

FERRAMENTA PARA ANÁLISE DO POTENCIAL DE IMPACTO AMBIENTAL: UM ESTUDO DE CASOS EM PROCESSOS ABRASIVOS

Adriel Magalhães Souza

João Marcos Guido do Carmo

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; joao.marcos.carmo@usp.br; eraldodasilva@usp.br

Resumo: A avaliação dos impactos ambientais nos processos abrasivos tem um alto reconhecimento pela indústria, pela atual necessidade de uma manufatura sustentável, sendo a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) uma técnica analítica para analisá-los. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta de análise do potencial de impacto ambiental com base na técnica de ACV para dois processos abrasivos (lixamento e retificação). Para os ensaios de lixamento, foi usinado o aço inoxidável 304L com duas ferramentas (flap discs - cônico e cilíndrico) em duas velocidades de avanço (10 e 15 m/min). Para os ensaios de retificação, foi usinado a superliga Inconel®751 com duas ferramentas (rebolo - convencional e superabrasivo) em duas taxas de remoção específica de material (50 e 150 mm³/mm.min). Para a comparação, foi considerada a mesma unidade funcional (quantidade de material removido). O modelo ambiental foi gerado pelo software Gabi 7.2, levando em consideração o consumo energético e resíduos gerados durante os processos. Em relação aos resultados desse estudo de caso, observou-se de maneira qualitativa e quantitativa que o impacto ambiental gerado pelo lixamento é menor quando comparado à retificação. Concluiu-se que a ferramenta desenvolvida mostrou-se eficiente para comparação do potencial de impacto ambiental dos processos abrasivos.

Palavras chave: Impacto Ambiental. Manufatura Sustentável. Avaliação do Ciclo de Vida

1. INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem por abrasão consistem na remoção de material da peça por meio da ação de grãos abrasivos, os quais são partículas não metálicas, duras, com arestas que podem apresentar forma e orientação irregulares. Pode-se citar como exemplo desse tipo de usinagem os processos de lixamento e retificação (MACHADO *et al.*, 2015).

Segundo Shaw (1996), os processos de lixamento manual utilizam ferramentas abrasivas chamadas abrasivos revestido (do inglês, *Coated Abrasives*). Essas ferramentas possuem uma única camada de partículas abrasivas ligadas a um costado que pode ser tecido, papel, polímero, etc. De acordo com Saint-Gobain (2019), dentro da classe dos *Coated Abrasives*, os *Flap Discs* são ferramentas de remoção de material, polimento e acabamento que possuem três componentes principais: uma placa de apoio, aglutinante e tiras retangulares de lixas abrasivas. Essas lixas são sobrepostas e coladas à placa de suporte rígida de forma uniforme. Segundo Das e Linke (2016), para a realização do processo de lixamento, os *Flap Discs* são colocados em máquinas rotativas de controle manual. A sua execução é extremamente dependente do conhecimento, habilidade, postura e força pessoal dos operadores. Justamente por ser controlada manualmente, a taxa de remoção de material provoca variações nas forças de usinagem as quais a peça de trabalho está sujeita, resultando num impacto direto no atrito, espessura de cavacos e consumo de energia específica.

Segundo Marinescu *et al.* (2007), os processos de retificação utilizam uma ferramenta rotativa denominada de rebolo (partículas abrasivas unidas por um material ligante), normalmente utilizada em altas velocidades de corte, para produzir peças com elevada qualidade superficial e estreitas tolerâncias dimensionais. Malkin e Guo (2008) destacam que esses processos são usualmente aplicados ao final da cadeia de processamento, impactando diretamente no desempenho do produto durante o ciclo de vida do produto.

Linke (2016) cita que os processos abrasivos são tecnologias fundamentais no desenvolvimento de novos sistemas energéticos, bem como na melhoria da eficiência dos produtos existentes. No entanto, a consideração de aspectos de sustentabilidade na usinagem abrasiva está apenas surgindo, mas tem um alto reconhecimento pela indústria.

Para estimular e motivar soluções de manufatura mais sustentáveis, segundo Duflou *et al.* (2012a), surgiu-se a necessidade de adaptar/criar novas regulamentações com critérios mais rigorosos, visando ajustar os padrões de emissão/exposição dos trabalhadores a determinados materiais, conservar insumos (energia, água, resíduos sólidos/líquidos, entre outros). A busca da manufatura ambientalmente sustentável mostra que, de acordo com Duflou *et al.* (2012b), a abordagem teórica de consumo de energia pode levar a equívocos, pois ela não mensura de fato a quantidade real de energia consumida e sim calcula estimativas do consumo a partir de informações das máquinas e tempos de uso, enquanto que as abordagens práticas que envolvem o monitoramento *in-loco* durante o processo (por exemplo, monitoramento da potência e tempo de uso das máquinas-ferramenta em condições industriais) fornecem o consumo real

de energia. Visto que a energia é apenas um dos insumos utilizados na produção, essa análise pode também ser estendida para os demais insumos que podem causar impactos ambientais. Sendo que, segundo Yuan *et al.*, 2012, para se alcançar uma produção sustentável, deve-se considerar toda a cadeia de valor para conhecer os impactos gerados, dessa forma é necessária uma abordagem sistemática de avaliação do ciclo de vida (ACV), uma vez que os impactos ambientais da manufatura se estendem além da fabricação, podendo estar desde à aquisição de matéria-prima até o uso e o final da vida útil do produto.

