

AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O REBOLO CONVENCIONAL E DE CBN

Adriel Magalhães Souza

Eraldo Jannone da Silva

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São Carlense, 400 – São Carlos, SP

adrielmagalhaes@usp.br

eraldodasilva@usp.br

Resumo. A manufatura sustentável é um tema em ascensão e visa à utilização eficiente de energia, material e recursos, podendo-se recorrer ao uso de softwares para análise dos impactos do processo ao meio ambiente. Todavia, necessita-se de bases de dados específicas e de elevado número de informações sobre o ciclo de vida do produto/processo, fazendo com que a análise seja complexa. De modo a facilitar a análise, faz-se o uso dos Indicadores de Sustentabilidade (ISs). Sendo assim, o objetivo deste trabalho é avaliar comparativamente os ISs em operações de retificação, nos quesitos econômicos, sociais e ambientais, entre um rebolo convencional e um de nitreto de boro cúbico (cBN). A metodologia utilizada na construção dos ISs para eficiência da integridade superficial (Ra) considerou os custos, o ruído laboral, o consumo de energia, a geração de resíduos e o consumo de água e, por fim, elaborou-se os Indicadores de Desempenho Globais de Sustentabilidade (IDGS). Como resultado, os ISs e o IDGS ofereceram informações que facilitam na tomada de decisão quanto ao desempenho do rebolo e/ou condição ideal. Concluiu-se que o rebolo convencional possui um desempenho econômico superior. Em relação aos impactos sociais, não houve diferença de ruído, e, no tocante aos aspectos ambientais, o cBN é uma alternativa vantajosa.

Palavras chave: Indicadores de sustentabilidade. Manufatura sustentável. Impactos econômicos, ambientais e sociais

1. INTRODUÇÃO

Dufrou et al. (2012) destacavam que os desafios ambientais que a sociedade/indústria enfrentaria num futuro próximo seriam significativos e todas as partes deveriam responder proativamente, visando utilizar de modo eficiente/consciente energia, material e recursos. Esses autores apresentaram uma visão geral sistemática do estado da arte sobre manufatura sustentável. Esse termo também é referenciado em inglês na literatura como *green manufacturing* (DORNFELD, 2012). Silva et al. (2016) avaliaram a produção científica relacionada a essa temática. Para isso, mapearam 239 artigos, de 1991 a 2013, sendo que 51,4% desses foram publicados nos últimos anos, evidenciando a ascensão do tema. Segundo os autores, este fato se deve ao surgimento da atual necessidade de integrar sustentabilidade à manufatura, de modo eficiente.

Segundo Aurich et al. (2013), a sustentabilidade dos processos abrasivos é um subconjunto da manufatura sustentável, sendo a retificação um desses processos. Por esses processos serem utilizados em operações de acabamento e de precisão, removem pouco material, necessitando de relativo alto consumo de energia (quando comparado ao fresamento ou torneamento de precisão) e insumos (principalmente os fluidos de refrigeração), o que, como consequência, gera um elevado impacto ambiental. De acordo com Winter et al. (2015), a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é amplamente utilizada para analisar o impacto ambiental de todas as fases do ciclo de vida de um produto ou processo. Esses autores utilizaram a ACV e avaliaram detalhadamente os impactos ambientais do processo de retificação com rebolos de nitreto de boro cúbico (do inglês, *cubic boron nitride* – cBN). Todavia, esse método necessita de um número elevado de informações, em todas as fases do ciclo de vida do produto, além da necessidade de bases de dados específicas para se avaliar o processo, fazendo com que a análise seja complexa. De modo a facilitar as análises, faz-se o uso dos Indicadores de Sustentabilidade (ISs), que, segundo Linke et al. (2013), possuem vantagens por serem coletados e tratados de forma rápida e fácil, podendo ser utilizados de forma qualitativa ou quantitativamente, em todas as dimensões da sustentabilidade (econômica, social e ambiental). Em consonância com Joung et al. (2012), ao mensurar os fenômenos envolvidos, os ISs analisam e comunicam as informações complexas e complicadas, sobre os quais podem deduzir-se conclusões. Singh et al. (2012) forneceram uma visão geral de vários índices de avaliação de sustentabilidade. Esses autores compilaram as informações relacionadas às estratégias de formação desses índices, que consistem em três etapas principais: normalização, ponderação e associação/agregação. Pollesch e Dale (2016) relataram sobre os tipos de normalização dos ISs e, consequentemente, seu impacto sobre os resultados.

