UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

REMO AUGUSTO PADOVEZI FILLETI

Modelo dinâmico de inventário de ciclo de vida (ICV) de processo unitário discreto de manufatura: um estudo de caso com retificação cilíndrica externa.

São Carlos

REMO AUGUSTO PADOVEZI FILLETI

Modelo dinâmico de inventário de ciclo de vida (ICV) de processo unitário discreto de manufatura: um estudo de caso com retificação cilíndrica externa.

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Processos e Gestão de Operações.

Orientador:

Prof. Dr. Eraldo Jannone da Silva.

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.

F485m

Filleti, Remo Augusto Padovezi

Modelo dinâmico de inventário de ciclo de vida (ICV) de processo unitário discreto de manufatura: um estudo de caso com retificação cilíndrica externa. / Remo Augusto Padovezi Filleti; orientador Eraldo Jannone da Silva. São Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Processos e Gestão de Operações -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. ICV. 2. UPLCI. 3. ACV. 4. Retificação. 5. MTConnect. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro REMO AUGUSTO PADOVEZI FILLETI.

Título da dissertação: "Modelo dinâmico de inventário de ciclo de vida (ICV) de processo unitário discreto de manufatura: um estudo de caso com retificação cilíndrica externa".

Data da defesa: 20/07/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADO

Prof. Titular Reginaldo Teixeira Coelho (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC) Aprovado

Prof. Dr. Milton Vieira Junior (Universidade Nove de Julho/UNINOVE)

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção: Profa. Associada Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto

Presidente da Comissão de Pós-Graduação: Prof. Associado Paulo César Lima Segantine

| À minha amada família, com extrem | na gratidão pelo grande apoio e compreensão às minhas escolhas. |
|-----------------------------------|---|
| | |
| | |
| | |

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Eraldo Jannone da Silva pela oportunidade, orientação e apoio durante os trabalhos desenvolvidos para a concretização dessa dissertação mestrado.

Ao Professor Aldo Roberto Ometto pelo apoio e auxílio durante a realização dos trabalhos e projetos de pesquisa.

Aos Professores Reginaldo Teixeira Coelho e Milton Vieira Jr. pelas recomendações e sugestões na finalização desse trabalho.

Ao Téc. Adolfo pelo apoio durante os trabalhos no laboratório.

Ao futuro engenheiro Marcelo Cassani e aos futuros doutores Diogo Aparecido Lopes Silva e Alex Camilli Bottene pela parceria e ajuda nos trabalhos de pesquisa realizados durante o mestrado.

À Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP e ao Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade – LAPRAS pelo suporte físico, educacional e apoio à pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo suporte financeiro à pesquisa.

À Sueli, Jéssica, Juliana, Talita e às demais funcionárias da secretaria do Departamento de Engenharia de Produção da Escola de Engenharia de São Carlos pelo apoio e paciência às minhas infindáveis dúvidas.

Aos amigos brasileiros do LAPRAS, Cleiton, Claudia, Arai, André, Gustavo, Franco, Rodrigo, Jonathan e Dhiego; e aos amigos alemães Alex e Lucas; pela convivência durante esses anos.

A República Demorô e todos os seus moradores por terem me acolhido durante os anos do mestrado.

E por fim, à Fundação Estudar e ao Laboratório Estudar pelo incentivo na busca por novos desafios que resultaram na minha volta ao mundo acadêmico.

"O homem que volta ao mesmo rio, nem o rio é o mesmo rio, nem o homem é o mesmo homem."

Heráclito de Éfeso

FILLETI, R. A. P. Modelo dinâmico de inventário de ciclo de vida (ICV) de processo unitário discreto de manufatura: um estudo de caso com retificação cilíndrica externa. 2015. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

RESUMO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se destaca como uma ferramenta de grande relevância na identificação dos impactos ambientais potenciais de um processo ou produto. Apesar disso, a ACV apresenta grandes limitações na avaliação de processos de manufatura discreta, devido à falta ou à incerteza nos dados adquiridos na fase de Inventário de Ciclo de Vida (ICV). O objetivo do presente trabalho foi propor e implementar um modelo dinâmico de execução da fase de ICV para uma unidade de processamento de manufatura discreta (ou processo unitário discreto de manufatura), com o intuito de reduzir as limitações referentes à falta e à incerteza dos dados de ICV. O modelo proposto baseou-se na metodologia Unit Process Life Cycle Inventory (UPLCI) e usou um sistema de monitoramento em tempo real compatível com o protocolo de comunicação MTConnect[®]. A implementação do modelo proposto foi feita em uma unidade de processamento de retificação cilíndrica externa, na qual os fluxos de energia elétrica, ar comprimido e emissão de ruído sonoro foram monitorados em tempo real. Além disso, seis modos de operação de corte foram definidos e testados. Três destes modos usaram rebolo de Al₂O₃ e trabalharam com taxas específicas de remoção (Q'_w) iguais a 10, 50 e 100 mm/mm³.min. Outros três modos de operação usaram rebolo de cBN e tiveram valores de Q'w iguais a 50, 100 e 150 mm/mm³.min. Cada modo de operação de corte foi testado duas vezes, totalizando 12 testes. Cada teste consistia na remoção de 3000 mm³ de material de peças cilíndricas feitas com a liga de níquel e cromo, o Inconel 751. A partir dos dados encontrados na fase de ICV, um estudo de ACV com abordagem gate-to-gate foi realizado para a avaliação do desempenho ambiental dos seis modos de operação de corte. Além disso, itens de desempenho de produção (como tempo de processo, relação G, rugosidade e circularidade) também foram avaliados para os seis modos de operação de corte. Os dados obtidos na fase de ICV mostraram que os modos de operação com o rebolo de cBN apresentaram valores de potência até 30% superiores aos modos de operação com rebolo de Al₂O₃ com as mesmas taxas específicas de remoção (Q'w). A avaliação de desempenho de produção mostrou grande superioridade do rebolo de cBN, que atingiu o menor de tempo de processo (com Q'w = 150 mm/mm³.min), valores de relação G até 40 vezes superiores aos encontrados para o rebolo de Al₂O₃, além de maior estabilidade e resultados melhores nos quesitos de rugosidade e circularidade. Na avaliação de desempenho ambiental, o modo de operação com rebolo de cBN e Q'_w = 150 mm/mm³.min apresentou os melhores resultados em todos os indicadores de impactos ambientais avaliados. A partir da aplicação do modelo proposto pelo presente trabalho, foi possível criar um banco de dados de ICV organizado e em tempo real, fundamental para a realização das avaliações de desempenho ambiental e de produção. Além disso, foi possível determinar que o modo de operação com rebolo de cBN e Q'_w = 150 mm/mm³.min apresentou a melhor relação entre desempenho de produção e desempenho ambiental dentre os seis modos testados.

Palavras-chave: ICV, UPLCI, ACV, Retificação, MTConnect

FILLETI, R. A. P. Dynamic life cycle inventory (LCI) model of discrete manufacturing unit process: a case study for external cylindrical grinding machine. 2015. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) is one of the most prominent tools to identify the potential environmental impacts of a process or product. The LCA, however, has great limitations on the assessment of discrete manufacturing processes, due the lack or the uncertainty of the data acquired during its Life Cycle Inventory phase (LCI). The objective of this work was to propose and to implement a dynamic model to perform the LCI phase for a discrete manufacturing unit process, in order to minimize the limitations associated with the lack and uncertainty of the LCI data. The proposed model was based on the Unit Process Life Cycle Inventory (UPLCI) methodology and used a real time MTConnect® compliant monitoring system. The implementation of the proposed model was executed on an external cylindrical grinding unit process, which had its energy, compressed air and noise emission flows monitored in a real time basis. Besides that, six cutting operational modes were defined and tested. Three of the cutting modes used a corundum grinding wheel and worked with specific removal rates Q'w equals to 10, 50 and 100 mm/mm³.min. The other three modes used a cBN grinding wheel and worked with Q'w equals to 50, 100 and 150 mm/mm³.min. Each cutting mode was tested twice, resulting in 12 tests. Each test consisted on the volume of removed material of 3000 mm³ from nickel-chrome alloy, the Inconel 751, cylindrical workpieces. From the LCI results, a LCA study was performed, using a gate-to-gate approach, to evaluate the environmental performance of the six cutting modes. Production performance items (process time, G-ratio, roughness and roundness) were also evaluated for the six cutting modes. The LCI data showed that the cBN wheel cutting modes presented power values 30% higher that the corundum wheel cutting modes with the same Q'w specifications. The production performance evaluation showed the superiority of the cBN grinding wheel, which achieved the lowest process time (with Q'w = 150 mm/mm³*min), presented G-ratio values 40 times higher than the corundum wheel cutting modes and higher stability and best results for roughness and roundness. On the environmental performance evaluation, the cutting mode using cBN grinding wheel and Q'w = 150 mm/mm³.min presented the best results for all the potential environmental impacts indicators. From the application of the model proposed by this work, it was possible the creation of an organized and real time LCI database, used to perform both environmental and production performance evaluations. Besides, it was possible to decide that the cBN wheel cutting mode with Q'w = 150 mm/mm³.min presented the best tradeoff between environmental and production performances among the six tested cutting modes.

Keywords: LCI, UPLCI, LCA, Grinding, MTConnect

LISTA DE FIGURAS

| Figura 2.1 – Pilares da sustentabilidade. Adaptado – HAUSCHILD, JESWIET e ALTINGA, |
|--|
| 2005 |
| Figura 2.2 - Representação do Ciclo de Vida. Adaptado - HAUSCHILD, JESWIET e |
| ALTING, 2005 |
| Figura 2.3 - Fases de uma ACV. Fonte – ABNT, 2009a16 |
| Figura 2.4 – Unidade de processamento. Adaptado – Li et al., 201223 |
| Figura 2.5 – Fluxograma completo UPLCI. Adaptado: KELLENS et al., 2011a26 |
| Figura 2.6 – UPLCI – Modelo do sistema. Adaptado - KELLENS et al., 2011a27 |
| Figura 2.7 – Abordagem aprofundada. Adaptado: KELLENS et al., 2011a |
| Figura 2.8 – Exemplos de análise com o uso das escalas temporais. Adaptado: |
| VIJAYARAGHAVAN et al., 2013 |
| Figura 2.9 – Arquiteturas para a implementação do padrão MTConnect®. Fonte – Rondon, |
| 201035 |
| Figura 2.10 – Geometria e cinemática da retificação cilíndrica externa de mergulho. Adaptado |
| - MALKIN E GUO, 2008b |
| Figura 3.1 – Entradas e saídas da unidade de processamento de retificação |
| Figura 3.2 - Unidade de retificação CNC ZEMA Numérika G 800-HS |
| Figura 3.3 – Estrutura de aquisição, comunicação, organização e armazenamento dos dados, |
| baseado no padrão MTConnect®. Adaptado – FILLETI et al., 2014 |
| Figura 4.1 – Exemplo de perfil de desgaste do rebolo. |
| Figura 3.5 – Modelo ambiental da unidade de processamento de retificação cilíndrica externa. |
| 63 |

LISTA DE GRÁFICOS

| Gráfico 1.1 - Histórico de Emissões de Carbono. Adaptado - BODEN, MAI | RLAND e |
|---|--------------|
| ANDRES, 2013 | 2 |
| Gráfico 2.1 – Variação da Temperatura Média Global sobre o Continente e o Oceano. | . Adaptado |
| - U.S. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2015 | 9 |
| Gráfico 2.2 – Nível de risco adicional devido à mudança climática. Fonte – FIELD e | t al., 2014. |
| | 10 |
| Gráfico 2.3 – Pegada Ecológica Terrestre. Adaptado – GLOBAL FOOTPRINT NE | ETWORK, |
| 2015 | 12 |
| Gráfico 4.1 – Estudo de potência dividido por subunidades | 68 |
| Gráfico 4.2 – Estudo de consumo de ar comprimido. | 71 |
| Gráfico 4.3 – Estudo de emissão sonora. | 74 |
| Gráfico 4.4 – Relação G para retificação com rebolo de cBN e Al ₂ O ₃ | 77 |
| Gráfico 4.5 – Resultados de rugosidade R _a . | 79 |
| Gráfico 4.6 – Resultados de rugosidade Rz. | 79 |
| Gráfico 4.7 – Resultados de rugosidade R _t . | 80 |
| Gráfico 4.8 – Resultados de circularidade RON _p . | 80 |
| Gráfico 4.9 – Resultados de circularidade RON _v . | 81 |
| Gráfico 4.10 – Resultados de circularidade RON _t . | 81 |
| Gráfico 4.11 – Potencial de Aquecimento Global. | 83 |
| Gráfico 4.12 – Potencial de Acidificação. | 83 |
| Gráfico 4.13 – Potencial de Eutrofização. | 83 |
| Gráfico 4.14 – Potencial de Esgotamento da Camada de Ozônio. | 84 |
| Gráfico 4.15 – Potencial de Oxidação Fotoquímica (NO _x Alto). | 85 |
| Gráfico 4.16 – Potencial de Oxidação Fotoquímica (NO _x Baixo) | 85 |
| Gráfico 4.17 – Ecotoxidade Crônica do Solo. | 86 |
| Gráfico 4.18 – Ecotoxidade Crônica da Água. | 86 |
| Gráfico 4.19 – Ecotoxidade Aguda da Água. | 86 |
| Gráfico 4.20 – Toxidade Humana no Solo. | 87 |
| Gráfico 4.21 – Toxidade Humana na Água. | 87 |
| Gráfico 4.22 – Toxidade Humana no Ar | 88 |

LISTA DE TABELAS

| Tabela 1.1 – Estruturação temática do trabalho | 7 |
|--|------|
| Tabela 2.1 - Modos de operação de uma unidade de processamento. Fonte - KELLENS et | al., |
| 2011a | .30 |
| Tabela 3.1 – Parâmetros de retificação para os rebolos de cBN e Al ₂ O ₃ | 49 |
| Tabela 3.2 – Limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente. | .59 |
| Tabela 3.3 – Características gerais para cada mergulho | 61 |
| Tabela 3.4 – Composição da mistura usada para fluido de corte. | 62 |
| Tabela 3.5 – Categorias de impacto. | 65 |
| Tabela 4.1 – Estudo de tempo dos modos de operação. | 66 |
| Tabela 4.2 – Registro de atividades do mapeamento de potência | 67 |
| Tabela 4.3 – Potência média dos modos ativos de operação | 69 |
| Tabela 4.4 – Resultados do estudo de potência dos modos de operação | .70 |
| Tabela 4.5 – Resultados do estudo de vazão de ar comprimido dos modos de operação | .72 |
| Tabela 4.6 – Cálculo do volume de rebolo desgastado V_{s} para cada modo ativo de operação | da |
| máquina | .73 |
| Tabela 4.7 – Cálculo da energia incorporada no rebolo para cada modo ativo de operação | da |
| máquina | .73 |
| Tabela 4.8 – Dados de ICV dos modos ativos conforme o fluxo de referência | .75 |
| Tabela 4.9 – Dados de ICV dos modos ativos conforme a unidade funcional | .75 |

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC Ar Comprimido

ACV Avaliação de Ciclo de Vida

AICV Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida

Al₂O₃ Q'_w10 Modo de operação de corte com rebolo de óxido de alumínio e taxa

específica de remoção de material igual a 10 mm³/mm*s

Al₂O₃_Q'_w50 Modo de operação de corte com rebolo de óxido de alumínio e taxa

específica de remoção de material igual a 50 mm³/mm*s

Al₂O₃ Q'_w100 Modo de operação de corte com rebolo de óxido de alumínio e taxa

específica de remoção de material igual a 100 mm³/mm*s

AMT Association for Manufacturing Technology (em português: Associação

para Tecnologia Manufatureira)

cBN *Cubic Boron Nitride* (em português: Nitreto cúbico de Boro)

cBN Q'w50 Modo de operação de corte com rebolo de cBN e taxa específica de

remoção de material igual a 50 mm³/mm*s

cBN_Q'w100 Modo de operação de corte com rebolo de cBN e taxa específica de

remoção de material igual a 100 mm³/mm*s

cBN_Q'w150 Modo de operação de corte com rebolo de cBN e taxa específica de

remoção de material igual a 150 mm³/mm*s

CLP Controlador Lógico Programável

CNC Comando Numérico Computadorizado

CNI Confederação Nacional da Indústria

CO2PE Cooperative Effort on Process Emissions in Manufacturing (em

português: Esforço Cooperativo em Emissões de Processos na

Manufatura)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (em português: Instituto Alemão

para Normatização)

EDIP Environmental Development of Industrial Products (em português:

Desenvolvimento Ambiental de Produtos Industriais)

EESC Escola de Engenharia de São Carlos

EMS Energy Management System (em português: Sistema de

Gerenciamento de Energia)

EU European Union (em português: União Europeia)

GM Green Manufacturing (em português: Manufatura Verde)

HTML Hypertext Mark-up Language (em português: Linguagem de Marcação

Hipertexto)

ICV Avaliação de Inventário de Ciclo de Vida

IPCC Intergovernamental Panel of Climate Changes (em português: Painel

Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

ISO International Organization for Standardization (em português:

Organização Internacional para Padronização)

LAPRAS Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade

NBR Norma Brasileira

NOAA *U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration* (em português:

Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos)

ONU Organização das Nações Unidas

OPC Object Linking and Embedding for Process Control (em português:

Vinculação e Incorporação de Objetos para Controle de Processo)

PIB Produto Interno Bruto

RA Compressor da subunidade de resfriamento ativo (Resfriamento Ativo)

SE Subunidade de exaustão

SF Subunidade de aplicação do fluido de corte

SGML Standard Generalized Markup Language (em português: Linguagem

Padrão Generalizada de Marcação)

SH Subunidade hidráulica

SP Subunidade primária

SR Subunidade de resfriamento

SS Subunidade de acionamento do rebolo

TCP/IP Transmission Control Protocol / Internet Protocol (em português:

Protocolo de Controle de Transmissão / Protocolo de Internet).

UPLCI Unit Process Life Cycle Inventory (em português: Inventário de Ciclo

de Vida de Unidade de Processamento)

UPR Undulations per Revolution (em português: Ondulações por

Revolução)

USP Universidade de São Paulo

WBCSD World Business Council for Sustainable Development (em português:

Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável)

XML Extensible Mark-up Language (em português: Linguagem de Marcação

Extensível)

LISTA DE SÍMBOLOS

 $\Delta_{\rm d}$ Desgaste diametral do rebolo [µm]

ρ_{cBN} Massa específica do cBN [g/cm³]

μ_g Quantidade de abrasivo por volume do rebolo [g/cm³]

ad Profundidade de dressagem [µm]

ae Profundidade de corte [µm]

b_w Largura de usinagem [mm]

ds Diâmetro do rebolo [mm]

d_w Diâmetro da peça [mm]

G Relação G [-]

h_{eq} Espessura equivalente de corte [μm]

k Subunidade ativa [-]

lc Comprimento de contato [mm]

m Todas as outras subunidades da unidade de processamento [-]

m_{st} Massa total de abrasivo no rebolo [g]

n Número inteiro (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7...) correspondente à grade do rebolo (E, F, G,

H, I, J, K...) [-]

P_{global} Potência total do sistema [W]

Pi Potência da subunidade analisada [W]

P_k Potência média da subunidade k [W]

q_d Taxa de velocidade entre o dressador e o rebolo [-]

Q'w Taxa específica de remoção de material [mm³/mm*s]

R_a Rugosidade média aritmética [μm]

RON_p Desvio de circularidade entre o pico da amostra e a curva de referência [µm]

RON_v Desvio de circularidade entre o vale da amostra e a curva de referência [µm]

RON_t Desvio de circularidade entre o maior pico e o maior vale da amostra [µm]

R_t Distância vertical de rugosidade entre o maior pico e o maior vale [µm]

R_z Distância média entre os cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos,

dentro a amostra medida [µm]

S Número da estrutura do rebolo [-]

S_d Passo de dressagem [mm/rot]

U_d Grau de recobrimento [-]

v_d Velocidade do disco dressador [m/s]

v_f Velocidade de avanço radial [mm/min]

V_{gAl203} Composição volumétrica de grão abrasivo do rebolo de óxido de alumínio [%]

V_{gcBN} Composição volumétrica de grão abrasivo do rebolo de cBN [%]

V_{gt} Volume total de abrasivo no rebolo [cm³]

V_p Porcentagem em volume de poros [%]

Vs Volume de rebolo desgastado [mm³]

V_{st} Volume total do rebolo [cm³]

v_s Velocidade de corte [m/s]

vt Velocidade da dressagem [mm/min]

V_w Volume de material removido da peça [mm³]

v_w Velocidade periférica da peça [m/min]

z_d Número de passes [-]

SUMÁRIO

| 1 11 | NIRODUÇAO, JUSIIFICATIVA E OBJETIVOS | I |
|-------|---|---------|
| 1.1 | Introdução | 1 |
| 1.2 | Objetivos | 5 |
| 1.3 | Justificativa e relevância do tema | 5 |
| 1.4 | Distribuição temática e estrutura do trabalho | 6 |
| 2 R | EFERENCIAL TEÓRICO | 8 |
| 2.1 | Green Manufacturing | 8 |
| 2.1.1 | Contexto | 8 |
| 2.1.2 | Definição e aplicação do GM | 11 |
| 2.2 | Avaliação de Ciclo de Vida - ACV | 14 |
| 2.2.1 | Fase I - Definição de objetivo e escopo | 16 |
| 2.2.2 | Fase II - Inventário de Ciclo de Vida - ICV | 19 |
| 2.2.3 | Fase III - Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida - AICV | 21 |
| 2.2.4 | Fase IV - Interpretação do Ciclo de Vida | 22 |
| 2.3 | Metodologias de ICV para unidades de processamento | 23 |
| 2.3.1 | Metodologia UPLCI | 25 |
| 2.3.2 | UPLCI - Definição de objetivo e escopo | 26 |
| 2.3.3 | UPLCI - Análise de Inventário de Ciclo de Vida e Interpretação | 28 |
| 2.4 | Sistemas de monitoramento para coleta de dados de processos de manufatura | 31 |
| 2.4.1 | Aquisição de dados in loco na máquina-ferramenta | 31 |
| 2.4.2 | Protocolo MTConnect® | 33 |
| 2.5 | Processo de retificação cilíndrica externa de mergulho: definições, aspectos ambier | itais e |
| opor | tunidades de melhoria de desempenho | 36 |
| 2.5.1 | Definição, parâmetros e estrutura | 36 |
| 2.5.2 | Aspectos ambientais do processo | 38 |
| 2.5.3 | As possibilidades do processo na melhoria do ciclo de vida do produto | 43 |
| 3 M | IATERIAIS E MÉTODOS | 45 |
| 3.1 | Função, unidade funcional e fluxo de referência | 45 |
| 3.2 | Fronteiras do sistema | 46 |
| 3.3 | Análise da máquina | 47 |

| 3.4 | Modos de operação | . 49 |
|-------|--|------|
| 3.5 | Inventário de Ciclo de Vida: abordagem in-depth | . 51 |
| 3.5.1 | Organização e aquisição dos dados | . 51 |
| 3.5.2 | Estudo de tempo | . 53 |
| 3.5.3 | Estudo de potência | . 54 |
| 3.5.4 | Estudo de consumíveis e emissões – Ar comprimido | . 54 |
| 3.5.5 | Estudo de consumíveis e emissões – Fluido de corte | . 55 |
| 3.5.6 | Estudo de consumíveis e emissões – Rebolo | . 55 |
| 3.5.7 | Estudo de emissões – Emissão sonora | . 59 |
| 3.5.8 | Considerações finais | . 60 |
| 3.6 | Realização dos experimentos e avaliações de desempenho produtivo e ambiental | . 60 |
| 3.6.1 | Procedimento experimental | . 60 |
| 3.6.2 | Avaliação de desempenho produtivo | . 62 |
| 3.6.3 | Avaliação de desempenho ambiental | . 63 |
| 4 RI | ESULTADOS E DISCUSSÃO | . 66 |
| 4.1 | Resultados do estudo de tempo | . 66 |
| 4.2 | Resultados do estudo de potência | . 67 |
| 4.3 | Resultados dos estudos de consumíveis e emissões | . 70 |
| 4.3.1 | Ar comprimido | . 70 |
| 4.3.2 | Fluido de corte | . 72 |
| 4.3.3 | Rebolo | . 72 |
| 4.3.4 | Emissões sonoras | . 74 |
| 4.4 | Resultados finais do estudo de ICV | . 75 |
| 4.5 | Avaliação de desempenho de produção | . 76 |
| 4.5.1 | Tempo de Processo | . 76 |
| 4.5.2 | Relação G | . 77 |
| 4.5.3 | Rugosidade e circularidade | . 78 |
| 4.6 | Avaliação de desempenho ambiental por meio do AICV | . 82 |
| 5 C | ONCLUSÕES | . 89 |
| 5.1 | Sugestões para trabalhos futuros | . 90 |
| REF | ERÊNCIAS | . 91 |
| APÊ | NDICE A – CARACTERÍSTICAS DO REBOLO DE CBN | . 99 |

| APÊNDICE B – CARACTERÍSTICAS DO REBOLO DE AL ₂ O ₃ | 100 |
|--|-----|
| APÊNDICE C – ENERGIA INCORPORADA DOS REBOLOS | 101 |
| ANEXO A – COMPOSIÇÃO DO LIGANTE VITRIFICADO C | 102 |

1 INTRODUÇÃO, JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

1.1 Introdução

"Desenvolvimento sustentável é aquele que atende as necessidades das gerações atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem a suas necessidades e aspirações" (ONU, 1987). Essa foi a definição sobre desenvolvimento sustentável feita há 28 atrás pela Organização das Nações Unidas (ONU) e marcou o início da preocupação da comunidade internacional sobre o tema sustentabilidade.

Apesar disso, somente após sete anos, em 1994, que o consultor John Elkington publicou uma abordagem estruturada do tema voltado ao mundo empresarial e seus meios produtivos. Elkington (2001) afirmou que para uma empresa atingir a sustentabilidade, ela deve extrapolar sua meta de impacto econômico positivo (lucro) e considerar com o mesmo grau de importância os impactos sociais e ambientais que suas atividades geram. Dessa maneira, Elkington (2001) estruturou um modelo de desenvolvimento sustentável baseado em três pilares: pilar econômico, pilar ambiental e pilar social, conhecido como o tripé da sustentabilidade (ou *triple bottom line*).

Tal modelo colocou em cheque o modelo de desenvolvimento seguido até àquele momento, no qual a geração de riqueza (impacto econômico) era o objetivo maior; e jogou luz a pontos fundamentais e muitas vezes esquecidos, como os impactos ambientais.

Desde a criação da agricultura, a interação humana com o meio ambiente sempre foi muito ativa, porém, a partir da revolução industrial, tal interação se tornou intensa e perturbante.

O aumento da queima de combustíveis fósseis como o carvão mineral, o gás natural e os derivados de petróleo na geração da energia necessária para a expansão industrial e urbana ao longo desses últimos dois séculos foi sem precedentes.

Tal fato pode ser notado por meio do aumento expressivo de emissões de gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), nos últimos 150 anos. O Gráfico 1.1 apresenta o total de emissões de carbono desse período, bem como as principais fontes de emissão: Gás (Gás Natural), Líquido (Petróleo e derivados líquidos), Sólido (Carvão Mineral), Cimento e *Flaring*.

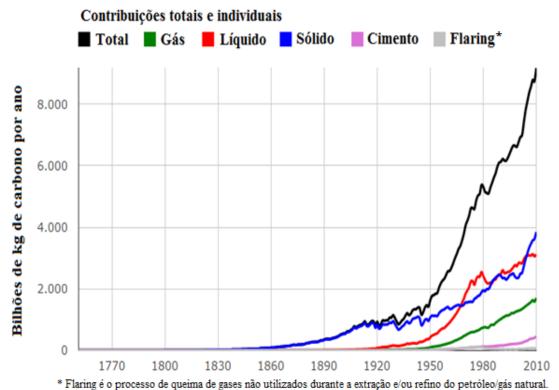


Gráfico 1.1 – Histórico de Emissões de Carbono. Adaptado - BODEN, MARLAND e ANDRES, 2013.

O *Intergovernamental Panel of Climate Changes* (IPCC) afirma, em seu Quinto Relatório Analítico, que a influência humana sobre as mudanças climáticas é clara e que um dos principais fatores é a crescente emissão de gases do efeito estufa antropogênicos, responsável pelo aumento da temperatura média da Terra nos últimos séculos (STOCKER et al., 2013).

