

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

João Marcos Guido do Carmo

Sustentabilidade em processos abrasivos manuais: um estudo do uso de Indicadores e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na aplicação de *Flap Discs*

São Carlos

2019

João Marcos Guido do Carmo

Sustentabilidade em processos abrasivos manuais: um estudo do uso de Indicadores e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na aplicação de *Flap Discs*

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof. Assoc. Eraldo Jannone da Silva

**São Carlos
2019**

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).

C287s Carmo, João Marcos Guido do
Sustentabilidade em processos abrasivos manuais: um estudo do uso de indicadores e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na aplicação de Flap Discs / João Marcos Guido do Carmo; orientador Eraldo Jannone da Silva. São Carlos, 2019.

Monografia (Graduação em Engenharia de Produção Mecânica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

1. Indicadores de sustentabilidade. 2. Avaliação do Ciclo de Vida. 3. Lixamento Manual. 4. Flap Disc. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: João Marcos Guido do Carmo
Título do TCC: Sustentabilidade em processos abrasivos manuais: um estudo do uso de Indicadores e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na aplicação de Flap Discs
Data de defesa: 30/10/2019

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Associado Eraldo Jannone da Silva (orientador)	APROVADO
Instituição: EESC - SEP	
Professor Associado Alessandro Roger Rodrigues	Aprovado
Instituição: EESC - SEM	
Professor Doutor Alex Camilli Bottene	Aprovado
Instituição: Insper: Ensino Superior em Negócios, Direito e Engenharia -	

Presidente da Banca: **Professor Associado Eraldo Jannone da Silva**

*Este trabalho é dedicado ao meu pai Sebastião (in memoriam),
por sempre incentivar meus estudos e despertar em mim
o interesse pelo bonito mundo da manufatura.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais **Sebastião do Carmo Filho** (*in memoriam*) e **Izilda Ap. Guido do Carmo**, que sempre proporcionaram a mim educação, saúde e construção de valores para a vida.

À todos os meus outros familiares, especialmente às minhas irmãs Giovana Guido do Carmo e Renata Guido do Carmo, que sempre estão ao meu lado.

Ao meu orientador de duas iniciações científicas, estágio e deste trabalho de conclusão de curso, Prof. Assoc. Eraldo Jannone da Silva, que em três anos e meio foi um grande provedor de conhecimentos e oportunidades profissionais.

Ao Prof. Assoc. Alessandro Roger Rodrigues e ao Professor Dr. Alex Camilli Bottene, que durante à minha formação, me trouxeram grande base para o conhecimento necessário para este trabalho. Foi um prazer tê-los como Banca examinadora.

Ao técnico Tiago Monteiro, pelos ensinamentos de processos de usinagem e por ter liderado a manufatura de diversos componentes utilizados neste trabalho.

À Juliana Paganelli, que devido ao seu compromisso e trabalho impecável na administração do Laboratório LAPRAS, foi uma pessoa crucial para o suprimentos de recursos para o esse projeto e cuidados burocráticos.

À Norton Saint-Gobain, pelo suprimento de recursos e conhecimento técnico da aplicação do processo de lixamento estudado neste trabalho.

Aos meus companheiros do projeto “Avaliação de indicadores de sustentabilidade para processos de usinagem por abrasão”, Adriel Magalhães, Vanessa Narumi e Luisa Scrideli, por contribuírem por todo trabalho e reflexões sobre o assunto.

Aos meus companheiros de estágio, Marco Aurélio Mijam, Guilherme Rocha, Camila Stenico e Bruna Dell’Avanzi, por todo apoio durante a fase final deste trabalho e a todos os alunos do Laboratório LAPRAS que contribuíram de alguma forma.

Ao meu amigo e companheiro de moradia durante a graduação Henrique Shoiti Matsui, que sempre me deu todo tipo de apoio e sempre acreditou e torceu pelas minhas ambições. Você é o irmão que a vida me deu!

A todos meus amigos e professores que sempre estiveram ao meu lado.

Aos Departamentos de Eng. Mecânica e de Eng. de Materiais da USP de São Carlos, pelo suprimento técnico e intelectual utilizado neste trabalho.

À CNPq, pelo fomento dos meus dois projetos de Iniciação Científica que originaram esse trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

CARMO, J.M.G. **Sustentabilidade em processos abrasivos manuais: um estudo do uso de Indicadores e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na aplicação de Flap Discs**. 2019. 60p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Processos abrasivos manuais são largamente utilizados no mercado de construção, fundição, reparação automobilística e indústrias de soldagem. Há uma preocupação na execução de tais processos devido à possível geração de impactos ambientais resultantes de suas emissões e impactos sociais, uma vez que a sua execução pode ser danosa à saúde dos operadores envolvidos. Visando mitigar ou reduzir tais impactos, as empresas têm buscado formas de conhecer, entender e quantificá-los para poder implementar práticas preventivas e corretivas visando o bem-estar ambiental, social e econômico. Assim o objetivo desta monografia é desenvolver uma metodologia de análise de sustentabilidade para o lixamento manual com uso de Flap Discs a partir de análises comparativas dos resultados entre diferentes condições da sua execução. A metodologia de análise comparativa das condições testadas deu-se pela avaliação da influência das variáveis de entrada (velocidades de avanço, geometrias da ferramenta e inclinações da esmerilhadeira) nas variáveis de saída do processo (consumo energético, vibração, ruído, geração de resíduos sólidos) e na qualidade superficial da peça trabalhada (rugosidade). Todas as variáveis de saída tiveram o papel fundamental para fornecer dados quantitativos para a análise de sustentabilidade que inclui os indicadores de sustentabilidade que normalizam parâmetros de qualidade ou de desempenho pela utilização de certo recurso e também para a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida – ACV. Como resultados, observou-se que é possível utilizar os valores dos indicadores e dos potenciais de impactos gerados pela ACV para classificação de melhores resultados. Como conclusão, o estudo de sustentabilidade pode auxiliar a tomada de decisão referente a quais condições o lixamento deve ser executado para que os resultados finais estejam alinhados à estratégia de certa empresa.

Palavras-chave: Indicadores de sustentabilidade. Avaliação do Ciclo de Vida. Lixamento Manual. *Flap Disc*.

ABSTRACT

CARMO, J.M.G. **Sustainability in manual abrasive processes: a study of the use of Indicators and Life Cycle Assessment (LCA) in the application of *Flap Discs***. 2019. 60p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Manual abrasive processes are widely used in the construction, foundry, auto repair, and welding industries. There is a concern in the execution of such processes due to the possible generation of environmental impacts resulting from their emissions and social impacts, as their execution may damage the health of the operators involved. In order to mitigate or reduce such impacts, the companies have been looking for ways to know, understand and quantify them to implement preventive and corrective practices aimed at environmental, social and economic well-being. Thus the goal of this monograph is to develop a sustainability analysis methodology for manual sanding using Flap Discs from a comparative analysis of the results between different conditions of its execution. The methodology of comparative analysis of the tested conditions was based on the evaluation of the influence of the input variables (feed rates, tool geometries, and grinder inclination) on the process output variables (energy consumption, vibration, noise, solid waste generation) and surface quality of the workpiece (roughness). All output variables played a key role in providing quantitative data for sustainability analysis that includes sustainability indicators that normalize quality or performance parameters by the use of a certain resource and also for the application of the Life Cycle Assessment - LCA. As a result, it was observed that it is possible to use the values of the indicators and the potentials of impacts generated by the LCA to classify the best results. In conclusion, the sustainability study can help in making decisions about which conditions sanding should be performed so that the end results are aligned with some company's strategy.

Keywords: Sustainability indicators. Life Cycle Assessment. Manual sanding. Flap Disc.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia da análise sistemática UPLCI.	8
Figura 2 – As quatro fases da Avaliação do Ciclo de Vida e suas aplicações.	9
Figura 3 – Vista lateral de uma ferramenta com revestimento de abrasivos.	10
Figura 4 – Detalhe esquemático dos <i>Flap Discs</i> : O tipo 29 cônico indicado para altas remoções de material e o tipo 27 cilíndrico indicado para operações de acabamento.	12
Figura 5 – Desenho esquemático com parâmetros de corte do processo de retificação frontal utilizando uma ponta montada.	13
Figura 6 – Simplificação do perfil de potência dissipada por uma retificadora durante um processo de retificação.	14
Figura 7 – Sistemas de coordenadas vetoriais de vibração manual-braço.	15
Figura 8 – Comparação do projeto antes da manufatura e depois com a bancada de testes finalizada.	19
Figura 9 – Bancada de testes com detalhes de seus componentes.	20
Figura 10 – Eixos referenciais adotados para o dispositivo de lixamento.	20
Figura 11 – Detalhe esquemático do ajuste da mola para controle da força normal F_z	21
Figura 12 – Sistema para automação da bancada de experimentação	22
Figura 13 – Seção transversal do corpo de prova proposto para a experimentação.	22
Figura 14 – Sistema de automação do processo MAG utilizado para a soldagem.	24
Figura 15 – Corpo de prova posicionado antes da soldagem.	24
Figura 16 – Planejamento dos parâmetros dos ensaios.	25
Figura 17 – Esquema do ciclo de lixamento: passada de avanço e passada de recuo.	26
Figura 18 – Relação trigonométrica das potências existentes em um motor elétrico.	27
Figura 19 – Estruturação para o sensor de efeito Hall.	28
Figura 20 – Correlação entre o sinal do sensor de efeito Hall e a potência dissipada.	29
Figura 21 – Acelerômetros PCB Piezotronics, sendo no eixo x o modelo 353B03 e no eixo y o modelo 352C33.	30
Figura 22 – Rugosímetro Taylor Hobson Precision - FormTalysurf 50.	31
Figura 23 – À esquerda, a medição de rugosidade no cordão de solda antes da realização do lixamento e à direita, a medição de rugosidade no cordão de solda após a realização do lixamento.	32
Figura 24 – Detalhes do posicionamento da ponta do rugosímetro durante as medições.	32
Figura 25 – Deslocamento do gráfico de potência em função do tempo para análise do consumo energético no “Estágio de Usinagem”.	34

Figura 26 – Visão lateral e superior (da esquerda para a direita) da execução do lixamento manual com o uso de <i>Flap Discs</i> onde são representadas as grandezas de corte do processo.	35
Figura 27 – Visão frontal de representação do aumento progressivo da penetração de trabalho (a_e) durante a execução do lixamento manual.	36
Figura 28 – Diagrama de Fluxos do processo de lixamento manual.	43
Figura 29 – Estudo de entradas (<i>inputs</i>) e saídas (<i>outputs</i>) do processo.	43
Figura 30 – Interface do GaBi na apresentação dos potenciais impactos.	44
Figura 31 – Modelagem ambiental do processo de lixamento manual pelo software GaBi.	45
Figura 32 – Indicadores de desempenho do lixamento manual.	47
Figura 33 – Comparativo de atuação de <i>Flap Discs</i> diferentes com a mesma velocidade de avanço v_f e inclinação θ_f	48
Figura 34 – Comparativo do desgaste visual de <i>Flap Discs</i> testados nas mesmas condições de velocidade de avanço v_f e inclinação θ_f	49
Figura 35 – Potenciais de impactos do lixamento manual.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação da Relação $G_{(Modificada)}$ considerando as condições de testes inclinação e v_f constantes.	48
Tabela 2 – Valores dos indicadores de sustentabilidade para cada condição testada.	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos <i>Flap Discs</i> selecionados.	25
Quadro 2 – Definições do processo para a ACV.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
CO ₂ PE!	<i>Cooperative Effort on Processes Emissions in Manufacturing</i> (em português: Esforço Cooperativo Sobre as Emissões de Processos na Fabricação)
DC	<i>Direct Current</i> (em português: Corrente Contínua)
EIIs	<i>Energy-Intensive Industries</i> (em português: Indústrias de Consumo Intensivo de Energia)
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (em português: Organização Internacional para Padronização)
LAPRAS	Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade
MAG	<i>Metal Active Gas</i> (em português: Metal e Gás Ativo)
NBR	Norma Brasileira
NR	Norma Regulamentadora
NUMA	Núcleo de Manufatura Avançada
RMS	<i>Root Mean Square</i> (em português: Valor Quadrático Médio)
UC	<i>University of California</i> (em português: Universidade da Califórnia)
UPLCI	<i>Unit Process Life Cycle Inventory</i> (em português: Inventário de Ciclo de Vida de Unidade de Processamento)
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

θ_c	Ângulo entre os chanfros da base do cordão [graus]
η_{sust}	Indicador de sustentabilidade [-]
A_c	Área da seção do cordão excedente à base [mm^2]
a_e	Penetração de trabalho [mm]
a_p	Profundidade de usinagem [mm]
$D_{Primitivo}$	Diâmetro primitivo da engrenagem [m]
e_b	Energia despendida no estado básico [J]
e_o	Energia despendida no estado ocioso [J]
e_u	Energia despendida na usinagem [J]
H_b	Espessura da chapa de aço inox [mm]
h_c	Altura do cordão de solda [mm]
L_b	Largura da base do cordão [mm]
l_c	Comprimento da chapa e do cordão de solda [mm]
l_n	Comprimento de avaliação de rugosidade [mm]
l_r	Comprimento de amostragem de rugosidade [mm]
n_d	Velocidade de rotação da ferramenta abrasiva [RPM]
$n_{Passadas}$	Quantidade de passadas da esmerilhadeira no corpo de prova [-]
P_b	Potência dissipada no estado básico [W]
P_o	Potência dissipada no estado ocioso [W]
P_u	Potência dissipada na usinagem [W]
Q_w	Taxa de remoção de material [mm^3/min]
R_a	Rugosidade média aritmética [μm]
R_z	Distância média entre os cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos dentro da amostra medida [μm]

t_i	Tempo gasto no estado básico [s]
t_{m+d}	Tempo gasto para manipulação e dressagem [s]
t_u	Tempo gasto na usinagem [s]
v_f	Velocidade de avanço [m/min]
$v_{Rotação}$	Velocidade de rotação do eixo do motor de passo [RPM]
V_s	Volume desgastado da ferramenta [mm ³]
V_w	Volume de material removido da peça [mm ³]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.2	Contextualização	1
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Objetivo Geral	3
1.3.2	Objetivos Específicos	4
2	REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1	Avaliação do Ciclo de Vida	5
2.1.1	Fase 1: Definição de objetivo e escopo da ACV	5
2.1.2	Fase 2: Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)	7
2.1.3	Fase 3: Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)	9
2.1.4	Fase 4: Interpretação do ciclo de vida	9
2.2	Processos abrasivos manuais	9
2.2.1	<i>Coated Abrasives</i>	10
2.2.2	<i>Flap Discs</i> e suas aplicações	11
2.2.3	Características e emissões do processo	12
2.2.3.1	Taxa de remoção de material (Q_w)	12
2.2.3.2	Consumo energético	13
2.2.3.3	Vibração mecânica	14
2.2.3.4	Emissão de ruído	15
2.2.4	Indicadores de desempenho e sustentabilidade	16
3	METODOLOGIA	19
3.1	Fase 1: Projeto e planejamento	19
3.1.1	Projeto e manufatura da bancada de testes e dispositivo de automação	19
3.1.2	Construção dos corpos de prova	22
3.1.3	Planejamento de experimentos	23
3.1.3.1	Matriz de experimentação	23
3.1.3.2	Planejamento da dinâmica dos experimentos	26
3.2	Fase 2: Execução dos experimentos	26
3.2.1	Monitoramento do processo	26
3.2.1.1	Monitoramento da potência	27
3.2.1.2	Monitoramento da vibração	29
3.2.1.3	Monitoramento do ruído	30
3.2.2	Medições pós processo	30

3.2.2.1	Estudo de variação de massas	30
3.2.2.2	Análise de qualidade superficial	31
3.3	Fase 3: Tratamento dos dados	33
3.3.1	Cálculo do consumo energético	33
3.3.2	Cálculo dos níveis de vibração	34
3.3.3	Cálculo dos níveis de ruído	34
3.3.4	Estimativa da taxa de remoção de material	35
3.4	Fase 4: Análise de sustentabilidade	38
3.4.1	Propostas de indicadores de sustentabilidade	38
3.4.2	Definição do objetivo e escopo da ACV	40
3.4.2.1	Sistema de produto a ser estudado	41
3.4.2.2	Função, unidade funcional e fluxo de referência	41
3.4.2.3	Requisitos de qualidade dos dados	41
3.4.2.4	Pressupostos e limitações	42
3.4.3	Modelagem ambiental do processo de lixamento manual	42
4	RESULTADOS	47
4.1	Indicadores	47
4.1.1	Indicadores de desempenho	47
4.1.2	Indicadores de sustentabilidade	49
4.2	Avaliação do Ciclo de Vida - ACV	50
5	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O projeto que originou o estudo envolvido neste trabalho de conclusão de curso foi o de “Avaliação de indicadores de sustentabilidade para processos de usinagem por abrasão” o qual teve como pesquisador responsável o Professor Associado Eraldo Jannone da Silva da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) conjuntamente com os Pesquisadores Associados a Associate Professor Dr.-Ing. habil. Barbara S. Linke – University of California – Davis (UC Davis) e Prof. Dr. Aldo R. Ometto - EESC/USP. Tal projeto faz a enunciação de um problema evidente quanto ao consumo de energia e água na indústria em âmbito nacional e internacional, mostrando a preocupação com a sustentabilidade dos processos abrasivos, os quais são corriqueiros na indústria. Ainda há o reforço que sendo esses processos representantes da manufatura atual, há a necessidade que os projetos que envolvam tais processos sejam “executados de maneira sustentável, nas dimensões econômica, social e ambiental, sem que a sua execução comprometa a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades no âmbito do desenvolvimento sustentável.”

A presente monografia é o resultado de dois projetos de Iniciação Científica desenvolvidos pelo autor entre os anos de 2016 e 2018, sob a orientação do Prof. Associado Eraldo Jannone da Silva, e basicamente todas as suas atividades foram desenvolvidas no Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS) o qual faz parte do Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA) presente no Departamento de Engenharia de Produção da EESC-USP.

O projeto como um todo contou com o apoio tecnológico e instrutivo da Norton Saint-Gobain Abrasivos do Brasil, empresa parceira do LAPRAS. Seu apoio refere-se ao fornecimento de informações sobre as ferramentas abrasivas utilizadas nos processos bem como o suprimento das ferramentas em si.

1.2 Contextualização

O impacto ambiental da atividade humana tornou-se evidente com o início da segunda metade do século XX. Fatores como a crise do petróleo e o encarecimento da energia chamaram a atenção para a dependência de recursos limitados, como os combustíveis fósseis, e levou eventualmente as empresas a melhorarem sua eficiência energética (SCHÖNSLEBEN et al., 2010).

Regulamentações mais rigorosas (padrões de emissão, padrões de exposição dos trabalhadores e materiais proibidos) e vantagens econômicas competitivas (conservação

de energia, água e materiais e redução de resíduos sólidos) são conhecidas como fatores motivadores e estimularam soluções de manufatura mais benéficas para o meio ambiente. Tais (DUFLOU et al., 2012a).

Esses fatores são intrínsecos da sustentabilidade e desta forma torna-se relevante a visão de Schönsleben et al. (2010) que utiliza, para a sustentabilidade, as seguintes definições:

- Aspectos ambientais, os quais referem-se à natureza com os seus recursos limitados e capacidades regenerativas como base para qualquer atividade empresarial;
- Aspectos sociais, os quais referem-se à sociedade representada por organizações governamentais e não-governamentais, indivíduos, funcionários e clientes;
- Aspectos econômicos, remetendo-se à competitividade das indústrias transformadoras e suas práticas de negócios.

As indústrias de consumo intensivo de energia (EIIs, sigla do inglês: *energy-intensive industries* que inclui o setor de ferro e aço, são as maiores consumidoras de energia. Embora elas tenham contribuído significativamente para a eficiência energética e de recursos, ainda possuem potenciais para maior produtividade dos recursos utilizados. Muitos dos processos em que tais empresas resultam em dissipação de calor residual para a atmosfera e fluxos de resíduos não utilizados o que deixa evidente os potenciais de melhoria. Reduzir a energia necessária nos processos resultará em reduções na pegada ambiental que trata-se da contabilização, em termos ambientais, do consumo humano sobre os recursos naturais do planeta (SCHÖNSLEBEN et al., 2010).

A indústria brasileira atualmente está na segunda colocação dos principais usuários de energia no Brasil tendo 31,7% da energia consumida em 2018 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2019). “No ano de 2016, o setor de Energia foi responsável pela emissão de 423,5 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente CO_2 , o que correspondeu a 19% do total anual de emissões no Brasil. Já o setor de Processos Industriais e Uso de Produtos foi responsável por 4% das emissões brasileiras, o que equivale a 95,6 milhões de toneladas de” (SISTEMAS DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES EFEITO ESTUFA, 2018).

