_s = 45 \text{ m/s}$.

*Referente à $Q'_w = 50 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$; ** $Q'_w = 100 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$; e *** $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$ para $v_s = 80 \text{ m/s}$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

2. Custos laborais/peça (C_l):

Levou-se em consideração a Equação 3.11 para a análise dos custos laborais por peça, tomando-se em consideração os custos das ferramentas (rebolos e dressadores), superligas (média dos três materiais), fluidos (corte e hidráulico), consumo energético médio¹² e mão de obra¹³, conforme discretizado pela Figura 30. Sendo diferenciados apenas pelo custo dos rebolos e dressadores.

$$C_l = \frac{c_l}{3600} t_t \quad (3.11)$$

Onde: c_l são os custos laborais e t_t o tempo total do ciclo de operação (t_t = tempo de operação do ciclo retificação, t_s , somado ao tempo de dressagem, t_d). Os tempos foram obtidos por meio do CNC da máquina.

Para o cálculo do custo por hora dos rebolos, levou-se em consideração o desgaste radial do rebolo (desgaste da operação de retificação em si somado ao desgaste da dressagem), sabendo-se a vida do rebolo (raio útil) pode-se calcular o número de peças que o rebolo seria capaz de produzir, nestas condições. O rebolo 3NQ possui uma vida (camada radial

¹² Para diminuir o número de variáveis na fórmula, fez-se a média entre as diversas condições (três materiais, três taxas e dois rebolos).

¹³ Relacionado ao valor por hora de um Técnico de Laboratório, classe 2.

Figura 30 – Discretização dos custos laborais para o (a) 3NQ e (b) cBN.

*Referente à $Q'_w = 50 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$; ** $Q'_w = 100 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$; e *** $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$.
Referente a media dos três materiais.

Fonte: Elaborada pelo autor.

de abrasivo útil) igual a 75 mm. Já o rebolo de cBN, a vida útil foi de 5 mm. Tendo-se os valores dos custos dos mesmos, efetuou-se a razão entre o custo total de cada rebolo pelo número de peças que este poderia produzir no total, obtendo-se o custo do rebolo/peça. Em seguida, considerando-se o tempo total de ciclo (retificação e dressagem), calculou-se o número de peças que seriam produzidas por hora. Por fim, multiplicou-se o custo do rebolo/peça pelo número de peças produzidas por hora, chegando-se nos valores do custo do rebolo/hora. No tocante aos custos do rebolo 3NQ, optou-se pela média entre os valores entre 45 e 80 m/s, de modo a simplificar as análises, uma vez que estes ficaram similares (Δ de $\approx 10\%$).

Para o rebolo convencional, o componente de maior impacto no custo laboral é o custo de aquisição das superligas, o custo do rebolo fica em quarta colocação, dentre os itens

analisados. Já para o cBN, o componente de maior impacto no custo laboral é o custo do rebolo, evidenciando sua principal limitação. O custo laboral do dressador para o rebolo de cBN foi 65% maior quando comparado à este item para o rebolo 3NQ. Os demais itens ficaram iguais em virtude da análise comparativa realizada, onde o tempo de retificação foi o mesmo, bem como os custos recursos utilizados, hora-máquina e hora-homem envolvidos.

A Tabela 9 apresenta os valores utilizados para o cálculo de C_l , sendo utilizados na Equação 3.11.

Tabela 9 – Parâmetros utilizados para cálculo dos custos laborais/peça.

Parâmetro	Valor		Unidade
	3NQ	cBN	
t_s	1.640*; 993**; 797***	1.640*; 993**; 797***	s
t_d	191	125	s
t_t	1.831*; 1.184**; 988***	1.765*; 1.118**; 922***	s
N_d	1	1	-
c_l	130,25*; 137,36**; 143,08***	187,45*; 232,40**; 304,62***	R\$/hr

*Referente à $Q'_w = 50 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$; ** $Q'_w = 100 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$; e *** $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3. Custos da máquina/peça (C_m):

Determinado pela Equação 3.12 calculou-se os custos relativos à máquina por peça.

$$C_m = \frac{C_{mc}}{N_{mc}} \quad (3.12)$$

Onde: C_{mc} é o custo da máquina e N_{mc} o número de peças produzidas no período de retorno do valor da máquina (y_t). Sendo N_{mc} calculado pela Equação 3.13.

$$N_{mc} = \frac{y_t}{t_t} \quad (3.13)$$

A Tabela 10 apresenta os valores utilizados para o cálculo de C_m , sendo utilizados nas Equações 3.12 e 3.13.

4. Custos totais/peça (C_t):

Os custos totais/peças são a soma dos três itens supracitados ou calculados de acordo com a Equação 3.14.

$$C_t = C_s + t_t \left(\frac{c_l}{3600} + \frac{C_{mc}}{y_t} \right) \quad (3.14)$$

A Tabela 11 apresenta os valores utilizados para o cálculo de C_t , sendo utilizados na Equação 3.14.

Tabela 10 – Parâmetros utilizados para cálculo dos custos da máquina/peça.

Parâmetro	Valor		Unidade
	3NQ	cBN	
C_{mc}	1.650.000	1.650.000	R\$
y_t	630.700.000 (20)	630.700.000 (20)	s (anos)
t_t	1.831*; 1.184**; 988***	1.765*; 1.118**; 922***	s
N_{mc}	344.456*; 532.685**; 638.360***	357.337*; 564.132**; 684.056***	-
C_m	4,79*; 3,09**; 2,58***	4,62*; 2,92**; 2,41***	R\$/peça

*Referente à $Q'_w = 50 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$; ** $Q'_w = 100 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$; e *** $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 11 – Parâmetros utilizados para cálculo dos custos totais/peça.

Parâmetro	Valor		Unidade
	3NQ	cBN	
C_s	5,54§; 6,19§§; 7,12§§§ 5,54*; 5,65**; 5,89***	32,43*; 34,49**; 46,95***	R\$/peça
t_t	1.831*; 1.184**; 988***	1.765*; 1.118**; 922***	s
c_l	122,81	233,02	R\$/hr
C_{mc}	1.650.000	1.650.000	R\$
y_t	630.700.000 (20)	630.700.000 (20)	s (anos)

§Referente à $Q'_w = 50 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$; §§ $Q'_w = 100 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$; e §§§ $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$ para $v_s = 45 \text{ m/s}$.

*Referente à $Q'_w = 50 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$; ** $Q'_w = 100 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$; e *** $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$ para $v_s = 80 \text{ m/s}$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como resultado dessa etapa, será avaliado e comparado o desempenho dos dois rebolos (3NQ e cBN), analisando a utilização dos três materiais empregados, verificando a hipótese da influência da velocidade de corte e da taxa específica de remoção de material nas variáveis de saída do processo, qualidade da peça retificada e fatores econômicos associados.

A seguir, apresenta-se o modo como foi construído os indicadores de sustentabilidade do processo, em todas as suas dimensões.

3.4 Indicadores de sustentabilidade

Para construção dos indicadores utilizou-se a metodologia proposta por Linke *et al.* (2014). Os indicadores calculados demonstram redução na rugosidade da peça (laminada-retificada) em função do impacto da adoção de diferentes combinações entre rebolos, materiais e taxa específicas de remoção de material, nos recursos de entrada do processo. Os materiais Inc. 751, 21-43 e Sil. 1, como recebido, possuíam os seguintes valores médios de R_a e R_z : 1,76 e 11,77; 1,56 e 9,85; e 1,60 e 10,14 μm , respectivamente. Os indicadores consideram dois parâmetros de qualidade da peça (rugosidades, R_a e R_z , em μm) e um de processo/produtividade

(taxa de remoção de material, Q_w , mm³/min), levando-se em consideração aspectos econômicos, ambientais e sociais. Primeiramente, serão descritos os parâmetros de qualidade e, em seguida, os parâmetros de processo.

Com base nos custos para cada rebolo, material e condição testada, calculou-se os Indicadores Econômicos ($\eta_{\$}$), de acordo com as Equações 3.15 e 3.16. O sinal (-) representa que os parâmetros devem ser minimizados (valor das rugosidades finais - pós retificação - devem ser menores que o recebido - laminado).

$$\eta_{\$ \rightarrow R_a} = -\frac{\Delta R_a}{\Delta Custo} \quad (3.15)$$

$$\eta_{\$ \rightarrow R_z} = -\frac{\Delta R_z}{\Delta Custo} \quad (3.16)$$

De modo análogo às análises anteriores, o parâmetro de processo leva em consideração a taxa de remoção (Q'_w em mm³/mm.min) utilizada na operação de retificação, conforme Equação 3.20:

$$\eta_{\$ \rightarrow Q_w} = \frac{\Delta Q_w}{\Delta Custo} \quad (3.17)$$

Para análise dos impactos ambientais (eficiência), levou-se em consideração o consumo de energia durante o processo, para os diferentes materiais, condições e rebolos testados. Por meio de uma rotina desenvolvida no software MATLAB®, calculou-se a integral, ao longo do tempo de retificação, da potência de corte e subtraindo-se a integral da potência em vazio obteve-se o valor da energia líquida do processo, E . Com base nos valores de E obtidos, calculou-se os Indicadores Ambientais (η_E), de acordo com as Equações 3.18 e 3.19:

$$\eta_{E \rightarrow R_a} = -\frac{\Delta R_a}{\Delta E} \quad (3.18)$$

$$\eta_{E \rightarrow R_z} = -\frac{\Delta R_z}{\Delta E} \quad (3.19)$$

O parâmetro de processo, que leva em consideração a taxa de remoção, foi calculado de acordo com a Equação 3.20:

$$\eta_{E \rightarrow Q_w} = \frac{\Delta Q_w}{\Delta E} \quad (3.20)$$

Para avaliar os impactos sociais, determinou-se a variação do nível de ruído laboral da máquina durante o ciclo de retificação e em vazio (com todos subsistemas ligados). Utilizou-se um decibelímetro, modelo DEC-460, da Instrutherm, localizado próximo à tela de operação do CNC da máquina (representando o local do operador), operando em circuito de compensação “A”

e resposta lenta. A saída do instrumento foi conectada à um cartão de entrada analógica, NI-9205, junto a um chassi NI cDAQ-9174, ambos da National Instruments. Para aquisição dos valores de ruído sonoro, utilizou-se um programa desenvolvido em Labview 8.5, com taxa de aquisição definida em 10 amostras por segundo (10 Hz). Com base nos valores de ruído, calculou-se os Indicadores Sociais (η_{dBA}), conforme Equações 3.21 e 3.22:

$$\eta_{dBA \rightarrow R_a} = -\frac{\Delta R_a}{\Delta R_{\text{ruído}}} \quad (3.21)$$

$$\eta_{dBA \rightarrow R_z} = -\frac{\Delta R_z}{\Delta R_{\text{ruído}}} \quad (3.22)$$

Assim como demonstrado para os outros indicadores, o parâmetro de processo foi calculado segundo a Equação 3.23:

$$\eta_{dBA \rightarrow Q_w} = \frac{\Delta Q_w}{\Delta R_{\text{ruído}}} \quad (3.23)$$

Por fim, a Figura 31 apresenta um fluxograma que resume todo procedimento supracitado, incluindo os nove critérios para análise do desempenho e os três indicadores de sustentabilidade.

Figura 31 – Fluxograma dos procedimentos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao final, de modo a permitir uma comparação global e direta dos resultados para ambos os rebolos, com diferentes unidades e grandezas, os mesmos foram normalizados de acordo com a Equação 3.24:

$$N_f = \frac{P_f}{R_f} \quad (3.24)$$

Onde: f é o fator analisado, N_f é o resultado normalizado, P_f é o parâmetro de processo analisado e R_f é uma relação de normalização. A relação de normalização foi feita dividindo-se o valor do fator pelo valor médio entre as três condições analisadas, conforme Araujo (2010).

De modo a avaliar todos os indicadores normalizados, fornecendo-se assim um valor para o desempenho do reboło/operaco que facilite a comparaco das condices aqui analisadas, construiu-se o Índice de Desempenho Global do Reboło (IDGR)¹⁴, sendo definido pela Equaco 3.25:

$$IDGR = \Sigma N_f \quad (3.25)$$

A seguir, sero apresentados os resultados encontrados experimentalmente neste estudo.

¹⁴ Quanto maior é o valor do índice maior é o desempenho do reboło.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente, como premissa do projeto quantificou-se a composição química dos materiais. Em seguida, avaliou-se os critérios de desempenho: analisou-se as variáveis de saída do processo (potência, energia específica, desgaste e superfície dos rebolos e morfologia dos cavacos); qualidade final da peça (rugosidades, circularidades e análise superficial) e fator econômico. Por fim, analisou-se os indicadores de sustentabilidade.

Na apresentação dos resultados, algumas ilustrações e tabelas foram inseridas no Apêndice D. Quanto for oportuno à consulta, na devida parte do texto encontrar-se-á citação a este conteúdo.

4.1 Análise química

A Tabela 12 traz os resultados da análise química, comparando-se os resultados obtidos com os valores de referência da Tabela 2 nota-se que ocorreu uma sinergia entre os resultados. A técnica utilizada forneceu valores próximos aos teóricos, com uma pequena variação entre eles. Todavia, a técnica não se demonstrou robusta a ponto de quantificar pequenos valores percentuais de elementos nas amostras. A Figura 32 apresenta os espectros de energia dispersiva (ordenada reapresenta intensidade/quantidade de sinal - *Counts* - e abcissa representa a energia característica de cada elemento), onde nota-se os picos de energia como indicativos de presença dos elementos químicos nas amostras.

Para o Inc. 751, observa-se majoritariamente a presença dos elementos Ni e Cr. Nota-se a presença dos elementos Ti e Al¹, exclusivamente juntos apenas para este material, sendo estes

¹ De acordo com Geddes, Leon e Huang (2010), Ti é utilizado para aumentar a dureza e promover a precipitação da fase γ' ; Al possui as mesmas características do Ti e é responsável por melhorar a resistência à oxidação.

Tabela 12 – Resultado da quantificação da composição química dos materiais.

Composição química (%)	Inc. 751	21-43	Sil. 1
Alumínio, <i>Al</i>	3,50	-	1,42
Cromo, <i>Cr</i>	15,79	21,86	5,89
Cobre, <i>Cu</i>	0,16	-	-
Ferro, <i>Fe</i>	8,4	59,85	84,48
Manganês, <i>Mn</i>	0,39	11,57	0,60
Níquel, <i>Ni</i>	66,76	3,63	1,08
Nióbio, <i>Nb</i>	0,83	2,10	-
Silício, <i>Si</i>	0,34	0,99	3,51
Enxofre, <i>S</i>	0,24	-	0,31
Titânio, <i>Ti</i>	3,6	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 32 – Espectros de energia dispersiva das amostras: (a) Inc. 751; (b) 21-43 e (c) Sil.1.

Fonte: Elaborada pelo autor.

elementos² responsáveis pela elevada dureza. Para o material 21-43, nota-se os elementos Fe, Cr

² Precipitados na fase γ' do tipo $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ (GEDDES; LEON; HUANG, 2010).

e Mn³ como os principais constituintes da composição. Já o Sil. 1, possui predominantemente, em sua composição química, os elementos Fe e Cr (entre os três materiais, o Sil. 1 possui a menor quantidade de cromo).

4.2 Indicadores de desempenho

De acordo com as diferentes composições químicas dos materiais, microestruturas e propriedades mecânicas; os materiais possuem diferentes comportamentos que impactaram diferentemente na capacidade de retificação dos mesmos. De modo a avaliar esta capacidade, calculou-se o *Grindability Index* (S_o), para estes materiais, de acordo com a Equação 3.6. Por meio dos resultados obtidos empiricamente neste estudo, a Figura 33 apresenta os valores de S_o para os diferentes materiais, condições e rebolos analisados. O índice permitiu ranquear os materiais testados e inferir a correlação com os resultados obtidos da relação G e rugosidade da peça.

Figura 33 – Capacidade de retificação para os diferentes materiais, rebolos e condições de retificação testadas.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação aos materiais, observa-se que o Inc. 751 possui os menores valores de S_o , comprovando sua difícil capacidade de retificação, pois quanto menor o índice mais difícil é a capacidade de retificar o material. O material Sil. 1 foi considerado, comparativamente, o de menor dificuldade de retificação (menores desgastes dos rebolos e maiores Relações G) dentre os materiais analisados, conforme apresentado na Tabela 13.

³ De acordo com Geddes, Leon e Huang (2010), Fe é utilizado para redução de custo; Cr é responsável por melhorar a resistência à corrosão e oxidação, causa endurecimento moderado na solução sólida e promove a precipitação gradual dos carbeto $M_{23}C_6$, M_6C e M_7C_3 em altas temperaturas; e, segundo König e Messer (1981), o Mn melhora a usinabilidade do material.

Tabela 13 – Comparação da capacidade de retificação para os diferentes materiais e rebolos testados.

Média do S_o para as três taxas (valor.E+05) [mm ⁵ /J.s]	Material	3NQ (45 m/s)	3NQ (80 m/s)	*	3NQ (média das duas v_s)	cBN	**
	Inc. 751	1,04	1,75	67,35%	1,39	51,9	3.621,08%
	21-43	3,62	3,92	8,35%	3,77	265	6.936,22%
	Sil. 1	134	141	5,41%	138	598	334,05%
	-	Média		27,04%	Média		3.630,45%

*Superioridade do rebolo 3NQ (80 m/s) quando comparado ao 3NQ (45 m/s).

**Superioridade do rebolo de cBN quando comparado ao 3NQ (média das duas velocidades).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação aos rebolos, conforme apresentado na Tabela 13, a maior resistência do ligante de cBN trouxe melhores resultados quando comparado ao 3NQ (em média, o S_o para o rebolo de cBN foi 3.630% maior quando comparado ao S_o do rebolo 3NQ), pois com o rebolo de cBN, de acordo com suas características físico-químicas do rebolo, este apresenta um desgaste menor (maior relação G) e maior qualidade superficial (menor R_z), melhorando a capacidade de retificação.

A seguir, serão apresentados os resultados relacionados aos nove itens para análise do desempenho dos processos, evidenciando a diferença na capacidade de retificação destes materiais.

