



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

THALES HENRIQUE TORRES DE ALMEIDA

**ANÁLISE E MELHORIA DO CONSUMO DE GÁS NATURAL NUMA
FÁBRICA DE FUSÃO DE ALUMÍNIO**

Recife
2019

THALES HENRIQUE TORRES DE ALMEIDA

**ANÁLISE E MELHORIA DO CONSUMO DE GÁS NATURAL NUMA
FÁBRICA DE FUSÃO DE ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Santos de Araújo Abreu

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

- A447a Almeida, Thales Henrique Torres de.
Análise e melhoria do consumo de gás natural numa fábrica de fusão de alumínio / Thales Henrique Torres de Almeida– Recife, 2019.
57 f. il., tabs., abrev. e siglas.
- Orientadora: Profa. Dra. Mônica Santos de Araújo Abreu.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Mecânica, 2019.
Inclui referências.
1. Engenharia mecânica. 2. Alumínio. 3. Refusão. 4. Gás natural. 5. WCM. I. Abreu, Mônica Santos de Araújo (Orientadora). II. Título.
- 621 CDD (22. ed.)
- UFPE
BCTG / 2020-11

THALES HENRIQUE TORRES DE ALMEIDA

**ANÁLISE E MELHORIA DO CONSUMO DE GÁS NATURAL NUMA FÁBRICA DE
FUSÃO DE ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 09/12/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Mônica Santos de Araújo Abreu (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Justo Emilio Alvarez Jacobo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Bleysson Cavalcanti Moreira (Examinador Externo)
Instituto de Produtividade Aplicada

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo o esforço para me dar uma boa educação, por todo o incentivo durante toda minha jornada, por todos os conselhos e puxões de orelha.

A todos os professores do curso de engenharia mecânica que contribuíram para minha formação acadêmica e profissional.

À EIXO Consultoria por ter me ensinado tantas lições, por ter me dado as experiências necessárias para encarar o mercado de trabalho possibilitando o desenvolvimento desse trabalho.

A todos meus amigos e colegas que estiveram comigo durante o meu período de formação acadêmica. Em especial agradeço a Washington, Ivan, Otávio, João Araújo, Lucas Melo e Juliana por terem feito meu período acadêmico ser mais divertido. Espero levar nossa amizade até o fim da vida.

RESUMO

Atualmente, o setor industrial é um dos maiores consumidores de energia do mundo, em contrapartida, devido a inúmeras razões, é um dos setores que mais desperdiçam energia. Com isso, existe a necessidade de serem implementadas algumas medidas que fomentem a busca por eficiência energética industrial. O setor de alumínio secundário tem um consumo energético bastante reduzido se comparado ao setor primário, porém ainda existem oportunidades para melhorar os processos internos e aumentar a eficiência energética do setor secundário. Portanto, este trabalho apresentou uma análise sobre as principais ineficiências energéticas presentes em uma fábrica de fusão de alumínio e detalha a aplicação de uma metodologia de melhoria focada para reduzir do consumo de gás natural, alcançando assim uma melhor eficiência energética. Para isso, é utilizado o pilar *Focused Improvement* da metodologia *World Class Manufacturing* com foco em melhorar o processo de fusão do alumínio bem como aumentar o nível de treinamento das pessoas envolvidas no processo. Verificou-se que a aplicação da metodologia WCM gerou uma redução significativa no consumo de gás natural em um dos fornos da fábrica de fusão de alumínio. A partir desses resultados, conclui-se que a aplicação de metodologias focadas em atingir a eficiência energética podem apresentar um impacto muito positivo em um processo produtivo.

Palavras-chave: Alumínio. Refusão. Gás natural. WCM.

ABSTRACT

Nowadays, the industrial sector is one of the largest energy consumers in the world, however, due to many reasons, it is a sector that wastes the most energy. Thereby, there is a growing need to implement some measures that foster the search for industrial energy efficiency. The secondary aluminum sector consumes a much smaller amount of energy compared to the primary sector, however there are still many opportunities to improve the internal processes and increase energetic efficiency of the secondary aluminum sector. Therefore, this paper presents an analysis of the main energy inefficiencies existent in an aluminum cast-house plant and details the application of a focused improvement methodology in order to reduce natural gas consumption, reaching a greater energy efficiency. In this case, the Focused Improvement pillar of World Class Manufacturing methodology is used aiming to improve the aluminum cast-house process as well as to increase the training level of the people involved in such process. It was verified that the WCM methodology generated a significant reduction of natural gas consumption in one of the melting furnaces of the aluminum cast house. From these results, it's concluded that the application of methodologies with focus on energy efficiency can generate a positive impact in a productive process.

Keywords: Aluminum. Cast house. Natural gas. WCM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma do Processo Bayer	16
Figura 2 - Parcelas de transferência de calor na fusão de alumínio	17
Figura 3 - Modelo WCM proposto por Schonberger	18
Figura 4 - Sistema WCM desenvolvido pelo Grupo Fiat (2005)	20
Figura 5 - Estrutura do WCM (pilares)	23
Figura 6 – Macro etapas do processo de refusão.....	26
Figura 7 - Forno de fusão de alumínio	27
Figura 8 – Fluxograma do ciclo de fusão do alumínio.....	28
Figura 9 - Distribuição do consumo energético industrial	30
Figura 10 – Sete passos na implementação do pilar FI	31
Figura 11 - Estratificação inicial do consumo de gás natural na refusão	35
Figura 12 - Perda de fusão (fornos de fusão)	35
Figura 13 - Consumo específico (fornos de fusão).....	36
Figura 14 – Consumo específico por turma (março-junho)	44
Figura 15 – Geração de escória por liga e por turma (março-junho)	44
Figura 16 – PA por turma (março-junho).....	45
Figura 17 – TPA por turma (março-junho)	45
Figura 18 - Evolução do consumo específico por turma (março-junho x julho-outubro).....	48
Figura 19 - Evolução do consumo específico médio (março-junho x julho-outubro).....	49
Figura 20 - Evolução do consumo absoluto médio diário (março-junho vs julho-outubro) ...	49
Figura 21 - Geração de escória por liga e por turma (julho-outubro)	50
Figura 22 - Evolução da PF (março-junho x julho-outubro).....	50
Figura 23 - PA por turma (julho-outubro).....	51
Figura 24 – TPA por turma (julho-outubro).....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grupos de ligas de alumínio segundo a ASTM	15
Tabela 2 - Pilares Operacionais do WCM	23
Tabela 3 - Composição química do gás natural	29
Tabela 4 – Indicadores agrupados	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
WCM	<i>World Class Manufacturing</i> – Manufatura de Classe Mundial
KPI	<i>Key Performance Indicator</i> – Indicadores de Desempenho
KAI	<i>Key Activity Indicator</i> – Indicadores de Atividades
OEE	<i>Overall Equipment Efficiency</i> – Eficiência Global do Equipamento
EBITDA	Lucros antes de juros, impostos, depreciação e amortização
PF	Perda de Fusão
FI	<i>Focused Improvement</i> – Melhoria Focada
PA	Número de vezes que a porta do forno é aberta
TPA	Tempo de Porta aberta

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	12
2	<u>REFERENCIAL TEÓRICO</u>	14
2.1	<u>O ALUMÍNIO E SEU PROCESSO DE FABRICAÇÃO</u>	14
2.1.1	<u>Energia Presente na Fusão do Alumínio</u>	17
2.2	<u>MANUFATURA DE CLASSE MUNDIAL (WCM)</u>	18
2.2.1	<u>Conceitos Chave</u>	20
2.2.2	<u>Estrutura da Manufatura de Classe Mundial</u>	22
3	<u>MÉTODO DE APLICAÇÃO</u>	25
3.1	<u>CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA</u>	25
3.1.1	<u>Fornos de Fusão</u>	26
3.1.2	<u>Uso do Gás Natural</u>	29
3.2	<u>PILAR FI</u>	30
4	<u>ANÁLISE DE MELHORIA E RESULTADOS</u>	33
4.1	<u>DEFINIÇÃO DE INDICADORES</u>	33
4.2	<u>SELEÇÃO DA ÁREA MODELO</u>	34
4.3	<u>PRINCIPAIS PERDAS PRESENTES NO PROCESSO DE FUSÃO</u>	36
4.3.1	<u>Perdas de Energia pelo Revestimento Refratário</u>	37
4.3.2	<u>Perdas de Energia Devido à Geração de Escória</u>	38
4.3.3	<u>Perdas de Energia Devido à Má Execução das Etapas do Processo</u>	38
4.3.4	<u>Perdas de Energia Devido à Combustão dos Gases</u>	39
4.4	<u>ESCOLHA DO TEMA E DEFINIÇÃO DA EQUIPE</u>	41
4.4.1	<u>Planejamento do Projeto</u>	42
4.5	<u>DESENVOLVIMENTO DO PROJETO</u>	43
4.5.1	<u>Ações de Melhoria Realizadas</u>	46

<u>4.5.2</u>	<u>Limitações do Projeto</u>	47
<u>4.6</u>	<u>ANÁLISE DE RESULTADOS</u>	48
<u>5</u>	<u>CONCLUSÕES</u>	54
<u>5.1</u>	<u>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS</u>	55
	<u>REFERÊNCIAS</u>	56

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, o consumo energético em grande escala tornou-se indispensável para o desenvolvimento econômico de um país. No Brasil, à medida que a economia vai recuperando o ritmo de crescimento, os dados dos balanços energéticos mostram uma demanda de energia cada vez mais crescente sobretudo nos setores de transporte e industrial correspondendo a 64,4% do consumo de energia do Brasil. O setor de indústrias é historicamente um dos setores que mais consomem energia mundialmente, entretanto, seja pelo baixo nível de financiamento, informações imprecisas ou falta de conhecimento adequado é um dos setores que mais desperdiçam energia (MME, 2019).

O desperdício pode ser justificado por algumas barreiras que impedem as indústrias de concentrar esforços nesse sentido, sendo os principais impedimentos o acesso ao capital, os riscos técnicos, tais como mudanças drásticas no setor produtivo, e a falta de financiamento ou orçamento. Em contrapartida, companhias que adotam estratégia de longo prazo, tem um perfil de sustentabilidade, possuem executivos com ambição e são mais atraídas a programas de eficiência energética industrial (ROHDIN *et al.*, 2007).

Nesse contexto encontra-se a indústria do alumínio, segundo Green (2007), energia e alumínio estão intimamente ligados desde o início da indústria desse metal em 1886 e, ainda que a reciclagem na indústria secundária economize 95% da energia usada, em comparação com a produção do metal a partir do minério de bauxita - indústria primária, há perdas no processo que remetem a oportunidades de melhoria.

O processo de fusão do alumínio, presente na indústria secundária, apresenta uma alta complexidade operacional pois muitas variáveis são interligadas e, caso sejam mal controladas, podem causar um impacto financeiro relevante para a fábrica. Em adição, os equipamentos envolvidos no processo são submetidos a condições bastante degradantes e incomuns, como altas temperaturas, choques térmicos cíclicos e choques mecânicos, todos esses fatores exigem uma análise apurada de perdas.

Esforços no sentido de diminuir perdas no processo fabril retomam meados dos anos 40, com o então Sistema Toyota de Produção (STP) e mais tarde com a proposta de Manufatura Enxuta (Lean Manufacturing). Atualmente, a manufatura de classe mundial (WCM), integração do Lean e outras técnicas tais como *Just-in-Time*, *Total Quality Management*, *Total Productive Maintenance* conta com um processo bem

definido para identificar, diminuir ou eliminar perdas no processo. Essa metodologia de gestão mantém o foco nos resultados e incentiva que sejam priorizadas as maiores perdas em termos financeiros para que a análise e melhoria tenha o maior alcance e impacto na competitividade da empresa.

Um dos insumos mais utilizados no processo de fusão do alumínio é o gás natural (BRATU *et al.*, 2016), portanto, em âmbito geral, o objetivo desse trabalho é o estudo da redução de perdas no consumo de gás natural em um processo de fusão de alumínio de uma fábrica de produtos laminados, com o uso de uma metodologia de gestão enxuta baseada no WCM.

De forma detalhada, no âmbito dos aspectos citados, tem-se em foco os seguintes objetivos específicos:

- Aplicar metodologia WCM e medir seus resultados.
- Estudo e análise de indicadores de eficiência energética de uma fábrica de fusão de alumínio.
- Medir a performance operacional (processo) através de indicadores da produção de uma fábrica de fusão de alumínio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os principais conceitos utilizados no desenvolvimento desse trabalho são apresentados nessa seção.

2.1 O ALUMÍNIO E SEU PROCESSO DE FABRICAÇÃO

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre e é amplamente utilizado na construção da sociedade atual estando presente em setores como: construção civil, automobilismo, alimentação, equipamentos elétricos, tecnologia, entre outros. Sua ampla utilidade se explica pela suas propriedades físico-químicas que são bastante atrativas quando comparadas com propriedades de outros metais muito utilizados nos mesmos setores (STUMP e VATAVUK, 2015).