Pelos trabalhos de Yuan, Zhai e Dornfeld (2012), resíduos industriais, como produtos químicos e tóxicos para o meio ambiente e emissões não causam apenas problemas ambientais, mas também econômicos, uma vez que existem custos e esforços para mitigar, controlar e/ou recuperar emissões ambientais dentro e fora do sistema de manufatura.

Desta forma, Yuan, Zhai e Dornfeld (2012) defende uma abordagem tridimensional do sistema para a evolução de uma manufatura ambientalmente sustentável, sendo ela

composta por três principais componentes de fabricação: tecnologia, energia e material. Promovendo a melhoria dos processos tecnológicos para reduzir os consumos de materiais e energia pode melhorar o desempenho de sustentabilidade da manufatura.

Resultados dos trabalhos de [Dufflou et al. \(2012b\)](#) na busca da manufatura ambientalmente sustentável mostraram que a abordagem teórica de consumo de energia pode levar a grandes equívocos e variações enquanto que as análises durante o processo com o monitoramento de tempo e potência de máquinas-ferramenta em condições industriais rotineiras fornecem o consumo real de energia contribuindo desta forma para uma contabilização mais precisa.

É um fato que os processos de transformação de matérias-primas em produtos finais têm um grande impacto no consumo de energia em todo o mundo. A pesquisa sobre os processos de fabricação possibilitou eficiência e precisão para a diminuição de custos. Com uma geral conscientização, o controle e a redução dos impactos ambientais e sociais destes processos tornam-se um objetivo adicional que tem igual importância ([LINKE et al., 2013](#)).

[Odum et al. \(2014\)](#) ressalta, especificamente nos campos da construção e indústria pesada como fundições, uma grande demanda de máquinas elétricas rotativas usadas para aplicação de processos abrasivos manuais. Há poucas informações práticas na literatura referente à sustentabilidade nessas aplicações e uma vez que esses processos têm forte influência no aspecto social da sustentabilidade, torna-se importante o estudo nessa área levando em consideração esses fatores.

Para se alcançar uma produção sustentável, deve-se considerar toda a cadeia de valor para conhecer os impactos gerados, dessa forma é necessário 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. ([YUAN; ZHAI; DORNFELD, 2012](#)).

1.3 Objetivos

A presente monografia é embasada em um objetivo geral e construída de acordo com os objetivos específicos apresentados a seguir:

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta monografia é desenvolver uma metodologia de análise de sustentabilidade para o lixamento manual com uso de *Flap Discs*.

1.3.2 Objetivos Específicos

De forma a atingir o objetivo geral, surge uma ramificação para objetivos específicos que são apresentados nos tópicos a seguir:

- Investigar os conceitos dos processos abrasivos com enfoque no lixamento manual para entender suas formas de aplicação e as grandezas físicas envolvidas.
- Projetar e construir uma bancada representativa de testes para a execução da experimentação do processo;
- Analisar a influência da variação de parâmetros do processo no seu resultado;
- Modelar qualitativamente o processo levando em consideração os conceitos da sustentabilidade de forma a criar a metodologia para execução da ACV e também para possibilitar o levantamento dos indicadores de sustentabilidade e desempenho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Os tópicos que seguem nessa seção buscam a compilação de um referencial teórico dos conceitos da análise de sustentabilidade e a percepção dos processos abrasivos com foco no lixamento manual.

2.1 Avaliação do Ciclo de Vida

No conjunto de normas brasileiras há duas delas que abordam as especificações da avaliação do ciclo de vida: NBR ISO 14040 ([ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a](#)) e NBR ISO 14044 ([ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b](#)) onde encontra-se a definição de ACV como “[...] compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida”.

Desta forma pode-se estruturar um estudo de ACV em 4 fases, as quais são abordadas a seguir:

2.1.1 Fase 1: Definição de objetivo e escopo da ACV

“Compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida” ([ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a](#)). Em seu objetivo é definida a proposta do estudo incluindo quais decisões ele vai apoiar e em seu escopo é definido o quão grande será a parte do ciclo de vida do produto que será incluída na ACV. Também é tomada uma decisão sobre os critérios em que o produto deve ser avaliado e o período de tempo durante o qual os resultados do ACV devem ser aplicados ([WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997](#)).

Segundo [Silva \(2016\)](#), dentro do objetivo da ACV, há a necessidade de se definir a razão do estudo e o público alvo em questão, uma vez que esses fatores direcionarão a construção do escopo do estudo que determina suas especificações e limitações.

Uma vez definido o objetivo do estudo, o passo seguinte é definir o escopo, o qual, segundo [Silva \(2016\)](#), [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2009a\)](#) tem diversos requisitos, sendo os principais:

- **Sistema de produto a ser estudado:** que pode ser do tipo:
 - *Cradle-to-grave*: abordagem do tipo "do berço ao túmulo", que indica um estudo de toda a cadeia de valor, desde processos elementares, como por exemplo

extração e beneficiamento de recursos naturais até a deposição final do produto após o uso;

- ***Cradle-to-gate***: abordagem do tipo "do berço ao portão de fábrica", que indica um estudo desde processos elementares, como por exemplo extração e beneficiamento de recursos naturais até a manufatura de produtos intermediários e/ou do produto final;
- ***Gate-to-gate***: abordagem do tipo "do portão ao portão da fábrica", que indica um estudo apenas da etapa de manufatura de produtos intermediários e/ou do produto final;
- ***Gate-to-grave***: abordagem do tipo "do portão da fábrica ao túmulo", que indica um estudo que compreenderá apenas etapas de distribuição, uso e o fim de vida do produto final.

- **Função, unidade funcional e fluxo de referência:** onde:

- **Função:** define-se pela característica do produto e como ela é desempenhada;
- **Unidade funcional:** define-se como uma base de referência da função do produto onde a ela é qualificada e quantificada para fins de análise comparativa;
- **Fluxo de referência:** mede-se a quantidade de produto necessário para cumprir a função expressa pela Unidade Funcional.

- **Requisitos de qualidade dos dados:** onde são especificadas as características dos dados necessários para a realização do estudo, sendo elas:

- **Cobertura temporal:** onde determina-se qual é a idade dos dados e o período mínimo de tempo para que ocorra a coleta;
- **Cobertura geográfica:** onde determina-se a área a partir da qual os dados devem ser coletados;
- **Cobertura tecnológica:** onde determina-se qual tipo de tecnologia será utilizada para a coleta de dados;
- **Fonte de dados:** onde determina-se se os dados serão **primários** (coletados por amostragem direta para cada processo elementar) ou **secundários** (originados de bases de dados pré estabelecidas).

- **Pressupostos e limitações:** que envolvem suposições e/ou considerações tomadas para o estudo ACV onde surgem pressupostos baseados em limitações do estudo como ausência de banco de dados e também estabelecimento de cenários. Já limitações refletem as restrições do estudo como falta de dados, restrições dos métodos de avaliação de impactos ambientais e também restrições devido ao estabelecimento da fronteira do sistema de produto.

2.1.2 Fase 2: Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

Envolve a “[...] compilação e quantificação das entradas e saídas de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a).

São coletadas nesta fase informações sobre as mudanças que o produto causa acerca dos processos que envolvem o ciclo de vida. Essas mudanças incluem o consumo de recursos como água e energia e a emissão de substâncias no ambiente bem como o modo que elas influenciam o ambiente de trabalho (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Segundo Aurich et al. (2013) nesta fase os processos que estão incluídos no sistema do produto identificados e os dados são compilados para cada um desses processos na forma de entrada de recursos, energia, materiais ou produtos e produção de produtos, emissões ou resíduos, estando todos os fluxos relacionados ao que fora especificado na definição do escopo.

Dentre as várias metodologias para compilar dados para o ICV, destaca-se a metodologia *UPLCI* (*Unit Process Life Cycle Inventory*), em português “Inventário de Ciclo de Vida de Unidade de Processamento” a qual é resultado do trabalho da iniciativa *CO₂PE!* (cooperative effort on process emissions in manufacturing), em português "esforço cooperativo sobre as emissões do processo na fabricação" que busca “[...] coletar, documentar e fornecer dados ICV para uma ampla gama de processos de unidades de produção discretas, bem como para identificar o potencial de melhorias ambientais das máquinas-ferramentas envolvidas” (KELLENS et al., 2012).

Garretson et al. (2016) traz uma compilação de abordagens de vários autores referente à metodologia *UPLCI*. Depois de definidos os objetivos e o escopo do estudo de sustentabilidade na Fase 1 da ACV é necessário iniciar uma investigação na unidade de processamento estudada. Para isso há a abordagem *Screening* e a abordagem *In-depth* que são sintetizadas a seguir:

Abordagem *Screening UPLCI (CO₂PE!)*

Um estudo *Screening* é considerado como uma investigação inicial em uma unidade de processamento de manufatura e definirá o limite, uma unidade funcional, parâmetros de máquina e informações de processo. Estas informações são utilizadas para gerar estimativas do consumo energético e das perdas e variações de massa do processo.

- Fronteiras do Sistema

A determinação das fronteiras do sistema é importante pois elas guiam o processo decisório durante a avaliação de sustentabilidade, além de facilitar estudos posteriores

e comparações. As fronteiras são identificadas com base em: 1) Critérios de avaliação, 2) Nível de detalhe da investigação, 3) *Inputs* e *Outputs* consideradas, 4) Uma meta específica para investigar, medir ou estudar o sistema.

- Unidade Funcional

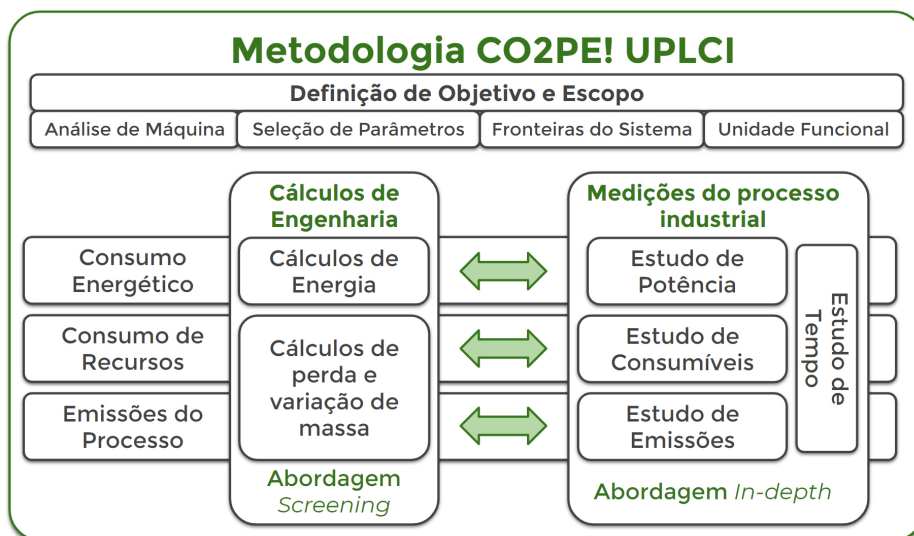
Para padronização da análise comparativa de sustentabilidade, é necessário definir a Unidade funcional do sistema, a qual faz menção à unidade de referência qualitativa e quantitativa de um sistema de produção. Para um processo unitário de manufatura, ela trata-se de uma unidade de referência quantificável e qualificável que indica o desempenho de um processo e pode incluir, por exemplo, volume ou massa de material removido num processo de usinagem. *CO₂PE!* especifica unidades funcionais padrão para manter dados *UPLCI* normalizados para vários processos.

Abordagem *In-depth UPLCI (CO₂PE!)*

A abordagem *In-depth UPLCI (CO₂PE!)* gera dados do ICV mais precisos do que a abordagem *Screening*, sendo ela dividida em quatro estudos: tempo, energia, consumíveis e emissões dos modos de operação do processo unitário, através de sistemas de monitoramento e equipamentos de medição instalados no equipamento e em suas vizinhanças (KELLENS et al., 2012; DUFLOU et al., 2012a; DUFLOU et al., 2012b).

A Figura 1 traz uma esquematização da metodologia *UPLCI*:

Figura 1: Metodologia da análise sistemática *UPLCI*.



Fonte: Adaptada de Kellens et al. (2012).

2.1.3 Fase 3: Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

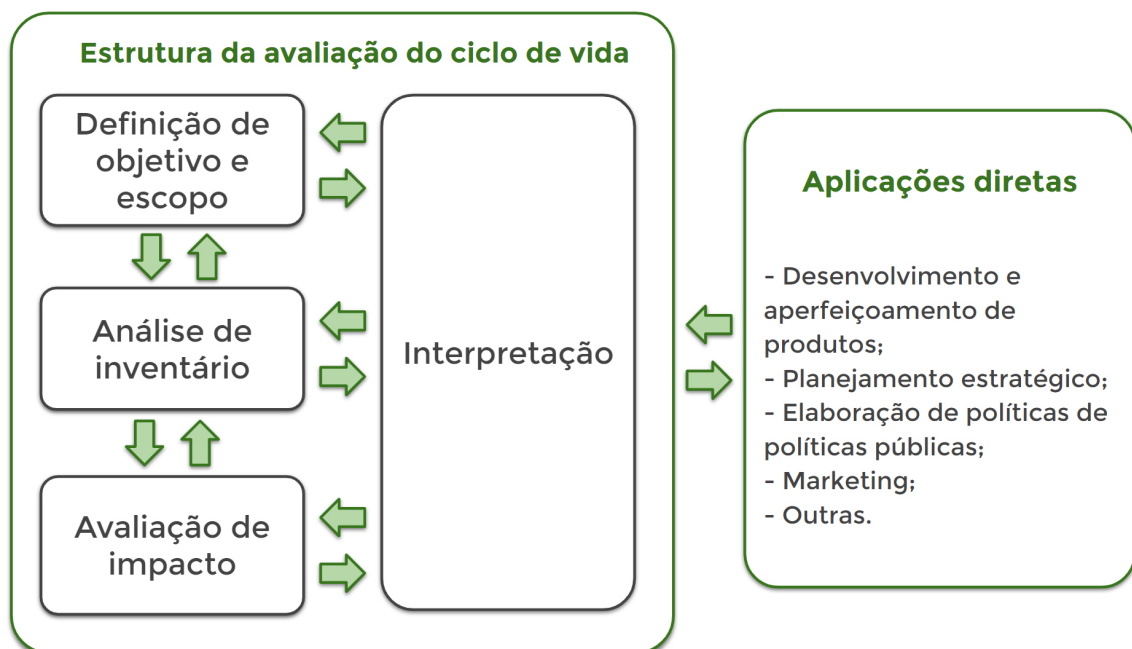
Depois de compilados os dados do ICV com a metodologia *UPLCI* completando a Fase 2 da ACV, inicia-se a Fase 3 de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) a qual exige um auxílio computacional de softwares específicos para execução de ACV. Nesta fase é possível encontrar informações sobre impactos de grande relevância tais como a ecotoxicidade e o impacto na saúde humana (LINKE et al., 2014).

Assim como descrito em Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009a), é a “Fase da avaliação do ciclo de vida onde realiza-se a avaliação da magnitude e significância dos potenciais impactos ambientais gerados num sistema de produto”.

2.1.4 Fase 4: Interpretação do ciclo de vida

A Figura 2 mostra a estrutura da fase de interpretação do ciclo de vida a qual as “constatações da análise de inventário ou da avaliação de impacto, ou de ambas, são avaliadas com relação ao objetivo e escopo definidos, a fim de se chegar a conclusões e recomendações” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a).

Figura 2: As quatro fases da Avaliação do Ciclo de Vida e suas aplicações.



Fonte: Adaptada de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009a), Aurich et al. (2013).

2.2 Processos abrasivos manuais

Pela análise de Das e Linke (2016), a abrasão envolve complexos processos de remoção de material, em que as ferramentas abrasivas possuem arestas de corte geometricamente indefinidas que atiram com a peça de trabalho para formar cavacos. Especificamente os

processos de acabamento abrasivo manual possuem um mercado crescente por exemplo, mercado de construção, fundição, reparação automobilística ou indústrias de soldagem).

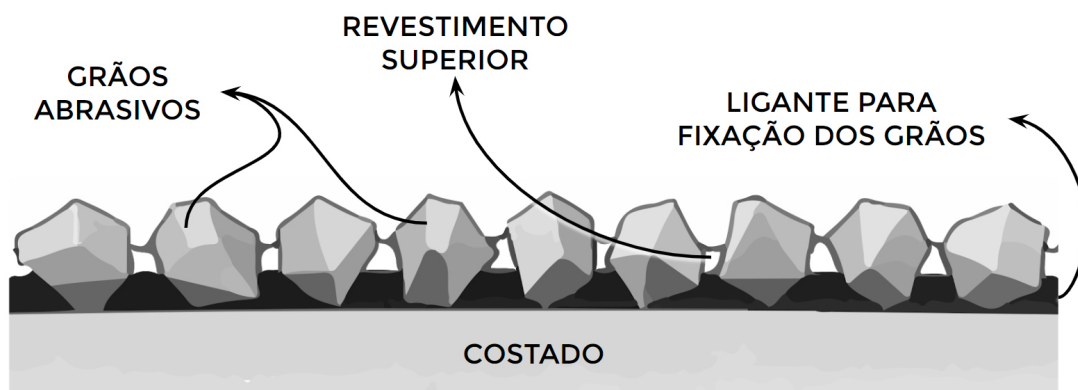
2.2.1 *Coated Abrasives*

Os *Coated Abrasives*, tendo como tradução livre “abrasivos revestidos”, segundo a análise de [Shaw \(1996\)](#), consistem em ferramentas abrasivas que possuem uma única camada de partículas abrasivas ligadas a um costado que pode ser tecido, papel, polímero, etc. As partículas abrasivas ficam mais distantes uma da outra em relação às partículas de um rebolo, por isso há um espaço maior para alojamento de cavaco o que contribui para para altas taxas de remoção.

O processo de fabricação de uma ferramenta com revestimento de abrasivos se inicia com aplicação de uma camada de ligante ao costado para que posteriormente sejam aplicadas as partículas abrasivas. À medida que o material de suporte passa através de um forte campo eletrostático, as partículas são orientadas com a sua maior dimensão vertical. As vantagens do método de espalhamento eletrostático são uma distribuição de grão uniforme, uma maior reprodutibilidade e maior protrusão de grão, ou seja, orienta as partículas com as suas bordas mais afiadas para fora. Para completar a estrutura, um revestimento adesivo é aplicado sobre toda a montagem ([SHAW, 1996](#); [LINKE, 2016](#)).

A estrutura abordada anteriormente pode ser verificada na Figura 3:

Figura 3: Vista lateral de uma ferramenta com revestimento de abrasivos.



Fonte: Adaptada de [Shaw \(1996\)](#).

A vida útil dessas ferramentas pode se encerrar por vários motivos. Vida física devido à quebra, vida econômica devido ao surgimento de novas ferramentas que oferecem a mesma funcionalidade, porém com menores custos, vida em aspectos legais devido ao surgimento de normas ou leis que proíbam a sua utilização e a vida funcional devido a cessamento do seu desempenho esperado. Para a maioria das aplicações, o fim da vida funcional dos *Coated Abrasives* é alcançado quando a taxa de remoção em determinada

carga torna-se drasticamente pequena ou quando há um grande aumento de requisito de energia para manutenção de uma velocidade apropriada para a operação (KING; HAHN, 1986; LINKE, 2016).

O motivo mais relevante para o final da vida das ferramentas abrasivas é o desgaste para as dimensões mínimas da camada abrasiva ou a degradação remetida ao final do prazo de validade. Finalmente o destino dessas ferramentas no final de suas vidas úteis é o aterro, combustão, reciclagem, reengenharia ou reutilização (LINKE, 2016).

Atualmente os custos da reciclagem e reutilização dos componentes das ferramentas abrasivas são maiores do que os benefícios que seriam gerados, entretanto isso pode mudar no futuro. Mesmo com esse cenário os fabricantes dessas ferramentas oferecem o recolhimento e reciclagem em diversos casos (LINKE, 2016).