Esse quadro tende a se agravar ainda mais nos próximos anos. Segundo Gutowski et al. (2013), a produção industrial global está crescendo e com ela cresce também a necessidade por energia, o que, por consequência, ocasionará no aumento das emissões de carbono na atmosfera. Fisher et al. (2007) relatam que as projeções de emissão de gases do efeito estufa para 2030 são de 25% a 90% maiores que a quantidade emitida em 2000.

Gutowski et al. (2013) alegam que os países na liderança econômica desse último século, como os Estados Unidos, a Inglaterra e a Alemanha, usaram a indústria da manufatura como plataforma para seus respectivos desenvolvimentos econômicos; e que os países emergentes, como a China, Rússia, Índia e o Brasil, também pretendem lançar mão dessa plataforma para alavancarem suas economias.

Segundo a Confederação Nacional da Indústria - CNI (2012b) "[...] em termos mundiais, a indústria é responsável por cerca de 35% do consumo de energia". O Brasil não ficou atrás

nesse sentido: em 2013 a indústria consumiu cerca de 33,9% da energia nacional disponível (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2014).

Dentre os diferentes setores da indústria, o setor de manufatura se destaca. Duflou et al. (2012a) salientam que os processos de manufatura demandam uma quantidade considerável de recursos e energia. Um exemplo disso é a indústria de processamento de metal, a qual foi responsável pelo consumo de 14,3% da energia disponível na União Europeia em 2008 (DUFLOU et al., 2012a).

Alguns pesquisadores, entretanto, ressaltam que, nos últimos anos, a eficiência energética tem sido intensamente discutida, tanto devido ao aumento dos custos da energia, quanto devido à emissão de gases do efeito estufa associada à sua produção e uso (OLIVEIRA e ALVES, 2007; LI et al., 2012).

De acordo com a ONU (2011), resultados obtidos por modelos matemáticos indicam que investimentos em tecnologias verdes para ganho em eficiência energética ao longo das próximas quatro décadas poderiam reduzir o consumo de energia industrial em quase 50% se comparado ao modelo atual.

Além da eficiência energética durante a produção, a redução dos impactos ambientais na manufatura também implica na ampliação da vida útil dos produtos manufaturados e numa ênfase maior em pontos como reprojeto, refabricação e reciclagem (ONU, 2011).

Nesse contexto, iniciativas em prol do desenvolvimento e da utilização de tecnologias verdes vêm sendo adotadas, como a aplicação de políticas e legislações ambientais mais restritas, a criação de incentivos financeiros e fiscais a empresas e produtos "mais verdes" e até o comprometimento com objetivos e metas ambientais nacionais e mundiais, como o *American Clean Energy and Security Act* (BRODER, 2009) e o Protocolo de Quioto (ONU, 2014a).

Oliveira e Alves (2007) salientam também que há uma demanda crescente por parte da sociedade por produtos e processos de produção "verdes", ou seja, que causam menos impactos ao meio ambiente. Dornfeld et al. (2013) denominam tais processos como *Green Manufacturing* (GM).

Dentre as práticas e ferramentas relacionadas ao GM, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) tem se destacado como uma ferramenta de grande relevância na identificação dos impactos ambientais relacionados à manufatura.

Segundo Garetti e Taisch (2012), a utilização de ferramentas de gestão ambiental, como a Avaliação de Ciclo Vida, tem possibilitado o desenvolvimento de práticas com menor influência ambiental, visando o GM.

Vijayaraghavan et al. (2013) avaliam ainda que o estudo de ACV, mesmo que focado apenas no consumo energético, é fundamental para se determinar estratégias apropriadas em busca do GM.

A importância dessa ferramenta também foi reconhecida por órgãos governamentais e organizações internacionais, os quais desenvolveram suas próprias metodologias para a sua aplicação (ISO, 2014; U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION ANGECY, 2014; EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Aqui no Brasil, as normas NBR ISO 14040:2009 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044:2009 (ABNT, 2009b), provenientes respectivamente das normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044, especificam e padronizam as diretivas para a aplicação da ACV.

Elas descrevem a ACV como uma ferramenta a qual enfoca os aspectos e impactos ambientais potenciais das diferentes fases do ciclo de vida de um produto ou processo; possibilitando a identificação de oportunidades de melhoria no desempenho ambiental nas diversas fases do seu ciclo de vida (ABNT, 2009a, 2009b).

Apesar de ser uma ferramenta muito abrangente e versátil, a ACV possui algumas limitações, principalmente relacionadas aos dados da sua fase de Avaliação de Inventário de Ciclo de Vida (ICV).

Thorn, Kraus e Parker (2011) expõem alguns desses problemas, indicando que a fase de inventário de ciclo de vida é a etapa com a maior probabilidade de incidência de erros, uma vez que é a etapa na qual os dados são reunidos e manipulados. Thorn, Kraus e Parker (2011) também ressaltam que os dados coletados nessa etapa em uma fábrica, por exemplo, geralmente se apresentam de maneira conjunta, o que dificulta a análise separada de cada máquina ou unidade de processamento.

Skone e Curran (2005) relatam ainda que a falta de dados com qualidade e prontamente disponíveis das unidades de processamento de manufatura se torna uma barreira para as empresas incorporarem as considerações e resultados sobre o ciclo de vida de seus produtos em seus processos de tomada de decisões.

1.2 Objetivos

O presente trabalho apresenta os seguintes objetivos:

- Realização do estudo de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) para uma unidade de processamento de retificação cilíndrica externa de mergulho, utilizando como base uma metodologia a ser aplicada em uma unidade de processamento de manufatura discreta;
- Definição e desenvolvimento da interface, organização e disponibilização dos dados adquiridos, por meio de um protocolo de base web e estruturado;
- Verificação dos dados de inventário gerados e relacionamento destes com fatores de desempenho produtivo e de desempenho ambiental.

1.3 Justificativa e relevância do tema

O processo de manufatura discreta escolhido para a aplicação foi o de retificação cilíndrica externa devido à sua grande utilização em setores chave da indústria metalomecânica, como automotivos e aeronaves (KOPAC e KRAJNIK, 2006) e também às questões relacionadas à sua eficiência energética (AURICH et al, 2013) e necessidade de uso de fluido de corte (LINKE e OVERCASH, 2012).

Aurich et al. (2013) ressaltam que processos abrasivos, como a retificação, são intimamente ligados à integridade e qualidade da superfície da peça usinada. Assim, análises relacionadas à sustentabilidade desses tipos de processos só podem ser executadas considerando a interação entre itens de desempenho ambiental, como a eficiência energética, e itens de desempenho produtivo, como a qualidade final da peça.

A partir das informações contidas na Introdução, verifica-se uma lacuna com relação à disponibilidade e à qualidade de dados de ICV de unidades de processamento de manufatura.

Além dos problemas relatados por Skone e Curran (2005) sobre a falta de dados de ICV com qualidade e por Thorn, Kraus e Parker (2011) sobre a indisponibilidade de dados das unidades de processamento de maneira isolada, Kellens et al. (2011a) verifica que os dados de

ICV existentes e disponíveis de processos de manufatura são restritos a apenas processos convencionais, como furação, torneamento e fresamento.

Outro ponto problemático, apontado por Duflou et al. (2012a, 2012b) e Kellens et al. (2011a), é que, mesmo quando disponíveis, esses dados de ICV são geralmente incompletos e abordam somente o consumo energético teórico do processo, deixando de avaliar outros aspectos como consumo de fluido de corte, ar comprimido e ferramenta.

Nesse sentido, se faz necessária a busca por uma metodologia que possibilite a padronização e disponibilização dos dados de ICV para os mais variados processos de manufatura, bem como não se limite ao cálculo ou aquisição de dados apenas de consumo energético.

Vijayaraghavan et al. (2013) vão além e avaliam que para que ocorra uma caracterização quantitativa dos processos de manufatura coerentes com a realização do GM, é fundamental realizar a caracterização dos vários fluxos envolvidos em cada processo de manufatura, a aquisição desses fluxos com o uso de instrumentos de medição, bem como a padronização dos dados adquiridos.

Ao encontro dessas necessidades, Vijayaraghavan et al. (2013) sugerem a implementação de um sistema de monitoramento em tempo real baseado em *software* e padrões *web* para o gerenciamento e controle desses dados.

Assim, o presente trabalho visa contribuir no preenchimento dessa lacuna relacionada à disponibilidade e à qualidade de dados de ICV de processos de manufatura, por meio de um estudo de caso em uma unidade de processamento de retificação cilíndrica externa da aplicação de uma metodologia de ICV dinâmico, em conjunto com um sistema de monitoramento, baseado em *software* e padrões *web*, em tempo real dos principais fluxos da unidade de processamento estudada.

A partir dos dados de ICV adquiridos, espera-se realizar uma análise de desempenho produtivo e de desempenho ambiental para a unidade de processamento estudada.

1.4 Distribuição temática e estrutura do trabalho

O presente trabalho consiste num estudo de caso de um estudo de inventário de ciclo de vida para uma unidade de processamento de retificação, por meio de uma abordagem mista qualitativa e quantitativa.

A estruturação temática do trabalho dividida em 5 capítulos e 3 elementos pós-textuais.

O presente capítulo possui papel introdutório e contextualiza a problemática do estudo. O capítulo seguinte realiza a fundamentação teórica necessária para a realização do trabalho. O terceiro capítulo apresenta os métodos e ferramentas empregadas no trabalho e o quarto capítulo mostra os resultados encontrados no estudo. O quinto capítulo consiste nas conclusões sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, encontram-se os três elementos pós-textuais: Bibliografia, Apêndices e Anexos. A Tabela 1.1 apresenta de maneira coordenada esta estruturação.

Tabela 1.1 – Estruturação temática do trabalho

| Fundamentação Teórica | Capítulo 1 Introdução, objetivos, justificativa e relevância do tema |
|--|--|
| Fundamentação Teórica | Capítulo 2 Green Manufacturing, Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), metodologias de Inventário de Ciclo de Vida (ICV), sistemas de monitoramento de dados de ICV, processo de retificação cilíndrica externa |
| Métodos, pesquisa em campo e discussão | Capítulo 3 Aplicação da metodologia do estudo de ICV escolhida, definição do sistema de monitoramento, do procedimento experimental e dos parâmetros de avaliação de desempenho produtivo e ambiental |
| M pesquisa di | Capítulo 4 Resultados do estudo de ICV, de desempenho produtivo e de desempenho ambiental |
| Síntese | Capítulo 5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros |
| itos uais | Bibliografia |
| Elementos oós-textuais | Apêndices |
| Elepós | Anexos |

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Green Manufacturing

2.1.1 Contexto

A manufatura representa uma grande força de desenvolvimento econômico e social, atuando ativamente na criação e produção dos bens de primeira importância para a manutenção da qualidade de vida da sociedade atual, bem como na geração de grande parte dos empregos no mundo (GARETTI e TAISCH, 2012; DUFLOU et al., 2012b).

Contudo, não há como negar o grande impacto que a indústria manufatureira causa ao meio ambiente. Ela demanda grandes quantidades de energia e de matérias-primas, renováveis ou não, como água, metais e derivados de petróleo (GARETTI e TAISCH, 2012; DUFLOU et al., 2012b); além de produzir grandes quantidades de efluentes e resíduos sólidos, que resultam em mais danos ao meio ambiente (DUFLOU et al., 2012b).

Tais características da indústria manufatureira, associadas à projeção de sua expansão nas próximas décadas em países em desenvolvimento como China, Rússia, Índia e Brasil (GUTOWSKI et al., 2013; GARETTI e TAISCH, 2012), criam um quadro preocupante de maior necessidade por recursos e consequente sobrecarga ambiental.

Segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (2009), o crescimento da demanda de energia para promover essa expansão, por exemplo, irá desencadear um aumento expressivo do consumo de combustíveis fósseis, mantendo esse tipo de combustível como a principal fonte energética mundial até 2030.

A utilização desse tipo de fonte energética é um dos grandes responsáveis pelo aumento da concentração de gases do efeito estufa e pelo consequente aumento da temperatura média da Terra (STOCKER et al., 2013).

De acordo com o mapeamento realizado pela *U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration* - NOAA (2015), a temperatura média da Terra em 2014 oscilou 0,69°C acima da média histórica para o século XX. O Gráfico 2.1 apresenta o mapeamento da série histórica e mostra que, a partir de 1970, há uma tendência de aumento da temperatura média global (U.S. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2015).

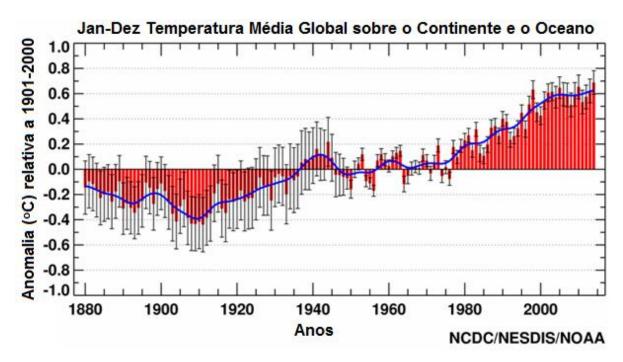


Gráfico 2.1 – Variação da Temperatura Média Global sobre o Continente e o Oceano. Adaptado - U.S. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2015.

De acordo com o IPCC (FIELD et al, 2014), esse aumento da temperatura média da Terra pode gerar alterações climáticas catastróficas, afetando o meio ambiente de forma drástica e até irreversível. O Gráfico 2.2 apresenta os riscos adicionais devido à mudança climática em tópicos como sistemas únicos e ameaçados, eventos climáticos extremos, distribuição de impactos, impactos agregados globais e eventos singulares de larga escala. A partir do Gráfico 2.2, é possível observar que um aumento de 2°C na temperatura média da Terra, comparado ao nível pré-industrial (eixo vertical direito), o nível de risco adicional devido à mudança climática atinge patamares entre moderado e alto para todos os tópicos analisados.

O Gráfico 2.2 também mostra que o aumento da temperatura média global chegou próximo a 0,8°C entre 2003 e 2012, já resultando em impactos significativos no nível de risco adicional na distribuição de impactos, nos eventos climáticos extremos e, especialmente, nos sistemas únicos e ameaçados.

Por esse motivo, o IPCC (FISHER et al., 2007) recomendou que, até 2050, as emissões de gases do efeito estufa deveriam ser reduzidas de modo que atingissem 50% das emissões de 2007, para que ocorresse a estabilização dos impactos ambientais relacionados a esse tipo de emissão.

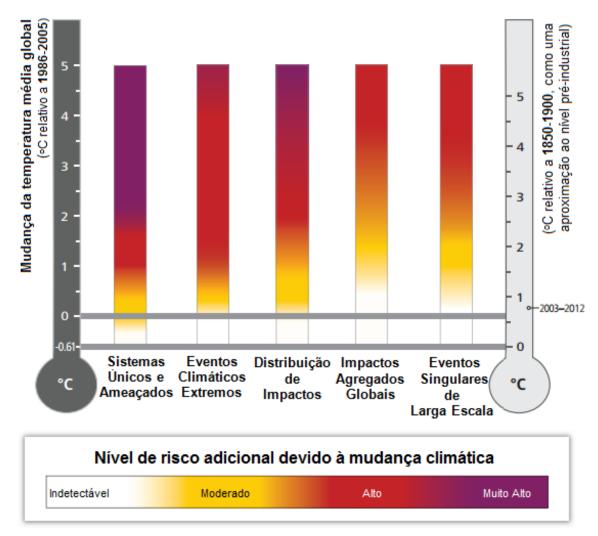


Gráfico 2.2 – Nível de risco adicional devido à mudança climática. Fonte – FIELD et al., 2014.

Além dos gases do efeito estufa, a utilização de fontes fósseis de energia também é responsável pela geração de muitos outros poluentes atmosféricos emitidos pela indústria de manufatura, como o dióxido de enxofre (SO_2), os óxidos de nitrogênio (NO_x), e materiais particulados (PM_{10} e $PM_{2.5}$) (GUTOWSKI et al., 2013).

Segundo a ONU (2011), a poluição do ar é responsável por grandes prejuízos relacionados à redução na qualidade da saúde da população, principalmente em área urbanas. Dados recentes mostram que tais prejuízos variam entre 2% a 5% do Produto Interno Bruto em países desenvolvidos e em desenvolvimento (ONU, 2014b). Na China, esse valor pode chegar 13% do PIB (BOYD, 2014).

Além disso, a ONU (2011) estima também que aproximadamente 17% desses prejuízos são provenientes da indústria manufatureira.

Ademais problemas relacionados às emissões atmosféricas, o setor manufatureiro demanda uma grande quantidade de recursos hídricos, estes cada vez mais escassos. Segundo

a CNI (2012a), o setor é responsável por 22% da demanda de água do mundo e no Brasil por 17% das captações e 7% do consumo.

Gutowski et al. (2013) argumentam que apesar de não haver uma resposta absoluta para quando e como o desenvolvimento industrial e manufatureiro tomará um caminho mais benigno ao meio ambiente, isso já é um dilema chave na indústria manufatureira.

Bourhis et al. (2013) reforçam essa ideia, afirmando que as questões ambientais já estão tomando uma posição de destaque no mundo da manufatura e que o *Green Manufacturing* (GM) é um primeiro passo para um desenvolvimento sustentável.

2.1.2 Definição e aplicação do GM

Dornfeld et al. (2013) definem o termo *Green Manufacturing* como um processo ou sistema de produção que gera impactos ambientais negativos mínimos, inexistentes, ou até, em alguns casos, impactos ambientais positivos.

Dornfeld et al. (2013) também destacam que a implantação do GM é impulsionada por fatores diversos, como:

- Pressão governamental, restrições, multas e benefícios;
- Escassez de recursos:
- Pressão da sociedade;
- Eficiência e redução de custos.

Oliveira e Alves (2007) relatam que a pressão governamental por meio das "[...] restrições resultantes da legislação não conduzem apenas às limitações e dificuldades com processos de manufatura e a um acréscimo de custo indesejável a elas associado, mas também força a desenvolver tecnologias novas e alternativas".

Tal fato representaria novos desafios tecnológicos às empresas e seus respectivos engenheiros, bem como aumenta a importância do GM como um fator de competitividade (OLIVEIRA e ALVES, 2007).

Com relação à escassez de recursos, o *Global Footprint Network* (2015) afirma que, na década de 1970, o modelo de consumo da sociedade atingiu um nível de consumo de recursos equivalente ao que o planeta Terra tinha a capacidade de regenerar em um ano (Pegada Ecológica). Nos anos seguintes, contudo, a sociedade começou então a exigir mais recursos do

que o planeta era capaz de regenerar, chegando a uma pegada ecológica de 1,5 planetas Terra em 2010 (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2015) (Gráfico 2.3).

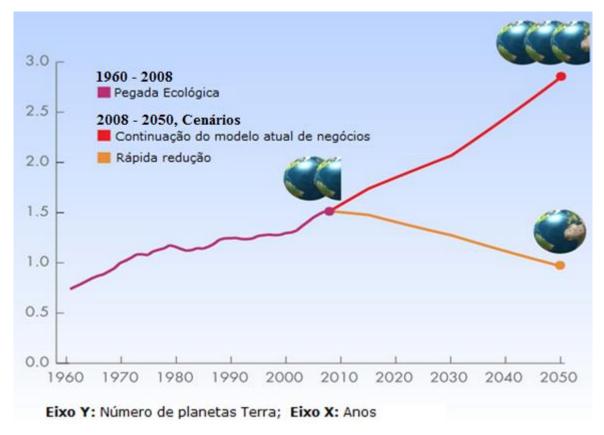


Gráfico 2.3 - Pegada Ecológica Terrestre. Adaptado - GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2015.

Além disso, o Gráfico 2.3 também mostra que se o modelo de consumo da sociedade não for modificado, a projeção é de aumento contínuo da pegada ecológica, podendo chegar a 3 planetas Terras em 2050.

A transformação mais rápida de recursos em resíduos do que a transformação de resíduos em recursos faz com que a esses recursos se tornem cada vez mais escassos e consequentemente mais caros (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2015), podendo chegar ao ponto de se tornarem economicamente inviáveis ou até indisponíveis (esgotamento).

A pressão da sociedade é outro fator estimulante para aplicação do GM. Segundo Swarr (2009), há uma demanda cada vez maior por parte dos consumidores por produtos que gerem impactos ambientais negativos reduzidos ou inexistentes durante o processo de produção.

A CNI (2012a) também salienta que a rotulagem desses produtos que geram impactos ambientais negativos reduzidos (rotulagem ambiental), "[...] pode ser um importante instrumento para melhorar a eficiência no uso dos insumos, ajudando a conquistar novos consumidores e mercados".

Já em relação à eficiência e redução de custos, Deif (2011) faz uma releitura do GM, voltada a esse tema. Segundo ele, o GM tem por objetivo refletir o novo paradigma de produção manufatureira, o qual emprega várias estratégias e tecnologias de produção verde com o intuito de se tornar mais eco-eficiente (DEIF, 2011).

A eco-eficiência é uma métrica fundamental na mensuração da execução do GM e é o resultado da interposição dos pilares econômicos e ambientais da sustentabilidade (Figura 2.1), estabelecendo um valor de comparação econômico-ambiental para as mais variadas práticas executadas ou previstas em um ou mais produtos ou processos produtivos.

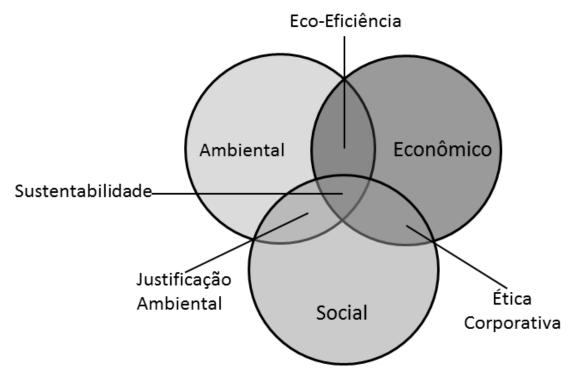


Figura 2.1 – Pilares da sustentabilidade. Adaptado – HAUSCHILD, JESWIET e ALTINGA, 2005.

Tal métrica, definida no ano 2000 pelo *World Business Council for Sustainable Development* – WBCSD (2000), eleva o pilar ambiental a um status equivalente ao de pilar econômico para um produto/processo/empresa (Equação 1):

$$eco - eficiência = \frac{Valor\ do\ produto\ ou\ processo}{Influência\ Ambiental}$$
 (1)

A partir da Equação 1, é possível visualizar que o aumento da eco-eficiência pode ser atingido, por exemplo, por meio da redução da influência ambiental de um produto/serviço, sem que ele perca seu valor.

Deif (2011) vai um pouco além dessa visão e afirma que a criação de produtos/sistemas que consumem menos energia e menos materiais, que realizam a substituição dos materiais de entrada (como a troca de materiais tóxicos por não tóxicos ou de não renováveis por renováveis), que reduzem saídas e emissões indesejadas e que convertem algumas dessas saídas em entradas novamente (reciclagem), resultam em ganhos duplos de eco-eficiência, pois influenciam de maneira desejada tanto o denominador quanto o numerador da equação; reduzem a influência ambiental do processo ou produto ao mesmo tempo em que aumentam o valor econômico do mesmo (reduzem seus custos).

Apesar das ações propostas acima por Deif (2011) para redução da influência ambiental e consequente melhoria em eco-eficiência de um processo ou produto, há técnicas e ferramentas ambientais as quais permitem levantar e avaliar quais ações produzem realmente impacto significativo em melhoria ambiental.

Uma dessas ferramentas é a proposta por Lucato, Vieira Jr e Santos (2015) que estabelece um procedimento para incorporar variáveis ambientais na técnica Seis Sigma, como uma forma de aumentar o nível de eco-eficiência de um processo industrial.

Outra ferramenta de destaque é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), tradicionalmente aceita e difundida como técnica predominante na avaliação dos aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um processo, produto ou serviço (Swarr, 2009; Thorn, Kraus e Parker, 2011).

Thorn, Kraus e Parker (2011) afirmam que ACV pode ser usada para inúmeras aplicações e pode ajudar na conscientização e gerenciamento dos impactos ambientais, bem como propor ações para o uso mais eficiente de recursos e diminuição de emissões nocivas, incluindo os gases de efeito estufa.

2.2 Avaliação de Ciclo de Vida - ACV

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é definida como uma técnica ou ferramenta analítica para avaliação dos impactos ambientais associados a um produto, processo ou sistema, durante seu ciclo de vida (HAUSCHILD, JESWIET E ALTING, 2005; THORN, KRAUS e PARKER, 2011; CNI, 2012b; AURICH et al., 2013).

No Brasil, as normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) definem e padronizam a ACV como a "[...] compilação e avaliação das entradas, saídas

e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida". Aqui, três conceitos fundamentais sobre a ACV são abordados: sistema de produto, impacto ambiental potencial e ciclo de vida.

Sistema de produto é o "[...] conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto" (ABNT, 2009a, 2009b).

Impacto ambiental potencial é a possibilidade de impacto no meio ambiente, saúde humana ou esgotamento dos recursos naturais, causado pelas intervenções entre os sistemas que sofreram transformações humanas (Tecnosfera) e os que não sofreram (Ecosfera) (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Já o conceito de ciclo de vida é definido como os estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais (como em atividades mineradoras ou agrícolas), passando pela produção de materiais e componentes (por meio da manufatura e montagem), pela sua distribuição e uso, até sua reciclagem, remanufatura ou disposição final (HAUSCHILD, JESWIET e ALTING, 2005; ABNT, 2009a, 2009b; AURICH et al., 2013; BOURHIS et al., 2013).

A Figura 2.2 apresenta um modelo simplificado da estrutura e do funcionamento de um ciclo de vida:

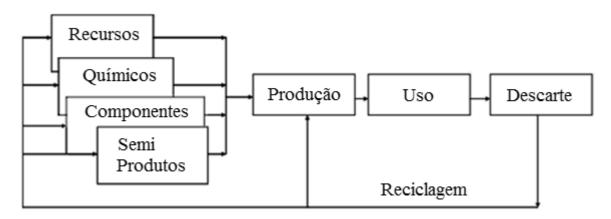


Figura 2.2 - Representação do Ciclo de Vida. Adaptado - HAUSCHILD, JESWIET e ALTING, 2005.

Em outras palavras, a ACV é uma técnica que permite a quantificação, qualificação e entendimento da influência ambiental de um produto ou processo por meio da modelagem e estudo de todas suas etapas, desde as matérias primas utilizadas até seu fim de vida.

Sua estrutura é composta por quatro fases, conforme ilustra a Figura 2.3, na qual também é possível perceber que a troca de informações entre as fases envolvidas na ACV não são

necessariamente sequenciais, nem possuem apenas um sentido, sinalizando o perfil dinâmico e iterativo da técnica.

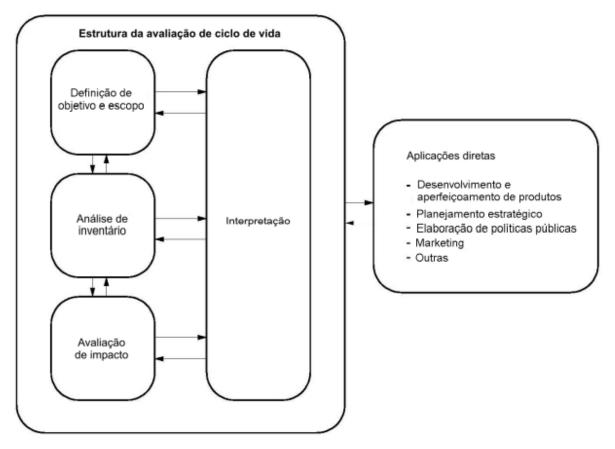


Figura 2.3 - Fases de uma ACV. Fonte – ABNT, 2009a.

2.2.1 Fase I - Definição de objetivo e escopo

Essa é a primeira fase do estudo de ACV e a etapa base do mesmo, uma vez que nela são definidos os parâmetros de sucesso e de conclusão das outras fases. De acordo com Bourhis et al. (2013), nessa etapa são definidos também os limites do estudo.

A primeira parte desta fase é a definição do objetivo do estudo de ACV e constitui na identificação da aplicação pretendida, das razões para execução do estudo, do público-alvo, das entregas e resultados, e na definição de se os resultados do estudo serão públicos e se serão usados para comparações com sistemas similares (ABNT, 2009a, 2009b; EUROPEAN COMMISSION, 2010).