Baseado nesse contexto, esse artigo tem como objetivo a avaliação comparativa dos ISs em operações de retificação, nos quesitos econômicos, sociais e ambientais, entre um rebolo convencional e um de cBN, de modo a oferecer dados para facilitar na tomada de decisão quanto ao desempenho sustentável do rebolo e/ou condição ideal para o processo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A operação de retificação analisada foi a cilíndrica externa de mergulho, utilizando uma retificadora, marca Zema, modelo Numérica G 800-HS, localizada no Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP).

Os materiais estudados foram: as superligas Inconel® 751 (Inc.751); aço 21-43 – materiais austeníticos usados principalmente para as válvulas de escape de motores de combustão; e a liga de aço Silcrome 1 (Sil.1) – metal martensítico também utilizado em válvulas. Para os três materiais, foram fabricadas amostras cilíndricas, com diâmetro externo igual a 42,5; 28,4 e 24,5 mm, respectivamente, e 150 mm de comprimento. De modo a avaliar a qualidade superficial das peças, considerou-se a rugosidade média (R_a) de 3 medições por amostra, e então foi realizada a média desses, utilizando-se um rugosímetro Taylor Hobson, modelo Talysurf, com filtro Gaussiano e *cut-off* de 0,8 mm, conforme ISO (1997).

Foram utilizados dois rebolos: rebolo convencional (especificação 3NQ80L10VS3, referenciado apenas como 3NQ); e rebolo superabrasivo de cBN (JB126 K150 VSS). Ambos foram utilizados com velocidades de corte (v_s) de 80 m/s.

O rebolo convencional 3NQ foi dressado com um dressador estático tipo Fliese FBS 115 Furioso, adotando-se um grau de recobrimento (U_d) igual a 4; profundidade de dressagem no raio (a_d) de 22 μ m; número de passes (Z_d) de 6; e passo de dressagem (S_d) de 0,25 mm/rot. 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) de 80 m/s; velocidade do disco (v_d) de 32 m/s; relação de velocidades igual a +0,4; profundidade de dressagem (a_d) de 2 μ m; velocidade de passagem (v_t) de 300 mm/min; passo de dressagem (S_d) de 0,15 mm/rot; e número de passes (Z_d) igual a 5.

Para a operação, utilizou-se o fluido de corte Vasco 7.000, com vazão de 50 l/min e concentração de 4%. Usou-se dois bicos, com 6 mm de diâmetro de saída e velocidade de jato (v_j) de 15 m/s, e um bocal de limpeza de alta pressão (60 bar).

Foram adotadas três taxas específicas de remoção de material (Q'_w): 50, 100 e 150 mm³/mm.min. Utilizou-se uma largura de retificação (b_w), 15 mm; rotação da peça (n_w), 250 rpm; tempo de *spark-out* (t_{spark}), 5 s (20,8 voltas). O volume total de material removido (V_w) em cada teste foi igual a 12.000 mm³. A cada intervalo de 1.000 mm³ de material removido, o sistema de limpeza por alta pressão era acionado. Para cada taxa ($Q'_w = 50, 100$ e 150 mm³/mm.min) e rebolo (3NQ e cBN), foi utilizado um corpo de prova de cada material (Inc.751, 21-43 e Sil.1), resultando em 18 peças usinadas. Foi realizada uma réplica para cada ensaio, totalizando 36 experimentos.

2.1. Proposição dos ISs do processo

De modo a avaliar os aspectos sustentáveis dos rebolos durante o processo de retificação, levou-se em consideração a construção dos ISs (aspectos econômicos, sociais e ambientais), conforme metodologia proposta por Linke *et al.* (2014).