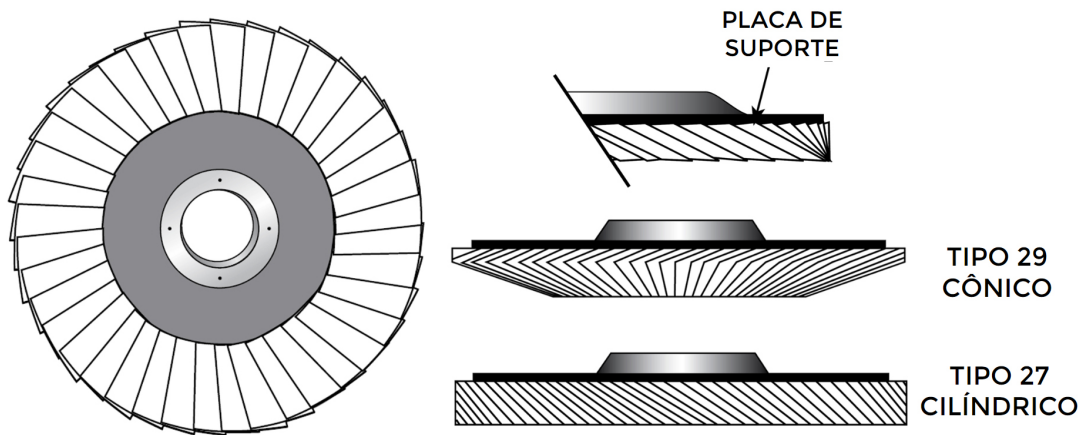
2.2.2 *Flap Discs* e suas aplicações

Dentro da classe dos *Coated Abrasives*, os *Flap Discs* (Figura 4) são ferramentas de remoção de material, polimento e acabamento versáteis, consistindo em três componentes principais: uma placa de apoio, cola e tiras retangulares de lixas abrasivas. Essas lixas são sobrepostas e coladas à placa de suporte rígida de forma uniforme. É a placa de suporte que fornece estabilidade durante a operação. Existem dois materiais principais utilizados: fibra de vidro e polímero termoplástico. A placa de suporte de fibra de vidro ajuda a absorver a vibração. É a mais popular devido à sua alta resistência e peso leve. A placa de suporte de polímero termoplástico oferece alguma conformabilidade adicional e é ajustável (SAINT-GOBAIN, 2015).

O uso de aço inoxidável é muito comum nas indústrias de eletrodomésticos, equipamentos de processamento de alimentos, aeroespacial e médica. Em algumas aplicações deste material, a remoção da parte superior de cordões de solda é necessária. Os *Flap Discs* são apropriados para a remoção destes cordões e excesso de materiais em geral. Um *Flap Disc* de granulometria 40 é recomendado para uso geral. Para velocidade e remoção agressiva de material, um disco cônico Tipo 29 é uma escolha adequada, enquanto que para cortes suaves e misturados é preferível o Tipo 27 (CARROLL, 2014).

No passado, para acabamento de aço inoxidável, os operadores usavam um processo constituído de duas etapas. Na primeira era realizada a remoção de material utilizando discos de desbaste, também conhecidos como *Thin Wheels* e em seguida discos de fibra (*Fiber Discs*) eram utilizados para padronização de acabamento da superfície da peça trabalhada. Uma vez que são menos propensos a arrancar pedaços e arranhar a peça de trabalho (muito comum em *Thin Wheels*), os *Flap Discs* cada vez mais estão substituindo o antigo processo de duas etapas por uma única, exigindo apenas um produto abrasivo (STONE, 2009).

Figura 4: Detalhe esquemático dos *Flap Discs*: O tipo 29 cônico indicado para altas remoções de material e o tipo 27 cilíndrico indicado para operações de acabamento.



Fonte: Adaptada de [Saint-Gobain \(2015\)](#).

2.2.3 Características e emissões do processo

O estudo de sustentabilidade de um processo manual envolve sua eficiência, bom desempenho e escolhas de metodologias apropriadas, já que isso influencia os aspectos econômicos que envolve os custos de aquisição e descartes de materiais, além da produtividade da ferramenta abrasiva e final de sua vida útil.

Deve-se considerar também os aspectos sociais que envolve a saúde dos operadores envolvidos e os aspectos ambientais, devido aos recursos naturais utilizados e impactos resultantes.

Em processos de lixamento manual com uso de máquinas rotativas de controle manual, a taxa de remoção de material, por ser controlada manualmente, provoca variações de força tridimensional (tangencial, normal e axial) na peça de trabalho, que têm um impacto direto no atrito, espessura de cavacos e consumo de energia específica. Uma vez que a execução destes processos é extremamente dependente do conhecimento, habilidade, postura e força pessoal dos operadores envolvidos, a execução incorreta deste processo pode causar sérios problemas de saúde que muitas vezes podem ser irreversíveis ([DAS; LINKE, 2016](#)).

2.2.3.1 Taxa de remoção de material (Q_w)

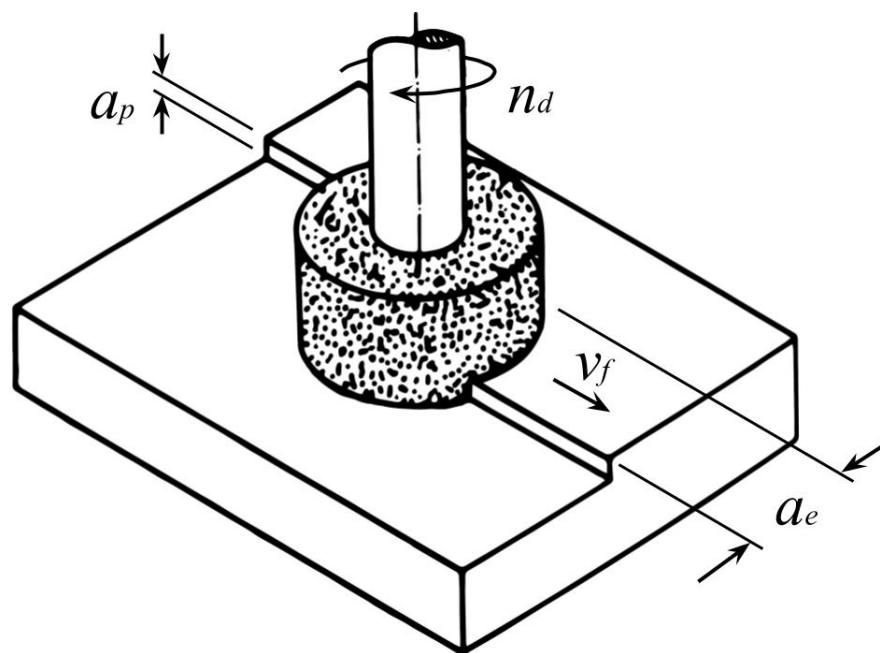
A taxa de remoção de material é um importante parâmetro de performance de processos de usinagem em geral. Para sua quantificação, deve-se conhecer grandezas de corte como velocidade de avanço v_f , profundidade de usinagem a_p e penetração de trabalho

a_e . Segundo Ferraresi (1977) a taxa de remoção de material Q_w é dada pela Equação 2.1:

$$Q_w = v_f \cdot a_p \cdot a_e \quad (2.1)$$

Na Figura 5, tem-se um desenho esquemático com as grandezas de corte do processo de retificação frontal utilizando uma ponta montada abrasiva.

Figura 5: Desenho esquemático com parâmetros de corte do processo de retificação frontal utilizando uma ponta montada.



Fonte: Adaptada de Ferraresi (1977).

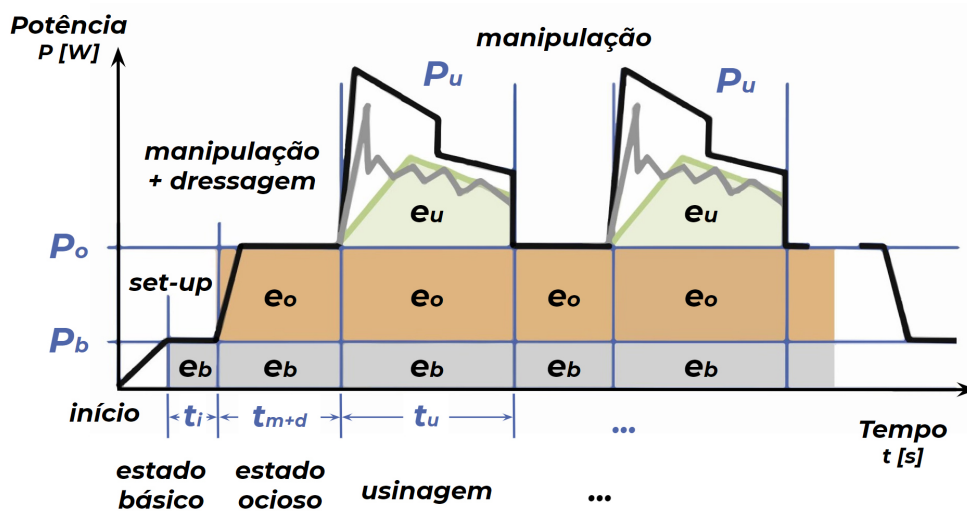
2.2.3.2 Consumo energético

Para realizar o estudo de energia proposto na Abordagem *In-depth* explicitado na seção 2.1.2 é necessário monitorar a potência dissipada pela esmerilhadeira. Para isso utiliza-se um sistema de monitoramento baseado num conceito chamado efeito Hall.

O efeito Hall é uma tensão induzida em um material semicondutor à medida que passa por um campo magnético. Para analisar tal efeito utiliza-se sensores magnéticos os quais são sensíveis às perturbações nas linhas de fluxo magnético causadas pela variação da potência dissipada. Analisada a potência é possível verificar o consumo energético, uma vez que o consumo de energia é determinado pela integral da potência dissipada em função do tempo da operação, conseqüentemente tem-se o consumo de energia elétrica (KELLENS et al., 2012; TöNSHOFF; INASAKI, 2001).

A Figura 6 mostra uma esquematização de como funciona o consumo energético numa unidade de processamento, especificamente em um processo de retificação.

Figura 6: Simplificação do perfil de potência dissipada por uma retificadora durante um processo de retificação.



Fonte: Adaptada de Aurich et al. (2013).

Há o primeiro estado de funcionamento chamado estado básico com uma duração de t_i segundos dissipando uma potência P_b resultando num consumo energético de e_b joules. Para a manipulação e dressagem atinge-se a potência P_o durante t_{m+d} segundos e uma energia e_o é acrescida ao consumo energético. Toda essa energia consumida é inevitável e quase irreduzível, pois é a energia básica de funcionamento do maquinário. Finalmente tem-se a usinagem que dissipa uma potência P_u durante o intervalo de tempo t_u que acrescentando uma energia e_u ao consumo energético a qual pode ser melhorada modificando os parâmetros do processo.

Essa energia e_u consumida, verificada com um estudo de potência e tempo é um exemplo de *input* significativo para a ACV e geração de resultados de potenciais de impactos ambientais do processo relativos ao consumo energético.

2.2.3.3 Vibração mecânica

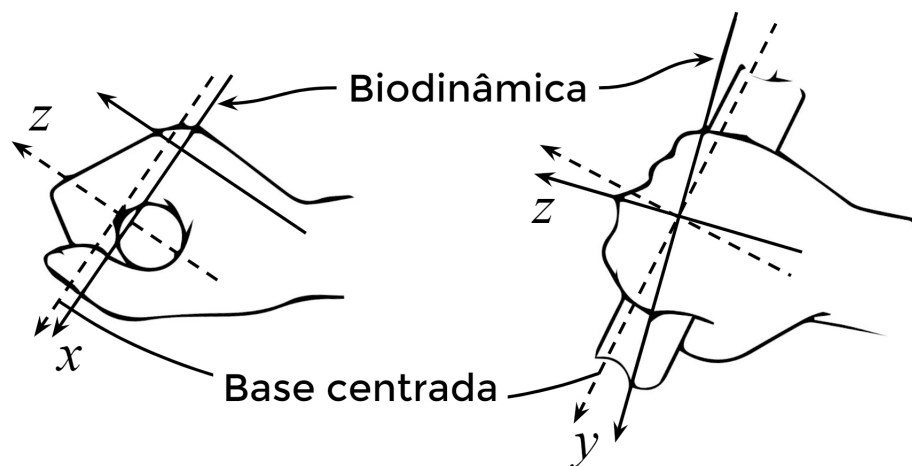
Segundo estudos de Wasserman et al. (2002) o desenvolvimento de doenças ocupacionais como a síndrome do dedo branco de vibração, e síndrome do túnel do carpo tem sido associado ao uso prolongado de ferramentas elétricas rotativas de uso manual, por ser uma fonte vibracional.

Desta forma, é crucial que se leve em consideração aspectos sociais em uma análise de sustentabilidade de processos deste tipo. Além disso, a ruptura de componentes das

ferramentas devido às altas velocidades do processo de abrasão pode ser nociva para o trabalhador e à própria máquina-ferramenta (AURICH et al., 2013).

Uma vez que a vibração mecânica é, por definição, uma resultante de três componentes ortogonais, essas componentes podem ser medidas usando o sistema de coordenadas de consenso internacional mostrado na Figura 7, onde o eixo z tem a componente de movimento ao longo do braço da mão, o eixo y possui a componente do movimento através dos metacarpos e o eixo x possui a componente de movimento através da mão (WASSERMAN et al., 2002).

Figura 7: Sistemas de coordenadas vetoriais de vibração manual-braço.



Fonte: Adaptada de Wasserman et al. (2002).

Devem ser consideradas as intensidades de aceleração em valor quadrático médio, traduzido do inglês *Root Mean Square* (RMS), dos eixos, sendo avaliados separadamente para cada posição de medição na ferramenta que está sendo monitorada (WASSERMAN et al., 2002).

2.2.3.4 Emissão de ruído

Outro aspecto relevante à saúde dos operadores remete-se ao ruído oriundo do processo. Devido à proximidade do operador com as vizinhanças da execução, sua única proteção vem do seu EPI (Equipamento de Proteção Individual). A norma regulamentadora NR-15 específica para esse contexto, instrui que neste cenário “os níveis de ruído contínuo ou intermitente devem ser medidos em decibéis (dB) com instrumento de nível de pressão sonora operando no circuito de compensação "A" e circuito de resposta lenta (SLOW). As leituras devem ser feitas próximas ao ouvido do trabalhador”. A norma também estabelece que “[...] não é permitida exposição a níveis de ruído acima de 115 dB(A) para indivíduos que não estejam adequadamente protegidos.” (ESCOLA NACIONAL DA INSPEÇÃO DO TRABALHO, 2018).

2.2.4 Indicadores de desempenho e sustentabilidade

Pela análise de [Malkin e Guo \(2008\)](#), uma forma de avaliar o desempenho de uma ferramenta abrasiva em seu tempo de vida é por meio da Relação G apresentada na Equação 2.2:

$$\text{Relação } G = \frac{V_w}{V_s} \quad (2.2)$$

Onde V_w é o volume de material removido da peça [mm^3] e V_s é o volume desgastado da ferramenta [mm^3].

Os processos abrasivos, de forma geral, têm sido questionados com frequência nas discussões sobre a sustentabilidade da produção. Pensou-se até na sua substituição devido às suas características problemáticas tais como alta energia específica envolvida ou efeitos negativos na saúde dos trabalhadores ([AURICH et al., 2013](#)).

Pela visão de [Linke et al. \(2013\)](#) as empresas têm buscado maneiras de capturar e medir seu desempenho de sustentabilidade, sendo o método mais comum a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), focando a sustentabilidade ambiental. O método ACV pode trazer informações sobre os efeitos de maior escala, tais como a eco toxicidade, o impacto na saúde humana, mas há a necessidade de bancos de dados específicos e dados quantitativos de grandes detalhes. Outro método é o uso de indicadores de sustentabilidade que tem como vantagem a obtenção mais rápida de informações e possui uma exibição mais simples ([LINKE et al., 2013](#); [LINKE et al., 2014](#)).

Segundo [Bellen \(2005\)](#), um indicador possui várias definições. Resumidamente, os indicadores podem informar sobre o progresso em direção a uma determinada meta, como por exemplo o desenvolvimento sustentável. Eles podem ser entendidos como medidas que resumem informações relevantes de um fenômeno particular ou substitutos dessas medidas. Conjuntamente, podem mensurar o comportamento do sistema em termos de atributos expressivos e perceptíveis.

A mais importante característica de um indicador, quando comparado com outros tipos ou formas de informação, é a sua relevância para a política e para o processo de tomada de decisão ([BELLEN, 2005](#)).

Os indicadores de sustentabilidade podem captar todas as três dimensões de sustentabilidade e auxiliar na avaliação em vários níveis (empresas, instalações, processos e produtos). Eles baseiam-se em dados medidos e/ou estimados que são normalizados, escalados e agregados de forma consistente para que as empresas possam avaliar a sua situação real, aumentar a sua consciência e definir os seus objetivos ([LINKE et al., 2014](#)).

Ainda pela visão de [Linke et al. \(2014\)](#) um indicador comum é a eco-eficiência, que pode ser definida como o valor do produto ou serviço dividido pelo impacto ambiental,

como é mostrado na Equação 2.3.

$$Eco - Eficiência = \frac{Valor\ do\ serviço}{Impacto\ ambiental} \quad (2.3)$$

Se tratando de consumo energético e material removido, pode-se calcular a energia específica, que segundo Linke et al. (2014) é a razão entre a energia total consumida em uma execução do lixamento e o material removido mostrado na Equação 2.4:

$$Energia\ Específica = \frac{Energia\ Total}{Material\ Removido} \quad (2.4)$$

Com a energia específica, pode-se comparar a eficiência energética entre diferentes parâmetros de usinagem. Segundo Aurich et al. (2013) e eficiência energética é um dos principais indicadores para a sustentabilidade da produção em geral. Ela influencia tanto a dimensão ambiental (através dos muitos aspectos problemáticos a respeito da geração de energia) como a dimensão econômica (através do custo da energia) da sustentabilidade.

Linke et al. (2014) afirma que a avaliação do desempenho do processo estudado pode remeter à análise de sustentabilidade, considerando que há como quantificar os seus parâmetros de desempenho. Define-se desta forma o indicador de eficiência, η_{sust} (Equação 2.5), onde deseja-se agregar certo valor ao processo/produto dado pela variação da performance ou do parâmetro de qualidade normalizado pela variação do recurso utilizado para atingir esse valor.

$$\eta_{sust} = \pm \frac{\Delta Performance \text{ ou } \Delta Parâmetro\ de\ Qualidade}{\Delta Recurso} \quad (2.5)$$

O sinal deve ser considerado, pois se o parâmetro em questão for o coeficiente de rugosidade ou fricção, por exemplo, estes devem ser mínimos após o processo, enquanto que outros parâmetros devem ser maximizados (por exemplo, qualidade, conforto do trabalhador, taxa de remoção de material).

+ Quando o processo se destina a aumentar o desempenho ou parâmetro de qualidade;

- Quando o processo se destina a diminuir o parâmetro de desempenho ou qualidade.

Nos resultados de estudos de Linke et al. (2014) indicadores que consideram as rugosidades médias aritméticas (R_a) e distância média entre os cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos dentro da amostra medida (R_z) como parâmetros de qualidade, mostraram-se bons indicadores de sustentabilidade, já que seus valores sofrem mudanças ao longo da energia consumida e do tempo.

3 METODOLOGIA

Os tópicos a seguir trazem uma progressão das atividades que fizeram parte da metodologia do presente trabalho.

3.1 Fase 1: Projeto e planejamento

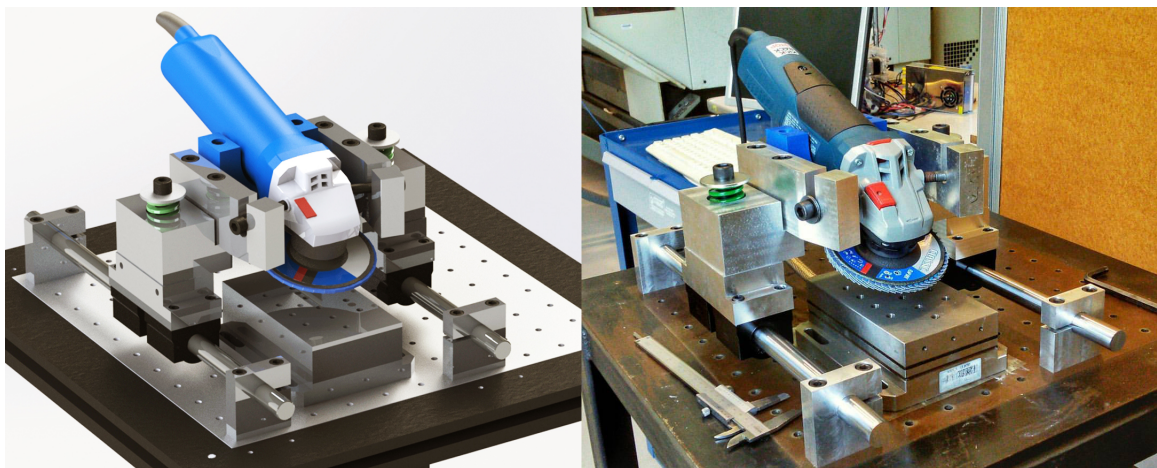
3.1.1 Projeto e manufatura da bancada de testes e dispositivo de automação

Para realizar uma análise comparativa entre combinações de parâmetros do processo lixamento manual, surgiu a necessidade de se projetar e construir uma bancada representativa de testes para a execução da experimentação do processo. A bancada deveria realizar o processo de maneira semelhante à forma que operadores usualmente o executam e proporcionar repetibilidade à experimentação.