A definição do objetivo guia todos os aspectos detalhados da segunda parte, a definição de escopo, a qual define o quadro de trabalho para as etapas de Análise de Inventário de Ciclo

de Vida (ICV) e de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Com relação à definição de escopo, primeiramente deve-se definir qual será a modelagem escolhida para a execução do estudo: a atribuicional ou a consequencial. De acordo com a *European Commission* (2010) a modelagem atribuicional visa estabelecer a carga ambiental associada com a produção e o uso de um produto ou processo, enquanto a modelagem consequencial está mais focada na identificação das possíveis consequências ambientais provenientes de uma decisão ou mudança em uma ou mais cadeias produtivas, sendo usada, por exemplo, para estudos sobre políticas ambientais.

Uma vez definida a modelagem, as próximas etapas consistem basicamente nas definições dos seguintes itens (ABNT, 2009a, 2009b; AURICH et al., 2013; EUROPEAN COMMISSION, 2010):

- Sistema de produto e de suas funções;
- Unidade funcional;
- Fronteiras do sistema:
- Fluxo de referência;
- Categorias de impacto;
- Requisitos e qualidade dos dados,
- Pressupostos e limitações;
- Revisão crítica e formato do relatório.

A função do sistema e unidade funcional são os elementos centrais de uma ACV. Sem eles, uma comparação válida e significativa entre produtos não é possível (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Segundo Hauschild, Jeswiet e Alting (2005) e Aurich et al. (2013), a função de um sistema de produto é definida em termos qualitativos e quantificada pela unidade funcional, a qual, por sua vez, define o fluxo de referência do sistema estudado.

Segundo a ABNT (2009a, 2009b) a unidade funcional deve ser consistente com o objetivo e escopo do estudo e sua principal finalidade é fornecer uma referência em relação à qual os dados de entrada e saída são normalizados.

A European Commission (2010) afirma que o papel da unidade funcional é identificar e quantificar as propriedades quantificáveis relevantes e o desempenho técnico/funcional do

sistema e da(s) sua(s) função(ões). A *European Commission* (2010) mostra que uma forma de se alcançar isso é a partir das perguntas "o que", "quanto", "quão bem" e "por quanto tempo".

O fluxo de referência pode ser definido como aquele em que todos os outros fluxos de entrada e de saída de um dado sistema de produto se relacionam quantitativamente para realizar a função expressa pela unidade funcional (ABNT, 2009a, 2009b; EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Além da unidade funcional e do fluxo de referência, outro ponto abordado na definição do escopo são as fronteiras do sistema. Elas definem quais processos elementares serão incluídos no sistema, a partir das definições prévias contidas no objetivo e no escopo (ABNT, 2009a, 2009b; EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Convém que as fronteiras do sistema sejam modeladas tais que as entradas e saídas sejam fluxos elementares e de produtos (ABNT, 2009a, 2009b). A *European Commission* (2010) define o fluxo elementar como "entrada única de energia ou substância no sistema estudado que veio da Ecosfera sem prévia transformação humana ou substância ou energia única que é liberada na Ecosfera sem subsequente transformação humana".

Após a definição das fronteiras do sistema, define-se qual a metodologia de AICV será usada e os tipos de impacto, de acordo com o objetivo do estudo. Bourhis et al. (2013) cita três das metodologias mais usadas por praticantes do ACV, o Eco-Indicator 99, o Impacts 2002+ e o CML. Além desses, Piekarski et al. (2012) lista mais três metodologias: EDIP 97, EDIP 2003 e o ReCiPe 2008.

Independente da metodologia escolhida, a fase de AICV tem o propósito de interpretar os resultados da fase de ICV com relação aos seus respectivos impactos ambientais potenciais nas seguintes áreas de proteção (HAUSCHILD, JESWIET e ALTING, 2005):

- Saúde Humana;
- Meio Ambiente;
- Recursos Naturais;
- Ambiente Antrópico.

Associadas a essas áreas de proteção estão as categorias de impacto e seus respectivos indicadores. Entre as categorias de impacto mais estudadas, é possível listar o aquecimento global, o esgotamento do ozônio estratosférico, toxidade humana, inorgânicos respiráveis, formação fotoquímica de ozônio (nível do solo), acidificação (terra e água), eutrofização (terra e água), ecotoxidade, uso da terra e esgotamento de recursos (minerais, fontes de energias

fósseis e renováveis, água) (EUROPEAN COMMISSION, 2010; HAUSCHILD, JESWIET e ALTING, 2005).

Uma vez definida a metodologia de AICV, bem como as categorias e indicadores de impacto ambiental, a próxima etapa na definição de escopo é a escolha dos tipos de dados de ICV desejados, bem como os requisitos de qualidade dos mesmos.

Os tipos de dados variam entre dados medidos, calculados ou estimados, de acordo com a qualidade desejada e disponibilidade (ABNT, 2009b). A escolha dos requisitos de qualidade dos dados de ICV deve ser feita de tal modo que os objetivos do estudo de ACV possam ser alcançados (ABNT, 2009b).

É de grande relevância que tais requisitos possuam, entre outras coisas, representatividade (composto por tecnológica, geográfica e temporal), completeza (em relação à cobertura da categoria de impacto no inventário), precisão / incerteza (dos dados coletados ou modelados no inventário) e consistência (ABNT, 2009b; EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Ainda nesta etapa, é realizada a explicitação dos pressupostos e limitações do estudo, e também como será realizado o tratamento dos dados faltantes (ABNT, 2009b).

Por fim, definem-se as diretrizes relacionadas ao uso do documento, à divulgação e à revisão crítica por consultores externos (ABNT, 2009b; EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Devido à natureza iterativa da ACV, a fase de definição de objetivo e escopo pode ser revisada com o surgimento de limitações não previstas, restrições ou de informações adicionais (ABNT, 2009b). Tais modificações, bem como suas justificativas, devem ser documentadas no estudo (ABNT, 2009b).

2.2.2 Fase II - Inventário de Ciclo de Vida - ICV

A fase de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) é a fase na qual há a compilação e quantificação dos dados das entradas e saídas definidas para o sistema de produto e suas fronteiras ao longo do seu ciclo de vida (ABNT, 2009a, 2009b; EUROPEAN COMMISSION, 2010; HAUSCHILD, JESWIET e ALTING, 2005).

Assim como a ACV em si, a ICV é também um processo iterativo, pois à medida em que há a coleta dos dados, novas informações sobre o sistema são reveladas, como novos requisitos e/ou limitações, o que pode requerer mudanças nos processos de coleta de dados para atender o objetivo do estudo (ABNT, 2009a).

Em resumo, o trabalho dessa fase do estudo de ACV significa (EUROPEAN COMMISSION, 2010):

- Identificar os processos requeridos pelo sistema;
- Planejar a coleta de dados brutos diretamente nos processos, com o uso de sistemas de monitoramentos e instrumentos de medição, ou nos bancos de dados de inventário;
- Desenvolver dados genéricos de ICV, principalmente quando dados específicos e médios não estão disponíveis ou não foram desenvolvidos previamente;
- Modelar o sistema por meio da conexão e escala dos conjuntos de dados corretamente, de modo que o sistema esteja produzindo sua unidade funcional;
- Resolver multifuncionalidades de processos do sistema;
- Calcular os resultados do ICV.

Dentre as fases do ACV, o ICV se mostra a fase que demanda os maiores esforços, tempo e recursos para execução (BOURHIS et al., 2013, EUROPEAN COMMISSION, 2010; THORN, KRAUS e PARKER, 2011).

Essa dificuldade associada à execução do ICV implica na falta de dados de qualidade e confiáveis. Skone e Curran (2005) relatam que apesar dos grandes avanços em melhoria e padronização da metodologia da ACV, não é possível dizer que o mesmo tenha ocorrido sobre o aumento da disponibilidade de banco de dados confiáveis de ICV.

Thorn, Kraus e Parker (2011) avaliam que os bancos de dados tradicionais existentes são geralmente formados por iniciativas governamentais ou de projetos fomentados por ações publicitárias, e são constituídos, em sua maioria, por dados regionais, médios, setoriais da indústria e que raramente são atualizados (estáticos).

Além da dificuldade na coleta e atualizações dos dados, Gutowski et al. (2013) chamam a atenção para a complicação na conversão de dados regionais em um conjunto consistente de dados globais.

Kellens et al. (2011a) mostram ainda que a maioria dos bancos de dados de ICV possui uma grande desvantagem: o tipo de dados que eles fornecem. Geralmente, eles simbolizam processos agregados ou valores médios, o que dificulta, por exemplo, a extração de informações de impacto exclusivas de uma unidade de processamento (KELLENS et al., 2011a; THORN, KRAUS e PARKER, 2011).

Essa situação é mais agravante na indústria manufatureira: Kellens et al. (2011a) relatam que os *ecodesigners* e os praticantes de ACV têm uma necessidade cada vez maior de dados de ICV confiáveis, completos, atuais e padronizados para a realização de estudos de ACV de processos de manufatura.

Kellens et al. (2011a) também relatam que apesar da grande variedade de processos de manufatura existentes, a disponibilidade de dados de ICV fica restrita a processos convencionais como furação, torneamento e fresamento. Além dessa escassez de processos, os dados disponíveis são geralmente incompletos e focados apenas no consumo energético teórico do processo (DUFLOU et al., 2012a, 2012b; KELLENS et al., 2011a).

Oliveira e Alves (2007) afirmam que para a execução de uma avaliação correta das questões ambientais na manufatura é necessária a realização de uma análise completa do processo, na qual todos os insumos de entrada e saída sejam verificados e os efeitos ao meio ambiente de cada parâmetro sejam examinados de maneira quantitativa.

Thorn, Kraus e Parker (2011) argumentam que o uso de uma abordagem *in loco* para a aquisição de dados, ou seja, diretamente no processo com o uso de sistemas de monitoramento e instrumentos de medição, pode representar uma grande melhoria na qualidade e na exatidão dos dados de ICV.

Nesse mesmo caminho, Vijayaraghavan et al. (2013) afirma que uma caracterização quantitativa de processos de manufatura mais verdes requerem um sistema de monitoramento dinâmico, baseado em sensores, que caracterize e realize as medições dos vários fluxos envolvidos no processo em tempo real.

2.2.3 Fase III - Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida - AICV

A Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) é a fase do ACV na qual os fluxos físicos e dados coletados na fase de estudo de ICV são traduzidos em resultados de indicadores de impacto ambientais potenciais (ABNT, 2009a; EUROPEAN COMMISSION, 2010; HAUSCHILD, JESWIET e ALTING, 2005; LINKE e OVERCASH, 2012).

A AICV é constituída primeiramente pela seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização (Seleção); depois pela correlação com os resultados do ICV (Classificação) e, por fim, pela determinação dos resultados dos indicadores de categoria (Caracterização) (ABNT, 2009a).

Os resultados do AICV são usados para dar suporte à identificação dos fluxos elementares que mais contribuem com os impactos ambientais, e assim encontrar pontos de melhoria no processo ou produto estudado (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

É importante ressaltar que como os resultados do AICV por categoria de impacto possuem diferentes unidades, elas não podem ser comparadas diretamente para identificação da mais relevante, muito menos podem ser somados (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Além da seleção, classificação e caracterização, elementos e informações opcionais são passíveis de serem utilizados dependendo do objetivo e escopo da ACV, como, por exemplo, a normalização (ABNT, 2009b).

A ABNT (2009b) define a normalização como "[...] o cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria com relação a alguma informação de referência".

Tal procedimento pode ser de grande utilidade na verificação de inconsistências no estudo e auxiliar na interpretação dos dados do AICV (ABNT, 2009b), uma vez que resultados normalizados do AICV dão, para cada tópico de impacto, a partilha do impacto de um processo ou sistema analisado no impacto total dessa categoria por, e.g., cidadão médio regional ou global (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

2.2.4 Fase IV - Interpretação do Ciclo de Vida

A fase de interpretação permite checar se os limites do estudo e os resultados de ICV e de AICV estão corretos e de acordo com o estabelecido no objetivo e escopo e, assim, verificar se há a necessidade de mudanças em alguma fase do estudo (BOURHIS et al., 2013; EUROPEAN COMMISSION, 2010; LINKE e OVERCASH, 2012, HAUSCHILD, JESWIET e ALTING, 2005).

Segundo a ABNT (2009a), essa fase da ACV constitui de três etapas:

- Definição das questões significantes do estudo;
- Avaliação das questões com relação à influência nos resultados finais da ACV;
- Formulação das conclusões.

Assim, caso não seja necessária nenhuma nova mudança ou iteração no estudo (i.e., os resultados encontrados estão de acordo com os objetivos do estudo e alinhados às questões significantes), a fase de interpretação resulta em conclusões robustas e, muitas vezes, em recomendações sobre o ciclo de vida do processo ou produto, as quais auxiliam na tomadas de

decisões por parte dos interessados no estudo. (ABNT, 2009a; EUROPEAN COMMISSION, 2010; HAUSCHILD, JESWIET e ALTING, 2005).

2.3 Metodologias de ICV para unidades de processamento

De acordo com Li et al. (2012), uma unidade de processamento funciona como um serviço que gera valor a um ou mais produtos e que, para isso, consome energia e outros recursos.

Uma visão mais detalhada sobre essa definição é apresentada pela Figura 2.4: na camada superior, a unidade de processamento transforma materiais diversos em uma saída com maior valor agregado (e.g., produtos que sofreram alteração de seus atributos, tais como propriedades geométricas, rugosidade superficial ou dureza); na camada do meio, os parâmetros do processo definem o desempenho do mesmo; e na camada inferior, há os fluxos de entrada de energia e outros materiais auxiliares que induzem impactos ambientais (Li et al., 2012).

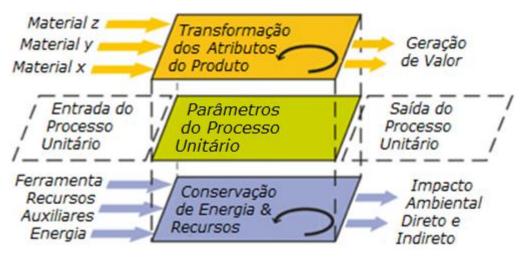


Figura 2.4 – Unidade de processamento. Adaptado – Li et al., 2012.

A partir da definição de unidade de processamento fornecida por Li et al. (2012), é possível verificar alguns pontos-chave na escolha de uma metodologia para a realização de um estudo de ICV desse tipo de processo.

O primeiro ponto importante é a modelagem adequada da unidade de processamento, a partir da geração de valor atribuída a ele e aos parâmetros de processo responsáveis por essa geração de valor e desempenho.

Nesse sentido, dados de ICV formados por informações conjuntas com mais de uma unidade de processamento, como os relatados por Thorn, Kraus e Parker (2011), não possibilitam uma modelagem adequada e isolada por unidade de processamento. Além da dificuldade em separar os dados por processo, esse tipo de dado de ICV em conjunto não apresenta as definições de geração de valor e de parâmetros de cada unidade de processamento envolvida.

Outro ponto fundamental é a falta de dados de ICV com relação aos fluxos de entrada e saída da unidade de processamento, que prejudica a avaliação completa do processo e o estudo de ACV, uma vez que os impactos ambientais potenciais relacionados a esses fluxos não considerados não poderão ser calculados e, assim, não farão parte do estudo de ACV.

Nesse sentido, metodologias que levem em conta os parâmetros do processo, a geração de valor pelo processo e que possibilitem a avaliação dos diferentes fluxos de entrada e saída do processo são necessárias.

Gutowski, Dahmus e Thiriez (2006) utilizam uma técnica baseada na exergia dos fluxos do processo, por meio da identificação do potencial desses fluxos em realizar trabalho. Por esse motivo, a representação dos fluxos de energia e de materiais é simplificada por uma mesma unidade de trabalho, geralmente o Joule (J) (GUTOWSKI, DAHMUS e THIRIEZ, 2006). Essa abordagem, contudo, limita a realização do estudo de ICV, reduzindo-o a apenas um estudo de energia.

Abele, Anderl e Birkhofer (2005) propõem uma metodologia estática a base de fórmulas teóricas e estatísticas para o cálculo dos fluxos energéticos e de materiais para vários tipos de unidades de processamento de manufatura discreta, como torneamento, fresamento e retificação.

Essa metodologia, apesar de considerar a geração de valor e os parâmetros de processo na modelagem do processo, carece de fórmulas que possibilitem a modelagem dos fluxos para a grande maioria dos processos de manufatura discreta existentes. Além disso, o fato de ser baseada em cálculos teóricos pode resultar, muitas vezes, em problemas com subestimação (KELLENS et al., 2013).

Bourhis et al. (2013) apresentam uma metodologia que simula uma unidade de processamento, com o intuito de gerar dados de ICV a partir do modelo matemático da máquina, considerando tanto os diferentes fluxos envolvidos quanto a geração de valor e os parâmetros do processo. Apesar de, no estudo, os autores realizarem algumas medições para verificar a compatibilidade do seu modelo com uma máquina real, a metodologia não abre possibilidade para uma abordagem de aquisição de dados *in loco* e em tempo real.

Kellens et al. (2013) observaram que há muitas discrepâncias nos dados de unidades de processamento de manufatura discreta obtidos por diferentes metodologias, indicando uma necessidade de padronização.

Com esse problema em perspectiva, a iniciativa internacional CO2PE (*Cooperative Effort on Process Emissions in Manufacturing*) desenvolveu uma ampla metodologia para a caracterização (de fluxos, parâmetros e atribuição de valor), padronização e aquisição de dados de ICV para unidades de processamento de manufatura discreta: o UPLCI (*Unit Process Life Cycle Inventory*), que será exposto na sequência.

2.3.1 Metodologia UPLCI

A metodologia UPLCI (*Unit Process Life Cycle Inventory*, em português "Inventário de Ciclo de Vida de Unidade de Processamento"), criada pelo CO2PE, foi desenvolvida com o intuito de ampliar e padronizar a construção de bancos de dados de ICV de unidades de processamento, principalmente as de manufatura discreta (KELLENS et al., 2011a).

Basicamente, o UPLCI consiste na análise e melhoria sistemática das unidades de processamento de manufatura, a partir de um estudo detalhado e estruturado de ICV (KELLENS et al., 2011a).

A Figura 2.5 apresenta a estrutura completa da UPLCI. Vale ressaltar as etapas associadas exclusivamente ao estudo de ICV, respectivamente, a etapa de definição de objeto e escopo (item C1 da Figura 2.5) e os cálculos e medições do processo industrial (item C2 da Figura 2.5), foram abordadas e detalhados nesse trabalho.

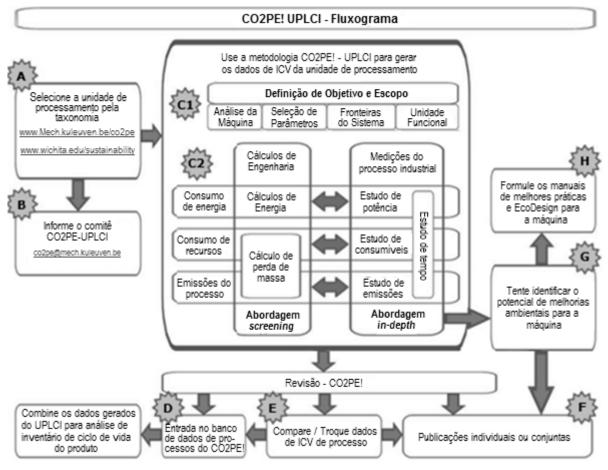


Figura 2.5 - Fluxograma completo UPLCI. Adaptado: KELLENS et al., 2011a.

2.3.2 UPLCI - Definição de objetivo e escopo

A definição de objetivo e escopo (Figura 2.5, item C1) deve ser clara e condizente com a unidade de processamento alvo (DUFLOU et al., 2012b). Kellens et al. (2011a) salienta que o objetivo de um estudo de UPLCI é fornecer informações bem documentadas e dados empíricos para o banco de dados de ICV, os quais futuramente serão usados em estudos de ACV.

Duflou et al. (2012b) salientam que as partes mais importantes a serem consideradas nessa etapa do UPLCI são as fronteiras do sistema, a unidade funcional e o fluxo de referência da unidade de processamento estudada. Após isso, a análise da máquina e os parâmetros do processo são investigados e todas as subunidades consideradas relevantes são identificadas (DUFLOU et al., 2012b).

As fronteiras do sistema são definidas para incluir apenas a fase de uso da unidade de processamento, levando em conta os subsistemas fundamentais para a execução da função da unidade de processamento, bem como seus respectivos fluxos de entrada e saída, e

desconsiderando o restante do ciclo de vida (KELLENS et al., 2011a, 2011b; DUFLOU et al., 2012b).

Por esse motivo, o produto no qual a unidade de processamento atua não entra na avaliação em si, o que interessa são os fluxos necessários para o funcionamento da unidade de processamento e suas respectivas emissões. Logo, as etapas anteriores de fabricação do produto, bem como etapas posteriores, como de uso e de descarte, não são consideradas nas fronteiras do sistema (KELLENS et al., 2011a, 2011b; DUFLOU et al., 2012b). As informações e dados referentes à produção e à manutenção da máquina-ferramenta a qual realiza a unidade de processamento também não são considerados (DUFLOU et al., 2012b).

A Figura 2.6 apresenta um modelo para a definição das fronteiras do sistema alvo de um estudo de UPLCI, formado por dois tipos de entrada e dois tipos de saída.

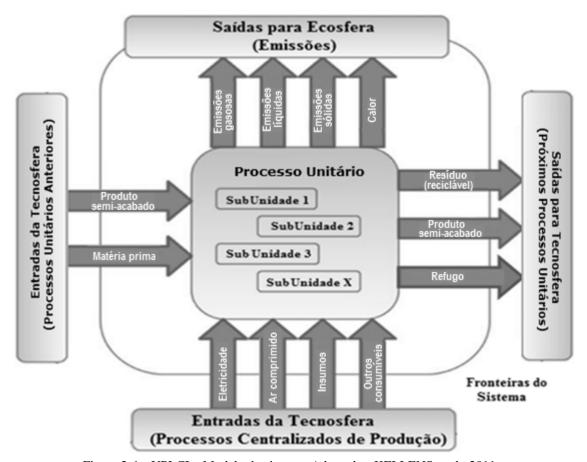


Figura 2.6 - UPLCI - Modelo do sistema. Adaptado - KELLENS et al., 2011a.

O primeiro tipo de entrada é formado pelos fluxos produtos-semi acabados e de materias primas que farão parte da composição final do produto após o processamento. O segunto tipo de entrada é formado por fluxos de energia e materiais necessários para o funcionamento da unidade de processamento e que não farão parte da composição final do produto, como o fluxo

de energia elétrica, de ar comprimido, insumos (e.g. fluído de corte, ferramenta) e outros consumíveis.

Já os fluxos de saída são caracterizados por saídas para ecosfera e saídas para tecnosfera. O primeiro tipo representa as emissões que não são coletadas, logo representam emissões diretas ao ambiente (Ecosfera), como o calor gerado no processo, o volume de ar comprimido usado e aerosois e partiludos em suspensão no ar.

O segundo tipo de fluxo de saída, por sua vez, representa os produtos finais e subprodutos gerados pela unidade de processamento e que são coletados, logo não são emissões diretas ao ambiente. Além do produto principal, os fluxos desse tipo de saída são caracterizadas por subprodutos que serão reutilizados pela própria unidade de processamento, utilizados em outras unidades de processamento ou tratados antes do descarte final.

Uma vez delimitadas as fronteiras do sistema, inicia-se a etapa de definição da unidade funcional e do fluxo de referência.

A unidade funcional deve ser bem definida e mensurável. Kellens et al. (2011a) ressaltam que os bancos de dados de unidade de processamentos de manufatura costumam usar a quantidade de material removido, em peso ou volume, como base para a unidade funcional.

Com relação ao fluxo de referência, propõe-se o uso de 1 segundo de tempo médio de uso da unidade de processamento (DUFLOU et al., 2012b; KELLENS et al., 2011a).

A etapa de seleção de parâmetros define quais parâmetros do processo em estudo que são importantes para sua execução, de acordo com os objetivos propostos ou unidade funcional definida (KELLENS et al., 2011a, 2011b). É importante que essa seleção seja realizada com base em dados sólidos, provenientes da literatura ou de experimentos já realizados (KELLENS et al., 2011a), pois essa etapa pode ter grande influencia no consumo energético e de insumos (DUFLOU et al., 2012b).

Por fim, antes de iniciar a fase de inventário, realiza-se uma investigação na máquina, com o intuito de se identificar os sistemas e subunidades envolvidos (e.g., unidade de resfriamento, posicionamento da ferramenta) (DUFLOU et al., 2012a), a interrelação entre elas, bem como suas as entradas e saídas (KELLENS, 2011a, 2011b).

2.3.3 UPLCI - Análise de Inventário de Ciclo de Vida e Interpretação

A coleta e documentação dos dados de ICV no UPLCI podem ser feitas de maneiras distintas, começando por cálculos teóricos de consumo e emissão e chegando até à aquisição

de dados *in loco* da unidade de processamento, com o uso de instrumentos de medição e sistemas de monitoramento (DUFLOU et al., 2012b).

Kellens et al. (2011a, 2011b) definem basicamente dois tipos de abordagens para a realização da coleta de dados, uma abordagem teórica, denominada de *screening*, e uma abordagem prática, denominada de *in-depth*.

De acordo com Kellens et al. (2011a, 2011b) e Duflou et al. (2012a, 2012b), a abordagem *screening* conta com dados públicos disponíveis e representativos (e.g., manual do fabricante da máquina-ferramenta, manual de manutenção e trabalhos científicos) e cálculos teóricos de engenharia. Em geral, essa abordagem tem uma dependência muito grande da qualidade dos dados fornecidos pelos fabricantes de máquina-ferramenta, bem como do reconhecimento adequado das contribuições dos modos não-produtivos (DUFLOU et al., 2012a).

A abordagem *in-depth*, por sua vez, consiste basicamente na obtenção dos dados reais de consumo e emissões dos modos de operação da unidade de processamento, com o uso de sistemas de monitoramento e equipamentos de medição instalados no equipamento e/ou informações diretas do chão de fábrica, provenientes do operador ou rotinas de manutenção/produção (KELLENS, 2011a, 2011b; DUFLOU et al., 2012a, 2012b). A Figura 2.7 apresenta a estrutura básica dessa abordagem:

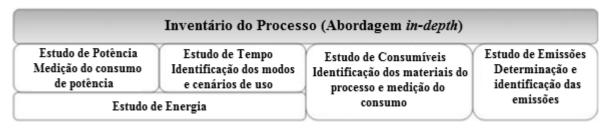


Figura 2.7 – Abordagem aprofundada. Adaptado: KELLENS et al., 2011a.

Conforme mostrado pela Figura 2.7, a abordagem aprofundada é constituída de três estudos distintos: estudo de energia (que engloba o estudo de tempo e o estudo de potência), estudo de consumíveis e estudo de emissões.

O primeiro passo na execução da abordagem *in-depth* é a realização do estudo de tempo. De acordo com Duflou et al. (2012b), o estudo de tempo é um estudo estatístico com o intuito de encontrar os modos de operação da máquina-ferramenta (e seus respectivos parâmetros de processo), bem como a parcela de cada modo no tempo total de uso da mesma.

A Tabela 2.1 apresenta uma lista dos modos de operação mais usados em processos de manufatura discreta (KELLENS et al., 2011a) e serve como base na definição dos modos de operação da unidade de processamento em estudo.

| Tabela 2.1 - Modos d | e operação de uma unidade de r | processamento. Fonte - K | ELLENS et al., 2011a. |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| | | | |

| Identificação | Modo de Operação | | | |
|---------------|------------------|--|--|--|
| A | Inicialização | | | |
| В | Potência máxima | | | |
| С | Potência parcial | | | |
| D | Em espera | | | |
| Е | Encerramento | | | |
| F | Desligado | | | |
| G | Outro(s) modo(s) | | | |

A etapa de definição dos modos de operação é de grande importância, principalmente na definição dos modos produtivos (e.g., os modos com potência parcial ou total) e seus respectivos parâmetros de processo. A variação nos parâmetros de processo resulta em saídas e impactos ambientais diferentes, bem como influência no desempenho da unidade de processamento com relação à precisão geométrica, rugosidade e dureza superficial do produto (AURICH et al., 2013; LI et al., 2012)

Uma vez identificados os modos de operação, realiza-se um estudo temporal estatístico para saber quanto tempo cada modo é acionado durante a operação da máquina.

Após o estudo de tempo, é realizado o estudo de potência, em paralelo com o estudo de consumíveis (e.g., ar comprimido, fluido de corte, ferramenta) para cada modo de operação (KELLENS et al., 2011a; DUFLOU et al., 2012b). Ambos os estudos constituem na aquisição dos dados com o uso de sistemas de monitoramento ou instrumentos *in-process* ou por meio de medições feitas pelo operador da máquina-ferramenta (KELLENS et al., 2011a; DUFLOU et al., 2012b).

