

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Vanessa Narumi Funada

Operação manual de lixamento e avaliação de
cenários de sustentabilidade

São Carlos

2019

Vanessa Narumi Funada

Operação manual de lixamento e avaliação de cenários de sustentabilidade

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira de Materiais e de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Eraldo Jannone Silva

São Carlos
2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Vanessa Narumi Funada
Título do TCC: Operação manual de lixamento e avaliação de cenários de sustentabilidade
Data de defesa: 13/11/2019

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Doutor Eraldo Jannone da Silva (orientador)	APROVADO
Instituição: EESC - SEP	
Professor Doutor José Benedito Marcomini	APROVADO
Instituição: EESC - SMM	
Professor Titular Reginaldo Teixeira Coelho	APROVADO
Instituição: EESC - SEP	

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



(assinatura)

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).

F 979o	<p>Funada, Vanessa Narumi Operação manual de lixamento e avaliação de cenários de sustentabilidade / Vanessa Narumi Funada; orientador Eraldo Jannone da-Silva. São Carlos, 2019.</p> <p>Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.</p> <p>1. Sustentabilidade. 2. Processos abrasivos. 3. Indicadores de sustentabilidade. 4. Lixamento manual. 5. Discos abrasivos. I. Título.</p>
-----------	--

Aos meus pais, Arnaldo Kakuzo Funada e Edna Fumiko Funada, pela compreensão, carinho e apoio ao longo de toda minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Arnaldo Kakuzo Funada e Edna Fumiko Funada, que sempre me incentivaram e lutaram para me proporcionar o melhor estudo.

À minha irmã, Rafaela Erika Funada, por sempre estar ao meu lado me apoiando.

Ao Prof. Dr. Eraldo Jannone da Silva, que proporcionou meu crescimento científico dando a oportunidade de desenvolver essa pesquisa.

Aos meus amigos da universidade Jayne dos Santos, Camila Yumi e Vinícius Ballista por todo o companheirismo.

À todas as pessoas da minha família e amigos por sempre estarem ao meu lado, me orientando ao longo de toda a minha vida acadêmica.

A todos eles o meu mais profundo agradecimento.

RESUMO

Funada, V. N. **Operação manual de lixamento e avaliação de cenários de sustentabilidade.** 2019. 81p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Os processos para a produção de uma peça representam a importante etapa de transformação de matéria-prima em produto. Avaliar o total de impacto ambiental, econômico e social em todo o ciclo de vida da peça é uma importante métrica que tem ganhado destaque nos últimos anos. Nesse projeto, foi executada a avaliação da sustentabilidade do processo de lixamento manual com o (*Flap Disc*). Essa operação tem como principais aplicações realizar o acabamento de peças e desbastar cordões de solda. Entretanto, esse processo envolve alto consumo de energia e insumos que geram um impacto ambiental significativo. Foram propostos alguns cenários produtivos para aquisição das informações para avaliação da sustentabilidade do processo, com variações desejadas de estudo. Como o lixamento manual é feito com um instrumento portátil (esmerilhadeira) e, portanto, móvel, foi construído uma bancada de teste a fim de padronizar a operação e manter uma regularidade dos dados coletados. Os indicadores de sustentabilidade foram baseados em levantamento bibliográfico. Por fim, foram apresentados e avaliados comparativamente os resultados dos testes para a proposição do cenário mais sustentável nas dimensões social, econômica e ambiental.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Processos abrasivos. Indicadores de sustentabilidade. Lixamento manual. Discos abrasivos. Esmerilhadeira.

ABSTRACT

Funada, V. N. **Manual sanding operation and evaluation of sustainability scenarios**. 2019. 81p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

The processes of production of an object represent the important step of transformation of raw material into product. Assessing the total environmental, economic and social impact throughout its life cycle is an important metric that has gained prominence in recent years. In this project, an evaluation of the sustainability of the manual sanding process with Flap Disc was carried out. This process has as main applications to finish the parts and to thin weld beads. However, this operation involves high energy consumption and raw materials that generate a significant environmental impact. Some production scenarios were proposed for the acquisition of information to evaluate the sustainability of the process, with desired study variations. As manual sanding is done with a portable instrument (grinder) and therefore mobile, a test bench has been constructed in order to standardize the operation and maintain a regularity of the collected data. The sustainability indicators were based on a bibliographical survey. Finally, the results were presented and comparatively evaluated for the proposition of the most sustainable scenario in the social, economic and environmental dimensions.

Keywords: Sustainability. Abrasives processes. Sustainability indicators. Manual Sanding. Flap Disc. Grinder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Porcentagem de Oferta Interna de Energia no Brasil (OIE) em 2018	20
Figura 2 – Crescimento da taxa média de energia industrial (R\$/MWh) na região sudeste do Brasil	20
Figura 3 – Modelo antigo representando as três dimensões: Meio ambiente, sociedade e economia	26
Figura 4 – Modelo atual representando as três dimensões da sustentabilidade	26
Figura 5 – Sustentabilidade em relação à qualidade do sistema	27
Figura 6 – Diagrama de um fluxo de processo genérico	28
Figura 7 – Diagrama de entrada e saída do processo de lixamento manual	30
Figura 8 – Classificação dos processos de usinagem	31
Figura 9 – Remoção de material com grão abrasivo	31
Figura 10 – Retificação frontal com avanço retilíneo da peça	32
Figura 11 – Velocidade de corte (V_c) e de avanço (V_f) na retificação frontal	32
Figura 12 – Ângulo de aplicação do <i>flap discs</i> em relação à peça-obra	33
Figura 13 – Detalhe da soldagem MIG	35
Figura 14 – Comparação entre os <i>Flap Discs</i> convexo (ou cônico) e plano	36
Figura 15 – Estrutura básica de uma lixa	38
Figura 16 – Esquema da Fabricação de abrasivos revestidos	38
Figura 17 – Calandra para aplicação do adesivo	39
Figura 18 – Aplicação do grão abrasivo por gravidade	39
Figura 19 – Aplicação do grão abrasivo por deposição eletroestática	40
Figura 20 – Aplicação do grão abrasivo por deposição eletroestática e gravidade	40
Figura 21 – Aplicação do grão abrasivo pelo método <i>slurry</i>	41
Figura 22 – Aplicação do grão abrasivo por dupla camada	41
Figura 23 – Duas estruturas de lixas diferentes: esquerda – aberta e direita – fechada	42
Figura 24 – Grão abrasivo	42
Figura 25 – Seção transversal do corpo de prova a ser utilizado no lixamento (sem escala)	49
Figura 26 – Corpo de prova depois de usinado e soldado	50
Figura 27 – Esmerilhadeira angular eletrônica Bosch 5” GWS 17-125 1700W CIE	50
Figura 28 – Flap discs Classic® e Evolution® da marca Norton, respectivamente	51
Figura 29 – Bancada de teste	51
Figura 30 – Suporte para a esmerilhadeira feita por manufatura aditiva	52
Figura 31 – Vista superior e lateral, respectivamente, da bancada de teste	52
Figura 32 – Referencial dos eixos X, Y e Z da bancada de teste	53
Figura 33 – Acelerômetro PCB Piezotronics 352C33 fixado no eixo Z	54
Figura 34 – Modelo de processo de lixamento manual	56

Figura 35 – Medição das rugosidades R_a e R_z	58
Figura 36 – Potência consumida pela esmerilhadeira com o passar do tempo	63
Figura 37 – Nível de ruído do processo de lixamento manual com o passar do tempo . .	69
Figura 38 – Espectros de vibração na direção X	72
Figura 39 – Espectros de vibração na direção Z	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de recursos, parâmetros de performance e parâmetros de qualidade	29
Tabela 2 – Comparação de dois tipos de <i>Flap Disc</i> em relação ao desempenho e economia para a aplicação em aço	37
Tabela 3 – Grãos abrasivos utilizados em lixas e suas principais características e aplicações	43
Tabela 4 – Relação entre aplicação e granulometria	44
Tabela 5 – Granulometrias em função da dureza do material e da rugosidade desejada .	45
Tabela 6 – Adesivo de ancoragem (<i>Maker</i>)	46
Tabela 7 – Adesivo de revestimento (<i>Sizer</i>)	46
Tabela 8 – Principais tipos de tecidos utilizados nas lixas e suas características	47
Tabela 9 – Sequência de simulações dos cenários	57
Tabela 10 – Rugosidades R_a e R_z inicial e final	62
Tabela 11 – Variação da massa do corpo de prova e do <i>Flap Disc</i> antes e depois do lixamento	64
Tabela 12 – Energia específica, relação G (modificada), energia média por passada e energia total do lixamento	65
Tabela 13 – Valores dos indicadores de sustentabilidade quanto ao recurso energético . .	66
Tabela 14 – Indicadores de sustentabilidade do recurso descarte de resíduos	67
Tabela 15 – Dados de ruído do ambiente, ruído do processo e variação do ruído obtidos a partir dos gráficos do decibelímetro	70
Tabela 16 – Indicadores de sustentabilidade referentes ao conforto do operador quanto ao nível de ruído	71
Tabela 17 – Dados de vibração coletados pelo acelerômetro	74
Tabela 18 – Indicadores de sustentabilidade referentes ao conforto do operador quanto ao nível de vibração	75
Tabela 19 – Resumo dos principais resultados	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
USP	Universidade de São Paulo
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
NUMA	Núcleo de Manufatura Avançada
LAPRAS	Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade
N3E	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
EPE	Emprsa de Pesquisa Energética
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
LCA	Análise do ciclo de vida (<i>Life Cycle Assessment</i>)
V_c	Velocidade de corte
V_f	Velocidade de avanço
a_e	Espessura de penetração
Fe	Ferro
C	Carbono
Cr	Cromo
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
MIG	Metal de gás inerte (<i>Metal Inert Gas</i>)
K	Constante Elástica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVO	23
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1	Sustentabilidade	25
3.2	Indicadores de sustentabilidade	26
3.2.1	Qualidade dos indicadores de eficiência	28
3.3	Processos abrasivos	29
3.3.1	Lixamento Manual	30
3.3.2	Corpo de prova	34
3.3.2.1	Aço inoxidável	34
3.3.2.2	Soldagem MIG	34
3.3.3	Flap Disc	35
3.3.3.1	Fabricação das lixas	37
3.3.3.2	Estrutura das lixas	40
3.3.3.3	Tipos de grãos	41
3.3.3.4	Granulometria	44
3.3.3.5	Tratamento dos grãos	45
3.3.3.6	Tipos de adesivos	45
3.3.3.7	Tipos de costados	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1	Metodologia	49
4.2	Instrumentação da esmerilhadeira	53
4.3	Parâmetros de processo	55
4.4	Indicadores de sustentabilidade	56
4.4.1	Recurso energia	56
4.4.2	Recurso descarte de resíduos	58
4.4.3	Conforto do operador: nível de ruído	59
4.4.4	Conforto do operador: nível de vibração	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1	Simulações dos cenários e coleta de dados	61
5.1.1	Recurso energia	62
5.1.2	Recurso descarte de resíduos	67
5.1.3	Conforto do operador: nível de ruído	68

5.1.4	Conforto do operador: nível de vibração	70
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

O processo abrasivo pode ser definido como um processo de usinagem com ferramenta de geometria não definida, onde a remoção de material ocorre através da ação de grãos (STOETTERAU, 2004). Melhoria na exatidão geométrica e dimensional e melhoria da qualidade superficial das peças são as principais finalidades pelo qual esse processo está presente na cadeia de processamento de grande parte dos produtos. O processo de lixamento, que é um tipo de processo de usinagem com ferramenta de geometria não definida, tem como principal aplicação melhorar o acabamento de peças já que altera a topografia da superfície das peças. Assim, um processamento abrasivo eficiente está intimamente relacionado com o bom desempenho da peça final.

Segundo Duflou et al. (2012), os processos de manufatura em geral consomem significativa quantidade de materiais renováveis e não-renováveis e geram resíduos sólidos, líquidos e gasosos ao meio ambiente. Afim de minimizar os danos causados ao meio ambiente, a sustentabilidade dos processos de manufatura e processos abrasivos devem ser projetadas e executadas de maneira eficiente em todos os âmbitos: econômico, social e ambiental.

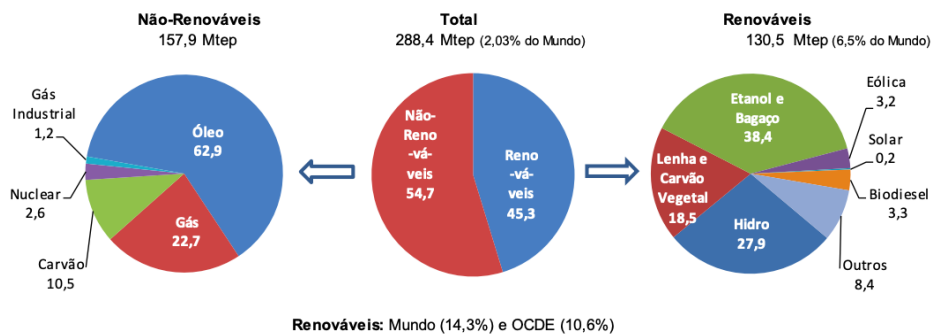
A sustentabilidade dos processos abrasivos é vista por muitos pesquisadores, representantes das indústrias e responsáveis políticos como um dos principais desafios a serem enfrentados nos próximos anos Aurich et al. (2013). Assim como a sustentabilidade do processo de manufatura, questões relacionadas à energia e recurso hídrico também apresentam grande relevância no setor industrial brasileiro. Apesar da participação de fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira terem aumentado de 2017 para 2018, ainda é evidente a dependência em relação à energia obtida via fontes não renováveis, com 54,7% da participação em 2018 (N3E, 2019). Segundo dados da EPE (2019), as indústrias foram responsáveis por utilizar 31,7% da energia renovável e não-renovável no Brasil em 2018. A (Figura 1) retrata bem essa oferta interna de energia no Brasil.

A predominância das fontes não-renováveis atrelado às questões políticas internas do país acarretou em um aumento de 51,7% de 2015 até 2018 na taxa média de energia (R\$/MWh) para a indústria na região sudeste do Brasil (Figura 2), desafiando o setor no quesito eficiência dos processos de manufatura ANEEL (2018).

Segundo relatório da SABESP (2015), a crise hídrica de 2014 na região metropolitana de São Paulo foi uma das mais severas desde 1953, onde a vazão média de 2014 (11,3 m³/s) foi cerca de ¼ da média anual (44,3m³/s). Essa escassez do abastecimento hídrico impactou também grande parte do setor industrial em São Paulo dependente desse recurso, aumentando a relevância de processos que minimizem, reutilizem ou eliminem totalmente a utilização da água na cadeia de produção.

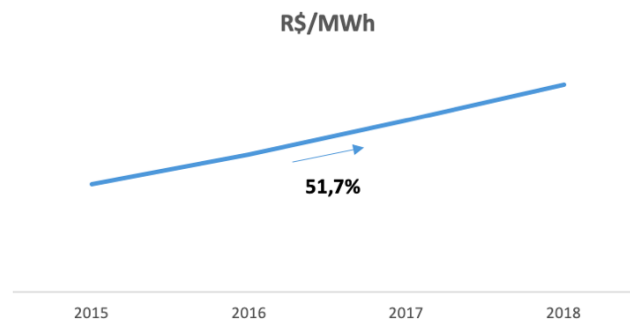
Atualmente, a procura pela preservação do meio ambiente e pela segurança no trabalho

Figura 1: Porcentagem de Oferta Interna de Energia no Brasil (OIE) em 2018



Fonte: N3E (2019).

Figura 2: Crescimento da taxa média de energia industrial (R\$/MWh) na região sudeste do Brasil



Fonte: ANEEL (2018).

tem aumentado significativamente. Empresas que apresentam a preocupação com a sustentabilidade da sua produção têm ganhado grande destaque e vantagem competitiva. É importante que os engenheiros garantam que a dimensão social tratada de forma igualitária em relação ao âmbito econômico e ambiental. Preservação da força de trabalho nos processos de manufatura e a ergonomia do trabalhador operando uma esmerilhadeira durante uma operação de lixamento manual são fatores que precisam ser levados em consideração durante o estudo.

Como todos os processos abrasivos, o lixamento manual precisa se tornar mais eficiente tanto no consumo energético, como também no conforto do operador que opera o equipamento. A eficiência energética dos sistemas de manufatura é um dos principais indicadores de sustentabilidade pois envolve a dimensão ambiental e econômica (AURICH et al., 2013). O fato do processo de lixamento manual ser feito com um instrumento portátil dificulta a padronização dos experimentos e regularidade dos dados coletados.

Apesar da eficiência energética ser um dos principais indicadores, ele não é suficiente

para a avaliação de operações de acabamento uma vez que frequentemente é utilizado o volume de material removido como parâmetro e esse é baixo nesse tipo de operação. Por isso, segundo Aurich et al. (2013), escolher e padronizar os melhores indicadores para a avaliação dos processos de fabricação é um grande desafio.

2 OBJETIVO

O objetivo do projeto atual visa o entendimento profundo do processo de lixamento manual, avaliando quais as principais métricas afetam o processo. A partir desse entendimento, analisar diferentes cenários com o levantamento de indicadores de sustentabilidade focado nos quesitos econômico, social e ambiental.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essa seção apresenta, inicialmente, uma revisão bibliográfica da sustentabilidade dos processos abrasivos nos âmbitos econômico, ambiental e social. Também são abordados conceitos técnicos dos processos abrasivos: principais tipos e funcionamento. É dado enfoque no processo de lixamento manual, com o detalhamento do processo, equipamento utilizado e como ocorre o desgaste da solda do corpo de prova. Por fim, são expostos os principais tipos de corpo de prova e (*Flap Discs*), bem como sua composição.

3.1 Sustentabilidade

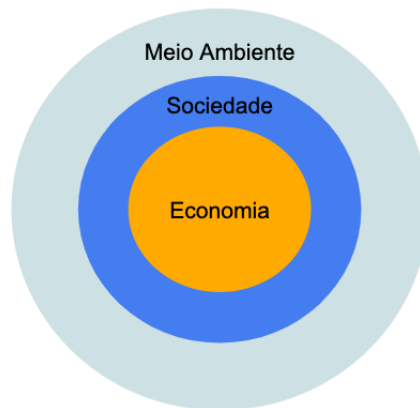
A sustentabilidade é um assunto que tem ganhado grande relevância nos últimos anos, tanto nas discussões político-econômicas do país quanto nos planos estratégicos das indústrias. Entretanto, existem diversas discussões a respeito do conceito de desenvolvimento sustentável.

Segundo Brundtland et al. (1987), o desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a necessidade das gerações futuras. Essa definição não enfoca em estratégias para a manutenção das condições econômicas atuais e concentra-se apenas no desenvolvimento econômico. McKenzie (2004) enfatiza esse contraste de opiniões entre autores a respeito do desenvolvimento sustentável e apresenta a inter-relação entre os aspectos ambientais, sociais e econômicos da sustentabilidade em dois modelos diferentes.