Na fase inicial deste projeto o autor realizou o projeto mecânico da bancada e dispositivo de automação e acompanhou todo o processo de fabricação no laboratório LAPRAS.

A Figura 8 mostra o projeto da montagem da bancada de testes cuja imagem à esquerda foi processada digitalmente no software *SolidWorks* em comparação com foto à direita tirada da bancada montada após a fabricação das peças.

Figura 8: Comparação do projeto antes da manufatura e depois com a bancada de testes finalizada.

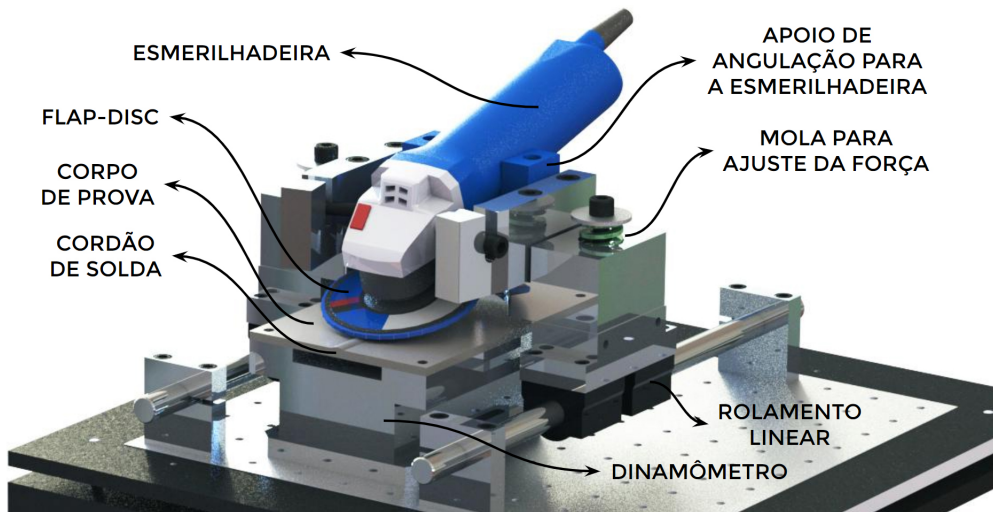


Fonte: Elaborada pelo Autor.

A Figura 9 mostra o detalhamento dos componentes utilizados para a montagem:

Por conveniência de adequação ao dinamômetro, adotou-se um eixo y paralelo ao movimento de avanço da esmerilhadeira onde existe a força axial de usinagem F_y , eixo

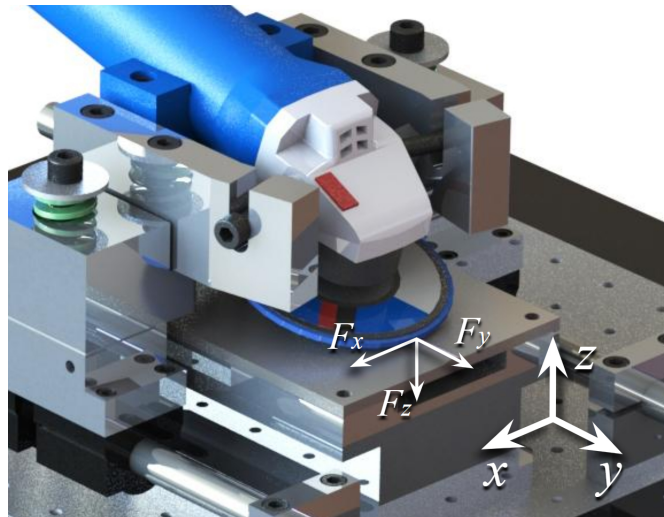
Figura 9: Bancada de testes com detalhes de seus componentes.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

x onde surge a força tangencial de corte F_x do *Flap Disc* e um eixo z vertical o qual relaciona-se com a força vertical F_z para baixo. Na Figura 10 pode-se verificar os eixos de referência adotados:

Figura 10: Eixos referenciais adotados para o dispositivo de lixamento.



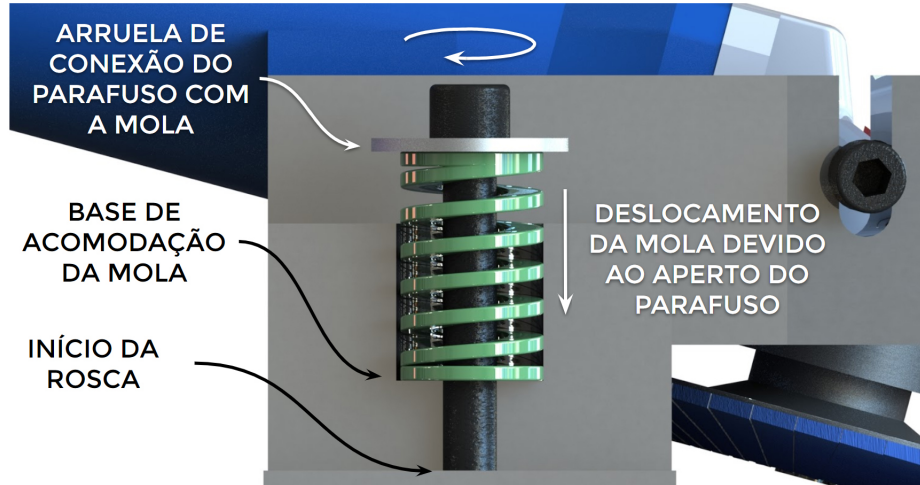
Fonte: Elaborada pelo Autor.

A mola introduzida no projeto do dispositivo de lixamento teve o propósito de ajustar e controlar a força normal F_z na direção do eixo z sendo ela similar a força normal que os operadores aplicam manualmente durante o processo.

A Figura 11 mostra uma vista em corte do ajuste da mola. Considerando a existência da base de acomodação, à medida que o parafuso é rosqueado, seu deslocamento para

baixo comprime a mola com o auxílio da arruela o que aumenta a força envolvida e consequentemente aumenta a força normal do disco uma vez que o sistema está conectado à fixação da esmerilhadeira.

Figura 11: Detalhe esquemático do ajuste da mola para controle da força normal F_z .



Fonte: Elaborada pelo Autor.

O aperto do parafuso foi ajustado de forma a manter a força normal F_z com um valor de aproximadamente 3,5 kgf. Este valor foi determinado a partir de informações do fabricante de *Flaps Discs* sendo ele o mesmo valor utilizado em testes de qualidade dessas ferramentas abrasivas. As forças de avanço F_y e de corte F_x foram registradas para validação da repetibilidade da bancada desenvolvida. O dinamômetro utilizado para realizar o ajuste e o monitoramento em tempo real das forças foi o Multicomponente Kistler 9257BA de quartzo capaz de medir os três componentes ortogonais da força resultante do processo.

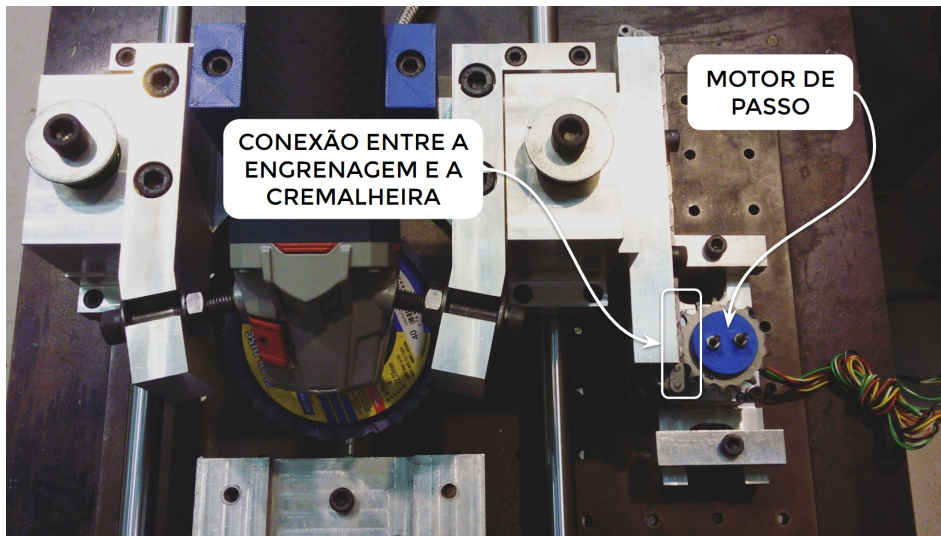
A Figura 12 mostra a automação da bancada desenvolvida para controlar o movimento de avanço da esmerilhadeira.

O eixo principal do Motor de Passo NEMA 34 - 52 kgf.cm/5A, acionado por uma placa de controle Arduino, tinha sua rotação convertida em movimento retilíneo através de um sistema engrenagem-cremalheira. Conhecendo o diâmetro primitivo ($D_{Primitivo}$) da engrenagem, é possível ajustar a velocidade de avanço (v_f) da esmerilhadeira a partir da velocidade de rotação ($v_{Rotação}$) do eixo do motor de passo de acordo com a Equação 3.1.

$$v_f = \pi \cdot D_{Primitivo} \cdot v_{Rotação} \quad (3.1)$$

Onde o $D_{Primitivo}$ é dado em m , $v_{Rotação}$ é dada em RPM e a v_f é dada em m/min .

Figura 12: Sistema para automação da bancada de experimentação

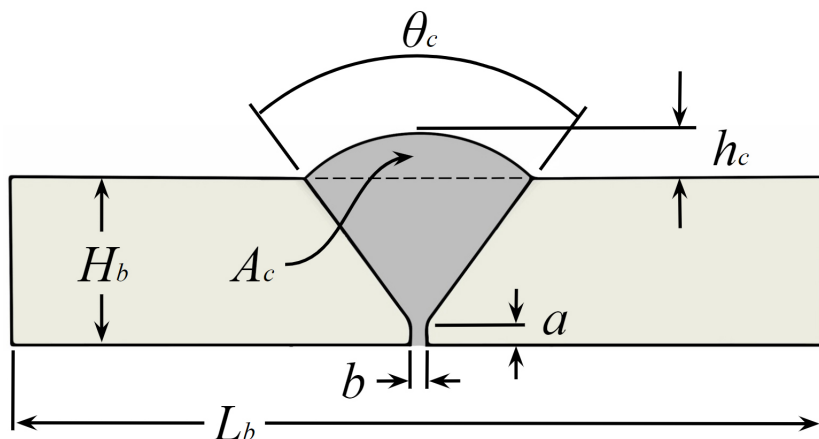


Fonte: Elaborada pelo Autor.

3.1.2 Construção dos corpos de prova

Para execução dos experimentos deste trabalho, foi proposto um modelo de corpo de prova (CP) composto por aço inox 304 L, que segundo [Carroll \(2014\)](#) é um material que aplica-se largamente os *Flap Discs* nos processos de acabamento. A sua seção transversal é apresentada na Figura 13 que está fora de escala.

Figura 13: Seção transversal do corpo de prova proposto para a experimentação.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Por conveniência de adequação às medidas comercialmente padronizadas pelo fabricante de chapas metálicas, a espessura da chapa H_b foi determinada em $\frac{1}{4}$ " (6,35 mm) e a largura da base do cordão L_b em 150 mm. De forma a facilitar a fixação do corpo de prova ao dinamômetro, determinou-se o comprimento da chapa e do cordão l_c em 170 mm

(não mostrado na Figura 13).

Para a determinação das dimensões de soldagem utilizou-se a metodologia para cálculo do consumo de consumíveis de soldagem apresentados em Kobelco (2019). A altura do cordão de solda h_c foi determinada em 2,5 mm, o ângulo entre os chanfros da base do cordão θ_c em 60° e as dimensões a e b iguais a 1 mm.

Conhecendo-se as medidas nominais do corpo de prova e do cordão, é possível estimar o volume de material (V_w) a ser removido pelo lixamento. Para isso é necessário determinar a área da seção do cordão excedente à base do cordão (A_c) mostrada na Figura 13 acima da linha tracejada e multiplicá-la pelo comprimento do cordão (l_c) assim como é mostrado na Equação 3.2. O volume estimado resultante foi de 2.430 mm^3 .

$$V_w = A_c \cdot l_c \quad (3.2)$$

Por viabilidade econômica e logística do projeto, optou-se por utilizar o Aço Inox 308L como material de adição da soldagem. De acordo com MakeItFrom (2019) os aços inox 304L e 308L possuem em comum cerca de 97% da sua composição média de liga. Optou-se por utilizar o processo de soldagem por arco elétrico MAG (*Metal Active Gas*), em português "Metal e Gás Ativo", o qual proporciona uma alta taxa de deposição do metal de solda, o que é preferível para as dimensões propostas para o cordão e a quantidade de corpos de prova que necessito-se produzir. O processo de soldagem foi realizado por uma automação simples como é mostrado na Figura 14 o que proporcionou mais exatidão e repetibilidade em sua geometria.

Na Figura 15 pode-se observar o posicionamento das chapas que deu origem ao canal para a deposição do cordão de solda.

Detalhes tais como parâmetros de soldagem e especificações dos equipamentos utilizados não serão abordados neste trabalho.

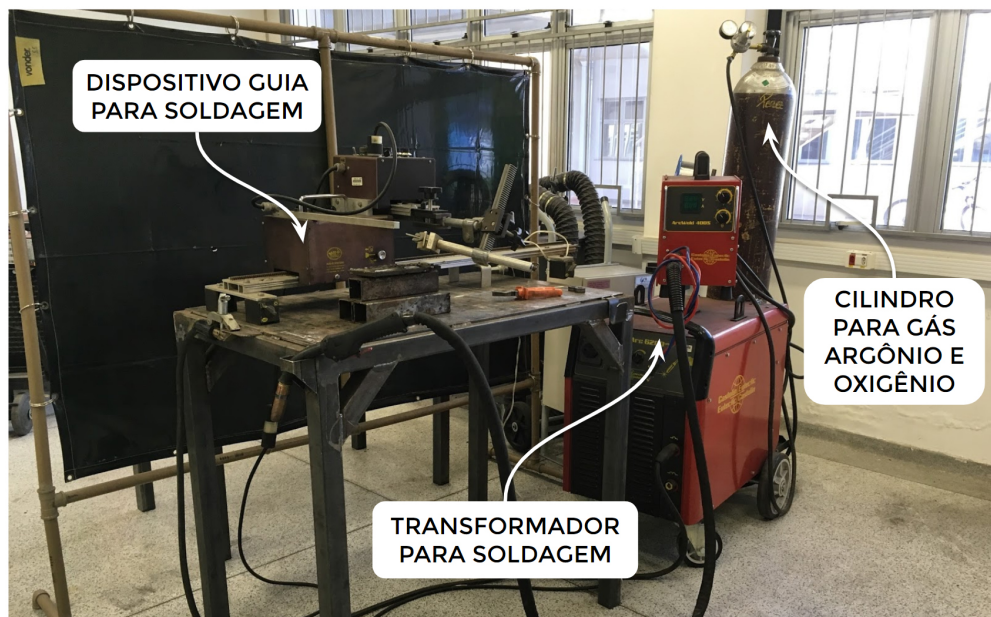
3.1.3 Planejamento de experimentos

Para o planejamento dos experimentos que foram realizados no projeto, utilizou-se a metodologia de experimentos fatoriais 2^k , especialmente usada quando se deseja estudar o efeito, na variável de resposta, da combinação de vários k fatores de controle variados em dois níveis de acordo com Carpinetti (2009).

3.1.3.1 Matriz de experimentação

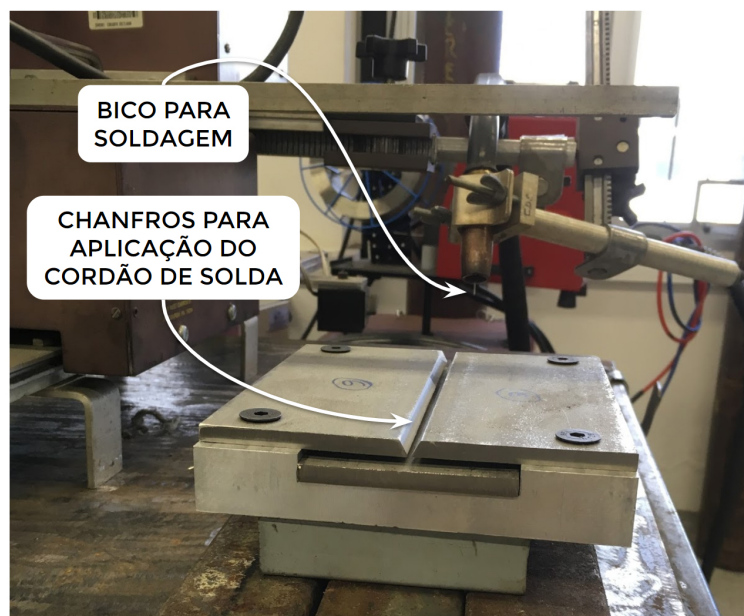
Após uma consulta com a Engenharia de Aplicação da fabricante dos *Flap Discs*, Norton Saint-Gobain referente aos testes de qualidade que são realizados ferramentas de desbaste e acabamento, adotou-se uma velocidade de avanço constante de 10 m/min e uma variante de 15 m/min. Segundo as especificações de uso do produto, utilizam-se inclinações

Figura 14: Sistema de automação do processo MAG utilizado para a soldagem.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 15: Corpo de prova posicionado antes da soldagem.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

de 15° quando os objetivos são acabamento mais refinado da peça e 30° quando o objetivo é proporcionar ao processo uma mais remoção de material.

Como pode ser visto no Quadro 1, selecionou-se diferentes geometrias de ferramentas para verificar se essa diferença traz discrepâncias significativas no resultado do processo. O

preço médio dos *Flaps Discs* foi calculado realizando uma consulta simples em *Marketplaces online*.

Quadro 1: Características dos *Flap Discs* selecionados.

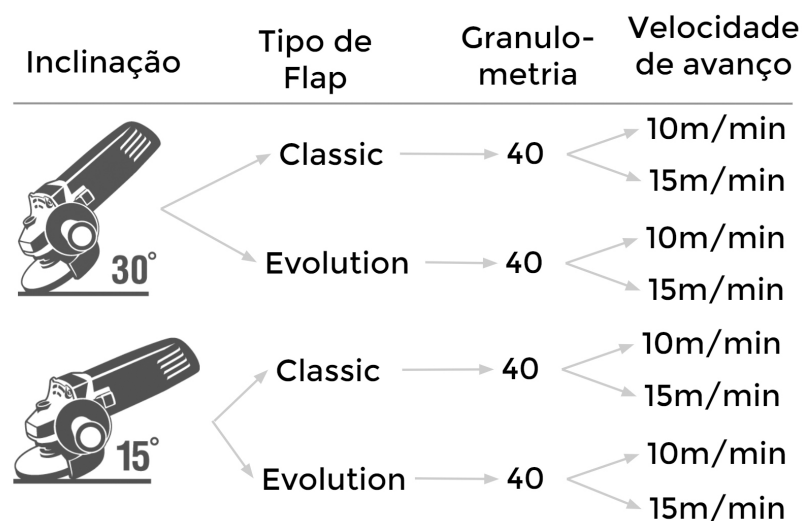
	Tipo da Geometria	Preço Médio	Tipo do Grão
Flap Disc Classic (Grão 40, 115 mm)	29 - Cônico	R\$7,60	Óxido de alumínio Zirconado
Flap Disc Evolution (Grão 40, 115 mm)	27 - Cilíndrico	R\$10,70	Óxido de alumínio Zirconado

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Segundo [Saint-Gobain \(2015\)](#) e também a Engenharia de Aplicação da Norton Saint-Gobain, como a remoção de cordões de solda são processos de alta remoção, experimentalmente maiores velocidades de rotações do disco (n_d) trazem melhores desempenhos, desde que não se exceda a rotação máxima de 13.300 RPM. A esmerilhadeira utilizada neste projeto foi a GWS 17-125 CIE Professional da marca Bosch cuja rotação máxima é de 10.400 RPM. Desta forma, este foi o valor determinado para n_d .