Hatch (1984) apresenta as seguintes propriedades:

- Leveza: O Alumínio tem uma baixa massa específica, aproximadamente três vezes menor que a massa específica do aço.
- Alta resistência mecânica: Existem algumas ligas de alumínio que suportam o mesmo nível de esforços mecânicos que metais mais pesados, sendo um diferencial bastante atrativo para as indústrias que utilizam metais para fabricar seus produtos.
- Condutividade elétrica: O alumínio é um bom condutor elétrico, possuindo cerca de 70% da condutividade do cobre (Cu).
- Resistência a corrosão: Em contato com o ar é formada uma camada muito fina de óxido sobre a superfície do alumínio protegendo-o contra a corrosão.
- Ductilidade: Além de uma boa resistência mecânica, o alumínio também consegue suportar altos níveis de deformação antes de chegar à fratura.

O alumínio é dificilmente comercializado em sua forma pura (100% Al), geralmente é possível encontrá-lo combinado com outros elementos e são muitas as possíveis combinações de elementos para formar a chamada liga de alumínio, cada uma com suas características e propriedades físico-químicas distintas.

As ligas de alumínio podem ser divididas em dois grupos: as ligas trabalhadas e ligas fundidas. As ligas trabalhadas passam por processos de extrusão, laminação, estiramento, forjamento e, devido ao grande número de ligas diferentes são nomeadas

segundo o padrão da ASTM (2017). A nomenclatura é composta de quatro dígitos “XXXX”, conforme Tabela 1, em que:

1º X: Especifica a liga de alumínio pelo principal elemento que compõe a liga.

2º X: Indica modificações da liga original ou nível de impurezas permitido

3º e 4º X: Normalmente utilizado para diferenciar as diversas ligas possíveis, mas pode indicar também o nível de pureza da liga.

Tabela 1 - Grupos de ligas de alumínio segundo a ASTM

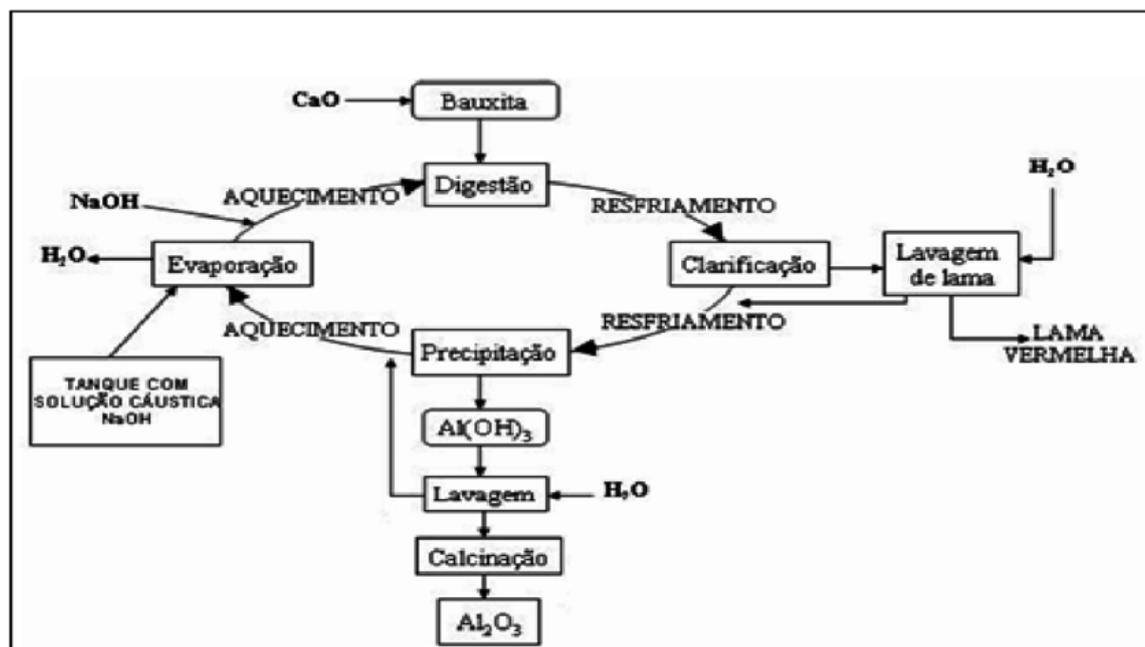
Classificação da Liga	Principal elemento químico da liga	Principais aplicações
1XXX	Alumínio não-ligado Teor de Al > 99%	Indústria química e elétrica
2XXX	Cobre	Aeroespacial
3XXX	Manganês	Arquitetura e uso geral
4XXX	Silício	Pistões fundidos e motores
5XXX	Magnésio	Aplicações náuticas (navios e barcos)
6XXX	Magnésio e Silício	Extrudados arquitetônicos
7XXX	Zinco	Aeroespacial
8XXX	Outros Elementos	Indústria Alimentícia
9XXX	Série não utilizada	-

FONTE: ASTM, 2017.

Contudo, as ligas de alumínio não são obtidas diretamente da natureza e para obtê-las é necessário um processo de transformação complexo e caro. Essa transformação se inicia na mineração e obtenção da bauxita, um mineral composto de 35% a 55% de óxido de alumínio (Al_2O_3), logo após a obtenção da bauxita tem-se o chamado *Processo Bayer* que tem como objetivo a extração do óxido de alumínio da bauxita, nesse processo a bauxita entra em contato com hidróxido de sódio (NaOH), também conhecido como soda cáustica, e água a temperaturas elevadas resultando no hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$). O hidróxido de alumínio resultante passa por um processo de calcinação onde a água é extraída, devido às altas temperaturas, gerando o óxido de alumínio e, por fim, o óxido de alumínio é submetido à um processo de redução onde o alumínio puro é obtido através da eletrolise. Posteriormente o alumínio é moldado em forma de lingotes finalizando a produção primária de alumínio. Todo

esse processo, representado na Figura 1, corresponde a indústria de alumínio primário (GREEN, 2007) e consome uma quantidade enorme de energia seja para o transporte da bauxita, o aquecimento das soluções envolvidas no *Processo Bayer*, etapa de redução do alumínio e outros consumos energéticos que fazem o processo de obtenção do alumínio primário ser muito caro no ponto de vista financeiro (FORTUNA *et al.*, 2012).

Figura 1 - Fluxograma do Processo Bayer



FONTE: ROZZA, 2015.

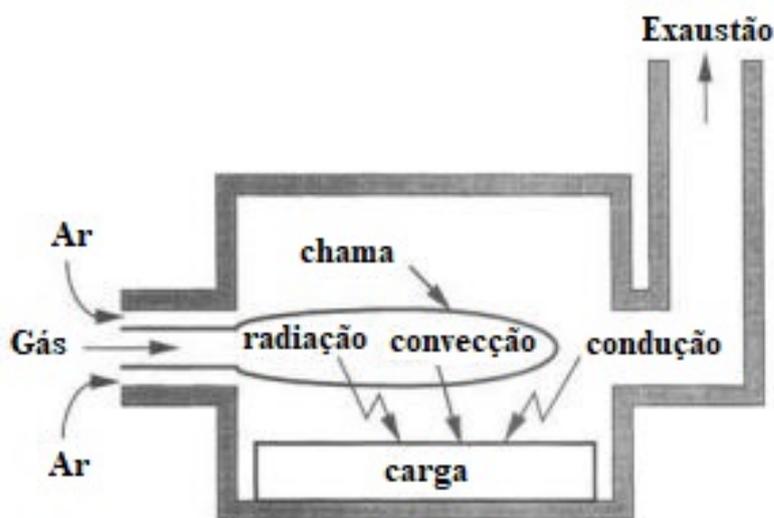
Com posse do alumínio primário, majoritariamente em forma de lingotes, a indústria de alumínio secundário entra em ação. Esses lingotes, em conjunto ou não, com alumínio reciclado são submetidos a processos de transformação diversos que tem como resultado final os produtos acabados de alumínio, sejam laminados, extrudados, forjados entre outros (GREEN, 2007). Para tal, esses elementos são convertidos ao estado líquido por meio de fornos. A esse processo dá-se o nome de fusão ou fundição. Os processos apresentados anteriormente (laminação, extrusão, etc) utilizam o alumínio líquido de maneira particular para seus processos produtivos.

2.1.1 Energia Presente na Fusão do Alumínio

Para uma fábrica de fusão de alumínio, a energia (em forma de calor) é um insumo essencial pois todo o processo depende de um fornecimento controlado de calor para que o metal se mantenha em temperaturas estáveis pelo tempo demandado pelo processo de fusão. Com isso, os custos de se manter uma fábrica de fusão são extremamente altos e, se mal administrados, podem chegar até a 60% dos custos totais da planta industrial (ALCOA, 2005). Essa situação se torna mais preocupante devido ao fato de que, a fusão do alumínio por si só não agrega valor ao produto final (produto laminado, extrudado, etc), ela serve majoritariamente para garantir que o metal tenha uma composição química correta e apresente o mínimo de inclusões possível sempre na temperatura adequada para o próximo processo de transformação.

Numa fábrica de fusão de alumínio as três formas de transferência de calor, condução, convecção e radiação coexistem dentro dos chamados fornos de fusão (Figura 2), equipamento que fornece o calor para fundir o metal, entretanto, devido às transferências de calor por condução e convecção serem proporcionalmente muito pequenas em relação à irradiação assume-se que o processo de fusão em fornos de fusão ocorre majoritariamente por radiação térmica (NIECKELE *et al.*, 2004).

Figura 2 - Parcelas de transferência de calor na fusão de alumínio



FONTE: Adaptado de ROHSENOW *et al.* (1998)

A transferência de calor por condução acontece através do contato entre corpos com temperaturas diferentes e nos fornos de fusão ela pode ocorrer de duas formas: contato das cargas presentes dentro do forno de fusão com suas paredes ou pelo contato

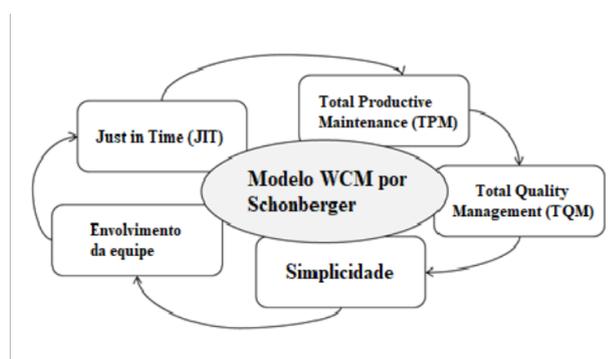
entre as cargas presentes dentro do forno de fusão. A transferência de calor por convecção ocorre devido a circulação de fluidos, no estado gasoso, na parte interna dos fornos de fusão. Tal circulação é provocada pela produção dos gases de combustão e pela entrada de ar nos fornos por frestas ou partes não isoladas.

A transferência de calor por radiação térmica (ou irradiação) ocorre devida a grande quantidade de energia armazenada em forma de calor dentro do forno de fusão, devida a ação do material isolante que compõe os fornos de fusão. Essa energia é gerada pela queima de combustível e é refletida nas paredes do forno para a carga, fazendo com que a mesma passe do estado sólido para o estado líquido.

2.2 MANUFATURA DE CLASSE MUNDIAL (WCM)

O conceito de Manufatura de Classe Mundial foi introduzido nos anos 80 por Richard J. Schonberger onde ele reuniu diversas técnicas de melhorias já existentes e propôs um sistema integrado de melhoria contínua, com objetivo de alcançar a excelência operacional e gerencial de um negócio. Essa ideia de criar esse sistema integrado de ferramentas se deu devido ao crescimento acelerado da economia japonesa puxado pela ascensão das filosofias de manufatura enxuta desde os anos 60, com isso muitas técnicas de melhoria da manufatura foram criadas e aplicadas nas indústrias e seus resultados foram se mostrando bem consistentes e relevantes. Essas técnicas foram organizadas e pensadas para funcionar de forma flexível e adaptativa, dando as empresas capacidade de atingir seus objetivos, crescer sua competitividade e entregar produtos com alta qualidade a seus clientes. O modelo do WCM pensado por Schonberger está ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Modelo WCM proposto por Schonberger



FONTE: Adaptado de Felice *et al.*, 2015.

Apesar de todo seu esforço, a ideia de Schonberger não foi muito aceita em sua época, até que na virada do século 21 a Fiat Group Automobiles (atualmente Fiat Chrysler Automobiles) desenvolveram o WCM como conhecemos atualmente. Segundo Diniz *et al.*, 2019 (apud YAMASHINA, Hashime. 2010): “O sistema é muito simples, precisamos **identificar** qual é o **problema**, **identificar** qual é a sua **perda**, o **método** que será adotado para resolvê-lo e depois **controlar** os resultados. Esta é a base do WCM.”

Para a Fiat Chrysler Automobiles o WCM é um sistema de produção estruturado e integrado que engloba todos os processos da planta, o ambiente de segurança desde a manutenção até a logística e controle da qualidade. O objetivo é melhorar continuamente o desempenho produtivo buscando a eliminação progressiva de desperdícios para garantir a qualidade dos produtos e a máxima flexibilidade para atender aos requisitos do cliente pelo envolvimento e motivação das pessoas que trabalham no estabelecimento (DINIZ *et al.*, 2019).