Segundo Aurich *et al.* (2013), a ACV é uma técnica analítica para avaliar os potenciais de impactos ambientais e de recursos associados a um produto, serviço ou sistema (muitas vezes conjuntamente designados por “produto”). A ACV possui 4 etapas interligadas: definição do objetivo e escopo, análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV), Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e a interpretação do Ciclo de Vida e tem como base uma perspectiva do ciclo de vida do produto considerando todos os processos que são necessários, desde as atividades de mineração ou produção agrícola, para a produção de materiais e componentes através da montagem, distribuição e uso do produto até sua reciclagem, remanufatura ou disposição final (AURICH *et al.*, 2013). Baseando-se nesse contexto, o objetivo desse trabalho é desenvolver uma ferramenta para análise do potencial de impacto ambiental com base na técnica de ACV, tendo como estudo de caso dois processos abrasivos (lixamento e retificação).

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios de lixamento foram realizados em uma bancada automatizada utilizando a esmerilhadeira Bosch 5" GWS 17-125 1700W CIE Eletrônica. Foram utilizados dois tipos de *Flap Discs*: Tipo cônico (referenciado como “CON”), composto por aletas de lixa com costado de tecido, aplicadas em suporte de fibra de vidro cônico e o tipo cilíndrico (referenciado como “CIL”), composto por aletas de lixa com costado de tecido, aplicadas em suporte polimérico cilíndrico. Ambos os tipos são compostos por grãos de óxido de alumínio zirconado com a granulometria 40 e foram utilizadas duas velocidades de avanço (v_f), 10 e 15 m/min resultando em 4 condições diferentes de ensaios, tendo utilizado um corpo de prova para cada condição com uma réplica para cada. Para todos os ensaios, a velocidade de corte (rotação do *Flap Disc*) foi de 10.400 RPM (cerca de 62 m/s), além disso foi mantida uma inclinação de 30° entre a mesa e o *Flap Disc*. Os corpos de prova eram compostos de duas placas de aço inoxidável 304L com as dimensões de 170 x 150 x 2,4 mm unidas com um cordão de solda de 170 mm de comprimento e 2,5 mm de altura composto de aço Inoxidável 308L que foi removido realizando-se 50 passadas osciladas do *Flap Disc* sob o material. Para a verificação do consumo energético, os dados foram coletados diretos da potência dissipada no processo por meio de um sensor de efeito Hall Newtronic NW – SCD. Para a análise de variação de massa dos *Flap Discs* foi utilizada a balança Marte AD200 com precisão de 0,001 g e para a variação de massa dos corpos de prova a balança BEL Engineering, com precisão de 0,01 g.

Os ensaios de retificação foram realizados em uma retificadora cilíndrica externa de mergulho CNC da marca Zema, modelo Numérica G 800-HS. Foram utilizados dois tipos de rebolos: um rebolo convencional de alto desempenho (especificação 3NQ80L10VS3, referenciado como Al_2O_3) e outro superabrasivo de nitreto de boro cúbico (do inglês, *cubic boron nitride* – cBN) (especificação JB126-K150-VSS, referenciado como cBN). Para todos os ensaios. Foram utilizadas duas taxas de remoção específica de material (Q'_w), 50 e 150 mm³/mm.min. Resultando em 4 condições diferentes de ensaio, tendo utilizado um corpo de prova para cada condição com uma réplica para cada. Para todos os ensaios, a velocidade de corte (v_s) foi mantida constante em 80 m/s. Utilizou-se o fluido de corte Vasco 7.000, na vazão de 50 l/min e concentração de 4%, empregando-se dois bocais, velocidade de jato (v_j) de 15 m/s. O volume total de material removido (V_w) foi de 12.000 mm³, a largura de retificação (b_w) foi de 15 mm, a rotação da peça (n_w) foi de 250 rpm e o tempo de *spark-out* (t_{spark}) foi de 5 s (20,8 voltas). Os corpos de prova retificados eram da superliga de níquel denominada comercialmente como Inconel® 751 (também referenciado como UNS N07751, Alloy 751 e WNR 2.4694, mas será doravante referenciado apenas pela abreviação, Inc. 751). Foram utilizados corpos de prova de formato cilíndrico, com diâmetro externo igual a 42,5 mm e 150 mm de comprimento. Para a verificação do consumo energético calculou-se a medição da potência de corte consumida pelo motor do rebolo durante a retificação, pela unidade de controle SINAMICS G120 - CU320 e software STARTER, da Siemens AG. Para a análise do consumo de fluido, utilizou-se o método proposto por Kalla, *et al.* (2009), verificando-se a quantidade de fluido de corte perdido devido à degradação (evaporado) e para as emissões de névoa durante a operação de retificação. Para a análise de variação de massa dos rebolos, calculou-se o desgaste dos rebolos por meio método de impressão, sendo o perfil do rebolo impresso em uma placa de aço SAE 1020 medido em um perfilômetro da Taylor Hobson, modelo Talysurf 50.

A avaliação do desempenho ambiental do processo com a metodologia ACV é relacionada à unidade funcional, assim apenas os modos de operação ativos são considerados, pois são estes que de fato agregam valor à peça. Assim, de modo a validar a ferramenta de análise desenvolvida foi considerada a mesma unidade funcional, sendo ela: quantidade de material removido.