4.2.1 Potência de retificação

A Figura 34 apresenta os valores da potência líquida de corte versus Q'_w . Os valores de potência de corte foram dadas por uma média entre as P encontradas para os três volumes de material removido (5.000, 9.000 e 12.000 mm³), pois não houve diferença significativa entre as medições. O aumento da velocidade de corte do rebolo 3NQ de 45 para 80 m/s resultou, em média, em um aumento da potência de corte, para o Inc. 751, 21-43 e Sil.1 de 31%, 37% e 64%, respectivamente.

O aumento da velocidade de corte do rebolo 3NQ de 45 para 80 m/s resultou, em média, um aumento da potência de corte, para o Inc. 751, 21-43 e Sil. 1 de 31%, 37% e 64%, respectivamente. Tais resultados mostram que o acréscimo da velocidade entre os dois primeiros materiais resultaram um acréscimo energético semelhante entre si, já para o Sil.1 observou-se um aumento energético de aproximadamente 2 vezes mais quando comparado aos outros dois materiais.

Comparando-se os valores de potência líquida de corte do rebolo 3NQ com o cBN, ambos na mesma velocidade de corte (80 m/s), ficaram, em média, semelhantes para o Inc. 751 e 21-43, com um aumento de 3 e 12%, respectivamente. Portanto, o consumo energético também ficou semelhante. Já para o Sil. 1, os valores de P para o cBN foram, em média, 49% menores

Figura 34 – Potência líquida de corte versus taxa específica de remoção de material: (a) 3NQ, 45 m/s; (b) 3NQ, 80 m/s e (c) cBN.

Fonte: Elaborada pelo autor.

quando comparados ao 3NQ. Sendo assim, o gasto energético para o cBN foi quase 50% menor quando comparado ao 3NQ.

Os gastos energéticos para retificação do Inc. 751 foram os mais elevados quando comparados aos outros materiais, seguido do material 21-43 e, por fim, o Sil. 1 foi o material que apresentou menor consumo energético dentre os analisados. Tal fato é justificado pelos maiores esforços requeridos para retificação do Inc. 751. Este material é o que apresenta maior dureza entre os materiais, sendo proporcional a resistência do material e potência exigida da máquina para o processo. Portanto, pelo maior consumo energético entre os materiais, comprova-se pior capacidade de retificação neste caso (conforme apresentado na Figura 33). Doravante serão apresentados motivos da piora da usinabilidade do Inc. 751, devido à sua composição química, presença de carbeto e estrutura austenítica.

Como esperado, para todos os materiais e rebolos testados, o aumento da taxa específica resultou em um acréscimo da potência (Figura 34), devido a maior taxa de avanço e severidade do processo em termos de profundidade de corte (posteriormente apresentado na Tabela 16).

Em seguida, serão apresentados os resultados de energia específica para os diferentes materiais, taxas e rebolos testados.

4.2.2 Energia específica

A Figura 35 apresenta os gráficos de energia específica para os diferentes materiais, condições e rebolos analisados. Observa-se que a energia específica de corte diminuiu com o aumento da taxa específica de remoção. A hipótese para isto é a menor fatia relacionada ao *plowing* e ao *sliding*, durante o processo de retificação. Para provar tal afirmação, foi avaliado qualitativamente a superfície da peça pós retificação, conforme será apresentado no subtópico “Análise da superfície da peça”, nas Figuras 44, 72 e 73. Notou-se pela análise topográfica qualitativa das superfícies retificadas, que o Inc. 751 apresentou maiores defeitos visuais, evidenciando, nas linhas de ação de corte dos grãos, maior volume de material aderido, resultado de uma maior porção de *plowing* durante o processo, agregando maiores valores de energia específica para retificação deste material. De modo análogo, o material Sil. 1 apresentou os menores valores de energia específica e apresentou, visualmente, menores defeitos visuais (menores porcentagens de material aderido), levando a menores percentuais de contribuição de energia advindos do *plowing*.

Adicionalmente, destaca-se que o Inc. 751 gerou os maiores valores de potência e, consequentemente, energia específica, sendo justificado pelo maior consumo de potência pelo motor durante a usinagem deste material, devido à resistência do mesmo.

Comparando-se a u para o 3NQ a 45 m/s com o cBN, para o Inc. 751, os valores ficaram, em média, 24% maiores. Para o 21-43, houve um acréscimo médio de aproximadamente 40%. Já para o Sil. 1, os valores ficaram próximos, com um acréscimo médio de 5%. Comparando-se os valores da energia específica do rebolo 3NQ com o cBN, ambos na mesma velocidade de corte (80 m/s), ficaram, em média, para o Inc. 751, 21-43 e Sil. 1: acréscimo de 5%; decréscimo de 4%

Figura 35 – Energia específica versus taxa específica de remoção de material: (a) 3NQ, 45 m/s; (b) 3NQ, 80 m/s e (c) cBN.

Fonte: Elaborada pelo autor.

e acréscimo de 63%, respectivamente. Sendo assim, em média, o rebolo de cBN consumiu 13% menos energia que o 3NQ na mesma velocidade de corte, auxiliando na tomada de decisão se levar em consideração termos sustentáveis de manufatura.

Conforme Figura 35, observa-se que a energia específica para retificação do Inc. 751, 21-43 e Sil. 1, para ambos os rebolos, varia entre 136-47; 96-30 e 84-29 J/mm³, respectivamente. O Inc. 751 gerou os maiores valores de energia, implicando, em termos energéticos, no pior índice de retificabilidade (conforme apresentado na Figura 33). A retificação com rebolo cBN consumiu, para a maioria dos casos, menos energia, quando comparado ao 3NQ, corroborando a afirmação de Oliveira *et al.* (2009). Todavia, para todos os rebolos e materiais testados, os níveis de energia específica encontrados ($28,7 < u < 136,3$ J/mm³) são maiores que a energia de

fusão⁴. Tal fato se deve, segundo Groover (2010), ao elevado consumo energético do processo de retificação, devido ao tamanho da espessura de corte, ângulos de inclinação negativos e grãos ineficientes durante o corte.

Conforme esperado, ocorreu um decréscimo da energia específica com o acréscimo da taxa de remoção. Tal fato se deve ao efeito de escala, em inglês *size effect*, pois o fato do aumento taxa de remoção leva a uma diferença da condição de interação rebolo/peça na retificação, tornando a condição mais agressiva com o aumento dos valores de espessura de corte equivalente (h_{eq}) - representa a espessura do cavaco (ver Tabela 14). Neste caso, para o rebolo 3NQ a 45 m/s os valores de h_{eq} , para os diferentes materiais, foram de 0,19; 0,37 e 0,56 μm para Q'_w 50, 100 e 150 $\text{mm}^3/\text{mm.min}$, respectivamente. Para o 3NQ e o cBN, ambos em 80 m/s, estes valores foram de 0,10; 0,21 e 0,31 μm , respectivamente.

Feita as considerações sobre o consumo energético nas diferentes condições de retificação; a seguir, será abordado o desgaste dos rebolos e de que forma as diferenças entre os materiais impactam a usinabilidade dos mesmos.

4.2.3 Desgaste dos rebolos

No Apêndice D, a Figura 60 apresenta os valores médios de desgaste radial para ambos os rebolos e para todas condições e materiais testados.

Para as três Q'_w testadas, com o aumento do volume de material removido, para o material Inc. 751, os desgastes radiais (Δr_s) do rebolo 3NQ a 45 m/s ficaram entre 50 e 275 μm , já para rebolo 3NQ a 80 m/s o valor de Δr_s ficou entre 46 e 166 μm . Para o material 21-43, os valores de desgaste radial do rebolo 3NQ a 45 m/s e 80 m/s ficaram entre $28 \leq \Delta r_s \leq 119 \mu\text{m}$ e $30 \leq \Delta r_s \leq 99 \mu\text{m}$, respectivamente. Já para o Sil. 1 os valores do desgaste do rebolo 3NQ para 45 e 80 m/s ficaram entre $6 \leq \Delta r_s \leq 10$ e $4 \leq \Delta r_s \leq 7$, respectivamente. Os desgastes radiais do rebolo de cBN ficaram entre 1,5 e 6 μm , com exceção do Inc. 751 que na maior taxa de remoção ($Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$) os valores aumentaram de 7 para 19 μm , com o aumento de V_w .

Os desgastes para o 3NQ em 80 m/s foram menores quando comparados com o rebolo em 45 m/s. A hipótese para esta redução é que o acréscimo da velocidade de corte promoveu uma redução da área da seção transversal do cavaco e geração de menores tensões mecânicas no rebolo (menores forças por grão). Para comprovar tais afirmações, avaliou-se as espessuras de corte equivalente (equivalente à espessura do cavaco) e as forças por grão envolvidas durante o processo de retificação para o 3NQ a 45 e 80 m/s, conforme apresentados nas Tabelas 14 e 15, respectivamente. Comprova-se que as espessuras de corte equivalente e as forças foram menores para a velocidade de 80 m/s, corroborando a hipótese do menor desgaste nesta velocidade.

Conforme esperado, para ambos os rebolos testados, condições e materiais, o incremento de Q'_w e V_w resultou no acréscimo do desgaste da ferramenta abrasiva. A hipótese para este

⁴ A energia específica para formação do cavaco em aços é 13,8 J/mm^3 (MALKIN; GUO, 2008).

Tabela 14 – Comparação das espessuras de corte equivalente para o rebolo 3NQ em 45 e 80 m/s.

Q'_w [mm ³ /mm.min]	h_{eq} [μm]		
	45 [m/s]	80 [m/s]	Δ [%]
50	0,19	0,10	-43,75
100	0,37	0,21	
150	0,56	0,31	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 15 – Comparação das forças por grão para o rebolo 3NQ em 45 e 80 m/s.

Q'_w [mm ³ / mm.min]	Inc. 751			21-43			Sil. 1		
	F_{t1g} [N]								
	45 [m/s]	80 [m/s]	Δ [%]	45 [m/s]	80 [m/s]	Δ [%]	45 [m/s]	80 [m/s]	Δ [%]
50	0,68	0,49	-28,31	0,47	0,34	-28,11	0,28	0,30	4,30
100	0,55	0,41	-25,13	0,36	0,28	-23,08	0,28	0,29	2,02
150	0,52	0,39	-25,37	0,33	0,27	-18,18	0,31	0,24	-21,50
Média			-26,27	Média		-23,12	Média		-5,06

Fonte: Elaborada pelo autor.

resultado é que o aumento de Q'_w (consequentemente maior avanço) incrementa os valores da profundidade de corte (a) e forças envolvidas no corte, levando-se a um maior desgaste do rebolo. Para corroborar tal afirmação, calculou-se os valores de a e forças tangenciais (F_t) dos processos, conforme apresentados nas Tabelas 16 e 17, respectivamente. Comprova-se que o aumento da taxa resulta no acréscimo do desgaste.

Tabela 16 – Relação entre profundidade de corte e taxa específica de remoção de material.

Q'_w [mm ³ /mm.min]	a^* [μm]		
	Inc.751	21-43	Sil.1
50	1,50	2,24	2,60
100	3,00	4,48	5,20
150	4,49	6,72	7,80

*A diferença na profundidade de corte entre os materiais é devido à variação do diâmetro entre os mesmos, resultando em diferentes velocidades periféricas.

Fonte: Elaborada pelo autor.

De modo a simplificar a estratégia de avaliação do processo/rebolo, [Badger \(2008\)](#) propôs o Número de Dinamização (do inglês, *Aggressiveness Number* - A_{ggr}) para substituir a Equação 2.1, de maneira a proporcionar um calculo simples para o operador, baseando-se apenas em velocidades e profundidade de corte, conforme Equação 4.1:

$$A_{ggr} = 16,7 \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a_e}{d_s}} \quad (4.1)$$

Tabela 17 – Relação das forças tangenciais com o aumento de Q'_w .

Q'_w [mm ³ / mm.min]	F_t [N]								
	3NQ						cBN		
	45 [m/s]			80 [m/s]			80 [m/s]		
	Inc.751	21-43	Sil.1	Inc.751	21-43	Sil.1	Inc.751	21-43	Sil.1
50	29,71	20,80	12,62	21,30	14,96	13,16	15,78	13,25	6,69
100	33,75	22,65	17,81	25,27	17,42	18,17	30,70	18,61	10,80
150	39,57	25,24	23,95	29,53	20,65	18,80	31,83	27,86	16,22

Fonte: Elaborada pelo autor.

Onde: v_w e v_s são as velocidades da peça e do rebolo, respectivamente, a_e a profundidade de corte e d_s o diâmetro do rebolo. O conceito de A_{ggr} é similar à profundidade de corte ou espessura do cavaco e é relacionado com quão profundo cada grão penetra na peça de trabalho (BADGER, 2008).

A Figura 36 apresenta o Número de Dinamização para ambos os rebolos, condições e materiais testados. Nota-se, assim como h_{eq} (ver Tabela 14) e a (ver Tabela 16), que A_{ggr} é proporcional à Q'_w . Além de ser proporcional ao desgaste (ver a Figura 60) e à F_t (ver Tabela 17) também é proporcional à qualidade superficial (em termos de R_a - conforme será apresentado na Figura 41) e custo total/peça (conforme será apresentado na Figura 48). A_{ggr} é inversamente proporcional ao tempo de operação, t_s , (t_s para Q'_w igual a 50, 100 e 150 mm³/mm.min equivale a 1640, 993 e 797 s, respectivamente), energia específica (ver Figura 35) e à relação G (conforme será apresentado na Figura 37). Observa-se que quanto maior a velocidade de corte do rebolo (3NQ-45 m/s é indicado por círculos e 3NQ-80 m/s é indicado pelos quadrados nos gráficos) menores são os valores de A_{ggr} , implicando em menores desgastes radiais do rebolo (estendendo à vida útil do rebolo e melhorando a eficiência de recursos) e qualidades finais da peça. A diferença entre os rebolos 3NQ e cBN, ambos na mesma velocidade, se deu pela desigualdade entre os diâmetros dos mesmos.

Em seguida, será apresentado o mapa acústico, derivado do sistema de EA, de modo a validar os dados de desgaste avaliados quantitativamente.

4.2.3.1 Mapa acústico

Os valores suprarreferidos de desgaste foram obtidos pelo método de impressão do perfil do rebolo, não obstante utilizou-se o método de EA como uma ferramenta de verificação dos valores. No Apêndice D a Figura 61 apresenta um exemplo de mapa acústico gerado pela EA. A Figura 61 (a) apresenta um exemplo de mapa acústico gerado e a Figura 61 (b) exhibe um zoom no mapa acústico nos últimos 4 passes da dressagem, para melhor visualização das regiões do rebolo. Tal mapa se refere a dressagem do rebolo convencional 3NQ em 80 m/s, após à retificação do material Inc.751, com Q'_w de 100 mm³/mm.min. Foram realizados 26 passes de dressagem, com 5 μ m de profundidade no raio, totalizando-se um desgaste radial de 130 μ m ($\Delta r_s = 130$

Figura 36 – Número de Dinamização versus taxa específica de remoção de material para todos os rebolos: (a) Inc. 751, (b) 21-43 e (c) Sil. 1.

Fonte: Elaborada pelo autor.

μm) para limpar a superfície do rebolo. O valor de Δr_s obtido pelo método de impressão foi de $\approx 127 \mu\text{m}$ ($\approx 2\%$ de erro), indicando uma sinergia entre os resultados.

4.2.3.2 Relação G

A Figura 37 exibe-se os valores da relação G apenas para o fim do processo (V_w igual a 12000 mm^3), para ambos os rebolos, taxas e materiais testados. Para todos os materiais e rebolos testados, observou-se uma pequena dispersão entre os valores de desgaste medidos, consequentemente baixas dispersões da relação G também foram observados.

Os valores da relação G para o Inc. 751 foram os menores quando comparados aos outros materiais, seguido do 21-43 e, por fim, o Sil.1, sendo que este último foi o que gerou maiores valores de relação G. A justificativa para isso são os maiores desgastes para os rebolos quando da retificação do Inc. 751 e menores desgastes dos rebolos gerados pela retificação do Sil. 1. Os mecanismos de desgaste dominantes são responsáveis pela diferença no comportamento do desgaste e, consequentemente, da relação G. Conforme apontado por König e Messer (1981), pode-se justificar a facilidade de retificação do Sil. 1 em relação ao tipo de estrutura presente neste material. Este material possui uma estrutura de martensita revenida, possuindo uma dureza uniforme. Diferente dos outros materiais Inc. 751 e 21-43 que possuem uma estrutura austenítica, com dureza produzida por carbeto precipitados⁵. Enquanto a estrutura uniforme, como no caso da martensítica (Sil. 1), causa principalmente desgaste abrasivo, o choque do grão abrasivo contra os carbonetos extremamente duros (Inc. 751 e 21-43) - em partes, mais duros que a alumina -

⁵ Não apenas o volume dos carbeto, mas também o tamanho e a distribuição destes exercem uma influência considerável no desgaste da ferramenta (KÖNIG; MESSER, 1981).

Figura 37 – Relação G dos rebolos versus taxa específica de remoção de material: (a) 3NQ, 45 m/s; (b) 3NQ, 80 m/s e (c) cBN.

Fonte: Elaborada pelo autor.

causa desgaste excessivo, rachaduras e até mesmo desprendimento do grão abrasivo.

De modo à corroborar esta afirmação, em relação à retificação com rebolo 3NQ, para o material Sil. 1, destaca-se que a ordem de grandeza, em média, do desgaste radial deste rebolo, com grão abrasivo Quantum®, foi de $\approx 6 \mu\text{m}$, consideravelmente menor que o tamanho do grão, $\approx 170 \mu\text{m}$. Pode-se concluir que os mecanismos de desgaste que governam o processo foram de micro fratura. Já para os materiais Inc. 751 e 21-43, os valores de desgaste radial do 3NQ foram de ≈ 130 e $93 \mu\text{m}$, respectivamente. Estes valores representam uma porcentagem considerável em relação tamanho de grão, levando-se a um outro tipo de mecanismo de desgaste, macro fratura. Adicionalmente, pela presença de grãos abrasivos inteiros, nas imagens de MEV dos cavacos (referenciadas nas Figuras 64 e 65), quando da retificação destes materiais, pode-se concluir que além da macro fratura também ocorreu outros mecanismos de desgaste, como desgaste do ligante, fratura do ligante ou perda total do grão.

Em relação à retificação com rebolo cBN, considerando-se que a ordem de grandeza, em média, do desgaste do grão abrasivo de cBN foi de $\approx 4 \mu\text{m}$, consideravelmente menor que o tamanho grão, $\approx 125 \mu\text{m}$. Pode-se concluir que o mecanismo de desgaste que governa o processo foi de micro fratura.