Na Figura 16 é mostrada a matriz de combinação de parâmetros de usinagem (fatores de controle) variados em dois níveis resultando $2^3 = 8$ condições diferentes de experimentação sendo que para cada uma foi realizada uma réplica resultando um total de 16 ensaios.

Figura 16: Planejamento dos parâmetros dos ensaios.



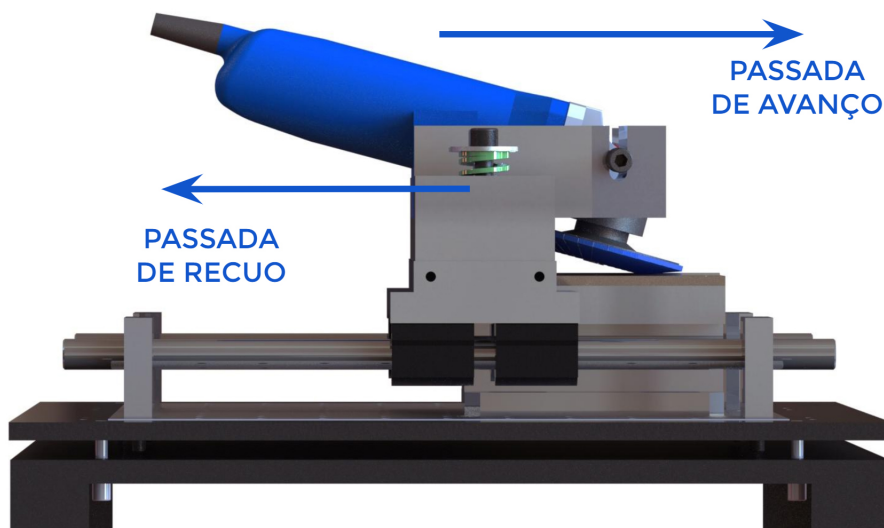
Fonte: Elaborada pelo Autor.

3.1.3.2 Planejamento da dinâmica dos experimentos

O movimento padronizado da esmerilhadeira consiste em duas passadas, a primeira de avanço e a segunda de recuo, sendo que quando as duas são realizadas, conclui-se um ciclo de lixamento. Neste trabalho foram realizados 25 ciclos de lixamento em cada experimento para se quantificar as grandezas físicas do processo, por exemplo a potência dissipada e vibração todas em função do tempo. Quantificou-se também posteriormente ao processo a variação de massa referente ao desgaste da ferramenta abrasiva, bem como a remoção do cordão de solda.

Para cada ensaio foram realizados dois tipos de passadas: 25 passadas de avanço e 25 passadas de recuo alternando-as entre si resultando um total de $n_{Passadas} = 50$ passadas seguindo a lógica esquematizada na Figura 17:

Figura 17: Esquema do ciclo de lixamento: passada de avanço e passada de recuo.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

3.2 Fase 2: Execução dos experimentos

Os tópicos a seguir abordarão os procedimentos para recolhimento de dados durante e após o processo de lixamento manual.

3.2.1 Monitoramento do processo

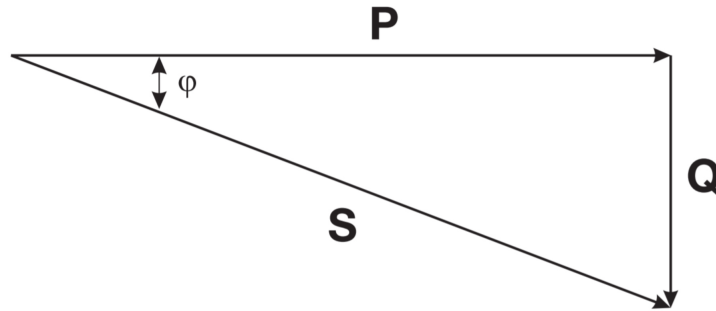
De acordo com o teorema da amostragem de Shannon abordado em [Tönshoff e Inasaki \(2001\)](#), a taxa de amostragem de um sinal em um sistema deve ser maior que o dobro da frequência de excitação desse sistema, que neste caso é a frequência de rotação da esmerilhadeira $n_d = 10.400$ RPM (≈ 173 Hz). Desta forma, para a aquisição dos dados de potência, vibração e ruído do processo, foi utilizada uma taxa de amostragem de 2.000 Hz

para se obter uma melhor precisão do sinal. Utilizou-se o CompactDAQ Chassi cDAQ-9174 da National Instruments, sendo nele colocados dois módulos de aquisição: o NI9205 e o NI9233. Os tópicos a seguir trazem os detalhes da estruturação de cada um dos sensores.

3.2.1.1 Monitoramento da potência

De acordo com a metodologia apresentada em 2.2.3.2, é possível calcular a energia dissipada no processo de lixamento manual, desde que se conheça a curva de potência dissipada pela esmerilhadeira. Esmerilhadeiras em geral possuem um motor elétrico universal, o qual a potência total é dada da $P_{Aparente}$ (S) que é resultante da P_{Ativa} (P) com a $P_{Reativa}$ (Q) e tais grandezas se relacionam através da relação mostrada Figura 18:

Figura 18: Relação trigonométrica das potências existentes em um motor elétrico.



Fonte: WEG (2019).

A parcela P_{Ativa} (P) realiza trabalho, ou seja, promove a transformação de energia elétrica em energia mecânica, neste caso rotacionando o motor elétrico da esmerilhadeira para promover a rotação n_d do disco. A parcela $P_{Reativa}$ (Q) “não” realiza trabalho nesse funcionamento. Ela é apenas transferida e armazenada nos elementos passivos (capacitores e indutores) do circuito (WEG, 2019). Para os cálculos deste trabalho é necessário conhecer a energia proveniente da potência ativa P_{Ativa} que se relaciona com potência aparente $P_{Aparente}$ através da Equação 3.3 onde $\cos \varphi$ é conhecido como *Fator de Potência*.

$$P_{Ativa} = \cos \varphi \cdot P_{Aparente} \quad (3.3)$$

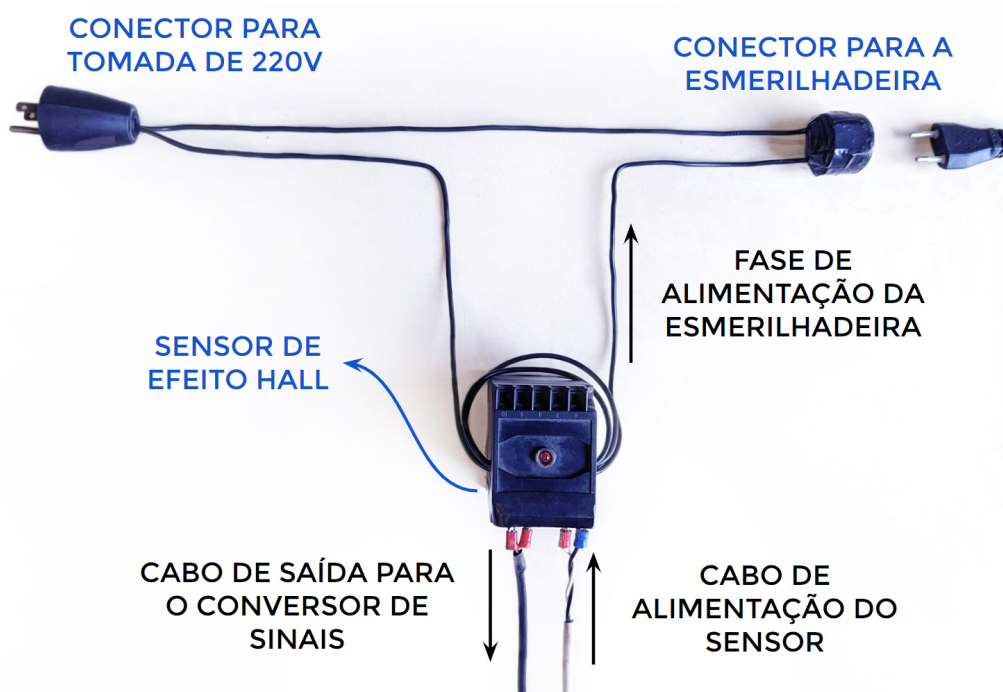
Segundo os estudos apresentados em Kaňuch e Višny (2009), motores elétricos universais, quando operados em $n_d = 5.000$ RPM, têm seu *Fator de Potência* variado entre 0,8 e 0,9 a medida que o aumenta-se torque aplicado nesse motor. O aumento da velocidade de rotação também proporciona o aumento do *Fator de Potência*, tendenciando seu valor para 1. A esmerilhadeira utilizada neste trabalho opera em $n_d = 10.400$ RPM e como buscou-se uma análise comparativa entre condições testadas e não determinação de valores intrínsecos de energia, considerou-se para simplificação dos cálculos $\cos \varphi = 1$,

uma vez que essa simplificação não mudaria os resultados e conclusões finais. Desta forma, especificamente para esse trabalho e os seus propósitos tem-se:

$$P(t) = P_{Ativa} = P_{Aparente} \quad (3.4)$$

O sensor de efeito Hall utilizado foi o modelo NW-SCD, da marca Newtronic Automação Ltda. e foi estruturado como mostra a Figura 19:

Figura 19: Estruturação para o sensor de efeito Hall.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

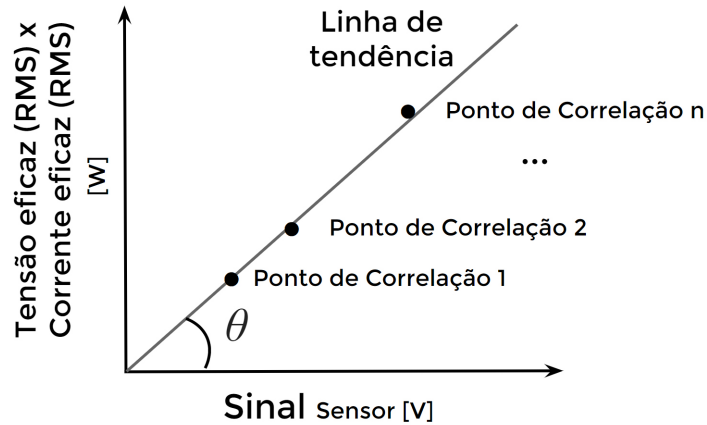
O sensor analisa uma fase de alimentação da esmerilhadeira, enviando um sinal em volts proporcional à corrente consumida pela esmerilhadeira para a placa de aquisição de dados e posteriormente para o *LabView*. A curva deste sinal é definida pela função $Sinal_{Sensor}(t)$ e a Equação 3.5 mostra sua relação com a potência $P(t)$ onde α é a constante de proporcionalidade:

$$P(t) = \alpha \cdot Sinal_{Sensor}(t) \quad (3.5)$$

Para determinar o valor de α , criou-se num ambiente de laboratório várias ligações elétricas com resistores para dissipar diferentes valores de potência. Uma vez que $P_{Aparente}$ é o resultado da multiplicação da tensão eficaz (RMS) pela corrente eficaz (RMS), mediu-se

com um multímetro vários valores de tensão e corrente no fio em que essas ligações elétricas foram feitas com e correlacionou-se o produto entre elas com o respectivo $Sinal_{Sensor}(t)$ que havia sido registrado naquele instante e construiu-se um gráfico de correlação de acordo com a ideia expressada na Figura 20:

Figura 20: Correlação entre o sinal do sensor de efeito Hall e a potência dissipada.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

A inclinação da linha de tendência entre os pontos correlacionados encontrados possui o ângulo θ cuja tangente é igual ao coeficiente angular α . Assim tem-se:

$$\alpha = \tan \theta \quad (3.6)$$

Finalmente aplicando a Equação 3.6 na Equação 3.5, tem-se a relação definitiva de correlação do sinal oriundo do sensor com a potência dissipada, a qual apresentada na Equação 3.7:

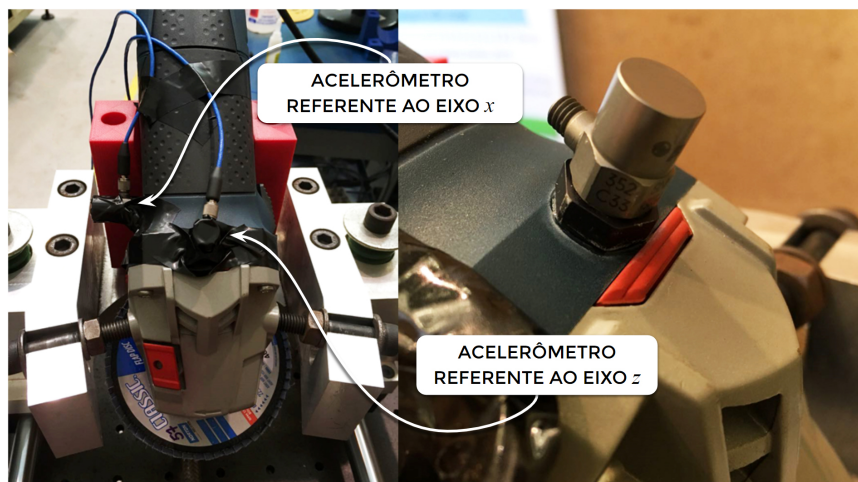
$$P(t) = (\tan \theta) \cdot Sinal_{Sensor}(t) \quad (3.7)$$

Essa equação será utilizada posteriormente na seção 3.3 para o cálculo do consumo energético.

3.2.1.2 Monitoramento da vibração

Para a análise de vibração oriunda do processo, foram utilizados dois acelerômetros piezoelétricos modelos 353B03 e 352C33 da marca PCB Piezotronics no eixo x e y , respectivamente. A Figura 21 mostra a estruturação dos acelerômetros na esmerilhadeira.

Figura 21: Acelerômetros PCB Piezotronics, sendo no eixo x o modelo 353B03 e no eixo y o modelo 352C33.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

3.2.1.3 Monitoramento do ruído

Para aquisição dos níveis de ruído do sistema, foi utilizado o Decibelímetro Instru-
temp – DEC-460, de saída de DC com relação 10 mV/Db, o qual foi conectado à placa de
aquisição de dados em tempo real juntamente aos outros sensores.

3.2.2 Medições pós processo

Esta seção abordará a metodologia para medições realizadas após os experimentos
de lixamento como a variação de massas dos corpos de prova e dos *Flap Discs* e também
as medições de rugosidade.

3.2.2.1 Estudo de variação de massas

Antes de iniciar quaisquer experimentos, todos os corpos de prova e *Flap Discs*
selecionados foram pesados e os valores de suas respectivas massas foram registrados. Para
a medição de variação de massa dos *Flap Discs* foi utilizada a balança de precisão Marte
AD200 com precisão de 0,001 g e para a medição variação de massa dos corpos de prova
foi utilizada a balança de precisão BEL Engineering L20102i, com precisão de 0,01 g com
verificação INMETRO N^o 20.831.964-5.

Inicialmente a literatura utiliza como avaliação de desempenho em processos de
retificação a Relação G, onde V_w , que é o volume de material removido da peça [mm^3] é
dividido por V_s que representa o volume desgastado da ferramenta [mm^3]. Como neste
processo é inviável mensurar a variação volumétrica do *Flap Disc* e da região lixada
no corpo de prova, propõe-se, embasando-se na Relação G (Equação 2.2) de Malkin e
Guo (2008), uma Relação $G_{(Modificada)}$, que ao invés de analisar as variações de volume,

considera as variações de massa tanto do *Flap Disc* quanto dos corpos de prova, a qual é mostrada na Equação 3.8:

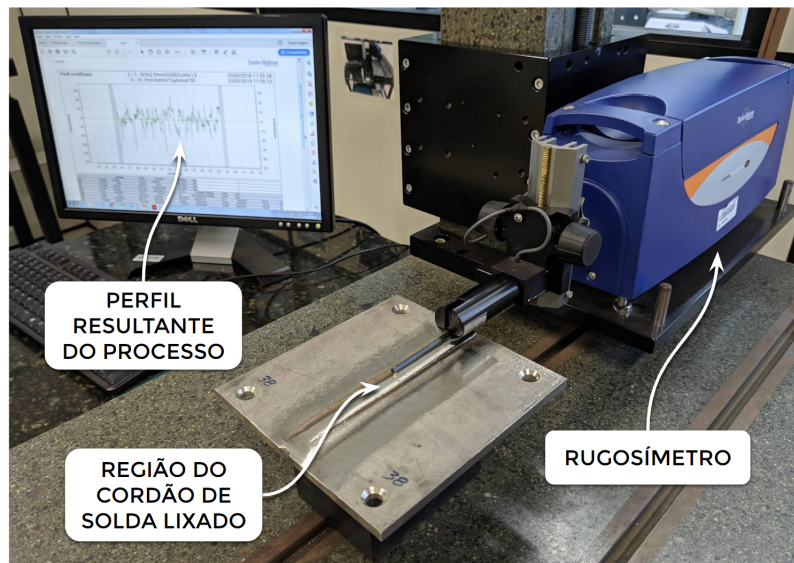
$$\text{Relação } G_{(\text{Modificada})} = \frac{\Delta \text{Massa}_{CP}}{\Delta \text{Massa}_{\text{Flap Disc}}} \quad (3.8)$$

Os valores de ΔMassa_{CP} e $\Delta \text{Massa}_{\text{Flap Disc}}$ também foram utilizados para calcular a quantidade de resíduos sólidos gerados no processo.

3.2.2.2 Análise de qualidade superficial

A análise da qualidade superficial é um importante parâmetro de qualidade em processos abrasivos e será utilizada para construção dos indicadores de sustentabilidade cujo conceito foi abordado e explicitado na Equação 2.5. Para a análise da qualidade superficial utilizou-se o rugosímetro digital Taylor Hobson Precision – Form Talysurf 50 apresentado na Figura 22:

Figura 22: Rugosímetro Taylor Hobson Precision - Form Talysurf 50.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Segundo Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), foi possível realizar a determinação dos comprimentos de amostragem l_r e avaliação l_n de rugosidade.

Realizou-se medições do cordão antes e depois dos experimentos preliminares de lixamento para determinar uma expectativa de rugosidade e verificou-se que ambas as medições estiveram num intervalo de $2 \mu m$ a $10 \mu m$ para R_a e num intervalo de $10 \mu m$ a $50 \mu m$ para R_z . Ambos os intervalos se remeteram a comprimento de amostragem $l_r = 2,5 mm$ e avaliação $l_n = 12,5 mm$.

As Figuras 23 e 24 mostram à esquerda a rugosidade de um cordão de solda sendo medida antes do lixamento e a direita após o lixamento:

Figura 23: À esquerda, a medição de rugosidade no cordão de solda antes da realização do lixamento e à direita, a medição de rugosidade no cordão de solda após a realização do lixamento.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 24: Detalhes do posicionamento da ponta do rugosímetro durante as medições.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Inicialmente, definiu-se uma rugosidade R_a e R_z típica de cordões antes de serem lixados desse tipo através de uma inspeção inicial de 16 amostras resultando $R_{a\text{ Médio}} = 7,04 \mu\text{m}$ com $\sigma = 0,92 \mu\text{m}$ e $R_{z\text{ Médio}} = 37,99 \mu\text{m}$ com $\sigma = 5,14 \mu\text{m}$. Tais valores foram utilizados como valores de rugosidade inicial para todos os cálculos dos indicadores que envolvem esse parâmetro de qualidade.

As regiões de amostragem foram posicionadas no centro do cordão de solda de forma a eliminar os efeitos das bruscas entradas e saídas do *Flap Disc* nos momentos de inversão de sentido das passadas.

3.3 Fase 3: Tratamento dos dados

Esta seção explicitará a metodologia de tratamento dos dados adquiridos do processo. Sendo os dados de potência para o cálculo do consumo energético ($\Delta Energia$), dados de aceleração para cálculo dos níveis de vibração ($\Delta Vibração$), dados do decibelímetro para o cálculo dos níveis de ruído ($\Delta Ruído$) e a estimativa da taxa de remoção de material (Q_w).