O modelo ambiental dos dois processos estudados foi dividido em duas partes. Os potenciais de impactos gerados por cada parte foram somados ao final do balanceamento de forma a determinar uma aproximação dos potenciais de impactos totais de cada processo. Ressalta-se que este procedimento não altera o resultado, pois os potenciais de impacto de um determinado processo são calculados pelo software de maneira que o potencial de impacto ambiental total do processo é a soma dos potenciais de impacto de cada elemento das suas entradas e saídas. A Figura 1 apresenta o modelo ambiental

dos processos estudados gerado pelo software Gabi 7.2, desenvolvido pela Thinkstep (2020). As entradas foram obtidas pelo banco de dados de ICV do software Gabi 7.2. Tomando-se como exemplo o modelamento ambiental do lixamento (Fig. 1 – a), observa-se que foi adicionado à unidade de processamento (Bloco “BR: Lixamento Manual (Parte A) <u-so>”) os fluxos de entrada referentes ao metal usinado e a energia gasta durante o processo. Na outra unidade de processamento (Bloco “BR: Lixamento Manual (Parte B) <u-so>”) foi adicionado o fluxo de entrada referente ao abrasivo do *Flap Disc*. A unidade de processamento total (Bloco “BR: Lixamento Manual <u-so>”) foi dada pela soma dos impactos ambientais das anteriores, sendo baseada da base de dados *ILCD recommendations*, presente no banco de dados de ICV do Gabi 7.2. Em comparação ao lixamento, para a retificação (Fig. 1 – b) observa-se um fluxo de informação semelhante ao descrito pelo processo anterior, adicionando os fluxos de entrada referente ao ar comprimido utilizado pela máquina durante o processo (e sua energia elétrica gasta para tal) e ao fluido de corte.

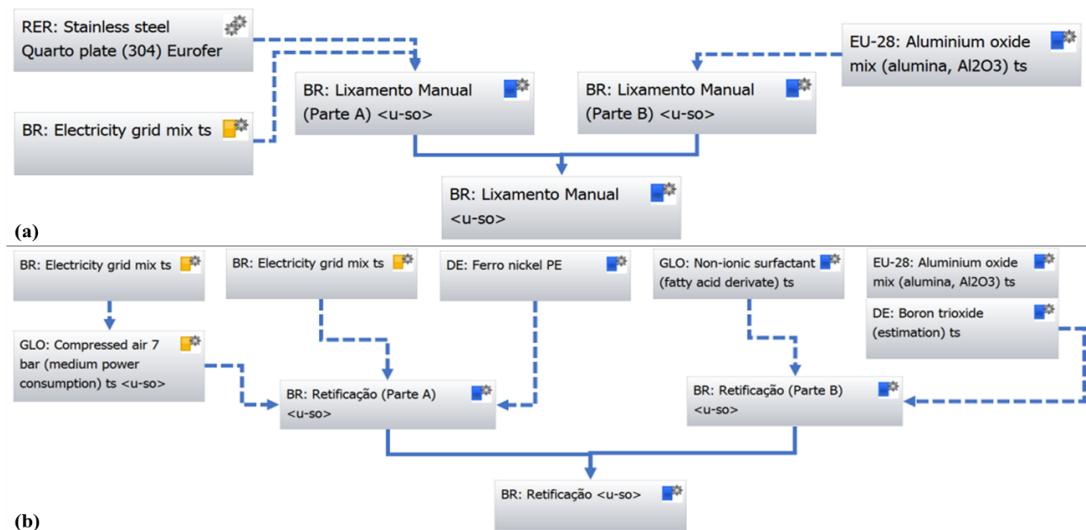


Figura 1. Modelo ambiental dos processos: (a) lixamento e (b) retificação

Para o modelo ambiental do lixamento (Fig. 1 – a), no que diz respeito ao maquinário utilizado, foi considerado apenas a energia elétrica necessária para a esmerilhadeira funcionar durante o processo, representada pelo bloco “BR: Electricity grid mix ts”. Para a modelagem do corpo de prova de aço inox 304L utilizou-se como referência o bloco padrão de aço inox do Gabi 7.2 “RER: Stainless steel Quarto plate (304) Eurofer”. Os *Flap Discs* tiveram seus consumos modelados pelo bloco adicional do Gabi: “EU-28 Aluminium oxide mix (Alumina Al₂O₃) ts”, no qual representa a composição química do óxido de alumínio. Assim, apenas o consumo do abrasivo foi considerado. Outros potenciais de impactos resultantes dos processos de produção do aço inox 304L (tais como, impactos da energia despedida na produção e rejeitos da produção), os *Flap Discs* (tais como: impactos da energia despedida na produção do suporte e na sinterização da camada abrasiva) e a preparação dos corpos de prova (tais como: impacto dos gases/energia durante o processo de soldagem, energia gasta na manufatura dos corpos e rejeitos de produção) não foram considerados, criando-se dessa forma uma das barreiras na ACV.