O aumento da velocidade de corte do rebolo 3NQ de 45 para 80 m/s, para todos os materiais e taxas testadas, resultou, em média, numa melhora da condição de corte, levando-se ao aumento da relação G (diminuição do desgaste), conforme já justificado no Subitem “Desgaste do rebolo” - Tabelas 14 e 15. Para o Inc. 751, 21-43 e Sil. 1 houve um aumento da relação G em 35; 0,1 e 49%, respectivamente. Para o 21-43, não houve uma alteração considerável, pois na menor taxa ocorreu um acréscimo de 15% da relação G (Δr_s foi de 78 para 90 μm com o aumento da velocidade).

Analisando-se a relação G do rebolo 3NQ a 45 m/s com o cBN, os valores para o Inc. 751, 21-43 e Sil. 1 foram, em média, 35; 39 e 5 vezes menores, respectivamente. Comparando-se a relação G do rebolo 3NQ com o cBN, ambos na mesma velocidade de corte (80 m/s), os valores para o Inc. 751, 21-43 e Sil. 1 ficaram, em média, 26; 39 e 3,5 vezes menor, respectivamente. Nota-se que a relação G para o rebolo cBN é maior que o 3NQ, significando elevada capacidade (devido à dureza dos grãos e características do ligante) de resistir ao desgaste. Isso resulta em uma possibilidade de remoção maior de material entre cada operação de dressagem e podendo manter o comportamento estável do rebolo por mais tempo. Acarretando-se assim, em maior produtividade e menores tempos de *setup* para dressagem. Entre os dois rebolos, destaca-se que ocorreu uma menor diferença da relação G para o material Sil. 1. Tal fato se deve ao menor desgaste do rebolo 3NQ quando comparado aos outros materiais. Para o 3NQ a 45 m/s, em todas as taxas, o Δr_s variou entre 8,0 e 9,5 μm e em 80 m/s o desgaste variou entre 5,0 e 7,0 μm ; valores bem baixos quando comparados aos outros materiais. Sendo assim, devido ao baixo desgaste ferramental, caracteriza-se o rebolo convencional 3NQ como alternativa promissora para retificação deste material.

A seguir, serão abordadas considerações sobre a força tangencial por grão, indicando de que modo os diferentes rebolos, materiais e condições afetam este item.

4.2.3.3 Força tangencial por grão

A Figura 38 apresenta os valores da relação G versus a força tangencial para um grão (F_{t1g}), para ambos os rebolos e materiais testados, exibindo uma linha de tendência exponencial para cada rebolo, sendo chamada de curva característica. A Figura 39 evidencia a função exponencial destas curvas características. Os valores de relação G e F_{t1g} apresentados nestas curvas características representam a média dos valores correspondentes ao final da operação de retificação (V_w igual a 12.000 mm³), para todas as taxas testadas. Para uma comparação entre os rebolos, os resultados para cada material foram apresentados por diferentes símbolos no gráfico e os rebolos foram diferenciados por cor.

Figura 38 – Curva característica dos rebolos em termos de relação G versus F_{t1g} para todos os materiais testados.

Figura 39 – Logaritmo da curva característica dos rebolos em termos de relação G versus F_{t1g} para todos os materiais testados.

Observa-se que os diferentes rebolos possuem comportamentos distintos, independentemente do material retificado, com superioridade para o rebolo de cBN. Devido à sua elevada capacidade (devido à dureza dos grãos superabrasivos e características do ligante vitrificado) de resistir ao desgaste. Para um mesmo valor de força por grão tomando-se como exemplo F_{t1g}

igual a 0,34 N, a relação G para o rebolo cBN foi aproximadamente 20 vezes maior quando comparada ao 3NQ.

Os resultados de F_{t1g} para o rebolo 3NQ a 45 m/s ficaram maiores quando comparados aos resultados de F_{t1g} com 80 m/s. Para o 3NQ (45 m/s), representado pela cor azul no gráfico, os valores variaram entre $0,28 \leq F_{t1g} \leq 0,68$ N, já para o 3NQ (80 m/s), representado pela cor laranja no gráfico, os valores ficaram entre $0,24 \leq F_{t1g} \leq 0,48$ N. Como esperado, as forças por grão decresceram com acréscimo da velocidade de corte (ver Tabela 15). Para o cBN, representado pela cor cinza no gráfico, as forças por grão foram menores (além de maiores valores da relação G), quando comparadas com rebolo 3NQ em ambas velocidades, entre 0,10 e 0,35 N. Tal fato é justificado pela maior capacidade de retenção do grão abrasivo para o rebolo de cBN, quando comparado ao 3NQ, sendo comprovado pela ausência de grãos abrasivos nas micrografias MEV dos cavacos (referenciado no Subitem 4.2.5 - “Morfologia dos cavacos” -, sendo as Figuras 64, 65 e 66 apresentadas no Apêndice D).

Os resultados do Inc. 751 estão localizados em uma faixa de F_{t1g} entre 0,68-0,52 e 0,48-0,39 N para a retificação com rebolo 3NQ a 45 e 80 m/s, respectivamente. Para o 21-43, estes valores ficaram em uma faixa intermediária entre 0,48-0,32 e 0,33-0,27 N, respectivamente. Os menores valores foram encontrados para o Sil.1, variando entre 0,31-0,28 e 0,29-0,24 N, respectivamente. Quando da retificação com o rebolo de cBN, a faixa de F_{t1g} para o Inc. 751, 21-43 e Sil. 1, foi de 0,34-0,25; 0,21-0,15; e 0,15-0,10 N, respectivamente. Como esperado, os maiores valores de F_{t1g} foram apresentados para o Inc. 751, seguido do 21-43 e Sil. 1, pois quanto menor a capacidade de retificação do material maior foi o valor de F_{t1g} , com uma redução da relação G. A retificação do Inc. 751, em todas as condições quando da retificação com ambos os rebolos testados, reduziram substancialmente a relação G. Adicionalmente, quando da retificação do Inc. 751 e 21-43, a redução da relação G foi pronunciada devido às forças de retificação excederem o limite de ruptura do ligante, desprendendo o grão abrasivo inteiro do rebolo, com o consequente desgaste acentuado da ferramenta, conforme pode-se comprovar por meio das análises microscópicas dos cavacos (citado no Subitem 4.2.5 - “Morfologia dos cavacos” -, sendo as Figuras 64, 65 e 66 apresentadas no Apêndice D).

De acordo com as Equações apresentadas na Figura 39 (b), observou-se que a relação G é inversamente proporcional ao F_{t1g} . Tais curvas/equações podem ser utilizadas como referências futuras para prever um valor aproximado do desgaste ou relação G, a partir dos valores de potência de corte (válida somente para estes rebolos e condições de refrigeração utilizadas).

De modo análogo, quanto maior é a F_{t1g} maior é a energia específica do processo (comparar Tabela 15 com Figura 35), induz-se maior calor na região de contato rebolo/peça e, consequentemente, aumenta-se a possibilidade de danos térmicos na superfície da peça. Adicionalmente, leva-se em consideração os menores valores de condutividade térmica para o Inc. 751 (ver Tabela 3), elevando-se a possibilidade de danos relacionados ao calor para este material. Todavia, conforme será apresentado no Subitem 4.2.8 - “Análise da superfície da

peça”, independentemente do material e rebolo utilizados não observou-se alteração na superfície das peças retificadas. Soma-se a este motivo, conforme será apresentado no Subitem 4.2.5 - “Morfologia dos cavacos”, não se observou a presença de corpos esféricos nos cavacos (indicativo de material fundido), comprovando a eficácia do fluido de refrigeração na região de contato rebolo/peça.

Além disso, tais resultados mostraram que para ambos os rebolos e Q'_w testados, o material Inc. 751 apresentou um desgaste elevado (menores valores de relação G) quando comparado aos outros materiais, evidenciando sua pior retificabilidade, em termos da diminuição da relação G. A hipótese para a pior capacidade de usinagem deste material é devido a dois fatores, segundo Silva e Oliveira (2011): presença de matriz austenítica⁶, elevando sua dureza durante a retificação, gerando assim o acréscimo da geração de temperatura e tensões na região de contato rebolo/peça; e a presença dos elementos Alumínio (Al) e Titânio (Ti) na sua composição (vide Tabela 12), elevando o desgaste da ferramenta abrasiva. A diferença na retificabilidade (em termos de relação G) dos aços 21-43 e Sil. 1 é devido a diferença das matrizes (21-43 possui matriz austenítica e o Sil. 1 matriz martensítica), pois, segundo König e Messer (1981), a presença do elemento químico Cromo (Cr), incorporados na estrutura da martensita modificam a capacidade de dissolução da austenita e dependendo da forma e composição da estrutura implica em diferenças consideráveis no comportamento da retificação. O Sil. 1 foi o material que apresentou menores valores de Cr na sua estrutura e foi considerado, comparativamente, o de menor dificuldade de retificação (menores desgastes dos rebolos e maiores Relações G) dentre os materiais analisados.

A seguir, serão apresentadas ponderações qualitativas sobre as imagens obtidas da superfície dos rebolos.

4.2.4 Superfície do rebolo

A Figura 40 apresenta imagens do rebolo de cBN antes da usinagem (após a dressagem) e pós retificação do Inc.751 na maior taxa ($Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$). Avaliou-se qualitativamente a superfície do rebolo para verificação da tendência do empastamento do mesmo para os diferentes materiais. Nota-se que não houve empastamento evidente⁷ do rebolo após a retificação do material de pior retificabilidade, constatando a eficiência pelo sistema de limpeza de alta pressão⁸ a cada 1.000 mm^3 de material removido.

As imagens da superfície do rebolo 3NQ (45 e 80 m/s) para este material apresentaram o mesmo comportamento, por isso foram aqui omitidas e apresentadas no Apêndice D (Figuras

⁶ Tal fato foi comprovado por meio da análise de metalografia do material retificado, conforme será doravante apresentado no subitem 4.2.8.2 - “Análise metalográfica” - na Figura 74.

⁷ Visualmente não se observou o fenômeno de empastamento. Todavia, a limitação de incidência de luz na região da superfície analisada, além da câmera e estereomicroscópio não possuírem alta resolução fez com que apareçam alguns pontos brancos nas imagens com zoom de 10x.

⁸ Mistura de ar comprimido (6 bar) e fluido de corte (60 bar), conforme descrito neste parágrafo 3 da Metodologia.

Figura 40 – Imagem da superfície do rebolo cBN antes e após a retificação do Inc.751 na maior taxa.

Fonte: Elaborada pelo autor.

62 e 63, respectivamente). As imagens para os demais materiais ficaram semelhantes (não apresentaram empastamento evidente), em razão disso não serão apresentadas.

Por fim, apesar da possibilidade de visualização da ausência de empastamento na superfície dos rebolos, o sistema de avaliação (câmera, estereomicroscópio e luz) apresentou incapacidade de resolução/zoom, com qualidade, para obtenção de imagens relacionadas aos mecanismos de desgaste (micro, macro do grão, desgaste/fratura do ligante e/ou perda total do abrasivo). Para tal, seriam necessários sistemas acoplados à máquina com alta resolução e ampliação, sem perder qualidade ou mesmo uma réplica da superfície do rebolo feita por meio de resinas com alta resolução; baixo coeficiente de expansão térmica; fosco ou translúcido passível de ser pigmentado; que possam reproduzir real e fielmente a superfície do rebolo, sem mascarar a granulometria, para que este possa ser avaliado externamente em um microscópio.

A seguir, serão apresentadas análises sobre os cavacos retirados do processo de retificação.

4.2.5 Morfologia dos cavacos

No Apêndice D, as Figuras 64, 65 e 66 apresentam as imagens micrográficas de MEV dos cavacos gerados pela retificação das superligas, referentes à Q'_w de 150 mm³/mm.min, quando da retificação com rebolo 3NQ (45 m/s), 3NQ (80 m/s) e cBN, respectivamente. Observa-se a configuração típica dos cavacos quando da retificação de materiais dúcteis, apresentando formato alongado e contínuo dos cavacos, algumas com formato de vírgula. Nota-se a parte frontal e posterior dos cavacos; sendo o lado da frente caracterizado por ser liso, com a possibilidade da presença de sulcos; o lado posterior exhibe dobras/lamelas, a hipótese para a causa destas lamelas é a formação de tensão de cisalhamento durante a deformação plástica da peça no corte.

Adicionalmente, observa-se a presença de grãos abrasivos inteiros, na ordem de 170 μm de tamanho, conforme apresentado no Apêndice D, nas Figuras 64 e 65, referentes à retificação dos materiais Inc. 751 e 21-43, com o rebolo convencional 3NQ em 45 e 80 m/s, respectivamente. Tal fato não foi observado nas micrografias dos cavacos para a retificação do material Sil. 1. A hipótese para a presença dos grãos inteiros é o rompimento da ligação grão/aglomerante no rebolo e, assim, seu desprendimento. Comprovando o elevado desgaste do rebolo para a retificação do Inc. 751, evidenciando a dificuldade de usinabilidade deste material. Fazendo-se uma analogia com o desgaste do rebolo 3NQ (45 e 80 m/s), estes materiais (Inc.751 e 21-43) foram os que apresentaram os maiores valores de desgaste, devido ao diferente mecanismo atuantes no processo, conforme discutido no Subitem 4.2.3 - “Desgaste dos rebolos”. Independentemente do material retificado, para o rebolo de cBN não foram observados grãos abrasivos nas micrografias, comprovando o desempenho superior do ligante deste rebolo quando comparado ao 3NQ.

Não se obteve diferença significativa na morfologia dos cavacos para os diferentes materiais nas três taxas de remoção testadas. A alteração da velocidade para o rebolo 3NQ também

não resultou em diferença aparente na estrutura do cavaco. Adicionalmente, pode-se verificar qualitativamente que a largura dos cavacos não se alterou significativamente para os diferentes rebolos. Tal fato é justificado pela pequena variação nas dimensões dos grãos entre os rebolos 3NQ e cBN (170 e 125 μm , respectivamente). Portanto, o aumento da velocidade para o rebolo 3NQ e a diferença dos tamanhos de grão entre os rebolos não gerou uma diferença significativa que pode ser visualmente identificada entre os cavacos.

Por fim, pode-se concluir pelas micrografias de MEV, que não se obteve anomalias aparentes em nenhum dos cavacos observados, como a presença de corpos esféricos nos cavacos (material fundido). Este resultado indica que o fluido de corte foi eficiente na transferência de calor, resultando em boa refrigeração na região de contato rebolo/peça.

A seguir, serão apresentadas considerações quantitativas sobre a qualidade superficial das peças, em termos de rugosidades R_a , R_t e R_z .

4.2.6 Rugosidades

A Figura 41 exibe os valores de rugosidade (R_a) para todos os rebolos, materiais e condições testadas. As curvas de R_t e R_z apresentaram comportamentos semelhantes (em escalas diferentes) às obtidas para R_a , estas foram aqui omitidas e foram apresentadas no Apêndice D (Figuras 68 e 67, respectivamente).

Como pode ser visto, o material Inc. 751, foi o que apresentou os piores valores de rugosidade, devido à sua pior capacidade de retificação, conforme já discutido anteriormente. Comparando-se as rugosidades, R_a , obtidas para o Inc. 751, o rebolo 3NQ (45 m/s) apresentou o pior desempenho e gerou peças com pior acabamento superficial, quando comparado ao rebolo 3NQ (80 m/s) e de cBN. Tal fato é devido a menor velocidade de corte, conforme visto anteriores, esta condição gera maiores espessuras equivalentes de corte (vide Tabela 14), maiores tensões são induzidas no rebolo (maiores forças de retificação - vide Tabela 15), implicando em maiores desgastes no rebolo ao longo do processo, fazendo com que a qualidade final da peça retificada fique prejudicada. Ainda em relação ao Inc. 751, apenas a retificação na menor taxa de remoção de material conseguiu ficar abaixo do limite tolerado para a sede de válvulas (0,8 μm). Já para o rebolo 3NQ (80 m/s), a única condição de retificação deste material que apresentou um valor limite acima do tolerado foi na taxa mais severa de retificação. Todos os valores de R_a encontrados para o cBN, quando da retificação deste material, ficaram abaixo do limite tolerável, evidenciando a superioridade do rebolo de cBN para retificação de materiais com piores índices de retificabilidade.

Em relação aos valores encontrados de R_a para a retificação do material 21-43, nota-se que o rebolo de 3NQ (45 m/s) gerou, às peças, todos parâmetros superiores ao limite predefinido. Do mesmo modo da retificação do Inc. 751, o rebolo 3NQ em 80 m/s gerou peças com valores acima do limite na condição mais severa de retificação. O rebolo cBN gerou peças deste material

Figura 41 – Rugosidade R_a para todos os rebolos, condições e materiais testados.

Fonte: Elaborada pelo autor.

com melhor acabamento superficial, todas dentro do limite.

No tocante ao Inc. 751 e 21-43, estes foram os materiais apresentaram os piores acabamentos superficiais, em termos de rugosidade, tal fato se deve, conforme já discutido anteriormente, principalmente à matriz austenítica, com presença das carbeto precipitados, causando desgaste excessivo, rachaduras e desprendimento do grão abrasivo. Deste modo, o impacto do desgaste do rebolo ao longo da operação de retificação é prejudicial à qualidade superficial da peça. Adicionalmente, comprova-se que a capacidade de retificação do material é proporcional à qualidade superficial da peça.

Já para o material Sil. 1, nota-se que os valores para o rebolo 3NQ (45 e 80 m/s) e cBN apresentaram pequenas diferenças significativas entre si, todas inferiores ao limite de R_a para a haste da válvula. Sendo assim, não houve um rebolo/condição que sobressaísse aos demais, tornando todas alternativas tecnologicamente viáveis. Tal fato se deve à melhor capacidade de retificação deste material, quando comparado aos outros aqui analisados. Este material possui uma matriz martensítica, o que promove um desgaste uniforme dos grãos ao longo do processo de retificação, minimizando o impacto do desgaste da ferramenta ao durante o ciclo de operação.