3.3.1 Cálculo do consumo energético

Conhecendo a relação da potência dissipada com o sinal do sensor de efeito hall a partir da Equação 3.7, pode-se calcular a variação de energia para cada condição testada a partir da seguinte relação:

$$\Delta Energia = \int_{t_0}^{t_f} P(t)dt = (\tan \theta) \int_{t_0}^{t_f} Sinal_{Sensor}(t)dt \quad (3.9)$$

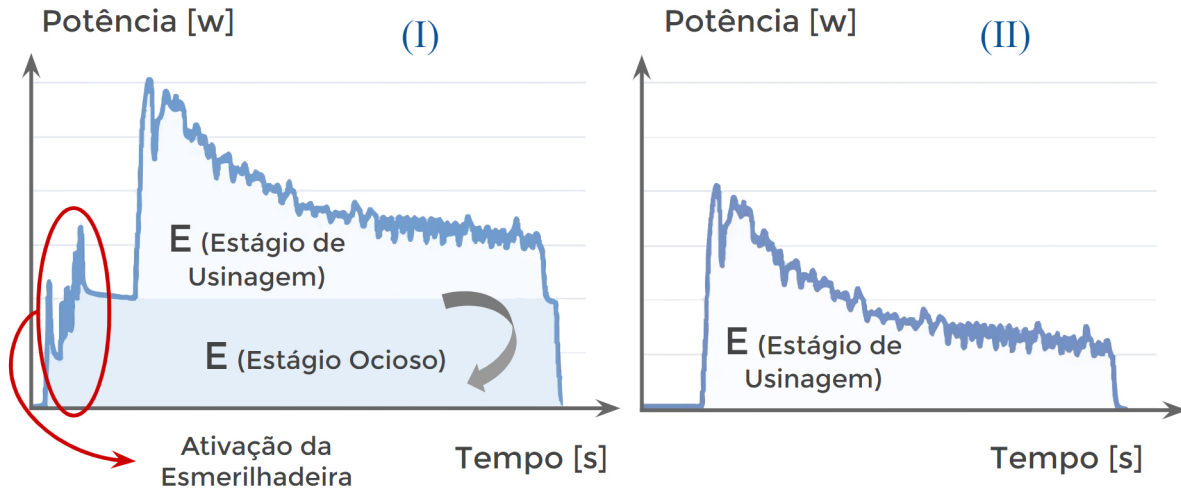
A integral definida da Equação 3.9, define que em um processo que dissipe certa potência, a energia total consumida pode ser calculada pela área abaixo dessa curva $P(t)$ dentro do intervalo do instante inicial t_0 até o instante final t_f . O número finito atingido expressa a energia consumida durante o todo o processo. Como os valores de potência serão expressos em Watts [W], e o tempo em segundos [s], temos que a unidade de energia estará na unidade de Joules [J], já que $[J] = [W] \cdot [s]$.

O gráfico (I) da Figura 25, expressa a curva típica de $P(t)$ de um processo de lixamento manual que pode ser interpretado como tendo estágios: O estágio ocioso, que remete ao consumo energético apenas para o funcionamento da esmerilhadeira, e o estágio de usinagem, que é quando começa o processo abrasivo entre o *Flap Disc* e o corpo de prova.

Nesta análise, para fins comparativos, apenas a Energia do Estado de Usinagem (gráfico II da Figura 25) foi considerada, uma vez que a energia do Estágio Ocioso é imutável a quaisquer parâmetros, desta forma deve-se subtrair de cada valor da potência total o valor da potência dissipada pela esmerilhadeira no Estágio Ocioso resultando o gráfico II.

Tendo-se os dados de potência dissipada com a subtração já realizada, estes dados foram colocados na forma vetorial no MATLAB, onde a função “trapz” que calcula a integral aproximada de um vetor y através do método trapezoidal com espaçamento

Figura 25: Deslocamento do gráfico de potência em função do tempo para análise do consumo energético no “Estágio de Usinagem”.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

unitário. O tamanho do vetor y determina o intervalo de integração. Uma vez calculada a integral de um vetor que representa a potência tem-se os valores de $\Delta Energia$ consumida.

3.3.2 Cálculo dos níveis de vibração

Durante o experimento foram coletados nos eixos x e z os valores de aceleração em m/s^2 . O valor de $\Delta Vibração$ foi determinado a partir do cálculo do RMS da aceleração de todos os pontos aquisitados durante o experimento (Equação 3.10).

$$\Delta Vibração = a_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N ((a_{xi})^2 + (a_{yi})^2)}{N}} \quad (3.10)$$

a_{RMS} = Valor médio RMS da aceleração de todo o teste.

a_{xi} = Valor da aceleração no eixo x em um determinado instante.

a_{yi} = Valor da aceleração no eixo y em um determinado instante.

N = Número de amostras de cada teste

3.3.3 Cálculo dos níveis de ruído

Em relação aos níveis de ruído, foram registrados todos os valores de ruído em cada instante em uma frequência de aquisição de 2.000Hz. O decibelímetro foi colocado na proximidade da execução do lixamento na altura dos ouvidos do operador. De acordo com a Equação 3.11, calculou-se a média simples do total de n valores registrados e subtraiu-se o *Nível de Ruído Ambiente* que trata-se da média dos valores registrados com

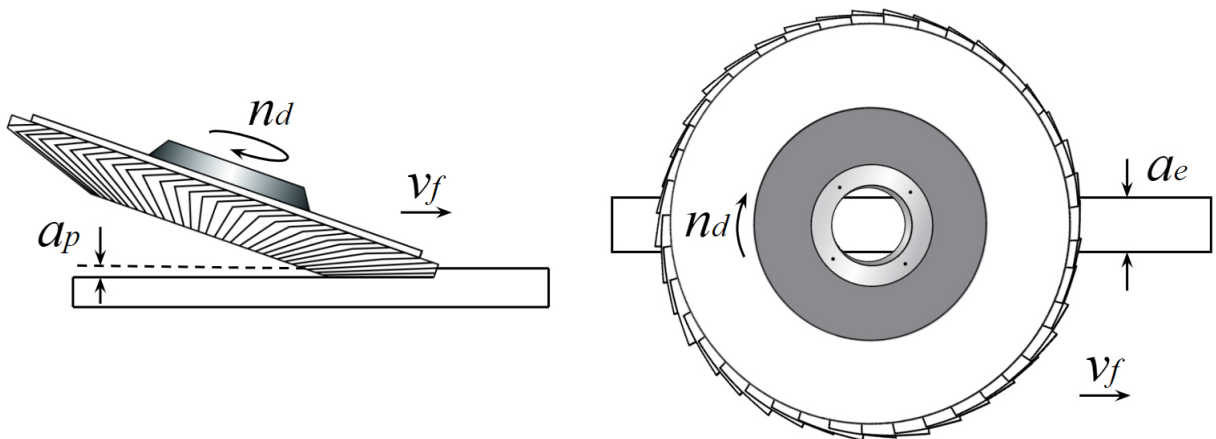
esmerilhadeira desligada determinando-se assim a variação do nível de ruído para o cálculo dos indicadores.

$$\Delta Ruído = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Nível de Ruído}(i) \right) - \text{Nível de Ruído}_{Ambiente} \quad (3.11)$$

3.3.4 Estimativa da taxa de remoção de material

A taxa de remoção de material é um importante parâmetro de performance em processos de usinagem e também será utilizada para construção dos indicadores de sustentabilidade cujo conceito foi abordado e explicitado na Equação 2.5. De forma análoga à Figura 5 que aborda as grandezas de corte ao processo de retificação frontal, a Figura 26 mostra uma esquematização das grandezas de corte do processo de lixamento com o uso de *Flap Discs*.

Figura 26: Visão lateral e superior (da esquerda para a direita) da execução do lixamento manual com o uso de *Flap Discs* onde são representadas as grandezas de corte do processo.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Os tópicos a seguir explicitam uma série de cálculos para se obter uma estimativa das taxas de remoção de material especificamente para essa aplicação do processo de lixamento considerando as suas geometrias, grandezas de corte e parâmetros escolhidos.

Estimativa da profundidade de usinagem (a_p)

Testes de 10 m/min:

Altura média dos cordões dos CPs (testes de 10 m/min): $h_{Médio} = 2,91 \text{ mm}$

Profundidade média de usinagem/passada = $\frac{2,91 \text{ mm}}{50} \Rightarrow a_{p \text{ Médio (10 m/min)}} = 0,058 \text{ mm}$

Testes de 15 m/min:

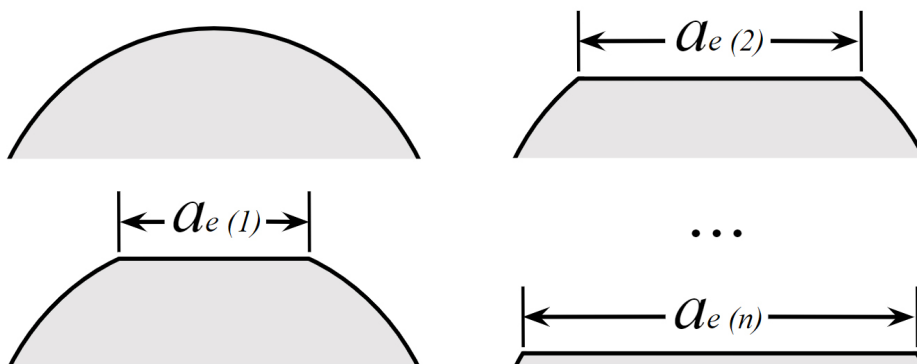
Altura média dos cordões dos CPs (testes de 15 m/min): $h_{Médio} = 2,38 \text{ mm}$

Profundidade média de usinagem/passada = $\frac{2,38 \text{ mm}}{50} \Rightarrow a_{p \text{ Médio (15 m/min)}} = 0,047 \text{ mm}$

Estimativa da penetração de trabalho (a_e)

Considerando que em cada passada da esmerilhadeira o cordão de solda sofria um decréscimo da sua altura equivalente ao $a_{p \text{ Médio}}$, a penetração de trabalho a_e deverá sofrer um aumento progressivo tendo um valor $a_e(i)$ diferente em cada passada como mostra a Figura 27.

Figura 27: Visão frontal de representação do aumento progressivo da penetração de trabalho (a_e) durante a execução do lixamento manual.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Utilizando-se a função *Sketch* do ambiente de desenho 2D do software *SolidWorks* é possível desenhar a seção do cordão de solda da Figura 27 e dividi-la horizontalmente

em $n = 50$ partes tornando possível a mensuração de cada um dos $a_e(i)$ diferentes. Posteriormente obteve-se a média entre os valores e o valor resultante foi estabelecido como uma estimativa do a_e Médio.

Testes de 10 m/min:

$$a_e \text{ Médio (10 m/min)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_e(i) = 5,49 \text{ mm}$$

Testes de 15 m/min:

$$a_e \text{ Médio (15 m/min)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_e(i) = 6,29 \text{ mm}$$

Determinadas as estimativas da profundidade de corte a_p Médio e espessura de penetração a_e Médio e conhecendo os valores das velocidades de avanço v_f foi possível estimar as taxas de remoção de material.

Taxa de remoção de material nos Testes de 10 m/min:

$$\begin{aligned} Q_w &= a_p \text{ Médio} \cdot a_e \text{ Médio} \cdot v_f \Rightarrow 0,058 \text{ mm} \cdot 5,49 \text{ mm} \cdot 10.000 \text{ mm/min} = \\ &= 3184.2 \text{ mm}^3/\text{min} \end{aligned}$$

Taxa de remoção de material nos Testes de 15 m/min:

$$\begin{aligned} Q_w &= a_p \text{ Médio} \cdot a_e \text{ Médio} \cdot v_f \Rightarrow 0,047 \text{ mm} \cdot 6,29 \text{ mm} \cdot 15.000 \text{ mm/min} = \\ &= 4434.5 \text{ mm}^3/\text{min} \end{aligned}$$

Validação das taxas de remoção estimadas

De forma a validar as estimativas de taxas de remoção volumétrica de material Q_w devido a sua grande importância para os indicadores de sustentabilidade realizadas anteriormente, realizou-se uma análise comparativa entre os volumes V_w calculado a partir das dimensões de projeto do cordão de solda (Figura 13) e os volumes $V_w(10 \text{ m/min})$ e $V_w(15 \text{ m/min})$ calculados a partir da taxa de remoção e do tempo estimado de cada teste.

Estimativa do tempo médio de duração dos testes de lixamento

Considerando que as acelerações e desacelerações do motor do motor de passo nos momentos de inversão de sentido da velocidade de avanço estiveram em curtos intervalos de tempo em relação a duração do teste completo e usando conceitos simples de movimento uniforme, pode-se observar na Equação 3.12 a estimativa do tempo médio de cada teste em relação à sua velocidade de avanço utilizada:

$$t_{Médio} = \frac{l_c \cdot n_{Passadas}}{v_f} \quad (3.12)$$

Tendo-se que o cordão de solda possui um comprimento $l_c = 170 \text{ mm}$ pôde-se estimar a remoção volumétrica média de material de cada teste considerando a sua respectiva velocidade de avanço utilizada a partir da Equação 3.13:

$$V_w = Q_w \cdot t_{Médio} = Q_w \cdot \frac{l_c \cdot n_{Passadas}}{v_f} \quad (3.13)$$

Para 10 m/min, têm-se:

$$V_{w(10 \text{ m/min})} = 3.184, 2 \text{ mm}^3/\text{min} \cdot \frac{170 \text{ mm} \cdot 50}{10.000 \text{ mm/min}} = 2.706, 6 \text{ mm}^3$$

Para 15 m/min, têm-se:

$$V_{w(15 \text{ m/min})} = 4.434, 5 \text{ mm}^3/\text{min} \cdot \frac{170 \text{ mm} \cdot 50}{15.000 \text{ mm/min}} = 2.512, 9 \text{ mm}^3$$

Como visto na seção de construção dos corpos de prova, a estimativa do volume do cordão de solda a ser lixado baseado nas dimensões do cordão de solda apresentadas na Figura 13 é de $V_w = 2.430 \text{ mm}^3$. Os volumes de material a ser removido calculados a partir das taxas de remoção Q_w estimadas têm proximidade considerável à esse valor, o que valida as estimativas realizadas. As divergências dos valores são provavelmente devido às aproximações dos cálculos e das variação das alturas reais dos cordões soldados.

3.4 Fase 4: Análise de sustentabilidade

3.4.1 Propostas de indicadores de sustentabilidade

Tendo-se como base a forma geral do o indicador de eficiência η_{sust} abordado e explicitado na Equação 2.5, define-se especificamente para este trabalho vários indicadores que serão utilizados para análise comparativa das condições testadas.

No caso dos indicadores que envolvem vibração e ruído, a variação dessas grandezas não está sendo considerada como uma utilização de recurso em si, mas a sua variação é diretamente proporcional aos impactos negativos na saúde do operador, desta forma, melhores serão os resultados se essas respectivas variações forem baixas.

A seguir, pode-se verificar todos os indicadores de sustentabilidade propostos neste projeto:

- Indicadores η_{sust} : (ΔR_a) como Δ Parâmetro de Qualidade

$$\eta_{sust}Energia \rightarrow R_a = \frac{\Delta R_a}{\Delta Energia} \quad (3.14)$$

$$\eta_{sust}Resíduo \rightarrow R_a = \frac{\Delta R_a}{\Delta Resíduo} \quad (3.15)$$

$$\eta_{sust}Vibração \rightarrow R_a = \frac{\Delta R_a}{\Delta Vibração} \quad (3.16)$$

$$\eta_{sust}Ruído \rightarrow R_a = \frac{\Delta R_a}{\Delta Ruído} \quad (3.17)$$

- Indicadores η_{sust} : (ΔR_z) como Δ Parâmetro de Qualidade

$$\eta_{sust}Energia \rightarrow R_z = \frac{\Delta R_z}{\Delta Energia} \quad (3.18)$$

$$\eta_{sust}Resíduo \rightarrow R_z = \frac{\Delta R_z}{\Delta Resíduo} \quad (3.19)$$

$$\eta_{sust}Vibração \rightarrow R_z = \frac{\Delta R_z}{\Delta Vibração} \quad (3.20)$$

$$\eta_{sust}Ruído \rightarrow R_z = \frac{\Delta R_z}{\Delta Ruído} \quad (3.21)$$

- Indicadores η_{sust} : (ΔQ_w) como $\Delta Performance$

$$\eta_{sust} Energia \rightarrow Q_w = \frac{\Delta Q_w}{\Delta Energia} \quad (3.22)$$

$$\eta_{sust} Resíduo \rightarrow Q_w = \frac{\Delta Q_w}{\Delta Resíduo} \quad (3.23)$$

$$\eta_{sust} Vibração \rightarrow Q_w = \frac{\Delta Q_w}{\Delta Vibração} \quad (3.24)$$

$$\eta_{sust} Ruído \rightarrow Q_w = \frac{\Delta Q_w}{\Delta Ruído} \quad (3.25)$$

Nos estudos de [Linke et al. \(2014\)](#), os indicadores são aplicados em apenas uma condição de teste para analisar a variação dos seus valores durante o tempo de usinagem, podendo-se desta forma avaliar qual é a duração ideal de execução de certa operação de forma a manter os indicadores com valores aceitáveis.

Neste projeto foi calculado apenas um valor final de cada indicador para oito condições de testes diferentes, tornando possível uma análise comparativa entre elas de forma a auxiliar a tomada de decisão de qual condição escolher para que os resultados dos indicadores estejam alinhados com a estratégia de determinada empresa que execute esse tipo de operação.

A nomenclatura adotada para os indicadores tenta sintetizar o seu significado. Por exemplo: $\eta_{sust} Resíduo \rightarrow Q_w$ é um indicador de sustentabilidade que normaliza a taxa de remoção de material Q_w do processo com a quantidade resíduo sólido gerado ($\Delta Massa_{CP} + \Delta Massa_{Flap Disc}$) dentro da unidade funcional proposta.

3.4.2 Definição do objetivo e escopo da ACV

Dentro da definição do objetivo da ACV tem-se a necessidade de se definir a razão do estudo e o público alvo em questão. As razões do estudo dentro da contextualização apresentada em 1.2 é devido à necessidade de se alinhar a aplicação de processos abrasivos manuais com práticas sustentáveis para se diminuir impactos ambientais que podem ser gerados na execução de tais processos. O público alvo em questão são as empresas que produzem ferramentas abrasivas e também empresas que usem tais ferramentas em processos de lixamento manual.

Tendo o objetivo determinado, deve-se determinar o escopo e os tópicos a seguir aborda seus requisitos principais.

3.4.2.1 Sistema de produto a ser estudado

O Sistema de produto que envolve a análise deste estudo trata-se da abordagem *Gate-to-gate* em português "do portão ao portão da fábrica" que indica um estudo apenas da etapa de manufatura de produtos intermediários e/ou do produto final desconsiderando o restante do ciclo de vida.

Na metodologia apresentada em [Filleti \(2015\)](#), quando se realiza um estudo baseado na metodologia *UPLCI*, as fronteiras do sistema devem incluir apenas o que ocorre no interior da unidade de processamento, levando em consideração os fluxos de entrada e saída e todos os subsistemas fundamentais para a execução da função do processo agregando valor a(os) determinado(s) componente(s) do produto final, que neste trabalho é a realização do processo de lixamento manual para a remoção de um cordão de solda.

3.4.2.2 Função, unidade funcional e fluxo de referência

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. Especificamente para o processo de lixamento manual, tem-se no Quadro 2 as seguintes definições para este estudo:

Quadro 2: Definições do processo para a ACV.

Processo	Função	Unidade Funcional
Usinagem por lixamento manual	Remover uma certa quantidade de material	Realização de 50 passadas osciladas com o Flap-Disc de lixamento num cordão de solda de Aço Inox 308L

Fonte: Elaborada pelo Autor.

3.4.2.3 Requisitos de qualidade dos dados

- **Cobertura temporal:** A duração de coleta de dados se resumiu ao tempo necessário para que, em cada condição de teste (combinação de parâmetros do processo), fosse realizada a unidade funcional estabelecida;
- **Cobertura geográfica:** Os dados deste processo foram coletados em um ambiente de simulação de fábrica (LAPRAS), onde foi construída uma bancada de testes para a execução da experimentação do processo;
- **Cobertura tecnológica:** Como explicitado na seção 3.2, o tipo de tecnologia utilizada para a coleta de dados foi para:
 - Monitoramento durante o processo: sensores eletrônicos conectados aos módulos de aquisição;

- Medições Pós-processo: instrumentos de medição como balanças de precisão e um rugosímetro digital.
- **Fonte de dados:** Os dados são todos **primários**, uma vez que foi desenvolvida uma experimentação exclusiva para esse estudo e os dados foram coletados por amostragem direta.