Para o modelo ambiental da retificação (Fig. 1 – b), no que diz respeito ao maquinário, o suprimento de ar comprimido foi modelado pelo bloco padrão ar comprimido a 7 bar contido no Gabi 7.2 “GLO: Compressed air 7 bar (medium power consumption) ts <u-so>”. Os dois blocos de energia “BR: Electricity grid mix ts” representam a quantidade de energia necessária para o funcionamento da retificadora durante os ensaios, bem como para a disponibilização da quantidade de ar comprimido. Para a modelagem do corpo de prova de Inconel® 751, utilizou-se como referência de composição o seu componente ferro níquel encontrado no bloco padrão do Gabi 7.2 “Ferro Nickel PE”. Os rebolos de Al₂O₃ e de cBN tiveram seus consumos modelados por blocos adicionais do Gabi, sendo eles: “EU-28 Aluminium oxide mix (Alumina Al₂O₃) ts” e “DE Boron trioxide (estimation) ts”, respectivamente, no qual representam a composição dos mesmos, considerando o consumo dos grãos abrasivos na análise. O suprimento de fluido de corte também foi modelado por um bloco adicional do Gabi: “GLO: Non-ionic surfactant (fatty acid derivate) ts”, no qual insere-se a quantidade de fluido perdido devido à degradação (evaporado) e para as emissões de névoa durante a operação de retificação. Outros potenciais de impactos resultantes dos processos de produção do Inconel® 751 (tais como, impactos da energia despedida na produção e rejeitos da produção), rebolos de Al₂O₃ e de cBN (tais como: impactos da energia despedida na produção da flange do rebolo e na sinterização da camada abrasiva), fluido de corte (tais como: insumos e energia necessários para a produção) e preparação dos corpos de prova (tais como: impacto dos gases/energia durante o processo de laminação/torneamento, energia gasta na manufatura dos corpos e rejeitos de produção) não foram considerados, criando-se desta forma mais uma barreira na ACV.

Os fluxos de saída das unidades de processamento não são apresentados no modelo acima, mas são referenciados internamente nos blocos. Os fatores que envolvem a deposição final das ferramentas abrasivas (rebolos e *Flap Discs*) ao final da sua vida útil não são abordados nesta modelagem, logo seus potenciais de impactos também não foram considerados, formando a última barreira da ACV. Assim, devido às limitações do estudo, ao invés de implementar uma análise de toda cadeia de valor (abordagem do tipo “do berço ao túmulo”, do inglês “*cradle-to-grave*”), elaborou-se uma análise do tipo “portão ao portão de fábrica” (do inglês, “*gate-to-gate*”), no qual realizou-se uma abordagem apenas do processo discreto de manufatura.

Dentre as limitações da ACV desenvolvida neste projeto, há a necessidade de se considerar duas observações referentes às análises de processos discretos de manufatura: 1) a definição do sistema de produto se concentra apenas nos processos de manufatura isolados (lixamento e retificação) e 2) não há relação do processo de manufatura com o produto final, conforme ressaltado por Silva (2016). Após essas considerações de recorte e fronteiras da metodologia utilizada, os potenciais de impactos ambientais dos processos de usinagem aqui estudados foram avaliados em 15 categorias diferentes, conforme Tab. 1.

Tabela 1. Potenciais de impactos ambientais analisados

Fator	Descrição	Abreviação	Unidade
1	Potencial de aquecimento global (inc. Carbono Biogênico)	PAG(+CO ₂ _{bio})	kg CO ₂ -eq.
2	Potencial de aquecimento global (excl. Carbono Biogênico)	PAG(-CO ₂ _{bio})	kg CO ₂ -eq.
3	Potencial de esgotamento da camada de ozônio	PECO	kg CFC-11 eq.
4	Potencial de toxicidade humana (Efeitos cancerígenos)	PTH(+can.)	CTUh
5	Potencial de toxicidade humana (Efeitos não cancerígenos)	PTH(-can.)	CTUh
6	Potencial de geração de material particulado	PGMT	kg PM _{2,5} -eq.
7	Potencial de Radiação Ionizante	PTI	kBq U235-eq.
8	Potencial de Formação de Ozono Fotoquímico	PFOF	kg NMVOC
9	Potencial de acidificação	PA	Moles de H ⁺ -eq.
10	Potencial de Eutrofização Terrestre	PET	Moles de N-eq.
11	Potencial de Eutrofização de água doce	PEAD	kg P-eq.
12	Potencial de Eutrofização do mar	PEM	kg N-eq.
13	Potencial de Ecotoxicidade (água doce)	PE	CTUe
14	Potencial de esgotamento de água	PEA	m ³ -eq.
15	Potencial de esgotamento mineral, fóssil e renovável	PEMFR	Sb-eq.

De modo a permitir uma comparação global e direta dos potenciais dos impactos ambientais para ambos os processos e pelos resultados possuírem diferentes unidades e grandezas, os mesmos foram normalizados de acordo com a Eq. (1):

$$ILC_f = \frac{\log_{10}(x_f) - \log_{10}(\mu_f)}{\log_{10}(\sigma_f)} \quad (1)$$

Onde: f é o fator (impacto) analisado; ILC é o índice absoluto com transformação logarítmica (base 10) para compensação das diferenças das magnitudes dos resultados encontrados; x_f é o fator ambiental analisado; μ_f é a média dos potenciais de impactos ambientais desse fator entre os diferentes processos e condições testadas; e σ_f é o desvio padrão da amostra.