Para a maioria dos valores de R_a obtidas pelo rebolo de cBN, com exceção do Inc. 751 nas duas maiores taxas, houve um decréscimo da rugosidade com o acréscimo do volume de material removido. A hipótese para este efeito, deve-se ao macro efeito da dressagem e sua perda ao longo do teste, pois inicialmente o número de arestas ativas no rebolo é menor, fazendo com que cada aresta remova mais metal. Tal fato causa maiores valores da rugosidade e à medida que ocorre o aumento da remoção de material o número de arestas ativas de corte também aumenta, distribuindo-se assim o corte pelas novas, se faz uma distribuição do corte mais uniforme entre os grãos, gerando-se assim menores valores de rugosidade. Da mesma forma, este efeito também aconteceu para o rebolo 3NQ, quando da retificação do material Sil. 1. Observou-se um cenário contrário para os demais materiais, quando da retificação com o rebolo 3NQ a 45 e 80 m/s, pois houve um acréscimo da rugosidade inicial com o aumento do volume de material removido. Devido ao desgaste do rebolo ao longo do processo, conseqüentemente uma perda da ação de corte que prejudicou a qualidade superficial da peça.

Para a maioria dos casos, com exceção da retificação do Sil. 1 com o 3NQ (ambas velocidades), houve um acréscimo da rugosidade com o aumento da taxa de remoção, conforme esperado. Pois, com o aumento da taxa de remoção elevou-se também a severidade do processo de retificação (vide Tabela 16), onde maiores avanços e esforços foram requeridos (vide Tabela 15), levando a prejudicar a qualidade superficial das peças.

No Apêndice D, a Figura 69 apresenta um exemplo de perfil obtido no rugosímetro/perfilômetro, em uma das medições, após remoção de 12.000 mm^3 do material Inc. 751, na maior taxa, $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{min}.$, quando da retificação com rebolo cBN. Para este caso, os valores das rugosidades, R_a , R_t e R_z , foram 0,65; 6,40 e 4,89 μm , respectivamente.

Esperava-se que as rugosidades das peças produzidas pelo rebolo 3NQ fossem maiores quando comparadas àquelas produzidas pelo rebolo de cBN, devido à natureza tecnológica dos grãos. Os grãos abrasivos do rebolo 3NQ são maiores que o de cBN. Os grãos Quantum®, rebolo 3NQ, possuem tamanho de aproximadamente $170\text{ }\mu\text{m}$, já os grãos abrasivos de cBN possuem valores próximos de $125\text{ }\mu\text{m}$, implicando em uma maior rugosidade para as peças produzidas pelo rebolo 3NQ. Todavia, por meio de testes preliminares, ambos os rebolos foram dressados em condições de acabamento, visando-se atingir limites preestabelecidos de R_a e com o intuito de maximizar o desempenho dos mesmos.

A seguir, serão apresentadas considerações quantitativas sobre a qualidade superficial das peças, em termos de circularidades RONT, RONp e RONv.

4.2.7 Circularidades

A Figura 42 exibe os valores de circularidade (RONT) para todos os rebolos, materiais e condições testadas. Os gráficos resultantes das circularidades RONp e RONv das peças pós retificação, estas foram aqui omitidas e apresentadas no Apêndice D (Figuras 70 e 71, respectivamente).

Em relação às circularidades (RONT), todas as peças retificadas pelo rebolo de cBN apresentaram valores dentro do limite estabelecido para a sede de válvula ($R_{ONT} \leq 6\text{ }\mu\text{m}$). A maioria das peças advindas do processo de retificação com o rebolo 3NQ também obtiveram erros de circularidade dentro do limite tolerável, porém com algumas exceções. Tais resultados indicam a superioridade do rebolo de cBN, em relação ao 3NQ, em gerar peças de maior qualidade superficial, em termos de circularidade.

Observa-se que os valores das circularidades para os três materiais não foram significativamente diferentes, independente da taxa de remoção e volume de material removido. Vale-se concluir que os valores de circularidade obtidos são maiores para retificação com 3NQ a 45 m/s , quando comparados ao rebolo 3NQ a 80 m/s , com exceção da retificação do Sil. 1, na menor taxa. Tal resultado indica que o aumento da velocidade de corte é benéfico para a qualidade superficial, em termos de circularidade, resultado do menor desgaste da ferramenta em elevadas velocidades. Além disso, as circularidades obtidas nas peças pós retificação com rebolo cBN foram menores que as circularidades encontradas nas peças retificadas pelo rebolo 3NQ, na mesma velocidade de corte, resultado da maior resistência ao desgaste do cBN, corroborando a vantagem competitiva do rebolo superabrasivo em relação ao rebolo convencional.

Assim como apontado por Biffi (2003), os fenômenos relacionados à RONp, RONv e RONT não tem boa relação com as condições de retificação, mas principalmente com o sistema de fixação (qualidade do furo de centro), além das circularidades serem aleatórias e dispersas. Adicionalmente, para comprovar a existência de ovalização e erro geométrico das peças e desbalanceamento do rebolo deve se realizar uma análise harmônica da circularidade dos corpos

Figura 42 – Circularidades RONT para todos os rebolos, condições e materiais testados.

Fonte: Elaborada pelo autor.

de prova.

A Figura 43 apresenta exemplos gráficos de perfil de circularidade obtidos no circularímetro, para o Inc. 751, na maior taxa de retificação ($Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$), ao final do teste ($V_w = 12.000 \text{ mm}^3$). A Figura 43 (a) refere-se à retificação com rebolo 3NQ a 45 m/s, tendo como resultado o $\text{RONt} = 5,31 \text{ }\mu\text{m}$ ($\text{RONp} = 2,64 \text{ }\mu\text{m}$ e $\text{RONv} = 2,67 \text{ }\mu\text{m}$). A Figura 43 (b) refere à retificação com rebolo 3NQ a 80 m/s, tendo como resultado o $\text{RONt} = 3,95 \text{ }\mu\text{m}$ ($\text{RONp} = 1,45 \text{ }\mu\text{m}$ e $\text{RONv} = 2,50 \text{ }\mu\text{m}$). A Figura 43 (c) refere à retificação com rebolo cBN a 80 m/s, tendo como resultado o $\text{RONt} = 3,56 \text{ }\mu\text{m}$ ($\text{RONp} = 2,12 \text{ }\mu\text{m}$ e $\text{RONv} = 1,44 \text{ }\mu\text{m}$).

Figura 43 – Exemplos de perfis de circularidade obtidas na peça de Inc. 751, pós retificação com rebolo: (a) 3NQ (45 m/s); (b) 3NQ (80 m/s) e (c) cBN. Escala $2 \text{ }\mu\text{m}/\text{div}$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, a partir dos resultados quantitativos de qualidade superficial, em termos de rugosidades e circularidades, é possível avaliar que o rebolo cBN apresenta resultados superiores, quando comparado ao 3NQ, indiferentemente das condições e materiais testados. Pois os valores de circularidade das peças produzidas pelo superabrasivo foram, em média, menores quando comparados aos valores encontrados pós retificação com o rebolo 3NQ.

A seguir, serão apresentadas considerações qualitativas e quantitativas sobre a análise superficial das peças, em termos da topografia, metalografia e microdureza.

4.2.8 Análise da superfície da peça

Os corpos de prova foram submetidos à duas análises qualitativas (avaliação topográfica e microestrutural da peça) e uma quantitativa (microdureza), conforme serão apresentados a seguir. Por uma questão de otimização de recursos técnicos foram analisadas apenas os espécimes na maior taxa, $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$, ao final do teste, $V_w = 12.000 \text{ mm}^3$, pois esta é considerada a condição mais severa de retificação.

4.2.8.1 Análise topográfica

A Figura 44 apresenta a superfície da peça pós retificação com rebolo 3NQ a 45 m/s, na maior taxa de remoção, $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm}.\text{min}$, para todos os materiais testados. Observa-se a direção de retificação (indicados pelas setas com o número 1) pela presença dos sulcos (indicados pelas setas com o número 3) oriundos da passagem dos grãos abrasivos na superfície da peça, além da presença de zonas lisas (indicados pelas setas com o número 4), indícios da posição randômica dos grãos abrasivos do rebolo. Nota-se também, a presença de materiais aderidos (indicados pelas setas com o número 2) à superfície da peça, sendo estes derivados, provavelmente, do *plowing* durante o processo.

De modo a avaliar a qualitativamente a superfície das peças, Figura 44, conseguiu-se visualizar detalhes microscópicos das irregularidades produzidas, onde nota-se que a superfície do Inc. 751 apresenta linhas de ação de corte dos grãos mais pronunciadas, com maior volume de material aderido, resultante do *plowing* no processo.

As imagens resultantes da superfície das peças pós retificação com o rebolo 3NQ a 80 m/s e com o cBN apresentam comportamentos semelhantes à estas apresentadas pela Figura 44, estas foram aqui omitidas e foram apresentadas no Apêndice D (Figuras 72 e 73).

Por fim, pode-se concluir por meio das análises qualitativas da superfície das peças, para os diferentes materiais, que ambos os rebolos geraram peças sem a presença de trincas ou queimas (sem alterações na coloração - formação de camada branca - da peça pós retificação).

De modo a avaliar outros possíveis danos térmicos causados na superfície das peças analisou-se metalograficamente os mesmos, conforme será descrito a seguir.

4.2.8.2 Análise metalográfica

A Figura 45 apresenta a imagem metalográfica da subsuperfície e superfície da seção transversal dos materiais analisados, após a retificação com rebolo de cBN, na maior taxa de remoção. As imagens metalográficas resultantes das peças pós retificação com o rebolo 3NQ (45 e 80 m/s) apresentam comportamentos semelhantes à estas apresentadas pela Figura 45, estas foram aqui omitidas e foram apresentadas no Apêndice D (Figuras 74 e 75, respectivamente).

Os materiais Inc. 751 e 21-43 apresentam microestrutura austenítica, com presença de partículas precipitadas. O Inc. 751 possui presença de matriz γ , sendo o níquel como o principal elemento na composição da fase matriz, com presença de elementos de solução sólida, como o cromo, que fornecem endurecimento da solução sólida para a matriz, além dos precipitados de alumínio (γ' - Ni_3Al) e titânio (γ' - Ni_3Ti). No material 21-43, ocorre a presença da matriz austenítica de ferro, com presença dos elementos cromo e manganês na solução sólida. O material Sil. 1, exibe microestrutura típica de martensita revenida, com presença de matriz de ferrita α (composta basicamente de ferro) e presença de carbonetos esferoidais (composto basicamente de cromo).

Figura 44 – Superfície da peça pós retificação com rebolo 3NQ a 45 m/s e maior taxa de remoção, zoom 100 x: (a) Inc. 751, (b) 21-43 e (c) Sil.1.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que não houve alteração microestrutural da superfície retificada (ausência de camadas brancas) e inexistência de trincas. Além disso, não se observou, mesmo aumentando o *zoom* do microscópio na região da borda, a presença de deformação plástica e/ou distorção da rede cristalina causada pela ação mecânica do rebolo na região de contato rebolo/peça.

Adicionalmente, por meio de imagens microestruturais na superfície e no núcleo da amostra pode-se verificar que não ocorreu precipitação adicional de carbeto na região de retificação, acarretando, na região de contato, em geração de temperaturas inferiores às necessárias para formação de carbeto primários ou secundários na matriz, corroborando a

Figura 45 – Microestrutura das peças pós retificação com rebolo cBN, na maior taxa de remoção, zoom 100 x: (a) Inc. 751, (b) 21-43 e (c) Sil. 1.

Fonte: Elaborada pelo autor.

eficiência do sistema de refrigeração na região de contato rebolo/peça.

Os materiais Inc. 751, 21-43 e Sil.1, apresentaram tamanhos de grão entre 7-8 (32-22 μm); 8 (22 μm) e maior que 8 ($< 22 \mu\text{m}$), respectivamente.

Por fim, pode se concluir por meio das análises qualitativas da microestrutura dos materiais retificados, que as peças não exibiram evidências de danos térmicos, como queimas ou camadas brancas, corroborando a eficiência do sistema de refrigeração.

De modo avaliar quantitativamente a alteração da dureza na superfície da peça, adotou-se

o uso do procedimento de microdureza, conforme será descrito a seguir.

4.2.8.3 Microdureza

No Apêndice D, a Figura 76 apresenta os valores de microdureza Vickers para os diferentes materiais quando da retificação com rebolo 3NQ (45 e 80 m/s) e cBN - $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$. Pode-se comprovar que não houve alteração da dureza ao longo do perfil analisado, corroborando a afirmação de que não houve danos térmicos nas peças retificadas, confirmando a eficiência do sistema/fluido de refrigeração. Apesar do menor valor de condutividade térmica para o Inc. 751, consequentemente maior possibilidade de incidência de danos térmicos, em comparação com os outros materiais, não houve alteração de dureza.

O material Inc. 751 apresenta os maiores valores de dureza dentre os materiais analisados ($461 \pm 16 \text{ HV}$), seguido do 21-43 (378 ± 9) e, por último, o Sil. 1 (285 ± 16). Tal fato se deve aos precipitados na fase γ' e elevados quantidades de níquel na composição do Inc. 751, conforme já discutido anteriormente.

A seguir, serão abordados os resultados relativos aos custos do processo, para cada condição e rebolo testados.

4.2.9 Custos

Todos os resultados de relativo aos custos do processo (C_s , C_l , C_m e C_t) para ambos os rebolos estão apresentados na Figura 46 para Q'_w igual a 50, 100 e $150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$.

Para o cálculo dos custos dos rebolos/peça, C_s , utilizou-se os valores da Tabela 8, baseando-se na Equação 3.10. Pela Figura 46, nota-se que o C_s (referenciado pela cor azul no gráfico) para o rebolo convencional 3NQ (média de 45 e 80 m/s) é, em média, aproximadamente 6 vezes menor quando comparado ao superabrasivo cBN. Sendo esta a principal limitação para o uso de cBN, corroborando a afirmação de Oliveira *et al.* (2009).

Para o cálculo dos custos laborais/peça, C_l , referenciado pela cor vermelha na Figura 46, utilizou-se os valores da Tabela 9, baseando-se na Equação 3.11. Observa-se que com o aumento de Q'_w , devido ao aumento da velocidade de avanço (v_f) - Equação 3.5, obtêm-se uma diminuição do tempo do ciclo de operação, consequentemente uma diminuição de C_l . A Figura 47 indica a redução dos custos laborais/peça com o aumento de Q'_w . Para o rebolo convencional, o aumento de Q'_w 50 para $150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$ resultou em uma redução de C_l de 41%. Já para o rebolo de cBN, esta redução foi de 33%. Adicionalmente, os custos laborais/peça para o rebolo 3NQ foram, em média, 34% menores quando comparados aos do rebolo cBN. Tal fato se deve aos menores custos envolvidos com o rebolo 3NQ e a utilização de dressadores mais baratos para este tipo de rebolo.

Para o cálculo dos custos da máquina/peça, C_m , utilizou-se os valores da Tabela 10, baseando-se nas Equações 3.12 e 3.13. De acordo com a Figura 46 este parâmetro, referenciado

Figura 46 – Valor dos custos rebolos/peça, laborais/peça, máquina/peça e totais/peça: 3NQ (45 e 80 m/s) e cBN.

Fonte: Elaborada pelo autor.

pela cor verde neste gráfico, apresentou a menor parcela dos itens analisados.

Por fim, para o cálculo dos custos totais/peça, C_t , referenciado pela cor roxa na Figura 46, utilizou-se os valores da Tabela 11, baseando-se na Equação 3.14. A Figura 48 exibe os resultados apenas para os custos totais/peça. Observa-se que para o rebolo convencional, o aumento de Q'_w 50 para 150 $\text{mm}^3/\text{mm.min}$ resultou em uma redução de C_t em 37%. Já para o rebolo de cBN esta redução foi de 14%. Ainda para o cBN, observa-se um pequeno aumento (1,5%) do custo total/peça de Q'_w 100 para 150 $\text{mm}^3/\text{mm.min}$, tal fato é justificado pelo aumento considerável de desgaste que o rebolo sofreu na maior taxa. Adicionalmente, nota-se que os valores de C_t para o rebolo 3NQ foram, em média, aproximadamente 2 vezes menores quando comparados aos do rebolo cBN, evidenciando-se o alto valor agregado para a utilização dos rebolos superabrasivos.

De modo a simplificar o estudo, as análise supracitadas foram baseadas em valores médios dos parâmetros para os três materiais, todavia houve uma diferença nos valores entre os

Figura 47 – Influência de Q'_w nos custos laborais/peça.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 48 – Influência de Q'_w nos custos totais/peça.

Fonte: Elaborada pelo autor.

materiais devido aos diferentes desgastes radiais do rebolo para cada material. No Apêndice D, a Figura 77 apresenta separadamente os custos totais por peça para cada material, condição e rebolo testados.

Tomando-se os valores de R_a como critério de decisão de descarte ou não da peça, as rugosidades obtidas para o Inc. 751, para o rebolo 3NQ (45 m/s) apenas a retificação na condição menos severa gerou peças abaixo do limite tolerado para a sede de válvulas ($0,8 \mu\text{m}$). Já para o rebolo 3NQ (80 m/s) apenas as peças produzidas pela maior taxa seriam descartadas. Evidenciando-se assim a dificuldade da retificação deste tipo de superligas. As peças produzidas pelo rebolo de cBN não seria descartadas, independentemente da taxa. Portanto, para este caso, a utilização do rebolo de cBN para retificação do Inc. 751 é econômica e tecnologicamente

adequada nas três taxas. Para este caso, corrobora-se a afirmação da superioridade de desempenho do cBN apesar do alto custo envolvido.

Levando-se em consideração o material 21-43, nota-se que todas as peças geradas pelo rebolo 3NQ (45 m/s) e o rebolo 3NQ (80 m/s), na maior taxa, apresentaram valores de R_a superiores ao limite predefinido. Já rebolo cBN gerou todas as peças deste material com melhor acabamento superficial, dentro do limite. Neste caso, o rebolo cBN foi econômica e tecnologicamente viável, pois apesar do gasto superior para fabricação das peças, estas não foram descartadas pelo critério de rugosidade. Para este caso, assim como o Inc. 751, corrobora-se a afirmação da superioridade de desempenho do cBN apesar do alto custo envolvido.

Já para a retificação do Sil.1, nota-se que os valores de R_a para o rebolo 3NQ (45 e 80 m/s) e cBN apresentaram pequenas diferenças significativas, todas, ao final do processo, inferiores ao limite de R_a para a haste da válvula. Todavia, os gastos com o rebolo de cBN para retificação dos corpos de prova foram 3,5 vezes quando comparados aos gastos com o rebolo 3NQ. Sendo assim, para este caso, o rebolo de 3NQ foi tecnológica e economicamente viável quando comparado ao rebolo de cBN. Portanto, caracteriza-se o rebolo convencional 3NQ como alternativa promissora para retificação deste material.