3.4.2.4 Pressupostos e limitações

Dentre os pressupostos e as limitações principais deste estudo, tem-se:

- De acordo com [Silva \(2016\)](#), no qual é realizado uma ACV de processos discretos de manufatura, cabe para o presente estudo uma limitação similar, onde como a definição do sistema de produto se concentra apenas num processo de manufatura isolado (*Gate-to-gate*), os impactos calculados não possuem relação com outras etapas da cadeia de valor;
- Desconhecimento de impactos relacionados à manufatura de alguns componentes do *Flap Discs*, uma vez que a análise considera apenas o material abrasivo desconsiderando o costado e a sua base para fixação da esmerilhadeira;
- Desconhecimento de impactos relacionados à manufatura da base dos corpos de prova, uma vez que só foi considerado o material do cordão de solda;
- Inexatidão dos impactos gerados, uma vez que o software utilizado (*GaBi*) possuía limitações nas bases de dados disponíveis.

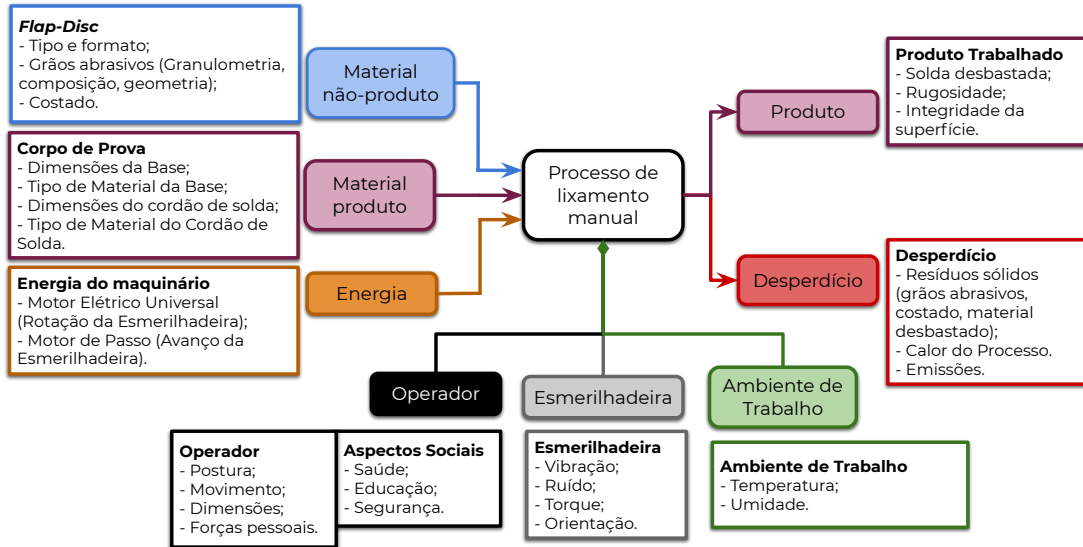
3.4.3 Modelagem ambiental do processo de lixamento manual

No processo de lixamento manual ocorrem diversos tipos de emissões e consumos de materiais e utilização direta e indireta de recursos. Constantemente, ocorrem vibrações na esmerilhadeira devido às irregularidades da peça e execução do operador além de existir a presença de ruídos maiores que 50dB ([SILVA, 2017](#)).

[Linke et al. \(2014\)](#) traz em seu estudo uma abordagem detalhada de processos abrasivos manuais. No trabalho há uma preocupação em considerar todos os componentes do processo em um diagrama abrangente de entrada e saída, de forma a facilitar o entendimento dos fluxos de recursos envolvidos. Além dos fluxos de recursos, o operador, a máquina (esmerilhadeira) e o ambiente de trabalho afetam direta e indiretamente resultado final.

Uma adaptação do diagrama de fluxos foi elaborada especificamente para o processo de lixamento manual executado neste trabalho como representado na Figura 28.

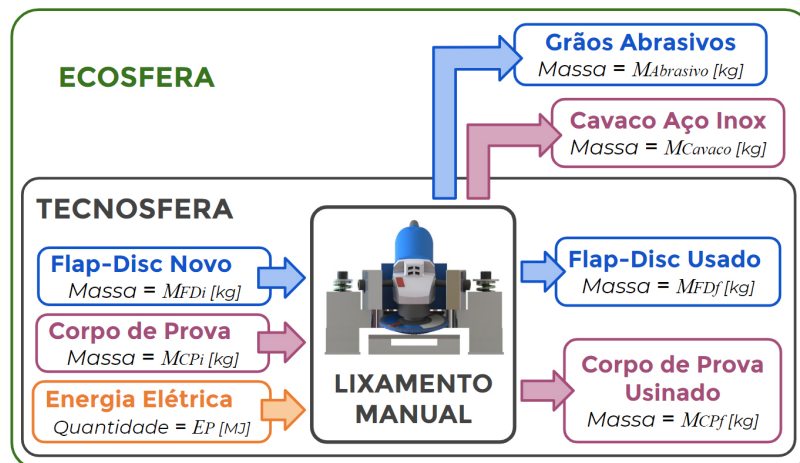
Figura 28: Diagrama de Fluxos do processo de lixamento manual.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Tendo em consideração a visão sistêmica do processo de lixamento manual apresentada na Figura 28, é necessário analisar quais destes fluxos devem ser quantificados para que seja feita a ACV. A Figura 29 mostra esses fluxos e servirá de guia para a modelagem do processo no software GaBi 7.2.

Figura 29: Estudo de entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) do processo.

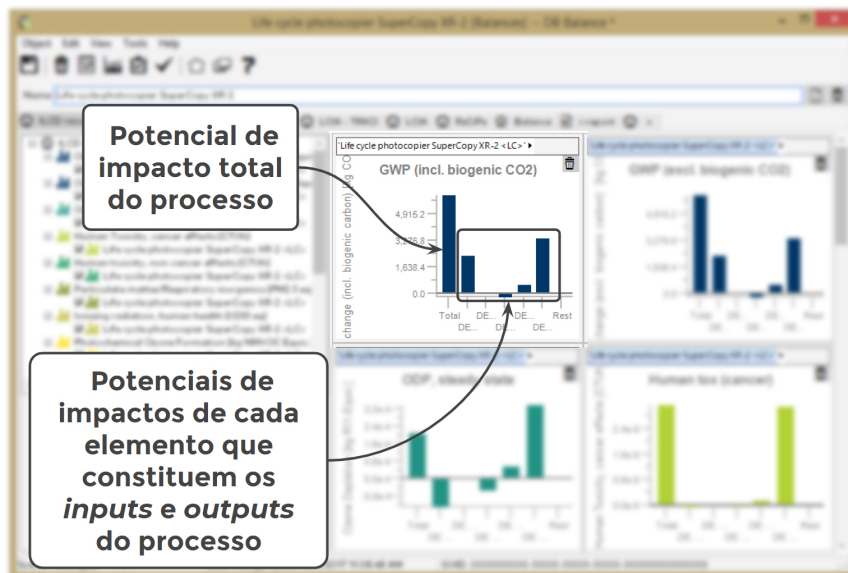


Fonte: Elaborada pelo Autor.

Os fatores que envolvem a deposição final do *Flap Disc* ao final de sua vida útil não são abordados nesse trabalho. Desta forma, tem-se uma barreira definida para o ACV. Outra barreira é a determinação do início da análise de sustentabilidade a partir do processo em si desconsiderando os processos produtivos costado dos *Flap Discs* e também dos processos de soldagem que foram utilizados para a confecção dos cordões de solda nos corpos de prova.

De acordo com a Figura 30, os resultados dos potenciais de impactos de um determinado processo são calculados pelo GaBi 7.2 de maneira que o potencial de impacto total do processo é a soma de potenciais de impactos de cada elemento das suas entradas e saídas.

Figura 30: Interface do GaBi na apresentação dos potenciais impactos.

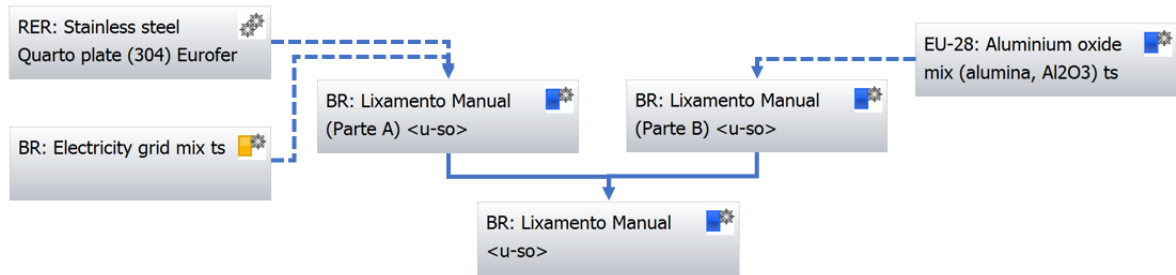


Fonte: Elaborada pelo Autor.

Devido às limitações da versão do software disponível e as diferenças das bases de dados que continham os elementos do processo, o modelo ambiental foi dividido em duas partes e os potenciais de impactos gerados por cada parte foram somados ao final da geração do ACV de forma a determinar uma aproximação dos potenciais de impactos totais do processo.

De acordo com a metodologia de modelagem ambiental apresentada por Filleti (2015) a modelagem apresentada na Figura 31 possui os *inputs* convergidos na unidade de processamento representada pelo “Lixamento manual” a qual é responsável agregar valor à peça, transformando tais *inputs* em produto final e emissões. O fluxo de saída (cavaco gerado e material abrasivo desgastado), não é mostrado no modelo, mas é referenciado internamente no bloco de operação “Lixamento manual <u-so>”.

Figura 31: Modelagem ambiental do processo de lixamento manual pelo software GaBi.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

As informações referentes ao suprimento de energia elétrica utilizada no processo, são baseadas no banco de dados de ICV do GaBi 7.2 “BR: Electricity grid mix”.

O cordão de solda lixado, composto aço inoxidável 308L foi representado no software GaBi pelo aço inoxidável 304, também presente no banco de dados de ICV do GaBi 7.2 como “RER: Stainless Steel Quarto plate (304) Eurofer”.

Para representar a ferramenta abrasiva, mais especificamente os grãos abrasivos, foi utilizado o composto “EU-28: Aluminium Oxide mix (Alumina, Al₂O₃) ts” presente no banco de dados de ICV do GaBi 7.2.

A geração de resultados de potenciais de impactos, foi baseada da base de dados *ILCD recommendations* presente no banco de dados de ICV do GaBi 7.2.

4 RESULTADOS

Nesta seção serão explicitados todos os resultados referentes aos Indicadores e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

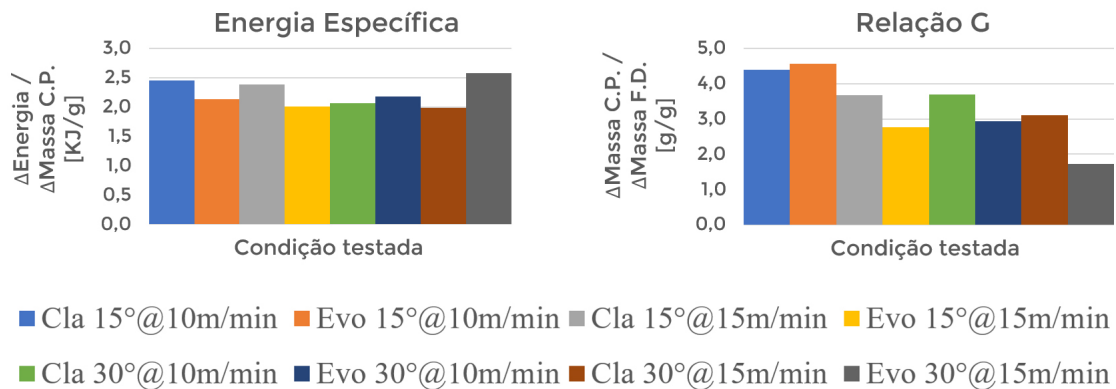
4.1 Indicadores

Os tópicos a seguir abordarão os resultados dos Indicadores de desempenho e de sustentabilidade apresentados na seção 3.4.1:

4.1.1 Indicadores de desempenho

Os primeiros resultados de análise do processo referem-se aos indicadores de desempenho. Na Figura 32 pode-se observar a análise comparativa dos testes, sendo à esquerda referente à Energia Específica (Equação 2.4) e à direita referente à Relação $G_{(Modificada)}$ (Equação 3.8).

Figura 32: Indicadores de desempenho do lixamento manual.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Nos resultados de Energia específica, as condições de testes apresentaram valores relativamente próximos, sendo o pior caso o uso do *Flap Disc Evolution* quando utilizado com $v_f = 15$ m/min e a inclinação de 15°.

Nos resultados de Relação $G_{(Modificada)}$, os maiores valores demonstram uma maior capacidade de corte do *Flap Disc*, ou seja, mais material removido por grama de abrasivo gasto. Visualmente o *Flap Disc Evolution* apresentou melhor desempenho, quando utilizado com $v_f = 10$ m/min e a inclinação de 15°.

Por outro lado as três combinações restantes do *Flap Disc Evolution* tiveram o pior desempenho. Na Tabela 1 comparou-se qual tipo ganhou, mantendo os parâmetros de

inclinação e v_f constantes:

Tabela 1: Comparação da Relação $G_{(Modificada)}$ considerando as condições de testes inclinação e v_f constantes.

	15° e 10 m/min	15° e 15 m/min	30° e 10 m/min	30° e 15 m/min
Evolution	Ganha com 0,18 de diferença	Perde	Perde	Perde
Classic	Perde	Ganha com 0,92 de diferença	Ganha com 0,76 de diferença	Ganha com 1,38 de diferença

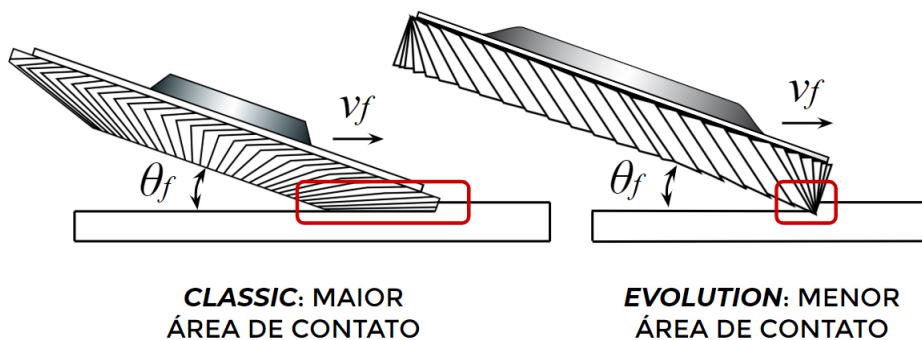
Fonte: Elaborada pelo autor

Na situação em que o *Flap Disc Evolution* foi o melhor, teve pouca diferença no valor da Relação $G_{(Modificada)}$ se comparado com as outras situações onde o *Flap Disc Classic* obteve melhores resultados.

O *Flap Disc Evolution* possui formato cilíndrico em comparação com o formato cônico do *Flap Disc Classic*, como abordado na Figura 4. Formula-se desta forma uma hipótese onde considerando uma mesma inclinação da esmerilhadeira em relação à peça, as diferentes geometrias dos discos resultarão em uma diferente distribuição dos grãos em contato com a peça.

A Figura 33 traz uma esquema para visualização de tal característica:

Figura 33: Comparativo de atuação de *Flap Discs* diferentes com a mesma velocidade de avanço v_f e inclinação θ_f .

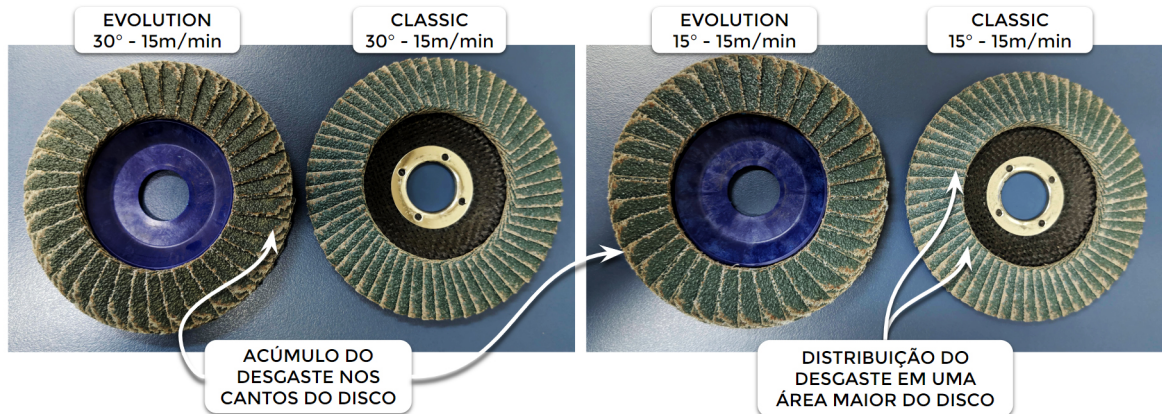


Fonte: Elaborada pelo Autor.

Seguindo essa hipótese, durante a operação, o *Flap Disc Classic* teria uma maior quantidade de grãos abrasivos realizando a remoção de material (maior área de contato), diminuindo a força requisitada por grão contribuindo assim para a diminuição do seu

desgaste, ou uma remoção maior. Já o *Flap Disc Evolution* se desgastaria mais rapidamente pois sua geometria exigiria a mesma carga para menos grãos (menor área de contato). A Figura 34 mostra dois comparativos entre dois *Flap Discs*, *Evolution* e *Classic* após dois testes.

Figura 34: Comparativo do desgaste visual de *Flap Discs* testados nas mesmas condições de velocidade de avanço v_f e inclinação θ_f .



Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.1.2 Indicadores de sustentabilidade

Os indicadores referentes aos aspectos sociais mostrados a seguir consideram o decréscimo nos valores de R_a e R_z ou a variação da taxa de remoção Q_w normalizados pelo acréscimo de energia utilizada no processo nos $\eta_{sust} Energia$ ou pelo acréscimo de resíduos que o processo descartou nos $\eta_{sust} Resíduo$. Em ambos os indicadores quando as variações de recursos são maiores, maior impacto é causado ao meio ambiente.

Referente aos aspectos sociais, os indicadores consideram o decréscimo nos valores de R_a e R_z ou a variação da taxa de remoção Q_w normalizados pelo acréscimo dos níveis de vibração da esmerilhadeira nos $\eta_{sust} Vibração$ ou pelo acréscimo dos níveis de ruído em dB nos $\eta_{sust} Ruído$. Em ambos os indicadores quando as variações desses níveis de normalização são maiores, maior impacto é causado à saúde do operador.

Uma vez que o processo promove o decréscimo das rugosidades R_a e R_z , os valores dos indicadores que consideram a rugosidade como parâmetro de qualidade são negativos, ou seja, quanto menor os valores dos indicadores (maior em módulo), melhor é a condição testada referente àquela análise.

Já nos indicadores que levam em consideração a taxa de remoção Q_w como parâmetro de performance, quanto maiores forem os valores dos indicadores, melhor é a condição testada referente àquela análise.

A Tabela 2 reúne todos os valores dos indicadores calculados neste projeto. A gradação de cores varia entre de vermelho (pior resultado) até o verde (melhor resultado).

Tabela 2: Valores dos indicadores de sustentabilidade para cada condição testada.

Condição Testada	Qw como parâmetro de Performance				Ra como parâmetro de Qualidade				Rz como parâmetro de Qualidade			
	η_{sust} Energia	η_{sust} Resíduo	η_{sust} Vibração	η_{sust} Ruído	η_{sust} Energia	η_{sust} Resíduo	η_{sust} Vibração	η_{sust} Ruído	η_{sust} Energia	η_{sust} Resíduo	η_{sust} Vibração	η_{sust} Ruído
Cla 15° 10 m/min	134,11	267,37	66,50	63,96	-0,18	-0,36	-0,09	-0,09	-0,84	-1,67	-0,42	-0,40
Evo 15° 10 m/min	103,69	181,40	62,16	64,85	-0,15	-0,27	-0,09	-0,10	-0,78	-1,36	-0,46	-0,48
Cla 15° 15 m/min	221,05	414,03	95,65	90,13	-0,19	-0,35	-0,08	-0,08	-0,90	-1,69	-0,39	-0,37
Evo 15° 15 m/min	244,74	361,60	91,06	91,59	-0,23	-0,34	-0,08	-0,09	-1,03	-1,53	-0,38	-0,39
Cla 30° 10 m/min	159,29	258,40	72,67	64,59	-0,26	-0,42	-0,12	-0,10	-1,16	-1,88	-0,53	-0,47
Evo 30° 10 m/min	142,53	231,81	76,97	65,06	-0,17	-0,28	-0,09	-0,08	-0,75	-1,22	-0,40	-0,34
Cla 30° 15 m/min	277,23	415,49	85,89	92,57	-0,19	-0,29	-0,06	-0,07	-0,87	-1,30	-0,27	-0,29
Evo 30° 15 m/min	281,64	459,11	89,98	91,07	-0,27	-0,44	-0,09	-0,09	-1,00	-1,63	-0,32	-0,32

Fonte: Elaborada pelo autor

Nos indicadores que adotam a taxa de remoção Q_w como $\Delta Performance$, verificou-se que sempre que se utilizava $v_f = 15$ m/min (maior taxa de remoção) em quaisquer inclinações ou geometrias, os resultados eram melhores do que nas condições que utilizaram $v_f = 10$ m/min (menor taxa de remoção), ou seja o fato de utilizar taxas de remoção maiores não verifica-se aumento proporcional dos fatores de normalização $\Delta Recurso$.