De modo a avaliar todos os potenciais de impactos normalizados, fornecendo-se assim um valor para o desempenho do processo que facilite a comparação das condições aqui analisadas, construiu-se o Índice de Desempenho do Potencial de Impacto Ambiental (IDPIA), Eq. (2), sendo que quanto maior esse índice, maior é o potencial de impacto ambiental do processo.

$$IDPIA = \sum_{f=1}^{15} ILC_f \quad (2)$$

Por fim, vale ressaltar os riscos ocupacionais desses processos. Em relação aos fatores ocupacionais, a Norma Regulamentadora (NR) 9 faz a classificações dos riscos em cinco grupos, sendo eles: físicos, químicos, biológicos, ergonômicos e acidentes mecânicos (BRASIL, 2020). A avaliação do potencial de impacto ambiental leva em consideração apenas os três primeiros itens, sendo que neste estudo foram considerados como resultado apenas os riscos físicos (por exemplo, potencial de radiação ionizante) e químicos (por exemplo, toxicidade humana, cancerígeno e não cancerígeno). Embora o escopo deste estudo seja focado apenas na avaliação do impacto ambiental dos processos (no qual levou em consideração apenas aspectos físicos e químicos), é importante ressaltar fatores relacionados aos possíveis impactos humanos (impactos na integridade e saúde dos operadores) que essas operações podem gerar. Dentre alguns riscos que envolvem os operadores e não foi abordado neste estudo, pode-se citar os riscos físicos, (i) exposição contínua

à vibração oriunda da lixadeira, processo de lixamento. Altos níveis de vibração em períodos excessivos de tempo podem ser danosos à saúde do operador. Para quantificar esses riscos, é necessário mensurar com acelerômetros a vibração e assim realizar a análise comparativa. (ii) Exposição contínua ao ruído oriundo das máquinas/equipamentos em ambos os processos. Riscos químicos como poeiras, fumos, névoas entre outros. Para a retificação, foi considerado apenas a exposição a névoa do fluido de corte degradado (evaporado). Todavia, para o lixamento nenhum risco químico foi mensurado. Riscos biológicos como surgimento de fungos e bactérias (no fluido de corte da retificação, por exemplo). Riscos ergonômicos como posturas inadequada do operador, monotonia/repetitividade e outras situações causadoras de estresse físico e/ou psíquico. Riscos de acidentes mecânicos devido ao manuseio incorreto e/ou sem proteção dos equipamentos e máquinas/ferramentas inadequadas ou defeituosas.

Dessa forma, fica definido as fronteiras do sistema da ferramenta para análise do potencial de impacto ambiental desenvolvida neste estudo, sendo que essa determinação das fronteiras do sistema é fundamental, pois ela direciona o processo decisório durante a avaliação de sustentabilidade dos processos. A análise, tanto no lixamento quanto na retificação, trata-se da abordagem *gate-to-gate*, utilizando apenas a etapa da manufatura, desconsiderando o restante do ciclo de vida de produtos intermediários e/ou do produto final.

3. RESULTADOS

A partir dos modelos ambientais desenvolvidos no software Gabi 7.2 e os dados de ICV fornecidos, foi possível gerar os potenciais de impacto ambiental para os diferentes processos e condições aqui testadas (ver Tab. 2, na qual a descrição dos fatores de 1-15 está na Tab. 1).

Tabela 2. Potenciais de impacto ambiental para o lixamento e retificação

	Lixamento				Retificação			
	CON		CIL		Al ₂ O ₃		cBN	
	v _f [m/min]				Q' _w [mm ³ /mm.min]			
	10	15	10	15	50	150	50	150
1	3,91E-02	3,30E-02	4,23E-02	2,71E-02	2,62E+25	1,27E+25	2,62E+25	1,27E+25
2	4,18E-02	3,52E-02	4,51E-02	2,88E-02	2,62E+25	1,28E+25	2,62E+25	1,28E+25
3	2,31E-09	1,92E-09	2,44E-09	1,46E-09	2,42E+15	1,18E+15	2,42E+15	1,18E+15
4	3,26E-10	2,73E-10	3,49E-10	2,15E-10	7,88E+16	3,83E+16	7,88E+16	3,83E+16
5	2,15E-08	1,79E-08	2,28E-08	1,38E-08	9,59E+17	4,66E+17	9,59E+17	4,66E+17
6	3,53E-05	2,97E-05	3,79E-05	2,40E-05	1,34E+22	6,51E+21	1,34E+22	6,51E+21
7	6,10E-04	5,23E-04	6,77E-04	4,70E-04	7,70E+23	3,74E+23	7,70E+23	3,74E+23
8	1,61E-04	1,35E-04	1,73E-04	1,09E-04	5,89E+22	2,86E+22	5,89E+22	2,86E+22
9	6,57E-04	5,48E-04	6,98E-04	4,27E-04	1,66E+23	8,08E+22	1,66E+23	8,08E+22
10	5,07E-04	4,27E-04	5,46E-04	3,47E-04	2,12E+23	1,03E+23	2,12E+23	1,03E+23
11	2,27E-08	1,92E-08	2,55E-08	1,80E-08	1,30E+20	6,32E+19	1,30E+20	6,32E+19
12	4,56E-05	3,84E-05	4,91E-05	3,12E-05	2,40E+22	1,17E+22	2,40E+22	1,17E+22
13	4,36E-02	3,62E-02	4,61E-02	2,78E-02	9,32E+24	4,53E+24	9,32E+24	4,53E+24
14	8,48E-04	8,31E-04	1,12E-03	1,11E-03	7,17E+23	3,48E+23	7,17E+23	3,48E+23
15	3,17E-06	2,65E-06	3,38E-06	2,05E-06	3,90E+19	1,89E+19	3,90E+19	1,89E+19

Avaliou-se separadamente as operações de lixamento e retificação, a fim de se determinar quais das condições testadas foram as mais impactantes de uma forma geral. A partir de uma média ponderada entre os 15 potenciais de impacto da Tab 2, determinou-se o impacto ambiental total de cada condição testada, conforme apresentado na Fig. 2.