No primeiro modelo (Figura 3), onde os três círculos são concêntricos, retrata a dependência do âmbito econômico e social em relação ao meio ambiente (MCKENZIE, 2004). Além disso, nota-se que a sustentabilidade não está representada nesse modelo. Já no outro modelo mais recente (Figura 4) a sustentabilidade está presente na junção entre os três âmbitos: social, econômico e ambiental. As partes que compõem esse modelo estão representadas em círculos iguais, mostrando que não há predominância de nenhum setor sobre o outro. Segundo Elkington (1998), o desenvolvimento sustentável de uma empresa abrange não apenas os seus lucros, mas também o meio ambiente e o impacto social exercido por sua atividade. De fato, a visão mais igualitária do segundo modelo mostra-se mais condizente no que diz respeito à importância dos três âmbitos ao referir-se ao desenvolvimento sustentável de um processo de fabricação.

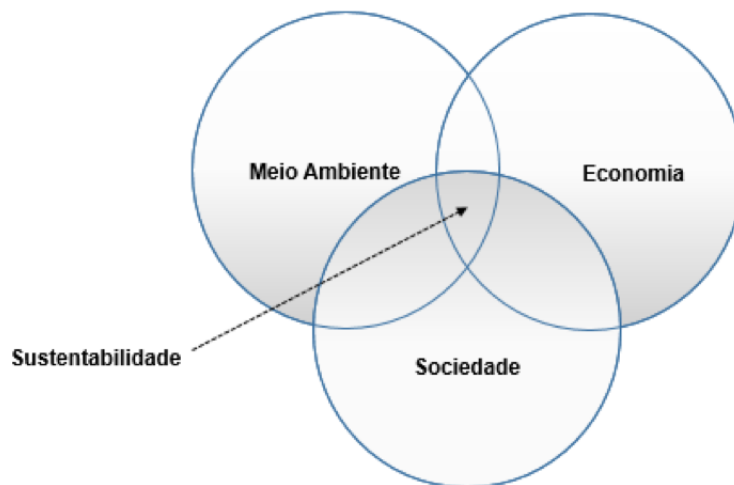
Em relação à sustentabilidade dos processos de fabricação e abrasivos, segundo Linke et al. (2014), nota-se um aumento na preocupação desse assunto para os engenheiros uma vez que atualmente existem cada vez mais leis voltadas para a proteção ambiental e do trabalhador. Além disso, há uma crescente cobrança por parte dos consumidores por produtos que sejam mais limpos tanto durante o processo de produção quanto durante o uso em si. Desse modo, o segundo modelo, que representa a sustentabilidade como a junção igualitária entre os âmbitos social, ambiental e econômico, mostra-se condizente com os processos abrasivos uma vez que

Figura 3: Modelo antigo representando as três dimensões: Meio ambiente, sociedade e economia



Fonte: Adaptado de McKenzie (2004)

Figura 4: Modelo atual representando as três dimensões da sustentabilidade



Fonte: Adaptado de Aurich et al. (2013)

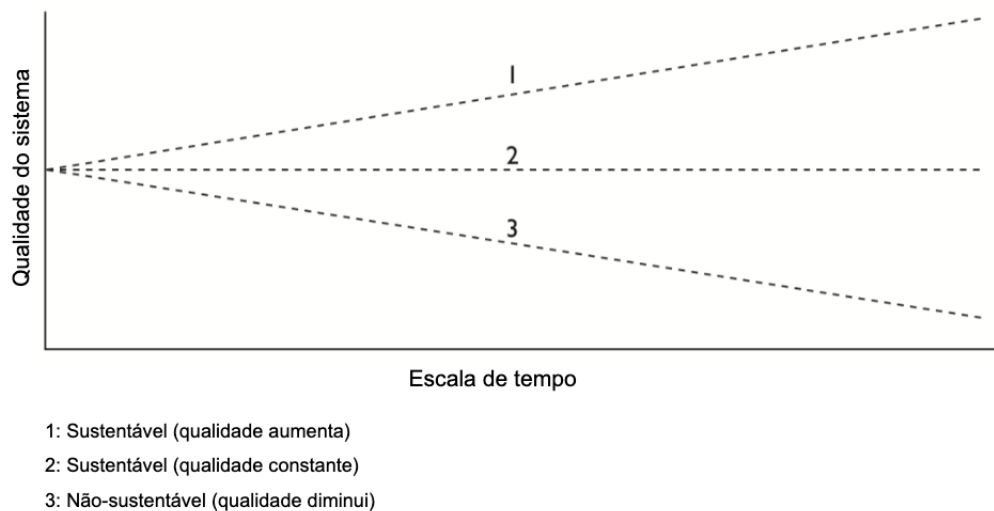
todos os três âmbitos apresentam a mesma importância.

3.2 Indicadores de sustentabilidade

A sustentabilidade dos processos de manufatura em geral é um assunto que tem ganhado destaque nos últimos anos. Entretanto, por ser um termo que pode apresentar diferentes interpretações, quantificar a sustentabilidade é um grande desafio da atualidade. Segundo Bell e Morse (2012), existem diversos modos de avaliarmos se um sistema é sustentável ou não. A Figura 5 apresenta como um indicador de sustentabilidade pode ser avaliado em relação à

qualidade do sistema em um período de tempo. Quando a qualidade do sistema permanece constante ou aumenta, a situação é denominada sustentável. Já quando a qualidade diminui, o sistema é dito insustentável. Esse método de análise da sustentabilidade contém uma série de problemas uma vez que não é claro o tipo de sistema de qualidade referenciado e o período de tempo considerado.

Figura 5: Sustentabilidade em relação à qualidade do sistema



Fonte: Adaptado de Bell e Morse (2012)

Uma outra forma comum utilizada para a quantificação da sustentabilidade de um determinado processo ou produto é através da análise do ciclo de vida (*Life Cycle Assessment - LCA*). Todavia, esse tipo de análise requer uma grande e detalhada quantidade de dados sensíveis o que acarreta no encarecimento e alta demanda de tempo para a realização do LCA (Graedel, Allenby e Comri  (1995)). Devido a essa dificuldade em implementar a análise do ciclo de vida para processos de manufatura, os indicadores de sustentabilidades se mostram bastante promissores.

Os indicadores de sustentabilidade s o valores  nicos obtidos a partir de dados medidos ou estimados que precisam ser normalizados, escalados e agregados (SINGH et al., 2012). Esses indicadores t m como principais vantagens a rapidez na obten o dos dados, a f cil visualiza o, a utiliza o de dados qualitativos e a possibilidade de abranger as dimens es econ mica, social e ambiental da sustentabilidade (LINKE et al., 2014).

A normaliza o dos indicadores de sustentabilidade   dada pela Equa o 3.1, sendo o fator de normaliza o o n mero de produtos produzidos, valor agregado, hora-pessoa, vida  til

do produto, entre outros (LINKE et al., 2014).

$$\text{Indicador de sustentabilidade} = \frac{\text{Recurso}}{\text{Fator de normalização}} \quad (3.1)$$

Outro importante indicador é a *eco-efficiency* que é definida como o produto ou o serviço dividido pelo impacto ambiental (LINKE et al., 2014). Segundo Saling et al. (2002), esse indicador é utilizado principalmente para a otimização ecológica de um sistema. Os impactos ambientais considerados na Equação 2 são: consumo de matérias-primas e energia, emissões de resíduos ou potencial de toxicidade, entre outros.

Os indicadores baseados na remoção de material não são ideais para operações de acabamento uma vez que a quantidade de material removida é muito baixa e pode gerar resultados enganosos. Desse modo, a avaliação da sustentabilidade deve abranger significativamente a qualidade da superfície e a eficiência do material (LINKE et al., 2014).

3.2.1 Qualidade dos indicadores de eficiência

O indicador de sustentabilidade mais indicado para as operações de acabamento é o de eficiência uma vez que essa métrica é de extrema importância para avaliação da relação de entrada (*input*) e saída (*output*) de um processo de manufatura. Afim de calcular a eficiência de uma operação de acabamento de uma peça, é importante saber todo o fluxo de entrada e saída de material. Sendo assim, a Figura 6 ilustra um diagrama de um processo genérico com recursos (energia, matéria-prima, etc.), capacitores (aspectos ambientais, qualidade do trabalho, etc.), parte final (rugosidade superficial, valor, etc.) e desperdício (LINKE et al., 2014).

Figura 6: Diagrama de um fluxo de processo genérico



Fonte: Adaptado de Linke et al. (2014)

Exemplos de métricas de entrada e saída mais utilizadas para construção do diagrama de fluxo de processo (Figura 6) estão indicados na Tabela 1.

O indicador de eficiência (η_{sust}) pode ser definido pela Equação 3.2. É importante notar que o sinal da equação depende do parâmetro analisado. Para parâmetros que devem ser

Tabela 1: Exemplos de recursos, parâmetros de performance e parâmetros de qualidade

Input: recursos	Processo: parâmetros de performance	Output: parâmetros de qualidade
Tempo Energia Consumo de água Material usado Custo laboratorial Etc.	Taxa de remoção de material Conforto do trabalhador Etc.	Coefficiente de fricção Valor estético de produto Preço de venda Vida útil/desempenho da peça Integridade da superfície Etc.

Fonte: Adaptado de LINKE et al. (2014).

maximizados, como a qualidade e o conforto do trabalhador, o sinal deverá ser positivo. Já quando os parâmetros devem ser minimizados, como a rugosidade da peça, o sinal deverá ser negativo Linke et al. (2014).

$$\eta_{\text{sust}} = \frac{\pm \Delta \text{performance} / \Delta \text{parâmetro de qualidade}}{\Delta \text{recursos}} \quad (3.2)$$

A definição de indicadores de eficiência mostrada pela Equação 3.2 relacionando performance, parâmetros de qualidade e recursos permite obter uma verdadeira perspectiva do ciclo de vida de um produto (LINKE et al., 2014). Desse modo, as operações de acabamento, como o lixamento, podem ser aplicadas a esses indicadores de eficiência.

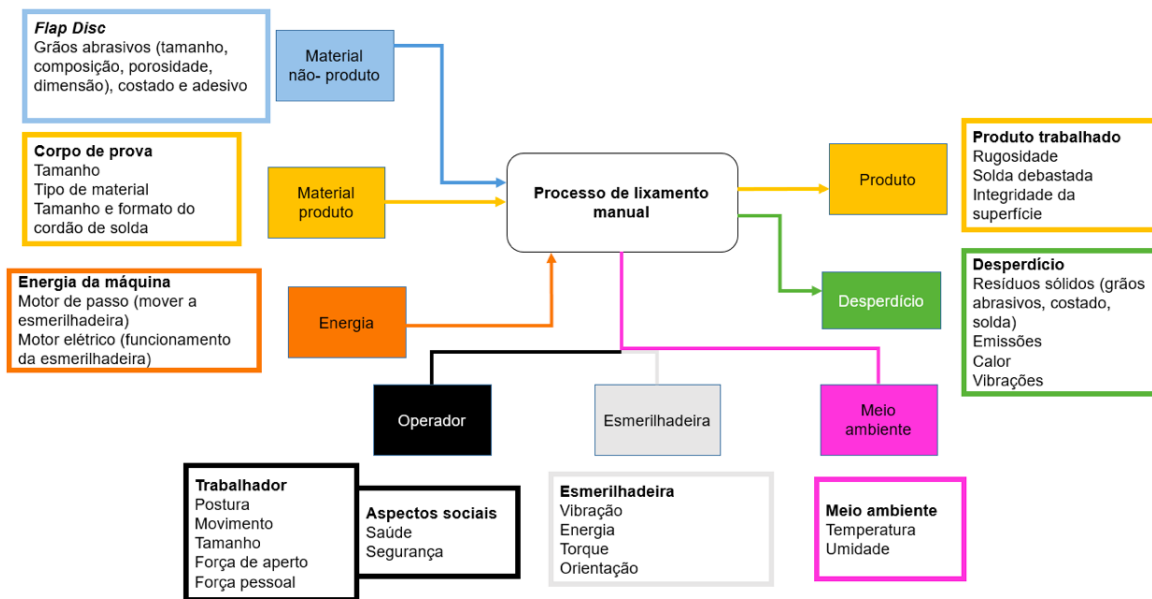
A operação de lixamento manual é utilizada principalmente para acabamento e desbaste de solda. Durante esses processos ocorrem vibrações na esmerilhadeira devido às irregularidades da peça e ao operador. A fim de entender profundamente esse processo, foi feito um diagrama de fluxo da operação manual de lixamento que está ilustrado na Figura 7. Esse tipo de ferramenta auxilia principalmente na escolha de indicadores de sustentabilidade adequados (LINKE et al., 2014).

Os recursos utilizados no processo de lixamento manual são *Flap Disc*, corpo de prova e energia do equipamento (esmerilhadeira). Os capacitores para esse processo são quesitos relacionados ao operador (ergonomia, saúde e segurança), à esmerilhadeira e ao meio ambiente. Por fim, o output dessa operação é o produto trabalhado com uma melhor qualidade superficial e alguns desperdícios como resíduos sólidos, emissões, calor e vibrações.

3.3 Processos abrasivos

A usinagem é definida como toda operação onde ocorre a remoção de material sob forma de cavaco Stoeterau (2004). Essa operação pode ser classificada como convencional e

Figura 7: Diagrama de entrada e saída do processo de lixamento manual



Fonte: Própria autora

não convencional em que busca-se uma melhoria na exatidão dimensional e geométrica e menor valor de rugosidade superficial. A usinagem não convencional pode ser ainda dividida em processo com geometria definida e não definida. A usinagem com geometria definida apresenta ferramenta de corte enquanto a com geometria não definida a remoção de material é realizada com grãos. A classificação completa dos processos de usinagem está representada na Figura 8.

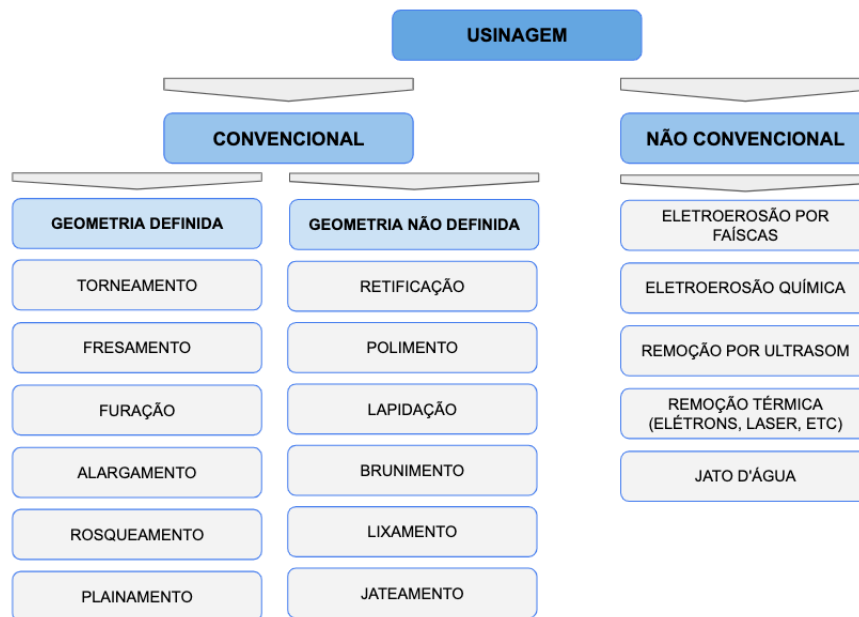
3.3.1 Lixamento Manual

O processo de lixamento manual é classificado como uma usinagem convencional com geometria não definida por apresentar ferramenta de corte formada por grãos com tamanho e forma irregulares. Esse tipo de operação é amplamente utilizado em operações de acabamento, melhora a qualidade superficial, além de tolerâncias geométricas e dimensionais (STOETERAU, 2004).

Assim como no processo de retificação, a remoção de material no lixamento manual ocorre através da interferência entre o grão e o material da peça (Figura 9). A forma, tamanho médio e tipo de material do grão abrasivo determinam a usinabilidade da ferramenta.

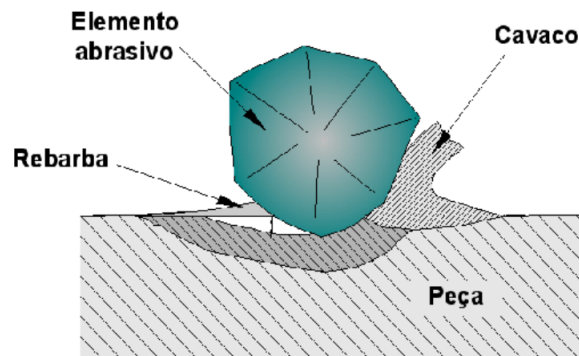
A cinemática do processo de lixamento manual com a esmerilhadeira angular e o *Flap Disc* pode ser relativamente comparada à retificação frontal com avanço retilíneo pela peça. A Figura 10 ilustra a retificação frontal, no qual o rebolo gira em torno do próprio eixo durante a operação.

Figura 8: Classificação dos processos de usinagem



Fonte: Adaptado de Stoeterau (2004)

Figura 9: Remoção de material com grão abrasivo

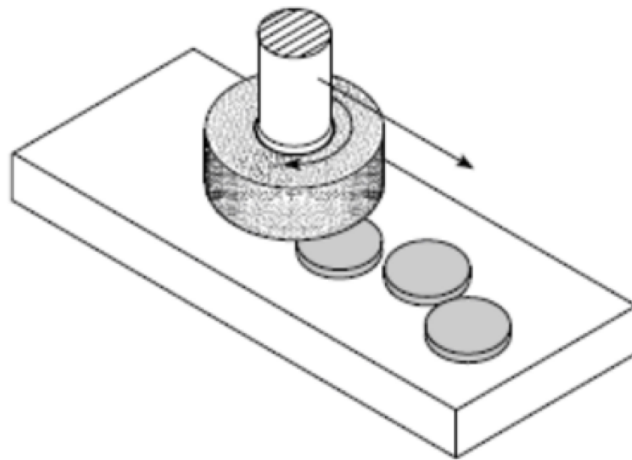


Fonte: Stoeterau (2003)

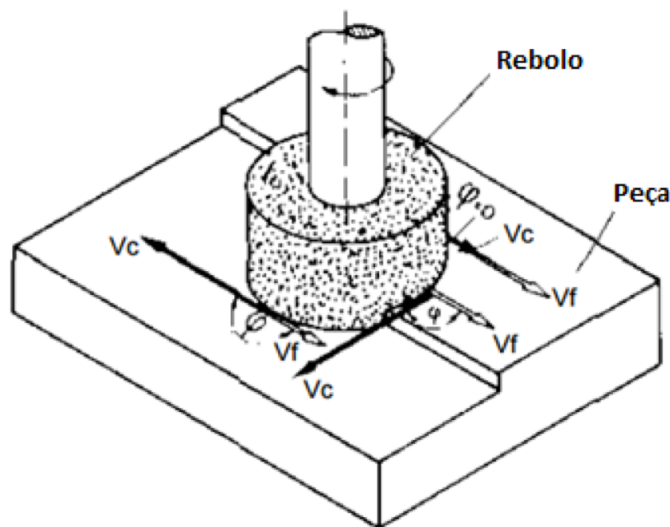
A operação de retificação frontal apresenta velocidades de corte (V_c), que variam ao longo de todo o perímetro do rebolo em contato com a peça, e velocidades de avanço (V_f) que são constantes. O sentido de rotação do rebolo interfere diretamente no sentido da velocidade de corte. A Figura 11 ilustra as diferentes velocidades encontradas no rebolo durante a retificação frontal.