Nos indicadores R_a e R_z como $\Delta Parâmetro de Qualidade$, viu-se que o *Flap Disc Classic* aplicado com uma inclinação de 30° e com $v_f = 10$ m/min obteve o melhor resultado entre todos.

4.2 Avaliação do Ciclo de Vida - ACV

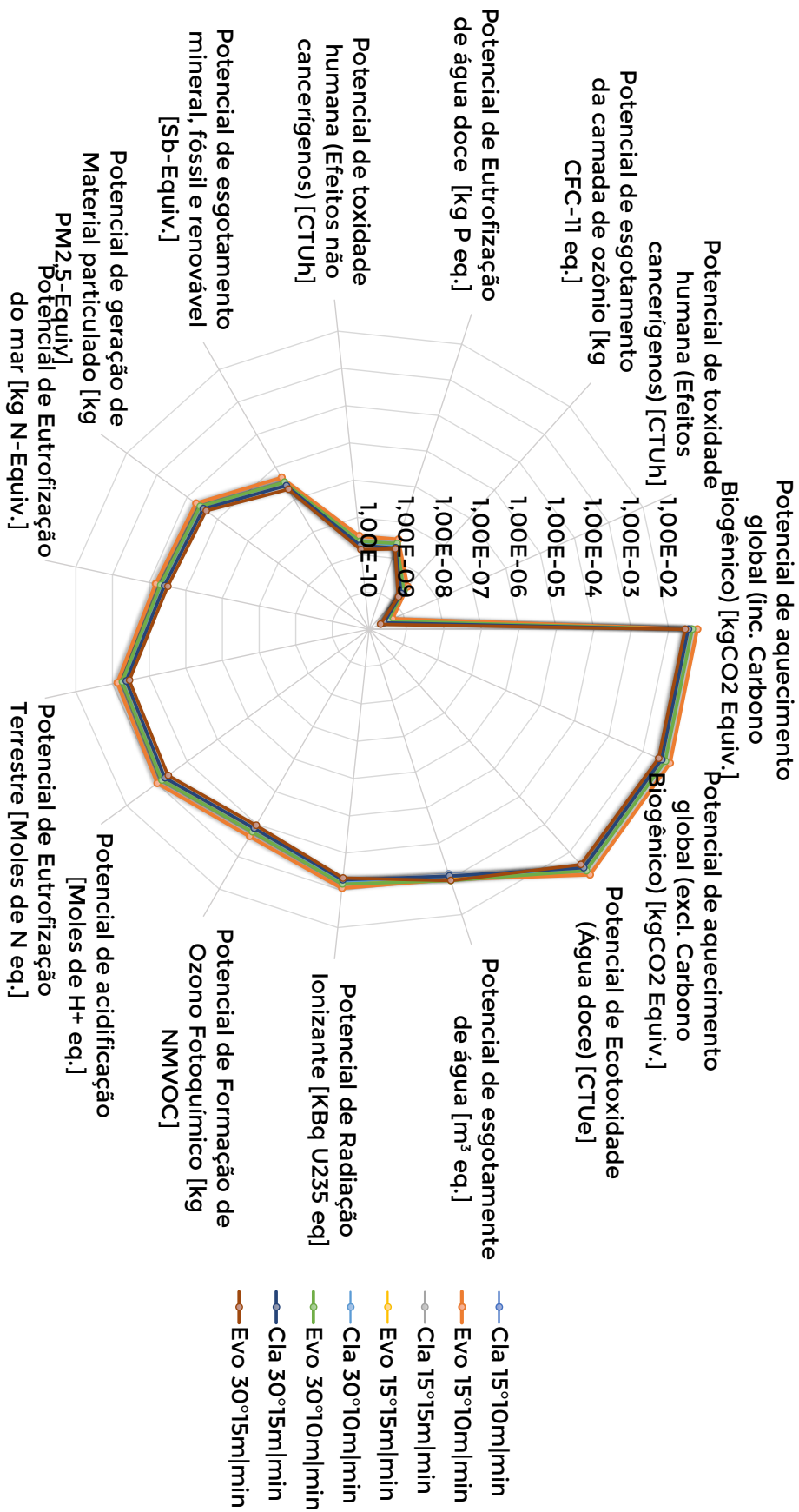
Essa seção abordará os resultados de potenciais de impactos ambientais gerados pelo *Software GaBi*. A seguir, tem-se a listagem dos impactos analisados:

- Potencial de aquecimento global (inc. Carbono Biogênico) [$kgCO_2$ Equiv.]
- Potencial de Eutrofização do mar [kg N-Equiv.]
- Potencial de aquecimento global (excl. Carbono Biogênico) [$kgCO_2$ Equiv.]

-
- Potencial de geração de Material particulado [kg PM_{2,5}-Equiv]
 - Potencial de Ecotoxicidade (Água doce) [CTUe]
 - Potencial de Esgotamento mineral, fóssil e renovável [Sb-Equiv.]
 - Potencial de Esgotamento de água [m^3 eq.]
 - Potencial de Toxicidade humana (Efeitos não cancerígenos) [CTUh]
 - Potencial de Radiação Ionizante [KBq U235 eq]
 - Potencial de Eutrofização de água doce [kg P eq.]
 - Potencial de Formação de Ozono Fotoquímico [kg NMVOC]
 - Potencial de Esgotamento da camada de ozônio [kg CFC-11 eq.]
 - Potencial de Acidificação [Moles de H^+ eq.]
 - Potencial de Toxicidade humana (Efeitos cancerígenos) [CTUh]
 - Potencial de Eutrofização Terrestre [Moles de N eq.]

A análise comparativa dos potenciais de impacto ambiental entre as condições testadas são apresentados na Figura 35. Considerando que os potenciais de impacto devem sempre ser reduzidos ou eliminados, quanto menor a área no gráfico radar, melhor o desempenho ambiental. Pode-se verificar que há uma leve tendência de melhor desempenho para o *Flap Disc Evolution* utilizado a 15 m/min e com inclinação de 30° da esmerilhadeira. O mesmo *Flap Disc Evolution* utilizado na inclinação de 15° da esmerilhadeira, mas na menor $v_f = 10$ m/min, foi o *Flap Disc* que obteve o pior desempenho entre todos.

Figura 35: Potenciais de impactos do lixamento manual.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

5 CONCLUSÕES

Quando o processo de lixamento manual com a utilização de *Flap Discs* é testado nos fabricantes, a experimentação é realizada de forma simples e muitas vezes sem grande diversidade de grandezas analisadas no monitoramento. Com o projeto findado, a bancada de testes aqui apresentada, trouxe um conceito de investigação do processo com uma grande variedade de informações referentes à sua execução o que pode trazer aos fabricantes e também aos clientes que desejem executar com excelência tal processo, a possibilidade de tomar melhores decisões referentes aos parâmetros que devem ser utilizados para que a aplicação de tais ferramentas abrasivas proporcionem os melhores resultados. Pôde-se estudar de forma mais aprofundada as grandezas de corte lixamento manual bem como as peculiaridades do seu comportamento, o que pode ser de grande valor no desenvolvimento de produtos similares e melhorias nas aplicações.

Verificou-se que testando diferentes combinações dos parâmetros do processo (velocidades de avanço, geometrias da ferramenta e inclinações da esmerilhadeira) há variações nas variáveis de saída do processo (consumo energético, vibração, ruído, geração de resíduos sólidos) e na qualidade superficial da peça trabalhada (rugosidade). Uma vez que os resultados dos indicadores de desempenho e da análise de sustentabilidade consideram essas variáveis de saída para serem calculados, foi possível realizar uma análise comparativa gerar as seguintes conclusões:

- Considerando o pior caso dos resultados de energia específica, a aplicação do *Flap Disc Evolution* com $v_f = 15$ m/min e a inclinação de 15° , há uma reflexão de baixa eficiência energética, ou seja, mais energia despendida por grama de material removido e deve ser uma condição evitada;
- Já nos resultados de Relação G, sabendo-se que o *Flap Disc Evolution* apresentou melhor desempenho, quando utilizado com $v_f = 10$ m/min e a inclinação de 15° , esse resultado, possivelmente refletiria uma melhor produtividade para essa condição, já que há uma maior quantidade de material removido com uma menor perda de abrasivo o que reduziria a frequência de trocas de ferramentas;
- Pôde-se gerar hipóteses sobre como, a princípio, a geometria da ferramenta abrasiva utilizada influenciou o resultado final do processo, principalmente referente ao desgaste aparente na ferramenta, uma vez que tem-se informações qualitativas do desgaste visual e também quantitativas referentes aos indicadores calculados. Conclusões mais confiáveis exigiriam um estudo específico dessa ferramenta e sua aplicação para conhecer o comportamento do seu desgaste ao longo do tempo e com outras variáveis sendo levadas em consideração;

- Assim como abordado nos resultados, os indicadores de sustentabilidade que levam em consideração R_a e R_z como Δ Parâmetro de Qualidade, viu-se que o *Flap Disc Classic* aplicado com uma inclinação de 30° e com v_f de 10 m/min geraria menor impacto social ou ambiental uma vez que obteve melhores resultados em praticamente todos os indicadores. Seria necessário uma investigação mais a fundo, pois os tais melhores resultados devem-se em grande parte pelo alto decréscimo de rugosidade que essa condição proporcionou, o que é contraditório uma vez que segundo [Saint-Gobain \(2015\)](#), para melhor qualidade superficial indica-se o formato cilíndrico presente no *Flap Disc Evolution* e inclinações próximas à 10° ;
- Ainda nos resultados dos indicadores de sustentabilidade, especificamente os que adotam a taxa de remoção Q_w como Δ Performance, verificando o resultado que todas as condições que foi utilizada a $v_f = 15$ m/min (maior taxa de remoção) tiveram resultados melhores que as condições que utilizaram 10 m/min (menor taxa de remoção), pode-se assumir que os fatores de normalização Δ Recurso permaneceram estáveis em todas as condições. Desta forma se o intuito da aplicação do *Flap Disc* for apenas a remoção de material sem aumentar Δ Recurso deve-se optar por velocidades de avanço maiores como 15 m/min, sendo o *Flap Disc Evolution* aplicado com uma inclinação de 30° e com $v_f = 15$ m/min foi o que obteve o melhor resultado entre todos;
- A modelagem ambiental construída neste trabalho foi crucial para entendimento dos fluxos de entrada e saída do processo de lixamento manual. Esse entendimento é importante para conhecer quais são as grandezas físicas que necessitam ser mensuradas bem como para dar direcionamento para a aplicação da ACV;
- Se for necessária uma análise ambiental mais aprofundada, a aplicação do ACV mostrou-se útil para também realizar uma análise comparativa entre condições testadas, trazendo relevância para esse tipo de análise até mesmo para processos mais simples e discretos como o lixamento manual;
- Finalmente, este trabalho teve o intuito de contribuir para a construção de uma percepção da sustentabilidade para o processo de lixamento manual desenvolvendo-se uma metodologia de análise que exigiu replicar o processo em diferentes condições, monitorar as grandezas físicas envolvidas, conhecer as limitações da análise e verificar que ela se limita unicamente aos impactos gerados na execução do processo sem considerar impactos referentes às etapas anteriores ao processo como extração ou beneficiamento de recursos naturais envolvidas ou às etapas posteriores aos processo como o uso e descarte do produto final. Os resultados gerados possibilitaram a classificação de melhores combinações de parâmetros para se atingir determinado resultado almejado, seja em desempenho ou em sustentabilidade e isso pode contribuir

para as empresas alinhem a aplicação do lixamento manual ao conceito de prática sustentáveis e melhores desempenhos.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Incluir nesta análise de sustentabilidade um estudo e aplicação mais aprofundada no aspecto econômico e integra-lo ao ambiental e social, que neste trabalho teve maior enfoque;
- Realização de uma análise mais aprofundada do comportamento do desgaste de ferramentas abrasivas manuais o que pode contribuir em diversos aspectos da sustentabilidade;
- Tornar a análise escalável e aplicável em diferentes processos;
- Expandir as fronteiras de análise de sustentabilidade da aplicação de *Flap Discs* não ficando apenas no processo, podendo-se desta forma investigar fatores que envolvem a deposição final ao final da vida útil da ferramanta abrasiva e sua logística reversa.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4288**: Especificações geométricas do produto (gps)- rugosidade: Método do perfil - regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.
- _____. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a. 30 p.
- _____. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b. 52 p.
- AURICH, J. et al. Sustainability of abrasive processes. **CIRP Annals**, v. 62, n. 2, p. 653 – 672, 2013. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785061300200X>>.
- BELLEN, H. M. van. Indicadores de desenvolvimento sustentável. In: _____. **Indicadores de sustentabilidade**: Uma análise comparativa. 2nd. ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2005. cap. 4, p. 41–62.
- CARPINETTI, L. C. R. Experimentos fatoriais. In: _____. **Planejamento e Análise de Experimentos**. 1st. ed. São Carlos: Editora USP, 2009. cap. 6, p. 107–149.
- CARROLL, P. **Stainless steel weld finishing by the numbers**. Jul 2014. Abrasive disc selection, use, and safety. *Open access*. Disponível em: <<https://www.thefabricator.com/thewelder/article/finishing/stainless-steel-weld-finishing-by-numbers>>. Acesso em: 24 oct. 2019.
- DAS, J.; LINKE, B. Effect of manual grinding operations on surface integrity. **Procedia CIRP**, v. 45, p. 95 – 98, 2016. ISSN 2212-8271. 3rd CIRP Conference on Surface Integrity. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116003735>>.
- DUFLOU, J. R. et al. Critical comparison of methods to determine the energy input for discrete manufacturing processes. **CIRP Annals**, v. 61, n. 1, p. 63 – 66, 2012b. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612000273>>.
- _____. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. **CIRP Annals**, v. 61, n. 2, p. 587 – 609, 2012a. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612002016>>.
- ESCOLA NACIONAL DA INSPEÇÃO DO TRABALHO. **NR-15 - Atividades e operações insalubres**: Anexo nº1: Limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente. Brasília, 2018. 82 p.
- FERRARESI, D. Conceitos básicos sobre os movimentos e as relações geométricas do processo de usinagem. In: _____. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1st. ed. São Paulo, Brasil: Editora Edgard Blücher Ltda., 1977. cap. 1, p. 1–16.

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. [s.n.], 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado em Processos e Gestão de Operações) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-17112015-104311/pt-br.php>>. Acesso em: 24 Outubro 2019.

GARRETSON, I. C. et al. Terminology to support manufacturing process characterization and assessment for sustainable production. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 986 – 1000, 2016. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616312513>>.

KAŃUCH, J.; VIŠNYI, P. Dc drive for universal motor. **Zeszyty Problemowe**, v. 84, n. 2, p. 7 – 11, 2009. Disponível em: <http://www.komel.katowice.pl/ZRODLA/FULL/84/ref_02.pdf>.

KELLENS, K. et al. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (uplci)—co 2 pe! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). part 1: Methodology description. **The international journal of life cycle assessment**, Springer, v. 17, n. 1, p. 69–78, 2012.

KING, R. I.; HAHN, R. S. Coated abrasives. In: _____. **Handbook of Modern Grinding Technology**. 1st. ed. London, United Kingdom: Chapman & Hall, 1986. cap. 11, p. 261–281.

KOBELCO. **Education center**. Oct 2019. Calculation of the welding consumables consumptions. *Open access*. Disponível em: <<https://www.kobelco-welding.jp/education-center/references/references01.html#s01>>. Acesso em: 24 oct. 2019.

LINKE, B. Abrasive tool types ; sustainability of grinding tools. In: _____. **Life Cycle and Sustainability of Abrasive Tools**. 1st. ed. RWTH Aachen University, Germany: Springer, 2016. cap. 4 and 7, p. 97–118 and 173–212.

LINKE, B. et al. Sustainability indicators for finishing operations based on process performance and part quality. **Procedia CIRP**, v. 14, p. 564 – 569, 2014. ISSN 2212-8271. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114001607>>.

LINKE, B. S. et al. Sustainability indicators for discrete manufacturing processes applied to grinding technology. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 4, p. 556 – 563, 2013. ISSN 0278-6125. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612513000708>>.

MAKEITFROM. **AISI 304 Stainless Steel vs. AISI 308L Stainless Steel**. Oct 2019. Disponível em: <<https://www.makeitfrom.com/compare/AISI-304-S30400-Stainless-Steel/AISI-308L-S30880-ER308-Stainless-Steel>>. Acesso em: 24 oct. 2019.

MALKIN, S.; GUO, C. Wheel wear and lubrication. In: _____. **Grinding Technology: Theory and applications of machining with abrasives**. 2nd. ed. New York: Industrial Press, Inc., 2008. cap. 11, p. 285–308.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balço Energético Nacional 2019:** Relatório síntese - ano base 2018. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2019. 67 p.

ODUM, K. et al. Sustainability analysis of grinding with power tools. **Procedia CIRP**, v. 14, p. 570 – 574, 2014. ISSN 2212-8271. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114001541>>.

SAINT-GOBAIN. **Abrasive product solutions for the Full Line Stock Industrial Market:** Coated abrasives. Catálogo Técnico, 2015. 316 p.

SCHÖNSLEBEN, P. et al. The changing concept of sustainability and economic opportunities for energy-intensive industries. **CIRP Annals**, v. 59, n. 1, p. 477 – 480, 2010. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850610001228>>.

SHAW, M. C. Abrasive tools. In: _____. **Principles of Abrasive Processing**. 1st. ed. Oxford University: Clarendon Press, 1996. cap. 2, p. 13–42.

SILVA, D. A. L. **Gestão do ciclo de vida de produtos por meio da avaliação e o monitoramento ambiental de processos de manufatura:** procedimento e estudos de caso. [s.n.], 2016. 317 f. Tese de Doutorado em Processos e Gestão de Operações - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-22072016-082844/pt-br.php>>. Acesso em: 24 Outubro 2019.

SILVA, E. J. da. **Avaliação de indicadores de sustentabilidade para processos de usinagem por abrasão.** 2017. 29 p. Primeiro relatório técnico (Projeto de pesquisa FAPESP) — Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2017.

SISTEMAS DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES EFEITO ESTUFA. Emissões pela queima de combustíveis e por processos industriais e uso de produtos: Relatório síntese - ano base 2018. **Emissões de GEE do Setor de Energia, Processos Industriais e Uso de Produtos**, Empresa de Pesquisa Energética, 2018.

STONE, C. Finish that stainless steel! p. 4, Oct 2009. *Open access*. Disponível em: <http://www.lehighvalleyabrasives.com/content/finish_stainless_steel.pdf>. Acesso em: 09 set. 2019.

TöNSHOFF, H.; INASAKI, I. Sensors for process monitoring. In: _____. **Sensors in Manufacturing:** Sensors applications, volume 1. 1st. ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2001. cap. 4, p. 143–341.

WASSERMAN, D. E. et al. Hand–arm vibration in a group of hand-operated grinding tools. **Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries**, Wiley Online Library, v. 12, n. 2, p. 211–226, 2002.

WEG. **Guia de especificação.** Jul 2019. Motores Elétricos. *Open access*. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 24 oct. 2019.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M. Z.; ALTING, L. Part ii: The life cycle assessment method. In: _____. **Environmental Assessment of Products**: Volume 1: Methodology, tools and case studies in product development. 1st. ed. London, United Kingdom: Chapman & Hall, 1997. cap. 6-13, p. 37-141.

YUAN, C.; ZHAI, Q.; DORNFELD, D. A three dimensional system approach for environmentally sustainable manufacturing. **CIRP Annals**, v. 61, n. 1, p. 39 – 42, 2012. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612001072>>.