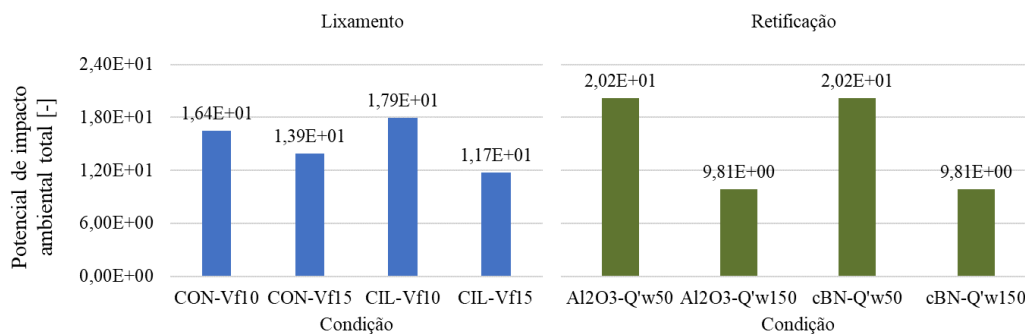


Figura 2. Potenciais de impacto ambiental total dos processos abrasivos

No lixamento, a condição que se utilizou o *Flap Disc CIL* a 15 m/min foi a que resultou um menor potencial de impacto ambiental, enquanto que a condição que se utilizou o *Flap Disc CIL* a 10 m/min foi a que resultou um maior potencial de impacto ambiental. Na retificação, para ambos os rebolos, as condições testadas em 50 mm³/mm.min, foram as que apresentaram maiores potenciais de impacto ambiental.

Em relação ao lixamento, observou-se que tanto para o *Flap Disc CIL* quanto para o *Flap Disc CON*, maiores taxas de remoção proporcionaram menores valores em todos os potenciais de impactos. Desta forma, considerando que com uma maior taxa de remoção as 50 passadas eram realizadas em um menor tempo, menos energia era gasta proporcionando uma diminuição dos potenciais de impactos associados a esse aspecto. Em relação à retificação, essa análise também é válida, para ambos os rebolos. Assim, tanto para o processo de lixamento quanto para o processo de retificação, para todos os casos, observa-se a redução do potencial de impacto ambiental com o aumento da taxa específica de remoção. Tal fato se deve ao menor tempo de processo, pois um menor tempo de ciclo consome menos energia elétrica, e especificamente a retificação, menos ar comprimido e uma menor quantidade de fluido foi evaporada durante a operação.

Adicionalmente, pode-se salientar que não ocorreu uma diferença significativa no potencial de impacto ambiental associado aos diferentes abrasivos (Convencional- Al₂O₃ e superabrasivo-cBN). Por isso, os resultados encontrados para os diferentes rebolos foram semelhantes. Assim, para deixar a análise mais refinada, em trabalhos futuros, dever-se-á considerar a unidade funcional em escala industrial, no qual utiliza-se uma grande quantidade rebolos, visto que o rebolo convencional tende a ter um desgaste maior que o rebolo de cBN, logo, a longo prazo, poderá ocorrer um maior descarte em massa de abrasivo e, consequentemente, maior potencial de impacto ambiental.

A partir dos resultados encontrados na Tab. 2, os potenciais de impactos foram normalizados, conforme Eq. (1). De modo a permitir uma visualização gráfica dos potenciais de impactos ambientais construiu-se o gráfico de radar (ou de teia/aranha), conforme Fig. 3 (vide Tab. 1 para descrição dos fatores de 1-15), onde é apresentado comparativamente o desempenho ambiental do processo de lixamento para a ferramenta CON e v_f igual a 10 m/min e do processo de retificação com o rebolo convencional Al₂O₃, com Q'_w igual a 50 mm³/mm.min. As demais condições não foram apresentadas no gráfico por terem apresentado curvas muito próximas. Considerando que os potenciais de impacto devem sempre ser reduzidos ou eliminados, quanto menor a área no gráfico radar, melhor o desempenho ambiental. Para o caso em questão, pode-se verificar qualitativamente que há uma diferença considerável de desempenho quando se compara os dois processos, sendo que o processo de lixamento apresentou menor potencial de impacto ambiental quando comparado ao potencial de impacto do processo de retificação.

Avaliou-se quantitativamente os impactos normalizados por meio da construção do Índice de Desempenho do Potencial de Impacto Ambiental (IDPIA), conforme Eq. (2). A Tabela 3 apresenta os valores do IDIA para todas as condições e processos aqui testados. Nota-se que os valores desse índice encontrados para o lixamento são bem menores (aproximadamente 90 vezes) quando comparados aos valores encontrados para a retificação. Tal fato indica quantitativamente o maior potencial de impacto ambiental gerado pelo processo de retificação. Além disso, verifica-se que os valores do IDIA foram próximos para as diferentes ferramentas e condições testadas no lixamento, indicando um potencial de impacto ambiental semelhante. Já para a retificação, nota-se uma diferença mais acentuada entre as duas taxas testadas (aproximadamente 4 vezes), significando um maior potencial de impacto ambiental na menor taxa. Isso se deve ao menor tempo de processamento, conforme já discutido anteriormente. Dessa forma, a ferramenta de análise desenvolvida foi validada e mostrou-se eficiente para avaliar o potencial de impacto ambiental dos dois processos abrasivos. Porém, é importante ressaltar as limitações imposta à análise (abordagem “gate-to-gate”), no qual não se refere ao uso de outros recursos naturais para a produção dos bens ou mesmo os potenciais de impactos ambientais da fabricação, uso e descarte das ferramentas e subproduto da usinagem. Assim, para uma análise completa dos potenciais de impactos ambientais, buscar-se-á realizar uma análise de toda cadeia de valor (abordagem “cradle-to-grave”).