Além disso, se fossem adicionados os critérios de circularidade como critério de decisão o rebolo de cBN possuiu superioridade, quando comparado com 3NQ. Visto que, para todos os materiais e taxas o rebolo superabrasivo gerou peças com menores erros geométricos em termos de circularidade quando comparadas às peças retificadas pelo rebolo convencional.

Por fim, vale ressaltar que essa análise econômica é particularmente importante para produção em série, em indústrias manufatureiras. Apesar desta pesquisa não ter sido realizada nesta situação foi possível avaliar a manufatura de pequenas séries, comprovando a aplicabilidade da análise. Segundo, [Kopac e Krajnik \(2006\)](#), a implementação de altas velocidades na retificação é caracterizada por um alto custo, devido à necessidade de adoção de sistemas periféricos adicionais na máquina-ferramenta que possibilitem a transformação de uma retificadora convencional trabalhar em altas velocidades, tais como mancais hidrostáticos, motores mais potentes, sistema de emissão acústica eficaz, entre outros. Todavia, este custo de implementação pode ter viabilidade compensada pelo maior potencial de desempenho da retificação, em termos de maior relação G (menor desgaste) da ferramenta, consequentemente, maior vida do rebolo e menor necessidade de dressagem (menor tempo de *setup* implica em produtividade). Além de melhor qualidade superficial (rugosidades e circularidades) da peça, conforme os resultados demonstrados aqui empiricamente.

De modo a avaliar sustentavelmente a integridade superficial da peça e da taxa de remoção de material para diferentes recursos de entrada, elaborou-se alguns indicadores de sustentabilidade em todas as suas dimensões, conforme será apresentado a seguir. A introdução destas ferramentas permitiu uma análise mais ampla da eficiência do processo, relacionando parâmetros de qualidade do produto e do processo, construindo indicadores que facilitam a

tomada de decisão de qual rebolo utilizar durante a retificação de superligas.

4.3 Indicadores de sustentabilidade

Avaliou-se aspectos de comportamento econômico, ambiental e social. Neste caso, atribuiu-se pesos iguais para os três pilares calculados.

4.3.1 Indicador econômico

Baseando-se na variação das rugosidades (laminado-retificado) das peças e nos valores do custo total por peça⁹, C_l , (Equações 3.15 e 3.16), calculou-se os Indicadores Econômicos, η_s . É possível verificar pela Figura 78, Apêndice D, que a maior redução da rugosidade na peça por custo unitário de peça [R\$] foi alcançada com o rebolo 3NQ a 80 m/s, para todos os materiais. Para os materiais Inc. 751 e 21-43, a melhor vantagem competitiva neste indicador econômico foi alcançada, em média, na condição de $Q'_w = 100 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$ (valores próximos à condição mais severa). Já para o Sil. 1, a condição com maior vantagem econômica foi dada na maior taxa de remoção, $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$.

No Apêndice D, a Figura 79 apresenta a eficiência da taxa de remoção de material para diferentes recursos de entrada (rebolos, materiais e taxas). Observa-se que a maior taxa de remoção de material (Q_w) por custo unitário [R\$] é obtida na condição $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$, com vantagem para o rebolo 3NQ (valores próximos para as duas velocidades de corte testadas).

A tomada de decisão quanto à adoção do tipo de rebolo pode ser realizada, considerando-se os indicadores calculados, com vantagem economicamente competitiva para o rebolo 3NQ (80 m/s).

4.3.2 Indicador energético

A Tabela 18 apresenta os valores de energia [kJ] de retificação para as diferentes condições testadas. Em média, os maiores valores de energia foram dados para o rebolo 3NQ (80 m/s), sendo o gasto energético 18% a mais que o cBN (devido à diferença de massa entre os rebolos) e 50% a mais que em 45 m/s.

Baseando-se na variação das rugosidades (laminado-retificado) das peças e nos valores de E (Equações 3.18 e 3.19), calculou-se os Indicadores Energéticos, η_E . No Apêndice D, a Figura 80 apresenta o impacto da adoção de diferentes combinações entre rebolo, materiais e taxa específicas de remoção de material; nos recursos de entrada do processo, considerando-se o consumo energético. Para os materiais Inc. 751 e 21-43, o cBN apresentou uma superioridade ao rebolo 3NQ (ambas velocidades), com vantagem para a condição de $Q'_w = 100 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$.

⁹ Para uma representação mais fidedigna utilizou-se os valores de C_l separadamente para cada material, rebolo e condição testada.

Tabela 18 – Energia de retificação [kJ] para os diferentes materiais, taxas e rebolos testados.

Rebolo	Q'_w [mm ³ /mm.min]	Materiais		
		Inc.751	21-43	Sil.1
3NQ (45 m/s)	50	1275,65	949,15	620,75
	100	756,45	567,25	480,95
	150	623,55	466,9	472,4
3NQ (80 m/s)	50	1834,85	1325,1	1391,25
	100	1019,8	765	840,3
	150	823,9	700,5	643
cBN	50	1303,85	1094,15	763,7
	100	968,15	913,05	483,25
	150	916,45	907,8	559,45

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível verificar que a maior redução de rugosidade na peça ao final do processo por kJ de energia gasta na retificação foi obtida para o material Sil. 1, quando da retificação com rebolo 3NQ (45 m/s) - $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$.

De modo análogo à análise anterior, o indicador de processo leva em consideração a taxa de remoção (Q'_w em mm³/mm.min), conforme Equação 3.20. No Apêndice D, a Figura 81 apresenta a eficiência da taxa de remoção de material para diferentes recursos de entrada (rebolos, materiais e taxas). Observa-se que a maior taxa de remoção de material (Q_w) por unidade de energia gasta [kJ] é obtida na condição $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$, com vantagem energética para o rebolo 3NQ a 45 m/s.

A tomada de decisão quanto à adoção do tipo de rebolo pode ser realizada, considerando-se os indicadores calculados, com vantagem energeticamente competitiva para o cBN, quando da retificação do Inc. 751 e 21-43. Já para o material Sil. 1, o rebolo 3NQ (45 m/s) sobressaiu às demais condições.

4.3.3 Indicador social

A variação dos níveis de ruído laboral da máquina foi de 8 dBA, valor constante para ambos os rebolos e materiais testados. Baseando-se na variação das rugosidades (laminado-retificado) das peças e na variação dos níveis de ruído laboral (Equações 3.21 e 3.22), calculou-se os Indicadores Sociais, η_{dBA} . No Apêndice D, a Figura 80 apresenta o impacto da adoção de diferentes combinações entre rebolo, materiais e taxa específicas de remoção de material; nos recursos de entrada do processo, considerando-se a variação dos níveis de ruído ocupacional. Para os materiais Inc. 751 e 21-43, a melhor vantagem competitiva neste indicador para o rebolo de cBN, sendo alcançada na condição de $Q'_w = 50 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$. Já para o Sil. 1, a condição com maior vantagem foi dada para o rebolo 3NQ (80 m/s), nesta mesma taxa de remoção.

No Apêndice D, a Figura 83 apresenta a eficiência da taxa de remoção de material para

diferentes recursos de entrada (rebolos, materiais e taxas). Observa-se que a maior taxa de remoção de material (Q_w) por ruído [dBA] é obtida na condição $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$, sem diferença entre os rebolos analisados.

No tocante aos Indicadores Sociais (η_{dBA}), considerando-se que não houve diferença de ruído nas condições testadas, os respectivos indicadores são influenciados apenas pela variação de rugosidade da peça. Vale ressaltar que os níveis de ruído do processo foram menores que 70 dBA, abaixo dos limites de exposição permissíveis, 85 dBA (8-horas), conforme [Madison \(2007\)](#). Tal fato comprova que os níveis de ruído ocupacional não prejudicam, ao longo do tempo, a audição do operador.

A seguir, serão abordadas algumas considerações sobre uma estratégia de avaliação do desempenho do rebolo com base nas avaliações tradicionais de projeto e indicadores de sustentabilidade (econômicos, ambientais e sociais).

4.3.4 Estratégia combinada para avaliação do rebolo

Foi proposto uma estratégia de avaliação do desempenho de rebolos cuja metodologia de análise combinada que englobe, de forma coordenada, parâmetros tradicionais de avaliação (rugosidades, imagem da peça/rebolo, circularidade, cavacos, potência, força e energia específica de retificação) e critérios de sustentabilidade (econômicos, ambientais e sociais). Foi adicionado à curva característica do rebolo a análise conjunta dos parâmetros para pontos extremos¹⁰ do gráfico (conforme apresentado na Figura 49) e, em conjunto, avaliou-se os indicadores sustentáveis do processo, conforme já discutido no item 4.3.

As análises a seguir foram centradas na comparação de desempenho entre os materiais de pior e melhor retificabilidade, Inc. 751 e Sil. 1, respectivamente. Os pontos marcados com os símbolos († e #) na Figura 49 representam a comparação entre os materiais, ambos para a condição de maior taxa de remoção, $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$, quando da retificação com o rebolo 3NQ e cBN, respectivamente, ambos a 80 m/s. Para os diferentes rebolos, nota-se que o material Inc. 751 apresentou uma força tangencial por grão maior e uma menor relação G, quando comparado ao Sil. 1.

A rugosidade (R_a) ao final do processo ($V_w = 12,000 \text{ mm}^3$) quando da retificação com o rebolo 3NQ, do Inc. 751 e do Sil. 1 foi, respectivamente, de 0,88 e 0,30 μm . Já para o cBN, estes valores foram de 0,68 e 0,37 μm , respectivamente, para o Inc. 751 e o Sil. 1. A diferença da capacidade de retificação desses materiais é comprovado com a pior qualidade superficial para o Inc. 751 (conforme apresentado qualitativamente na Figura 84, Apêndice D, onde nota-se que a superfície do Inc.751 apresenta linhas de ação de corte dos grãos mais pronunciadas, com maior volume de material aderido, resultante do *plowing* no processo; e no perfil de rugosidades das peças, conforme Figura 85, Apêndice D). Uma maior força tangencial por grão para remoção

¹⁰ Os pontos com os símbolos, † e #, correspondem à maior taxa de remoção, $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$, sendo denominados de pontos extremos.

Figura 49 – Pontos extremos evidenciados na curva característica dos rebolos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

do Inc. 751, resultou num maior desgaste de ambos os rebolos (diminuição da relação G) - vide Figura 49 -, acarretando em uma perda da capacidade do corte, macrodesgaste (redução significativa da relação G) e consequentemente, piora da qualidade superficial da peça ao final do processo.

Para o rebolo 3NQ, os valores de circularidade ($RONt$) para o Inc. 751 e o Sil. 1 foram de 5,00 e 4,57 μm , respectivamente. Já para o rebolo de cBN, estes valores foram de 3,41 e 1,72 μm , conforme Figura 50. Para uma mesma taxa de remoção de material, a circularidade obtida é pior para o Inc.751 quando comparado ao Sil. 1. Corroborando-se assim, a afirmação de que o Inc. 751, por possuir uma pior retificabilidade que o Sil. 1, gera peças com pior acabamento superficial. O rebolo de cBN gerou peças com menores valores de circularidades quando comparado às peças retificadas com o rebolo 3NQ.

A partir dos resultados de rugosidade de circularidade, pode-se inferir que a diferença da capacidade de retificação desses materiais é evidenciado com a piora na qualidade superficial, em termos de R_a e $RONt$, com o aumento da força tangencial por grão e o desgaste da ferramenta. Tal fato já foi abordado anteriormente.

Adicionalmente, avaliou-se, comparativamente, os cavacos gerados nesses pontos. A Figura 51 apresenta as imagens de MEV para o Inc. 751 e Sil. 1, pós retificação com rebolo 3NQ e cBN. Em relação aos cavacos gerados pelo rebolo de 3NQ, para o Inc.751, observa-se a presença de grãos abrasivos inteiros, na ordem de 170 μm de tamanho. Tal fato não foi observado nas micrografias dos cavacos para a retificação do material Sil. 1. A hipótese para a presença dos grãos inteiros se deve aos mecanismos de desgaste presentes no processo, como desgaste e/ou fratura do ligante e/ou perda total dos grãos (*pollout*) - conforme já discutido no item

Figura 50 – Gráficos polares dos desvios de circularidade das peças produzidas pelos rebolos 3NQ e cBN (80 m/s).

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.3. Comprovando o elevado desgaste do rebolo para a retificação do Inc.751, evidenciando a dificuldade de usinabilidade deste material. Já para rebolo de cBN, não se observa a presença de grãos abrasivos, como apresentado para o rebolo 3NQ quando da retificação do material Inc.751. Tal resultado indica a maior capacidade de retenção do grão pelo ligante para o rebolo de cBN quando comparado ao 3NQ.

A Figura 52 apresenta imagens do rebolo 3NQ e de cBN, antes da usinagem (após a dressagem) e pós retificação do Inc.751 na maior taxa ($Q'w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$), com o objetivo de detectar possível empastamento do rebolo durante a retificação do Inc.751. Nota-se que não ocorreu indicativos da presença de empastamento evidente do rebolo após a retificação, constatando a eficiência pelo sistema de limpeza de alta pressão a cada $1,000 \text{ mm}^3$ de material removido. As imagens obtidas para o rebolo quando da retificação do Sil.1, não apresentaram empastamento, por isso foram aqui omitidas.

Em relação à potência líquida média de corte (P_{net}), forças tangenciais (F_t) e energia específica (u) destes pontos, destaca-se que estes valores, indiferentemente do rebolo utilizado, para o Inc.751 foram superiores ao Sil. 1. Para o 3NQ, a P_{net} do Inc. 751 foi de 2.363 W, já para o Sil. 1 foi de 1.504 W (variação de 36% entre os materiais), demonstrando que a P_{net} é proporcional à dureza do corpo de prova (vide Figura 76). O mesmo é válido para as F_t , 29,5 e 18,8 N, para o Inc. 751 e Sil. 1, respectivamente. No tocante aos valores de u para estes materiais, foram de 63,0 e 40,1 J/mm^3 , respectivamente. Pelo maior gasto energético para retificar o

Figura 51 – Micrografia dos cavacos gerados pós retificação com os rebolos 3NQ e cBN (80 m/s).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 52 – Superfície dos rebolos 3NQ (esquerda) e cBN (direita), ambos a 80 m/s (zoom 10x).

(1) Parte usada do rebole: depois da retificação, $Q'w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm}.\text{min}$. (2) Parte não usada do rebole (referência): antes da retificação (depois da dressagem).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Inc.751, comprova-se sua dificuldade de retificação. Já em relação ao rebole de cBN, os valores de P_{net} do Inc. 751 e Sil. 1, foram, respectivamente, de 2.547 ($F_t=31,8 \text{ N}$) e 1.298 W ($F_t=16,2 \text{ N}$), respectivamente, representando uma variação de 49% entre as superligas. Os valores de u da retificação destes materiais foram de 67,9 e 34,6 J/mm³, respectivamente.

A seguir, serão abordadas algumas considerações finais sobre a avaliação do desempenho dos rebolos, levando-se em consideração a análise normalizada dos parâmetros de projeto e sustentabilidade quando da retificação das superligas.

4.3.5 Considerações finais

Por fim, de modo a permitir uma comparação direta dos resultados para as condições aqui comparadas, os mesmos foram normalizados de acordo com a Equação 3.24.

Analisou-se os seguintes fatores: potência de retificação; indicador energético; energia específica; rugosidade média; custo total por peça; indicador econômico e circularidade total, para o rebolo 3NQ (45 e 80 m/s) e de cBN, três materiais e taxas testadas. Todos estes fatores analisados foram normalizados e os parâmetros¹¹ estão apresentados no Apêndice D, nas Tabelas 23, 24 e 25, para $Q'_w = 50, 100$ e $150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$, respectivamente.

Visando fornecer uma avaliação qualitativa geral do desempenho dos rebolos, os resultados normalizados para as diferentes condições e materiais analisados foram plotados na Figura 53.

O rebolo 3NQ apresentou desempenho superior quando leva-se em consideração os custos por peça e indicador econômico. Já para rebolo de cBN, este apresentou melhor desempenho em relação à circularidade e indicador energético.

Levando-se em consideração todos os critérios normalizados, independentemente do material, na menor taxa, o rebolo de cBN apresentou um desempenho total superior ao rebolo 3NQ, devido à maior área interna do polígono. Já para as outras taxas, o rebolo 3NQ apontou um desempenho total superior ao de cBN. Para o material Sil. 1, destaca-se que o rebolo 3NQ, na menor velocidade de corte, para as duas maiores taxas, foi superior ao rebolo 3NQ (80 m/s) e ao cBN. Tal fato se deve principalmente aos menores gastos energéticos durante a operação e aos fatores relacionados à este critério. Já para os demais materiais, nestas taxas, o rebolo 3NQ (80 m/s) foi superior às demais condições.

Baseando-se na Equação 3.25, elaborou-se quantitativamente o Índice de Desempenho Global dos Rebolos (IDGR). Os resultados do IDGR estão apresentados na Tabela 19 para todos materiais e taxas testadas. Os números em negrito representam o rebolo com maior desempenho.

Tabela 19 – Índice de Desempenho Global dos Rebolos (IDGR) para todas as condições analisadas.

Q'_w [mm ³ / mm.min]	Inc. 751			21-43			Sil. 1		
	3NQ [45 m/s]	3NQ [80 m/s]	cBN	3NQ [45 m/s]	3NQ [80 m/s]	cBN	3NQ [45 m/s]	3NQ [80 m/s]	cBN
50	6,99	7,04	7,66	6,28	3NQ	8,45	6,96	7,21	7,65
100	7,34	7,35	6,96	6,89	7,80	7,48	8,52	7,16	6,40
150	7,86	8,10	6,25	7,53	7,88	6,57	8,57	7,63	6,01

Por fim, analisando-se todos os critérios normalizados em conjunto, observa-se que o rebolo 3NQ (80 m/s), em média, exibiu um desempenho total superior em relação as outras condições analisadas, uma vez que seu correspondente polígono apresentou maior área interna,

¹¹ Referentes aos valores para o final do processo, $V_w = 12.000 \text{ mm}^3$.

Figura 53 – Análise do desempenho dos rebolos para as diferentes taxas e materiais testados.