Duflou et al. (2012b) ponderam que, embora o fluxo de matéria-prima não represente um impacto induzido pelo processo de manufatura, a quantidade de resíduos produzidos é dependente do processo e por esse motivo são incluídos como consumíveis.

O estudo de emissões, quando necessário, também deve ser realizado em paralelo aos estudos de consumíveis e de potência (KELLENS et al., 2011a). Esse estudo consiste na identificação e no levantamento das emissões produzidas pela unidade de processamento, principalmente se tais emissões indicam alguma contribuição a uma ou mais categorias de impacto relevantes do estudo (KELLENS et al., 2011a).

O estudo de emissões inclui emissões gasosas, líquidas e sólidas, bem como liberação de calor, e deve estar em sintonia com o balanço mássico e energético da unidade de processamento estudada (KELLENS et al., 2011a; DUFLOU et al., 2012b).

2.4 Sistemas de monitoramento para coleta de dados de processos de manufatura

2.4.1 Aquisição de dados in loco na máquina-ferramenta

Vijayaraghavan et al. (2013) argumentam que sistemas automáticos de monitoramento podem ajudar na aquisição de informações contextualizadas do processo de manufatura a partir dos dados brutos (e.g., energia elétrica). Neste sentido, Vijayaraghavan et al. (2013) sugerem que, baseado na complexidade analítica dos processos e sistemas de manufatura, os sistemas de monitoramento devem ser formados por *software* e possuir:

- Monitoramento simultâneo dos dados, com o uso de instrumentos ou equipamentos de medição, referentes aos fluxos da unidade de processamento;
- Dados padronizados;
- Arquitetura escalável para grandes volumes de dados;
- Arquitetura aberta e expansível para dar suporte na análise dos mais diferentes níveis de manufatura, desde o nível de controle de processo, passando pela caracterização e quantificação dos fluxos de cada modo de operação (microplanejamento e macroplanejamento) e, por fim, dando suporte ao planejamento de produção da máquina-ferramenta (Figura 2.8).

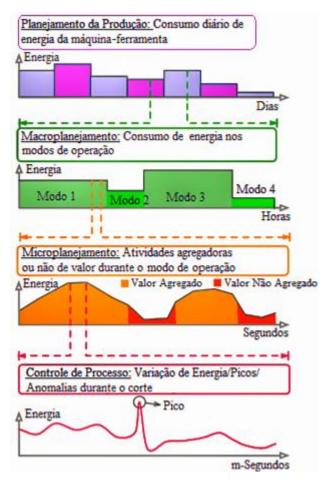


Figura 2.8 – Exemplos de análise com o uso das escalas temporais. Adaptado: VIJAYARAGHAVAN et al., 2013.

Tais sistemas de monitoramento possibilitam tanto a criação de bancos de dados de ICV dinâmicos mais exatos e em tempo real, quanto a criação de estudos de ACVs dinâmicos.

Thorn, Kraus e Parker (2011) afirmam que, e.g., sistemas de monitoramento permitem que os dados de consumo energético das máquinas-ferramentas possam ser continuamente monitorados e acessados por meio de uma interface em software, a qual também poderia estimar de maneira dinâmica e contínua os impactos ambientais relacionados a esse fluxo (energia), possibilitando um maior controle desses impactos.

Shao et al. (2011) avaliam que os dados provenientes das máquinas-ferramentas podem ser adquiridos por diferentes sistemas, baseados em tecnologias de comunicação e gerenciamento como o *Energy Management System* (EMS), o padrão *Object Linking and Embedding for Process Control* (OPC) e o protocolo MTConnect[®].

O EMS possibilita o monitoramento de dados de consumo de energia elétrica da máquina a partir dos dados provenientes de outras fontes, como o controlador lógico

programável ou um servidor OPC (SHAO et al., 2011). Essa tecnologia, contudo, é atribuída apenas ao fluxo de energia elétrica da máquina e não realiza o monitoramento de outros fluxos.

O OPC é uma tecnologia já existente para o monitoramento dos sistemas produtivos e de seus respectivos status (SHAO et al., 2011). O padrão OPC define a comunicação dos dados de processo, alarmes e eventos, possibilitando a troca de dados entre sensores, instrumentos, controladores, *software* de monitoramento e dispositivos (SHAO et al., 2011). Contudo, o OPC, por si só, não possui interface padrão disponível para comunicação *web* (TORRISI e OLIVEIRA, 2008).

Nesse sentido, Torrisi e Oliveira (2008) desenvolveram um protocolo baseado no OPC com interface *web* denominado CyberOPC. A partir de um servidor OPC e tecnologias *web* comercialmente disponíveis, como o XML (*Extensible Mark-up Language*) e o HTML (*Hypertext Mark-up Language*), o CyberOPC se apresenta como uma alternativa viável de padronização e comunicação de dados entre máquinas ferramentas com interface para a *web*.

Contudo, com poucos casos de aplicação bem sucedidos e poucos desenvolvedores e apoiadores, desde 2011 não houve mais pesquisas e aperfeiçoamentos no desenvolvimento desse protocolo (CYBEROPC, 2015), desencorajando a aplicação desse tipo de tecnologia hoje em dia.

Por fim, o protocolo MTConnect[®], assim como o padrão CyberOPC, também padroniza a comunicação e organização dos dados de processo a partir de tecnologias *web* comercialmente disponíveis como o XML e o HTML (ASSOCIATION FOR MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2011). Mas, diferentemente, do CyberOPC, o protocolo MTConnect[®] tem sido cada vez mais utilizado na padronização e organização da comunicação de dados no chão de fábrica e possui mais de 140 apoiadores e desenvolvedores pelo mundo (MTCONNECT INSTITUTE, 2015).

2.4.2 Protocolo MTConnect®

De acordo com Vijayaraghavan et al. (2008) e a *Association for Manufacturing Technology* – AMT (2011), o MTConnect[®] é um padrão livre de royalties, extensível e que define uma estrutura e uma linguagem comum para comunicação em equipamentos de manufatura, além de habilitar a interoperabilidade ao permitir acesso aos dados de manufatura por meio de interfaces padronizadas.

Como protocolo, ele não compete com os protocolos já existentes, mas sim os complementa, aumentando a capacidade de aquisição de dados das unidades de processamento e possibilitando um ambiente *plug-and-play* com baixo custo de implementação (SOBEL, 2012). Vijayaraghavan et al. (2013) ressaltam ainda que o protocolo permite com que os dados do equipamento sejam organizados de maneira lógica, sem a necessidade de serem condicionados por interfaces físicas.

O mecanismo de comunicação é baseado na linguagem XML e descreve a estrutura da máquina-ferramenta, juntamente com seus dados e o momento da coleta (*timestamp*) (ASSOCIATION FOR MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2011; VIJAYARAGHAVAN et al., 2013).

A linguagem XML, sigla para *Extensible Markup Language*, é um formato de texto muito simples e flexível derivado do *Standard Generalized Markup Language* – SGML, este definido pela norma ISO 8879 (WORLD WIDE WEB CONSORTIUM, 2014). Inicialmente desenvolvida para se adequar aos desafios da publicação eletrônica em larga escala, a linguagem XML também participa, de forma crescente, na troca de uma grande variedade de dados na Internet e outras plataformas (WORLD WIDE WEB CONSORTIUM, 2014). Em linhas gerais, sua finalidade principal é a facilitar o compartilhamento de informações com o uso da Internet.

A AMT (2011) divide o protocolo MTConnect[®] nos seguintes componentes:

- *Device* (**Dispositivo**): Equipamento capaz de realizar uma operação e fornecer dados a respeito dela;
- *Adapter* (**Adaptador**): Software que transforma os dados adquiridos no *Device* em dados disponíveis para o *Agent*;
- Agent (Agente): Software que gerencia os dados coletados no(s) Adapter(s), organizando-os de acordo com o protocolo MTConnect[®], em linguagem XML. É o componente mais importante, pois realiza a organização e padronização dos dados, além de disponibilizá-los para a rede;
- Client (Cliente): O Client, em termos gerais, é o responsável pela requisição dos dados disponibilizados pelo Agent, ou seja, ele é o componente que utilizará os dados padronizados.

Além dos componentes descritos acima, o padrão MTConnect[®] também propõe as possíveis arquiteturas de funcionamento para utilização do protocolo, com a localização de cada componente no sistema, bem como a forma de comunicação entre eles.

A Figura 2.9 apresenta quatro arquiteturas diferentes de implementação do protocolo. De acordo com Rondon (2010), a arquitetura mostrada no item "a)" da Figura 2.9 possui o *Adapter* e o *Agent* já integradas ao dispositivo, em outras palavras, esse *Device* já é integralmente compatível com o protocolo MTConnect® desde fábrica e não necessita de modificações. A arquitetura "b)" mostra um *Adapter* já integrado ao *Device*, mas o desenvolvimento do *Agent* se faz necessário para a implementação do sistema. As arquiteturas "c)" e "d)" mostram *Devices* incompatíveis ou *Devices* padrão Legacy. Nesses casos, é necessário o desenvolvimento tanto do *Adapter*, quanto do *Agent* (RONDON, 2010).

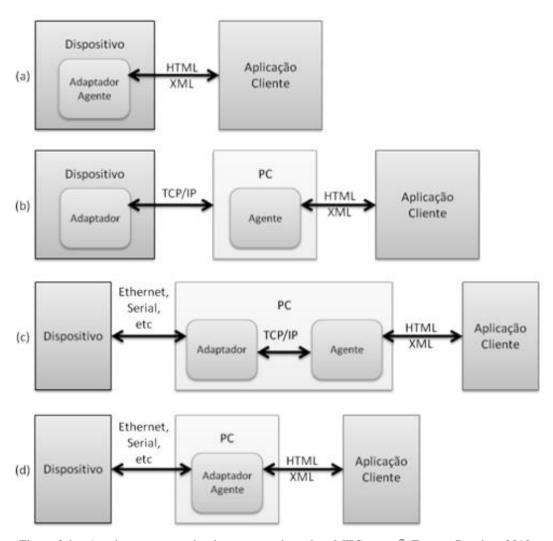


Figura 2.9 – Arquiteturas para a implementação do padrão MTConnect®. Fonte – Rondon, 2010.

A partir das arquiteturas e estruturas do protocolo, é possível interligar e coletar os dados de praticamente todos os equipamentos e sistemas de monitoramento presentes no chão de fábrica, de maneira lógica, organizada e numa linguagem comum, possibilitando a criação de bancos de dados de ICV de uma ou mais máquinas, de maneira simultânea, dinâmica e disponível via *web*.

2.5 Processo de retificação cilíndrica externa de mergulho: definições, aspectos ambientais e oportunidades de melhoria de desempenho

2.5.1 Definição, parâmetros e estrutura

A retificação é um processo abrasivo com arestas de geometria não-definida para remoção de material por meio da formação de cavaco e é usado principalmente para acabamento superficial de peças, devido às tolerâncias restritas e às rugosidades baixas que esse tipo de processo consegue proporcionar (ARAÚJO, 2010; AURICH et al., 2013; KOPAC e KRAJNIK, 2006; LI et al., 2012; LINKE e OVERCASH, 2012, MALKIN e GUO, 2008b).

Segundo Malkin e Guo (2008b), a retificação cilíndrica externa de mergulho consiste na atuação de um rebolo com diâmetro d_s e velocidade periférica v_s que avança com velocidade radial v_f a uma peça cilíndrica de diâmetro d_w e velocidade periférica v_w , formando um comprimento de contato l_c com a peça e removendo material desta até uma profundidade de corte a_e . A Figura 2.10 apresenta uma representação desse processo.

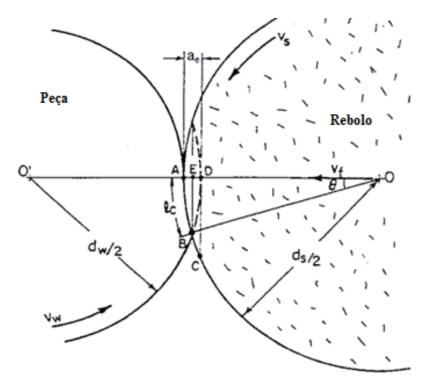


Figura 2.10 – Geometria e cinemática da retificação cilíndrica externa de mergulho. Adaptado - MALKIN E GUO, 2008b.

A partir da Figura 2.10 é possível visualizar os parâmetros base do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho (MALKIN e GUO, 2008b):

- $\mathbf{v}_{s} = \text{Velocidade de corte } [\text{m/s}];$
- $\mathbf{d}_{s} = \text{Diâmetro do rebolo [mm]};$
- $\mathbf{v}_{\mathbf{w}} = \text{Velocidade periférica da peça [m/min]};$
- $\mathbf{d}_{\mathbf{w}} = \text{Diâmetro da peça [mm]};$
- $\mathbf{v_f} = \text{Velocidade de avanço radial } [\text{mm/min}];$
- **a**_e = profundidade de corte [µm];
- l_c = comprimento de contato [mm].

Além dos parâmetros acima, também são relevantes para o processo a largura de usinagem b_w e a taxa específica de remoção de material Q^{\prime}_w .

A taxa específica de remoção de material Q'_w é um parâmetro de desempenho produtivo e representa o volume de material removido por unidade de largura do rebolo por tempo (AURICH et al., 2013; LINKE e OVERCASH, 2012; MACHADO et al., 2009; OLIVEIRA, 2001). Este parâmetro também pode ser definido como o produto da velocidade de avanço radial v_f pelo perímetro da seção transversal da peça, ou seja, pelo diâmetro da peça d_w multiplicado por π .

De acordo com Linke e Overcash (2012), a retificadora possui muitas subunidades e elementos auxiliares à máquina-ferramenta. Sena (2007) as descreve em mais detalhes e afirma que uma retificadora pode ser dividida nos seguintes elementos básicos e auxiliares:

- Componentes estruturais: guias, acionamentos, sistemas de medição e controle
 (como o Comando Numérico Computadorizado CNC e o Controlador Lógico
 Programável CLP), dispositivos de segurança, sistemas hidráulicos ou
 pneumáticos, fiações, tubulações, sistemas de coleta e remoção de cavacos e
 fluidos;
- Sistemas de fixação: Fixação do rebolo e da peça;
- Sistemas de avanço: Acionamento elétrico, conversor de movimento e sistema de medição;
- **Sensores de posição:** Encoders, sensores de emissão acústica e sensores indutivos ou resistivos;
- Trocadores de calor: Principalmente o sistema de resfriamento de óleo hidráulico.

Vale ressaltar que, dependendo do tipo da retificadora (e.g., retificadora manual, retificadora CNC) e do tipo de aplicação, as subunidades e elementos acima apresentados por Sena (2007) podem ou não estar contidos na máquina-ferramenta estudada. Dessa forma, a caracterização das subunidades e elementos de uma retificadora deve ser realizada de maneira isolada, de acordo com seu tipo e aplicação.

2.5.2 Aspectos ambientais do processo

A preocupação com os aspectos ambientais relacionados ao processo de retificação é cada vez maior e vem ganhando destaque tanto na indústria quanto no meio acadêmico (LINKE e OVERCASH, 2012).

Aurich et al. (2013) afirmam que características indesejáveis do processo, como alta energia específica (energia consumida por volume de material removido), necessidade do uso de fluido de corte e consequentes efeitos negativos na saúde do trabalhador geram uma situação problemática ao processo, incentivando a sua substituição por outros processos, mesmo que lentamente.

A questão energética é fundamental nos processos de manufatura e a eficiência energética é um dos seus principais indicadores de sustentabilidade, pois influencia tanto no

pilar ambiental (devido à dependência de combustíveis fósseis para a geração de energia), quanto no pilar econômico (custo da energia). Por esse motivo, pesquisadores iniciam a análise do ciclo de vida da retificação pelo do consumo energético (LINKE e OVERCASH, 2012).

A dissipação da energia consumida pela retificação também é um ponto crítico. De acordo com Malkin e Guo (2007) e Kopac e Krajnik (2006), virtualmente, toda a energia consumida na operação é dissipada como calor na zona de trabalho (onde há a interação do rebolo com a peça).

Para que esse calor não provoque dano térmico à peça, a diminuição da temperatura na zona de trabalho se faz necessária, tornando crucial o uso de fluido de corte no processo de retificação (KOPAC e KRAJNIK, 2006; LINKE e OVERCASH, 2012; MALKIN e GUO, 2007).

Além de levar o calor gerado na operação para fora da zona de trabalho, impedindo assim o dano térmico da peça, o fluido de corte também funciona como lubrificante do processo, reduzindo a fricção entre o rebolo e a peça e melhorando o acabamento superficial do produto retificado (AURICH et al., 2013; KOPAC e KRAJNIK, 2006). Além disso, o fluido de corte também realiza a remoção do cavaco da zona de trabalho, auxilia na limpeza do superficial do rebolo e protege a peça contra corrosão (AURICH et al., 2013; KOPAC e KRAJNIK, 2006).

Os fluidos de corte podem ser considerados uma combinação de água, de lubrificante (óleo mineral ou composto sintético) e de aditivos, formando uma emulsão ou dispersão, na qual a água serve como refrigerante e o lubrificante serve para reduzir a fricção entre o rebolo e a peça (AURICH et al., 2013; CLARENS et al., 2008; LINKE e OVERCASH, 2012). Há também o uso de óleos integrais (sem água) como fluido de corte (CLARENS et al., 2008; LINKE e OVERCASH, 2012).

O uso de fluido de corte na retificação, contudo, vem acompanhado de alguns efeitos colaterais negativos, principalmente relacionados às questões ambientais. De acordo com Clarens et al. (2008), uma pesquisa feita com cerca de 150 artigos sobre fluido de corte identificou a toxidade ecológica, a degradação hídrica e as emissões fugitivas de fluido como problemas chave desse recurso.

Oliveira e Alves (2007) salientam também o uso do fluido de corte a efeitos nocivos para a atmosfera (dentro e fora do chão de fábrica), a saúde ocupacional, a degradação do solo e a necessidade de disposição correta do fluido após seu ciclo de uso.

De acordo com Howes, Tönshoff e Heuer (1991) os fluidos de corte seguem as mesmas legislações referentes a resíduos tóxicos e perigosos, logo, são resíduos que necessitam de tratamento especial para disposição, o que acarreta em custos elevados de tratamento. Por esse

motivo, ações em prol da recuperação, filtragem, reciclagem e do reuso do fluido de corte e dos subprodutos nele encontrados são fundamentais na redução de custos e emissões ao meio ambiente.

Além disso, o uso de fluido de corte resulta na necessidade de sistemas de filtração para a retirada do cavaco gerado durante a retificação, de sistemas de exaustão para a retirada da névoa e vapores gerados durante a aplicação do fluido e do próprio sistema de aplicação do fluido de corte (AURICH et al., 2013; LINKE e OVERCASH, 2012; OLIVEIRA e ALVES, 2007).

Howes, Tönshoff e Heuer (1991) salientam que sistemas de filtragem do fluido de corte são fundamentais na manutenção das suas propriedades funcionais e para a redução substancial do seu consumo. Dyer, Ngo e Wivagg (2007) e Howes, Tönshoff e Heuer (1991) apresentam diferentes sistemas de filtragem, como a filtragem por gravidade, a separação magnética e a separação hidrociclônica.

A filtragem gravitacional realiza a remoção das partículas do fluido de corte com o uso de um filtro, geralmente celulósico (HOWES, TÖNSHOFF e HEUER, 1991). Apesar desse sistema não demandar um alto consumo de energia elétrica, o filtro usado pode gerar um grande passivo a ser descartado como lixo tóxico.

A separação magnética é um método muito interessante de filtragem, pois nele, um imã realiza a remoção apenas das partículas metálicas do fluido de corte, as quais podem ser destinadas para reciclagem, gerando renda a partir da venda do metal separado e reduzindo a geração e disposição de resíduos do processo (DYER, NGO e WIVAGG, 2007). Esse processo, contudo, não separa as partículas não-metálicas do fluido, como as partículas abrasivas ou ligantes do rebolo. Assim, em processos de retificação, seu uso exclusivo como sistema filtrante se mostra ineficaz, resultando na necessidade do uso de outro tipo de sistema filtrante em conjunto.

No sistema de filtragem hidrociclônica o fluido de corte é bombeado tangencialmente em um vaso cônico, dimensionado para criar um ciclone (HOWES, TÖNSHOFF e HEUER, 1991). Nesse processo, as partículas sólidas são centrifugadas para as paredes do vaso e são removidas por gravidade, enquanto o fluido de corte limpo é removido pelo centro, por meio do vácuo criado a partir do ciclone.

Apesar de não gerarem passivos residuais adicionais (e. g., filtros usados), ambos os sistemas de separação magnética e hidrociclônica consumem quantidades significativas de energia elétrica.

Nesse sentido, Aurich et al. (2013) salientam que o consumo energético relacionado ao uso de fluidos de corte nos processos de usinagem, e com os sistemas a ele atrelados como filtragem e exaustão, pode representar até 32% de todo o consumo energético da planta manufatureira.

Outro ponto de grande relevância do processo de retificação, tanto na questão ambiental quanto no desempenho, é o rebolo. O rebolo é a ferramenta de corte utilizada na retificação e é formado basicamente por um sistema ternário: ligante, grãos abrasivos e poros (AURICH et al., 2013; LINKE e OVERCASH, 2012; MACHADO et al., 2009; MALKIN e GUO, 2008a).

O ligante é responsável por reunir os grãos abrasivos, os quais entram em contato com a peça a ser usinada para realizar a remoção de cavaco (ARAÚJO, 2010). A seleção do material ligante é um fator muito importante na especificação de um rebolo, uma vez que este determina a resistência e a máxima velocidade de operação da ferramenta.

O grão abrasivo é componente principal do rebolo, pois é o responsável direto pela operação de corte e formação de cavaco (ARAÚJO, 2010; KOPAC e KRAJNIK, 2006; LINKE e OVERCASH, 2012; MALKIN e GUO, 2008a).

Já os poros representam a ausência de material no rebolo e, de acordo com Machado et al. (2009) e Malkin e Guo (2008a), são usados para o alojamento do fluido de corte e de cavacos durante a operação de retificação.

Os rebolos podem ser classificados de duas formas: convencionais e de alta performance (MALKIN e GUO, 2008a). Os rebolos convencionais são formados, em sua totalidade, por estrutura abrasiva e costumam utilizar abrasivos convencionais como o carboneto de silício (SiC) e o óxido de alumínio (Al₂O₃).

Os rebolos de alta performance, por sua vez, consistem em um corpo base (metálico ou sintético) e uma camada abrasiva, composta por superabrasivos, como o diamante e o nitreto cúbico de boro (cBN) (AURICH et al., 2013, MALKIN e GUO, 2008a).

Os superabrasivos são assim denominados por serem mais duros, mais resistentes ao desgaste e por terem tempos de vida maiores, se comparados com os abrasivos convencionais (KOPAC e KRAJNIK, 2006; MALKIN e GUO, 2008a). Por causa da dureza mais elevada, os superabrasivos conseguem alcançar maiores velocidades de corte e, consequentemente, níveis superiores de acabamento superficial (LI et al., 2012).

O uso do rebolo e seu desgaste são um ponto de grande relevância ao processo. Li et al. (2012) apontam que as condições topográficas da superfície do rebolo, fortemente influenciadas pelo desgaste durante o uso, refletem no acabamento superficial da peça usinada. Por esse motivo, para que as características topográficas desejadas do rebolo sejam mantidas e o

acabamento superficial desejado da peça usinada alcançado, o rebolo precisa ser periodicamente dressado (AURICH et al., 2013; LI et al., 2012; MALKIN e GUO, 2008c).

A dressagem é remoção da camada superficial do rebolo com o propósito de preparar e recuperar sua macrogeometria (perfilagem) e microgeometria (afiação) (MALKIN e GUO, 2008c). Apesar de se um processo não-produtivo (uma vez que não há retificação de peça), uma estratégia sensata e eficiente de dressagem proporciona a manutenção das características desejáveis de corte do rebolo, sem que haja desperdício de seu material abrasivo, nem de tempo de processo com dressagens desnecessárias (AURICH et al., 2013; LINKE e OVERCASH, 2012).

De acordo com Malkin e Guo (2008d), uma forma de se avaliar as estratégias de dressagem, bem como o desempenho de um rebolo e seu tempo de vida, é por meio da Razão G (Equação 2):

$$G = \frac{V_W}{V_S} \tag{2}$$

Onde:

- **G** = Relação G [-];
- $V_w = Volume de material removido da peça [mm³];$
- V_s = Volume de rebolo desgastado [mm³].

Aurich et al. (2013) destacam que rebolos de alta performance, como os de cBN, podem chegar a ter relações G mil vezes maiores que rebolos convencionais, como os de Al₂O₃, mostrando a superioridade desse tipo de rebolo com relação a desempenho e tempo de vida. Contudo, Linke e Overcash (2012) fazem uma ressalva e afirmam que, apesar de desejável, valores elevados de G podem gerar maior concentração de energia na área de trabalho, o que aumenta a possibilidade de dano térmico à peça.

Com relação aos impactos ambientais diretamente relacionados à fabricação e ao uso do rebolo, Linke e Overcash (2012) relatam que o mesmo dificilmente é considerado nos estudos de ACV, uma vez que há pouca informação de ICV relacionados à fabricação do rebolo e às suas emissões. Estudos recentes, como os de Aurich et al. (2013) e de Kirsch et al. (2014), já apresentam dados de ICV relacionados à energia incorporada durante a fabricação de alguns rebolos de Óxido de Alumínio (Al₂O₃) e de Nitreto Cúbico de Boro (cBN).

De acordo com Aurich et al. (2013), outro ponto relevante é sobre o fim de vida dos rebolos. Os rebolos convencionais em sua maioria acabam descartados como lixo comum, lixo

especial ou incinerados, sem documentação correta das possíveis emissões e seus respectivos impactos ambientais potenciais (AURICH et al. 2013; LINKE e OVERCASH, 2012). Linke e Overcash (2012) relatam ainda que, em alguns casos, rebolos convencionais podem ser triturados e usados como material de enchimento para asfalto.

Além das possibilidades acima, os rebolos de alta performance de corpo metálico podem ser reutilizados, removendo-se a camada abrasiva por meio de ataque químico e substituindo-a por uma nova (AURICH et al., 2013; LINKE e OVERCASH, 2012).

Com relação ao consumo do rebolo durante as operações de retificação e de dressagem, é muito difícil e custoso realizar a separação do resíduo sólido gerado na operação, ainda mais porque o abrasivo, o ligante e o cavaco estão contaminados por fluido de corte (LINKE e OVERCASH, 2012). Este fato praticamente inviabiliza a reciclagem ou o reuso do abrasivo (LINKE e OVERCASH, 2012).

Mesmo assim, Linke e Overcash (2012) avaliam que há potencial na recuperação do material abrasivo, principalmente no caso dos superabrasivos que são mais caros.

2.5.3 As possibilidades do processo na melhoria do ciclo de vida do produto

Apesar da influência ambiental negativa do processo, a retificação possui um grande potencial na redução da influência ambiental total de vários tipos de produtos, pois, em comparação a quaisquer outros tipos de processos de manufatura, ela é capaz de proporcionar às peças propriedades superficiais superiores (AURICH et al., 2013).

Essa superioridade nas características superficiais impacta na vida útil, eficiência funcional, energética e material do produto retificado (LINKE e OVERCASH, 2012; AURICH et al., 2013).

Kirsch et al. (2014) relatam que em produtos expostos a atrito, como guias e rolamentos, o acabamento superficial refinado resulta em menos atrito, menos perdas de energia e mais tempo de vida às peças, possibilitando a melhoria energética e ambiental total do produto. Aurich et al. (2013) apresentam situações similares com caixas de câmbio e componentes de turbinas eólicas; nestes, diferentemente dos outros exemplos apresentados, o ganho ambiental com a redução do atrito mecânico entre as peças não está associado ao consumo menor de energia, mas sim à maior produção energética do sistema eólico.

Nesse cenário, a realização de um esforço maior na fase de manufatura da peça se mostra desejável, desde que haja como consequência o aumento do tempo de vida e eficiência

funcional do produto, que acaba resultando num impacto ambiental potencial negativo significativamente menor (ou impacto ambiental potencial positivo significativamente maior) do ciclo de vida do produto (LINKE e OVERCASH, 2012; AURICH et al., 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As definições e informações relacionadas à modelagem da unidade de processamento de retificação cilíndrica externa de mergulho com o uso da metodologia UPLCI, bem como os procedimentos estabelecidos para a execução da fase experimental desse trabalho são descritos nesse capítulo, de acordo com os objetivos estabelecidos no item 1.2.