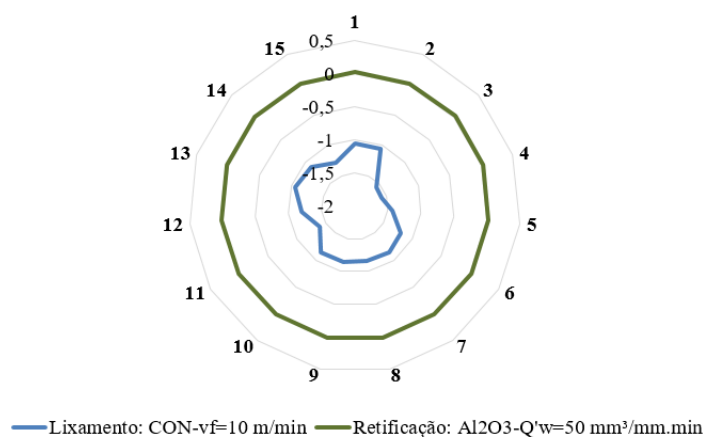


Figura 3. Comparação do potencial de impacto ambiental entre o lixamento e retificação

Tabela 3. Potenciais de impacto ambiental normalizados

	Lixamento				Retificação			
	CON		CIL		Al ₂ O ₃		cBN	
	v _f [m/min]				Q' _w [mm ³ /mm.min]			
	10	15	10	15	50	150	50	150
IDPIA	-18,489	-18,5406	-18,4627	-18,5978	0,3074	0,0835	0,3074	0,0835

Os processos de lixamento e retificação possuem diferentes propósitos dentro de uma cadeia de valor e as expectativas de qualidade superficial e tolerâncias dimensional e geométrica são distintas, desta forma a ferramenta de análise desenvolvida possui ênfase no entendimento da particularidade de cada equipamento, visando reduzir o consumo energético, no tocante a relação energia total/taxa de remoção ou energia total/rugosidade obtida e/ou desgaste da ferramenta, de forma a diminuir os potenciais de impactos ambientais no momento de sua execução. Tais considerações podem ser utilizadas por empresas que utilizem esses processos para que possam ser tomadas decisões relacionadas a escolha de condições, visando a redução de seus potenciais impactos ambientais.

É importante ressaltar que a retificadora necessita de uma série de dispositivos periféricos para funcionar (como por exemplo: dressadores rotativos, emissão acústica, sistemas de refrigeração/limpeza da região de contato rebolo-peça eficientes, entre outros), ao contrário da esmerilhadeira, mesmo que esteja no modo ativo. Assim, para o processo de retificação, a maior parcela de energia despendida é referente ao estágio ocioso da máquina, característica de um processo de *Equipment Heavy*. Já para o processo de lixamento, a análise de potência mostrou que a principal parcela de energia consumida ocorre durante a execução do processo, podendo-se assim defini-lo como *Process Heavy*.

No caso do processo de retificação (*Equipment Heavy*), além de otimizar a ferramenta de corte, deve-se desligar, melhorar o desempenho ou eliminar periféricos não utilizados, visando reduzir a energia despendida no estágio ocioso, quando não há remoção de material.

No caso do lixamento, caracterizado por ser *Process Heavy*, a esmerilhadeira utilizada só é dotada de um único motor que vai proporcionar a rotação do disco, desta forma a eficiência do disco de lixamento e sua correta estratégia de utilização manual (aliado à experiência do operador) são fundamentais para a redução do consumo de energia.

4. CONCLUSÕES

A partir da metodologia desenvolvida, pode-se concluir que:

- A avaliação do desempenho dos processos abrasivos e suas ferramentas de corte pelo método de ACV (abordagem “gate-to-gate”) mostrou-se eficaz, permitindo analisar aspectos ambientais dos processos frente à diferentes recursos de entrada dos processos, apesar das limitações imposta à análise, tais como o uso de outros recursos naturais para a produção dos bens ou mesmo os potenciais de impactos ambientais da fabricação, uso e descarte das ferramentas e subproduto da usinagem.
- A partir dos resultados do potencial de impacto ambiental apresentados para o processo de lixamento e de retificação, pode-se concluir que o tempo de processo (intimamente ligado ao consumo energético) é um fator que impacta diretamente no desempenho ambiental, além do desempenho de produtividade.
- Para o caso em questão, o potencial de impacto ambiental gerado pelo processo de lixamento é menor quando comparado ao processo de retificação.
- A ferramenta de análise desenvolvida mostrou-se eficiente para avaliar o potencial de impacto ambiental dos dois processos abrasivos. O tipo de análise que essa ferramenta resulta pode agregar valor para empresas que executem esses tipos de operações em sua cadeia produtiva, podendo direcionar e adicionar critérios de decisão para a escolha de parâmetros/ferramentas que envolvam aspectos ambientais.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Considerar o uso em escala industrial dos abrasivos para o cálculo dos impactos, visto que o rebolo convencional tende a ter um desgaste maior que o rebolo de cBN, logo, a longo prazo, terá um maior descarte em massa de abrasivo e, conseqüentemente, poderá apresentar maior potencial de impacto ambiental.
- Expandir as fronteiras do ciclo de vida para as ferramentas, podendo-se dessa forma investigar os potenciais de impactos ambientais gerados nos processos de fabricação das ferramentas abrasivas em questão e a deposição final, ao final da vida útil, realizando-se assim uma abordagem de análise do tipo “cradle-to-grave”.