Fonte: Elaborada pelo autor.

comprovando-se, para este estudo, a aplicabilidade do rebolo convencional em substituição aos rebolos de cBN vitrificados para a retificação de superligas.

A seguir, são apresentadas as conclusões sobre este estudo, propostas para continuação e produção bibliográfica.

CONCLUSÕES

Por fim, este capítulo apresenta as conclusões delineadas deste trabalho de pesquisa, propostas para trabalhos futuros e produção bibliográfica até o momento, respectivamente.

5.1 Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo geral a avaliação da aplicabilidade para retificação de superligas quando da utilização de um rebolo convencional de alto desempenho em relação ao de cBN. Este objetivo foi então subdividido em objetivos específicos e suas conclusões serão apresentadas a seguir.

Inicialmente, avaliou-se os indicadores bibliométricos.

- Ao todo foram publicados 177 artigos, em periódicos com fator de impacto maior que 1, no período de 1980-2017, envolvendo 427 autores de 35 países;
- Mais de 65% dos artigos foram publicados nos últimos 10 anos, evidenciando a ascensão na temática;
- Sobre a análise dos periódicos destacam-se o *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, *CIRP Annals – Manuf. Technol.*, *Int. J. Mach. Tools and Manuf.* e *J. Mater. Proces. Technol.* como os mais prolíficos;
- Em relação aos países de origem das publicações, tem-se: China, Estados Unidos, Reino Unido, Alemanha e Japão nas cinco primeiras colocações. O Brasil encontra-se com baixa participação nas pesquisas relacionadas ao tema; e
- Sobre os autores mais produtivos, em termos de número de publicações, destacam-se os chineses: Ding, W. F. (17 artigos), Xu, J. H. (16 artigos) e Fu, Y. C. (14 artigos). Quanto ao número de citações recebidas os principais autores são: Ezugwo E. O. (1028 citações),

Komanduri, R. (507 citações) e Jawahir, I. S. (469 citações). Adicionalmente, destaca-se a participação de pesquisadores/professores provenientes de universidades.

Em seguida, analisou-se os indicadores de desempenho.

- O gasto energético para o rebolo de cBN foi menor quando comparado ao 3NQ, auxiliando na tomada de decisão da escolha do rebolo se levar em consideração termos sustentáveis (ambientais) de manufatura.
- O rebolo 3NQ (80 m/s) gerou os maiores valores de energia de retificação, onde aumento da velocidade de corte no rebolo 3NQ implicou em um acréscimo da energia durante a operação de retificação.
- A diferença na composição química, microestrutura e propriedade mecânica entre os materiais impacta diretamente na capacidade de retificação dos mesmos, onde o material Inc.751 apresentou piores índices de usinabilidade, seguido 21-43 e, por fim, com melhores capacidade de retificação, o Si.1.
- Os materiais Inc.751 e 21-43, apresentam estrutura austenítica, com dureza produzida por carbeto precipitados, impactando nos seguintes mecanismos de desgaste dominantes no rebolo convencional 3NQ: macro fratura (desgaste excessivo), desgaste ou fratura do ligante e/ou perda total dos grãos, elevando o desgaste do rebolo durante o ciclo de operação e, conseqüentemente, menor relação G quando comparado ao Si.1. Já o material Si.1, que possui uma estrutura de martensita revenida, com dureza uniforme, gera desgaste abrasivo (micro fratura) como principal mecanismo de desgaste, diminuindo o desgaste do rebolo ao longo do processo e, gerando assim, maior relação G .
- Para o cBN, o mecanismo de desgaste que governa o processo foi de micro fratura.
- O aumento da velocidade de corte do rebolo 3NQ de 45 para 80 m/s, para todos os materiais e taxas testadas, resultou, em média, numa melhora da condição de corte, devido à diminuição da espessura de corte equivalente (equivalente à espessura do cavaco) e menores força por grão (menores tensões mecânicas), levando-se ao aumento da relação G (diminuição do desgaste) e maior qualidade superficial.
- A relação G para o rebolo de cBN é maior quando comparada ao rebolo 3NQ. Devido à sua elevada capacidade (devido à dureza dos grãos e características do ligante - indicativo da maior habilidade de retenção dos grãos) de resistir ao desgaste.
- A utilização da curva característica (relação G versus F_{t1g}) pode ser utilizada em trabalhos futuros para prever o comportamento destes rebolos quando da retificação de outros materiais e condições não testadas, sabendo-se apenas da força por grão.

- Após a retificação, não houve empastamento evidente do rebolo, constatando a eficiência do sistema de limpeza de alta pressão.
- Não se observou a presença de corpos esféricos nos cavacos (indicativo de material fundido), comprovando a eficácia do fluido de refrigeração na região de contato rebolo/peça.
- Em termos de rugosidade, para os materiais Inc. 751 e Sil.1, o rebolo de cBN possui um desempenho superior, quando comparado ao 3NQ, pois manufacturei peças com maior qualidade superficial. Todavia, para o material Sil. 1, o rebolo 3NQ foi uma alternativa tecnologicamente viável.
- Em termos de circularidade, o rebolo de cBN possui um desempenho superior, quando comparado ao 3NQ, pois fabricou peças com maior qualidade superficial.
- Por meio das análises da topografia das peças (microscópio e visuais), microestrutura e microdureza Vickers, permitem concluir que a retificação, independentemente do material, não induziu danos térmicos nas superfícies retificadas, pois não foram observadas queimas, formação de camada branca, alteração da dureza ao longo do perfil da subsuperfície ou trincas nas superfícies retificadas em nenhum dos ensaios realizados. Sendo assim, pode-se concluir que o sistema de refrigeração foi eficiente.
- O valor do custo total por peça para o rebolo 3NQ foi, em média, aproximadamente 2 vezes menor quando comparado ao do custo total/peça do rebolo cBN, evidenciando-se o alto valor agregado para a utilização dos rebolos superabrasivos. Sendo esta a principal limitação para o uso deste tipo de rebolo. Todavia, este custo pode ter viabilidade compensada pelo maior potencial de desempenho da retificação, em termos de maior relação G (menor desgaste) da ferramenta, consequentemente, maior vida útil do rebolo e menor necessidade de dressagem (menor tempo de setup implica em produtividade). Além de melhor qualidade superficial (rugosidades e circularidades) final das peças produzidas pelo rebolo de cBN.

Posteriormente, concluiu-se sobre os indicadores de sustentabilidade.

- A avaliação de indicadores de sustentabilidade proporcionou uma ampla análise da eficiência do processo, relacionando parâmetros de produção e de qualidade do produto retificado frente aos recursos de entrada do processo, facilitando na tomada de decisão quanto ao desempenho do rebolo e/ou condição ideal.
- Em relação à eficiência da integridade superficial em termos de sustentabilidade, pode-se concluir que o rebolo convencional 3NQ é uma alternativa viável econômica e tecnologicamente, comparado ao cBN. Já em termos energéticos, o cBN é uma alternativa ambientalmente vantajosa. Em termos sociais, níveis de ruído laboral, não houve diferença entre os rebolos.

Por fim, a análise coordenada que engloba além dos parâmetros tradicionais os critérios de sustentabilidade (econômica, ambiental e social) é viável e mostrou-se eficaz, permitindo uma melhor tomada de decisão quanto ao desempenho do rebolo.

Levando-se em consideração todos os parâmetros e indicadores normalizados, em média, o rebolo 3NQ apresentou um desempenho total superior em relação ao rebolo de cBN, comprovando-se, para este caso, a hipótese de aplicabilidade do rebolo convencional em substituição ao rebolo de cBN vitrificado para a retificação de superligas.

5.2 Limitações e propostas de continuidade

Baseando-se nas dificuldades operacionais e possibilidades de melhoria da metodologia utilizada, propôs-se os seguintes itens.

- Na análise bibliométrica, não foi possível apresentar as interações por mapas bibliométricos, representando visual e dinamicamente as redes de ligações/relações entre os periódicos, países e autores. Tal fato é justificado pela utilização das bases de dados em conjunto, levando à impossibilidade de gerar os mapas pelos *softwares* bibliométricos. Sendo assim, para trabalhos futuros, recomenda-se utilizar apenas uma base de dados e, conseqüentemente, analisar as inter-relações entre os mesmos.
- Realizar análise química nas peças após a operação de retificação em uma técnica robusta¹, com o intuito de verificar se as concentrações dos elementos químicos se mantiveram ou foram alteradas por meio de reações físico-químicas entre peça/rebolo induzidas pela temperatura. Além da possibilidade da validação quantitativa da hipótese de queima ou não da peça.
- Verificar a topografia do rebolo, podendo ser desenvolvida de três modos:
 1. Aplicar uma resina que consiga replicar real e fielmente a superfície do mesmo, possuindo propriedades como alta resolução, baixo coeficiente de expansão térmico, colorido ou passível de ser pigmentado. Como no caso da resina Microset 101 RT.
 2. Examinar a superfície do rebolo, *in-loco*, por meio de um sistema adequado entre câmera/estereomicroscópio/luz, com alta resolução e qualidade. Sendo assim, possível verificar os mecanismos de desgaste predominantes por meio das imagens do mesmo.
 3. Desenvolver e projetar um rebolo que possibilite acoplar e retirar segmentos do mesmo de forma fácil, para a visualização de sua topografia em um microscópio adequado.

¹ Com a possibilidade de quantificar o elemento Oxigênio na amostra, por exemplo.

- Elaborar um sistema de tratamento de imagens via software (LabVIEW ou MATLAB®) que consiga avaliar quantitativamente, após tratamentos/correções das mesmas, a porcentagem aproximada de material aderido pós retificação.
- Desenvolver e projetar um sistema para avaliação da agressividade dos rebolos para retíficas do tipo cilíndrica externa que não inviabilize processos futuros, utilizando o mesmo reboło.
- Analisar o processo da retificação de superligas, utilizando a metodologia aqui apresentada para outros tipos rebolos e, obtendo assim, uma maior gama de comparação entre diferentes conjuntos.
- Para auxiliar na tomada de decisão quanto ao reboło a ser utilizado, pode-se atribuir pesos para construção dos parâmetros normalizados e realizar uma análise ponderada do desempenho do reboło, levando-se em consideração fatores de prioridade de projetos predeterminados ou critérios de sustentabilidade.
- Estudar teórica e computacionalmente o comportamento térmico das superligas durante o processo de retificação.
- Investigar o processo de retificação de superligas, empregando-se diferentes técnicas de lubrificação, tais como Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) e criogenia.
- Examinar a retificabilidade de outras superligas, tais como da família do Incoloy, Nimonic, Waspaloy, Rene', entre outras.

5.3 Produção bibliográfica

Até o momento, esta dissertação e trabalhos relacionados realizados durante este período possibilitaram a publicação de quatro artigos científicos, sendo eles:

1. SOUZA, A. M. e SILVA, E. J. Retificação de Superligas com Rebolos de Alto Rendimento: Avaliação do Desempenho. XX Colóquio de Usinagem. Uberlândia, 2016.

Publicação de um artigo no XX Colóquio de Usinagem, evento promovido pelo Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), nos dias 16 a 18 de novembro de 2016. Intitulado de “Retificação de Superligas com Rebolos de Alto Rendimento: Avaliação do Desempenho”, com o objetivo de apresentar e discutir o plano de trabalho relacionado a esta dissertação.
2. SOUZA, A. M. e SILVA, E. J. Retificação de superligas: uma análise bibliométrica. 2º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (SiPGEM). São Carlos, 2017.

Publicação de um artigo no 2º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (SiPGEM), evento promovido pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, nos dias 4 e 5 de setembro de 2017, São Carlos/SP. Intitulado de “Retificação de superligas: uma análise bibliométrica”, com o intuito de apresentar a metodologia utilizada para análise da produção científica e citações da área de retificação de superligas, tal ferramenta foi utilizada no capítulo de Revisão da Literatura desta dissertação.

3. MARTINS, P. E. T. et al. An MTConnect-Based Monitoring System for CNC machines. XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2017). Porto Alegre, 2017.

Publicação de um artigo no XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2017), realizado de 01 a 04 de outubro de 2017, em Porto Alegre/RS. Artigo intitulado de “An MTConnect-Based Monitoring System for CNC machines”, com o objetivo de apresentar um estudo desenvolvido no Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS) que visou o desenvolvimento de um sistema de monitoramento on-line para as máquinas CNCs situadas no laboratório, inclusive a retífica Zema G-800-HS utilizada nos estudos para esta pesquisa.

4. KANEKO, P. M. et al. Development of a wrist-hand orthosis for children with neurological and motor disabilities: conceptual design and mock-up. 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering. Curitiba, 2017.

Publicação de um artigo no 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, realizado de 03 a 08 de dezembro de 2017, em Curitiba/PR. Artigo intitulado de “Development of a wrist-hand orthosis for children with neurological and motor disabilities: conceptual design and mock-up”, com o objetivo de apresentar o desenvolvimento de um modelo de órtese de punho e mão para o auxílio de atividades diárias de crianças com paralisia cerebral. Tal artigo foi desenvolvido durante a disciplina de Metodologia de Projeto em Engenharia em que o aluno, Adriel Magalhães, cursou.

Foi submetido ao Journal of Materials Processing Technology² um artigo intitulado “Global strategy of grinding wheel performance evaluation applied to grinding of superalloys”. O artigo encontra-se em fase de revisão e abordou a estratégia de avaliação do desempenho de rebolos, cuja metodologia de análise englobou, de forma coordenada, parâmetros tradicionais, adicionados à curva característica do rebole, e critérios de sustentabilidade, quando da retificação das superligas aqui analisadas.

² Tal revista possui um Fator de Impacto (2017) de 3,647 © Clarivate Analytics Journal Citation Reports 2018.

REFERÊNCIAS

AFONSO, G. A.; FILLETI, R. A. P.; SILVA, E. J. Strategy for mapping power consumption in grinding. International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), v. 22, nov. 2013. Citado na página 50.

AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY. 2017. Disponível em: <<http://www.afit.edu.ng/provost.php#>>. Citado na página 121.

AKADEMIKA. 2017. Disponível em: <<http://www.akademika.no:8080/manufacturing-technology-transfer/tom-childs/yamane-yasuo/9781466567634>>. Citado na página 121.

ALLWOOD, J. M.; CHILDS, T. H. C.; CLARE, A. T.; SILVA, A. K. M. de; DHOKIA, V.; HUTCHINGS, I. M.; LEACH, R. K.; AYALA, D. R. L.; LOWTH, S.; MAJESKI, C. E.; MARZANO, A.; MEHNEN, J.; NASSEHI, A.; OZTURK, E.; RAFFLES, M. H.; ROY, R.; SHYHAM, I.; TURNER, S. Manufacturing at double the speed. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 229, p. 729–757, mar. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013615301801>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2546 - 07: Standard Practice for Instrumented Indentation Testing**. 2007. Citado na página 56.

_____. **ASTM E384 - 11: Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials**. 2011. Citado na página 56.

_____. **ASTM E112 - 13: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**. 2013. Citado na página 56.

_____. **ASTM E407 - 07: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys**. 2015. Citado na página 56.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **In Memoriam: Ranga Komanduri**. 2012. Disponível em: <<http://manufacturing-science.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1460872>>. Citado na página 121.

ARAUJO, J. B. **Desenvolvimento de método de avaliação de desempenho de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade**. Tese (phdthesis) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. 176 f. Citado na página 63.

AURICH, J. C.; CARRELLA, M.; STEFFES, M. Evaluation of abrasives process and machines with respect to energy efficiency. **Proceedings of the 19 CIRP Conference on Life Cycle Engineering**, 2012. Citado na página 38.

AURICH, J. C.; LINKE, B.; HAUSCHILD, M.; CARRELLA, M.; KIRSCH, B. Sustainability of abrasive processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 62, n. 2, p. 653–672, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785061300200X>>. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 38 e 40.

- BADGER, J. A. Practical application of aggressiveness and chip thickness in grinding. **Annals of the CIRP 3rd International Conference High Performance Cutting (HPC)**, p. 599–606, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 73 e 74.
- BALAN, A. S. S.; VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R.; KUPPAN, P.; OYYARAVELU, R. An experimental assessment on the performance of different lubrication techniques in grinding of inconel 751. **Journal of Advanced Research**, v. 7, p. 709–718, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123216300558>>. Citado na página 36.
- BARCZAK, L. M.; BATAKO, A. D. L.; MORGAN, M. N. A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (mql) conditions. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 50, p. 977–985, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695510001392>>. Citado na página 35.
- BIANCHI, E. A. **Ação de geometria teórica do cavaco no desgaste de rebolos de CBN com ligante resinóide**. Tese (phdthesis) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992. Citado na página 52.
- BIFFI, M. **Desenvolvimento do processo de retificação com alta velocidade em sede de válvulas de motores á combustão interna usando rebolo de CBN vitrificado**. Dissertação (mathesis) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Citado na página 86.
- BLASER SWISSLUBE. **Ficha de informações de segurança de produto químico Vasco 7000**. 2016. Citado na página 45.
- BRINKSMEIER, E.; AURICH, J. C.; GOVEKAR, E.; HEINZEL, C.; HOFFMEISTER, H. W.; KLOCKE, F.; PETERS, J.; RENTSCH, R.; STEPHENSON, D. J.; ULMANN, E.; WEINERT, K.; WITTMANN, M. Advances in modeling and simulation of grinding processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 55, n. 2, p. 667–696, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1660277306000041>>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 26.
- CEARSOLO, X.; CABANES, I.; SANCHEZ, J. A.; POMBO, I.; PORTILLO, E. Dry dressing for ecological grinding. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 633–643, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616307922?via%3Dihub>>. Citado na página 35.
- CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO. 2017. Disponível em: <<http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?id=K4781203T2>>. Citado na página 122.
- COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR. 2017. Disponível em: <<https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.
- ELSEVIER, B. V. **Scopus**. 2017. Disponível em: <<https://www.scopus.com/>>. Citado na página 8.
- EUROPEAN STEEL & ALLOY GRADES. **X50CrMnNiNbN21-9 (1.4882)**. 2017. Disponível em: <http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=844>. Citado na página 43.

EZUGWU, E. O. Key improvements in the machining of difficult to cut aerospace superalloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, p. 1353–1367, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505000544?via%3Dihub>>. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 34.

FILLETI, R. A. P. **Modelo dinâmico de inventário de ciclo de vida (ICV) de processo unitário discreto de manufatura: um estudo de caso com retificação cilíndrica externa**. Dissertação (mathesis) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 41, 50 e 51.