O caminho para atingir a Manufatura de Classe Mundial usa de técnicas e métodos que são comuns a diversas empresas, uma delas é o cliente. No WCM o cliente está no centro de tudo e todos os esforços são despendidos para satisfazer as necessidades e expectativas do cliente, bem como a estratégia da companhia é moldada para dar suporte a isso (FELICE *et al.*, 2015). Para tal, os objetivos da companhia são definidos de forma que sejam mensuráveis e tenham um prazo bem estabelecido. Isso é de extrema importância pois ajuda a atribuir responsabilidades aos colaboradores, além de envolvê-los na construção de uma companhia de classe mundial.

Um dos principais conceitos utilizados no WCM é o dos sete desperdícios, que tem origem na filosofia *Lean Manufacturing* e apresenta os tipos de perdas que podem existir em toda indústria ou negócio. São eles: Estoque, movimentação, espera, transporte, processamento, defeitos e superprodução. Os sete desperdícios são descritos abaixo:

- Estoque: refere-se ao armazenamento de peças, materiais ou produtos em geral devido à baixa demanda da produção.
- Movimentação: refere-se a um desperdício devido a ineficiência de movimentação que os funcionários ao realizar uma atividade.

- Espera: refere-se a o tempo ocioso de um funcionário ou equipe de pessoas devido a indisponibilidade de material, peças ou máquinas. Também é relativo a ociosidade de equipamentos e máquinas.
- Transporte: refere-se a movimentações desnecessárias ou excessivas dos materiais, ferramentas ou equipamentos.
- Processamento: refere-se a processos realizados por pessoas ou por uma máquina que não agregam valor ao produto final.
- Defeito: refere-se a geração de produtos fora dos padrões especificados, gerando retrabalho ou sucateamentos.
- Superprodução: refere-se à produção acima do planejado, normalmente devido a um mal planejamento produtivo.

2.2.1 Conceitos Chave

O sistema WCM é composto de alguns métodos, técnicas e padrões conforme mostrado na Figura 4, e seu núcleo se assemelha muito ao que foi proposto pelo Sistema Toyota de Produção (*Lean Manufacturing*) com metodologias como *Total Productive Engeneering*, *Total Quality Control*, *Total Productive Maintenance* e *Just in Time* no centro.

Figura 4 - Sistema WCM desenvolvido pelo Grupo Fiat (2005)



FONTE: Diniz *et al.*, 2019.

Para fazer com este sistema funcione em total sintonia, existem 5 conceitos chave para aplicação da metodologia.

- I. **LÓGICA:** Esse conceito tem como objetivo identificar as principais perdas, classificá-las em ordem de prioridade e estratificá-las até um nível em que possa ser mensurado o impacto de cada perda permitindo que as perdas mais relevantes do negócio sejam priorizadas.

- II. **MÉTODOS E FERRAMENTAS:** Após identificar as principais perdas e estratificá-las vem a fase de definir qual o método ou ferramenta(s) serão utilizados para essas perdas. Logo, cria-se um passo-a-passo (método) para resolução desses problemas normalmente organizado em 7 passos. Para cada passo existem uma ou várias ferramentas que irão auxiliar em seu desenvolvimento. Esses passos são classificados em três fases: Reativa, preventiva e proativa. A fase reativa tem como objetivo a realização de medidas corretivas para sanar o problema no curto prazo. A fase preventiva usa das experiências adquiridas na fase reativa para realização de ações mais direcionadas impedindo ao máximo a repetição do problema conhecido. A fase proativa busca sempre analisar mais a fundo o sistema e melhorar padrões para evitar a ocorrência de novos problemas.

- III. **RIGOR:** Com todos os métodos e ferramentas definidos é de suma importância garantir que o método seja seguido criteriosamente conforme planejado, então não é permitido alterar a sequência do método criado. Em contraste, podem ser adicionadas ou alteradas as ferramentas definidas, conforme a necessidade. Os resultados alcançados na metodologia não serão satisfatórios caso o método não seja seguido rigorosamente.

- IV. **CADÊNCIA:** A metodologia WCM é organizada em passos pois permite uma visualização clara da evolução das melhorias ao longo do tempo, logo deve existir um ritmo na aplicação das técnicas para que se possa evoluir nos passos. Assim é apenas permitido andar para frente, voltar a um passo já implementado não é previsto na metodologia.

V. RESULTADOS: A manufatura de classe mundial tem foco em gerar resultados. Esses resultados devem ser mensurados e acompanhados por meio de indicadores: KPI's (*Key Performance Indicators* – Indicadores chave de performance) que medem capacidade, produtividade, OEE¹, etc; KAI's (*Key Activity Indicators* – Indicadores chave de atividade) que medem quantidade de treinamentos, projetos de melhoria, etiquetas de segurança criadas, etc; Indicadores econômicos que medem custo-benefício, evolução de gastos, EBITDA², etc.

VI. ÁREA MODELO: Normalmente um problema de grande impacto ao negócio (identificado e estratificado) abrange uma área muito grande do negócio, então para implementar da metodologia em toda a companhia seria necessária uma força de trabalho muito grande, coisa que a maioria das empresas não tem disponível com facilidade. Então, nasce o conceito de área modelo que nada mais é que uma área, máquina ou equipamento específico escolhido por sua criticidade para iniciar a implantação do WCM, devendo evoluir conforme os cinco conceitos chave anteriores. A área modelo também serve para validar o método e depois expandir para as demais áreas.

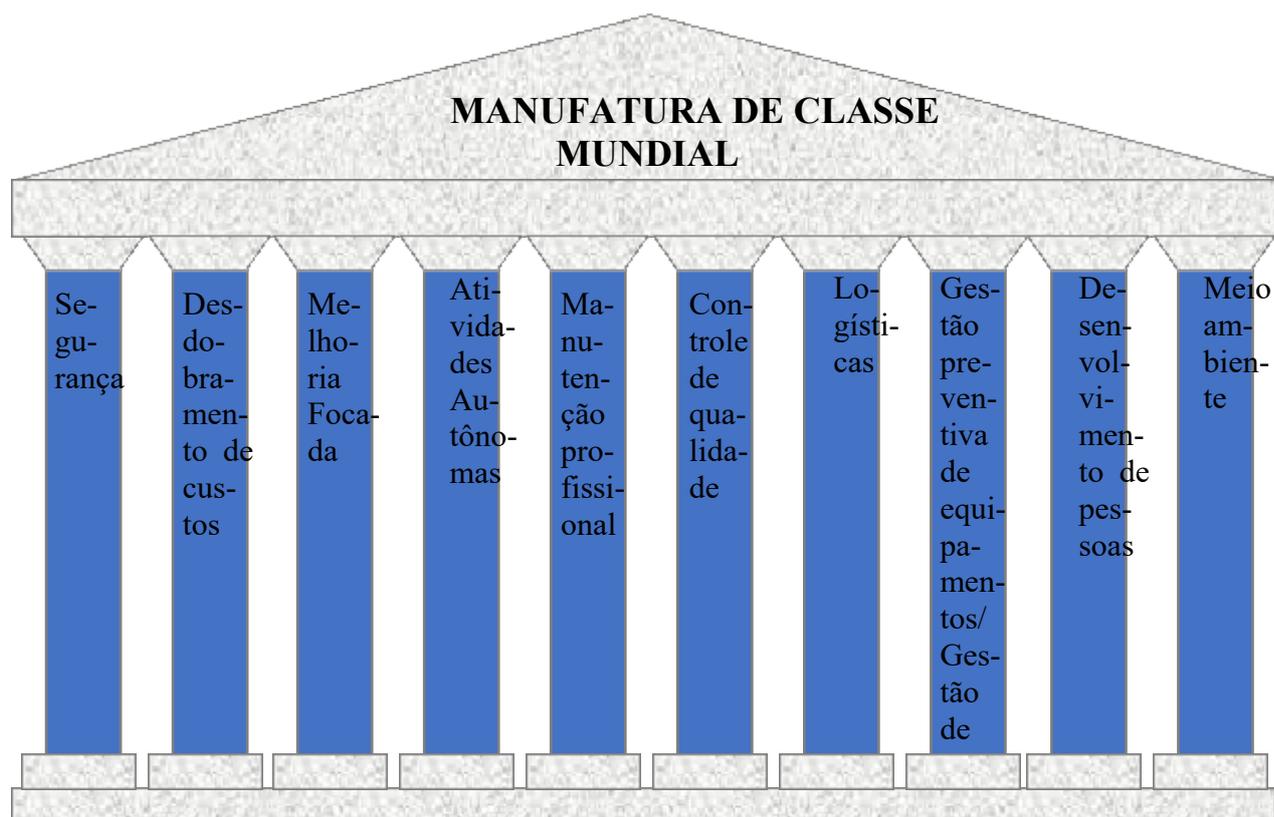
2.2.2 Estrutura da Manufatura de Classe Mundial

A estrutura do WCM é composta de dez pilares gerenciais e dez pilares técnicos ou operacionais. Os níveis de implementação dos pilares operacionais são indiretamente afetados pelos pilares gerenciais. A Figura 5 apresenta o sistema WCM em forma de um templo que tem como objetivo mostrar que para atingir a excelência é necessário um desenvolvimento paralelo de todos os pilares operacionais e gerenciais.

¹ OEE – Overall Equipment Efficiency (Eficiência Global de Equipamentos) mede a eficiência de cada equipamento presente na planta/fábrica.

² EBITDA – Indicador contábil que indica lucros antes de juros, impostos, depreciação e amortização. Também conhecido como LAJIDA

Figura 5 - Estrutura do WCM (pilares)



FONTE: Adaptado de Palucha, 2012.

Na Tabela 2 são apresentados os dez pilares operacionais, seu motivo de implementação e o propósito.

Tabela 2 - Pilares Operacionais do WCM

Pilar Operacional	Motivo de implementação	Propósito
Segurança (SAF – Safety)	Melhorar continuamente a segurança e prevenir a ocorrência de acidentes	<ul style="list-style-type: none"> Buscar ter zero acidentes no ambiente de trabalho Desenvolver uma cultura de prevenção à acidentes Melhorar ou implementar ergonomia no ambiente de trabalho
Desdobramento de custos (CD – Cost Deployment)	Analisar o impacto financeiro das perdas identificadas	<ul style="list-style-type: none"> Identificar as principais oportunidades de redução de custos da companhia Quantificar os potenciais ganhos financeiros Direcionar recursos de maneira mais assertiva
Melhoria Focada (FI – Focused Improvement)	Atacar as perdas identificadas no Cost Deployment	<ul style="list-style-type: none"> Eliminar perdas e ineficiências Eliminar atividades que não agregam valor para aumentar a competitividade da companhia

Atividades Autônomas (AA – Autonomous Activities)	Melhorar continuamente o ambiente de trabalho da companhia	Autonomous Maintenance (AA): Melhorar a eficiência global do sistema produtivo por meio de políticas de manutenção. Workplace Organization (WO): Criar um padrão de local de trabalho que garanta a segurança dos locais e o bem-estar das pessoas, a qualidade das funções executadas e a máxima produtividade.
Manutenção profissional (PM – Professional Maintenance)	Minimizar os tempos de parada e defeitos de máquina	Aumentar a eficiência das máquinas Facilitar o trabalho em equipe entre os colaboradores para garantir um funcionamento seguro dos equipamentos
Controle de Qualidade (QC – Quality Control)	Garantir que as especificações do cliente sejam atendidas	Buscar ter zero defeitos nos produtos Diminuir a variabilidade do processo Garantir a qualidade total dos produtos entregues aos clientes
Logística LOG – Logistics	Controlar o nível de estoque da companhia	Reduzir ao máximo os estoques Minimizar ao máximo o manuseio de produtos desde a linha de produção até o cliente
Gestão preventiva de equipamentos/ Gestão de novos produtos (EEM – Early Equipment Management)	Otimizar a instalação de novas máquinas ou produtos	Garantir tempos de setup sejam rápidos e estáveis Reduzir os custos com ciclos de vida útil Desenvolver sistemas de fácil manutenção
<u>Desenvolvimento de pessoas</u> PD - People Development	Melhorar continuamente as habilidades dos colaboradores	Promover treinamentos de maneira estruturada para garantir as habilidades de cada colaborador de acordo com seu posto de trabalho Desenvolver os colaboradores pessoal e profissionalmente
Meio Ambiente ENV - Environment	Implementar medidas sustentáveis e reduzir desperdícios de energia	Implementar e seguir normas ambientais desenvolvendo uma cultura de sustentabilidade na companhia Reduzir as perdas de energia presentes na companhia

FONTE: Adaptado de Felice *et al.* (2015).