Para análise dos custos, mensuraram-se os custos totais por peça (C_i) associados para cada operação, conforme metodologia proposta por Rowe *et al.* (2004). Para o cálculo do C_i , levou-se em consideração a somatória dos seguintes itens: os custos de cada rebolo/peça; custos laborais/peça, considerando-se as ferramentas (rebolos e dressadores), superligas, fluidos (corte/hidráulico), consumo energético e mão de obra; e custos da máquina/peça. Com base nos custos para cada rebolo, material e condição testada, calculou-se os Indicadores Econômicos (η_s), de acordo com a Eq. (1) (I).

$$\left(\eta_{s \rightarrow R_a} = -\frac{\Delta R_a}{\Delta Custo} \right)_I \left(\eta_{dBA \rightarrow R_a} = -\frac{\Delta R_a}{\Delta dBA} \right)_{II} \left(\eta_{E \rightarrow R_a} = -\frac{\Delta R_a}{\Delta Energia} \right)_{(III)}$$

$$\left(\eta_{Res \rightarrow R_a} = -\frac{\Delta R_a}{\Delta Resíduos} \right)_{(IV)} \left(\eta_{H2O \rightarrow R_a} = -\frac{\Delta R_a}{\Delta Consumo \text{ - Água}} \right)_{(V)} \quad (1)$$

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 a 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 laboral, calcularam-se os Indicadores Sociais (η_{dBA}), conforme Eq. (1) (II).

Para análise dos impactos ambientais (eficiência), para os diferentes materiais, condições e rebolos testados, levou-se em consideração o consumo de energia, descarte de resíduos e consumo de água durante o processo. Em relação ao consumo de energia, a energia líquida do processo, E , foi encontrada por meio de uma rotina desenvolvida no software MATLAB®, onde se calculou 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 de E . Com base nos valores de E , calcularam-se os Indicadores Energéticos (η_E), de acordo com a Eq. (1) (III). Em relação ao descarte de resíduos do processo, considerou-se o volume de rebolo removido (V_s) e o volume de material removido (V_w) – volume de cavaco gerado. Sabendo-se a densidade teórica aproximada dos diferentes rebolos e materiais testados, construiu-se os Indicadores de Resíduos (η_{Res}), conforme Eq. (1) (IV). Em relação ao consumo de água, utilizou-se o método proposto por Clarens *et al.* (2008) para o cálculo do fluido de corte perdido

durante a operação de retificação. Ocorreu uma perda de 5% de fluido do reservatório durante a usinagem (20 litros), podendo-se, assim, calcular o Indicador de Consumo de Água (η_{H2O}), conforme Eq. (1) ^(iv).

Os ISs supracitados consideram um parâmetro de qualidade da peça (rugosidade média, R_a , em μm), e os indicadores calculados demonstram redução na rugosidade da peça (laminada-retificada) em função do custo unitário dos diferentes recursos de entrada do processo. O sinal (-) nas Eqs. (1) ^(i-v) representa que os parâmetros devem ser minimizados (valor das rugosidades finais – pós-retificação – devem ser menores que o recebido – laminado). Os materiais Inc.751, 21-43 e Sil.1 possuíam, como recebido, os seguintes valores médios de R_a : 1,76; 1,56 e 1,60 μm , respectivamente.

De modo a permitir uma comparação global e direta dos resultados dos ISs para ambos os rebolos, com diferentes unidades e grandezas, eles foram normalizados dividindo-se o valor do fator pelo valor médio entre as condições analisadas, conforme Araújo (2010). Por fim, para todas as condições analisadas, elaboraram-se os Indicadores de Desempenho Globais de Sustentabilidade (IDGS), sendo esse calculado pela somatória dos índices normalizados. Quanto maior esse índice, maior é a eficiência da integridade superficial da peça.

3. INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE: ANÁLISE ECONÔMICA, SOCIAL E AMBIENTAL

A partir do custo total por peça para retificação dos corpos de prova e da variação da rugosidade (R_a) da peça como recebido (laminado) e pós-retificação, obteve-se o Indicador Econômico (η_s), conforme Fig. 1 (a). Nota-se que a maior redução de rugosidade na peça ao final do processo por custo unitário de peça [R\$] foi obtida, em média, na condição rebolo 3NQ – $Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$, indicando que o rebolo convencional 3NQ apresenta uma vantagem competitiva nesse indicador econômico. O valor do custo total por peça, C_t , para o rebolo 3NQ foi, em média, ≈ 2 vezes menor quando comparado ao C_t do rebolo de cBN, evidenciando-se o alto valor agregado para a utilização dos rebolos superabrasivos. Sendo essa a principal limitação para o uso de rebolos deste tipo, conforme apontado por Oliveira *et al.* (2009).