3.1 Função, unidade funcional e fluxo de referência

A função da unidade de processamento de retificação cilíndrica externa é proporcionar acabamento superficial e geométrico à peça, por meio da retirada de material da superfície da peça por ação abrasiva da ferramenta de corte (rebolo).

A unidade funcional foi definida como a remoção por meio de um rebolo previamente dressado de 3000 mm³ de material de uma peça cilíndrica previamente torneada, feita com a liga Inconel 751, com 150 mm de comprimento e 28,30 mm de diâmetro (d_w); e que resulte em uma rugosidade aritmética média (R_a) inferior a 1 μm após o processo.

Esse volume de remoção de material é relativamente alto para uma retificação convencional, contudo ele foi utilizado para que fosse possível visualizar o desgaste dos rebolos usados após o processo. A rugosidade Ra de 1 µm foi definida porque é um grau de qualidade superficial dentro do intervalo esperado para a retificação (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999) e que pode, em alguns casos, ser alcançado mesmo com os grãos abrasivos desgastados.

O fluxo de referência foi definido, seguindo a sugestão da metodologia UPLCI (Kellens et al., 2011a, 2011b), como um segundo de tempo de produtivo da máquina, ou seja, quando ela esteja realizando a usinagem.

3.2 Fronteiras do sistema

Como determina a metodologia UPLCI (Kellens et al., 2011a, 2011b), foram considerados apenas os insumos e emissões da unidade de processamento, sem considerar as outras etapas de produção, uso e fim de vida do produto.

As principais entradas e saídas identificadas para a unidade de processamento em estudo foram:

- Entradas da Tecnosfera (Peça e Outros materiais):
 - o Peça Torneada (PEÇA_T).
- Entradas da Tecnosfera Utilidades e Insumos:
 - Ar Comprimido (AC);
 - o Energia Elétrica (ELET);
 - o Rebolo (RB);
 - o Fluido de Corte (FC).
- Saídas para a Ecosfera:
 - \circ Ar (AR);
 - o Ruído Sonoro (SOM);
 - o Calor (CAL).
- Saídas para a Tecnosfera:
 - Rebolo Consumido (RBC);
 - o Fluido de Corte Perdido (FCP);
 - Peça Retificada (PEÇA_R);
 - o Cavaco (CAV).

A Figura 3.1 apresenta uma representação das fronteiras do sistema, com suas entradas e saídas:

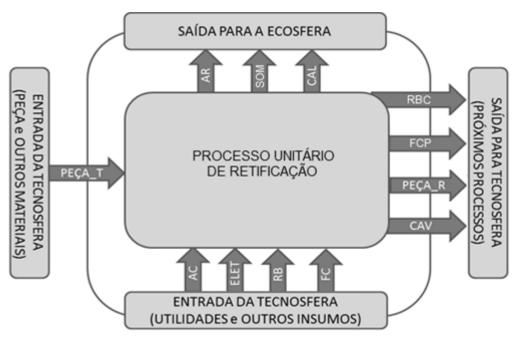


Figura 3.1 – Entradas e saídas da unidade de processamento de retificação.

3.3 Análise da máquina

A máquina-ferramenta estudada foi uma retificadora cilíndrica CNC Zema Numérika G 800-HS (Figura 3.2), com alimentação elétrica trifásica de 220V e alimentação de ar comprimido a 7 bar; localizada no Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).



Figura 3.2 - Unidade de retificação CNC ZEMA Numérika G 800-HS.

A partir do estudo da máquina-ferramenta foram identificadas nove subunidades distintas, as quais são acionadas ou desligadas dependendo do modo de operação vigente:

- **Subunidade primária:** Formada pela iluminação da máquina, computador, controlador numérico, sensores e instrumentos de medição;
- Subunidade hidráulica: Essa subunidade é responsável por suprir a demanda de óleo pressurizado nos mancais rotativos, nas guias hidrostáticas e no cabeçote contraponto. Ela é composta por bomba de palhetas, reservatório, válvulas servoacionadas e filtro.
- Subunidade de resfriamento: Essa subunidade é constituída por um compartimento de água gelada (capacidade de 8000 kcal/h) e de três trocadores de calor, sendo dois deles para o sistema hidráulico e um para o sistema de bombeamento de fluido de corte. A temperatura e pressão da água gelada também devem ser monitoradas por sensores e controladas por sistemas automáticos da máquina. A água gelada é utilizada ainda como fluido de resfriamento do motor de acionamento do eixo porta-rebolo. Uma bomba de recalque é utilizada ainda para garantir o escoamento da água gelada nos trocadores de calor destinados ao resfriamento do óleo. Seu funcionamento é intermitente, baseado no valor de referência para a temperatura de saída de água gelada, com impacto direto no consumo energético e no percentual de utilização do equipamento.
- Subunidade de movimentação dos carros transversal e longitudinal: é responsável por executar a movimentação dos carros transversal e longitudinal, acionados pelo conjunto servo-motor, encoder e fusos de esferas recirculantes;
- **Subunidade de acionamento do rebolo:** Composta de cabeçote porta-rebolo, inversor de frequência e motor elétrico de 37KW para acionamento direto do eixo porta-rebolo;
- Subunidade de acionamento do cabeçote porta-peças: Composta de cabeçote
 porta-peça, dotado de servo-motor e encoder de posicionamento; responsável pelo
 movimento de giro da peça;
- Subunidade de bombeamento de fluido de corte: Subunidade de bombeamento
 e aplicação composta de bomba de alta vazão, elemento filtrante posicionado sobre
 esteira móvel acionada por motor elétrico e bocal de aplicação de fluido de corte;

- Subunidade de exaustão: Composta de motor elétrico, pás e filtro, responsável
 pela remoção e filtração da névoa de fluido de corte produzida no interior da
 retificadora durante a usinagem com aplicação de fluido de corte;
- Subunidade de acionamento do dressador rotativo: Composta de motor elétrico e um disco diamantado.

3.4 Modos de operação

Os modos de operação foram definidos de acordo com as diretivas da metodologia UPLCI (Kellens et al., 2011a), bem como com as diferentes configurações estabelecidas para a fase de ICV da unidade de processamento.

Para averiguar tanto o desempenho ambiental como de produção em diferentes configurações de uso, foram utilizados dois tipos de rebolo, um convencional com ligante vitrificado e abrasivo Al₂O₃ (especificação 55A46-1-K8VC1) e outro superabrasivo com corpo metálico, ligante vitrificado e abrasivo cBN (especificação 8B126 K150 VT2).

Além disso, cada rebolo foi submetido a três configurações de trabalho distintas, variando-se a taxa específica de remoção Q'_w. A Tabela 3.1 a presenta as três configurações distintas de trabalho para o rebolo de cBN e o rebolo de Al₂O₃.

| Config. | Q'w [mm³/mm· min] | v _s [m/s] | d _s | v _w | d _w | v _f [mm/min] | a _e [μm] | b _w |
|--|-------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------|-----------------------|
| cBN_Q'w50 | 50 | 80 | 400 | 17,781 | 28,300 | 0,562 | 16900 | 15 |
| cBN_Q'w100 | 100 | 80 | 400 | 17,781 | 28,300 | 1,125 | 16900 | 15 |
| $cBN_Q'_w150$ | 150 | 80 | 400 | 17,781 | 28,300 | 1,687 | 16900 | 15 |
| Al ₂ O ₃ _Q' _w 10 | 10 | 45 | 475 | 17,781 | 28,300 | 0,112 | 16900 | 15 |
| $Al_2O_3_Q'_w50$ | 50 | 45 | 475 | 17,781 | 28,300 | 0,562 | 16900 | 15 |
| $Al_2O_3_Q'_w100$ | 100 | 45 | 475 | 17,781 | 28,300 | 1,125 | 16900 | 15 |

Tabela 3.1 – Parâmetros de retificação para os rebolos de cBN e Al₂O₃.

As taxas específicas de remoção Q'w foram definidas de acordo as faixas de trabalho para o rebolo de cBN (cBN_Q'w50, cBN_Q'w100 e cBN_Q'w150). No caso do rebolo de Al₂O₃ utilizou-se uma taxa específica de remoção padrão (Al₂O₃_Q'w10) e duas taxas específicas de

remoção similares ao rebolo de cBN (Al₂O₃_ Q'_w50 e Al₂O₃_ Q'_w100) para critério de comparação entre os desempenhos dos rebolos.

As velocidades de corte v_s foram definidas de acordo com o tipo de rebolo: 80 m/s para o rebolo superabrasivo de cBN e 45 m/s para o rebolo convensional de Al_2O_3 .

A velocidade periférica da peça $v_{\rm f}$ foi definida a partir do diametro da peça $d_{\rm w}$ e da rotação da peça definida em 200 rot/min.

Assim, por meio das subunidades identificadas na unidade de processamento e das configurações de trabalho, foi possível definir onze modos de operação da máquina-ferramenta:

- Desligado: Modo de operação no qual todas as subunidades estão desligadas, ou seja, sem operar;
- Inicialização: Modo de operação no qual apenas a subunidade primária está operando e energizada;
- Espera: Modo de operação no qual o equipamento está pronto para começar a
 operar o rebolo e/ou o dressador rotativo. Subunidade primária, hidráulica, de
 resfriamento e de bombeamento de fluido de corte e operando, este último
 operando em modo circulação (sem aplicação de fluido). Subunidades de
 movimentação dos carros transversal e longitudinal, acionamentos do rebolo, do
 cabeçote porta-peças, da exaustão e do dressador rotativo inoperantes, porém
 energizados;
- **Dressagem de rebolos convencionais:** Todas as subunidades em funcionamento, exceto a de acionamento do dressador rotativo e a do cabeçote porta-peças;
- **Dressagem de rebolos de cBN:** Todas as subunidades em funcionamento, exceto a do cabeçote porta-peças;
- Corte com rebolo cBN e Q'w50: Retificação da peça com o rebolo de cBN e configuração cBN_Q'w50 (conforme Tabela 3.1). Todas as subunidades em funcionamento, exceto a do acionamento do dressador rotativo;
- Corte com rebolo cBN e Q'w100: Retificação da peça com o rebolo de cBN e configuração cBN_Q'w100 (conforme Tabela 3.1). Todas as subunidades em funcionamento, exceto a do acionamento do dressador rotativo;
- Corte com rebolo cBN e Q'w150: Retificação da peça com o rebolo de cBN e configuração cBN_Q'w150 (conforme Tabela 3.1). Todas as subunidades em funcionamento, exceto a do acionamento do dressador rotativo;

- Corte com rebolo Al₂O₃ e Q'_w10: Retificação da peça com o rebolo de Al₂O₃ e configuração Al₂O₃_Q'_w10 (conforme Tabela 3.1). Todas as subunidades em funcionamento, exceto a do acionamento do dressador rotativo;
- Corte com rebolo Al₂O₃ e Q'_w50: Retificação da peça com o rebolo de Al₂O₃ e configuração Al₂O₃_Q'_w50 (conforme Tabela 3.1). Todas as subunidades em funcionamento, exceto a do acionamento do dressador rotativo;
- Corte com rebolo Al₂O₃ e Q'_w100: Retificação da peça com o rebolo de Al₂O₃ e configuração Al₂O₃_Q'_w100 (conforme Tabela 3.1). Todas as subunidades em funcionamento, exceto a do acionamento do dressador rotativo.

3.5 Inventário de Ciclo de Vida: abordagem in-depth

A aquisição de dados foi embasada pela abordagem *in-depth* do UPLCI, com o uso de instrumentos e de equipamentos de medição instalados na máquina para a coleta *in loco* e em tempo real dos principais fluxos de entrada e saída.

3.5.1 Organização e aquisição dos dados

A preocupação com a organização e padronização dos dados coletados na etapa de ICV é fundamental, uma vez que eles podem ser usados na criação de bancos de dados de inventário da unidade de processamento.

Por esse motivo, escolheu-se lançar mão da plataforma MTConnect[®] para direcionar e gerenciar essa organização e padronização, uma vez que ela é uma plataforma comum de comunicação e organização de dados de máquinas-ferramenta.

A partir das arquiteturas identificadas pela Figura 2.9, escolheu-se estrutura "c)" como base para implementação do sistema de aquisição e organização dos dados, devido à necessidade de desenvolvimento de um *Adapter* próximo aos instrumentos de aquisição da máquina (*Device*) e a conveniência da implementação do *Agent* no servidor do LAPRAS.

A Figura 3.3 apresenta a estrutura proposta para aquisição, comunicação, organização e armazenamento dos dados.

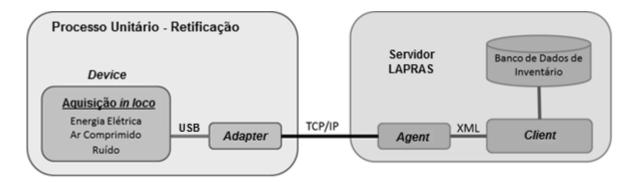


Figura 3.3 – Estrutura de aquisição, comunicação, organização e armazenamento dos dados, baseado no padrão MTConnect®. Adaptado – FILLETI et al., 2014.

A partir da identificação das fronteiras e fluxos do processo, definiu-se a aquisição *in loco* para dois fluxos de entrada (energia elétrica e ar comprimido) e uma emissão (ruído sonoro). Nesse contexto, o sistema de aquisição dinâmico foi formado por três instrumentos distintos: um medidor multivariável elétrico calibrado (energia elétrica), um medidor de vazão de ar calibrado (ar comprimido) e um decibilímetro calibrado (ruído sonoro). Os fluxos faltantes serão abordados futuramente neste trabalho (fluido de corte, calor, ar, rebolo e cavaco).

O medidor multivariável elétrico utilizado foi o transdutor de estado sólido UPD 600, da Ciber do Brasil. De acordo com Malkin e Guo (2007), esse tipo de instrumento é uma opção barata e eficiente para aquisição dos dados de potência e energia da máquina. Entre outras variáveis, o modelo escolhido foi usado para medir grandezas elétricas de entrada do sistema, como a potência total instantânea.

O medidor elétrico foi instalado na entrada principal de energia da retificadora e juntamente com três transformadores de corrente que dividem as correntes das três fases que entram no medidor a um fator de 20, pois o medidor elétrico não consegue trabalhar com as correntes elevadas da máquina-ferramenta. Essa relação de corrente é corrigida depois, via *Adapter*, regularizando os valores das correntes e, consequentemente, das variáveis a elas associadas, como a potência total instantânea.

Além disso, um sistema de conversão foi instalado para transformar a saída serial RS-485 do medidor elétrico em saída USB, possibilitando com que os dados adquiridos pudessem ser utilizados pelo *Adapter*, instalado no computador da retificadora. Esse sistema consistiu no uso de um conversor RS-485/RS-232, modelo 7520R, da ICP-COM em série com um conversor RS-232/USB, modelo I-7560, da ICP-DAS.

Para a medição dos valores de consumo de ar comprimido, utilizou-se um medidor de vazão de ar do tipo turbina, modelo VTG-019A020211RAA20, marca Incontrol. Ele foi

instalado na alimentação principal de ar comprimido da máquina e possui uma saída 4-20mA, convertida para uma saída de 1-5V, com o uso de uma carga resistiva de 250Ω.

Por fim, a ruído sonoro foi medido com o uso de um decibilímetro, modelo DEC-460, da marca Instrutherm, provido de uma saída de sinal DC, com relação 10mV/dB. O decibilímetro foi instalado e configurado conforme as orientações da "Norma Regulamentadora 15 - ATIVIDADES E OPERAÇÕES INSALUBRES" (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2014); trabalhando com o circuito de compensação "A" e circuito de resposta lenta (SLOW) e localizado próximo ao operador da máquina.

As saídas do medidor de vazão e do decibilímetro são conectadas a um cartão de entrada analógica NI9205, acoplado a um chassi NI cDAQ-9174, ambos da National Instruments.

Tanto a saída do medidor elétrico quanto a saída do conjunto da National Instruments (com as informações dos outros instrumentos) foram tratadas pelo *Adapter*, desenvolvido em Labview 8.5, o qual adquire as informações a uma taxa de cinco amostras por segundo (5 Hz).

O *Adapter* realiza a transformação das informações fornecidas pelos instrumentos em dados e os disponibiliza por meio do protocolo TCP/IP ao *Agen*t (versão MTConnect C++ Agent Version 1.2.0.18), localizado no servidor do LAPRAS.

O *Agent*, por sua vez, organiza os dados adquiridos em formato XML e os disponibiliza para a aplicação *Client*, também localizada no servidor do LAPRAS, a qual faz coleta periodicamente os dados disponibilizados pelo *Agen*t e os organiza em um banco de dados de ICV.

3.5.2 Estudo de tempo

Como a máquina-ferramenta estudada não trabalha em escala industrial, mas sim em escala laboratorial, o estudo de tempo foi realizado apenas para as rotinas usadas para os experimentos feitos no presente trabalho, logo, não foi definido um regime temporal de uso diário da máquina, uma vez que cada dia ela realiza um trabalho diferente, com uma configuração diferente.

3.5.3 Estudo de potência

O estudo de potência foi realizado por meio do mapeamento dos modos de operação da máquina-ferramenta, a partir das suas subunidades, de forma similar à proposta por Afonso, Filleti e Silva (2013).

Como o medidor de potência foi instalado na entrada principal de alimentação da máquina-ferramenta, o mapeamento foi realizado a partir da ativação dos modos de operação ou das subunidades de maneira isolada.

Caso não fosse possível ativar uma subunidade de maneira isolada, sua potência média seria calculada a partir da subtração da potência média do total do sistema no momento de sua ativação pelas potências médias das subunidades que também se encontravam ativadas (Equação 3) (AFONSO, FILLETI e SILVA, 2013).

$$P_i = P_{global} - \sum_{k=1}^{m} P_k \tag{3}$$

Onde:

- **P**_i = Potência da subunidade analisada [W];
- **P**global = Potência total do sistema [W];
- **k** = Subunidade ativa [-];
- P_k = Potência média da subunidade k [W];
- $\mathbf{m} = \text{Todas as outras subunidades } [-].$

Por fim, os cálculos de potência média das subunidades foram feitos a partir de pontos estabilizados de potência. Pontos de variação abrupta de potência não foram usados nos cálculos, uma vez que eles representam situações bruscas e não recorrentes.

3.5.4 Estudo de consumíveis e emissões – Ar comprimido

De maneira similar ao estudo de potência, o consumo de ar comprimido foi realizado por meio do mapeamento dos modos de operação da máquina-ferramenta, a partir das suas subunidades.

Com relação às emissões de ar provenientes do consumo de ar comprimido, considerouse que todo ar comprimido consumido pela unidade de processamento se converteria em ar à Ecosfera, sendo assim, a massa de ar emitido teria o mesmo valor da massa de ar comprimido consumido. A conversão da massa de ar comprimido em ar atmosférico foi feita a partir da Lei dos Gases Ideais (GRIMM, 1999; CORREA, 2015).

3.5.5 Estudo de consumíveis e emissões – Fluido de corte

Para a realização do estudo do consumo de fluido de corte, lançou-se mão do método usado por Clarens et al. (2008) para cálculo de fluido de corte perdido. De acordo com Clarens et al. (2008), durante a etapa ativa de usinagem há uma perda média de 5% do volume do reservatório de fluido de corte.

Além disso, considerou-se que todo fluido de corte consumido foi tratado como emissão à Tecnosfera.

3.5.6 Estudo de consumíveis e emissões – Rebolo

O estudo de consumo do rebolo foi realizado a partir do cálculo do desgaste radial verificado após as retificações, realizado com o auxílio de placas de aço SAE1010 e um perfilômetro plano modelo Form Talysurf 50, da marca Taylor Hobson.

Após a conclusão de cada retificação, o perfil do rebolo era impresso em uma placa de aço SAE1010, a qual é levada a um medidor de perfil e mensurada, conforme o exemplo mostrado pela Figura 4.1.

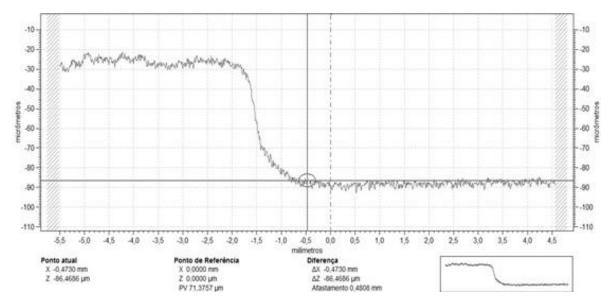


Figura 3.4 – Exemplo de perfil de desgaste do rebolo.

A variação de altura apresentada pela Figura 4.1 representa a redução radial do rebolo devido ao desgaste da retificação. A multiplicação da redução radial do rebolo por dois resulta na redução diametral do rebolo (Δ_d), a qual é usada no cálculo do volume desgastado (V_s), conforme a Equação 4:

$$V_{S} = \frac{\pi b_{W} d_{S}^{2}}{4} - \frac{\pi b_{W} (d_{S} - \Delta_{d})^{2}}{4} = \frac{\pi b_{W}}{4} (2d_{S} \Delta_{d} - \Delta_{d}^{2})$$
(4)

Onde:

• $b_w = \text{Largura de usinagem}$.

Conforme mencionado no tópico 3.4, foram usados dois tipos distintos de rebolo para os experimentos: um de cBN (especificação 8B126 K150 VT2) e outro de Al₂O₃ (especificação 55A46-1-K8VC1).

A partir das especificações de cada rebolo, realizou-se uma caracterização das suas respectivas camadas abrasivas, uma vez que é essa parte que será utilizada e desgastada durante a retificação.

Uma vez identificadas as propriedades do rebolo, como dimensões, tipo de grão abrasivo, tamanho do grão, tipo de ligante, grau de dureza e concentração; realizou-se a caracterização da composição volumétrica do rebolo para seus três componentes base: grão abrasivo, ligante e poros.

A composição volumétrica de grão abrasivo do rebolo de cBN (V_{gcBN}) foi realizada a partir das informações apresentadas por Malkin e Guo (2008a) sobre a quantidade de abrasivo por volume de rebolo (μ_g).

De acordo com eles, para superabrasivos, a quantidade de abrasivo por volume de rebolo (μ_g) apresenta uma relação direta com a concentração do rebolo (MALKIN e GUO, 2008a). Malkin e Guo (2008a) mostram que, para um rebolo com concentração 100, o valor de μ_g corresponde a 4,4 quilates/cm³, ou 0,88g/cm³. Como a relação entre μ_g e o número de concentração é direta, é possível afirmar que para um rebolo de cBN que possua uma concentração 50% maior que 100, ou seja, uma concentração igual a 150, o valor de μ_g também será 50% maior, nesse caso, igual a 1,32g/cm³.

Como o rebolo de cBN usado nos experimentos possui concentração 150 (Apêndice A), definiu-se o seu valor de μg igual a 1,32g/cm³.

Após a identificação do valor de μ_g , calculou-se a massa total de abrasivo no rebolo (m_{st}) , multiplicando μ_g pelo volume total do rebolo (V_{st}) (Equação 5):

$$m_{st} = \mu_q V_{st} \tag{5}$$

Logo depois, encontrou-se o volume total de abrasivo no rebolo (V_{gt}), a partir da divisão de m_{st} pela massa específica do cBN (ρ_{cBN}), esta igual a 3,48 g/cm³ (Equação 6):

$$V_{gt} = \frac{m_{st}}{\rho_{cBN}} \tag{6}$$

Por fim, dividiu-se o volume total de abrasivo no rebolo (V_{gt}) pelo volume total do rebolo (V_{st}) , encontrando, assim, composição volumétrica de grão abrasivo do rebolo de cBN (V_{gcBN}) (Equação 7):

$$V_{gcBN}(\%) = \frac{V_{gt}}{V_{st}} \tag{7}$$

De maneira resumida, a composição volumétrica de grão abrasivo do rebolo de cBN (V_{gcBN}) pode ser encontrada por (Equação 8):

$$V_{gcBN}(\%) = \frac{\mu_g V_{st}}{\rho_{cBN}} \cdot \frac{1}{V_{st}} = \frac{\mu_g}{\rho_{cBN}}$$
 (8)

A composição volumétrica de grão abrasivo do rebolo de Al_2O_3 (V_{gAl2O3}), por sua vez, foi encontrada a partir da Equação 9 (MALKIN e GUO, 2008a):

$$V_{aAl2O3}(\%) = 2(32 - S) \tag{9}$$

Onde:

• **S** = Número da estrutura do rebolo.

A composição volumétrica de poros (V_p) de ambos os rebolos foi calculada a partir da fórmula geral proposta por Malkin e Guo (2008a) (Equação 10):

$$V_p(\%) = \frac{2(99,5-2n)-V_g}{3} \tag{10}$$

Onde:

n = Número inteiro (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7...) correspondente à grade do rebolo (E, F, G, H, I, J, K...);

Por fim, a composição volumétrica de ligante (V_b) de ambos os rebolos foi calculada por meio da Equação 11 (MALKIN e GUO, 2008a):

$$V_b(\%) = 100\% - V_p(\%) - V_q(\%)$$
(11)

Para definição da composição e características mássicas do ligante, utilizaram-se as características de um dos ligantes vitrificados ("ligante C") apresentados na patente da Saint Gobain Abrasives Inc (2003). As informações do ligante escolhido estão presentes no Anexo A.

As composições mássicas dos grãos abrasivos de cBN e de Al_2O_3 foram obtidas a partir da multiplicação das composições volumétricas V_{gcBN} e V_{gAl2O3} pelas suas respectivas massas específicas, presentes nos Apêndices A e B, juntamente com as demais informações de caracterização dos rebolos de cBN e de Al_2O_3 .

Além dos componentes relacionados à composição dos rebolos, o estudo de consumo de rebolo também levou em consideração a energia incorporada associada à massa de rebolo consumida.

A partir dos dados presentes nos trabalhos de Aurich et al. (2013) e Kirsch et al. (2014), foi possível estimar a energia incorporada da fabricação da camada abrasiva dos rebolos.

Por fim, similarmente ao caso do fluido de corte, todo rebolo consumido foi tratado como emissão à Tecnosfera, uma vez que não há transferência mássica do rebolo à peça.

3.5.7 Estudo de emissões – Emissão sonora

De maneira similar aos estudos de potência e de consumo de ar comprimido, o de emissão sonora também foi realizado por meio do mapeamento dos modos de operação da máquina-ferramenta, a partir das suas subunidades. O mesmo foi realizado com propósitos de saúde ocupacional, com o intuito de avaliar se a máquina-ferramenta apresenta níveis de emissão sonora dentro dos limites de segurança exigidos pela "Norma Regulamentadora 15 - ATIVIDADES E OPERAÇÕES INSALUBRES", do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2014).

A norma estabelece que o tempo de exposição aos diferentes níveis de ruído contínuo ou intermitente não pode ultrapassar os limites de tolerância estabelecidos conforme a Tabela 3.2 (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2014).

Tabela 3.2 – Limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente. Adaptado: MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2014.

| NÍVEL DE RUÍDO [dB] | MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA PERMISSÍVEL |
|---------------------|-------------------------------------|
| 85 | 8 horas |
| 86 | 7 horas |
| 87 | 6 horas |
| 88 | 5 horas |
| 89 | 4 horas e 30 minutos |
| 90 | 4 horas |
| 91 | 3 horas e 30 minutos |
| 92 | 3 horas |
| 93 | 2 horas e 40 minutos |
| 94 | 2 horas e 15 minutos |
| 95 | 2 horas |
| 96 | 1 hora e 45 minutos |
| 98 | 1 hora e 15 minutos |
| 100 | 1 hora |
| 102 | 45 minutos |
| 104 | 35 minutos |
| 105 | 30 minutos |
| 106 | 25 minutos |
| 108 | 20 minutos |
| 110 | 15 minutos |
| 112 | 10 minutos |
| 114 | 8 minutos |
| 115 | 7 minutos |

Além dos limites apresentados pela Tabela 3.2, a norma também define que não é permitida exposição a níveis de ruído superiores a 115 dB para indivíduos que não estejam adequadamente protegidos.

Por fim, os dados relacionados à emissão sonora não foram incluídos ao inventário final, pois não há uma categoria de impacto a qual esse fluxo possa ser associado. O estudo ficou restrito a questões ocupacionais, conforme abordado no início do tópico.

3.5.8 Considerações finais

Com relação aos fluxos não abordados pelos estudos de potência, de consumíveis e de emissões, considerou-se que:

- Toda energia elétrica consumida pela unidade de processamento se converteria em emissão de calor à Ecosfera, não se convertendo em outras formas de energia, como ruído sonoro. Sendo assim, a emissão de calor teria o mesmo valor do consumo energético;
- O cavaco gerado foi calculado a partir das dimensões iniciais e finais das peças retificadas, totalizando 3000 mm³ de cavaco por peça, o que equivale a 24,663 g de cavaco de Inconel 751 por peça (SPECIAL METALS, 2008) para todos os modos de operação de corte.