3 MÉTODO DE APLICAÇÃO

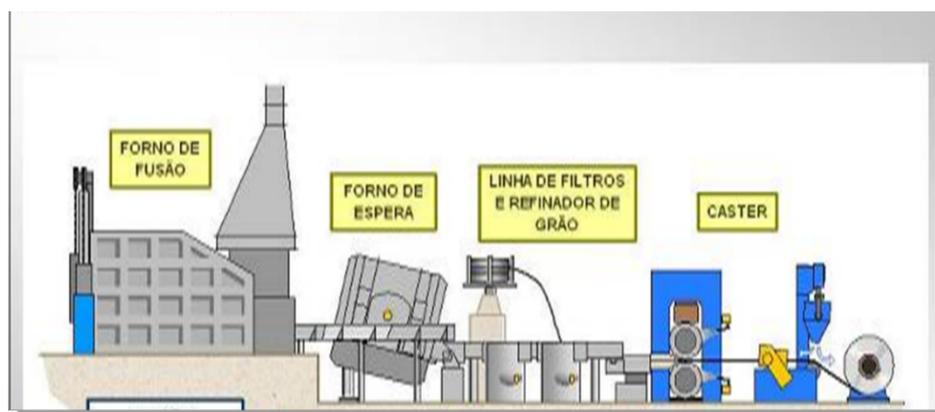
Tendo em vista que a metodologia WCM se mostra bastante relevante na busca pela eliminação de perdas, é possível adaptar tal método para qualquer situação onde deseje-se eliminar desperdícios, qualquer que seja sua natureza. No caso das indústrias de alumínio, a perda energética pode ser tratada de tal maneira que os custos de aplicação da metodologia sejam mínimos e, mesmo assim, a redução de desperdícios seja relevante. Para isso, esse trabalho foi realizado com o auxílio do pilar FI da metodologia de gestão WCM para conduzir a análise de perdas e redução do consumo de gás natural no processo de fusão de alumínio em uma fábrica de laminados. O método, a empresa e as características de refusão de alumínio do seu processo são apresentados nesse tópico.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

O presente trabalho tem sua aplicação em uma indústria de laminados de alumínio localizada em Itapissuma, Pernambuco. A empresa é líder nacional na produção de laminados de alumínio e está presente em todas as partes do mundo, utiliza em seus processos uma tecnologia de ponta com alto grau de modernização para atender as demandas do mercado.

A empresa tem uma planta muito extensa e produz laminados de alumínio para diversas aplicações na sociedade, por isso, sua planta se subdivide em três fábricas integradas: Refusão, Chapas e Folhas. A fábrica da refusão é a responsável pela transformação do alumínio primário (lingotes de alumínio) nas ligas de alumínio, o processo é apresentado na Figura 6 e consiste de quatro macro etapas.

Figura 6 – Macro etapas do processo de refusão



FONTE: ALCOA (2005).

Na primeira etapa, o alumínio primário (lingotes) juntamente com os elementos de liga são derretido nos fornos de fusão, formando a liga de alumínio, que, por sua vez, é transportada para a segunda etapa, os fornos de espera, é neles que o metal é mantido à altas temperaturas até ser transferido para a terceira etapa, a linha de filtragem e refinador de grãos. Uma vez filtrado e com sua granulometria devidamente refinada, o alumínio é enviado para a última etapa, a formação de uma lâmina de alumínio sólido disposta no formato de uma bobina por meio do processo conhecido como *Twin-Roll Casting (TRC)*.

As fábricas de chapas e folhas recebem a bobina de alumínio formada anteriormente e realizam processos de laminação, ou seja, reduzem a espessura da lâmina formada na refusão para produzirem os produtos finais. Para fins desta monografia, apenas o processo da área de fornos de fusão da fábrica da refusão será estudado com mais detalhamento devido à ausência de fornos de fusão nas outras áreas da planta.

3.1.1 Fornos de Fusão

Os fornos de fusão são equipamentos que fornecem energia térmica por meio da combustão com fim de transformar o alumínio sólido em alumínio líquido. Sua estrutura é composta de aço e suas paredes e a porta são reforçadas com material refratário. O material refratário deve ser quimicamente estável, resistente a impactos mecânicos e a choques térmicos servindo para dois propósitos: preservar energia dentro do forno e proteger a estrutura de aço das altas temperaturas e do contato com o alumínio líquido.

O sistema de combustão dos fornos do setor de refusão da empresa estudada é composto por duas linhas de suprimento independentes: as linhas de gás combustível e as de ar de combustão, além da chaminé para eliminação dos gases de combustão. A combustão ocorre por meio de queimadores instalados nas paredes do forno, estes realizam a mistura do ar de combustão com o gás combustível e, por meio de um piloto de ignição, geram a chama. A chama gerada fornece calor para o material refratário das paredes que, por sua vez, fornece calor para as cargas presentes no interior do forno por radiação térmica (Figura 7). A temperatura de operação dos fornos de fusão flutua entre 680°C e 760°C. O controle de funcionamento dos queimadores é realizado através de um Controlador Logico Programável (CLP) que realizam o controle da temperatura do alumínio líquido, isto é, recebe sinais de um termopar inserido dentro do alumínio líquido e, ao atingir a temperatura requerida os queimadores são parcialmente desligados.

Figura 7 - Forno de fusão de alumínio



FONTE: Bratu *et al.* (2016).

O ciclo de fusão do alumínio é um pouco complexo, pois passa por algumas etapas importantes para garantir a segurança do processo e qualidade do material. Por motivos de segurança, antes de ser inserido dentro dos fornos de fusão o alumínio primário deve passar pela etapa de preparação de carga, isto é, ser pré-aquecido em estufas para que a umidade excessiva de seu interior seja retirada evitando o contato direto da água com alumínio líquido. Uma vez dentro do forno, as cargas (alumínio

primário, anteligas³ e sucatas) se fundem e se misturam quimicamente. Para garantir que essa mistura esteja homogênea, bem como garantir que as temperaturas em todos os pontos do metal líquido sejam igual ou muito próximas é realizado um procedimento de homogeneização da carga, ou seja, semelhantemente ao processo de mistura do açúcar na água, o alumínio líquido é agitado até sua composição química e suas respectivas propriedades atingirem a uniformidade em todo seu volume.

A próxima etapa consiste em limpar o alumínio das impurezas presentes em seu interior e isso é feito utilizando um sal especial, composto de cloreto de magnésio e cloreto de sódio (ou cloreto de potássio), que é inserido dentro do metal líquido e passado certo um tempo reage com o alumínio líquido retirando os óxidos e inclusões não metálicas, gerando a escória⁴ do alumínio. A escória sobe para a superfície do banho⁵ e deve ser retirada o mais rápido possível para evitar maiores perdas de energia e material. Ao ser retirada, a escória é depositada em um recipiente separado e é devidamente pesada e armazenada em um local específico. Com o metal livre de inclusões e óxidos, o dreno do forno é aberto e o alumínio líquido é transportado para ser utilizado em outro processo. A Figura 8 apresenta o fluxograma do ciclo de fusão do alumínio.

Figura 8 – Fluxograma do ciclo de fusão do alumínio



FONTE: AUTOR DA MONOGRAFIA

Durante a maioria destas etapas, é necessário que a porta do forno de fusão seja aberta. Essa abertura ocorre nas etapas de carregamento, homogeneização, inserção do sal e retirada da escória. Com isto, parte do calor presente no interior do forno de fusão

³ Elementos adicionados no alumínio para formação das ligas (Fe, Mg, Mn, Si)

⁴ Rejeito do alumínio como alcalinos dissolvidos, inclusões não metálicas e óxidos.

⁵ Alumínio em sua forma líquida dentro do forno

é transferido para o ambiente externo devido ao gradiente de temperaturas entre ambiente interno (680 °C) ao forno e ambiente externo (25 °C). Essa perda de calor impacta diretamente no consumo de gás natural, pois será necessário que os queimadores realizem a combustão de uma quantidade maior de gás combustível até que o alumínio líquido atinja a temperatura especificada para o processo.

3.1.2 Uso do Gás Natural

O gás natural é um hidrocarboneto derivado do petróleo também definido como uma parcela do petróleo em fase gasosa e que tem estabilidade nas condições atmosféricas padrão. Sua composição química (Tabela 3) varia de acordo com sua origem geológica, mas de maneira geral é formada de uma mistura de hidrocarbonetos, com dominância do metano (CH₄), contendo também em menores quantidades os gases etano (C₂H₆), butano (C₄H₁₀) e propano (C₃H₈). O gás natural é formado por meio de um processo lento de decomposição de animais e vegetais em uma atmosfera com oxigênio escasso e altas pressões e temperaturas.

Tabela 3 - Composição química do gás natural

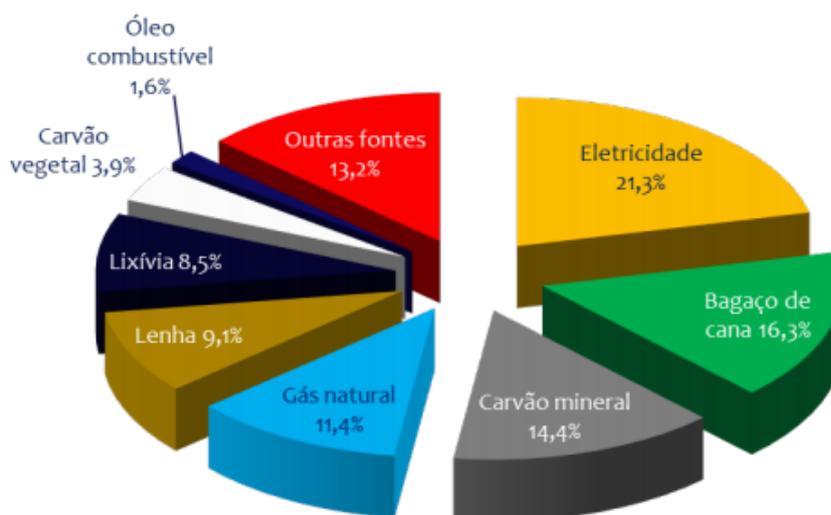
Componentes	% Volumétrica
Metano	89,24
Etano	7,86
Propano	0,24
Butano e Mais Pesados	0,05
N ₂	1,34
CO ₂	1,25
O ₂	0,02

FONTE: COPERGÁS (2019)

A utilização do gás natural como insumo energético nas indústrias é tida como estratégica para alavancar os resultados, aumentar produtividade e diminuir os custos de

produção. Segundo o MME (2019), a queima do gás natural para obtenção de energia constitui 11.4% do consumo energético das indústrias sendo um dos insumos mais utilizados para esse fim (Figura 9). Essa expansão do mercado de gás natural se deu devido à grande oferta desse recurso, que tornou seu preço atrativo, juntamente com as novas políticas de sustentabilidade que deram mais visibilidade a esse insumo, pois é um tipo de energia fóssil limpa.

Figura 9 - Distribuição do consumo energético industrial



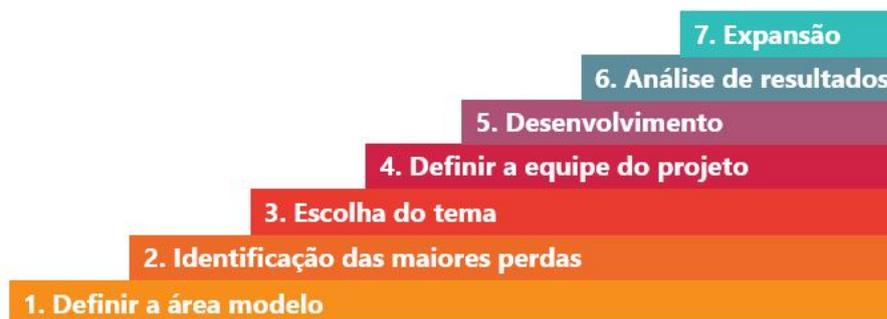
FONTE: MME, 2019

3.2 PILAR FI

O problema de eficiência energética é bastante impactante em uma indústria de alumínio e, como forma de analisar tal problema, o pilar de melhoria focada (*FI - Focused Improvement*) do WCM foi escolhido devido a sua característica de eliminação de perdas e ineficiências presentes em um processo ou produto. O Pilar FI fornece ferramentas para reduzir atividades de baixo valor agregado, desenvolver competências profissionais específicas requeridas, padronizar atividades, eliminar perdas de processos, etc (MURINO *et al.*, 2012).

A palavra “focada” é utilizada pelo fato de que os esforços serão direcionados para um problema em particular, trata-se de uma melhoria das condições atuais que abrange uma operação, um componente, um defeito, um processo, enfim, algo muito específico. Esse pilar é implementado em 7 passos (Figura 10).

Figura 10 – Sete passos na implementação do pilar FI



FONTE – Adaptado de Diniz *et al.* (2019).

O primeiro passo do pilar FI tem como objetivo selecionar a área, máquina ou equipamento modelo conforme o conceito chave apresentado anteriormente e, de posse da área modelo, o próximo passo é identificar quais as principais perdas presentes na área modelo e estratificá-las de acordo com seu nível de impacto ao negócio.

O terceiro passo é um dos mais importantes, seu objetivo é escolher qual perda será solucionada. Caso não seja possível mensurar as perdas e elencá-las de acordo com seu impacto ao negócio, uma das perdas poderá ser escolhida mediante discussões com uma equipe multidisciplinar. Esse pilar tem ainda como função a realização do planejamento das atividades e ações de melhoria relacionadas com a perda selecionada.

No passo quatro, uma equipe do projeto de melhoria é definida, sendo importante salientar que a equipe do projeto deve ser organizada de modo que os conhecimentos necessários ao projeto sejam distribuídos por toda a equipe e, portanto, são realizados alguns treinamentos para suprir as lacunas de conhecimento existentes.