Comparando a retificação frontal com o lixamento manual tem-se que a velocidade de

Figura 10: Retificação frontal com avanço retilíneo da peça



Fonte: SOUZA (2011)

Figura 11: Velocidade de corte (V_c) e de avanço (V_f) na retificação frontal

Fonte: FERRARESI (1995)

corte e de avanço no *Flap Disc* é similar ao encontrado no rebolo. A velocidade de avanço apresenta a mesma direção e sentido do movimento da esmerilhadeira angular e a velocidade de corte é perpendicular a de avanço e depende do sentido da rotação do *Flap Disc*.

A grande diferença entre os dois processos é que na retificação a superfície da ferramenta de corte está totalmente em contato com a peça a ser usinada enquanto no lixamento manual apenas a superfície da porção frontal do *Flap Disc* está em contato com a peça. A área de contato

ferramenta-peça no lixamento manual varia conforme a inclinação da ferramenta. Desse modo, para obter a mesma profundidade de penetração (a_p) no lixamento manual é necessário uma maior força normal, já que a área em contato é menor. A espessura de penetração (a_e) é constante na retificação e definida pelo diâmetro do rebolo enquanto no caso do lixamento apresenta comprimento significativamente reduzido e dependente da angulação da ferramenta.

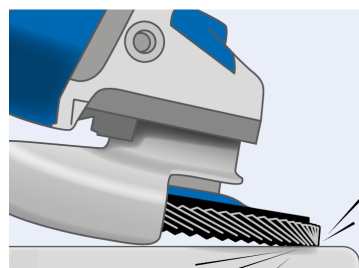
É importante ressaltar que a velocidade periférica desses discos é de no máximo 80 m/s, sendo extremamente necessário o uso de capas protetoras (NUSSBAUM, 1988).

A posição de trabalho da esmerilhadeira depende da operação requerida para a peça. Operações de desbaste requerem ângulos maiores (30°) em relação à peça-obra, uma vez que é necessário uma maior remoção de material e com uma angulação maior é possível obter uma profundidade de penetração maior com menor força.

Segundo a norma ABNT (2016), o processo de desbaste é caracterizado pela remoção de grande quantidade de material sem a preocupação com tolerâncias estreitas e acabamento superficial. Por isso, a operação de lixamento manual é bastante utilizada para a remoção do excesso de material em peças soldadas.

Operações de acabamento por sua vez deve apresentar o disco posicionado em ângulos menores (15°) pois quanto menor o ângulo, menor a remoção de material e melhor é a qualidade da superfície trabalhada. Isso ocorre pois uma menor angulação da ferramenta em relação à peça proporciona maior área de contato entre a peça a ser usinada e a ferramenta. A Figura 12 ilustra a operação de lixamento manual com o *Flap Disc*.

Figura 12: Ângulo de aplicação do *flap discs* em relação à peça-obra



Fonte: PFERD (2019)

O lixamento com o *Flap Disc* normalmente é realizado com uma esmerilhadeira portátil. Esse equipamento é classificado como uma máquina de eixo vertical para desbaste manual e apresenta um peso elevado em relação às máquinas de eixo horizontal, o que auxilia em uma maior remoção de material. Por ser um equipamento sustentado pelo operador, a pressão da ferramenta sobre a peça e a angulação do disco em relação à superfície a ser trabalhada depende exclusivamente de quem opera a máquina.

Existem dois tipos principais de esmerilhadeiras manuais: elétrica e pneumática. A grande vantagem da esmerilhadeira pneumática é a ergonomia do operador em relação ao peso e a vibração do equipamento. É possível alcançar uma eficiência maior com a esmerilhadeira pneumática, além de ser possível a utilização em ambientes úmidos sem risco de choque elétrico. Entretanto, a diferença de preço entre esses dois equipamentos é exorbitante, a esmerilhadeira pneumática chega a ser 20 vezes mais cara que a elétrica.

3.3.2 Corpo de prova

O processo de lixamento manual pode ser realizado para melhorar o acabamento de peça com diversos tipos de materiais como madeira, ferro fundido, aço, entre outros. Nesse trabalho, o lixamento manual foi realizado em cordões de solda de corpos de prova de aço inoxidável.

3.3.2.1 Aço inoxidável

Os aços inoxidáveis são materiais metálicos formados principalmente por ligas de Ferro (Fe), Carbono (C) e Cromo (Cr). O cromo é um componente essencial nesses aços pois possibilita a formação de filmes que tornam o aço inoxidável altamente resistente à corrosão. CARBÓ (2008)

Existem dois tipos de aços inoxidáveis: ferríticos e austeníticos. Os aços inoxidáveis ferríticos pertencem à série 400 e são aços magnéticos com estrutura cúbica de corpo centrado. Já os austeníticos pertencem à série 300 e não são magnéticos, com estrutura cúbica de face centrada. A estrutura ferrítica pode ser transformada em austenítica com a adição de níquel como elemento de liga. CARBÓ (2008)

O aço inoxidável austenítico apresenta elevada resistência à corrosão, excelente ductibilidade e alta soldabilidade, podendo ser utilizado em temperaturas elevadas. O mais comum desse grupo é o aço 304, que apresenta 18% de cromo e 8% de Níquel. CARBÓ (2008)

O aço 304 é muito utilizado em utensílios de cozinha e em aplicações industriais. Entretanto, quando em contato com meios ácidos, por exemplo, pode sofrer corrosão intergranular. Esse tipo de corrosão está relacionado com o empobrecimento de cromo nos contornos de grão. O processo de sensitização é quando o cromo precipita em forma de carbonetos, deixando o contorno de grão com baixa resistência à corrosão. Afim de amenizar esse problema, aços com baixo teor de carbono (até 0,03%) foram desenvolvidos para essas aplicações em meios que provocam corrosão. O aço 304L é um exemplo bastante utilizado em meios bastante oxidantes por apresentar, assim como o aço 304, alta resistência à corrosão, ductibilidade e soldabilidade. CARBÓ (2008)

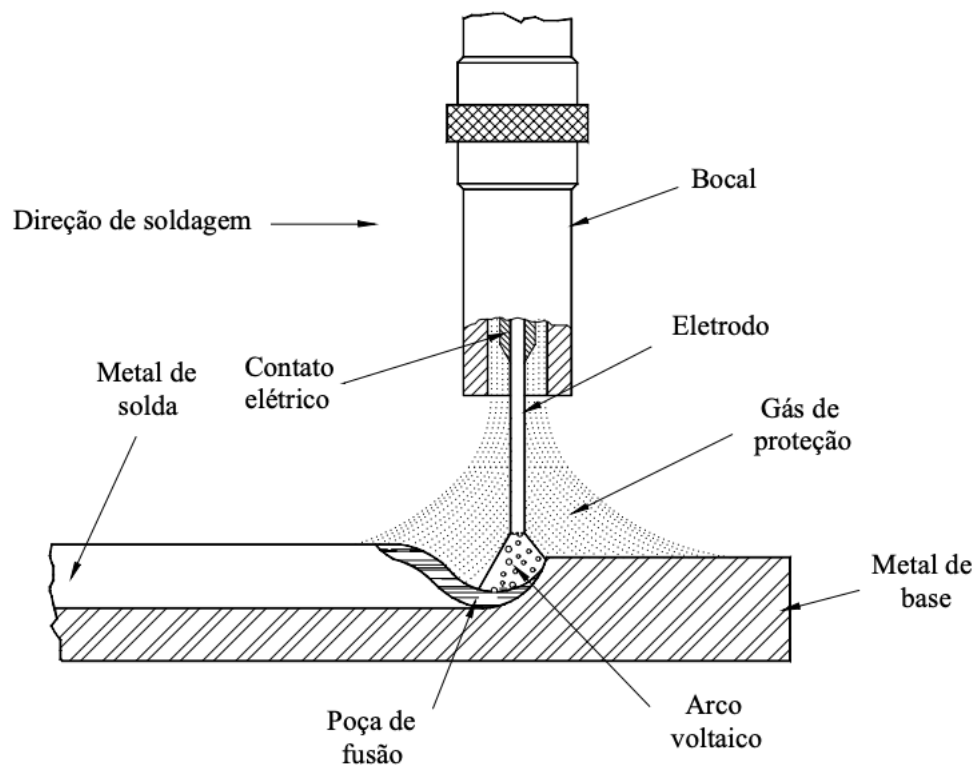
3.3.2.2 Soldagem MIG

O processo de soldagem é definido como a união de materiais metálicos através da fusão. A fusão é realizada com uma fonte de calor que pode ser advinda de reação química, fenômenos

físicos em um gás ou radiação. Silva et al. (2005)

Um tipo de soldagem muito utilizado é a soldagem MIG (*Metal Inert Gas*) onde a fusão dos materiais é realizada através de um arco voltaico protegido com um gás inerte de Argônio ou Hélio. O arco voltaico é formado com o metal base e o eletrodo não revestido, gerando calor e fundindo os materiais metálicos envolvidos na soldagem. A Figura 13 ilustra o processo da soldagem MIG.

Figura 13: Detalhe da soldagem MIG



Fonte: Figueiredo et al. (2002)

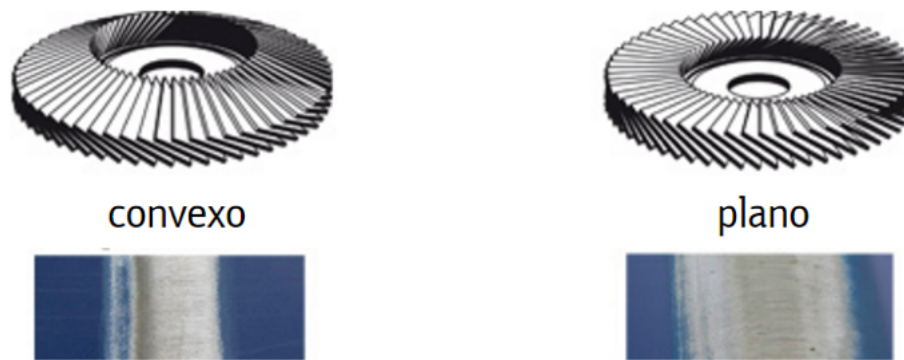
A grande vantagem da soldagem MIG é rapidez da soldagem, taxas de deposição maiores que com os eletrodos revestidos e possibilidade de soldar em qualquer posição. Além disso, a presença do gás inerte evita a formação de óxidos ou nitretos que fragilizam a peça.

3.3.3 Flap Disc

O *Flap Disc* é uma ferramenta abrasiva acoplada em esmerilhadeiras manuais. São muito utilizadas para desbastar soldas, rebarbação, eliminação de pontos de corrosão, entre outras aplicações. São indicados para aço inoxidável, metais ferrosos e não ferrosos. Essa ferramenta é constituída por lamelas de lixas fixadas lado a lado sobre uma base de poliéster ou de fibra reforçada de modo a formar uma camada circular de lixa abrasiva. Essa disposição das lamelas permite uma maior exposição do grão e, conseqüentemente, aumenta a durabilidade do produto.

A fixação das lamelas de lixa na base é feita por um adesivo ligante com alta resistência mecânica. A base em que é fixada a lixa pode apresentar dois tipos de perfil: reto ou angulado (*Flap Disc* cônico). A Figura 14 mostra a diferença entre o perfil dos *Flap Discs*.

Figura 14: Comparação entre os *Flap Discs* convexo (ou cônico) e plano



Fonte: KLINGSPOR (2019)

Os discos cônicos (ou convexos) apresentam uma área de atuação menor para remoção do material do que os discos planos, o que faz com que os cônicos possuam uma maior taxa de remoção de material. Sendo assim, os discos com perfil angulado são mais indicados para operações como desbaste de solda, onde a superfície é mais irregular. Já a ferramenta com o perfil reto é mais indicado para superfícies planas para que toda a área da ferramenta entre em contato com a peça e ocorra uma eficiência maior da operação (KLINGSPOR, 2019).

A grande vantagem do *Flap Discs* é a facilidade de desbastar e dar acabamento em uma única etapa, ou seja, não é preciso trocar de ferramenta para desbaste de soldas e proporcionar um aspecto visualmente atrativo para a peça. Desse modo, o custo do processo é relativamente reduzido, assim como o tempo de operação, o que melhora significativamente o desempenho da ferramenta (SAINT GOBAIN, 2016).

O formato anatômico da depressão central no disco faz com que a porca que prende a ferramenta na esmerilhadeira fique posicionada na parte interna do *Flap*, o que permite a utilização de toda a superfície do disco. Se a porca de fixação ficasse para fora da ferramenta, uma parte significativa das lamelas de lixa iriam ser inutilizadas, causando desperdício no processo.

A Tabela 2 compara dois tipos de *Flap Disc* em relação ao desempenho e economia para a aplicação em aço. É importante ressaltar que ambos apresentam o mesmo grão abrasivo, NorZon®, mudando apenas o costado e o formato da base do disco.

O *Flap Disc Evolution* é mais indicado para operações que exigem melhor desempenho, tais como remoção de solda, rebarbas, limpeza e acabamento de superfícies. Apresenta um suporte externo de polímero reto.

Tabela 2: Comparação de dois tipos de *Flap Disc* em relação ao desempenho e economia para a aplicação em aço

Aplicação		Remoção de Material (<i>Flap Disc</i>)
Aço	Desempenho	Evolution -Grão abrasivo: NorZon para alta remoção de material; -Costado plástico reto ideal para operações de remoção de solda ou rebarbas, limpeza e acabamento de superfícies.
	Economia	Classic -Grão abrasivo NorZon; -Costado de fibra reforçada, cônico, oferece um ótimo custo benefício com excelente taxa de remoção.

Fonte: Adaptado de Saint Gobain (2016)

Já o *Classic*, é focado em economia oferecendo um ótimo custo benefício. Apresenta um suporte externo de fibra de vidro cônico, sendo bastante resistente e o formato cônico auxilia em uma maior taxa de remoção de material.

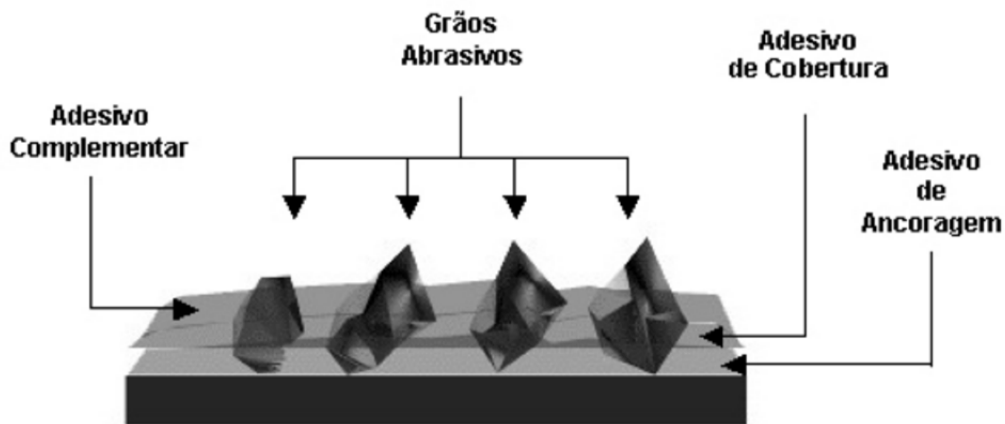
Os compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro, de um modo geral, apresentam elevada resistência mecânica e um baixo peso específico em relação aos polímeros puros. Segundo Silva et al. (2019), o aumento da concentração de fibra de vidro em um material polimérico causou aumento na resistência à tração, no esforço de flexão máximo, no módulo de elasticidade e na resistência ao impacto. Entretanto, a presença da fibra diminuiu a ductilidade do material.

O processo de lixamento manual exigem uma alta resistência do *Flap Disc* afim de evitar acidentes durante o desgaste do material. O suporte externo dessas ferramentas, que podem ser compostos por fibra de vidro ou polímero, tem um papel fundamental. Um disco cônico exige uma resistência mecânica maior que um disco reto uma vez que a área de contato ferramenta-peça é menor. A força aplicada em uma determinada área é bem maior no suporte cônico do que no suporte reto. Um suporte externo de fibra de vidro confere uma maior resistência mecânica à ferramenta.

3.3.3.1 Fabricação das lixas

Os *Flap Discs* são formados por lamelas de lixas. Essas lixas são constituídas basicamente de grãos abrasivos revestidos e fixados por adesivos sobre uma base (PROMAQUINA, 2019). A estrutura da lixa e os componentes estão indicados Figura 15.

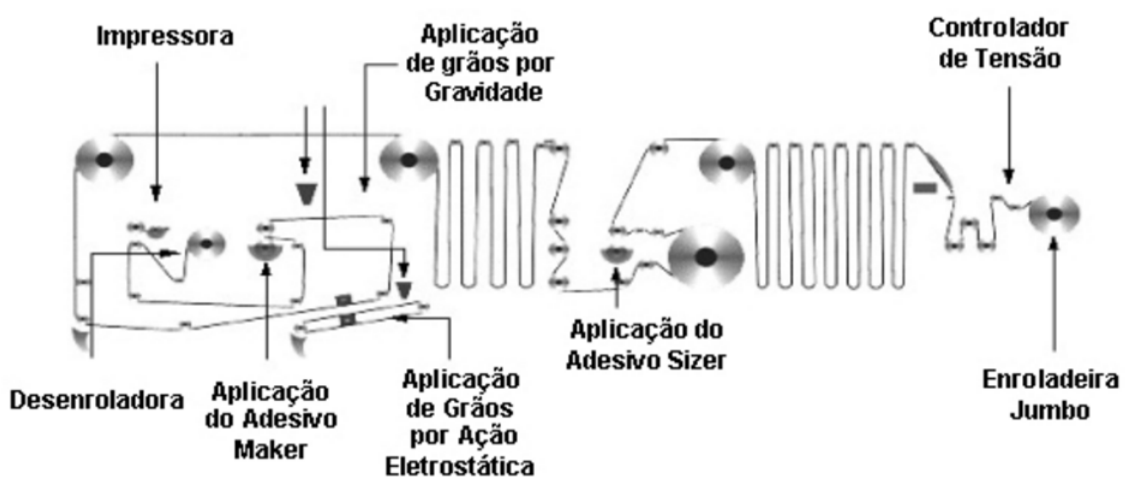
Figura 15: Estrutura básica de uma lixa



Fonte: UNIVEN (2016)

A fabricação das lixas ocorre através de longas linhas de produção (“Makers”) onde grãos abrasivos são depositados e o adesivo é aplicado. Em seguida, os grãos são fixados por duas camadas de adesivos, sendo a primeira (“Marker”) responsável pela fixação dos grãos em si e a segunda (“Sizer”) pela fixação definitiva do grão e também é aquela que determina a maior ou menor exposição desse grão (PROMAQUINA, 2019). O esquema de fabricação da lixa está ilustrada na Figura 16.