3.6 Realização dos experimentos e avaliações de desempenho produtivo e ambiental

3.6.1 Procedimento experimental

A primeira etapa do procedimento experimental constituiu da realização do estudo estatístico do tempo, seguido pelos estudos de potência, de consumíveis e de emissões.

Para cada um dos seis modos de operação de corte, foram realizados dois experimentos, ou seja, houve a retificação e avaliação de doze peças. Antes de cada retificação, o rebolo foi dressado a fim de garantir as mesmas condições de corte em cada operação. O rebolo de cBN

foi dressado por um dressador rotativo com disco diamantado, enquanto o rebolo de Al₂O₃ foi dressado por um dressador estático diamantado, tipo Fliesen.

As condições de dressagem para o rebolo de cBN foram as seguintes: velocidade de corte (v_s) : 80 m/s, a velocidade do disco (v_d) 32 m/s; taxa de velocidade (q_d) : +0,400; profundidade de dressagem (a_d) 2 μ m; velocidade de dressagem (v_t) 501 mm/min; passo de dressagem (S_d) : 0,131 mm/rot; o número de passes (z_d) : 5.

As condições de dressagem para o rebolo de Al₂O₃ foram: grau de recobrimento (U_d): 4; passo de dressagem (S_d): 0,250 mm/rot; profundidade de dressgem (a_d) 20 μm; velocidade de corte (v_s): 45 m/s; velocidade de dressagem (v_t): 451 mm/min; o número de passes (z_d): 10.

Cada peça sofreu três mergulhos distintos ao longo do seu comprimento, cada um com 15 mm de largura de usinagem (b_w). Todos os mergulhos partem do diâmetro inicial de 28,3 mm até atingir o seu respectivo diâmetro final. Para que fosse possível preservar a camada de referência do rebolo (5 mm) para a medição do desgaste radial do mesmo, decrementou-se em 0,1 mm ao valor do sobremetal de retificação (Tabela 3.3).

| | | Largura de usinagem b _w [mm] | Diâmetro da Inicial da Peça [mm] | Sobremetal de retificação a _e [mm] | Diâmetro Final da Peça [mm] |
|--|------------|---|---|--|--------------------------------------|
| | Mergulho 1 | 15,00 | 28,30 | 1,65 | 26,65 |
| | Mergulho 2 | 15,00 | 28,30 | 1,55 | 26,75 |
| | Mergulho 3 | 15,00 | 28,30 | 1,45 | 26,85 |

Tabela 3.3 – Características gerais para cada mergulho.

Cada mergulho representa uma remoção de aproximadamente 1000 mm³ de cavaco, o que possibilitou verificar a variação das propriedades de corte do rebolo com desgate causado pela remoção acumulada de 1000 mm³, de 2000 mm³ e de 3000 mm³ de material. Tal variação pôde ser verificada a partir das mudanças nas características superficiais da peça, como rugosidade e circularidade, em cada um dos mergulhos.

Além disso, definiu-se um tempo de *spark-out* de 10s para todos os mergulhos, com o intuito de se evitar que as deformações elásticas que ocorrem na peça e no rebolo durante o processo interfiram nos resultados de qualidade superficial da peça, como rugosidade e circularidade.

Como descrito no tópico 3.3, a máquina ferramenta apresenta uma alimentação elétrica trifásica de 220 V e uma alimentação de ar comprimido a 7 bar. O fluido de corte usado é uma mistura de dez partes de água e uma parte composto sintético (especificação METCUT SC-

101K), com massa específica final de 1,005 g/cm³ (ARCHEM QUÍMICA LTDA, 2012). A Tabela 3.4 apresenta a composição teórica final da mistura usada:

Tabela 3.4 – Composição da mistura usada para fluido de corte.

| | Componente | Valor | Tipo |
|------------------------|-------------------------------------|--------|---------------------------------------|
| [9] | Amino Etanol*/** | 1,200 | Alcanolamina/ Surfactante primário |
| ssica [9 | Dicloreto de Polioxietileno */** | 0,080 | Bactericida |
| Composição mássica [%] | Polialquileno glicol */** | 1,400 | Lubrificante Biodegradável |
| osiç | Amida dicarboxílica */** | 1,500 | Anticorrosivo |
| mp | Amida bórica */** | 1,500 | Anticorrosivo |
| ပိ | Água */** | 94,320 | Água |
| | Total | 100 | |

* Fonte: ARCHEM QUÍMICA LTDA, 2012;

Os dados provenientes dos resultados dos estudos de potência, de consumíveis e emissões serviram como insumo para a avaliação de desempenho produtivo e ambiental.

3.6.2 Avaliação de desempenho produtivo

A avaliação de desempenho produtivo foi realizada em relação à unidade funcional, logo, apenas os modos de operação ativos (de corte) foram considerados, uma vez que eles são os únicos que agregam valor à peça. A avaliação foi realizada a partir de oito critérios distintos: tempo de processo, relação G, rugosidade média (R_a), rugosidade correspondente à média dos cinco maiores picos e cinco maiores vales (R_z), rugosidade máxima (R_t), circularidade RON_p (maior desvio local positivo), circularidade RON_v (maior desvio local negativo) e circularidade RON_t (desvio pico-vale).

O tempo do processo está intimamente associado à eficiência produtiva do processo e foi adquirido pelo sistema de monitoramento.

A relação G está associada ao índice de desempenho e a resistência ao desgaste do rebolo, sendo calculada a partir do desgaste do rebolo em cada operação de corte para a remoção do volume de material definido pela unidade funcional, ou seja, 3000 mm³.

^{**} Fonte: MASCO CORPORATION, MILLER ENVIRONMENTAL, MILLER OIL OF INDIANA INC, 2004.

Os critérios de rugosidade e de circularidade representam, respectivamente, parâmetros associados à qualidade superficial final e ao erro geométrico da peça retificada.

As medições dos critérios de rugosidade foram realizadas com um rugosímetro Taylor Hobson, modelo Surtronic 25, configurado com filtro Gaussiano e *cut-off* igual a 0,8mm. Para cada um dos três mergulhos, realizaram-se três varreduras paralelas ao eixo da peça, cada uma rotacionada 120º em relação à outra. As medições de R_a , R_z e R_t eram feitas em conjunto durante cada varredura.

As medições dos critérios de circularidade foram feitas com um medidor de circularidade Taylor Hobson, modelo Talyround 131, configurado com filtro Gaussiano, 1-150 UPR (*undulations per revolution*) (International Organization of Standardization, 2011), e *cut-off* igual a 5 μm. Para cada um dos três mergulhos, realizaram-se três varreduras tangenciais ao eixo da peça, uma próxima a cada extremidade do mergulho e outra no centro. As medições de RON_p, RON_v, e RON_t eram feitas em conjunto durante cada varredura.

3.6.3 Avaliação de desempenho ambiental

De maneira similar à avaliação de desempenho produtivo, a avaliação de desempenho ambiental também realizada foi em relação à unidade funcional e, mais uma vez, apenas os modos de operação ativos (de corte) foram considerados.

Para a realização da avaliação de desempenho ambiental da unidade de processamento, utilizou-se o software de ACV Gabi 4 para a criação do modelo ambiental do processo, como fonte de dados secundários de ICV e para a geração dos dados de AICV. De maneira similar à avaliação de desempenho de produção, foram avaliados nessa etapa apenas os modos ativos de operação.

A Figura 3.5 apresenta o modelo ambiental da unidade de processamento estudada:

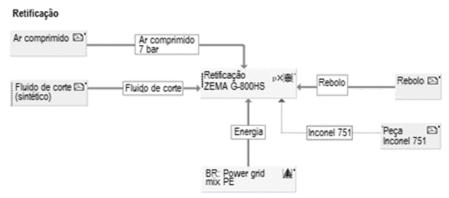


Figura 3.5 – Modelo ambiental da unidade de processamento de retificação cilíndrica externa.

O modelo ambiental foi construído a partir da unidade de processamento (bloco "Retificação ZEMA G-800HS" na Figura 3.5), o qual é responsável por realizar a transformação dos fluxos de entrada (energia elétrica, ar comprimido, fluido de corte, rebolo e peça) em geração de valor. Os fluxos de saída das unidades de processamento não são mostrados no modelo, mas são referenciados internamente no bloco "Retificação ZEMA G-800HS".

Em relação à entradas, as informações referentes ao suprimento de energia elétrica vieram do banco de dados de ICV do Gabi 4 e referem-se ao *mix* de energia brasileiro (bloco "BR: Power grid mix PE").

O suprimento de ar comprimido foi modelado por um processo padrão de produção de ar comprimido a 7 bar (pressão média da linha usada nos experimentos) contido no Gabi 4 (bloco "Ar comprimido").

O suprimento de fluido de corte foi criado a partir das informações da composição do fluido (Tabela 3.4) (bloco "Fluido de corte sintético"). Contudo, só foi possível considerar o impacto causado pelo uso da água e do dicloreto de polioxietileno, uma vez que não havia dados disponíveis de ICV para os demais componentes e por isso não puderam ser considerados na avaliação de AICV.

Os dados de consumo de rebolo (bloco "Rebolo") se limitaram apenas à energia incorporada relacionada ao volume consumido (Tabela 4.7), uma vez que no banco de dados disponível para a realização desse estudo não havia dados os componentes e os materiais usados na confecção dos rebolos usados.

Além disso, os dados referentes à geração de cavaco (bloco "Peça Inconel 751") não surtiram efeito nos resultados dos indicadores de impacto, uma vez que não havia informações referentes à extração de seus componentes e à formulação do Inconel 751 no banco de dados do Gabi 4.

A partir da alimentação dos modelos criados no Gabi com os dados de ICV referentes às entradas e saídas da unidade de processamento em seus modos de operação ativos, foi possível realizar a avaliação ambiental a partir do estudo de AICV da unidade de processamento de retificação.

Como metodologia de AICV, utilizou-se o método EDIP 97 (*Environmental Design of Industrial Products*) de AICV, desenvolvido por entidades dinamarquesas para a avaliação de categorias de impactos ambientais. De acordo com Ometto (2005), o EDIP é um método utilizado internacionalmente, além de seus resultados serem científica e tecnicamente comprovados.

Os modos de operação ativos foram avaliados em 12 categorias diferentes de impactos, conforme a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Categorias de impacto.

| Categoria de Impacto | Impacto |
|---|---|
| Aquecimento Global | Aquecimento global e mudanças climáticas |
| Potencial de Acidificação | Montalidada a antinaño da comácios hielácioses no maio aquático |
| Potencial de Eutrofização | Mortalidade e extinção de espécies biológicas no meio aquático |
| Potencial de Esgotamento da Camada de Ozônio | Aumento de doenças e da mortalidade da população humana |
| Potencial de Oxidante Fotoquímico (NO _x alto) | Mortalidade e extinção de espécies biológicas no atmosfera e no |
| Potencial de Oxidante Fotoquímico (NO _x baixo) | solo |
| Ecotoxidade Crônica do Solo | Mortalidade e extinção de espécies biológicas no solo |
| Ecotoxidade Crônica da Água | Montalidada a autinaão da comácios hielácioses no maio aquático |
| Ecotoxidade Aguda da Água | Mortalidade e extinção de espécies biológicas no meio aquático |
| Toxidade Humana no Solo | |
| Toxidade Humana na Água | Aumento de doenças e da mortalidade da população humana |
| Toxidade Humana no Ar | |

Por fim, com o intuito de facilitar o entendimento dos dados do estudo de AICV, os indicadores foram normalizados em impacto ambiental por pessoa equivalente, referência *European Union* (EU) 1994. Isso significa que os indicadores dos impactos ambientais potenciais foram representados pelo equivalente em número pessoas da união europeia que causariam os mesmos impactos, no ano base de 1994.

Em outras palavras, e.g., dizer que um modo de operação apresentar um indicador de 1 pessoa equivalente na categoria de Potencial de Aquecimento Global para retificar uma peça, equivale a dizer que um cidadão médio europeu executando suas funções diárias (i.e., trabalhando, comendo, dirigindo um carro, etc.) causou, no ano de 1994, o mesmo impacto com relação ao Potencial de Aquecimento Global que o modo de operação avaliado causou durante sua execução.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados do estudo de tempo

Como descrito no tópico 3.5.2, o estudo de tempo foi realizado apenas para as rotinas usadas para os experimentos feitos no presente trabalho, sem a definição de um regime temporal de uso diário da máquina.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados do estudo de tempo de cada modo de operação da máquina.

| Tabela 4.1 - | - Estudo | de temp | o dos | modos | de | operação |
|---------------|----------|---------|-------|-------|----|-----------|
| I abbita T. I | Lotado | uc temp | o aos | mouos | uc | operação. |

| Modo de Operação | Tempo médio experimental [s] |
|---|------------------------------------|
| Inicialização* | 1200 |
| Espera** | 900 |
| Dressagem de rebolos convencionais *** | 66 |
| Dressagem de rebolos de cBN**** | 12 |
| Corte com rebolo cBN e Q'w50 | 262,0 |
| Corte com rebolo cBN e Q'w100 | 131,3 |
| Corte com rebolo cBN e Q'w150 | 88,6 |
| Corte com rebolo Al ₂ O ₃ e Q' _w 10 | 1329,8 |
| Corte com rebolo Al ₂ O ₃ e Q' _w 50 | 259,9 |
| Corte com rebolo Al ₂ O ₃ e Q' _w 100 | 130,5 |

^{*} Soma do tempo gasto para ligar e desligar a máquina; **Tempo médio gasto com manuseio e preparação da máquina entre operações de corte; *** Tempo total de dressagem, com 10 passes com 6,6s cada; ****Tempo total de dressagem, com 5 passes com 2,4s cada.

 \acute{E} importante ressaltar que os modos ativos com valores mais elevados de Q'_w apresentaram os menores tempos de processo, tanto para o rebolo de cBN, quanto para o rebolo de Al_2O_3 .

É possível observar também que houve uma pequena variação no tempo de processo de modos ativos com o mesmo valor de Q'w (cBN_Q'w50 e Al₂O₃_Q'w50, cBN_Q'w100 e Al₂O₃_Q'w100). Isso ocorreu pelo fato de o tempo de processo ter sido gerado experimentalmente através do sistema de aquisição e não por procedimentos puramente matemáticos.

4.2 Resultados do estudo de potência

A primeira etapa do estudo de potência constituiu no mapeamento dos modos de inicialização, de espera e de dressagem de rebolos convencionais. Também foram mapeadas nesse primeiro momento as subunidades de acionamento do cabeçote porta-peças e de movimentação dos caros transversal e longitudinal.

A Tabela 4.2 apresenta o registro do mapeamento dessa primeira etapa:

Tabela 4.2 – Registro de atividades do mapeamento de potência

| Período [s] | Atividade |
|----------------|--|
| 0 | Ativação da Subunidade Primária (SP) - Modo inicialização |
| 5,4 | Liberação do ar comprimido |
| 36,6 | Ativação das subunidades hidráulica (SH), de refrigeração (SR) e de bombeamento de fluido de corte (SF) - Modo em espera |
| 117,2 | Ativação do compressor da subunidade de refrigeração (RA) |
| 218,4 | Desativação do compressor da subunidade de refrigeração (RA) |
| 271,4 | Ativação do compressor da subunidade de refrigeração (RA) |
| 322 | Ativação da subunidade de movimentação dos carros transversal e longitudinal |
| 369,4 | Desativação da subunidade de movimentação dos carros transversal e longitudinal |
| 418,4 | Ativação da subunidade de exaustão (SE) |
| 452,4 | Ativação da subunidade de acionamento do rebolo (SS), com o rebolo de Al_2O_3 e $v_s=45$ m/s |
| 463,4 | Modo dressagem de rebolos convencionais ativado - 1a dressagem |
| 472,4 | Modo dressagem de rebolos convencionais ativado - 2a Dressagem |
| 482 | Desativação do modo dressagem de rebolo convencionais e da subunidade de acionamento do rebolo (SS) |
| 494,4 | Desativação da subunidade de exaustão (SE) |
| 519,4 | Ativação da subunidade de subunidade de acionamento do cabeçote porta-peças |
| 540,2 | Desativação da subunidade de acionamento do cabeçote porta-peças |

O monitoramento de potência do mapeamento descrito pela Tabela 4.2 pode ser visualizado no Gráfico 4.1.

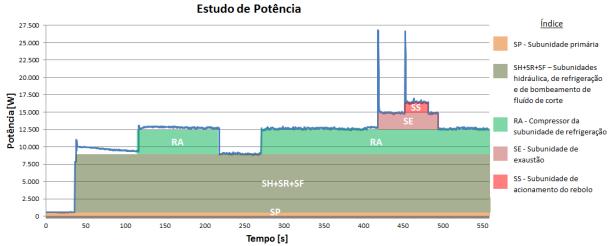


Gráfico 4.1 – Estudo de potência dividido por subunidades.

Como definido no tópico 3.5.3, os cálculos de potência média das subunidades foram feitos a partir de pontos estabilizados de potência, desprezando-se os pontos de variação abrupta de potência (e.g., picos de potência).

A primeira variação de potência calculada foi do da subunidade primária (SP), mostrado no Gráfico 4.1 pela faixa laranja na parte mais inferior do gráfico. A ativação da subunidade primária também representa a ativação do Modo de Inicialização. A potência média desse modo foi calculada em 540 W.

A segunda variação de potência calculada foi do modo em espera (faixa verde escuro no Gráfico 4.1), com a ativação das subunidades hidráulica (SH), de resfriamento (SR) e de bombeamento de fluido de corte (SF), em conjunto com a subunidade primária (SP). A potência média desse modo de operação foi calculada em 9398 W, dos quais 540 W são da subunidade primária (SP).

Devido aos intertravamentos da máquina, os dados de potência da subunidade hidráulica (SH) e de resfriamento (SR) foram coletados separadamente ao mapeamento definido pela Tabela 4.2 e representam, respectivamente, 4200 W e 480 W.

A partir da subtração da potência média do modo em espera pelas potências das subunidades SP, SH e SR, foi possível encontrar o valor da potência média de SF, calculada em 4178 W.

Durante a realização do mapeamento, houve a ativação do compressor da subunidade de resfriamento para controlar a temperatura do sistema hidráulico e do fluido de corte. Essa ativação do compressor (RA) resultou em um aumento significativo da potência da máquina (faixa verde clara no Gráfico 4.1), calculado em 3274 W. Após algum tempo, o compressor é desligado e religado novamente, mantendo-se ativo até o fim do mapeamento.

O Gráfico 4.1 ainda apresenta mais duas faixas com variações de potência. A primeira dessas faixas (faixa lilás claro) representa o aumento de potência causado pela ativação da subunidade de exaustão (SE), calculado em 2214 W. A segunda das faixas (faixa vermelha) representa a ativação da subunidade de acionamento do rebolo (SS), calculado em 1498 W.

A ativação da subunidade de movimentação dos carros transversal e longitudinal (intervalo de tempo entre 322s e 369,2s) e da subunidade de acionamento do cabeçote portapeças (intervalo de tempo entre 519,4s e 540,2s) não apresentaram variações significativas de potência, logo a contribuição dessas subunidades no estudo de potência não foi considerada.

O mesmo ocorreu com o modo dressagem de rebolos convencionais, o qual, apesar de ter sido ativado duas vezes durante o intervalo de tempo, entre 463,4s e 481,8s, também não resultou em variação significativa de potência.

O mapeamento da subunidade de acionamento do dressador rotativo foi realizado após a instalação do rebolo de cBN e sua potência média foi calculada em 2405 W.

O mapeamento de potência dos modos ativos de operação foi realizado de maneira similar ao realizado com os outros modos de operação. Contudo, o cálculo do valor médio de potência foi feito com a média aritmética dos dados das duas retificações realizadas para cada modo ativo estudado.

É importante ressaltar que, durante a retificação, ocorreu a ativação e/ou a desativação do compressor da subunidade de refrigeração (RA), o que influenciou nos valores de potência encontrados. Contudo, como esse controle de ativação é feito pela máquina por meio de um controle regulatório por limite fixo de temperatura de saída da água gelada, sendo necessário ao funcionamento do processo, os dados de potência foram tratados no sentido de eliminar essa influência nos valores de potência encontrados.

Os valores médios de potência para os modos ativos são apresentados na Tabela 4.3.

Modo de Potência Média [W] Operação cBN_Q'w50 21685 22106 cBN Q'w100 cBN_Q'w150 23233 $\overline{A}l_2O_3_Q'_w10$ 15070 Al₂O₃ Q'_w50 16478 $Al_2O_3_Q'_w100$ 17876

Tabela 4.3 – Potência média dos modos ativos de operação

É possível verificar pela Tabela 4.3 que quanto maior o valor de Q'w, maior é o valor da potência do modo ativo. Outro ponto de destaque é que o rebolo de cBN apresentou valores de

potência média superiores, mesmo para modos ativos com valores idênticos de Q'w (cBN_Q'w50 e Al₂O₃_Q'w50, cBN_Q'w100 e Al₂O₃_Q'w100). Esses valores de potência mais altos são devidos ao maior valor da velocidade de corte v_s usada nos experimentos para o rebolo de cBN.

Finalmente, a Tabela 4.4 apresenta os resultados do estudo de potência para todos os modos de operação definidos para a máquina:

Tabela 4.4 – Resultados do estudo de potência dos modos de operação

| Modo de Operação | Potência Média [W] |
|---|-----------------------|
| Inicialização | 540 |
| Espera | 9398 |
| Dressagem de rebolos convencionais | 16450 |
| Dressagem de rebolos de cBN | 18788 |
| Corte com rebolo cBN e Q'w50 | 21685 |
| Corte com rebolo cBN e Q'w100 | 22106 |
| Corte com rebolo cBN e Q'w150 | 23233 |
| Corte com rebolo Al ₂ O ₃ e Q' _w 10 | 15070 |
| Corte com rebolo Al ₂ O ₃ e Q' _w 50 | 16478 |
| Corte com rebolo Al ₂ O ₃ e Q' _w 100 | 17876 |

4.3 Resultados dos estudos de consumíveis e emissões

4.3.1 Ar comprimido

A vazão de entrada de ar comprimido também foi mapeada durante os experimentos com o uso do sistema de aquisição instalado na máquina-ferramenta. O Gráfico 4.2 apresenta o mapeamento do consumo de ar comprimido de acordo com os passos descritos pela Tabela 4.2.

Estudo de Vazão de Ar Comprimido

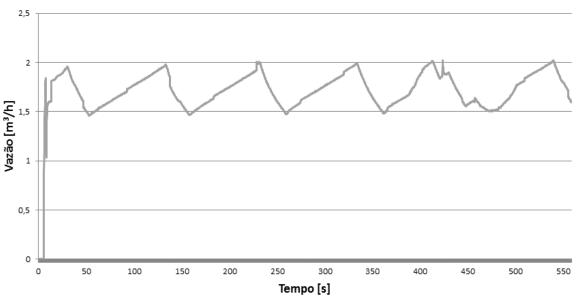


Gráfico 4.2 – Estudo de consumo de ar comprimido.

Conforme é possível verificar no Gráfico 4.2, não há uma relação direta entre a ativação das subunidades e os modos de operação. Após a liberação do fluxo de ar comprimido, aos 5,4s do gráfico, há uma variação brusca logo no início, mas depois a vazão de ar varia entre uma faixa de 1,5m³/h a 2 m³/h, numa onda quase triangular, independente da ativação ou desativação das subunidades envolvidas.

Na verdade, uma vez liberado o fluxo de ar comprimido, a vazão de entrada de ar segue as variações da linha de alimentação de ar comprimido, sujeita ao controle do compressor de ar do laboratório e também do uso de ar comprimido por outras máquinas-ferramentas.

Durante a etapa de análise da máquina, verificou-se que apenas as subunidades hidráulica e de acionamento do dressador rotativo possuíam alimentação de ar comprimido. Assim, apenas essas duas subunidades poderiam influenciar na vazão de entrada de ar comprimido, conforme constatado: após a liberação de ar comprimido para a subunidade hidráulica, a única variação considerável identificada foi com a ativação da subunidade de dressagem de rebolos de cBN, com um aumentando de 0,38 m³/h na vazão média, já a refrigeração interna do sistema de dressagem é realizada utilizando-se um fluxo de ar comprimido.

A Tabela 4.5 apresenta os dados médios de vazão dos modos de operação:

Tabela 4.5 – Resultados do estudo de vazão de ar comprimido dos modos de operação

| Modo de Operação | Vazão Ar Comprimido [m³/h] | Vazão Ar Comprimido [cm³/s] |
|---|----------------------------------|-----------------------------------|
| Inicialização | 0 | 0 |
| Espera | 1,72 | 478,9 |
| Dressagem de rebolos convencionais | 1,72 | 478,9 |
| Dressagem de rebolos de cBN | 2,10 | 585,3 |
| Corte com rebolo cBN e Q'w50 | 1,63 | 452,0 |
| Corte com rebolo cBN e Q'w100 | 1,63 | 453,0 |
| Corte com rebolo cBN e Q'w150 | 1,62 | 450,3 |
| Corte com rebolo Al ₂ O ₃ e Q' _w 10 | 1,68 | 467,3 |
| Corte com rebolo Al ₂ O ₃ e Q' _w 50 | 1,72 | 476,5 |
| Corte com rebolo Al ₂ O ₃ e Q' _w 100 | 1,77 | 493,1 |

4.3.2 Fluido de corte

Conforme relatado no tópico 3.5.5, o cálculo do fluido de corte perdido foi feito de acordo com o método usado por Clarens et al. (2008). Estimou-se durante a etapa de usinagem uma perda média de 5% do volume do reservatório de fluido de corte. O reservatório usado nos experimentos possui 400.000 cm³, o que resultou em uma perda de 20.000 cm³ de fluido de corte durante os experimentos.

Como foram usinadas 12 peças durante os ensaios, atribuiu-se uma perda de 1.667 cm³, ou 1675 g, de fluido por peça retificada.

4.3.3 Rebolo

Por meio do procedimento descrito no tópico 3.5.6, realizou-se a medição da variação radial do rebolo por desgaste para cada modo de operação ativo. A partir dessas medições da variação radial do rebolo, foi possível encontrar o volume médio desgastado de rebolo (V_s) para cada modo ativo de operação da máquina (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Cálculo do volume de rebolo desgastado V_s para cada modo ativo de operação da máquina.

| | Largura de Usinagem b _w [mm] | Diâmetro do Rebolo d _s [mm] | Desgaste Diametral Δd [μm] | $ \begin{array}{c} Volume~de~Rebolo\\ Desgastado\\ V_s~[cm^3] \end{array} $ | Desgaste Total Rebolo em Massa* [g] |
|-------------------------|---|--|----------------------------------|---|---|
| $cBN_Q'_w50$ | 15,0 | 400,0 | 3,5 | 0,033 | 0,057 |
| $cBN_Q'_w100$ | 15,0 | 400,0 | 3,8 | 0,036 | 0,063 |
| cBN_Q' _w 150 | 15,0 | 400,0 | 4,3 | 0,041 | 0,072 |
| $Al_2O_3_Q'_w10$ | 15,0 | 475,0 | 77,5 | 0,867 | 1,879 |
| $Al_2O_3_Q'_w50$ | 15,0 | 475,0 | 111,9 | 1,252 | 2,713 |
| $Al_2O_3_Q'_w100$ | 15,0 | 475,0 | 159,5 | 1,784 | 3,866 |

^{*} Massa específica do rebolo de cBN = $1,75 \text{ g/cm}^3$ (Apêndice A) e massa específica do rebolo de Al₂O₃ = $2,17 \text{ g/cm}^3$ (Apêndice B).

A partir do volume e da massa de rebolo consumido, e dos estudos feitos por Aurich et al. (2013) e Kirsch et al. (2014), foi possível identificar a energia incorporada em cada etapa da confecção da camada abrasiva dos rebolos, bem como definir a energia total incorporada por unidade de volume de camada abrasiva (Apêndice C).