O quinto passo corresponde ao desenvolvimento das atividades e ações de melhoria definidas no passo cinco. No passo seis realiza-se a análise dos resultados obtidos pelas atividades desenvolvidas e ações de melhoria tomadas. Normalmente, os resultados são medidos pelo benefício-custo (B/C). Custo é tudo que se gastou para desenvolver a melhoria (tempo, materiais, energia, ferramentas, serviços, etc). Benefício é a perda que foi recuperada ou deixou de ser gasta (tempo, materiais, energia, ferramentas, serviços, etc). O cálculo do benefício custo é feito através da Equação 1.

$$B/C = \frac{\text{Benefício}}{\text{Custo}} = \frac{\Sigma (\text{ganhos com o projeto})}{\Sigma (\text{custos com o projeto})} \geq 1 \quad (1)$$

O valor do indicador B/C deve ser maior ou igual a um. Caso $B/C = 1$, as ações de melhoria não geraram resultados e/ou não tiveram nenhum impacto na área selecionada para o projeto. Caso $B/C < 1$, as ações de melhoria não geraram resultados e/ou tiveram um impacto negativo na área selecionada para o projeto.

Após a implantação das melhorias é importante um acompanhamento dos indicadores considerados no projeto por no mínimo 3 meses, esse é o sétimo passo e tem como objetivo analisar algum possível distúrbio não percebido durante a análise da causa raiz ou na implementação das melhorias. Posteriormente, analisa-se a possibilidade de aplicar o método às outras áreas existentes, o que é chamado de expansão.

4 ANÁLISE DE MELHORIA E RESULTADOS

Nessa seção serão apresentadas as atividades desenvolvidas na implementação do pilar FI no processo estudado. Esse trabalho será focado na aplicação dos seis primeiros passos do pilar FI tendo em vista que, o sétimo pilar corresponde à expansão da metodologia para outras áreas, não sendo objetivo desse estudo.

4.1 DEFINIÇÃO DE INDICADORES

Segundo a metodologia do WCM é necessário utilizar uma forma de mensurar os dados mais importantes do processo em questão e utilizá-los para a resolução dos problemas. No caso de uma fábrica de fusão de alumínio existem muitas variáveis no processo que influenciam na eficiência energética dos fornos de fusão, porém, nesse estudo serão usados três indicadores para mensurar a eficiência energética do processo: consumo absoluto (m^3), perda de fusão ou PF (%) e consumo específico (m^3/ton).

O indicador que melhor descreve a eficiência de uso do gás natural é o consumo específico pois esse indicador relaciona o consumo absoluto de gás natural com a produção de alumínio líquido nos fornos (toneladas) e mostra o como o insumo combustível está sendo utilizado para transformar cada tonelada de alumínio sólido em alumínio líquido. De maneira semelhante, o consumo absoluto é muito útil para mostrar quanto gás foi consumido em determinado período de tempo, que nesse estudo será medido a cada ciclo do forno de fusão, além de permitir calcular os custos diretos com gás natural. Por fim, a PF é medida levando-se em consideração a quantidade de escória de alumínio gerada (em toneladas) relativa à produção de alumínio líquido nos fornos (em toneladas), sendo esse indicador lido em forma percentual.

Como nem todos os fornos de fusão da refusão são semelhantes, alguns apresentam diferenças de tamanho físico, capacidade de carga (toneladas), isolamento térmico e depreciação, o indicador de consumo absoluto não pode ser utilizado para definir qual o forno é o mais crítico pois, por exemplo, um forno que tem maior capacidade irá consumir mais gás natural, em termos absolutos, que um forno de menor capacidade. Já os indicadores de consumo específico e perda de fusão não são dependentes dessas variáveis, além de serem indicadores de eficiência. Dessa forma, apenas os indicadores de consumo específico e perda de fusão serão analisados.

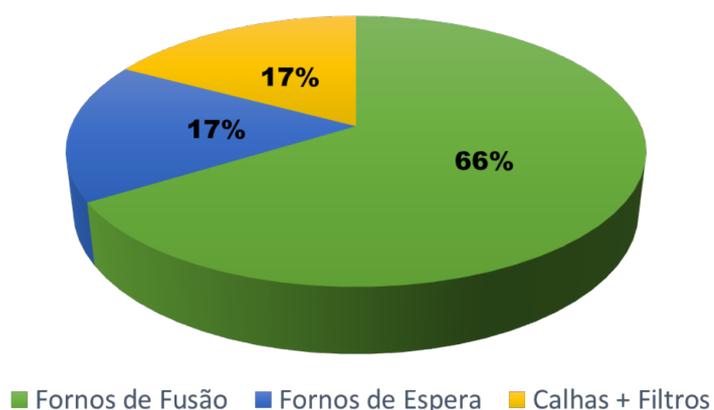
É muito importante que esses indicadores sejam medidos a cada ciclo, pois dessa forma, é possível se ter uma maior estratificação dos dados e identificar os principais impactos de maneira pontual, ciclo a ciclo. Serão também medidos alguns indicadores de desempenho da operação (processo) dos fornos de fusão, como número de vezes que a porta do forno de fusão foi aberta a cada ciclo, o tempo total que a porta ficou aberta a cada ciclo. Esses indicadores foram selecionados para medir o tamanho do impacto da abertura de porta no consumo de gás natural. Serão abordadas, mais à frente, as principais perdas presentes no forno de fusão onde, uma dessas perdas é bastante atenuada caso a porta do forno de fusão fique aberta mais que o necessário devido a transferência de calor do ambiente interno ao forno de fusão para o ambiente externo.

4.2 SELEÇÃO DA ÁREA MODELO

O primeiro passo do Pilar FI é a definição da área, máquina ou processo modelo conforme descrito anteriormente. No primeiro passo do pilar são definidas as prioridades da fábrica através do uso dos principais direcionadores do WCM, normalmente o custo apresentado pelo pilar *Cost Deployment*. Então, é necessário identificar qual setor da refusão apresenta o maior custo (consumo) com gás natural e, estratificar ao máximo esse custo até conseguir identificar uma perda específica e de grande impacto.

Os fornos de fusão são responsáveis por 66% do consumo total de gás natural na refusão seguidos pelos fornos de espera (17%) e a linha de filtragem (17%) (Figura 11). Com base nesse dado, fica justificado o motivo pelo qual a área de fornos de fusão foi selecionada para estudo, porém, a área de fornos de fusão é composta de 8 (oito) fornos de fusão em sua totalidade, com isso existe a possibilidade de analisar cada forno em particular e, em seguida, definir qual forno é o mais crítico para o consumo energético.

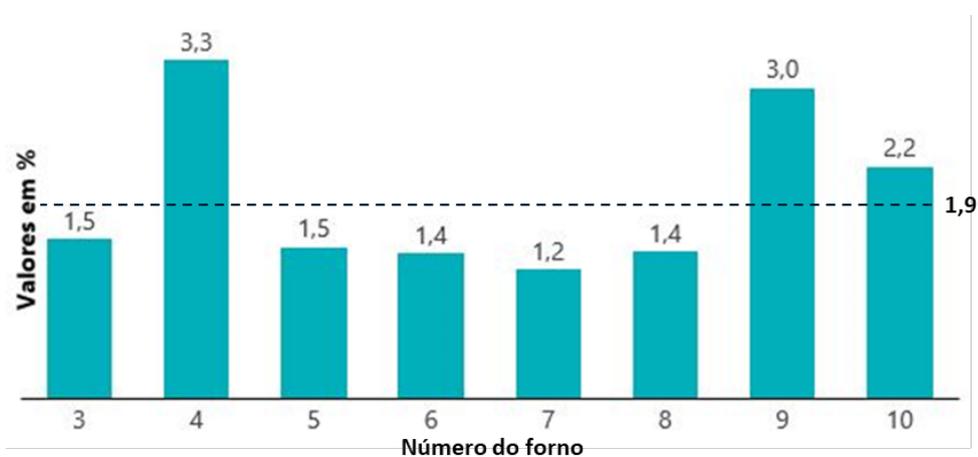
Figura 11 - Estratificação inicial do consumo de gás natural na refusão



FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA

Os dados foram coletados no período de abril até junho de 2019, totalizando três meses de produção e os indicadores mostrados na Figura 12 e 13 são valores médios para cada forno durante o período que estão apresentados em gráficos de barras em que, cada barra representa um forno de fusão.

Figura 12 - Perda de fusão (fornos de fusão)



FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA

Figura 13 - Consumo específico (fornos de fusão)



FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA

O primeiro indicador analisado foi a perda de fusão. Esse indicador é importante pois é de extrema importância para a eficiência energética que seja gerada o menor valor percentual de escória de alumínio. Os dados da Figura 12 mostram que existem dois fornos que tem uma geração de escória mais elevadas que os outros, fornos 4 (3,3% de escória) e forno 9 (3,0% de escória).

A Figura 13 apresenta o indicador de consumo específico e é notória a disparidade do consumo específico do forno de fusão 9 ($168,2\text{m}^3/\text{ton}$) para o forno 6 ($141,4\text{m}^3/\text{ton}$) que é o forno com o segundo maior valor dentre os oito fornos. Isso significa que o forno de fusão 9 utiliza $26,8\text{ m}^3$ a mais que o forno de fusão 4 para fundir uma tonelada de alumínio, indicando uma alta criticidade para a eficiência energética.

Com base nesses dois dados, conclui-se que o forno de fusão 9 é o mais crítico de todos, pois apresenta indicadores muito alarmantes comparado aos outros fornos e, com isso, a área modelo selecionada foi o forno de fusão 9.

4.3 PRINCIPAIS PERDAS PRESENTES NO PROCESSO DE FUSÃO

Uma das fases mais importantes para a resolução de um problema é a identificação de sua(s) causa(s) raiz(es) permitindo que a abordagem de resolução seja mais assertiva e não sejam despendidos esforços em pontos que talvez não causem o impacto necessário e esperado.

No caso específico dos fornos de fusão, como existem diversas perdas minoritárias, a empresa preferiu listar as perdas que fornecem um maior impacto no

consumo para este trabalho. Essas maiores perdas de energia foram definidas da seguinte forma:

1. Perdas de energia pelo revestimento refratário do forno
2. Perdas de energia devido à geração de escória
3. Perdas de energia devido à má execução das etapas do processo
4. Perdas de energia pela combustão

4.3.1 Perdas de Energia pelo Revestimento Refratário

O revestimento refratário do forno é um elemento de extrema importância para seu isolamento térmico pois evita que o calor escape do interior do forno tanto pelas suas paredes quanto pela porta e um dos requisitos básicos para a preservação da vida útil do refratário é a implementação de rotinas de inspeção, manutenção e substituição periódica dos isolamentos térmicos, pois se degradam ao longo do tempo devido às mudanças bruscas de temperatura, choques e vibrações mecânicas que estão submetidos constantemente podendo causar rachaduras e quebras.

Ao entrar em contato com o alumínio líquido, o revestimento refratário pode sofrer corrosão química e erosão devido a possíveis reações danosas, o que pode reduzir consideravelmente a vida útil do refratário. Como resultado, a taxa de isolamento térmico do forno diminui e passa-se a trocar uma parcela maior de calor com o meio externo gerando uma necessidade maior de consumo de energia para atingir as temperaturas requeridas pelo processo de fusão.

Outro fator que causa impactos na eficiência do isolamento térmico são as limpezas periódicas que o forno deve passar. As rotinas de limpeza são determinadas pelo tipo de sucata carregada nos fornos, pelo número de ciclos diários de produção, ou seja, o tempo total entre o início e final de uma fusão e tipo de liga produzida, as ligas do grupo 3XXX e 5XXX geram muito mais escória que as ligas do grupo 1XXX e. A escória contém muitos óxidos complexos que se depositam nas paredes dos fornos diminuindo a taxa transferência de calor entre o refratário e a carga.

Um dos maiores vilões dos fornos de fusão são os óxidos de magnésio (MgO) pois combinados com alumínio em altas temperaturas podem formar o *Spinel* ($MgAl_2O_4$), que, ao se depositar nas rachaduras e falhas do refratário, se expandem rapidamente tornando as rachaduras ou falhas cada vez maiores e, caso seja identificada

a sua presença dentro do forno, a limpeza deve ser feita de imediato para evitar maiores perdas (ALCOA, 2005).

Para realizar a limpeza é utilizada uma ferramenta de raspagem que é pressionada sobre o isolamento térmico e arrastada para retirada de todas as inclusões, óxidos ou metais solidificados (caso haja).

4.3.2 Perdas de Energia Devido à Geração de Escória

A geração de escória ocorre naturalmente no processo de fusão do alumínio devido aos metais alcalinos dissolvidos em seu interior, formação de óxidos e inclusões não-metálicas no banho. Essa escória depois que é gerada sobe para a superfície do alumínio líquido e se comporta como um isolante térmico, isto é, impede que o calor seja transferido para o alumínio líquido abaixo da superfície causando um consumo energético maior, pois a temperatura requerida pelo processo não será atingida no tempo desejado.

Uma das etapas de tratamento do alumínio líquido consiste na retirada da escória do banho para aumentar a taxa de transferência de calor do forno. É de extrema importância que essa etapa seja realizada no tempo correto pois a taxa de geração de escória de alumínio aumenta com o tempo, ou seja, quanto maior o atraso na retirada da escória da superfície do banho mais escória será gerada. Em adição, estudos indicam que com uma camada de escória com espessura de duas polegadas a necessidade energética é aumentada em 700 BTU/lb, quando um ciclo normal necessita de 1300 BTU/lb (ALCOA, 2005).