5. REFERÊNCIAS

- Aurich, J.C., Linke, B., Hauschild, M., Carrella, M. e Kirsch, B., 2013. “Sustainability of abrasive processes”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 62, p. 653-672.
- Brasil, 2020. *NR 9 - Avaliação e Controle das Exposições Ocupacionais a Agentes Físicos, Químicos e Biológicos*. Brasília: Ministério da Economia, Secretaria Especial de Previdência e Trabalho, Portaria Nº 6.735. 10 Ago. 2020 <https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/NR-09-atualizada-2020.pdf>.

- Das, J. e Linke, B., 2016. "Effect of manual grinding operations on surface integrity". *Procedia CIRP*, Vol. 45, p. 95–98.
- Duflou, J.R., Sutherland, J.W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., Hauschild, M. e Kellens, K., 2012a. "Towards energy and resource efficient manufacturing: A process and systems approach". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 63, p. 587–609.
- Duflou, J.R., Kellens, K., Reinaldi, Guo, Y e Dewulf, W., 2012b. "Critical comparison of methods to determine the energy input for discrete manufacturing processes". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 61, p. 63–66.
- Kalla D., Twomey J. e Overcash M., 2009. "MR4 turning process: unit process life cycle inventory". UPLCI Online DatabaseGoogle Scholar.
- Linke, B.S., 2016. *Life Cycle and Sustainability of Abrasive Tools*. RWTH, Alemanha, 1ª edição.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T. e Silva, M.B., 2015. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Edgard Blucher Ltda, Brasil, 3ª edição.
- Malkin, S. e Guo, C., 2008. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. Industrial Press, Estados Unidos, 2ª edição.
- Marinescu, I.D., Hitchiner, M.P., Uhlmann, E. Rowe, W.B. e Inasaki, I., 2007. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. Taylor & Francis Group LLC, Estados Unidos, 1ª edição.
- Saint-Gobain, 2019. "Abrasive product solutions for the Full Line Stock Industrial Market". 15 Nov. 2020 <<https://www.nortonabrasives.com/sga-common/files/document/catalog-nortonindustrial-7362-lr-bookmarked.pdf>>
- Shaw, M.C., 1996. *Principles of Abrasive Processing*. Oxford University Press, Inglaterra, 1ª edição.
- Silva, D.A.L., 2016. *Gestão do Ciclo de Vida de produtos por meio da avaliação e monitoramento ambiental de processos de manufatura: Procedimento e estudos de caso*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Thinkstep, 2020. "GaBi Life Cycle Engineering Suite". 10 Dez. 2020 <https://www.gabi-software.com/uploads/media/GaBi_Life_Cycle_Engineering_Suite_24.pdf>.
- Yuan, C.; Zhai, Q. e Dornfeld, D., 2012. "A three dimensional system approach for environmentally sustainable manufacturing". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 61, p. 39–42.

6. AGRADECIMENTOS

Ao apoio das empresas Saint-Gobain e Blaser Swissslube do Brasil Ltda e da agência de fomento Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - processos nº 2016/12425-4 e 2015/22121-0.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

TOOL FOR POTENTIAL ENVIRONMENTAL IMPACT ANALYSIS: A CASE STUDY IN ABRASIVE PROCESSES

Adriel Magalhães Souza

João Marcos Guido do Carmo

Eraldo Jannone da Silva

University of São Paulo, São Carlos School of Engineering, Av. Trabalhador São Carlense, 400, São Carlos, SP
e-mails

Abstract: The evaluation of the environmental impacts in the abrasive processes has a high recognition by the industry, due to the current need for a sustainable manufacture, being the Life Cycle Assessment (LCA) an analytical technique to analyze them. The objective of this work is to develop a tool for potential environmental impact analysis based on LCA technique for two abrasive processes (sanding and grinding). For the sanding tests, 304L stainless steel was machined with two tools (Flap Discs – conical and cylindrical), using two feed rates (10 and 15 m/min). For the grinding tests, Inconel®751 superalloy was ground with two tools (grinding wheels - conventional and superabrasive), using two specific removal rates (50 and 150 mm³/mm.min). For comparison, the same functional unit (amount of material removed) was considered. The environmental model was generated by the Gabi 7.2 software, taking into account energy consumption and waste generated during the processes. Regarding the results of this case study, it was observed in a qualitative and quantitative way that the environmental impact generated by sanding is less when compared to grinding. It was concluded that the developed analysis tool proved to be efficient for comparing the potential environmental impact of abrasive processes.

Keywords: Environmental Impact, Sustainable Manufacturing, Life Cycle Assessment

RESPONSIBILITY NOTICE

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