A partir das informações da Tabela 4.6 e do Apêndice C, foi possível calcular a energia incorporada referente ao volume de rebolo desgastado em cada modo ativo de operação da máquina (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Cálculo da energia incorporada no rebolo para cada modo ativo de operação da máquina.

| Configuração | $ \begin{array}{c} \text{Volume de Rebolo} \\ \text{Desgastado} \\ \text{V}_s [\text{cm}^3] \end{array} $ | Energia Incorporada [kJ/cm³] | Energia Incorporada Desgaste Rebolo [kJ] |
|-------------------|--|------------------------------------|---|
| $cBN_Q'_w50$ | 0,033 | 1184,6 | 38,7 |
| $cBN_Q'_w100$ | 0,036 | 1184,6 | 42,8 |
| $cBN_Q'_w150$ | 0,041 | 1184,6 | 48,6 |
| $Al_2O_3_Q'_w10$ | 0,867 | 44,2 | 38,4 |
| $Al_2O_3_Q'_w50$ | 1,252 | 44,2 | 55,4 |
| $Al_2O_3_Q'_w100$ | 1,784 | 44,2 | 78,9 |

Como descrito no tópico 3.6.3, tais valores de energia incorporada relacionados ao volume de rebolo desgastado entrarão nos cálculos da fase de AICV.

4.3.4 Emissões sonoras

Assim como o consumo de potência e consumo de ar comprimido, os dados referentes à emissão sonora foram coletados a partir do sistema de monitoramento desenvolvido.

O Gráfico 4.3 apresenta a variação de emissão sonora durante o mapeamento realizado no tópico 4.2 (Tabela 4.2).

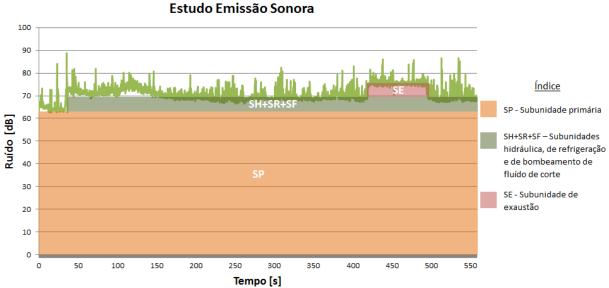


Gráfico 4.3 – Estudo de emissão sonora.

Como é possível verificar, houve aumento significativo de emissão sonora apenas após a ativação conjunta das subunidades hidráulica (SH), de resfriamento (SR) e de bombeamento de fluido de corte (SF). Houve também um aumento na emissão sonora com a ativação da subunidade de exaustão (SE).

Contudo, com exceção de alguns picos de ruído, os modos de inicialização e de espera apresentaram valores de emissão sonora contínua ou intermitente abaixo do limiar de segurança de 85 dB, previsto pela Norma Regulamentadora 15 do Ministério do Trabalho e Emprego (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2014).

Tal cenário também se repetiu nos modos de dressagem de rebolos convencionais e de Dressagem de rebolos de cBN, bem como nos seis diferentes modos de corte estudados. Também não houve nenhum pico de ruído acima de 115 dB, atendendo assim os requisitos de segurança do trabalho com relação à insalubridade descritos pela Norma Regulamentadora 15 (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2014).

4.4 Resultados finais do estudo de ICV

A partir da realização dos estudos de tempo, potência, consumíveis e emissões, foi possível calcular os dados finais de ICV de acordo com a unidade funcional e o fluxo de referência definidos para o estudo.

Como tanto a unidade funcional, quanto o fluxo de referência estão associados aos modos de operação produtivos, ou seja, que executam a geração de valor da unidade de processamento, considerou-se apenas os modos de operação ativo nessa etapa do estudo.

A Tabela 4.8 apresenta os dados encontrados nos estudos de ICV e os relaciona ao fluxo de referência, definido no tópico 3.1 como sendo um segundo de tempo de produtivo da máquina, ou seja, quando ela esteja realizando a usinagem.

Tabela 4.8 – Dados de ICV dos modos ativos conforme o fluxo de referência.

| | Potência Média [W] | Vazão Ar Comprimido [cm³/s] | Desgaste Total Rebolo em Massa [mg/s] | Taxa de Consumo Energia Incorporada Desgaste Rebolo [kJ/s] | Taxa de Consumo de Fluido de Corte [g/s] | Taxa de Geração de Cavaco em Massa [g/s] |
|--|--------------------------|-----------------------------------|---|--|--|--|
| cBN_Q'w50 | 21685 | 452,0 | 0,23 | 0,16 | 6,77 | 0,10 |
| $cBN_Q'_w100$ | 22106 | 453,0 | 0,58 | 0,40 | 15,50 | 0,23 |
| cBN_Q'w150 | 23233 | 450,3 | 1,15 | 0,78 | 26,75 | 0,39 |
| $Al_2O_3_Q'_w10$ | 15070 | 467,3 | 1,43 | 0,03 | 1,28 | 0,02 |
| $Al_2O_3_Q'_w50$ | 16478 | 476,5 | 10,78 | 0,22 | 6,65 | 0,10 |
| Al ₂ O ₃ _Q'w100 | 17876 | 493,1 | 23,71 | 0,54 | 11,57 | 0,17 |

A Tabela 4.9, por sua vez, apresenta os dados de ICV à unidade funcional, definida no tópico 3.1 como a remoção, sem dressagem intermediária do rebolo, de 3000 mm³ de material em de peça cilíndricas previamente torneadas, feitas com a liga Inconel 751, com 150 mm de comprimento e 28,30 mm de diâmetro (dw); e que resulte em uma rugosidade aritmética média (Ra) inferior a 1 μm após o processo.

São apresentados os dados de ICV, dos diferentes modos de operação ativos, com relação à retificação de uma peça. Os valores de consumo de energia e de volume de ar comprimido foram calculados integrando-se os valores de potência e de vazão de ar comprimido (Tabela 4.8) pelo tempo de processo de cada modo de operação ativo (Tabela 4.1).

Tabela 4.9 – Dados de ICV dos modos ativos conforme a unidade funcional.

| | Energia | Volume de Ar | Massa de Ar* | Desgaste Total Rebolo em Massa | Consumo Energia Desgaste Rebolo | Consumo de Fluido** | Massa de Cavaco | Tempo médio experimental |
|--|---------|-----------------|-----------------|---|--|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | [kJ] | $[m^3]$ | [kg] | [g] | [kJ] | [g] | [g] | [s] |
| cBN_Q'w50 | 5683 | 0,119 | 0,98 | 0,057 | 38,7 | 1675 | 24,7 | 262,0 |
| cBN_Q'w100 | 2905 | 0,059 | 0,49 | 0,063 | 42,8 | 1675 | 24,7 | 131,3 |
| cBN_Q'w150 | 2037 | 0,040 | 0,33 | 0,072 | 48,6 | 1675 | 24,7 | 87,6 |
| Al ₂ O ₃ _Q'w10 | 20040 | 0,621 | 5,13 | 1,879 | 38,4 | 1675 | 24,7 | 1329,8 |
| Al ₂ O ₃ _Q'w50 | 4274 | 0,124 | 1,02 | 2,713 | 55,4 | 1675 | 24,7 | 259,9 |
| Al ₂ O ₃ _Q'w100 | 2333 | 0,064 | 0,53 | 3,866 | 78,9 | 1675 | 24,7 | 130,5 |

^{*} Massa de ar calculado conforme a Lei dos Gases Ideais (GRIMM, 1999; CORREA, 2015).

**Fonte – CLARENS et al., 2008.

Os dados relacionados à emissão sonora não foram incluídos ao inventário final, pois não há uma categoria de impacto a qual esse fluxo possa ser associado, limitando esse tipo de fluxo a apenas questões ocupacionais, conforme abordado no tópico 3.5.7.

4.5 Avaliação de desempenho de produção

4.5.1 Tempo de Processo

A partir da Tabela 4.9 é possível observar que, como esperado, os processos com taxas Q'w maiores apresentaram menores valores de tempo médio experimental de processo. Esse parâmetro é de grande importância na avaliação de desempenho do processo, pois ele está intimamente associado à produtividade da unidade de processamento: quanto menor o tempo de processo, mais peças podem ser feitas em um turno de trabalho. Além disso, ele também possui forte relação com o consumo de energia e de recursos.

Conforme apresentado na Tabela 4.8, na maioria dos casos estudados, quanto menor o valor de Q'w, menor o valor da potência do modo de operação. Outro fator que influenciou no valor da potência foi o tipo de rebolo: os modos de corte com rebolo de cBN, por conta da elevada velocidade de corte se comparada à velocidade de corte usada no rebolo de Al₂O₃, apresentaram potências de 30% a 40% maiores que os modos utilizando o rebolo de Al₂O₃ com o mesmo valor de Q'w.

Apesar disso, o tempo de processo foi o que mais influenciou no consumo energético total. O modo de operação que apresentou o menor consumo de energia foi o que possuía o

maior valor de potência e o menor tempo de processo (cBN_Q'_w150) (Tabela 4.9). De forma oposta, o que apresentou o maior consumo foi o que possuía o menor valor de potência e o maior tempo de processo (Al₂O₃_Q'_w10) (Tabela 4.9).

No caso do consumo de ar comprimido, no qual a vazão média entre os modos de corte não variou muito (Tabela 4.8), o papel do tempo de processo no consumo foi mais direto e intuitivo, pois, da mesma forma que no consumo energético, o modo com o menor tempo de processo apresentou o menor consumo de ar comprimido (cBN_Q'w150) (Tabela 4.9) e o modo com o maior tempo de processo apresentou o maior consumo de ar comprimido (Al₂O₃_Q'w10) (Tabela 4.9).

4.5.2 Relação G

O Gráfico 4.4 apresenta os valores de relação G para os rebolos e modos de operação testados.

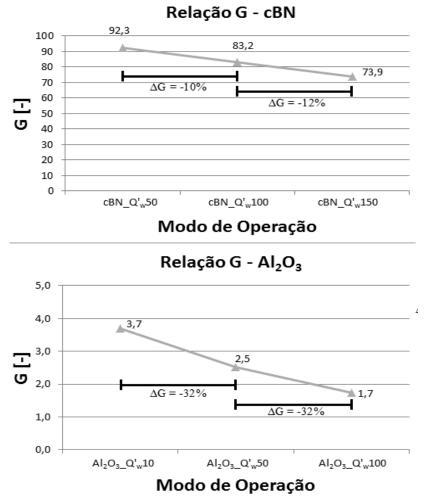


Gráfico 4.4 – Relação G para retificação com rebolo de cBN e Al₂O₃.

A partir do Gráfico 4.4 é possível verificar que quanto maior o valor de Q'w, menor é a relação G, tanto para o rebolo de cBN quanto para o rebolo de Al₂O₃.

Além disso, vale ressaltar ainda a grande diferença da relação G entre os tipos de rebolo, uma vez que o rebolo de cBN apresentou resultados nesse quesito 40 vezes maiores que o rebolo de Al₂O₃ para as mesmas condições de Q'_w; e no mínimo 20 vezes maiores para condições distintas de Q'_w.

O Inconel 751 é um material de difícil usinabilidade devido à combinação de dois fatores. A retificação desse material de matriz austenítica, a qual sofre endurecimento durante a usinagem, leva a um aumento de temperatura na interface material-ferramenta, resultando em tensões de origem térmica (aquecimento e posterior resfriamento pelo fluido de corte) na interface rebolo-peça, como observado por Choudhury e El-Baradie (1998).

O segundo fator refere-se à composição da liga de Inconel 751. A liga apresenta alumínio e titânio em sua composição química, com presença de carbetos, que são altamente abrasivos (RICHARDS e ASPINWALL, 1989). Os melhores valores de relação G para o rebolo de cBN são resultado da maior dureza deste grão quando comparado ao Al₂O₃ e da maior dureza do ligante do rebolo de cBN testado.

Além disso, o aumento da velocidade de corte, quando do teste com rebolo de cBN, resultou num aumento da dureza dinâmica dos grãos da ferramenta. Adicionalmente, para uma mesma taxa específica de remoção de material, aumentando-se esta velocidade, reduz-se a espessura equivalente de corte (h_{eq}), que pode ser entendida como sendo a espessura da camada de material que é arrancada pelo rebolo, dotado de velocidade de corte (v_s) (OLIVEIRA, 1989). Uma espessura menor resulta em uma operação menos severa, com menores esforços de corte, implicando num menor desgaste da ferramenta.

Esses resultados reafirmam o ponto levantado por Aurich et al. (2013), de que os rebolos de alta performance, como os de cBN, possuem superioridade em desempenho e tempo de vida se comparados aos rebolos convencionais, como os de Al₂O₃.

Por fim, o melhor desempenho encontrado nesse quesito foi com o modo cBN_Q' $_{\rm w}$ 150, e o pior com o modo Al $_{\rm 2}$ O $_{\rm 3}$ _Q' $_{\rm w}$ 100.

4.5.3 Rugosidade e circularidade

Os Gráficos 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam os resultados encontrados para as rugosidades R_a , R_z e R_t , respectivamente, após 1000 mm³, 2000 mm³ e 3000 mm³ de material removido.

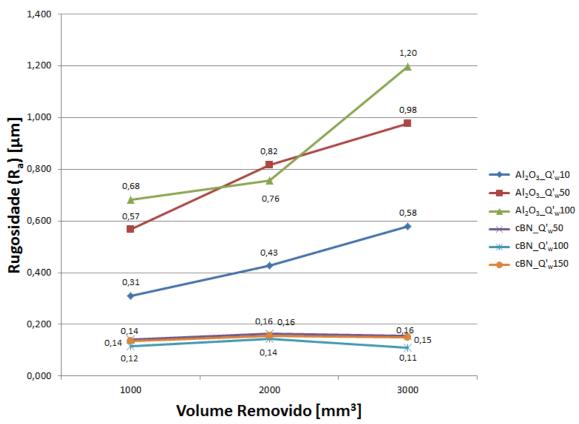
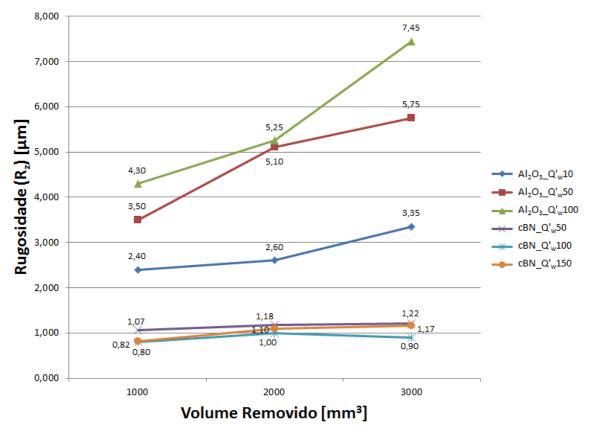


Gráfico 4.5 – Resultados de rugosidade R_a.



 $Gráfico\ 4.6-Resultados\ de\ rugosidade\ R_z.$

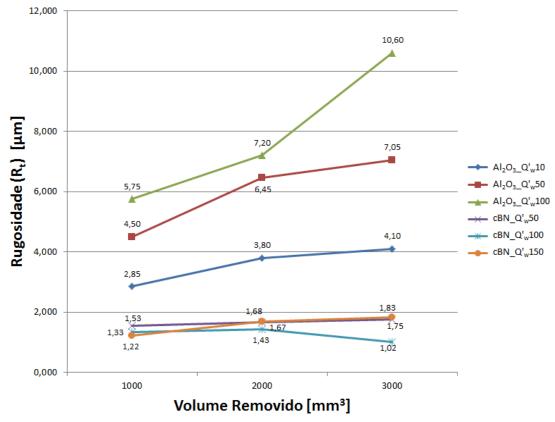


Gráfico 4.7 – Resultados de rugosidade R_t.

De maneira similar, os Gráficos 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam respectivamente os resultados encontrados para as circularidades RON_p, RON_v e RON_t.

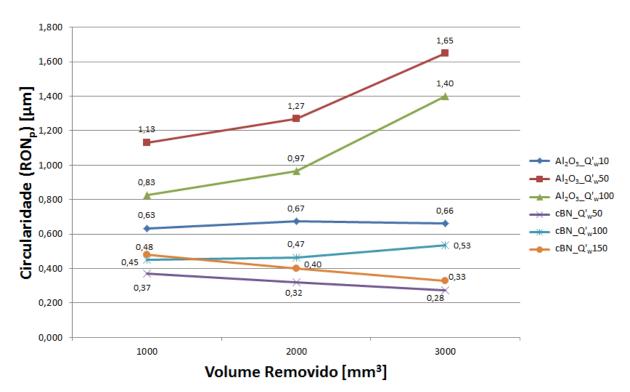


Gráfico 4.8 - Resultados de circularidade RON_p.

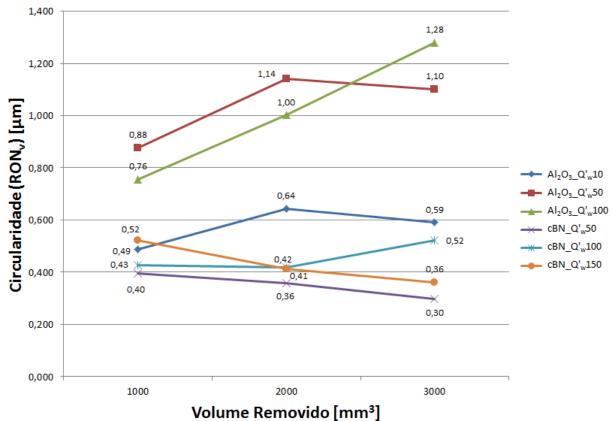


Gráfico 4.9 – Resultados de circularidade RON_v.

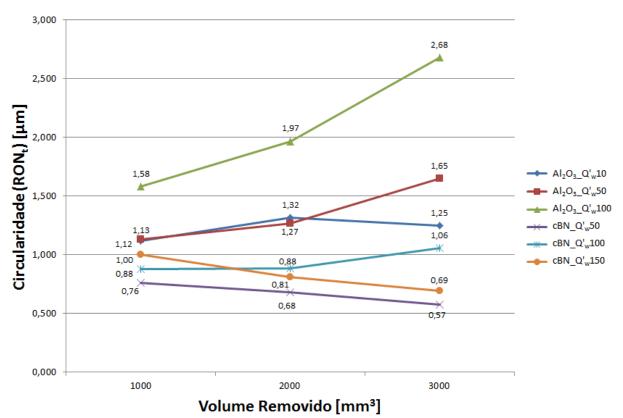


Gráfico 4.10 - Resultados de circularidade RON_t.

A partir dos resultados apresentados, é possível verificar que todos os modos de corte com rebolo de cBN apresentaram resultados melhores em todos os quesitos de qualidade superficial (rugosidade) e no erro de forma (circularidade), mesmo se compararmos configurações com valores de Q'w diferentes.

Além disso, os modos de corte com rebolo de cBN apresentaram grande estabilidade com relação à progressão de volume de material removido, tanto nas rugosidades quanto nas circularidades estudadas, resultado da maior resistência ao desgaste desta ferramenta.

O rebolo de cBN apresentava uma vantagem competitiva inicial em relação ao rebolo de Al₂O₃, pois é constituído por um tamanho de grão FEPA-B126, com tamanho médio de 142 μm, enquanto o de Al₂O₃ é constituído de um grão US Grit -46, com tamanho médio de 508 μm.

Todavia, ambos os rebolos foram dressados em condições de acabamento, buscando-se atingir rugosidades Ra inferiores a 1 μm. Inicialmente, em todas as condições testadas, ambas as ferramentas proporcionaram peças retificadas abaixo do limite de rugosidade estabelecida. Para o rebolo de Al₂O₃, com a progressão do volume de material removido, apenas a condição Al₂O₃_Q'_w10 permitiu a obtenção de peças dentro da tolerância de rugosidade especificada, já que o valor médio obtido para a condição Al₂O₃_Q'_w50 encontra-se muito próxima do limite estabelecido.

4.6 Avaliação de desempenho ambiental por meio do AICV

A partir dos modelos ambientais apresentados no tópico 3.6.3 (Figuras 3.5 e 3.6) e os dados de ICV da Tabela 4.9, foi possível encontrar, para os seis modos de operação ativos, os indicadores das 12 categorias de impactos definidas para a avaliação de desempenho ambiental.

Vale salientar que os resultados normalizados por pessoa equivalente apresentaram ordens de grandezas muito baixas para todas as categorias, o que representa que os impactos relacionados à retificação da unidade funcional pela unidade de processamento são extremamente menores que os impactos gerados por uma pessoa durante um ano inteiro.

Os Gráficos 4.11, 4,12, 4.13 e 4.14 apresentam, respectivamente, os indicadores para as quatro primeiras categorias de impacto avaliadas: potencial de aquecimento global, potencial de acidificação, potencial de eutrofização e potencial de esgotamento da camada de ozônio,

considerando a unidade funcional como sendo a retificação, sem dressagem intermediária do rebolo, de 3000 mm³ de Inconel 751.

Potencial de Aquecimento Global

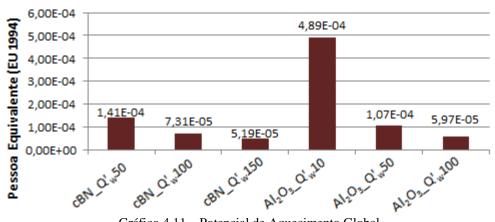


Gráfico 4.11 – Potencial de Aquecimento Global.

Potencial de Acidificação

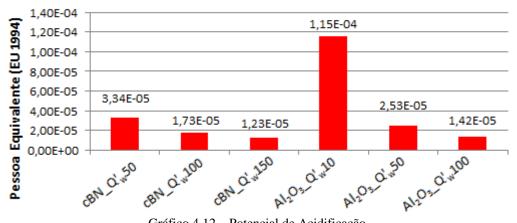


Gráfico 4.12 – Potencial de Acidificação.

Potencial de Eutrofização

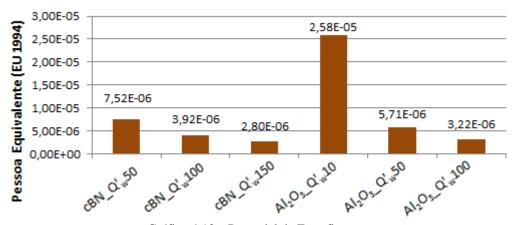


Gráfico 4.13 – Potencial de Eutrofização.

Potencial de Esgotamento da Camada de Ozônio

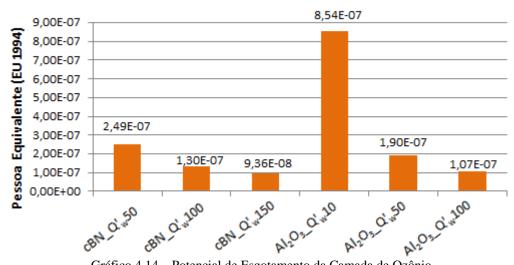


Gráfico 4.14 – Potencial de Esgotamento da Camada de Ozônio.

A partir da análise dos Gráficos 4.11, 4,12, 4.13 e 4.14, foi possível verificar que quanto maior o valor de Q'w, menores eram os valores dos indicadores normalizados. Isso se deve ao fato de que quanto maior for o valor de Q'w menor será o tempo do processo, e quanto menor o tempo de processo menor será o valor de consumo de energia elétrica, resultando em menos impacto ambiental.

Em todos esses casos, o consumo de energia elétrica foi o fluxo com maior participação nos indicadores acima, com participação superior a 97% dos valores encontrados nos resultados de AICV para os quatro indicadores.

Isso pode ser verificado na comparação dos modos de operação com valores de Q'w idênticos, Q'w50 e Q'w100, uma vez que os modos ativos que usaram o rebolo de cBN (cBN Q'w50 e cBN Q'w100) possuíam valores de consumo energético mais elevados (Tabela 4.9), resultando em indicadores de impacto maiores se comparados, respectivamente, aos modos ativos que usaram rebolo de Al₂O₃ (Al₂O₃ Q'_w50 e Al₂O₃ Q'_w100).

Situação similar também foi encontrada para as categorias de Potencial de Oxidação Potencial de Oxidação Fotoquímica NO_x Alto (Gráfico 4.15), Potencial de Oxidação Fotoquímica NO_x Baixo (Gráfico 4.16). Neles, a participação do consumo energético nos resultados de AICV foi superior a 96% em ambos os casos.

Potencial de Oxidação Fotoquímica (NO_x Alto)

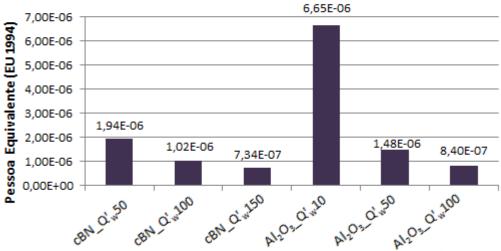


Gráfico 4.15 – Potencial de Oxidação Fotoquímica (NO_x Alto).

Potencial de Oxidação Fotoquímica (NO_x Baixo)

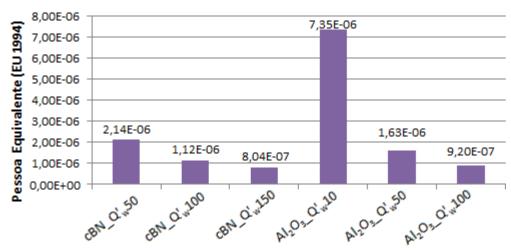


Gráfico 4.16 – Potencial de Oxidação Fotoquímica (NO_x Baixo).

O mesmo ocorreu como os três indicadores de Ecotoxidade avaliados: Ecotoxidade Crônica do Solo (Gráfico 4.17), Ecotoxidade Crônica da Água (Gráfico 4.18) e Ecotoxidade Aguda da Água (Gráfico 4.19). Nesses casos, a participação do consumo de energia elétrica nos resultados foi superior a 91%.

Ecotoxidade Crônica do Solo

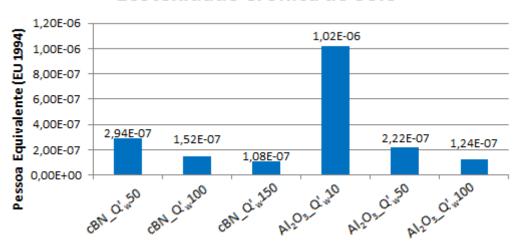
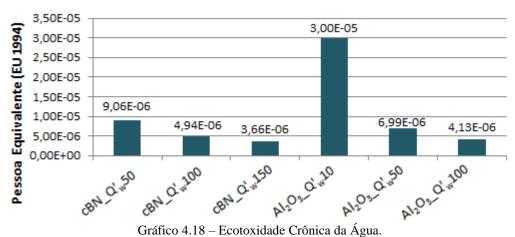
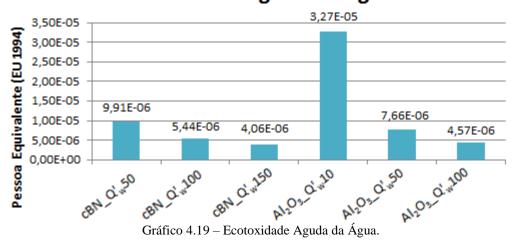


Gráfico 4.17 – Ecotoxidade Crônica do Solo.

Ecotoxidade Crônica da Água



Ecotoxidade Aguda da Água

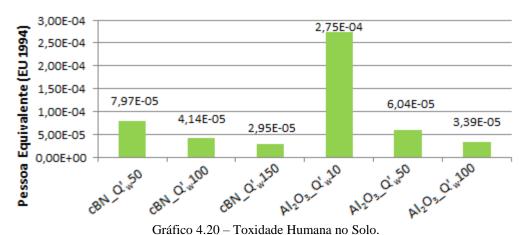


Com relação às categorias de toxidade humana, o consumo de energia elétrica também foi responsável pela maior parcela dos indicadores de Toxidade Humana no Solo (Gráfico 4.20)

e Toxidade Humana na Água (Gráfico 4.21), com participação superior a 94% nos dois indicadores. Contudo, para o indicador da categoria de Toxidade Humana no Ar (Gráfico 4.22), o aspecto que teve maior participação foi o consumo de ar comprimido.

Isso pode ser verificado, a partir da análise dos modos de operação ativos que possuíam o mesmo valor de Q'w. Os modos de operação Al₂O₃_Q'w50 e Al₂O₃_Q'w100 consumiram mais volume de ar comprimido que os modos de operação com o mesmo valor de Q'w, respectivamente cBN_Q'w50 e cBN_Q'w100 (Tabela 4.9), o que resultou em indicadores de Toxidade Humana no Ar (Gráfico 4.22) mais elevados.

Toxidade Humana no Solo



Toxidade Humana na Água

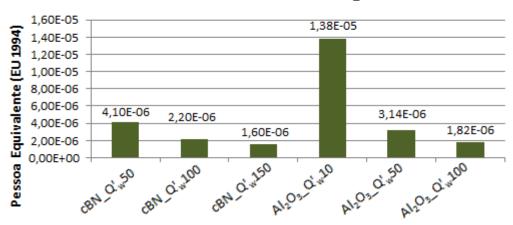


Gráfico 4.21 – Toxidade Humana na Água.