4.3.3 Perdas de Energia Devido à Má Execução das Etapas do Processo

Um dos fatores mais impactante para o consumo energético, no processo dos fornos de fusão é a abertura da porta do forno de fusão que é um passo necessário para todas as etapas do processo, exceto a etapa de transporte do metal líquido para o processo seguinte. Ao abrir a porta do forno, o calor que antes estava confinado em seu interior é perdido para o ambiente externo, assim, maior deverá ser o consumo energético para que o forno atinja as mesmas temperaturas que antes. Estima-se que a

cada um minuto de porta aberta sejam necessários dois minutos adicionais de ciclo devido às perdas de calor (ALCOA, 2005).

4.3.4 Perdas de Energia Devido à Combustão dos Gases

A combustão é uma reação química exotérmica entre uma substância combustível e uma substância comburente⁶ (normalmente o oxigênio (O_2)) onde ocorre a liberação de energia nas formas de calor e luminosidade. Durante a combustão ocorre a formação dos chamados produtos de combustão resultantes da combinação dos elementos reagentes. No caso do gás natural, são formados diversos compostos como água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e outros químicos.

A combustão pode ser classificada em três tipos (REED, 1986):

- I. Combustão completa: a reação química de combustão ocorre nas proporções exatas de combustível e comburente. Nesse caso, os produtos de combustão gerados são apenas o dióxido de carbono e água. Normalmente esse tipo de combustão é pouco provável de ocorrer, a menos que seja feita em um ambiente rigorosamente controlado.
- II. Combustão turbulenta: Caracterizada pelos seus elementos reagentes se comportarem de forma turbulenta durante a combustão gerando fluxos turbulentos de combustão.
- III. Combustão Incompleta: a reação química de combustão é caracterizada por ser pobre em substância comburente, resultando em parcelas do combustível que não sofrem a reação de combustão. Em termos mais gerais, o gás não é totalmente queimado. Em adição, caso o nível de comburente seja muito baixo é gerado um tipo de fuligem a partir da queima, que são partículas sólidas de carbono visíveis a olho nu além de gerar uma atmosfera explosiva, colocando em risco a segurança do processo.

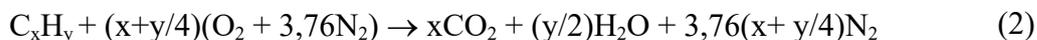
Grande parte das indústrias de fusão de metais utilizam o ar como comburente para a combustão, então é de total interesse das indústrias conhecer as quantidades

⁶ Elemento químico capaz de provocar a oxidação ou combustão de outras substâncias.

exatas de ar e combustível que devem se misturar para que a queima seja eficiente. Essas quantidades são determinadas a partir da análise estequiométrica da queima. Em uma situação ideal a combustão completa ocorreria em todos os momentos da queima de combustíveis, porém existem perdas e incertezas atreladas aos equipamentos e sistemas de controle de combustão que normalmente impedem que isso aconteça.

O ar, comburente utilizado na queima do gás natural pela fábrica de fusão de alumínio é composto de 78% de nitrogênio (N_2), 21% de oxigênio (O_2) e 1% de outros gases. Definiu-se, por meio de estudos de campo, que a cada 1kg de excesso de ar utilizado são produzidos 8,4kg de gases de combustão (DIAS, 2013). Isso se deve ao fato de o ar possuir uma pequena parcela de oxigênio em sua composição química sendo necessário introduzir mais ar para que a combustão ocorra. A outra parcela de elementos presentes no ar (cerca de 80% da composição do ar) é sinônimo de grandes perdas de energia pois não são úteis e roubam uma grande quantidade de energia que deveria ser utilizada no aquecimento das cargas presentes dentro dos fornos.

Para fins de análise estequiométrica, o gás natural será modelado como um hidrocarboneto (C_xH_y) utilizando o ar (aproximado para 79% de N_2 e 21% de O_2) como comburente (Equação 2).



A partir da Equação 2 é possível determinar a razão estequiométrica de ar/combustível para haver a queima completa (Equação 3):

$$(m_{ar}/m_{comb})_{estequiométrico} = 4,76(x+y/4)(M_{ar}/M_{comb}) \quad (3)$$

Os índices m e M são massa em quilogramas e massa molar respectivamente.

Como dito anteriormente, atingir a composição estequiométrica da combustão é muito improvável em um processo de fusão e para garantir uma queima eficiente é adotado um coeficiente de excesso de ar, normalmente entre 5% e 10%. Esse excesso de ar não pode ser demasiado pois, como já explanado, exigirá do processo um consumo energético maior para aquecer os outros gases presentes no ar que não participam do processo de combustão. De modo análogo, o excesso de ar não pode ser muito baixo pois devido às incertezas presentes no controle de combustão pode ocasionar a combustão incompleta.

4.4 ESCOLHA DO TEMA E DEFINIÇÃO DA EQUIPE

Identificadas as principais perdas presentes no processo de fusão de alumínio na fábrica da refusão, deve-se calcular o impacto que cada uma delas tem relativas ao processo e elencá-las em ordem decrescente. Contudo, algumas das perdas listadas não puderam ser mensuradas devido a falta de equipamentos adequados (perda na combustão e perda no revestimento refratário).

A perda por combustão é muito comum de ocorrer nos fornos pois a estequiometria da queima quase nunca é perfeita, logo pode ocorrer uma queima muito pobre e oxigênio ou uma queima com muito excesso de ar, ambas gerando perdas de eficiência. Basicamente, o controle de combustão atual é realizado por um conjunto de válvulas e controladores. Como o sistema de combustão já está bem estabelecido, todas as tubulações instaladas, torna-se inviável um projeto para readequação da linha de combustão. Assim, a única ação possível a curto prazo é a correção do excesso de ar utilizado na queima que sofre variações naturais e previsíveis.

A perda pelo revestimento refratário é bastante significativa, porém a empresa já tem projetos de restauração do refratário dos fornos definidos. Para tal, é necessário que o forno seja desligado e permaneça inoperante durante um longo período de tempo. Durante esse tempo, serão feitas as manutenções adequadas e a restauração do refratário do forno.

A perda por geração de escória é um tema tratado diariamente e seu controle é feito indiretamente pelo controle do processo, ou seja, a geração de escória é inerente ao processo de fusão do alumínio conforme apresentado, porém, caso o processo seja feito de maneira correta e nos tempos especificados, essa geração pode ser minimizada. Com isso, definiu-se que o objetivo desse trabalho seria garantir que o processo seja seguido corretamente, mesmo sem ter dados suficientes para justificar tal escolha. Vale ressaltar que essa decisão foi tomada por uma equipe multidisciplinar e foi aceita pela gestão da empresa.

Após a análise das perdas, os mais diversos membros das áreas produtivas, qualidade e supervisão, decidiram que a perda analisada é a devido à má execução das etapas do processo de fusão de alumínio.

A equipe do projeto foi composta por um engenheiro de processos, um coordenador de produção e um estagiário. O engenheiro de processos é responsável por

analisar os dados de processos, revisar o processo atual e determinar quais os conhecimentos devem ser agregados à operação dos fornos. O coordenador de produção é responsável por facilitar a comunicação entre a equipe, gerenciamento da operação, identificar lacunas de conhecimento, indicar e realizar treinamentos. O estagiário é responsável pela coleta diária de dados, aplicação de ferramentas de melhoria, realizar treinamentos com a operação, identificar lacunas de conhecimento e auxiliar as atividades do engenheiro de processos e do coordenador de produção caso necessário.

4.4.1 Planejamento do Projeto

A etapa de planejamento é de extrema importância para o desenvolvimento do projeto de melhoria pois este plano irá guiar o desenvolvimento das atividades e ações de melhoria. Primeiramente, é necessário estabelecer uma base de dados para que os indicadores possam ser acompanhados diariamente, além de possibilitar a visualização de tendências, correlação de variáveis, segregação e estratificação dos dados e acesso imediato a informações que sejam julgadas importantes. Essa base de dados foi criada com utilização do *Microsoft Excel* onde os dados (total carregado nos fornos (kg), gás absoluto (m³), perda de fusão (kg)), são inseridos diariamente ciclo a ciclo. A partir desses dados serão obtidos os indicadores definidos anteriormente.

Relativo as etapas do processo, foram desenhadas algumas ações que visam garantir que o processo seja cumprido de forma correta, bem como controlar o tempo de porta aberta durante o processo visto que a abertura da porta causa um impacto direto no consumo de gás natural:

1. Medir e controlar o tempo de porta aberta por ciclo.
2. Medir e controlar a quantidade de vezes que a porta foi aberta por ciclo.

Outra parte importante do projeto é o desenvolvimento das pessoas que realizam o processo (operação). Dessa forma, existe a necessidade de identificar as principais lacunas de conhecimento ou habilidades da operação, bem como identificar as principais falhas operacionais e corrigi-las. As ações com ênfase no desenvolvimento de pessoas são:

1. Ministrando reuniões diárias e identificar falhas operacionais frequentes. Corrigi-las a partir de treinamentos adequados.

2. Ministrar treinamentos regulares *treinamento on the job*⁷.
3. Implementar gestão visual de indicadores de cada operador.
4. Definir metas e realizar o acompanhamento regular dos resultados.

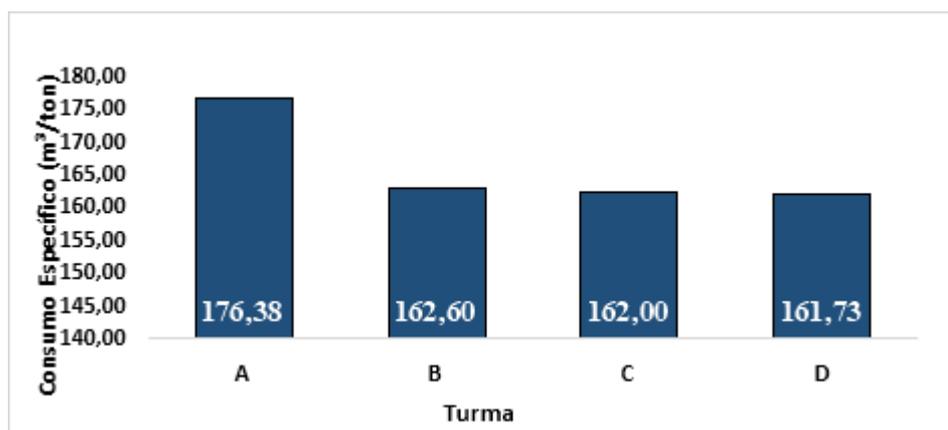
4.5 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A primeira atividade desenvolvida foi a coleta diária de dados e criação de um banco de dados que permitisse a visualização dos dados de maneira flexível. A coleta de dados foi realizada todos os dias pela manhã considerando a produção do dia anterior, além disso, os dados foram coletados ciclo a ciclo e segregados conforme o operador que realizou o ciclo de produção. O forno 9 tem 04 operadores (cada operador é classificado em uma turma: A, B, C ou D). Os dados coletados incluem gás absoluto (m³), escoria gerada (kg), total carregado (kg), liga de alumínio produzida, operador (turma) que produziu, TPA (min) e PA.

Primeiramente, foram coletados dados durante os quatro primeiros meses do projeto (março a junho). Estes dados foram utilizados em todo o planejamento do projeto são apresentados nas Figuras 14, 15, 16 e 17. A Figura 14 mostra o consumo específico médio de gás natural segregado por turma. Todas as turmas estão sujeitas a mesma carga de trabalho, condições de trabalho e disponibilidades de ferramentas e insumos, dito isso, é perceptível a discrepância de resultado obtido pela turma A em relação às outras turmas. O consumo específico (principal indicador de eficiência energética de fusão) da turma A é muito elevado pois está acima da média de consumo específico geral (168.2 m³/ton, Figura 14). O consumo absoluto de gás natural durante esse período foi de 4414,0 m³ por dia.

⁷ *Treinamento on the job* – Treinamento no ambiente de trabalho.

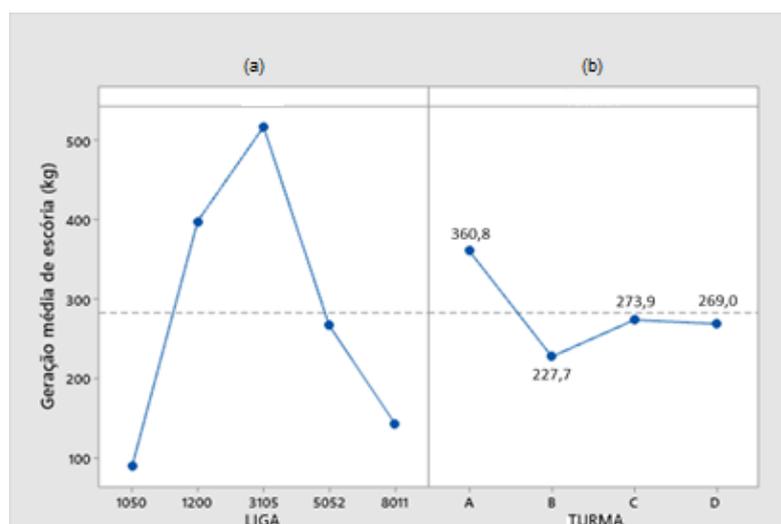
Figura 14 – Consumo específico por turma (março-junho)



FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA, 2019

No caso da geração de escória, foi possível ter uma visão bem mais avançada a respeito do desempenho das turmas e de algumas particularidades da produção de alumínio. A Figura 15 (a) mostra a geração de escória estratificada de acordo com a liga de alumínio produzida nos fornos de fusão. Já a Figura 15 (b) apresenta a geração de escória estratificada por turma. Pode-se afirmar, a partir desses dados, que a produção da liga ASTM 3105 gera mais escória. Isso pode ser explicado pelos altos teores de material reciclado utilizado para produzir tal liga. No caso dos operadores, mais uma vez vemos a turma A com uma média um pouco maior que as outras turmas.