Figura 16: Esquema da Fabricação de abrasivos revestidos

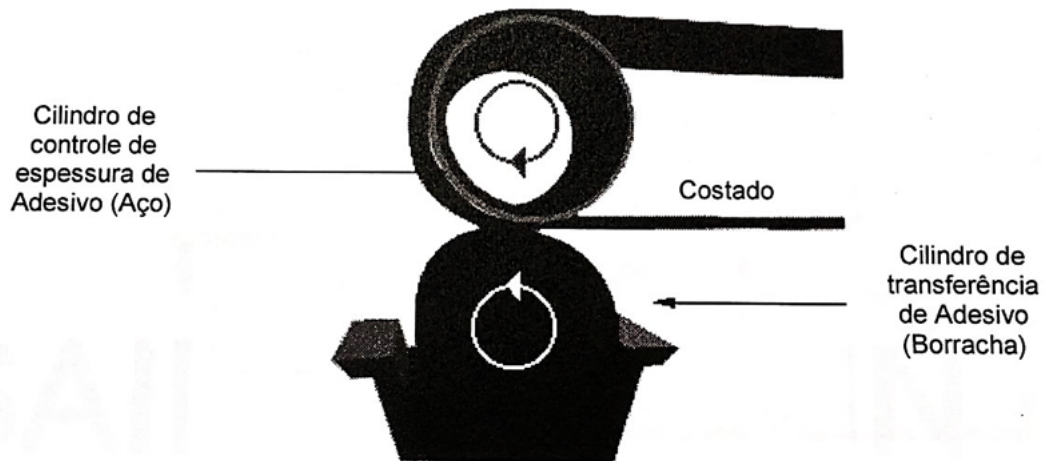


Fonte: UNIVEN (2016)

A aplicação do adesivo “Maker” é feita através da calandragem, um processo com pressão controlada em que o adesivo é transferido do cilindro para o costado. Para uma aplicação eficiente

é necessário o controle rigoroso da reologia do adesivo, como a temperatura, a viscosidade e a quantidade de produto (UNIVEN, 2016). A aplicação do adesivo pela calandra está ilustrada na Figura 17.

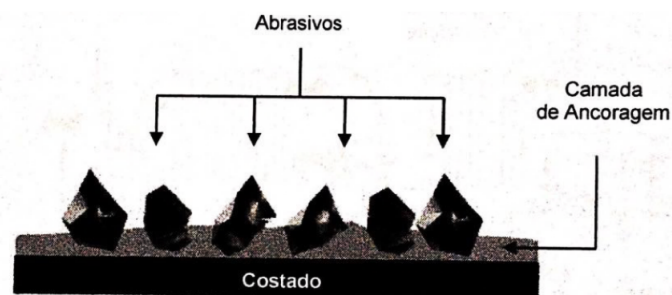
Figura 17: Calandra para aplicação do adesivo



Fonte: UNIVEN (2016)

A deposição dos grãos abrasivos pode ser feita por gravidade, eletroestática, gravidade e eletroestática concomitantemente, “slurry” ou dupla camada por gravidade e eletroestática. A aplicação do abrasivo por gravidade é feita conforme ilustrada na Figura 18, onde os grãos caem livremente sobre o costado com adesivo. Após essa etapa, o costado sofre vibração para que alguns grãos se acomodem e outros, que não se fixaram, sejam reaproveitados (MÓBILE FORNECEDORES, 2011).

Figura 18: Aplicação do grão abrasivo por gravidade

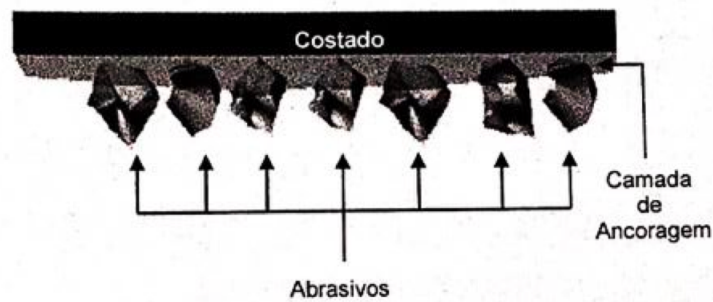


Fonte: UNIVEN (2016)

Na deposição eletroestática mostrada na Figura 19, os grãos ficam em uma esteira enquanto o costado fica na parte superior. Uma carga eletroestática impele os grãos em direção

à camada de ancoragem de forma alinhada. O costado com adesivo, por sua vez, retém esses grãos, deixando a parte mais fina e cortante exposta (SENAI-RS, 2007).

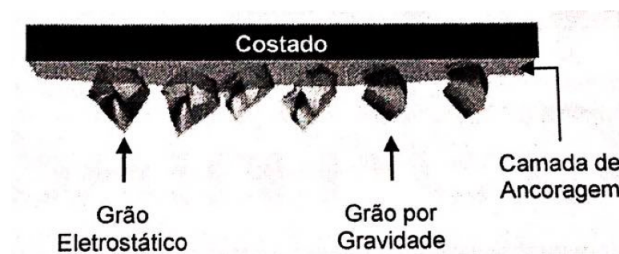
Figura 19: Aplicação do grão abrasivo por deposição eletroestática



Fonte: UNIVEN (2016)

O método de deposição do grão abrasivo por deposição eletroestática e gravidade está ilustrada na Figura 20. Nesse processo, os grãos são colados no costado por gravidade e eletrostaticamente na mesma camada de adesivo.

Figura 20: Aplicação do grão abrasivo por deposição eletroestática e gravidade



Fonte: UNIVEN (2016)

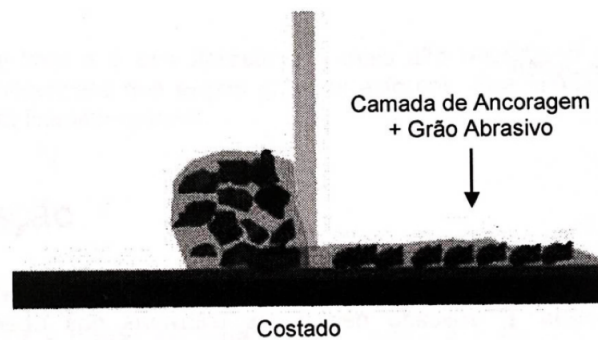
O método *slurry* apresenta o adesivo de ancoragem e o grão abrasivo misturado durante a aplicação sobre o costado. Este processo está ilustrado na Figura 21.

A aplicação do grão abrasivo por dupla camada está ilustrada na Figura 22. Primeiramente, o grão é depositado eletrostaticamente no costado com adesivo. Depois, é assentada uma nova camada de ancoragem onde os grãos são aplicados por gravidade. Por fim, é sobreposto uma camada de cobertura.

3.3.3.2 Estrutura das lixas

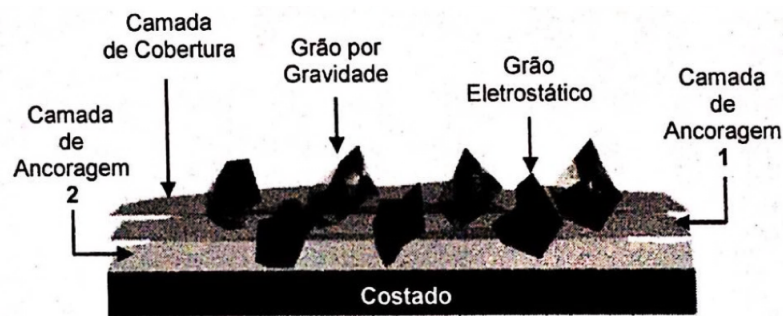
As lixas podem apresentar estruturas diferentes, aberta ou fechada, em relação ao espaçamento entre os grãos. A camada mais aberta, ou seja, com menor quantidade de grão por

Figura 21: Aplicação do grão abrasivo pelo método *slurry*



Fonte: UNIVEN (2016)

Figura 22: Aplicação do grão abrasivo por dupla camada



Fonte: UNIVEN (2016)

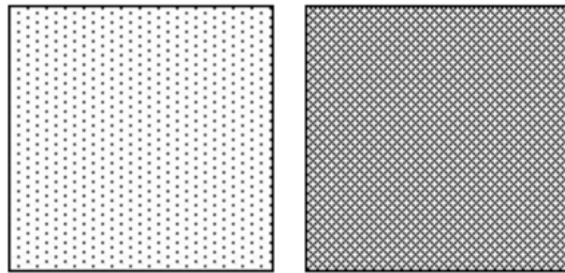
unidade de área, evita o empastamento (PROMAQUINA, 2019). Entretanto, estrutura muito aberta tendem a se desgastar de modo irregular e propagar tricas devido à porosidade excessiva (NUSSBAUM, 1988). Por outro lado, a camada fechada proporciona um acabamento mais uniforme e é indicada para grãos mais finos (UNIVEN, 2016). A Figura 23 ilustra a estrutura aberta e fechada das lixas, respectivamente.

3.3.3.3 Tipos de grãos

O grão abrasivo atua removendo material da superfície da peça a ser usinada. A Figura 24 apresenta o grão abrasivo com as linhas de clivagem que permitem a exposição de novas superfícies cortantes. A principal vantagem desse mecanismo é o aumento da vida útil do grão e, conseqüentemente, da ferramenta de corte.

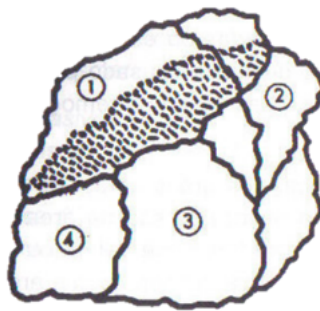
A classificação do grão abrasivo pode ser natural ou sintética. Os grãos naturais são aqueles cuja origem é os minerais que formam as rochas, como por exemplo, o diamante, o quartzo

Figura 23: Duas estruturas de lixas diferentes: esquerda – aberta e direita – fechada



Fonte: UNIVEN (2016)

Figura 24: Grão abrasivo



Fonte: Venson (2016)

e o coríndon. Já os sintéticos são aqueles produzidos artificialmente através de altas pressões e temperaturas, como por exemplo, o óxido de alumínio e o carbeto de silício (MONTAGNA, 2019).

Existem diversos tipos de grãos abrasivos para as variadas funcionalidades. Entretanto, os mais comuns são: óxido de alumínio, carbeto de silício, óxido de alumínio cerâmico e óxido de alumínio zirconado. A Tabela 3 apresenta um resumo dos principais tipos de grãos bem como as suas características e aplicações.

Os grãos de óxido de alumínio (Al_2O_3) são muito resistentes e apresentam formato de cunha que facilita a penetração em materiais duros, como aço carbono, liga de aço e bronze duro, sem se desgastar (PROMAQUINA, 2019). Existem dois tipos de óxidos de alumínio: branco e marrom. O óxido de alumínio branco apresenta uma dureza média e é indicado para cortes frios de madeira ou couro. Já o óxido de alumínio marrom apresenta uma dureza alta e é indicado para tratamento em alta temperatura, sendo utilizado na retificação de metais ferrosos, madeira dura e alumínio.

Tabela 3: Grãos abrasivos utilizados em lixas e suas principais características e aplicações

Grão	Características	Aplicações
Óxido de Alumínio Branco	Dureza média	Madeira
	Corte frio	Couro
	Durabilidade	
Óxido de Alumínio Marrom	Durabilidade	Metais ferrosos
	Tratamento em alta temperatura	Madeira dura
	Dureza alta	Alumínio
Carbeto de Silício	Frágil	Vidro, mármore e granito; Borracha e plástico; Titânio, latão, bronze e alumínio
	Extremamente friável	Aço inoxidável e acabamento de ferro fundido; Madeira e aglomerado
Óxido de alumínio cerâmico	Micro estruturado	Ferro e metais não ferrosos
	Resistente a fragmentação sob pressão	Aço carbono e ligas especiais
	Extrema durabilidade	Madeira dura, compensado e aglomerados
Óxido de alumínio zirconado	Extremamente duro com alto índice de remoção e fragmentação	Metais ferrosos e não ferrosos; Aço inoxidável e madeira plana;
	Friável	Fibra de vidro, madeira, plástico; Compensados e aglomerados;

Fonte: Adaptado de UNIVEN (2016)

O carbeto de silício tem como principal vantagem a penetração e rapidez de corte sob leves pressões em materiais não ferrosos, por ser o mais duro e afiado em relação a outros grãos abrasivos. Ele é utilizado, principalmente, para dar acabamento em alumínio, latão, vidro e entre outros materiais (PROMAQUINA, 2019). Também é possível utilizar o carbeto de silício na usinagem de aços inoxidáveis e acabamento de ferro fundido, além de madeira e aglomerado.

O grão de óxido de alumínio cerâmico é um material muito denso e resistente produzido a partir da alumina em forma de gel (levigada), também conhecida como *Seeded Gel*. Durante a produção, esse gel é tratado quimicamente de modo a formar uma pasta, composta por cristais de óxido de alumínio, que passa por processos de extrusão e sinterização para gerar o grão abrasivo de alta qualidade e extrema durabilidade. O diferencial do composto produzido é a alta friabilidade devido a sua estrutura microcristalina formada pela aglomeração de milhares de microcristais (SAINT-GOBAIN ABRASIVOS BRASIL, 2019). Essa característica permite a exposição de novas superfícies de corte o que proporciona um melhor aproveitamento do grão

em materiais como aços-carbono, ligas aeroespaciais e alguns aços inoxidáveis, por exemplo.

O óxido de alumínio zirconado, ou NorZon®, é obtido pela combinação do óxido de alumínio e óxido de zircônio. Esses óxidos são produzidos por meio do processo de fusão que é gerado por um arco voltaico através de uma diferença de potencial. O arco elétrico juntamente com um forte jato de ar comprimido proporciona um grande aumento na temperatura que funde e oxida o material (RODRIGUEZ et al., 2001). O grão produzido apresenta alta resistência ao desgaste e impacto e arestas com grande afiação o que proporciona uma menor geração de calor durante a remoção de material. Além disso, o óxido de alumínio zirconado é indicado para materiais como aço inoxidável, aço e ligas de ferro fundido nodular (FERREIRA, 2008). Também pode ser utilizado em fibra de vidro, madeira, polímero, compensados e aglomerados.

3.3.3.4 Granulometria

A granulometria desses grãos depende essencialmente da aplicação, do acabamento superficial requerido e da dureza da peça a ser usinada. Para isso, os grãos são triturados e classificados, por peneiramento, conforme o tamanho da partícula (MONTAGNA, 2019). A relação entre a aplicação e granulometria está indicada na Tabela 4.

Tabela 4: Relação entre aplicação e granulometria

Aplicação	Grãos
Desbaste Pesado	Grossos
Desbaste Leve	Médios
Semi Acabamento	Finos
Acabamento	Muito Finos
Polimento	Super Finos

Fonte: Adaptado de Montagna (2019)

A granulometria dos grãos interfere significativamente na quantidade de material removido durante o processo de lixamento. Quanto mais grosseiro o grão, maior a quantidade de material removida. Desse modo, para um desbaste pesado é recomendado um grão mais grosso enquanto para polimento os grãos super finos desempenham melhor essa função.

A obtenção de um determinado acabamento superficial está intimamente relacionada com a granulometria da lixa e a dureza do material a ser debastado. Para obter uma rugosidade específica na superfície da peça, é necessário um tamanho de grão menor quando o material a ser usinado é menos duro do que para materiais mais duros. Acabamentos mais grosseiros, ou seja, com um R_a maior requerem grãos maiores. A Tabela 5 indica essa relação.

Tabela 5: Granulometrias em função da dureza do material e da rugosidade desejada

Durezas do Material	Acabamento em Ra (μm)						
	0,02÷0,03	0,04÷0,06	0,07÷0,10	0,12÷0,16	0,18÷0,25	0,30÷0,40	0,44÷0,60
<40 HRc	1.200- 1.600	1.000	600	400	280	220	150
40-60 HRC	1.000- 1.200	800	500	320	240	180	120
>60 HRc	1.000- 1.200	600	400	280	220	150	100

Fonte: Adaptado de Nussbaum (1988)

3.3.3.5 Tratamento dos grãos

Os grãos podem apresentar diferentes tratamentos a fim de melhorar o desempenho durante aplicação e de eliminar contaminação da superfície. O tratamento antiempastante, por exemplo, acrescenta um recobrimento de estearato de zinco sobre os grãos e atua como lubrificante durante o lixamento, que funde esse recobrimento através do calor gerado no processo. Já o tratamento supersizer proporciona a diminuição do calor gerado durante a operação através da aplicação de uma terceira camada de revestimento. Esse tratamento aumenta a vida útil do produto e evita a queima da peça. Por fim, o tratamento antiestático evita a formação de eletricidade estática em máquinas de lixamento que é o principal responsável pelo depósito excessivo de resíduos nas lixadeiras (PROMAQUINA, 2019). Além disso, essa incorporação de agentes especiais proporciona a redução de pó de madeira no ar, o que melhora significativamente a vida do trabalhador.

3.3.3.6 Tipos de adesivos

Os adesivos podem ser naturais ou sintéticos. Os naturais são à base de amidos e cola animal e os sintéticos à base de resinas. Os adesivos de cola animal, por exemplo, apresentam boa flexibilidade de baixa resistência ao calor e à umidade quando usados para reforçar a adesão de base. Já os adesivos a base de resinas uréicas e fenólicas apresentam uma ótima adesão de base e é resistente ao calor e à umidade durante a fixação do grão abrasivo ao costado. Os adesivos sintéticos de poliéster e epóxi apresentam uma boa adesão de base e flexibilidade, entretanto a resistência ao calor é baixa (UNIVEN, 2016). As Tabela 6 e Tabela 7 apresentam os principais tipos de adesivos de ancoragem e de revestimento, respectivamente, além da finalidade e características do produto.