GATE, R. 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/E_Ezugwu/reputation>. Citado na página 120.

GEDDES, B.; LEON, H.; HUANG, X. **Superalloys: Alloying and Performance**. [S.l.]: ASM International, 2010. ISBN 978-1-61503-040-8. Citado 4 vezes nas páginas 2, 65, 66 e 67.

GOIND, G. S.; SARKAR, P. Dry machining: A step towards sustainable machining – challenges and future directions. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 1557–1571, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617316918>>. Citado na página 35.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Process, and Systems**. 4. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. ISBN 978-0470-467002. Citado 8 vezes nas páginas 13, 14, 15, 16, 38, 39, 40 e 72.

GUERRINI, G.; LANDI, E.; PEIFFER, K.; FORTUNATO, A. Dry grinding of gears for sustainable automotive transmission production. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, p. 76–88, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261733086X?via%3Dihub>>. Citado na página 35.

GUO, S.; LI, C.; ZHANG, Y.; YANG, M.; JIA, D.; ZHANG, X.; LIU, G.; LI, R.; BING, Z.; JI, H. Analysis of volume ratio of castor/soybean oil mixture on minimum quantity lubrication grinding performance and microstructure evaluation by fractal dimension. **Industrial Crops & Products**, v. 111, p. 494–505, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669017307744?via%3Dihub>>. Citado na página 36.

HADAD, M. J.; TAWAKOLI, T.; SADEGHI, M. H.; SADEGHI, B. Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication mql grinding process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 54-55, p. 10–17, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695511002239>>. Citado na página 35.

HASSUI, A.; DINIZ, A. E. Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 43, p. 855–862, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089069550300049X?via%3Dihub>>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

HOOD, R.; COOPER, P.; ASPINWALL, D. K.; SOO, S. L.; LEE, D. S. Creep feed grinding of γ -tial using single layer electroplated diamond superabrasive wheels. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 11, p. 36–44, mar. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581715000358?via%3Dihub>>. Citado na página 25.

JACKSON, M. J.; DAVIM, J. P. **Machining with Abrasive**. [S.l.]: Springer, 2011. ISBN 978-1-4419-7301-6. Citado 8 vezes nas páginas 13, 14, 18, 19, 20, 22, 33 e 34.

JACKSON, M. J.; DAVIS, C. J.; HITCHINER, M. P.; MILLS, B. High-speed grinding with cbn grinding wheels: applications and future technology. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 110, n. 1, p. 78–88, mar. 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013600008694>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 28 e 47.

JIA, D.; LI, C.; ZHANG, Y.; YANG, M.; WANG, Y.; GUO, S.; CAO, H. Specific energy and surface roughness of minimum quantity lubrication grinding ni-based alloy with mixed vegetable oil-based nanofluids. **Precision Engineering**, v. 50, p. 248–262, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635917300892?via%3Dihub>>. Citado na página 36.

KISS, S. Norton vitrium3: Revolutionary grain adhesion. **Key Engineering Materials**, v. 581, p. 229–234, 2013. Citado na página 20.

KLOCKE, F. **Manufacturing Process 2: Grinding, Honing, Lapping**. [S.l.]: Springer, 2009. ISBN 978-3-540-92258-2. Citado 12 vezes nas páginas 3, 13, 16, 19, 22, 23, 29, 30, 33, 34, 39 e 44.

KLOCKE, F.; SOO, S. L.; KARPUSCHEWSKI, B.; WEBSTER, J. A.; NOVOVIC, D.; ELFIZY, A.; AXINTE, D. A.; TÖNISSEN, S. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 64, n. 2, p. 581–604, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850615001432>>. Citado 4 vezes nas páginas 1, 3, 23 e 31.

KÖNIG, W.; MESSER, J. Influence of the composition and structure of steels on grinding process. **Annals of the CIRP**, v. 30(2), p. 547–552, 1981. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607601656>>. Citado 4 vezes nas páginas 49, 67, 75 e 80.

KOPAC, J.; KRAJNIK, P. High-performance grinding: a review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 175, p. 278–284, 2006. Citado na página 95.

LINKE, B. **Life Cycle and Sustainability of Abrasive Tools**. [S.l.]: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-28345-6. Citado 6 vezes nas páginas 17, 18, 19, 20, 21 e 22.

LINKE, B.; DAS, J.; LAM, M.; LY, C. Sustainability indicators for finishing operations based on process performance and part quality. **Procedia CIRP**, v. 14, p. 564–569, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114001607>>. Citado na página 60.

LYNCH, A. J.; ROWLAND, C. A. **The History of Grinding**. [S.l.]: Society for Mining Metallurgy and Exploration Inc, 2009. ISBN 0-87335-238-6. Citado na página 15.

MACHADO, A. R.; ABRAO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. [S.l.]: Blucher, 2015. ISBN 9788521208464. Citado 3 vezes nas páginas 14, 26 e 38.

MADISON, T. K. Technical information for occupational health and safety professionals – recommended changes to ohsa noise exposure dose calculation. **3M JobHealth Highlights**, v. 25, n. 8, p. 1–15, 2007. Citado na página 98.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**. 2. ed. [S.l.]: Industrial Press, 2008. ISBN 978-0-8311-3247-7. Citado 15 vezes nas páginas 1, 4, 13, 14, 15, 16, 19, 22, 26, 34, 39, 44, 72, 125 e 126.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M. P.; UHLMANN, E.; ROWE, W. B.; INASAKI, I. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. [S.l.]: Taylor & Francis Group LLC, 2007. ISBN 1-57444-671-1. Citado 11 vezes nas páginas 3, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 29, 34, 39 e 40.

MATWEB. **Online Materials Information Resource**. 2017. Disponível em: <<http://www.matweb.com>>. Citado na página 43.

OLIVEIRA, J. F. G.; FRANÇA, T. V.; WANG, J. P. Experimental analysis of wheel/work-piece dynamic interactions in grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, n. 1, p. 329–332, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850608000796?via%3Dihub>>. Citado na página 37.

OLIVEIRA, J. F. G.; SILVA, E. J.; GUO, C.; HASHIMOTO, F. Industrial challenges in grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, p. 663–680, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850609001735>>. Citado 8 vezes nas páginas 1, 3, 24, 25, 28, 47, 71 e 92.

POINT, V. **Vantage Point: Serious Software for Serious Professionals**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.thevantagepoint.com/>>. Citado na página 9.

REED, R. C. **The Superalloys: Fundamentals and Applications**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2006. ISBN 978-0-511-24546-6. Citado 3 vezes nas páginas 2, 32 e 33.

REUTERS, T. **Journal Citation Reports**. 2017. Disponível em: <<https://jcr.incites.thomsonreuters.com/>>. Citado na página 8.

_____. **Web of Science**. 2017. Disponível em: <<http://apps.webofknowledge.com>>. Citado na página 8.

ROWE, B. W. **Principles of Modern Grinding Technology**. [S.l.]: William Andrew, 2009. ISBN 978-0-81-552018-4. Citado 8 vezes nas páginas 14, 15, 22, 28, 29, 31, 33 e 34.

ROWE, W. B.; EBBRELL, S.; MORGAN, M. N. Process requirements for cost effective precision grinding. **CIRP Annals**, v. 53, p. 255–258, 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607606921>>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 56.

RUTGERS UNIVERSITY. **Biography Professor Tuğrul Özel**. 2017. Disponível em: <<http://www.rci.rutgers.edu/~ozel/biography.htm>>. Citado na página 122.

SAINT-GOBAIN ABRASIVES INC. **Soluções abrasivas: Tabela industrial**. [S.l.], 2016. 232 f. Disponível em: <https://cld.pt/dl/download/bc8d30f3-0ca2-451a-bbdb-3c5055063026/NORTON_Tabela%20Industrial%202016-01-01.pdf>. Citado na página 21.

SETTI, D.; SINHA, M. K.; GHOSH, S.; RAO, P. V. Performance evaluation of Ti6Al4V grinding using chip formation and coefficient of friction under the influence of nanofluids. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 88, p. 237–248, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695514400105>>. Citado na página 35.

SILVA, E. J. **Análise de estratégias de retificação de virabrequins automotivos forjados utilizando rebolos de cBN vitrificados em altas velocidades**. Tese (phdthesis) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. 178 f. Citado 5 vezes nas páginas 26, 27, 28, 45 e 51.

SILVA, E. J.; ABUJAMARA, R. C.; GIUFFRIDA, A. D. B.; REIS, V. R. A. Web based supervisory system for plunge grinding operation. *Symposium Series in Mechatronics*, v. 5, p. 859–868, 2012. Citado na página 50.

SILVA, E. J.; OLIVEIRA, J. F. G. Evaluation technique for determining wheel performance in the grinding of aerospace materials. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 225, n. 1, p. 25–34, jan. 2011. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/09544054JEM2074?journalCode=pibb>>. Citado 5 vezes nas páginas 2, 3, 37, 38 e 80.

SILVA, E. J.; RONDON, L. C.; MARTINS, M. V.; FRANCA, T. V.; CERVELIN, J. E. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento para máquinas-ferramentas utilizando-se o padrão mtconnect. *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM)*, v. 6, 2010. Citado na página 50.

SINHA, M. K.; SETTI, D.; GHOSH, P. S.; RAO, V. An investigation on surface burn during grinding of inconel 718. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 21, p. 124–133, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612515001589?via%3Dihub>>. Citado na página 2.

SPECIAL STEEL. **Material number 1.4882 - X50CrMnNiNbN21-9**. 2017. Disponível em: <<http://www.specialsteel-jy.com/DIN%201.4882.html>>. Citado na página 43.

STONE, F. 2016. Disponível em: <<http://flintstone2020.eu/partners-people-seco-tools-ab-seco/>>. Citado na página 121.

SUBRAMANIAN, K.; RAMANATH, S.; TRICARD, M. Mechanisms of material removal in the precision production grinding of ceramics. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 119, p. 509–514, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

TAYLOR HOBSON PRECISION. **The Parameter Tree of Surface Roughness**. [S.l.], 2003. Citado na página 54.

_____. **Roundess Metrology**. [S.l.], 2003. Citado na página 55.

TECHNOLOGY, F. M. . **Patent-Pending Abrasive Bond Technology**. 2013. Disponível em: <<http://foundrymag.com/finishingmro/patent-pending-abrasive-bond-technology>>. Citado na página 20.

THAKUR, A.; GANGOPADHYAY, S. State of the art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 100, p. 25–54, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695515300730>>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 35.

UMASS AMHERST. **A Tribute to Professor Steve Malkin: Reflections from Colleagues and Friends**. [S.l.], 2014. 25 f. Citado na página 122.

UNIVERSITY OF KENTUCK. **I. S. Jawahir**. 2017. Disponível em: <<https://www.engr.uky.edu/research/researchers/ibrahim-jawahir/>>. Citado na página 121.

VOORT, G. F. V.; LUCAS, G. M.; MANILOVA, E. P. Metallography and microstructures of stainless steels and maraging steels. **Metallography and Microstructures**, v. 9, p. 670–700, 2004. Disponível em: <<http://www.georgevandervoort.com/images/Metallography-General/Met-of-SS-Vol-9.pdf>>. Citado na página 55.

VOORT, G. F. V.; MANILOVA, E. P.; LUCAS, G. M. Metallographic techniques for superalloys. **Microscopy and Microanalysis**, v. 10(02), p. 1–8, 2004. Disponível em: <http://www.georgevandervoort.com/images/Metallography-General/Nickel-Alloys/MET_TECHS_FOR_SUPERALLOYS.pdf>. Citado na página 55.

WANG, J. P. **Avaliação da retificação com rebolo de CBN vitrificado aplicada em ligas de alto desempenho**. Dissertação (mathesis) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 43, 52, 54 e 55.

WANG, Y.; LI, C.; ZHANG, Y.; YANG, M.; ZHANG, X.; ZHANG, N.; DAI, J. Experimental evaluation on tribological performance of the wheel workpiece interface in minimum quantity lubrication grinding with different concentrations of Al_2O_3 nanofluids. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 3571–3583, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616317309?via%3Dihub>>. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

WEBSTER, J.; TRICARD, M. Innovations in abrasive products for precision grinding. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 53, n. 2, p. 597–617, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607600316>>. Citado 6 vezes nas páginas 2, 13, 16, 17, 31 e 33.

WEGENER, K.; BLEICHER, F.; KRAJNÍK, P.; HOFFMEISTER, H. W.; BRECHER, C. Recent developments in grinding machines. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 66, p. 779–802, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850617301452?via%3Dihub>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 24.

WEGENER, K.; HOFFMEISTER, H. W.; KARPUSCHEWSKI, B.; KUSTER, F.; HAHMANN, W. C.; RABIEY, M. Conditioning and monitoring of grinding wheels. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 60, n. 2, p. 757–777, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850611002058>>. Citado 6 vezes nas páginas 13, 14, 29, 30, 31 e 34.

WENFENG, D.; BIAO, Z.; JIUHUA, X.; CHANGYONG, Y.; YUCAN, F.; HONGHUA, S. Grinding behavior and surface appearance of (ticip+ tibw)/ti-6al-4v titanium matrix composites. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 27, n. 5, p. 1334–1342, out. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936114001265?via%3Dihub>>. Citado na página 50.

WERKSTOFFTECHNIK, I. F. **Head E. Brinksmeier**. 2017. Disponível em: <<http://www.iwt-bremen.de/en/manufacturing-technologies/brinksmeier/>>. Citado na página 121.

YONEKURA; YOKOGAWA. Effects of tsukidashiryo of resinoid bonded borazon cbn wheels on grinding performance. **Bull JSPE**, v. 17, n. 2, p. 113–118, 1983. Citado na página 2.

ZHENG, L.; WENFENG, D.; LONG, S.; XINXIN, X.; YUCAN, F. Comparative investigation on high-speed grinding of tcp/ti-6al-4v particulate reinforced titanium matrix composites with single-layer electroplated and brazed cbn wheels. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 593, p. 1.414–1.424, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100093611600011X?via%3Dihub>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 28.

BIBLIOMETRIA

Nesta seção, são apresentadas análises adicionais sobre a bibliometria.

Figura 54 – Fator de Impacto dos periódicos em 2015.

*JIF de 2014.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 55 – Quantidade de citações em 2015 dos periódicos.

*Número de citações de 2014.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir são apresentadas maiores informações sobre os autores que mais receberam citações dentre os artigos analisados. Os números de citações informados abaixo são correspondentes aos da data da coleta.

- **1ª colocação - Ezugwu, E. O. (1028 citações):** De acordo com [Gate \(2013\)](#), Ezugwu é professor da Air Force Institute of Technology (AFIT), Nigéria. Obteve seu PhD¹ em 1986 pela Warwick Manufacturing Centre, University of Warwick no Reino Unido. Possui vários prêmios e honrarias. Tem extensa pesquisa, ensino e consultoria em diferentes áreas da engenharia de fabricação. Com habilidade e experiências nas seguintes áreas: processa-

¹ *Philosophiae Doctor (PhD).*

mento de materiais, engenharia de superfície, engenharia de manufatura, tribologia, entre outros ([AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2017](#)).

- **2ª colocação - Komanduri, R. (507 citações):** Ex-professor da Oklahoma State University, com diversas honrarias. Recebeu seu PhD em 1972 pela Monash University da Austrália. Possuía interesse em manufatura avançada e tribologia, cujos resultados foram 230 publicações e 22 patentes. Faleceu em 2011 ([AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2012](#)).
- **3ª colocação - Jawahir, I.S. (469 citações):** Professor da University of Kentucky (UK), EUA, College of Engineering e diretor do Institute for Sustainable Manufacturing (ISM). Obteve seu PhD em 1986 pela University of New South Wales, Sydney, Austrália. Possui várias honrarias e mais de 300 publicações. O ISM compromete desenvolver e implementar tecnologias de manufatura sustentável para produtos, processos e sistemas ([UNIVERSITY OF KENTUCKY, 2017](#)).
- **4ª colocação - Brinksmeier, E. (449 citações):** Professor da University of Bremen, Alemanha, e diretor do Foundation Institute of Materials Science e Laboratory for Precision Machining. Concluiu seu PhD em 1982 pela University of Hanover, Alemanha. Possui mais de 600 publicações. As pesquisas atuais incluem as áreas de fabricação (integridade superficial, retificação de materiais DTG, entre outros), desenvolvimento de processos ambientalmente sustentáveis, com foco em fluidos e otimização da potência gasta em processos, tecnologia dos abrasivos, entre outros ([WERKSTOFFTECHNIK, 2017](#)).
- **5ª colocação - Bonney, J. (430 citações):** Professor da Koforidua Polytechnic, Department of Mechanical Engineering, Koforidua, Gana. Recebeu seu PhD em 2004 pela London South Bank University (LSBU), Machining Research Centre, Department of Engineering Systems (informação pessoal²).
- **6ª colocação - Yamane, Y. (425 citações):** Professor da Hiroshima University (HU), Japão. Recebeu o título de PhD pela H.U. em 1980 e já iniciou sua carreira acadêmica na mesma instituição, onde atualmente é vice-presidente. Possui mais de 200 publicações nas áreas Usinagem dos metais e mais especificamente em fricção e desgaste de componentes ([AKADEMIKA, 2017](#)).
- **7ª colocação - M'Saoubi, R. (288 citações):** Pesquisador sênior da Seco Tools AB, Suécia, na divisão R&D de Desenvolvimento de Materiais e Tecnologia e membro do CIRP. Recebeu o título de PhD em 1998 pela Ecole Nationale Supérieure D'Arts et Métiers (EN-SAM), Paris, França. Seus principais interesses de pesquisa são: investigação de aspectos materiais nos processos de usinagem, incluindo integridade superficial, mecanismos de desgaste e desempenho de usinagem ([STONE, 2016](#)).

² da SILVA, R. B. **John Bonney**. Mensagem recebida via e-mail em 13 de mar. 2017.