Toxidade Humana no Ar

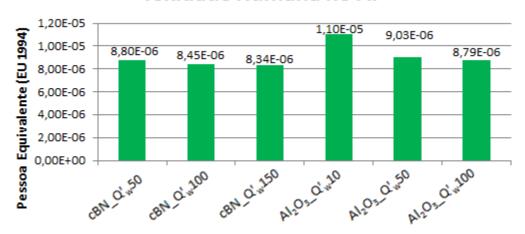


Gráfico 4.22 – Toxidade Humana no Ar.

Vale ressaltar que os valores

Vale ressaltar que tanto o consumo de energia elétrica quanto o consumo de ar comprimido estão intimamente relacionados com o tempo de processo, conforme visto no tópico 4.5.1. Tal avaliação demonstra que o tempo de processo, além ser de parâmetro de desempenho de produção, está fortemente ligado aos resultados do estudo de AICV e, consequentemente, aos resultados do desempenho ambiental.

Ao final da avaliação ambiental, verificou-se que o modo de operação Al₂O₃_Q'_w10 apresentou os piores resultados para todas as categorias avaliadas, enquanto o modo de operação cBN_Q'_w150 apresentou os melhores resultados em todas as categorias avaliadas, o que demonstra, entre outras coisas, a importância do tempo de processo nos resultados do AICV.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nessa pesquisa, pode-se concluir que:

- A metodologia UPLCI foi adequada para a realização do estudo de ICV para uma unidade de processamento de manufatura discreta, como a retificação cilíndrica externa de mergulho. Apesar da carência de dados referentes à composição exata dos rebolos de cBN e de Al₂O₃ e sobre o consumo de fluido de corte, os quais foram estimados, a abordagem *in-depth* do UPLCI possibilitou a caracterização da unidade de processamento e quantificação dos seus fluxos de forma adequada e com qualidade nos dados.
- A utilização do MTConnect[®] foi de grande valia na estruturação do sistema de monitoramento proposto pela abordagem *in-depth*, proporcionando as diretrizes para o desenvolvimento e gerenciamento desse sistema. O MTConnect[®] forneceu as diretrizes para a organização dos diferentes sinais, analógicos e digitais, provenientes dos instrumentos usados no sistema de monitoramento, transformando-os em dados estruturados de ICV. Os dados foram então divididos e organizados por fluxos da unidade de processamento, permitindo a construção do banco de dados de ICV da unidade de processamento em tempo real.
- Os resultados do estudo de ICV e de desempenho de processo mostraram a superioridade do rebolo cBN em relação à vida útil da ferramenta (relação G), quanto na qualidade superficial da peça retificada (rugosidade) e erros de forma (circularidade). Outro ponto importante no estudo foi a verificação de que, apesar de o rebolo de Al₂O₃ ter trabalhado com valores elevados de taxas de remoção especificas (Q'w), como 50 mm/mm³.min e 100 mm/mm³.min, ele não conseguiu manter os nível mínimo de qualidade definido pela unidade funcional. Logo, esses modos de operação com Q'w elevado não atendem às especificações de qualidade do estudo de ICV.
- Os resultados de desempenho ambiental mostraram que o tempo de processo, além de representar um parâmetro de desempenho produtivo, é um parâmetro de grande influência nos resultados de desempenho ambiental. O tempo está intimamente ligado aos consumos energético e ao de ar comprimido, que representam juntos,

mais de 90% de todos os indicadores das categorias de impacto avaliadas. Isso justifica o fato de o modo de operação com maior potência e menor tempo de processo (cBN_Qw'150) apresentar os melhores resultados em todas as categorias de impacto e o modo de operação com menor potência e maior tempo de processo (Al₂O₃_Qw'10) apresentar os piores resultados em todas as categorias de impacto.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Aplicação do modelo proposto para a caracterização de outros modos ativos de operação da máquina-ferramenta estudada, com outros tipos de rebolo, peças, material usinado e taxas específicas de remoção Q'w;
- Aplicação do modelo proposto para outros processos de manufatura discreta, possibilitando a criação de bancos de dados de ICV para todas as unidades de processamento do ambiente produtivo de uma fábrica;
- Expansão do modelo proposto com a inclusão da geração de dados de AICV em tempo real, a partir da integração de banco de dados das categorias de impacto selecionadas e os dados de ICV gerados.

REFERÊNCIAS

- ABELE, A.; ANDERL, R.; BIRKHOFER, H. The Product Life Cycle. In: ABELE, A.; ANDERL, R.; BIRKHOFER, H. **Environmentally-Friendly Product Development:** Methods and Tools. 1^a ed. Londres: Springer, 2005. cap. 3. p. 35-126.
- AFONSO, G. A.; FILLETI, R. A. P.; SILVA, E. J. Strategy for Mapping Power Consumption in Grinding. In: **22nd International Congress of Mechanical Engineering** COBEM 2013, 2013, Ribeirão Preto. Proceedings of 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013). Rio de Janeiro: ABCM, 2013. p. 5720-5727.
- ARAÚJO, J. B. **Desenvolvimento de método de avaliação de desempenho de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade**. 2010. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2010.
- ARCHEM QUÍMICA LTDA. **Ficha de informação de segurança de produto químico Produto: METCUT SC-101K**. Araras: ARCHEM, 2012. 5 p. Relatório técnico, M.101K VER.00 08/12.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009a). **NBR ISO 14040:** Gestão ambiental Avaliação do ciclo de vida Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, ISO, 2009.
- _____ (2009b). **NBR ISO 14044:** Gestão ambiental Avaliação do ciclo de vida Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro: ABNT, ISO, 2009.
- ASSOCIATION FOR MANUFACTURING TECHNOLOGY. **Getting Started with MTConnect**®. AMT, 2011. Disponível em: http://www.mtconnect.org. Acesso em: 11 jan. 2014.
- AURICH, J. C.; LINKE, B.; HAUSCHILD, M.; CARRELLA, M.; KIRSCH, B. Sustainability of abrasive processes. **CIRP Annals Manufacturing Technology**, v. 62, p. 653-672, 2013. ISSN: 0007-8506.
- BODEN, T. A.; MARLAND, G.; ANDRES, R. J. **Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions.** Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy. Oak Ridge: 2013. Disponível em: http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/glo_2010.html. Acesso em: 8 dez. 2014.
- BOURHIS, F. L.; KERBRAT, O.; HASCOET, J. Y.; MOGNOL, P. Sustainable manufacturing evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 69, p. 1927-1939, 2013. ISSN: 1433-3015.
- BOYD, O. Human toll of air pollution could be costing China 13% of GDP. **China Dialogue**, Londres, 16 set. 2014. Disponível em: https://www.chinadialogue.net/blog/7316-Human-toll-of-air-pollution-could-be-costing-China-13-of-GDP/en. Acesso em: 12 dez. 2014.

BRODER, J. M. House passes bill to address threat of climate change. **New York Times**, Nova Iorque, 27 jun. 2009. Politics, p. A1.

CYBEROPC. Disponível em:http://www.cyberopc.org. Acesso em: 11 jun. 2015.

CHEIL GRINDING WHEEL IND. CO. LTD. **General Guide for Abrasive Products**. 2010. 13 p. Catalog. Disponível em: http://www.grinding.co.kr/sitefiles/ general_catalog_en.pdf. Acesso em: 5 mar. 2015.

CHOUDHURY, I. A.; EL-BARADIE, M. A. Machinability of nickel-base super alloys: a general review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 77, p. 278-284. 1998.

CLARENS, A. F.; ZIMMERMAN, J. B.; KEOLEIAN, G. A.; HAYES, K. F.; SKELOS, S. J. Comparison of Life Cycle Emissions and Energy Consumption for Environmentally Adapted Metalworking Fluid Systems. **Environmental Science & Technology**, v. 42, p. 8534-8540. 2008, ISSN: 1520-5851.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (2012a). **A Indústria Brasileira no Caminho da Sustentabilidade**. Brasília, DF: CNI, 2012. 42 p.

_____ (2012b). **A Indústria de Máquinas na era da economia verde**. Brasília, DF: CNI, ABIMAQ, 2012. 44 p.

CORREA, L. O. **Notas de Aula da Disciplina Hidráulica e Pneumática da Universidade Tecnológica Federal do Paraná** - Aula - Fundamentos Físicos do Ar Comprimido. Curitiba: UTFPR, 2015. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/luizotavio/disciplinas/hidraulica-e-pneumatica-engenharia/material-de-aula/PnEUMATICA_Fundam_Fisicos.pdf. Acesso em: 6 mar 2015.

DEIF, A. M. A system model for green manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p. 1553-1559. 2011. ISSN: 0959-6526.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 1ª ed. São Paulo: M M Editora, 1999. 242 p.

DORNFELD, D.; YUAN, C.; DIAZ, N.; ZHANG, T.; VIJAYARAGHAVAN, A. Introduction to Green Manufacturing. In: DORNFELD, D (ed.). **Green Manufacturing:** Fundamentals and Applications. 1^a ed. Berkeley: Springer, 2013. cap. 1. p. 1-23.

DUFLOU, J. R.; KELLENS, K.; REINALD; GUO, Y.; DEWULF, W (2012a). Critical comparison of methods to determine the energy input for discrete manufacturing processes. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 61, p. 63-66. 2012a.

DUFLOU, J. R.; SUTHERLAND, J. W.; DORNFELD, D.; HERRMANN, C.; JESWIEST, J.; KARA, S.; HAUSCHILD, M.; KELLENS, K (2012b). Towards energy and resource efficient manufacturing: A process and system approach. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 61, p. 587-609. 2012b.

- DYER, S.; NGO, B.; WIVAGG, K. Chip Recycling: Recycling of Chips from BZZ Conditioning Processes. 70 f. Monografia (Bacharel em Engenharia de Manufatura) Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 2007.
- ELKINGTON, J. Canibais com garfo e faca. Tradução de Patrícia Martins Ramalho. São Paulo: Makron Books, 2001.
- EUROPEAN COMMISSION. Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook**: General guide for Life Cycle Assessment Detailed guidance. Ispra: EU, JCR, 2010. 398 p. ISSN 1018-5593.
- FIELD, C. B.; BARROS, V. R.; DOKKEN, D. J.; MACH, K. J.; MASTRANDREA, M. D.; BILIR, T. E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K. L.; ESTRADA, Y. O.; GENOVA, R. C.; GIRMA, B.; KISSEL, E. S.; LEVY, A. N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P. R.; WHITE, L. L. (Ed.). Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2014:** Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. 1^a ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 1-32.
- FILLETI, R. A. P.; SILVA, D. A. L.; SILVA, E. J.; OMETTO, A. R. Dynamic System for Life Cycle Inventory and Impact Assessment of Manufacturing Processes. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 531-536, 2014. ISSN: 2212-8271.
- FISHER, B.; NAKICENOVIC, N; ALFSEN, K.; MORLOT J. C.; CHESNAYE, F.; HOURCADE, J.-CH.; JIANG, K.; KAINUMA, M.; LA ROVERE, E.; MATYSEK, A.; RANA, A.; RIAHI, K.; RICHELS, R.; ROSE, S.; VUUREN, D.; WARREN, R. Issues related to mitigation in long-term context. In: METZ, B.; DAVIDSON, O.R.; BOSCH, P.R.; DAVE, R.; MEYER, L.A. (Ed.). **Climate Change 2007:** Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. 1^a ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- GARETTI, M.; TAISCH, M. Sustainable manufacturing: trends and research challenges. **Production Planning & Control:** The Management of Operations, v. 23, n. 2-3, p. 83-104, 2012. DOI: 10.1080/09537287.2011.591619.
- GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **World Footprint**. 2015. Disponível em: http://www.footprintnetwork.org/ar/index.php/GFN/page/world_footprint/. Acesso em: 5 jan. 2015.
- GRIMM, A. M. Notas de Aula da Disciplina Meteorologia Básica da Universidade Federal do Paraná Capítulo 4.2: A Lei dos Gases Ideais. Curitiba: UFPR, 1999. Disponível em: http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap4/cap4-2.html. Acesso em: 05 mar 2015.
- GUO, Y. **UPLCI Dataset:** Grinding (external cylindrical) Studer AG: S20. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven. 2012. 3 p. Disponível em: http://www.co2pe.org. Acesso em: 22 mai. 2013.
- GUTOWSKI, T. G.; ALLWOOD, J. M.; HERRMANN, C.; SAHNI, S. A Global Assessment of Manufacturing Economic Development, Energy Use, Carbon Emissions, and the Potential

for Energy Efficiency and Materials Recycling. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 38, p. 81-106. 2013. ISSN: 1543-5938.

GUTOWSKI, T.; DAHMUS, J.; THIRIEZ, A. Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. In: **13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering**, 2006, Leuven. Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Leuven: CIRP, LCE, 2006.

HAUSCHILD, M.; JESWIET, J.; ALTINGA, L. From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 54, n. 2, p. 1-21, 2005. ISSN: 0007-8506.

HARIS DIVISION SUPERABRASIVES. **Cubic Boron Nitride**. 2006. Catalog. Disponível em: http://www.harisdiamond.com/catalogs.html. Acesso em: 16 jun. 2015.

HOWES, T. D.; TÖNSHOFF, H. K.; HEUER, W. Environmental Aspects of Grinding Fluids. **Annals of CIRP**, v. 20, p. 623-630, 1991.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO, 2014. Disponível em: http://http://www.iso.org. Acesso: 29 set. 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12181:** Geometrical product specifications (GPS) – Roundness. Genebra: ISO, 2011.

JESWIET, J.; SZEKERES, A. Definitions of critical nomenclature in environmental discussion. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 14-18, 2014. ISSN: 2212-8271.

KELLENS, K.; DEWULF, W.; LAUWERS, B.; KRUTH, J.-P.; DUFLOU, J. R. Environmental impact reduction in discrete manufacturing: examples for non-conventional processes. **Procedia CIRP**, v. 6, p. 27-34, 2013. ISSN: 2212-8271.

KELLENS, K.; DEWULF, W.; OVERCASH, M.; HAUSCHILD, M. Z.; DUFLOU, J. R (2011a). Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)—CO2PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 17, p. 69-78. 2011. ISSN: 1614-7502.

_____(2011b). Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)—CO2PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: Case studies. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 17, p. 242-251. 2011b. ISSN: 1614-7502.

KIRSCH, B.; EFFGEN, C.; BÜCHEL, M.; AURICH, J. C. Comparison of the embodied energy of a grinding wheel and an end mill. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 74-79. 2014. ISSN: 2212-8271.

KOPAC, J.; KRAJNIK, P. High-performance grinding - A review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 175, n. 1-3, p. 278-284, jun. 2006.

- LI, W.; WINTER, M.; KARA, S.; HERRMANN, C. Eco-efficiency of manufacturing processes: A grinding case. **CIRP Annals Manufacturing Technology**, v. 61, p. 59-62, 2012. ISSN: 0007-8506.
- LINKE, B. S.; OVERCASH M. Life Cycle Analysis of Grinding. In: **Leveraging Technology for a Sustainable World:** Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering (19th CIRP LCE), 2012, Berkeley. Berkeley: Springer, 2012. p. 293-298.
- LUCATO, C.; VIEIRA JR, M.; SANTOS, J. C. S. Eco-Six Sigma: integration of environmental variables into the Six Sigma technique. **Production Planning & Control:** The Management of Operations, v. 6, p. 605-616. 2015. DOI:10.1080/09537287.2014.949896.
- MALKIN, S.; GUO, C (2008a). Grinding Wheels: Composition and Properties. In: _____. **Grinding Technology:** Theory and Application of Machining with Abrasives. 2. ed. South Norwalk: Industrial Press Inc., 2008a. cap. 2, p. 11-42.
- MALKIN, S.; GUO, C (2008b). Grinding Geometry and Kinematics. In: _____. **Grinding Technology:** Theory and Application of Machining with Abrasives. 2. ed. South Norwalk: Industrial Press Inc., 2008b. cap. 3, p. 43-80.
- MALKIN, S.; GUO, C (2008c). Wheel truing, dressing, and topography. In: _____. **Grinding Technology:** Theory and Application of Machining with Abrasives. 2. ed. South Norwalk: Industrial Press Inc., 2008c. cap. 4, p. 81-114.
- MALKIN, S.; GUO, C (2008c). Wheel truing, dressing, and topography. In: _____. Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives. 2. ed. South Norwalk: Industrial Press Inc., 2008c. cap. 4, p. 81-114.
- MALKIN, S.; GUO, C (2008d). Wheel wear and lubrication. In: _____. **Grinding Technology:** Theory and Application of Machining with Abrasives. 2. ed. South Norwalk: Industrial Press Inc., 2008d. cap. 11, p. 285-314.
- MALKIN, S.; GUO, C. Thermal Analysis of Grinding. **CIRP Annals Manufacturing Technology**, v. 56, p. 760-782, 2007. ISSN: 0007-8506.
- MASCO CORPORATION, MILLER ENVIRONMENTAL, MILLER OIL OF INDIANA INC.(Estados Unidos). John M. Noble, Phillip B. Simon, Scott P. Riggle, Douglas E. Doles, Antony A. Mccullough, Ross Darren Smith. **Water-based metalworking fluid**. EP1685221 A2, 29 out. 2004, 02 ago. 2006. Disponível em: http://www.google.com/patents/EP1685221A2?cl=en. Acesso em: 5 mar. 2015.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2014:** Relatório Síntese Ano Base 2013. Rio de Janeiro: MME, EPE, 2014. 53 p.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Projeto Programa Piloto para minimização dos Impactos gerados por resíduos perigosos**. Documento 3 Gestão de resíduos fluidos de usinagem. Porto Alegre: MMA, UNEP, SENAI, FIERGS, UNIDO, 2006. 42 p.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Norma Regulamentadora Nº 15** – Atividades e Operações Insalubres. Brasília: MTE, 2014. 82 p.

MTCONNECT INSTITUTE. Disponível em:http://www.mtconnect.org. Acesso em: 11 jun. 2015.

OLIVEIRA, J. F. G. **Tópicos avançados sobre o processo de retificação**. Apostila. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos — Universidade de São Paulo, 1989. 94 p.

OLIVEIRA, J. F. G.; ALVES, S. M. Adequação ambiental dos processos de usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. **Produção**, v. 17, n. 1, p. 129-138. São Paulo: 2007. ISSN: 0103-6513.

OMETTO, A. R. **Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, Exergia e Emergia**. 2005. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2005.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. The World Commission on Environment and Development. **Report of the World Commission on Environment and Development:** Our Common Future. Genebra: ONU, WCED, 1987. 300 p.

| Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA. Rumo a um | ıa |
|---|----|
| economia verde: Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável e a Erradicação da Pobreza | _ |
| Síntese para os tomadores de decisão. Nairóbi: ONU, PNUMA, 2011. 44 p. ISBN: 978-92-80' | 7- |
| 3204-7. | |

_____ (2014a). Convenção-Quadro sobre a Mudança do Clima. **Kyoto Protocol**. 2014. Disponível em: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php. Acesso em: 11 dez. 2014.

_____ (2014b). Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA. **Urban Air Pollution**. 2014. Disponível em: http://www.unep.org/urban_environment/Issues/urban_air.asp. Acesso em: 12 dez. 2014.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. Agência Internacional de Energia. **World Energy Outlook 2009**. Paris: OCDE, IEA, 2009. 691 p.

PIEKARSKI, C. M.; LUZ, L. M.; ZOCCHE, L.; FRANCISCO, A. C. Métodos de Avaliação de Impactos Do Ciclo de Vida: Uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras. **Revista Gestão Ambiental**, v. 08, n. 03, p 222-240. 2012. ISSN 1808-0448

RICHARDS, N.; ASPINWALL, D. Use of ceramic tools for machining nickel based alloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 29, p. 575-588. 1989.

RONDON, L. C. **Desenvolvimento de sistema de supervisão utilizando padrão MTConnect**TM. 2010. 61f. Monografia (Bacharel em Engenharia de Computação) — Instituto de Ciências Matemáticas e Computação, São Carlos, 2010.

SAINT GOBAIN ABRASIVES INC (Estados Unidos). Anne M. Bonner; Eric Bright; Edward L. Lambert; Dean S. Matsumoto; Xavier Orlhac; David A. Sheldon. **Abrasive articles with**

- **novel structures and methods for grinding**. EP 1497075 A4, 21 mar. 2003, 30 jul. 2008. Disponível em: http://www.google.co.in/patents/EP1497075A4?cl=en. Acesso em: 5 mar. 2015.
- SAINT-GOBAIN DIAMANTWERKZEUGE GMBH & CO. **KG Catalogue No. 2** Tools: WINTER Diamond and cBN Tools for the Tools Industry. 2010. 200 p. Catalog. Disponível em: http://www.winter-superabrasives.com/uploadedFiles/SGwintersuperabrasives/Documents/WINTER-catalogue-no-2-diamond-and-cBN%20tools-tools-industry.pdf. Acesso em: 5 mar. 2015.
- SENA, L. Avaliação do sistema de posicionamento do carro porta-rebolo numa retificadora CNC Flexa 600-L com o auxílio de sinais de emissão acústica. 2007. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- SHAO, G.; KIBIRA, D.; BRODSKY, A.; EGGE, N. Decision Support for Sustainable Manufacturing using Decision Guidance Query Language. **International Journal of Sustainable Engineering**. v. 4, p. 251-265. 2011.
- SKONE, T. J.; CURRAN, M. A. LCAccess Global Directory of LCI resources. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, p. 1345-1350. 2005. ISSN: 0959-6526.
- SOBEL, W. **MTConnect® Standard Part 1** Overview and Protocol Version 1.2.0. 2012. Disponível em: http://www.mtconnect.org. Acesso em: 11 jan. 2014.
- SPECIAL METALS. Inconel alloy 751. Huntington: Special Metals. 2008.
- STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (Ed.). Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2013:** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1^a ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 3-29.
- SWARR, T. E. Societal life cycle assessment—could you repeat the question? **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 14, p. 285-289. 2009. ISSN: 1614-7502.
- THORN, M. J.; KRAUS, J. L.; PARKER, D. R. Life-cycle assessment as a sustainability management tool Strengths, weaknesses, and other considerations. **Environmental Quality Management**, v. 20, n. 3, p. 1-10. 2011. ISSN: 1520-6483.
- TORRISI, N. M.; OLIVEIRA, J. F. G. Remote control of CNC machines using the CyberOPC communication system over public networks. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 39. p. 570-577. 2008.
- U.S. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Climate Monitoring**. Washington: NOAA, NESDID, NCDC, 2015. Disponível em http://www.ncdc.noaa.gov/climate-monitoring/. Acesso em: 05 mar. 2015.

VIJAYARAGHAVAN, A; YUAN, C.; DIAZ, N.; FLESCHUTZ, T.; HELU, M. Closed-loop Production Systems. In: DORNFELD, D (ed.). **Green Manufacturing:** Fundamentals and Applications. 1^a ed. Berkeley: Springer, 2013. cap. 6. p. 117-152.

VIJAYARAGHAVAN, A.; SOBEL, W.; FOX, A.; DORNFELD, D.; WARNDORF, P. Improving Machine Tool Interoperability Using Standardized Interface Protocols: MTConnectTM. In: 2008 International Symposium on Flexible Automation, 2008, Atlanta. **Proceedings of 2008 ISFA**. Atlanta: ASME, 2008. p. 1-8.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Ecoefficiency:** Creating More Value with Less Impact. Genebra: WBCSD, 2000. 32 p.

WORLD WIDE WEB CONSORTIUM. **Extensible Markup Language (XML)**. Disponível em: http://www.w3.org/XML. Acesso: 11 jan. 2014.

APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DO REBOLO DE CBN

| Modelo: 8B126 K150 VT2 400 |)x20x135 |
|---|----------------------|
| Diâmetro Externo Inicial [mm] | 400 |
| Diâmetro Interno Abrasivo [mm] | 390 |
| Diâmetro Interno Matriz [mm] | 135 |
| Largura [mm] | 20 |
| Abrasivo [-] | cBN |
| Tamanho de Grão* [-] | B126 |
| Grade* [-] | K(n = 7) |
| Concentração* [-] | 150 |
| Ligante** [-] | Vitrificado (VT2) |
| Massa Específica Abrasivo*** [g/cm³] | 3,48 |
| Quantidade de Abrasivo por Volume do Rebolo* [g/cm³] | 1,32 |
| Massa Específica Ligante**** [g/ cm³] | 2,42 |
| Composição Volumétrica do Grão Abrasivo* [%] | 37,93% |
| Composição Volumétrica dos Poros* [%] | 44,36% |
| Composição Volumétrica do Ligante* [%] | 17,71% |
| Volume Rebolo Total [cm³] | 124,09 |
| Volume Grão [cm³] | 47,07 |
| Volume Ligante [cm ³] | 21,98 |
| Massa Grão* [g] | 163,80 |
| Massa Ligante [g] | 53,19 |
| Massa Total [g] | 216,99 |
| Porcentagem Mássica Grão [%] | 75,49% |
| Porcentagem Mássica Ligante [%] | 24,51% |
| Massa específica média Rebolo [g/ cm³] | 1,75 |

APÊNDICE B - CARACTERÍSTICAS DO REBOLO DE AL₂O₃

| Modelo: Norton 500x50x203,2 554 | A46-1 K8VC1 |
|--|--------------------------------------|
| Diâmetro Externo Inicial [mm] | 500 |
| Diâmetro Interno [mm] | 203 |
| Largura [mm] | 50 |
| Abrasivo* [-] | 55A - Al ₂ O ₃ |
| Tamanho de Grão* [-] | 46 |
| Grau* [-] | K (Médio) |
| Estrutura* [-] | 8 |
| Ligante* [-] | Vitrificado |
| Tipo** [-] | C (Norton) |
| Massa Específica Grão Abrasivo *** [g/cm³] | 3,96 |
| Massa Específica Ligante ** [g/cm³] | 2,42 |
| Composição Volumétrica do Grão Abrasivo * [%] | 48,00% |
| Composição Volumétrica dos Poros * [%] | 41,00% |
| Composição Volumétrica do Ligante * [%] | 11,00% |
| Volume Rebolo Total [cm³] | 8779,74 |
| Volume Grão [cm³] | 4214,28 |
| Volume Ligante [cm ³] | 965,77 |
| Massa Grão [g] | 16688,53 |
| Massa Ligante [g] | 2337,17 |
| Massa Total [g] | 19025,70 |
| Porcentagem Mássica Grão [%] | 87,72% |
| Porcentagem Mássica Ligante [%] | 12,28% |
| Massa Específica Média Rebolo [g/cm³] | 2,17 |

APÊNDICE C – ENERGIA INCORPORADA DOS REBOLOS

| | Volume | | | | Energia incorporada do rebolo | ada do reb | olo | | | |
|--|------------------|-------------------|---|--|--|----------------------------|--|-------|----------------------|-----------|
| | Abrasivo | | Material | | | | Processo | | | Total |
| Especificação | Rebolo [cm^3] | Grão [kJ/cm^3] | Grão Ligante Auxiliar J/cm^3] [kJ/cm^3] [kJ/cm^3 | Rebolo Grão Ligante Auxiliar [cm^3] [kJ/cm^3] [kJ/cm^3] | Peneiramento e Mistura [kJ/cm^3] | Prensa Se [kJ/cm^3] [kJ | Prensa Secagem Queima kJ/cm^3] [kJ/cm^3] [kJ/cm^3 |] | Acabamento [kJ/cm^3] | [kJ/cm^3] |
| cBN* Vitrificado, Espessura da camada abrasiva: 5mm; Matriz de aço baixo carbono; 400x20x200 | 124,09 | 209,52 | 48,35 | 0,00 | | | 926,72 | | | 1184,60 |
| AL2O3** Lapport Schleiftechnik GmbH, Vitrificado, alumina branca e rosa fundida, grão tamanho 100, 500x32x203,2 mm | 5245,45 21,04 | 21,04 | 3,51 | 0,00 | 0,01 | 0,30 | 0,10 | 19,11 | 0,16 | 44,23 |

*Fonte: Aurich et al. (2013); ** Fonte: Kirsch et al. (2014).

ANEXO A – COMPOSIÇÃO DO LIGANTE VITRIFICADO C

| Composição do ligante depois de queimado | Material em porcentagem mássica [%] |
|--|--|
| Vitrificantes (SiO ₃ +B ₂ O ₃) | 71 |
| Al_2O_3 | 14 |
| Óxidos Alcalinos Terrosos (CaO, MgO) | <0,5 |
| Óxidos Alcalinos (Na ₂ O, K ₂ O, Li ₂ O) | 13 |
| Massa Especifica do Ligante [g/cm ³] | 2,42 |

Fonte: SAINT GOBAIN ABRASIVES INC, 2003