Tabela 6: Adesivo de ancoragem (*Maker*)

Tipo	Base	Finalidade	Características
Sintético	Poliéster e Epóxi	Fixar o grão abrasivo ao costado	Boa adesão de base e flexibilidade. Baixa resistência ao calor e à umidade.
Sintético	Resinas uréicas e fenólicas		Ótima adesão de base, com boa flexibilidade em alguns casos. Resistente ao calor e à umidade.

Fonte: Adaptado de UNIVEN (2016)

Para a ancoragem do grão os adesivos sintéticos, tanto o poliéster, epóxi e as resinas uréicas e fenólicas, se mostram eficientes devido a boa adesão e flexibilidade. A vantagem das fenólicas e uréicas é a capacidade de resistir ao calor e à umidade.

Tabela 7: Adesivo de revestimento (*Sizer*)

Tipo	Base	Finalidade	Características
Natural	Cola animal (nervos)	Reforçar a adesão de base	Boa flexibilidade. Baixa resistência ao calor e à umidade.
Sintético	Resinas		Boa resistência ao calor e à umidade nas lixas com base de resina. Em alguns casos pode-se trabalhar em operações refrigeradas e úmidas (costado impermeável)

Fonte: Adaptado de UNIVEN (2016)

Os adesivos de revestimento reforçam a adesão de base. Esses adesivos podem ser tanto naturais (cola animal) como sintéticas (resinas). A desvantagem da cola animal é a baixa resistência ao calor e à umidade.

3.3.3.7 Tipos de costados

Os costados das lixas podem ser de papel, tecido, fibra, combinação de materiais ou filme plástico. As lixas de papel leve apresentam grande flexibilidade e são empregadas em operações manuais e lixadeiras portáteis. Já o costado com papel pesado (formato de cinta ou fita) apresenta uma maior resistência em relação à anterior e são utilizadas para desbaste,

acabamento e semi-acabamento. Os costados de tecido, como por exemplo, Lonita, Jeans, Drill e Poliéster, são utilizados em operações manuais e mecânicas devido a sua alta resistência a tração, rasgo e estiramento (UNIVEN, 2016). A Tabela 8 apresenta os principais tipos de tecido e suas características.

Tabela 8: Principais tipos de tecidos utilizados nas lixas e suas características

Tipo	Base	Finalidade	Características
Sintético	Poliéster e Epóxi	Fixar o grão abrasivo ao costado	Boa adesão de base e flexibilidade. Baixa resistência ao calor e à umidade.
Sintético	Resinas <u>uréticas</u> e fenólicas		Ótima adesão de base, com boa flexibilidade em alguns casos. Resistente ao calor e à umidade.

Fonte: Adaptado de UNIVEN (2016)

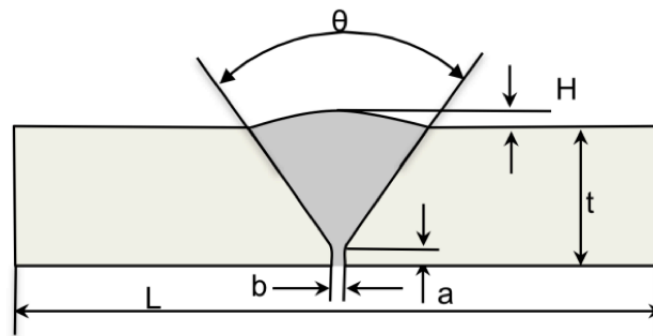
As lixas com costado de fibra são empregadas em discos para lixadeiras portáteis e apresentam a mais alta resistência mecânica. Já o costado obtido através da combinação de pano e papel colados por adesivo é aplicado, principalmente, nas indústrias madeireiras. Por fim, o filme plástico é utilizado em lixas para virabrequim por apresentar grande flexibilidade e impermeabilidade (UNIVEN, 2016).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Metodologia

A avaliação dos cenários de sustentabilidade da operação manual de lixamento foi feita através de um ambiente de simulação. Nesse ambiente, cordões de solda em chapas de aço inoxidável 304L foram desbastados. A Figura 25 ilustra a seção transversal dos corpos de prova, no qual o ângulo (θ) é de 60 graus, a espessura da chapa (t) é de $\frac{1}{4}$ " , as dimensões a e b são de 2 mm, a largura (L) é de 100 mm e o comprimento (C) é de 500 mm.

Figura 25: Seção transversal do corpo de prova a ser utilizado no lixamento (sem escala)



Fonte: Própria autora.

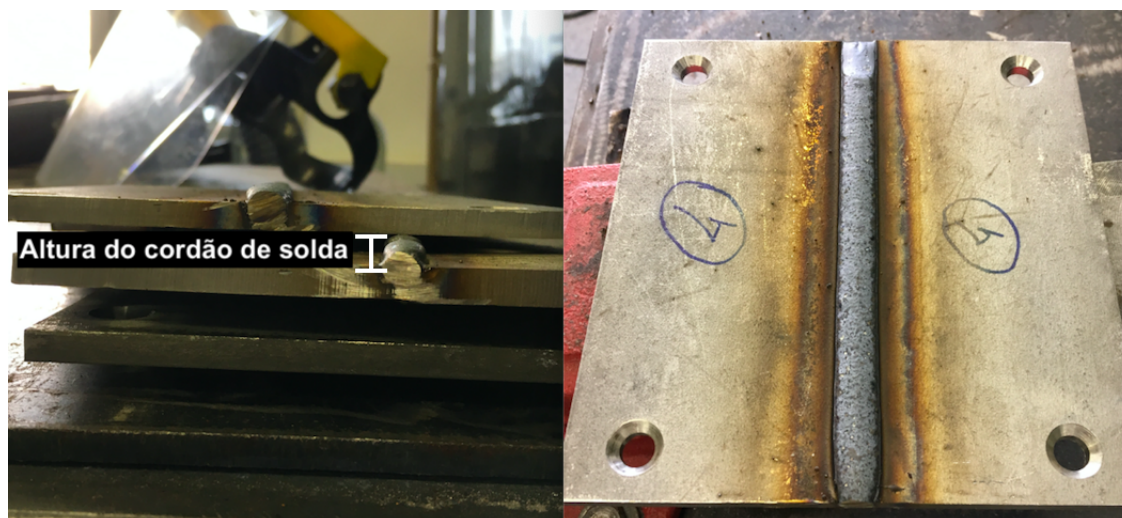
A usinagem dos corpos de prova foram feitos no Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA) no Centro de Usinagem Romi D800. A soldagem MIG foi realizada Departamento de Engenharia de Materiais - EESC (USP) no equipamento da marca Castolin Eutetic, Pulsarc 6200 Max. Na soldagem foi utilizado como gás inerte o argônio com 2% de oxigênio e o arame de Aço Inoxidável 308L com 1,2mm de diâmetro.

Foram usinados e soldados 85 corpos de prova, sendo que 16 foram selecionados para os testes. Para a seleção dos corpos de prova levou-se em conta o cordão de solda que apresentava uma maior regularidade em toda a extensão. Também foram selecionados os corpos de prova que apresentavam altura do cordão de solda (H) similares. A Figura 26 mostra o corpo de prova usinado e soldado. Do lado esquerdo é possível observar a altura do cordão de solda (H) e do lado direito a regularidade do cordão de solda.

As operações de desbaste e acabamento foram realizadas com a esmerilhadeira angular eletrônica 5" GWS 17-125 1700W CIE da marca Bosch (Figura 27).

Os *Flap Discs* utilizados foram o Evolution® e o Classic® da Norton (Saint-Gobain), com costado de plástico reto e fibra reforçada cônica, respectivamente. Ambos possuem grãos de alumínio zirconado (NorZon®) que proporcionam uma menor geração de calor durante a

Figura 26: Corpo de prova depois de usinado e soldado



Fonte: Própria autora

Figura 27: Esmerilhadeira angular eletrônica Bosch 5" GWS 17-125 1700W CIE



Fonte: BOSCH (2019)

remoção de material. Foram utilizados grãos médios (grana 40) para desbaste em ambas as ferramentas. A Figura 28 ilustra os dois tipos de *Flap Discs* utilizados nessa pesquisa.

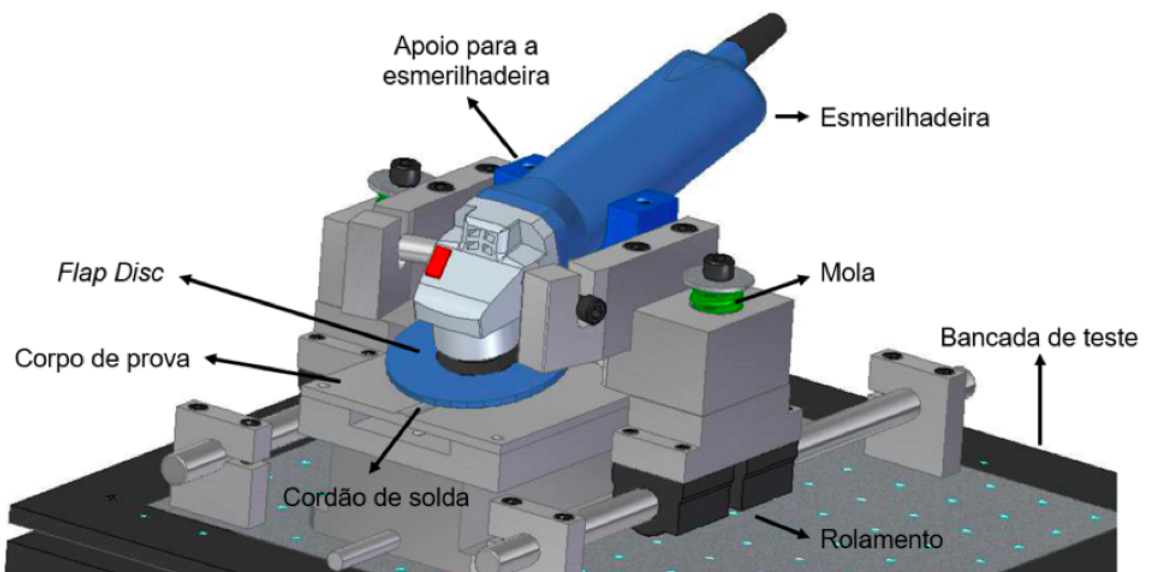
Os parâmetros de corte do processo do lixamento manual, como a força aplicada no *Flap Discs* e a velocidade de avanço e de corte, dependem necessariamente do operador. A fim de padronizar esses parâmetros, foi projetado um ambiente de simulação onde a esmerilhadeira fica apoiada em um suporte que se movimenta através de um motor com velocidade controlada. Além disso, a força aplicada para o desgaste da solda é regulada por duas molas, indicadas na Figura 29. O projeto da bancada de teste foi feito pelo aluno João Marcos Guido, que também participou do projeto.

Figura 28: Flap discs Classic® e Evolution® da marca Norton, respectivamente



Fonte: Saint-Gobain Abrasivos Brasil (2019)

Figura 29: Bancada de teste

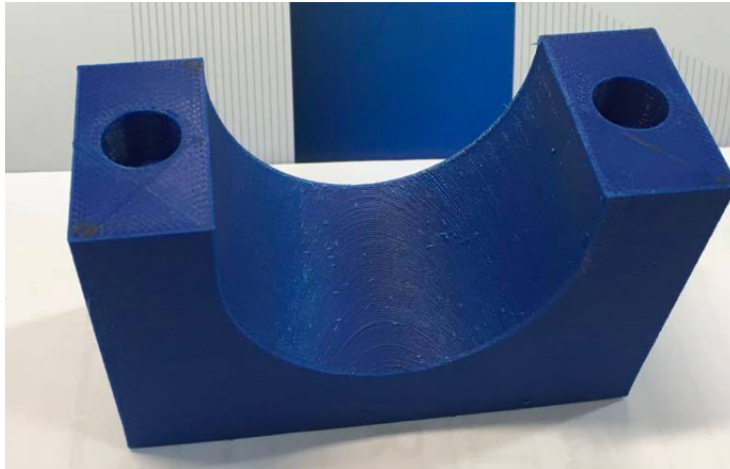


Fonte: Carmo (2017)

O suporte para a esmerilhadeira na parte posterior, representada em azul na Figura 30, foi feita por manufatura aditiva e é presa à bancada de teste com dois parafusos. O tamanho e o formato da depressão central dependem da angulação requerida para o *Flap Disc* durante a operação de desbaste. Esse suporte pode ser trocado quando houver necessidade de alteração na angulação do *Flap Disc*.

A angulação do *Flap Disc* em relação ao corpo de prova depende essencialmente da quantidade de material que se deseja retirar. Desse modo, quanto maior a inclinação do disco de desbaste, maior a força vertical aplicada e, conseqüentemente, maior é a remoção de material.

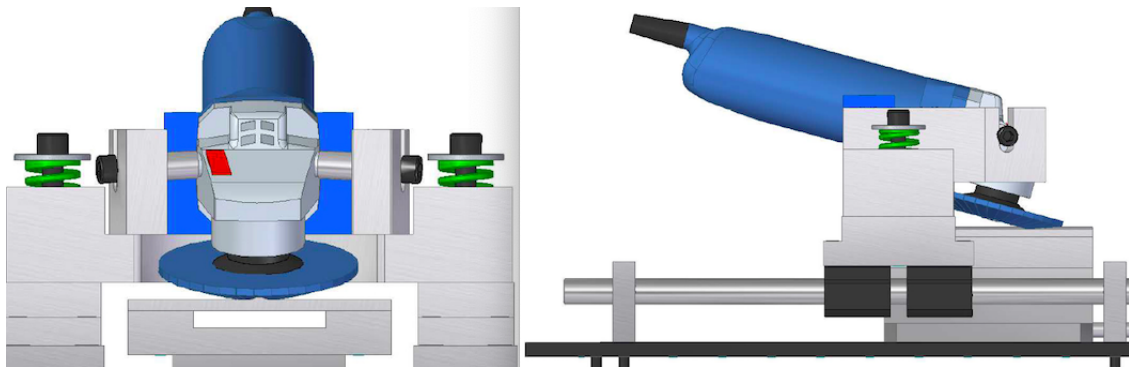
Figura 30: Suporte para a esmerilhadeira feita por manufatura aditiva



Fonte: Carmo (2017)

A Figura 31 ilustra melhor o posicionamento do suporte (Figura 30) em relação à esmerilhadeira e a bancada de teste. Também é possível observar com clareza na vista lateral a angulação do *Flap Disc*, os rolamentos que auxiliam a movimentação da esmerilhadeira e a mola que regula a força aplicada pelo disco.

Figura 31: Vista superior e lateral, respectivamente, da bancada de teste



Fonte: Carmo (2017)

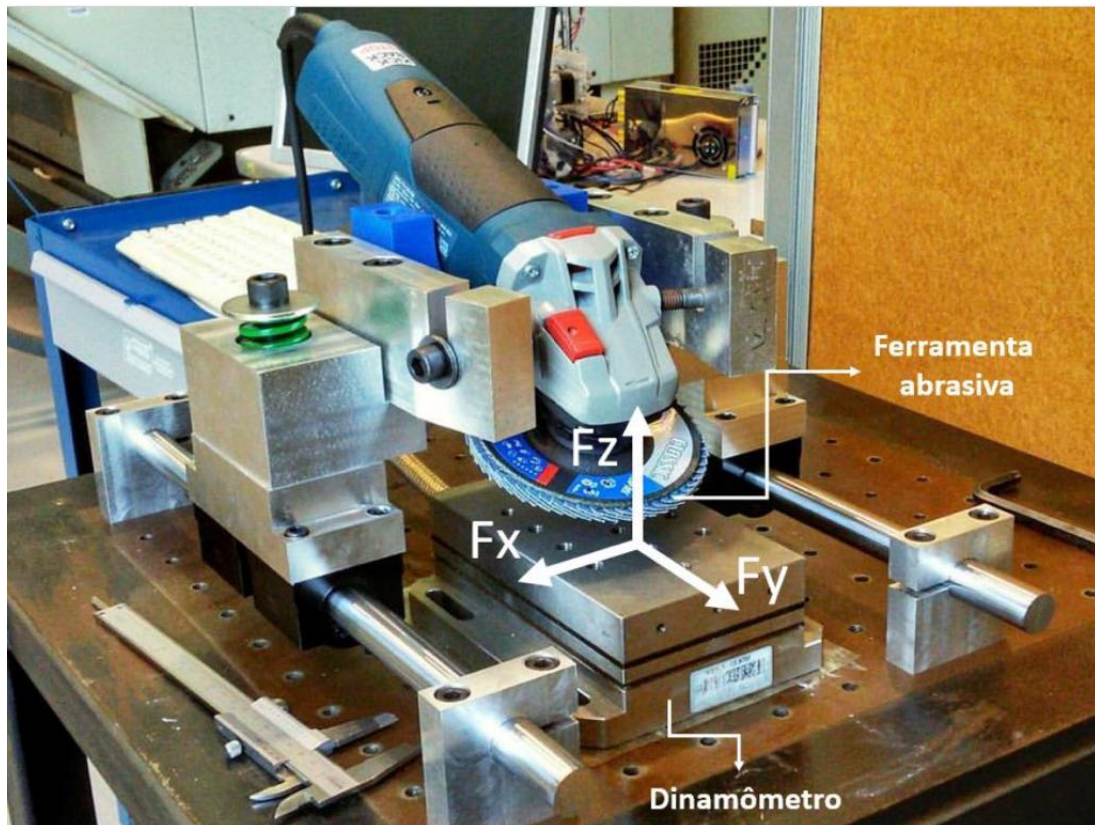
O modelo do rolamento utilizado na bancada de teste é o Pillow Block fechado de 20 mm e apresenta capacidade de carga dinâmica e estática de 860N e 1370N, respectivamente. Já a mola de compressão MDL apresenta seção retangular e é indicada para cargas leves. Além disso, apresenta comprimento inicial (L_0) de 51 mm, diâmetro externo e interno de 32 mm e 16 mm, respectivamente, constante elástica (K) de 71 N/mm e curso máximo de trabalho de 20 mm (40% de L_0).

É importante ressaltar que todas as outras peças de aço utilizadas no suporte, representadas em cinza nas Figura 29 e Figura 31, foram usinadas no Laboratório de Processo

Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS). Os parafusos utilizados para a fixação dessas peças foram comprados.

A bancada de teste pronta e montada, assim como os eixos referenciais X, Y e Z, estão ilustrada na Figura 32.

Figura 32: Referencial dos eixos X, Y e Z da bancada de teste



Fonte: Carmo (2017)

4.2 Instrumentação da esmerilhadeira

O ambiente de simulação do processo manual de lixamento deve apresentar instrumentação adequada para análise completa dos parâmetros da operação. Desse modo, foram instalados os seguintes equipamentos na bancada de teste: dinamômetro, sensor magnético, acelerômetro, decímetro, motor de passo e *Labview*.