Figura 15 – Geração de escória por liga e por turma (março-junho)

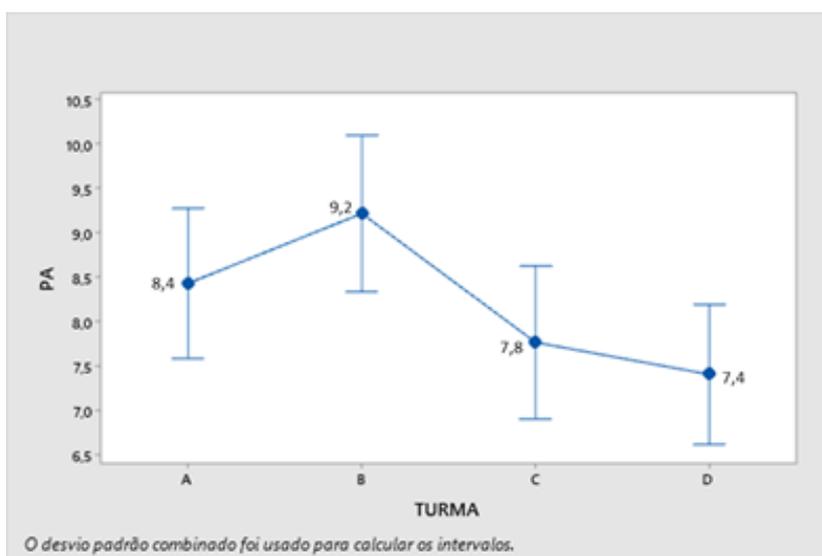


FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA, 2019.

Por fim, as Figuras 16 e 17 mostram indicadores de performance dos operadores relativos as etapas do processo, PA e TPA. O número ideal de vezes que a porta deve

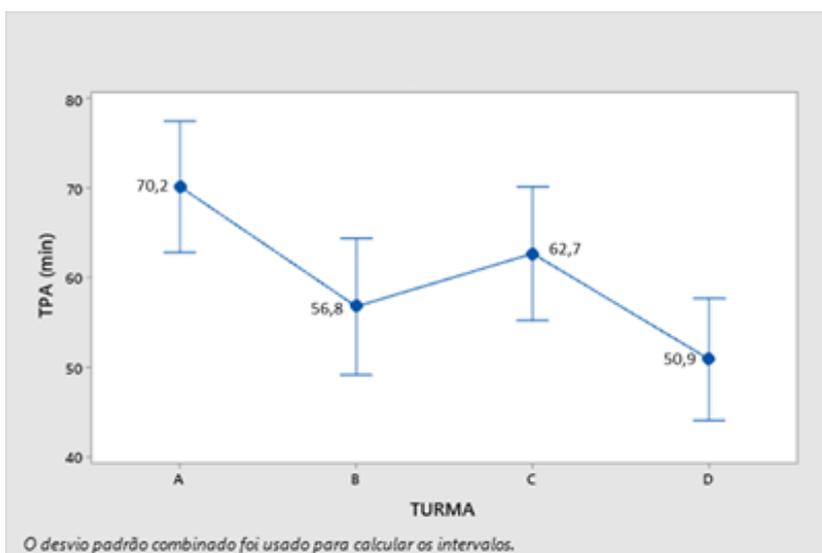
ser aberta segundo o processo são 07 vezes, porém esse valor pode variar até 09 vezes caso ocorram problemas na produção. Já o TPA ideal por ciclo é de 50 minutos, porém o tempo de realização da etapa de carregamento do forno pode variar muito, tornando esse indicador muito incerto e flutuante. Então, quanto menor for o valor do TPA menos gás natural será necessário na produção (ALCOA, 2005), dessa forma, o trabalho será feito para minimizar esse indicador. Na Figura 16, o PA varia naturalmente entre os valores ideais e, na Figura 17 o TPA varia entre 50 e 70 minutos por ciclo.

Figura 16 – PA por turma (março-junho)



FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA, 2019.

Figura 17 – TPA por turma (março-junho)



FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA, 2019

4.5.1 Ações de Melhoria Realizadas

Como a parte preliminar do projeto (coleta inicial de dados) teve duração de quatro meses, a etapa de aplicação da metodologia teve uma duração igual, também quatro meses (julho a outubro). Nessa etapa, o trabalho de continuar com a coleta diária de dados foi essencial para a obtenção de resultados de redução do consumo de gás natural. Semanalmente foi realizado um trabalho de auditoria dos indicadores de cada turma sempre focando na melhoria dos indicadores e em encontrar quais os maiores obstáculos para atingir uma melhor eficiência energética no forno de fusão 9. A partir desse trabalho de auditoria, os problemas mais pontuais foram identificados e corrigidos, os treinamentos necessários foram mapeados e alguns procedimentos importantes foram incluídos no plano de atividades de cada operador.

Em relação os problemas pontuais, foram corrigidas as seguintes situações: melhor posicionamento da carga na frente do forno, possibilitando um tempo menor de porta aberta durante a etapa de carregamento; conserto do sistema de abertura e fechamento da porta do forno de fusão que apresentou uma falha em certos momentos; conserto do piso na frente do forno de fusão que melhorou a condição de transito da empilhadeira ao realizar as etapas reduzindo o tempo de porta aberta.

Foram mantidas reuniões diárias com todos os operadores, onde foram identificadas algumas lacunas de conhecimento dos operadores e, a partir disso, foram mapeados alguns treinamentos operacionais focados em eliminar tais lacunas de conhecimento. Além disso, durante essas reuniões foi realizada a gestão dos indicadores para trazer mais engajamento no projeto visando a obtenção de bons resultados. Foram realizados três treinamentos durante o período em que a metodologia foi aplicada.

O primeiro treinamento realizado teve como objetivo ensinar aos operadores como realizar a correção da composição química da carga produzida, caso essa composição esteja fora dos padrões estabelecidos pela ASTM. O conhecimento desse assunto pode gerar uma menor rejeição de material produzido (rejeição de produção significa gás natural mal utilizado), menos operações de abertura de porta para introduzir materiais para correção da composição química e outros fatores que contribuem indiretamente na redução do consumo de gás natural. Os assuntos abordados no segundo e terceiro treinamentos foram as etapas de homogeneização e

adição do sal de limpeza do alumínio. Como essas duas etapas estão no procedimento escrito da fábrica, foi repassado aos operadores novamente como devem ser realizadas, os tempos e temperaturas corretas para realizar. Uma melhora nessas etapas pode gerar economia de gás natural, menor geração de escória e mais assertividade na composição química do alumínio.

Foi identificada ainda uma reação exotérmica que ocorre no alumínio quando combinado com magnésio sob altas temperaturas chamada de *thermite* (PIERCEY, 2010). Como essa reação torna o alumínio inutilizável devido à “queima” de suas moléculas, foi criado um procedimento e repassado aos operadores com objetivo de evitar perdas por tal reação. Outro procedimento também foi criado, dessa vez em relação à retirada de uma camada de óxidos que se forma na superfície do banho (ALCOA, 2005) anteriormente à adição do sal de limpeza. Essa camada de óxidos funciona como um isolante térmico ao alumínio impedindo que o calor gerado nos queimadores e irradiado pelas paredes do forno chegue até a carga, aumentando o consumo de gás natural.

4.5.2 Limitações do Projeto

Durante o período de aplicação da metodologia WCM, algumas dificuldades foram presentes na rotina de trabalho e impactaram nos resultados apresentados. A primeira delas foi fazer com que os operadores dos fornos de fusão entendessem a importância das ações planejadas e qual o impacto positivo que essas ações causariam na operação como um todo. Logo, foram mantidas algumas reuniões informativas em que todos os objetivos, planos e ações foram repassadas as pessoas da operação, bem como as dúvidas que surgiram a respeito das mesmas foram respondidas.

Algumas das ferramentas utilizadas para melhoria do processo requeriam total comprometimento da operação e foram adicionadas a seus planos de atividades rotineiras, com isso, inicialmente houve um período de adaptação às ferramentas e procedimentos, que geraram um pequeno atraso na aplicação da metodologia e na geração de resultados.

A coleta de dados também se caracterizou como uma atividade bastante difícil devido a indisponibilidade de um sistema que realize a coleta automaticamente. Logo,

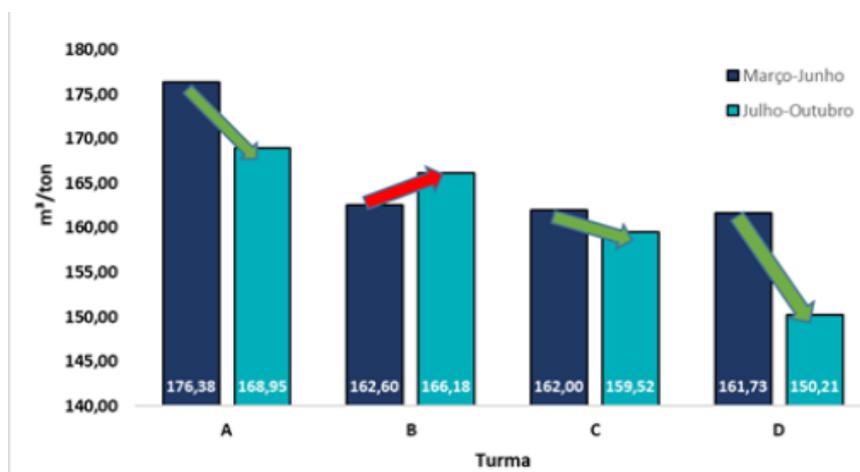
todos os dados apresentados nesse trabalho foram coletados manualmente, necessitando uma grande quantidade de tempo dedicado a essa atividade.

4.6 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados obtidos ao longo da fase de aplicação da metodologia WCM pelo pilar FI foram muito satisfatórios e foi possível observar melhoria na maioria dos indicadores estudados e uma redução significativa no consumo de gás natural durante esse período de quatro meses.

A Figura 18 mostra a evolução do indicador de consumo específico desdobrado por turmas. Pode-se perceber que houve uma evolução positiva desse indicador em todas as turmas, exceto na turma B que mostrou uma piora no indicador no período de julho a outubro. A turma B apresentou um aumento do consumo específico de 162,60 m³/ton para 166,18 m³/ton (aumento de 2,2% relativo aos primeiros quatro meses). As turmas A C e D conseguiram reduzir o indicador de consumo específico no mesmo período: turma A reduziu de 176,38m³/ton para 168,95 m³/ton (redução de 4,21% relativo aos quatro primeiros meses); turma C reduziu de 162,00 m³/ton para 159,52 m³/ton (redução de 1,53% relativo aos quatro primeiros meses); turma D reduziu de 161,73 m³/ton para 150,21 m³/ton (redução de 7,12% relativo aos quatro primeiros meses).

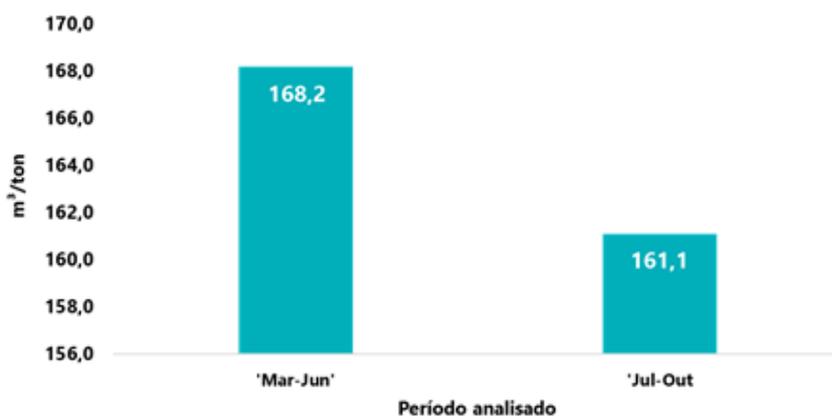
Figura 18 - Evolução do consumo específico por turma (março-junho x julho-outubro)



FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA

Em termos gerais, a Figura 19 mostra a evolução do indicador de consumo específico de todas as turmas somadas entre os dois períodos de análises desse trabalho. O indicador de consumo específico teve uma redução de 168,2 m³/ton para 161,1 m³/ton (diminuição de 7,1 m³/ton representando uma redução de 7,22% relativo aos quatro primeiros meses).