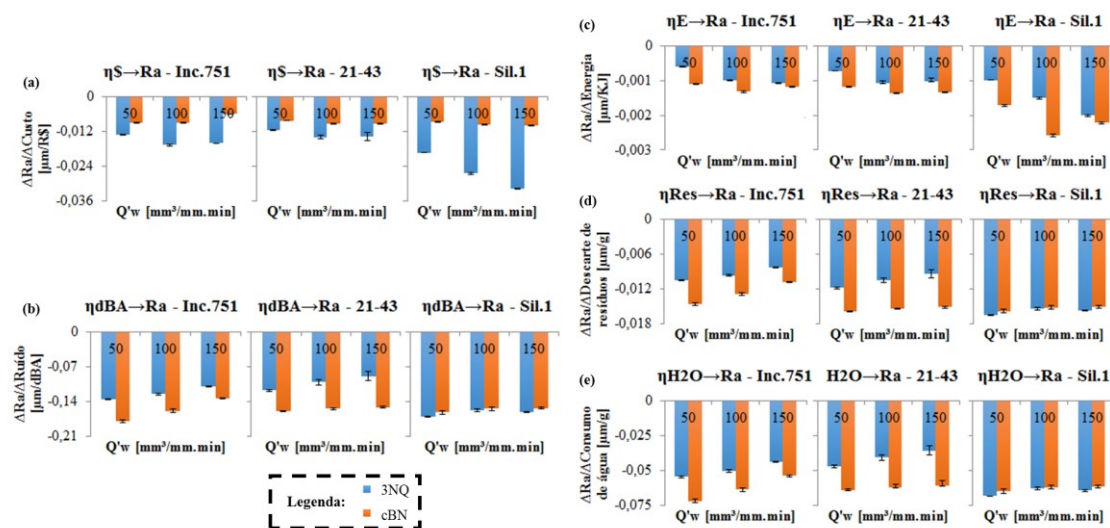


Figura 1. ISs para eficiência da integridade superficial (R_a): (a) econômico – custo; (b) social – ruído e (c/d/e) ambiental – energia/descarte de resíduos/consumo de água

A Figura 1 (b) apresenta o impacto da adoção de diferentes combinações entre rebolo, materiais e Q'_w ; nos recursos de entrada do processo, considerando-se o Níveis de Ruído Laboral (NRL). A variação dos NRL da máquina foi de 8 dBA, valor constante para todas condições testadas. Observa-se que a maior redução de R_a na peça ao final do processo por dBA de ruído gasto na retificação foi obtida com rebolo cBN – $Q'_w = 50 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$. No tocante aos Indicadores Sociais (η_{dBA}) considerando-se que não houve diferença de NRL nas condições testadas, os respectivos indicadores são influenciados apenas pela variação de R_a da peça. Vale ressaltar que os NRL do processo foram menores que 70 dBA, abaixo dos limites de exposição permissíveis, 85 dBA (8-horas), conforme Madison (2007).

A Figura 1 (c), (d) e (e) apresenta os impactos ambientais 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, descarte de resíduos e consumo de água, respectivamente.

No tocante ao consumo energético, vide Fig. 1 (c), observa-se que a maior redução de rugosidade na peça ao final do processo por energia gasta [kJ] na retificação foi obtida com rebolo cBN – $Q'_w = 100 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$. A retificação com rebolo de cBN consumiu menos energia, quando comparado ao 3NQ, corroborando a afirmação de Oliveira, *et al.* (2009).