O dinamômetro na esmerilhadeira auxilia na medição da força aplicada pelo *Flap Disc* no corpo de prova. A força aplicada na ferramenta durante o lixamento manual é de extrema importância uma vez que interfere diretamente na profundidade de penetração da ferramenta na peça durante a operação e, conseqüentemente, na qualidade do acabamento. O dinamômetro utilizado na bancada de teste foi o Kistler 9257A que tem capacidade de medição nos três eixos referenciais: X, Y e Z.

A fim de automatizar o avanço retilíneo da esmerilhadeira sobre a peça, foi implementado um motor de passo. Esse tipo de motor converte pulsos elétricos em movimentos mecânicos que geram variações angulares discretas. A rotação dos motores depende essencialmente dos impulsos elétricos recebidos e a sequência desses pulsos. O motor de passo utilizado na bancada de teste foi o NEMA 34 - 52 kgf.cm/5A do fabricante Neoyama. O projeto da automatização da esmerilhadeira foi realizada pelo aluno Marco Aurélio Mijan que foi estagiário do LAPRAS em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação.

O sensor Hall também foi implementado na esmerilhadeira e é utilizado para o monitoramento da variação de energia. Esse dispositivo apresenta como principal vantagem o fato de não influenciar o espaço de trabalho, por ser acoplado diretamente no cabo da esmerilhadeira, e de apresentar custos relativamente baixos. A inspeção não destrutiva, característica desse sensor, permite a análise da potência consumida pela esmerilhadeira durante a remoção de material. O sensor Hall acoplado na esmerilhadeira foi Newtronic Automação Ltda, Modelo NW-SCD, N° de Série: 98101401.

Outro sensor que foi utilizado na esmerilhadeira é o acelerômetro. Esse sensor eletrônico mede o quão rápido a velocidade de um corpo varia ao longo do tempo. Desse modo, ao acoplar na esmerilhadeira é possível verificar a vibração da mesma e, conseqüentemente, analisar a condição de trabalho que o operador é submetido. No eixo x da bancada de teste, foi utilizado o modelo PCB Piezotronics 353B03 e no eixo z PCB Piezotronics 352C33, como ilustrado na Figura 33. No eixo y não foi colocado nenhum acelerômetro pois essa direção apresenta movimento não significativo quando comparado aos eixos x e z.

Figura 33: Acelerômetro PCB Piezotronics 352C33 fixado no eixo Z



Fonte: Própria autora

Também foi analisado o nível de ruído emitido durante a operação de desbaste. Para isso, foi utilizado um decímetro localizado próximo ao ouvido do operador. Esse dado permite

a análise dos possíveis problemas no campo da saúde ocupacional, uma vez que um ruído excessivo pode ocasionar a perda auditiva, estresse, falta de concentração e entre outros efeitos na saúde do operador. Desse modo, foi possível analisar o efeito do processo de lixamento sobre a qualidade de trabalho dos funcionários. O equipamento utilizado para medir o ruído foi o Instrutherm–DEC-460, de saída de DC com relação 10 mV/Db.

Por fim, o software *Labview* auxiliou na aquisição de dados dos experimentos. Esse software é um ambiente de desenvolvimento integrado que auxilia engenheiros e cientistas em relação ao fluxo de dados.

4.3 Parâmetros de processo

No processo de lixamento abordado neste trabalho, foi estudado o efeito da inclinação da esmerilhadeira na qualidade da peça depois do desbaste da solda. A inclinação da esmerilhadeira pode ser controlada pela cavidade central do suporte produzido por manufatura aditiva (Figura 30).

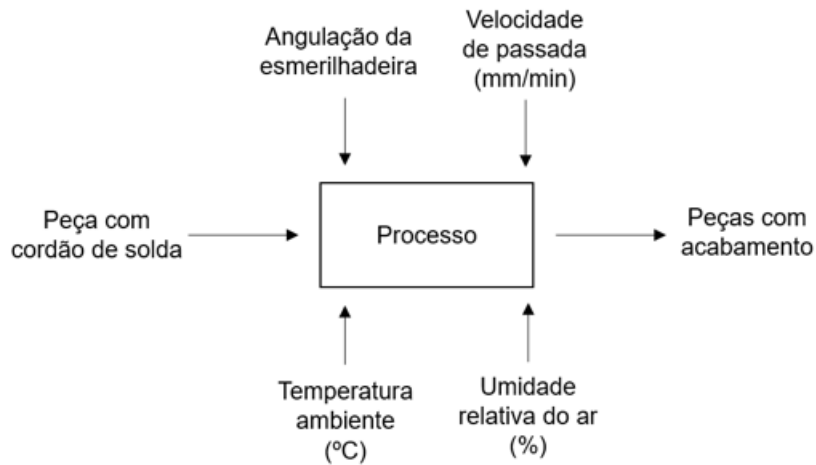
Foram fabricados três suportes diferentes para analisar três inclinações do *Flap Disc* em relação à peça usinada: 8°, 15° e 30°. Sendo a menor angulação (8°) aquela que o disco apresenta maior área de contato com o cordão de solda da peça e menor força normal e, conseqüentemente, melhor acabamento e menor desbaste.

Entretanto, devido a dificuldades técnicas na instrumentalização da bancada de teste foi utilizado somente as angulações de 15° e 30°, focando os testes na operação de desbaste. A velocidade de passada também foi um parâmetro que não foi padronizado devido às dificuldades encontradas na implementação do motor de passo. Ao final de cada processo foi medido o peso do *Flap Disc* e avaliação do desgaste, energia específica, relação G, rugosidade, nível de vibração e de ruído. No experimento realizado, dois fatores foram variados: angulação da esmerilhadeira e velocidade de passada. Cada fator apresenta diferentes níveis que são os valores das inclinações e das velocidades, respectivamente. Sendo assim, existem oito combinações possíveis dos diferentes níveis. A Figura 34 ilustra o modelo para o processo de lixamento realizado nesse trabalho.

Para garantir a validade das análises estatísticas e reduzir erro experimental, foram realizadas réplicas de todas as combinações dos níveis, melhorando assim a qualidade das análises estatísticas do projeto. Todas as simulações dos cenários de estudo e réplicas realizadas estão apresentadas na Tabela 9 a seguir.

Todas as sequências dos testes foram feitas de modo aleatório. A numeração dos corpos de prova refere-se a ordem de usinagem e soldagem realizadas antes das simulações. Além disso, foi utilizado dois tipos de *Flap Disc*: Classic e Evolution. A granulometria (40) e inclinação (15° e 30°) escolhidas deve-se à operação de desbaste. A velocidade de passada estabelecida foi de 10m/min e 15m/min, controlada manualmente.

Figura 34: Modelo de processo de lixamento manual



Fonte: Própria autora

4.4 Indicadores de sustentabilidade

O diagrama de fluxo da operação manual de lixamento ilustrado na Figura 7 auxiliou no entendimento profundo do processo. Esse tipo de ferramenta auxiliou principalmente na escolha de indicadores de sustentabilidade adequados, que leva em conta a integridade superficial (rugosidades R_a e R_z), quantidade de energia utilizada no processo, descarte de resíduos, nível de ruído e nível de vibração. A energia específica e relação G são calculadas conforme as Equação 4.1 e Equação 4.2, respectivamente.

$$\text{Energia específica} = \frac{\text{Energia total do processo}}{\text{Material removido}} \quad (4.1)$$

$$\text{Relação G (modificada)} = \frac{\Delta \text{Massa do corpo de prova}}{\Delta \text{Massa do Flap Disc}} \quad (4.2)$$

4.4.1 Recurso energia

O indicador de sustentabilidade focado no recurso energético mede a quantidade de energia gasta para atingir determinada rugosidade.

As medidas de rugosidade foram realizadas com base na norma brasileira ABNT NBR ISO 4288. O valor de comprimento de onda (cut-off) foi o determinado pela mesma norma citada anteriormente. O rugosímetro utilizado foi da marca Ametek-Taylor Hobson e em cada corpo de prova foi feita duas medidas: uma no centro do cordão de solda, afim de evitar os efeitos de entrada e saída do *Flap*, e outra no centro do corpo de prova a 40mm do cordão de solda. A Figura 35 ilustra como foi realizada as medidas das rugosidades R_a e R_z .

Tabela 9: Sequência de simulações dos cenários

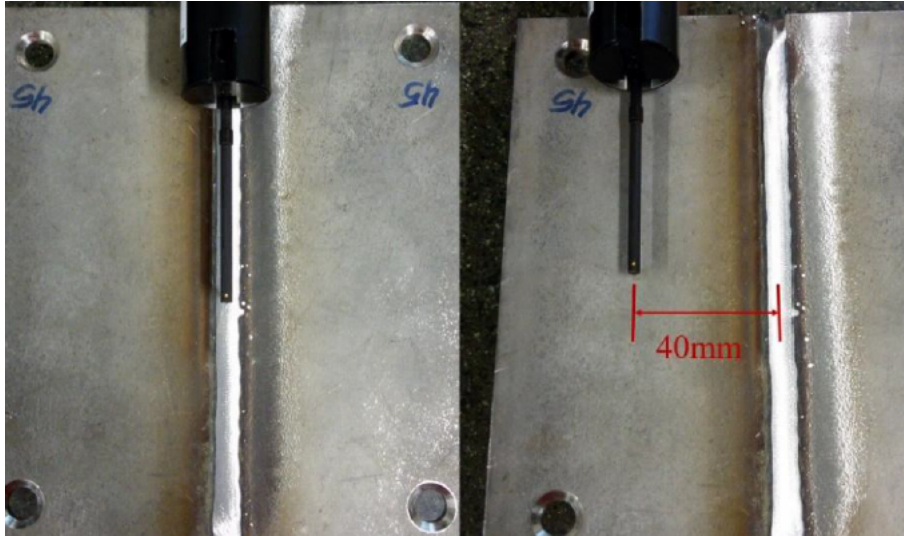
Sequência teste	Numeração corpo de prova	Tipo de Flap Disc	Granulometria	Inclinação esmerilhadeira	Velocidade de passada (m/min)
1	20	Classic	40	15°	10
2	23	Classic	40	15°	10
3	5	Evolution	40	15°	10
4	58	Evolution	40	15°	10
5	60	Classic	40	15°	15
6	51	Classic	40	15°	15
7	37	Evolution	40	15°	15
8	52	Evolution	40	15°	15
9	31	Classic	40	30°	10
10	64	Classic	40	30°	10
11	45	Evolution	40	30°	10
12	14	Evolution	40	30°	10
13	25	Classic	40	30°	15
14	3	Classic	40	30°	15
15	22	Evolution	40	30°	15
16	59	Evolution	40	30°	15

Fonte: Própria autora

Também foi calculado a energia gasta no processo através dos dados adquiridos pelo sensor Hall. Os cálculos dos indicadores de sustentabilidade quanto ao recurso energético estão nas Equação 4.3 e Equação 4.4.

$$\eta_{\text{Sust,Ra}} = -\frac{\Delta Ra}{\Delta \text{Energia}} \quad (4.3)$$

Sendo, ΔRa a variação da rugosidade média e $\Delta \text{Energia}$ a energia consumida durante o

Figura 35: Medição das rugosidades R_a e R_z 

Fonte: Própria autora

processo.

$$\eta_{\text{Sust,Rz}} = -\frac{\Delta R_z}{\Delta \text{Energia}} \quad (4.4)$$

Sendo, ΔR_z a variação da média aritmética de cinco valores de rugosidade parcial e $\Delta \text{Energia}$ a energia consumida durante o processo.

4.4.2 Recurso descarte de resíduos

O indicador de sustentabilidade focado no descarte de resíduos mede a quantidade de material removido para atingir determinada rugosidade. Para isso, foram medidas as massas iniciais dos corpos de prova depois da soldagem e as massas finais depois do lixamento manual. A medição do corpo de prova foi feita na balança TA4000D da marca Ohaus e a do *Flap Disc* na Shangping FA2104N com precisão de 0,0001g. Os cálculos dos indicadores de sustentabilidade quanto ao descarte de resíduos estão nas Equação 4.5 e Equação 4.6.

$$\eta_{\text{SustW@Ra}} = -\frac{\Delta R_a}{\Delta \text{Descarte de resíduos}} \quad (4.5)$$

Sendo, ΔR_a a variação da rugosidade média e $\Delta \text{Descarte de resíduos}$ a quantidade de massa perdida no lixamento.

$$\eta_{\text{SustW@Rz}} = -\frac{\Delta R_z}{\Delta \text{Descarte de resíduos}} \quad (4.6)$$

Sendo, ΔR_z a variação da média aritmética de cinco valores de rugosidade parcial e $\Delta \text{Descarte de resíduos}$ a quantidade de massa perdida no lixamento.

4.4.3 Conforto do operador: nível de ruído

O indicador de sustentabilidade focado no nível de ruído mede a quantidade de ruído no ambiente para atingir determinada rugosidade. Para isso, foram medidas o ruído do ambiente com o equipamento desligado e depois o ruído durante o processo de lixamento manual. A medição do ruído durante os testes dos cenários foi feita utilizando o modelo de decibelímetro DEC-460 da Instrutemp. Também foram computadas as rugosidades iniciais e finais dos corpos de prova já explicadas nos itens anteriores. Esse indicador está relacionado diretamente com a segurança de trabalho do operador e as Equação 4.7 e Equação 4.8 mostram como foi feito o cálculo para esse indicador.

$$\eta_{\text{SustNoise@Ra}} = -\frac{\Delta Ra}{\Delta \text{Nível de ruído}} \quad (4.7)$$

Sendo, ΔRa a variação da rugosidade média e $\Delta \text{Nível de ruído}$ o barulho causado pela operação de lixamento.

$$\eta_{\text{SustNoise@Rz}} = -\frac{\Delta Rz}{\Delta \text{Nível de ruído}} \quad (4.8)$$

Sendo, ΔRz a variação da média aritmética de cinco valores de rugosidade parcial e $\Delta \text{Nível de ruído}$ o barulho causado pela operação de lixamento.

4.4.4 Conforto do operador: nível de vibração

O indicador de sustentabilidade focado no nível de vibração mede a vibração causada pela operação de lixamento manual para atingir determinada rugosidade. Para isso, foi medida a vibração da esmerilhadeira com o acelerômetro durante o processo e também foram computadas as rugosidades iniciais e finais dos corpos de prova. Esse indicador está relacionado diretamente com a segurança de trabalho do operador e as Equação 4.9 e Equação 4.10 mostram como foi feito o cálculo para esse indicador.

$$\eta_{\text{SustVib@Ra}} = -\frac{\Delta Ra}{\Delta \text{Nível de vibração}} \quad (4.9)$$

Sendo, ΔRa a variação da rugosidade média e $\Delta \text{Nível de vibração}$ a vibração causada pela operação de lixamento.

$$\eta_{\text{SustVib@Rz}} = -\frac{\Delta Rz}{\Delta \text{Nível de vibração}} \quad (4.10)$$

Sendo, ΔRz a variação da média aritmética de cinco valores de rugosidade parcial e $\Delta \text{Nível de vibração}$ a vibração causada pela operação de lixamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Simulações dos cenários e coleta de dados

A sequência de simulações dos cenários de estudo definida na etapa anterior foi realizada e os dados coletados através do Software LabView. Outro parâmetro estabelecido foi a velocidade de rotação do disco, em todos os testes foi utilizado a rotação máxima de 11500rpm. Além disso, foram realizadas 50 passadas do *Flap Disc* sobre o cordão de solda, alternando o sentido na direção do cordão.

Os cálculos dos indicadores de sustentabilidade foram estimados considerando a variação das rugosidades R_a e R_z antes e depois do lixamento. Também foi considerado um aspecto qualitativo que tem como base o aspecto visual do corpo de prova. Essas medidas e as variações estão indicadas na Tabela 10.

No teste 3, a porca que segura a esmerilhadeira não estava bem apertada, o que prejudicou na obtenção dos dados. Sendo assim, o teste 3 não foi considerado.

Os testes 11 e 12 foram os que apresentaram menor variação de R_a e R_z . Nesses dois testes foi utilizado o *Flap Disc Evolution*, inclinação de 30° da esmerilhadeira em relação à peça e velocidade de 10m/min. Já os testes 7 e 8 foram os que apresentaram maior variação de R_a . Nesse caso, o *Flap Disc* utilizado foi o *Evolution*, com inclinação de 15° da esmerilhadeira em relação à peça e velocidade de 15m/min. Ou seja, uma inclinação menor da esmerilhadeira auxilia em uma maior variação das rugosidades iniciais e finais uma vez que a área de contato entre os grãos abrasivos e o cordão de solda é maior.

Em relação ao *Flap Disc Classic*, os testes que apresentaram maior variação da rugosidade foram o 9 e 10 e a menor variação foram os testes 13 e 14. Todos os quatro testes com angulação de 30° , variando apenas a velocidade de passada da ferramenta sobre o cordão de solda. Velocidades maiores acarretaram em uma menor variação da rugosidade que pode ser explicada devida à menor interação da ferramenta com a peça. Isso mostra que as condições ideais para a ferramenta com perfil cônico não é o mesmo que com o perfil reto.

Comparando o *Flap Disc Classic* com o *Evolution* com a angulação de 15° , a variação de R_a e R_z foi maior nos testes com o *Evolution*. A variação das rugosidades continuam maior para os testes com o *Evolution* quando a angulação é de 30° e a velocidade é de 15m/min. Porém, para a angulação de 30° e velocidade de 10m/min, o *Flap Disc Classic* se mostra mais eficiente com uma variação maior da rugosidade. O fato do perfil da ferramenta *Evolution* ser reto pode ter influenciado nesse resultado, uma vez que apresenta uma maior área de contato entre o *Flap* e a solda e permite uma maior atuação abrasiva.