- **8ª colocação - Machado, A. R. (274 citações):** Professor aposentado pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), atualmente é professor da Pontifícia Universidade Católica (PUC), Paraná. Concluiu em 1990 seu PhD pela University of Warwick, Inglaterra. Coordenou o Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) na UFU. Possui experiência nos seguintes temas: usinagem de superligas; temperatura de corte; formação do cavaco; desgaste e mecanismos de desgastes em ferramentas de corte; entre diversos outros temas relacionados a Usinagem. Possui mais de 300 publicações nestas áreas ([CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO, 2017](#)).
- **9ª colocação - Özel, T. (268 citações):** Professor da Rutgers University (RU), Nova Jérsei, EUA, diretor do Manufacturing & Automation Research Laboratory (MARL). Recebeu em 1998 seu PhD pela Ohio State University, EUA. Editor fundador e chefe de vários jornais de relevância, dentre eles: *Inter. Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, *Inter. Journal of Machine Tools and Manufacture*, além de ser membro do CIRP. Possui mais de 100 publicações, nos seguintes temas: fabricação de componentes de precisão em ligas metálicas e materiais compósitos; design, prototipagem e desenvolvimento de dispositivos de energia renovável; entre outros ([RUTGERS UNIVERSITY, 2017](#)).
- **10ª colocação - Malkin, S. (263 citações):** Malkin era um professor renomado e reconhecido mundialmente por suas ideias, visão e sua extrema capacidade de ser mentor. Recebeu inúmeras honrarias pelas suas pesquisas. Atuou desde 1986 na University of Massachusetts (UMASS) Amherst, EUA, com graduação (1963), Msc (1965) e PhD (1968) pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT). Faleceu em 2013, com 72 anos. Recomenda-se a leitura do “*A Tribute to Professor Steve Malkin: Reflections from Colleagues and Friends*” para maiores informações ([UMASS AMHERST, 2014](#)).

Figura 56 – Número de documentos publicados pelos principais autores.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 57 – Quantidade de citações recebidas pelos principais autores.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 58 – Índices Hs dos principais autores.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 20 – Referências mais citadas pelos artigos estudados.

Colocação	Referências mais citadas pelos artigos analisados na bibliometria
1º	ASPINWALL, D.K., SOO, S.L., CURTIS, D.T., MANTLE, A.L. Profiled Superabrasive Grinding Wheels for the Machining of a Nickel Based Superalloy (2007) CIRP Annals - Manufacturing Technology, 56 (1), pp. 335-338., DOI 10.1016/j.cirp.2007.05.077, PII S0007850607000820
2º	YAO, C.F., JIN, Q.C., HUANG, X.C., WU, D.X., REN, J.X., ZHANG, D.H. Research on surface integrity of grinding Inconel 718 (2013). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 65, pp. 1019-1030
3º	OSTERLE, W., LI, P.X. Mechanical and Thermal Response of a Nickel-base Superalloy upon Grinding with High Removal Rates (1997). Materials Science and Engineering, A238.
4º	BRINKSMEIER, E., HEINZEL, C., WITTMANN, M. Friction cooling and lubrication in grinding (1999). Annals of the CIRP, 48 (2), pp. 581-598
5º	MALKIN, S., (1989). Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives, Ellis Horwood Limited, Chichester
6º	MALKIN, S., (2008). Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives, Second Ed, Industrial Press, New York
7º	XU, X.P., YU, Y.Q., HUANG, H., Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium and nickel alloys (2003). Wear, 255, pp. 1421-1426
8º	EZUGWU, E.O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys (2005). International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45, pp. 1353-1367
9º	RAHMAN, M., SEAH, W.K.H., TEO, T.T. The machinability of Inconel 718 (1997). Journal of Materials Processing Technology, 63, pp. 199-204
10º	EZUGWU, E.O., WANG, Z.M., MACHADO, A.R. The machinability of nickel-based alloys: a review (1999). Journal of Materials Processing Technology, 86, pp. 1-16

Fonte: Elaborada pelo autor.

CARACTERÍSTICAS DO REBOLO CONVENCIONAL DE ALTO DESEMPENHO

Tabela 21 – Características do rebolo convencional 3NQ.

Modelo: 3NQ 80L10 VS3 500x50x135*	
Diâmetro Externo Inicial [mm]	500
Diâmetro Interno [mm]	203,2
Largura [mm]	50
Abrasivo [-]	Quantum® (3NQ)
Tamanho do Grão [-]	80 (Fino)
Grau [-]	L (Médio, $n = 8$)
Estrutura [-]	10
Ligante [-]	Vitrificado (Vitrium ³ ®)
Composição Volumétrica do Grão Abrasivo [§] [%]	44
Composição Volumétrica dos Poros [†] [%]	41
Composição Volumétrica do Ligante [‡] [%]	15
Volume Total do Rebolo [cm ³]	8.196,01
Volume do Grão [cm ³]	3.606,24
Volume do Ligante [cm ³]	1.229,40

Não foi possível obter maiores informações sobre o grão Quantum® e o ligante Vitrium³®, pois estas ainda são sigilosas.

Fonte: Elaborada pelo autor.

[§] De acordo com Malkin e Guo (2008), a composição volumétrica do grão abrasivo (V_g) de um rebolo convencional é encontrada a partir da Equação B.1:

$$V_g (\%) = 2 (32 - S) \quad (\text{B.1})$$

Onde: S equivale ao valor do número da estrutura do rebolo, para este caso $S = 10$.

[†]De acordo com Malkin e Guo (2008), a composição volumétrica dos poros (V_p) de um rebolo é encontrada a partir da Equação B.2:

$$V_p(\%) = \frac{2(99,5 - 2.n) - V_g}{3} \quad (\text{B.2})$$

Onde: n é número inteiro (1,2,3...) correspondente ao grau do rebolo (E, F, G...). Para este caso o grau corresponde à letra L, consequentemente, $n = 8$.

[‡] De acordo com Malkin e Guo (2008), a composição volumétrica do ligante (V_b) de um rebolo é calculada por meio da Equação B.3:

$$V_b(\%) = 100\% - V_p(\%) - V_g(\%) \quad (\text{B.3})$$

A Figura 59 apresenta o diagrama ternário para este rebolo, de acordo com as composições V_g , V_p e V_b .

Figura 59 – Diagrama ternário.

Fonte: Elaborada pelo autor.

CARACTERÍSTICAS DO REBOLO SUPERABRASIVO DE CBN

Tabela 22 – Características do rebolo superabrasivo cBN VSS.

Modelo: B1-VG-3A1-400-20-5-136-B126 / JB126-K150-VSS	
Diâmetro Externo Inicial [mm]	400
Diâmetro Interno [mm]	395
Diâmetro Interno Matriz [mm]	136
Largura [mm]	20
Abrasivo [-]	cBN
Tamanho do Grão [-]	JB126
Grau [-]	K (Médio, n = 7)
Concentração [-]	150
Ligante [-]	Vitrificado (VSS)
Composição Volumétrica do Grão Abrasivo [%]	37,5
Composição Volumétrica dos Poros [%]	44,5
Composição Volumétrica do Ligante [%]	18,0
Volume Total do Rebolo [cm ³]	62,44
Volume do Grão [cm ³]	23,42
Volume do Ligante [cm ³]	11,24

Fonte: Elaborada pelo autor.

RESULTADOS ADICIONAIS

Nesta seção, são apresentadas ilustrações e tabelas adicionais derivadas deste estudo.

Tabela 23 – Valores normalizados dos fatores analisados, para ambos os rebolos e materiais testados na taxa de $Q'_w = 50 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$.

Material	Fator	Unidade	P_f			R_f Valor médio	N_f		
			3NQ-45	3NQ-80	cBN		3NQ-45	3NQ-80	cBN
Inc.75.1	P	W	1336,8333	1703,8333	1262,6010	1434,4226	0,93	1,19	0,88
	η_E	$\mu\text{m/kJ}$	-0,0008	-0,0006	-0,0011	-0,0008	0,98	0,68	1,34
	u	J/mm^3	106,9467	136,3067	101,0081	114,7538	0,93	1,19	0,88
	R_a	μm	0,7266	0,6701	0,3230	0,5732	1,27	1,17	0,56
	C_t	R\$	83,2100	82,6800	157,0300	107,6400	0,77	0,77	1,46
	$\eta\$$	$\mu\text{m/R\$}$	-0,0124	-0,0132	-0,0092	-0,0116	1,07	1,14	0,79
21-43	RONt	μm	3,5450	3,8100	2,8100	3,3883	1,05	1,12	0,83
	P	W	936,2067	1196,5800	1059,9631	1064,2499	0,88	1,12	1,00
	η_E	$\mu\text{m/kJ}$	-0,0007	-0,0005	-0,0012	-0,0008	0,86	0,62	1,52
	u	J/mm^3	74,8965	95,7264	84,7970	85,1400	0,88	1,12	1,00
	R_a	μm	0,9219	0,6112	0,2703	0,6011	1,53	1,02	0,45
	C_t	R\$	80,5900	81,2500	153,1800	105,0067	0,77	0,77	1,46
Sil.1	$\eta\$$	$\mu\text{m/R\$}$	-0,0079	-0,0116	-0,0084	-0,0093	0,85	1,25	0,90
	RONt	μm	7,6750	3,8300	1,8300	4,4450	1,73	0,86	0,41
	P	W	567,9489	1053,1349	535,0864	718,7234	0,79	1,47	0,74
	η_E	$\mu\text{m/kJ}$	-0,0020	-0,0009	-0,0017	-0,0016	1,31	0,59	1,10
	u	J/mm^3	45,4359	84,2508	42,8069	57,4979	0,79	1,47	0,74
	R_a	μm	0,3315	0,2271	0,2961	0,2849	1,16	0,80	1,04
	C_t	R\$	70,7500	70,6600	149,5800	96,9967	0,73	0,73	1,54
	$\eta\$$	$\mu\text{m/R\$}$	-0,0179	-0,0194	-0,0087	-0,0153	1,17	1,27	0,57
	RONt	μm	6,5050	7,1950	3,1100	5,6033	1,16	1,28	0,56

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 24 – Valores normalizados dos fatores analisados, para ambos os rebolos e materiais testados na taxa de $Q'_w = 100 \text{ mm}^3/\text{mm.min.}$

Material	Fator	Unidade	P_f			R_f Valor médio	N_f		
			3NQ-45	3NQ-80	cBN		3NQ-45	3NQ-80	cBN
Inc.751	P	W	1518,6667	2021,5000	2455,8591	1998,6753	0,76	1,01	1,23
	η_E	$\mu\text{m/kJ}$	-0,0009	-0,0006	-0,0013	-0,0009	0,92	0,68	1,39
	u	J/mm^3	60,7467	80,8600	98,2344	79,9470	0,76	1,01	1,23
	R_a	μm	1,1006	0,7556	0,4853	0,7805	1,41	0,97	0,62
	C_t	R\$	63,0900	60,1200	140,4700	87,8933	0,72	0,68	1,60
	η_S	$\mu\text{m/R\$}$	-0,0105	-0,0167	-0,0091	-0,0121	0,87	1,38	0,75
21-43	RONt	μm	4,0550	4,2350	2,9300	3,7400	1,08	1,13	0,78
	P	W	1019,2400	1393,8633	1488,7092	1300,6042	0,78	1,07	1,14
	η_E	$\mu\text{m/kJ}$	-0,0010	-0,0008	-0,0014	-0,0011	0,98	0,73	1,29
	u	J/mm^3	40,7696	55,7545	59,5484	52,0242	0,78	1,07	1,14
	R_a	μm	0,9701	0,7396	0,3127	0,6741	1,44	1,10	0,46
	C_t	R\$	58,2600	58,1500	131,7800	82,7300	0,70	0,70	1,59
Sil.1	η_S	$\mu\text{m/R\$}$	-0,0101	-0,0140	-0,0094	-0,0112	0,90	1,26	0,84
	RONt	μm	6,6450	4,8250	3,2850	4,9183	1,35	0,98	0,67
	P	W	801,2777	1453,2139	863,7277	1039,4064	0,77	1,40	0,83
	η_E	$\mu\text{m/kJ}$	-0,0026	-0,0015	-0,0026	-0,0022	1,16	0,67	1,17
	u	J/mm^3	32,0511	58,1286	34,5491	41,5763	0,77	1,40	0,83
	R_a	μm	0,3679	0,3312	0,3560	0,3517	1,05	0,94	1,01
	C_t	R\$	47,6500	47,5700	127,1400	74,1200	0,64	0,64	1,72
	η_S	$\mu\text{m/R\$}$	-0,0258	-0,0266	-0,0098	-0,0207	1,24	1,28	0,47
	RONt	μm	6,9650	4,3750	3,1800	4,8400	1,44	0,90	0,66

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 25 – Valores normalizados dos fatores analisados, para ambos os rebolos e materiais testados na taxa de $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min.}$

Material	Fator	Unidade	P_f			R_f Valor médio	N_f		
			3NQ-45	3NQ-80	cBN		3NQ-45	3NQ-80	cBN
Inc.751	P	W	1780,8333	2362,6667	2546,7182	2230,0727	0,80	1,06	1,14
	η_E	$\mu\text{m/kJ}$	-0,0006	-0,0005	-0,0012	-0,0008	0,82	0,62	1,55
	u	J/mm^3	47,4889	63,0044	67,9125	59,4686	0,80	1,06	1,14
	R_a	μm	1,3729	0,8849	0,6820	0,9799	1,40	0,90	0,70
	C_t	R\$	60,4300	54,2100	179,9300	98,1900	0,62	0,55	1,83
	η_S	$\mu\text{m/R\$}$	-0,0064	-0,0162	-0,0060	-0,0095	0,68	1,70	0,63
21-43	RONt	μm	5,3000	3,9550	3,4850	4,2467	1,25	0,93	0,82
	P	W	1135,7283	1651,9483	2228,8691	1672,1819	0,68	0,99	1,33
	η_E	$\mu\text{m/kJ}$	-0,0009	-0,0006	-0,0013	-0,0010	0,96	0,64	1,40
	u	J/mm^3	30,2861	44,0520	59,4365	44,5915	0,68	0,99	1,33
	R_a	μm	1,1287	0,8418	0,3389	0,7698	1,47	1,09	0,44
	C_t	R\$	52,4700	51,4300	128,1900	77,3633	0,68	0,66	1,66
Sil.1	η_S	$\mu\text{m/R\$}$	-0,0081	-0,0139	-0,0095	-0,0105	0,77	1,32	0,90
	RONt	μm	6,0850	5,9650	2,9600	5,0033	1,22	1,19	0,59
	P	W	1077,6795	1503,9992	1298,0311	1293,2366	0,83	1,16	1,00
	η_E	$\mu\text{m/kJ}$	-0,0027	-0,0020	-0,0022	-0,0023	1,18	0,86	0,96
	u	J/mm^3	28,7381	40,1066	34,6142	34,4863	0,83	1,16	1,00
	R_a	μm	0,3230	0,3056	0,3675	0,3320	0,97	0,92	1,11
	C_t	R\$	40,6500	40,6000	123,0100	68,0867	0,60	0,60	1,81
	η_S	$\mu\text{m/R\$}$	-0,0313	-0,0318	-0,0100	-0,0244	1,29	1,30	0,41
	RONt	μm	4,1750	4,6650	3,6700	4,1700	1,00	1,12	0,88

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 60 – Desgaste dos rebolos versus volume de material removido: (a) 3NQ, 45 m/s; (b) 3NQ, 80 m/s e (c) cBN.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 61 – Mapa acústico de dressagem do rebolo 3NQ (80 m/s), com $Q'_w = 100 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$, pós retificação do Inc.751: (a) todos os passes e (b) zoom nos últimos 4 passes.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 62 – Imagem da superfície do rebolo 3NQ (45 m/s) antes e após a retificação do Inc.751 na maior taxa.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 63 – Imagem da superfície do rebolo 3NQ (80 m/s) antes e após a retificação do Inc.751 na maior taxa.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 64 – Micrografias MEV dos cavacos das superligas gerados pela retificação com rebolo 3NQ (45 m/s).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 65 – Micrografias MEV dos cavacos das superligas gerados pela retificação com rebolo 3NQ (80 m/s).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 66 – Micrografias MEV dos cavacos das superligas gerados pela retificação com rebolo cBN.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 67 – Rugosidade R_z para todos os rebolos, condições e materiais testados.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 68 – Rugosidade R_t para todos os rebolos, condições e materiais testados.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 69 – Exemplo de perfil de rugosidade obtida da peça de Inc.751, pós retificação com rebolo de cBN, na maior taxa e volume testado.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 70 – Circularidades RONp para todos os rebolos, condições e materiais testados.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 71 – Circularidades RONv para todos os rebolos, condições e materiais testados.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 72 – Superfície da peça pós retificação com rebolo 3NQ a 80 m/s e maior taxa de remoção, zoom 100 x: (a) Inc. 751, (b) 21-43 e (c) Sil. 1.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 73 – Superfície da peça pós retificação com rebolo cBN na maior taxa de remoção, zoom 100 x: (a) Inc. 751, (b) 21-43 e (c) Sil. 1.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 74 – Microestrutura das peças pós retificação com rebolo 3NQ a 45 m/s, na maior taxa de remoção, zoom 100 x: (a) Inc. 751, (b) 21-43 e (c) Sil. 1.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 75 – Microestrutura das peças pós retificação com rebolo 3NQ a 80 m/s, na maior taxa de remoção, zoom 100 x: (a) Inc. 751, (b) 21-43 e (c) Sil. 1.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 76 – Perfil de microdureza Vickers dos diferentes materiais testados, quando da retificação com (a) 3NQ (45 m/s), (b) 3NQ (80 m/s) e (c) cBN.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 77 – Custos totais/peça para todos materiais, condições e rebolos analisados: (a) 3NQ (45 m/s); (b) 3NQ (80 m/s) e (c) cBN.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 78 – Indicadores econômicos para eficiência da integridade superficial: (a) $\eta\$ \rightarrow R_a$ e (b) (a) $\eta\$ \rightarrow R_z$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 79 – Indicadores econômicos para eficiência da taxa de remoção de material.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 80 – Indicadores energéticos para eficiência da integridade superficial: (a) $\eta E \rightarrow R_a$ e (b) (a) $\eta E \rightarrow R_z$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 81 – Indicadores energéticos para eficiência da taxa de remoção de material.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 82 – Indicadores sociais para eficiência da integridade superficial: (a) $\eta_{dBA} \rightarrow R_a$ e (b) (a) $\eta_{dBA} \rightarrow R_z$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 83 – Indicadores sociais para eficiência da taxa de remoção de material.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 84 – Superfície das peça pós retificação com rebolo 3NQ e cBN, ambos a 80 m/s.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 85 – Perfil de rugosidade das peças produzidas pelos rebolos 3NQ e cBN, ambos a 80 m/s.