Na Figura 1 (d), para a geração de resíduos, o menor desgaste radial obtido para as menores taxas específicas de remoção de material influenciou positivamente o desempenho da condição $Q'_w = 50 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$ para ambos os rebolos. Para os materiais Inc.751 e 21-43, o rebolo de cBN foi ambientalmente vantajoso no quesito de geração de resíduos quando comparado ao 3NQ, devido aos menores descartes de camada abrasiva. Isso se deve à maior capacidade de

retenção do grão abrasivo pelo ligante e maior resistência ao desgaste dos grãos abrasivos (consequentemente menor desgaste) no rebolo de cBN. Nesse quesito, para o material Sil.1, o desempenho do rebolo 3NQ foi superior ao cBN.

Em relação ao consumo de água, conforme Fig. 1 (e), não houve diferenças nas condições testadas para o consumo de água durante a operação de retificação. Dessa forma, os melhores valores de rugosidade obtidos na condição $Q'_w = 50 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$ foram determinantes para o melhor desempenho da referida condição, com vantagem para o rebolo de cBN na retificação do Inc.751 e 21-43. Já para o material Sil.1, em relação a esse item, o rebolo 3NQ oferece uma vantagem tecnologicamente viável e competitiva, quando comparado ao cBN.

3.1. Indicador global de sustentabilidade do processo

De modo a permitir uma comparação direta dos resultados para as diferentes condições, todos os indicadores foram normalizados e com sua somatória elaborou-se o IDGS. Os resultados do IDGS estão apresentados na Tab. (1) para todos os materiais e taxas testadas. Os números em negrito representam a condição com maior desempenho, facilitando-se a tomada de decisão na implementação de um novo processo ou escolha de um novo ferramental. Para os materiais Inc.751 e Sil.1, observa-se que o aumento da taxa de remoção de material é benéfico ao rebolo convencional 3NQ (aumento do IDGS). Tal fato é inversamente proporcional ao rebolo de cBN. O mesmo fenômeno não ocorreu para o material 21-43, pois o índice de desempenho para o rebolo 3NQ foi superior ao cBN apenas na condição com a taxa de $100 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$.

Tabela 1. IDGS para todas as condições analisadas

Q' _w [mm ³ /mm.min]	Inc.751		21-43		Sil.1	
	3NQ	cBN	3NQ	cBN	3NQ	cBN
50	4,45	5,55_↑25%	4,47	5,53_↑24%	5,19_↑8%	4,81
100	4,77	5,23_↑10%	5,10_↑4%	4,90	5,23_↑10%	4,77
150	5,07_↑3%	4,93	4,30	5,70_↑33%	5,55_↑25%	4,45

4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

Baseando-se na metodologia proposta de avaliação dos IS para os processos de retificação, pode-se concluir que:

- A avaliação dos ISs e do IDGS 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. Em termos sociais, não houve diferença dos níveis de ruído laboral entre os rebolos, taxas e materiais testados. Já em termos ambientais, para a maioria dos casos, o cBN é uma alternativa ambientalmente vantajosa.
- Para a retificação do material Inc.751, o rebolo de cBN é vantajoso nas taxas, Q'_w , de 50 e $100 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$. Já na maior taxa ($Q'_w = 150 \text{ mm}^3/\text{mm.min}$) o 3NQ é sustentavelmente superior. Para o material 21-43, o rebolo 3NQ foi superior apenas na taxa mediana. Já para o material Sil.1, o rebolo 3NQ apresentou um melhor desempenho quando comparado ao cBN, independentemente da condição testada.

Como sugestões para trabalhos futuros:

- Pode-se atribuir pesos (matriz de prioridades) para a construção dos parâmetros normalizados e realizar uma análise ponderada do desempenho do rebolo, levando-se em consideração fatores de prioridade de projetos predeterminados ou critérios de sustentabilidade e realizar a ACV do processo.

5. AGRADECIMENTOS

Aos colaboradores e à agência de fomento: Blaser Swissslube do Brasil Ltda, Federal Mogul Sistemas Automotivos Ltda, Materials Institute of Brazil (MIB), Saint-Gobain Abrasives e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos 2016/12425-4 e 2015/22121-0.