Conforme os testes realizados, pode-se constatar que o *Flap Disc Evolution* é mais

Tabela 10: Rugosidades R_a e R_z inicial e final

Sequência teste	Ra (μm)		Rz (μm)		ΔR (μm)	
	Ra inicial	Ra final	Rz inicial	Rz final	ΔR_a	ΔR_z
1	5,91	2,10	38,09	15,23	3,81	22,85
2	5,87	3,50	33,82	20,93	2,38	12,90
3	-	-	-	-	-	-
4	6,52	2,29	43,44	14,19	4,23	29,15
5	6,19	3,53	37,62	19,33	2,66	18,30
6	6,87	3,10	46,62	20,38	3,77	26,23
7	7,74	2,59	39,62	19,17	5,15	20,46
8	9,19	3,25	51,36	19,37	5,95	31,99
9	5,93	2,48	35,36	20,28	3,45	15,08
10	5,61	1,30	34,30	9,40	4,31	24,90
11	4,39	3,62	28,47	24,23	0,77	4,24
12	3,57	2,91	25,17	18,28	0,66	6,89
13	4,98	3,09	31,24	15,69	1,88	15,55
14	6,89	4,76	48,46	32,47	2,14	15,99
15	5,24	2,25	31,83	19,60	2,99	12,22
16	8,00	3,27	50,24	24,86	4,73	25,38

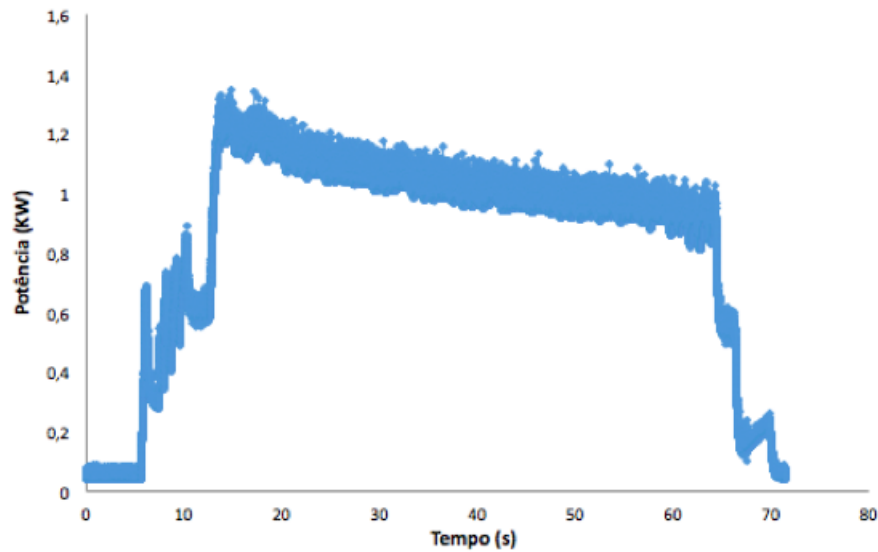
Fonte: Própria autora

eficiente em angulações de 15° e velocidades de passada de 15m/min. Já o *Flap Disc Classic* apresentou maior eficiência quanto a rugosidade com as condições de 30° e 10m/min. Entretanto, a eficiência do *Classic* é inferior a do *Evolution*, ou seja, a variação da rugosidade utilizando o *Evolution* é maior nas mesmas condições do *Classic* devido ao formato do *Flap*.

5.1.1 Recurso energia

O cálculo da energia gasta durante o processo de lixamento foi estimado a partir do gráfico potência por tempo, conforme ilustrado na Figura 36.

Figura 36: Potência consumida pela esmerilhadeira com o passar do tempo



Fonte: Própria autora.

No primeiro intervalo de tempo (entre 5 e 15s), a potência da esmerilhadeira somente ligada é bem menor que a com o instrumento em uso. O aumento gradativo da potência enquanto o instrumento está apenas ligado deve-se à aceleração da rotação do *Flap Disc* que exige mais do motor. Além disso, o alto consumo de energia durante a retirada de material (entre 15 e 65s) diminuiu com o passar do tempo uma vez que a altura cordão de solda (H) diminuiu constantemente devido ao processo de lixamento e, conseqüentemente, diminuiu a energia requerida pelo motor. A quantidade de material removida do corpo de prova e do *Flap Disc* está ilustrada na Tabela 11.

Os testes que tiveram a maior quantidade de resíduos gerados foi o 4 e o 12. Em ambos os testes foram utilizados o *Flap Disc Evolution* com velocidade de passada de 10m/min. As angulações nesses testes foram diferentes. Entretanto, nota-se que a maior porção de material removido foi proveniente do cordão de solda. Isso pode ter acontecido devido ao fato de que o cordão de solda apresentava uma altura mais alta para esses corpos de prova. Além disso, uma menor velocidade de passada proporciona uma maior interação entre o grão abrasivo e a peça-obra, causando um maior desgaste.

Para o *Flap Disc Classic*, os ensaios que apresentaram maior quantidade de resíduos foi o 2 e o 9. Esses testes foram realizados com as mesmas condições no *Evolution* o que mostra que a velocidade de passada da ferramenta tem grande influência no quesito material removido do corpo de prova.

A diferença de resíduos gerados entre dois testes com as mesmas condições (réplicas) deve-se à diferença na altura do cordão de solda e peso inicial do *Flap Disc*.

O indicador de sustentabilidade relacionado ao recurso energia é calculado através da

Tabela 11: Variação da massa do corpo de prova e do *Flap Disc* antes e depois do lixamento

Sequência teste	Massa inicial corpo de prova (g)	Massa final corpo de prova (g)	Material removido (g)	Massa inicial <i>Flap Disc</i> (g)	Massa final <i>Flap Disc</i> (g)	Desgaste <i>Flap Disc</i> (g)	Total resíduos (g)
1	1200,60	1192,20	8,40	76,065	73,880	2,18	10,58
2	1210,10	1199,10	11,00	74,842	72,608	2,23	13,23
3	-	-	-	-	-	-	-
4	1196,80	1182,40	14,40	102,247	99,094	3,15	17,55
5	1216,93	1208,76	8,17	75,040	72,651	2,39	10,56
6	1203,44	1194,77	8,67	74,995	72,803	2,19	10,86
7	1199,72	1191,08	8,64	95,726	92,579	3,15	11,79
8	1194,74	1185,38	9,36	97,809	94,429	3,38	12,74
9	1200,40	1189,90	10,50	74,866	71,750	3,12	13,62
10	1184,30	1175,40	8,90	74,633	72,502	2,13	11,03
11	1196,90	1187,60	9,30	103,331	99,441	3,89	13,19
12	1199,30	1188,10	11,20	102,464	99,381	3,08	14,28
13	1203,53	1195,26	8,27	75,736	73,029	2,71	10,98
14	1192,77	1184,89	7,88	74,253	71,764	2,49	10,37
15	1220,45	1214,27	6,18	97,182	93,343	3,84	10,02
16	1218,95	1212,89	6,06	96,021	92,782	3,24	9,30

Fonte: Própria autora

área embaixo da curva no instante em que o instrumento está em uso, que representa a energia gasta pela esmerilhadeira durante o processo de lixamento. Para estimar essa área foi utilizado o Software Matlab. Além disso, foi feita uma média aritmética entre os dados das réplicas dos testes adquiridos para o cálculo da energia específica, relação G, energia por passada e energia total do lixamento. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 12 a seguir.

Os testes 3 e 4 tiveram um maior consumo de energia no processo total e por passada, enquanto os testes 15 e 16 tiveram um menor consumo. Os testes 3 e 4 foram realizados em condições mais brandas, com inclinação de 15° da esmerilhadeira e 10m/min. Já os testes 15 e 16 a inclinação era de 30° e a velocidade de passada de 15m/min. Em todos os quatro testes foram utilizados *Flap Discs Evolution*, sendo a angulação e a velocidade de passada os fatores variantes. Ao contrário do que é esperado, as condições com maior inclinação e maior velocidade de passada tiveram um menor consumo de energia total de lixamento. Os testes 13 e 14 com o

Tabela 12: Energia específica, relação G (modificada), energia média por passada e energia total do lixamento

Sequência teste	Energia específica (kJ/g)	Relação G	Energia média por passada (kJ)	Energia total do lixamento (kJ)
1;2	2,45	4,39	0,47	23,50
3;4	2,13	4,57	0,61	30,50
5;6	2,38	3,68	0,40	20,00
7;8	2,01	2,76	0,36	18,00
9;10	2,06	3,70	0,40	20,00
11;12	1,91	2,94	0,45	22,50
13;14	1,98	3,11	0,32	16,00
15;16	2,57	1,73	0,31	15,5

Fonte: Própria autora

Flap Discs Classic também tiveram um baixo consumo de energia média por passada e total do lixamento, mostrando que a influência do formato do *Flap* no recurso energia não é relevante.

A energia média por passada e energia total do lixamento está intimamente relacionada com a angulação do *Flap Disc* em relação à peça-obra e a velocidade de passada. Quanto menor a inclinação, maior a área de contato entre a ferramenta e a peça, sendo necessária uma maior quantidade de energia para realizar a operação. A velocidade de passada se relaciona com o atrito provocado pelos grãos sobre peça, quanto menor a velocidade, maior o atrito entre as superfícies de contato durante a operação e, por isso, maior a energia necessária para o lixamento.

A relação G dos testes 15 e 16 foi o menor e dos testes 3 e 4 o maior. Isso quer dizer que nos testes 15 e 16 ocorreu um desgaste maior na ferramenta que na peça a ser lixada. Condições mais extremas como angulação maior e velocidade de passada maior, favorecem um maior desgaste da ferramenta. Nesse sentido, os *Flap Discs Evolution* sofreram mais desgastes que o *Classic*. A velocidade de passada tem grande influência nesse parâmetro, já que os testes com a maior velocidade de passada (5, 6, 7, 8, 13, 14, 15, e 16) apresentaram um menor valor da relação G.

Em compensação, a energia específica dos testes 15 e 16 foi o mais alto e os testes 11 e 12 tiveram o menor valor nesse quesito. Os testes 15 e 16 apresentaram as menores quantidades de material removido durante o processo de lixamento, mostrando uma ineficiência do processo

quando comparado aos outros testes. Os testes 11 e 12 apresentaram resultados mais eficientes pois com a energia total gasta no processo foi possível remover maior porção de material. A energia específica para os testes com o *Flap Disc Classic* também apresentaram valores elevados para a angulação de 15°, mostrando que angulações maiores com o *Classic*, que apresenta a base cônica, são mais eficientes.

O cálculo dos indicadores de sustentabilidade com foco energético foi feito de acordo com as Equação 4.3 e Equação 4.4. O resultado está indicado na Tabela 13.

Tabela 13: Valores dos indicadores de sustentabilidade quanto ao recurso energético

Sequência teste	Indicador Energia@Ra ($\mu\text{m}/\text{kJ}$)	Indicador Energia@Rz ($\mu\text{m}/\text{kJ}$)
1;2	0,13	0,75
3;4	0,14	0,95
5;6	0,16	1,11
7;8	0,31	1,45
9;10	0,19	1,00
11;12	0,03	0,25
13;14	0,13	0,99
15;16	0,25	1,19

Fonte: Própria autora

Sabe-se que quanto maior o indicador de sustentabilidade, mais eficiente o cenário em relação ao recurso energético. Ou seja, menor o gasto energético para se obter um bom acabamento da peça.

Sendo assim, os testes 11 e 12 apresentaram o menor valor do indicador de recurso energético em relação à R_a e R_z , ou seja, foram os piores cenários no quesito energético. Já os 7 e 8 tiveram o maior valor para esses mesmos indicadores. Ou seja, gasta-se uma maior quantidade de energia nas condições dos testes 11 e 12 para atingir uma determinada rugosidade do que nas condições 7 e 8. Uma inclinação maior e velocidade de passada menor é menos eficiente que uma inclinação menor e velocidade de passada maior. Todos os 4 testes foram feitos com o *Flap Disc Evolution*.

Existe uma maior quantidade de testes com indicadores de recurso energético eficientes

utilizando o *Flap Disc Classic* do que o *Evolution*. Isso mostra que a ferramenta com o perfil cônico com fibra de vidro é capaz de remover uma grande quantidade de material com uma menor quantidade de energia.

5.1.2 Recurso descarte de resíduos

O cálculo do indicador referente ao descarte de resíduos foi realizado considerando as massas perdidas tanto do *Flap Disc* quanto do corpo de prova lixado. Para isso, foram feitas medições das massas antes e depois dos testes. A Tabela 11 apresenta as massas medidas antes e depois dos testes e a diferença entre elas.

O indicador de sustentabilidade referente ao desgaste de resíduo foi calculado através razão entre a rugosidade e a soma das massas perdidas do *Flap* e do corpo de prova. Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Indicadores de sustentabilidade do recurso descarte de resíduos

Sequência teste	Indicador Resíduo@Ra (µm/g)	Indicador Resíduo@Rz (µm/g)
1;2	0,26	1,50
3;4	0,24	1,66
5;6	0,30	2,08
7;8	0,45	2,14
9;10	0,31	1,62
11;12	0,05	0,41
13;14	0,19	1,48
15;16	0,40	1,95

Fonte: Própria autora

Os testes 11 e 12 apresentaram o menor valor do indicador de sustentabilidade do recurso descarte de resíduos em relação à R_a e R_z . O total de resíduo removido nesses dois testes foram relativamente alto, enquanto a variação da rugosidade antes e depois do processo foi bem baixa. Isso mostra que ocorreu uma ineficiência do processo, uma vez que houve liberação de grande quantidade de resíduo para se obter pouco resultado quanto a rugosidade. Nesses testes, foram utilizados *Flap Discs Evolution* com angulação de 30° e velocidade de passada de 10m/min.

Já os testes 7 e 8 foram os que apresentaram um maior valor para esse indicador. Foi removido uma menor quantidade de resíduo nos testes 7 e 8 do que nos testes 11 e 12, entretanto a variação da rugosidade foram uma das maiores dentre todos os testes. Isso mostra que os testes 7 e 8 foram mais eficientes, ou seja, apresentam as condições onde ocorreu pouca remoção de material com um bom acabamento da peça final.

Os testes 15 e 16 também apresentaram indicador elevado em relação à R_a e R_z . A velocidade de passada é um fator determinante nesse indicador para o *Flap Disc Evolution*, uma vez que uma elevada velocidade acarreta em uma diminuição significativa na rugosidade.

No caso dos *Flap Discs Classic*, nota-se uma pequena variação no valor do indicador. A condição dos testes 9 e 10 é mais eficiente no quesito liberação de resíduos do que os testes 13 e 14, ou seja, liberou-se menos resíduos no primeiro conjunto de testes. Uma velocidade de passada menor da ferramenta (*Classic* sobre peça faz com que a liberação de resíduos seja menor.

Os *Flap Discs Evolution*, devido à sua forma geométrica, apresetaram inicialmente uma massa maior que os *Flap Discs Classic*. Com a angulação padronizada da ferramenta sobre a peça e o próprio formato do *Flap*, observou-se que a ferramenta abrasiva com base plana ficou mais em contato com a peça-obra do que a ferramenta cônica. Isso explica o fato de que a quantidade de resíduo removido serem maiores para os testes envolvendo o *Flap Disc Evolution*.

5.1.3 Conforto do operador: nível de ruído

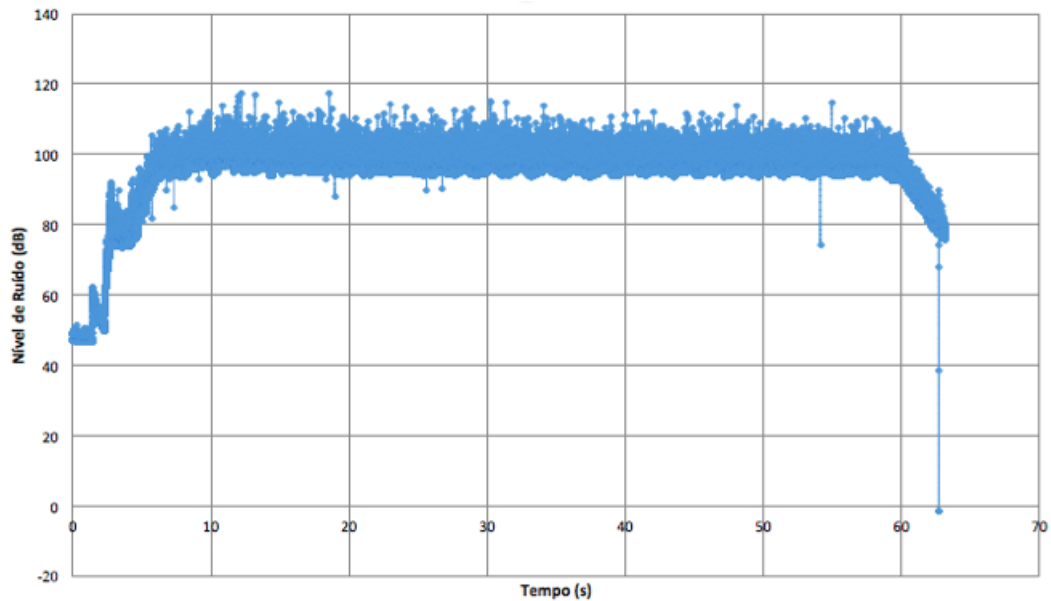
O ruído no ambiente de trabalho é o agente físico nocivo mais comum e está associada a manifestações sistêmicas como elevação da frequência cardíaca e respiratória, aceleração da frequência cardíaca e entre outros. A exposição ao ruído intenso pode ocasionar lesões nas células ciliares do órgão de Corti e causar, conseqüentemente, perda progressiva e irreversível da audição. Acúfeno ou tinnitus é outra doença associada à alta exposição à ruído intenso e é uma ilusão auditiva em que o paciente se queixa de zumbido.

A normas regulamentadora relacionada à segurança e medicina do trabalho de atividades e operações insalubre é a NR-15. Essa norma apresenta os limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente de modo que o tempo máximo de exposição diária permissível depende do nível de ruído (dB). Sendo assim, para 115 dB o tempo máximo de exposição por dia é de 7 minutos.

As curvas obtidas nos testes através do decibelímetro apresentaram o comportamento do gráfico ilustrado na Figura 37.

Nos primeiros instantes do teste é possível observar o nível de ruído do ambiente, Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS), de 47,73dB. Ao ligar a esmerilhadeira e aumentar a rotação do flap disc o nível de ruído aumenta significativamente, chegando a até 100dB. O nível de ruído durante a usinagem do corpo de prova foi de 95-98dB.

Figura 37: Nível de ruído do processo de lixamento manual com o passar do tempo



Fonte: Própria autora.

Quando atingiu 60 segundos, a esmerilhadeira foi desligada e é possível observar a queda gradativa do ruído. Sendo assim, pode-se observar que o teste obedece a norma regulamentadora NR-15. Ou seja, não haveria nenhum dano à saúde do operador supondo que a exposição ao ruído seja menos que 7 minutos.

Os valores de ruído do ambiente e ruído do processo foram obtidos através dos gráficos gerados com os dados coletados pelo decibelímetro. Todos os valores de ruído estão apresentados na Tabela 15. A variação de ruído leva em conta a diferença entre o ruído do processo e o do ambiente.

O cálculo dos indicadores de sustentabilidade foi feito utilizando a razão entre a rugosidade e a variação de ruído. Os valores encontrados estão presentes na Tabela 16.

O maior valor do indicador indica que o cenário é favorável ao operador, ou seja, menor dano à saúde auditiva. Conseguir-se um bom acabamento superficial com o menor impacto na saúde do trabalhador. Sendo assim, os testes 11 e 12, que apresentaram o menor valor do indicador de sustentabilidade referente ao nível de ruído, possui as piores condições para esse quesito. Já os testes 7 e 8 apresentaram maior valor e, portanto, é a condição mais favorável quanto à saúde do trabalhador.

Os testes com *Flap Disc Evolution* foram os que mais apresentaram ruído. Isso se deve ao fato de que essas ferramentas, com o formato reto, terem uma maior superfície de contato com o corpo-de-prova do que o *Classic*.