6. REFERÊNCIAS

- Araujo, J.B., 2010. *Desenvolvimento de método de avaliação de desempenho de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Aurich, J.C., Linke, B.S., Hauschild, M., Carrella, M. e Kirsch, B., 2013. "Sustainability of abrasive processes". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 62, p. 653-672.
- Clarens, A.F., Zimmerman, J.B., Keoleian, G.A., Hayes, K.F. e Skerlos, S.J., 2013. "Comparison of Life Cycle Emissions and Energy Consumption for Environmentally Adapted Metalworking Fluid Systems". *Environmental Science & Technology*, Vol. 42, p. 8534-8540.

- Dornfeld, A.D., 2012. *Green manufacturing: fundamentals and applications*. Springer, Berkeley.
- Duflou, J.R., Sutherland, J.W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara S., Hauschild, M. e Kellens, K., 2012. "Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 61, p. 587-609.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), 1997. *ISO 4287: Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters*. ISO.
- Joung, C.B., Carrell, J., Sarkar, P. e Feng, S. C., 2012. "Categorization of indicators for sustainable manufacturing". *Ecological Indicators*, Vol. 24, p. 148-157.
- Linke, B.S., Corman, G.J., Dornfeld, D.A. e Tönissen, S., 2013. "Sustainability indicators for discrete manufacturing processes applied to grinding technology". *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 32, p.556-563.
- Linke, B.S., Das, J., Lam, M. e Ly, C., 2014. "Sustainability indicators for finishing operations based on process performance and part quality". *Procedia CIRP*, Vol. 14, p. 564-569.
- Madison, T.K., 2007. "Technical information for occupational health and safety professionals – recommended changes to OSHA noise exposure dose calculation". *3M JobHealth Highlights*, Vol. 25, p. 1-15.
- Oliveira, J.F.G.; Silva, E.J.; Guo, C.; Hashimoto, F., 2009. "Industrial challenges in grinding". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 58, p. 663-680.
- Pollesch, N.L. e Dale, V.H., 2016. "Normalization in sustainability assessment: Methods and implications". *Ecological Economics*, Vol. 130, p. 195-208.
- Rowe, W.B., Ebbrell, S. e Morgan, M.N., 2004. "Process requirements for cost effective precision grinding". *CIRP Annals*, Vol. 53, p. 255-258.
- Silva, D.A.L., Silva, E.J. e Ometto, A. R., 2011. "Green manufacturing: uma análise da produção científica e de tendências para o futuro". *Production*, Vol. 26, p. 642-655.
- Singh, R. K., Murty, H.R., Gupta, S.K. e Dikshit, A.K., 2012. "An overview of sustainability assessment methodologies". *Ecological Indicators*, Vol. 15, p. 281-299.
- Winter, M., Ibbotson, S., Kara, S. e Herrmann, C., 2015. "Life cycle assessment of cubic boron nitride grinding wheels". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 107, p. 707-721.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

ASSESSMENT OF SUSTAINABILITY INDICATORS FOR THE GRINDING PROCESS: COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN CONVENTIONAL AND CBN GRINDING WHEEL

Adriel Magalhães Souza

Eraldo Jannone da Silva

University of São Paulo, São Carlos School of Engineering, Av. Trabalhador São Carlense, 400 – São Carlos, SP

adrielmagalhaes@usp.br

eraldodasilva@usp.br

Abstract. Green manufacturing is a topic which has been on the rise and aims for the efficient use of energy, material and resources, and may also employ the use of software for the analysis of the impacts of such process on the environment. However, specific databases and a great number of information on the product/process life cycle are needed, which leads to a complex analysis. In order to facilitate, Sustainability Indicators (SIs) are used. Thus, the objective of this paper is to evaluate the SIs in the grinding process (economically-socially-environmentally), comparing the use of a conventional grinding wheel (CGW) to the use of a cubic boron nitride (cBN). The methodology applied on the construction of the SIs in order to obtain efficiency on the roughness (R_a), took into consideration the costs, noise, energy consumption, waste generation, and water consumption. Thus, the Sustainable Development Indicator (SDI) was created. As result, the SIs and SDI provided information that made decision making easier regarding the performance of the GW and/or the ideal conditions. The conclusion reached was that the CGW shows a greater economic performance; the social impacts showed no difference in noise, and as for the environmental aspects, cBN is a profitable alternative.

Keywords: Sustainability indicators, Green manufacturing, Economic/social/environmental impacts

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.