Tabela 15: Dados de ruído do ambiente, ruído do processo e variação do ruído obtidos a partir dos gráficos do decibelímetro

Sequência teste	Ruído ambiente (dB)	Ruído processo (dB)	ΔRuído (dB)
1	47,73	96,85	49,12
2	47,73	98,19	50,46
3	-	-	-
4	47,73	96,83	49,10
5	47,73	96,96	49,23
6	47,73	96,90	49,17
7	47,73	96,78	49,05
8	47,73	95,50	47,77
9	47,73	97,05	49,32
10	47,73	97,01	49,28
11	47,73	96,40	48,67
12	47,73	96,95	49,22
13	47,73	95,95	48,22
14	47,73	95,32	47,59
15	47,73	97,27	49,54
16	47,73	95,58	47,85

Fonte: Própria autora

5.1.4 Conforto do operador: nível de vibração

A vibração do braço e da mão causada por equipamentos pode ocasionar diversos efeitos como distúrbios vasculares, distúrbios neurológicos, efeitos no sistema locomotor e afetar o conforto e a performance do operador.

Os acelerômetros acoplados na esmerilhadeira proporcionaram a obtenção dos espectros de vibrações nas direções X e z. Depois de serem coletados pelo software Labview, os dados foram tratados pela Transformada de Fourier através do software Matlab. Sendo assim, o sinal de vibração no domínio do tempo é transformado em um sinal equivalente no domínio da frequência de modo a obter o espectro de vibrações. Esses espectros permitem relacionar as frequências com as possíveis causas, como por exemplo a vibração de um motor. Além disso, com a análise de vibração é possível observar a evolução do nível de vibração do equipamento em suas frequências características, permitindo a identificação de falha. A Figura 38 e a Figura 39

Tabela 16: Indicadores de sustentabilidade referentes ao conforto do operador quanto ao nível de ruído

Sequência teste	Indicador Ruído@Ra (µm/dB)	Indicador Ruído@Rz (µm/dB)
1;2	0,06	0,36
3;4	0,09	0,59
5;6	0,07	0,45
7;8	0,11	0,54
9;10	0,08	0,41
11;12	0,01	0,11
13;14	0,04	0,33
15;16	0,08	0,39

Fonte: Própria autora

ilustram os espectros obtidos a partir dos dados já tratados pela transformada de Fourier na direção X e Z, respectivamente.

A frequência fundamental analisada nos testes dos cenários é a relacionada com a rotação do *Flap Disc*. Sabe-se que a rotação máxima do *Flap* é de 11500rpm. Sendo assim, transformando para Hertz, temos que a frequência fundamental é de 191,667 Hz. Na Figura 38 é possível observar valores próximos à frequência fundamental, o que é esperado.

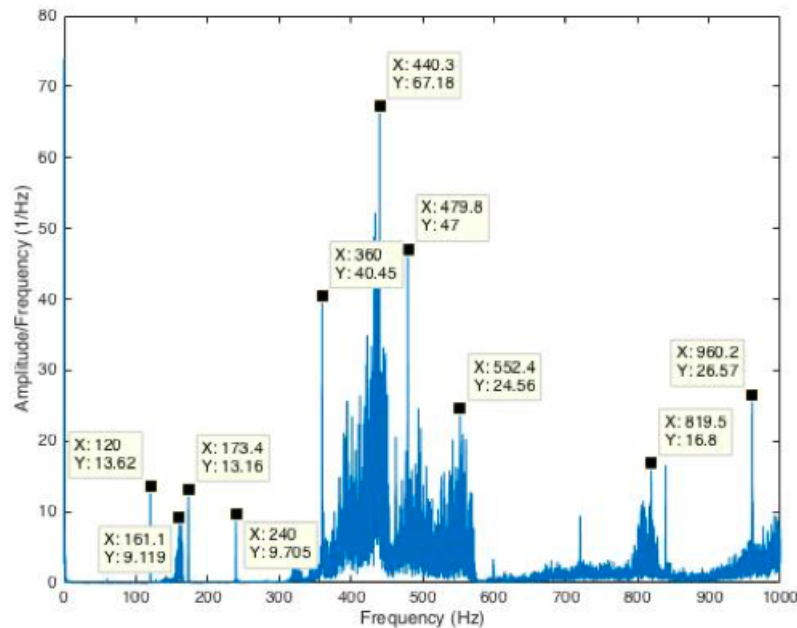
Os valores da vibração durante o processo foram obtidos através dos espectros gerados com os dados coletados pelo acelerômetro. Todos os valores de vibração estão apresentados na Tabela 17.

O cálculo dos indicadores de sustentabilidade em relação à vibração foi feito utilizando a razão entre a rugosidade e a variação de vibração. Os valores encontrados estão presentes na Tabela 18.

Nota-se que assim como nos outros indicadores os testes 11 e 12 apresentaram menor valor enquanto os testes 7 e 8 apresentaram um valor elevado. A vibração nos testes 7 e 8 foram superiores quando comparados aos testes 11 e 12. Entretanto, apesar da vibração ser maior obteve-se uma maior variação de rugosidade.

O maior valor do indicador indica a condição em que se obteve um melhor acabamento

Figura 38: Espectros de vibração na direção X



Fonte: Própria autora.

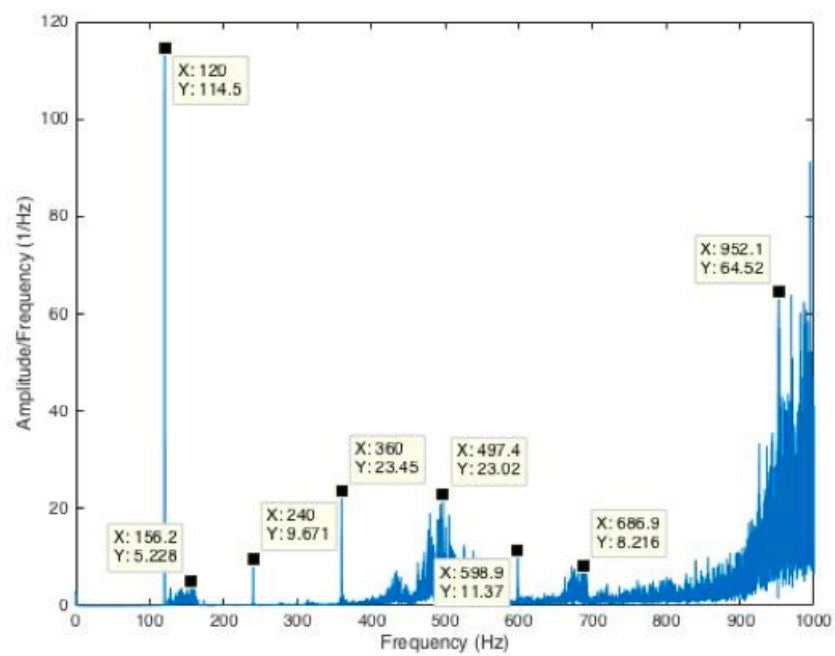
superficial da peça com um menor nível de vibração e, portanto, menor impacto na saúde do operador. Sendo assim, os testes 7 e 8 com o *Flap Disc Evolution*, e os testes 9 e 10 com o *Flap Disc Classic* foram os mais sustentáveis nesse quesito.

Os menores valores dos indicadores estão concentrados nos testes 11, 12, 13 e 14, onde a angulação da ferramenta é de 30°. Essa angulação não permite uma grande interação entre a ferramenta e a peça o que reduz a variação da rugosidade.

O *Flap Disc Evolution* é o mais eficiente quando se refere ao nível de vibração da esmerilhadeira para se obter um determinado acabamento superficial. A maior superfície de contato entre a ferramenta de desbaste e o cordão de solda acarretam em um nível de vibração alto que é compensado pela variação da rugosidade que os grãos proporcionam. O resumo dos principais resultados dos testes está ilustrado na Tabela 19.

Nota-se que para as condições de teste com inclinação de 15° e velocidade de passada de 15m/min o *Flap Disc Evolution* é mais sustentável nos quesitos econômico, social e ambiental. Já para as condições com inclinação de 30° e velocidade de passada de 10m/min, o *Flap Disc Classic* se mostra mais eficiente.

Figura 39: Espectros de vibração na direção Z



Fonte: Própria autora.

Tabela 17: Dados de vibração coletados pelo acelerômetro

Sequência teste	Vibração Ociosa (g)	Vibração Usinagem (g)	Δ Vibração (m/s ²)
1	0	4,86	47,63
2	0	4,91	48,13
3	-	-	-
4	0	5,22	51,23
5	0	4,19	41,12
6	0	5,26	51,60
7	0	4,24	41,61
8	0	5,69	55,79
9	0	4,67	45,84
10	0	4,26	41,80
11	0	4,51	44,20
12	0	3,93	38,54
13	0	5,15	50,49
14	0	5,38	52,78
15	0	4,80	47,06
16	0	5,25	51,51

Fonte: Própria autora

Tabela 18: Indicadores de sustentabilidade referentes ao conforto do operador quanto ao nível de vibração

Sequência teste	Indicador Vibração@Ra ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{s}^2$)	Indicador Vibração@Rz ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{s}^2$)
1;2	0,06	0,37
3;4	0,08	0,57
5;6	0,07	0,48
7;8	0,11	0,54
9;10	0,09	0,46
11;12	0,02	0,13
13;14	0,04	0,31
15;16	0,08	0,38

Fonte: Própria autora

Tabela 19: Resumo dos principais resultados

Indicador de sustentabilidade	Inclinação 15° e velocidade de passada de 15m/min		Inclinação 30° e velocidade de passada de 10m/min	
	Flap Disc Evolution	Flap Disc Classic	Flap Disc Evolution	Flap Disc Classic
Energia ($\mu\text{m}/\text{kJ}$)	0,31	0,16	0,03	0,19
Descarte de resíduo ($\mu\text{m}/\text{g}$)	0,45	0,30	0,05	0,31
Nível de ruído ($\mu\text{m}/\text{dB}$)	0,11	0,07	0,01	0,08
Nível de vibração ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{s}^2$)	0,11	0,07	0,02	0,09

*Considerando a rugosidade média Ra

Fonte: Própria autora

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O lixamento manual é uma operação que apresenta diversos fatores que interferem diretamente no acabamento da peça. Dentre esses fatores, tem-se que a composição dos grãos, o costado e o adesivo dos *Flap Discs* influenciam diretamente na qualidade do acabamento. Já a força aplicada, o perfil do *Flap Disc*, a inclinação da esmerilhadeira e a velocidade de passada da ferramenta sobre a peça provocam a variação na quantidade de material desbastado. Sendo assim, a bancada de teste projetada pelo aluno João Marcos Guido e Marco Aurélio Mijan se mostrou bastante promissora uma vez que proporcionou a padronização dos parâmetros de corte e a automatização da esmerilhadeira, além de facilitar a análise do processo.

Os indicadores de sustentabilidade auxiliam na análise dos cenários. Quanto maior o valor do indicador, mais sustentável é aquele cenário quanto ao quesito ambiental, social ou econômico. Comparando todos os dados coletados, tem-se que os testes 7 e 8 foram os mais sustentáveis nos quesitos eficiência energética, geração de resíduo sólido e conforto do operador, tanto no nível de ruído quanto no nível de vibração. Esse fato se deve principalmente ao perfil reto da ferramenta que permitiu maior contato do *Flap* com o cordão de solda e, conseqüentemente, essa maior interação proporcionou em uma maior variação da rugosidade que refletiu nos indicadores.

Outros parâmetros como a angulação da ferramenta em relação à peça-obra e velocidade de passada do *Flap* sobre o corpo de prova também contribuíram para que esse cenário fosse o mais sustentável. A inclinação de 15° da esmerilhadeira aumentou a área de contato da peça com o *Flap*, fazendo com que uma maior porção de grãos atuem no processo, o que aumentou a variação da rugosidade. Já a velocidade de passada de 15m/min acarreta em uma menor interação e, portanto, menor quantidade de energia é necessária para o processo e menor quantidade de resíduos sólidos é gerado. Essa combinação de fatores fazem com as condições dos testes 7 e 8 sejam os mais eficientes.

Os *Flap Discs Evolution* são mais sustentáveis quando comparados aos *Flap Discs Classic* nos âmbitos ambiental, econômico e social. Isso se deve principalmente ao perfil reto do *Evolution* que permite maior interação ferramenta-peça e, conseqüentemente, maiores alterações no acabamento final.

Quanto ao conforto da operação em relação ao nível de ruído e vibração é importante levar em consideração restrições impostas pelas normas para evitar doenças que prejudiquem o operador.

O próximo passo seria a realização de novos testes analisando condições diferentes do *Flap Disc*, como granulometria e tipo de grão. Desse modo, seria possível verificar qual o tipo de ferramenta mais eficiente nos quesitos ambiental, social e econômico, além das condições do processamento (angulação da esmerilhadeira e velocidade de passada da ferramenta) já estudadas

nesse trabalho.<https://www.overleaf.com/project/5cdd738777d61b6561f20fc1>

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tarifa Média por Classe de Consumo e por Região**. 2018. Disponível em: <http://relatorios.aneel.gov.br/_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSAMPRegiaoEmp.xlsx&Source=http%3A%2F%2Frelatorios%2Eaneel%2Egov%2Ebr%2FRelatoriosSAS%2FForms%2FAIItems%2Easpx&DefaultItemOpen=1>. Acesso em: 01 set. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15230**: Ferramentas abrasivas — uso, manuseio, segurança, classificação e padronização. Rio de Janeiro, 2016. 21-24 p.
- AURICH, J. et al. Sustainability of abrasive processes. **CIRP Annals**, Elsevier, v. 62, n. 2, p. 653–672, 2013.
- BELL, S.; MORSE, S. **Sustainability indicators: measuring the immeasurable?** [S.l.]: Routledge, 2012.
- BOSCH. **Produtos**. 2019. Disponível em: <<https://www.bosch-professional.com/br/pt/products/>>. Acesso em: 24 abr. 2019.
- BRUNDTLAND, G. H. et al. Our common future. **New York**, 1987.
- CARBÓ, H. M. Aços inoxidáveis: aplicações e especificações. **São Paulo: ArcelorMittal Inox Brasil**, 2008.
- CARMO, J. M. G. A sustentabilidade para o processo de lixamento manual com a utilização de *Flap Discs*. São Carlos, 2017.
- CENTRO TECNOLÓGICO DO MOBILIÁRIO. **Preparação de Superfícies para Acabamento**. 2007.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **CHES - Crise Hídrica**: Estratégia e soluções da sabesp para a região metropolitana de São Paulo. 2015. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/crisehidrica/ches_crise_hidrica.pdf>. Acesso em: 01 set. 2019.
- DUFLOU, J. R. et al. Critical comparison of methods to determine the energy input for discrete manufacturing processes. **CIRP Annals**, Elsevier, v. 61, n. 1, p. 63–66, 2012.
- ELKINGTON, J. Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business. **Environmental quality management**, Wiley Online Library, v. 8, n. 1, p. 37–51, 1998.
- FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. v. 1. **SP: Editora Edgard Blücher Ltda**, 1995.
- FERREIRA, P. M. F. Investigação da tecnologia de infravermelho para cura de resinas fenólicas. **Universidade de Aveiro**, 2008.
- FIGUEIREDO, K. M. d. et al. Mapeamento dos modos de transferência metálica na soldagem mig de alumínio. Universidade Federal de Uberlândia, 2002.

GRAEDEL, T.; ALLENBY, B.; COMRI, P. Matrix approaches to abridged life cycle assessment. **Environmental Science & Technology**, ACS Publications, v. 29, n. 3, p. 134A–139A, 1995.

KLINGSPOR. **Discos Flap**. 2019. Disponível em: <<https://www.klingspor.de/pt-br/produtos/anwendung/schleifmopteller>>. Acesso em: 29 set. 2019.

LINKE, B. et al. Sustainability indicators for finishing operations based on process performance and part quality. **Procedia CIRP**, Elsevier, v. 14, p. 564–569, 2014.

MCKENZIE, S. Social sustainability: towards some definitions. Hawke Research Institute, University of South Australia Magill, 2004.

MONTAGNA. **Discos de corte**. 2019. Disponível em: <<https://montagna.com.br/discos-de-corte/>>. Acesso em: 24 abr. 2019.

MÓBILE FORNECEDORES. **Novidades em Abrasivos: Mercado - abrasivos**. 2011.

NUSSBAUM, G. C. **Rebolos & abrasivos: tecnologia básica**. [S.l.]: Ícone, 1988.

NÚCLEO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS DE ENERGIA, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira: Exercício – 2018**. 2019. 32 p. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+-+edi%C3%A7%C3%A3o+2019+v2.pdf/66a837a8-4164-4b37-be4a-59a5ad270c50?version=1.0>>. Acesso em: 01 set. 2019.

PFERD. Cut-off wheels, flap discs and grinding wheels. **Caralogue 6**, 2019. Disponível em: <<https://www.pferd.com/int-en/service/tool-manual/>>. Acesso em: 27 abr. 2019.

PROMAQUINA. **Tecnologia em abrasivos e polimentos: Conceitos gerais**. 2019. Disponível em: <<http://www.promaquina-abrasivos.com.br/a-Conceitos%20Gerais.html>>. Acesso em: 29 set. 2019.

RODRIGUEZ, R. et al. Formação de óxido de alumínio na aspensão térmica. **CBCiMat, São Pedro, SP**, 2001.

SAINT GOBAIN. **Discos de desbaste**. 2016. Disponível em: <<https://www.nortonabrasives.com/pt-br/discos-de-desbaste>>. Acesso em: 29 set. 2019.

SAINT-GOBAIN ABRASIVOS BRASIL. **Nossos Produtos**. 2019. Disponível em: <<https://www.saint-gobain-abrasives.com/pt-br/produtos>>. Acesso em: 24 abr. 2019.

SALING, P. et al. Eco-efficiency analysis by basf: the method. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Springer, v. 7, n. 4, p. 203–218, 2002.

SILVA, G. C. d. et al. Estudo da substituição do nylon por compósito de polipropileno com fibra de vidro. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 24, n. 3, 2019.

SILVA, R. H. G. et al. Soldagem mig/mag em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz. Florianópolis, SC, 2005.

SINGH, R. K. et al. An overview of sustainability assessment methodologies. **Ecological indicators**, Elsevier, v. 15, n. 1, p. 281–299, 2012.

SOUZA, A. J. d. Processos de fabricação por usinagem parte 1. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 2011.

STOETERAU, E. R. L. Fundamentos dos processos de usinagem. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Notas de Aula**, 2003.

STOETERAU, R. L. Introdução ao projeto de máquina-ferramentas modernas. **Universidade Federal de Santa Catarina**, 2004.

UNIVERSIDADE DE VENDAS SAINT-GOBAIN ABRASIVOS. **Lixas**. 2016.

VENSON, I. Processos de corte em madeiras: Abrasivos. Universidade Federal do Paraná, 2016.