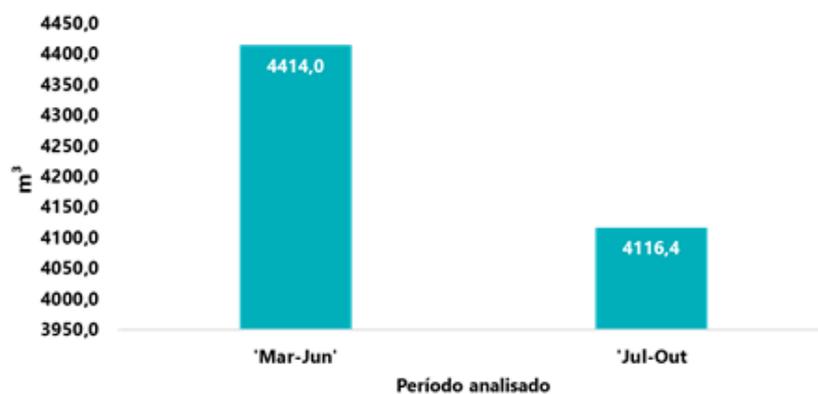
Figura 19 - Evolução do consumo específico médio (março-junho x julho-outubro)



FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA

Em termos absolutos, o consumo médio diário de gás natural (Figura 20) no forno de fusão 9 apresentou uma redução de 296,7 m³ (-6,7% relativo aos quatro primeiros meses).

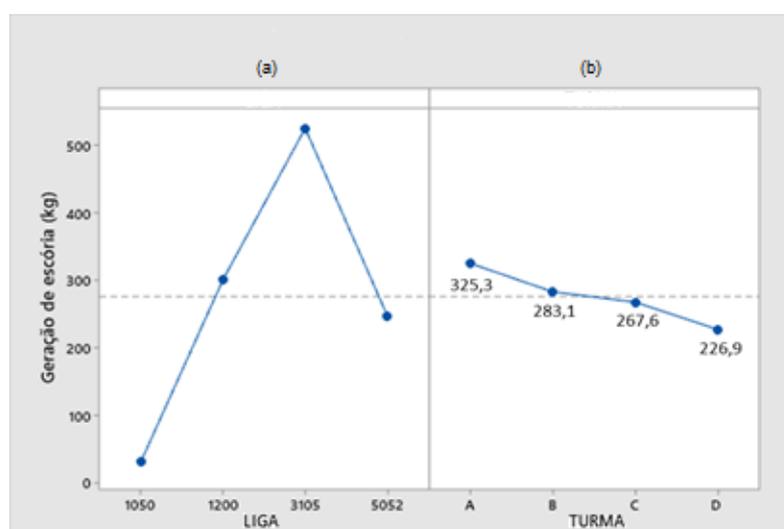
Figura 20 - Evolução do consumo absoluto médio diário (março-junho vs julho-outubro)



FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA

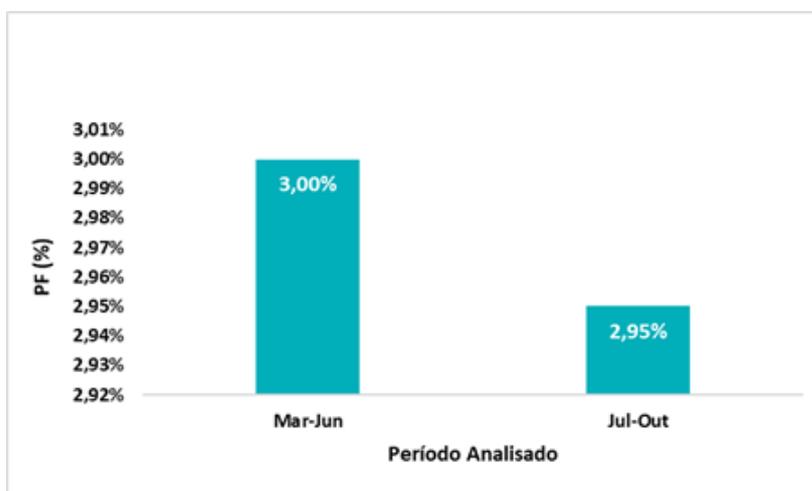
A geração de escória também apresentou uma leve evolução positiva relativos ao primeiro período de avaliação. Enquanto no período de março a junho a geração média foi de 282,8 kg, no período de julho a outubro a geração média foi de 275,7 kg (redução de 7,1 kg de escória gerada por fusão), conforme apresentado na Figura 21 (a). O indicador percentual (PF) apresentou uma leve queda de 0,05% em relação ao período de março a junho (Figura 22). Com isso, temos um resultado satisfatório desse indicador apresentando impactos positivos na redução do consumo de gás natural nos fornos.

Figura 21 - Geração de escória por liga e por turma (julho-outubro)



FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA

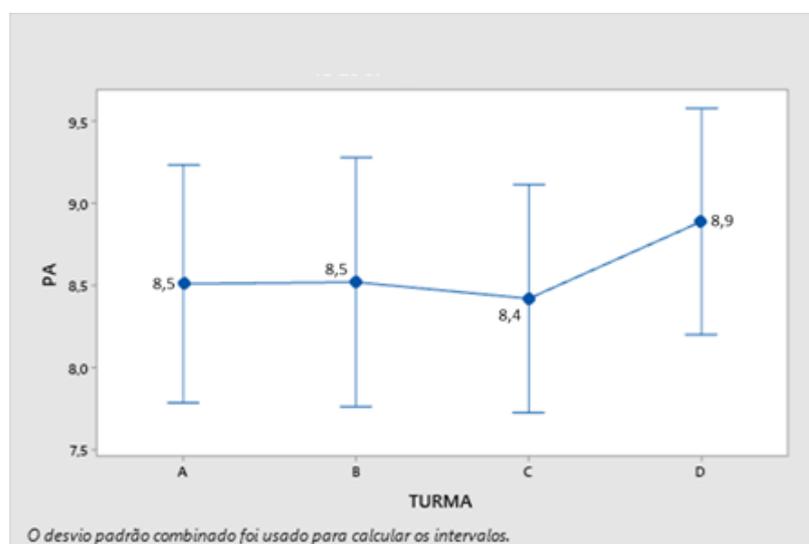
Figura 22 - Evolução da PF (março-junho x julho-outubro)



FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA

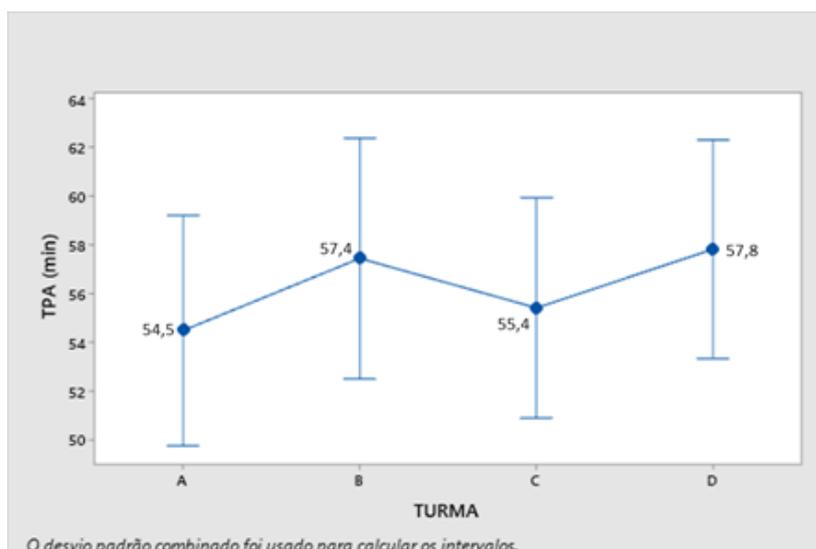
Por fim, são apresentados nas Figuras 23 e 24 os resultados dos indicadores PA e TPA que medem o desempenho da operação (processo) dos fornos de fusão. O indicador PA teve um leve aumento relativo ao período inicial de avaliação apresentando uma média de 8,6 aberturas de porta contra 8,15 aberturas. Esse aumento por si só não é alarmante, pois tais aberturas podem ter sido de curta duração e, portanto, não tem tanto impacto no consumo de gás natural. Isso se confirma na Figura 24 onde é possível identificar uma redução no tempo de porta aberta do forno 9. No período de março a junho a média foi de 59,8 minutos de porta aberta enquanto no período de julho a outubro a média foi de 56,3 minutos, uma redução de 3,5 minutos de porta aberta.

Figura 23 - PA por turma (julho-outubro)



FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA

Figura 24 – TPA por turma (julho-outubro)



FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA

Em geral, os resultados da aplicação da metodologia WCM medido pelos indicadores apresentados acima foram bastante satisfatórios. A economia diária de gás natural de 297,6 m³ (correspondendo a uma economia percentual de 6,74% [$\frac{297,6 \text{ m}^3}{4414 \text{ m}^3}$]) indica ganhos financeiros bastante atrativos. Para calcular esse ganho aproximado financeiro utiliza-se uma base anual (365 dias) e fixa-se o preço do metro cúbico do gás natural em R\$ 1,50/m³ (COPERGÁS, 2019).

$$\text{Benefício} = \frac{297,6 \text{ m}^3}{\text{dia}} \times 365 \frac{\text{dias}}{\text{ano}} \times \frac{1,50\text{R\$}}{\text{m}^3} = 162.936,00 \frac{\text{R\$}}{\text{ano}}$$

Em relação aos custos, foram 3 pessoas trabalhando diretamente nesse projeto. Um engenheiro de processos, um coordenador de produção e um estagiário. Os custos da produção não serão levados em conta pois tais custos já estavam previstos. O cálculo do custo total do projeto será feito considerando o preço da hora de cada funcionário. Estima-se que o engenheiro dedica h diária ao projeto, o coordenador dedica 2h diárias ao projeto e o estagiário dedica 4h diárias ao projeto, com isso temos um preço médio por dia dos 3 funcionários juntos de R\$ 148,00. Cada funcionário trabalha 5 dias da semana durante 52 semanas no ano, totalizando 260 dias por ano de trabalho.

$$\text{Custos} = \frac{148,00\text{R\$}}{\text{dia}} \times \frac{260\text{dias}}{\text{ano}} = 38.480,00 \frac{\text{R\$}}{\text{ano}}$$

$$\text{B/C} = \frac{\text{Benefício}}{\text{Custo}} = \frac{162.936,00}{38.480,00} = 4,23$$

Conforme dito anteriormente, o indicador $B/C \geq 1$ significa que as atividades de melhoria geraram bons resultados e tiveram um impacto positivo na área analisada. No caso desse trabalho, o B/C foi de 4,23 mostrando que os impactos das ações de melhorias e monitoramento dos indicadores geraram resultados satisfatórios.

Os indicadores de maneira sintetizada são apresentados a seguir:

Tabela 4 – Indicadores agrupados

INDICADOR	Período de observação	
	Mar-Jun	Jul-Out
Consumo Específico (m ³ /ton)	168,2	161,1
Consumo Absoluto (m ³)	4414,0	4116,4
Perda de fusão (%)	3,00	2,95
PA	8,15	8,60
TPA (min)	59,8	56,3

FONTE – AUTOR DA MONOGRAFIA

5 CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido na empresa de alumínio secundário, mais especificamente numa área que lida com alumínio líquido permitiu concluir que a eficiência energética deve ser um tema presente em indústrias que tem um consumo energético relevante. A busca por melhorias no setor energéticas, mesmo com diversos obstáculos nos ambientes interno e externo à indústria, pode trazer resultados de grande impacto para o negócio, gerando melhores sinergias internas e ganhos financeiros.

A aplicação da metodologia WCM se mostrou bastante eficaz. O conceito de área modelo foi bastante útil pois permitiu que a aplicação da metodologia fosse focada em um ponto mais crítico do processo, facilitando a condução das ações de melhoria e o controle dos indicadores escolhidos para medir os resultados das mesmas. O direcionamento da metodologia em torno da obtenção de resultados teve um papel extremamente importante nesse trabalho, contribuindo para um melhor planejamento e execução de atividades de maneira mais assertiva e eficaz.

Os indicadores escolhidos para medir os resultados obtidos com o WCM descreveram muito bem o perfil de consumo de gás natural na fábrica de fusão de alumínio. Os indicadores do período de aplicação da metodologia (julho a outubro) mostraram uma evolução bastante positiva comparado aos indicadores do período inicial de avaliação (março a junho). A geração de escória média foi reduzida tanto em quilogramas quanto em valor percentual (relativo à quantidade carregada). O tempo de porta aberta diminuiu no período final, mostrando a evolução do processo em termo de performance operacional. E por fim, o indicador de consumo específico mostrou uma redução significativa, isto é, atualmente o processo é capaz de fundir uma tonelada de alumínio utilizando menos gás natural. Isso pode ser confirmado pelo indicador de consumo absoluto que apresentou uma redução de 297,6 m³ por dia em média.

Conclui-se que os trabalhos e ações de melhoria realizadas foram bem direcionadas e geraram bons resultados, trazendo mais benefícios que custos para a empresa em questão (B/C = 4,23).

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A metodologia WCM prevê que após a validação da metodologia e a obtenção de resultados satisfatórios seja feita uma expansão, isto é, levar a metodologia para as outras áreas, máquinas ou equipamentos. Com isso seguem algumas ações futuras que podem ser desenvolvidas:

- Aplicar a metodologia WCM em um ou mais fornos de fusão.
- Estudo para mensurar o tamanho das perdas de energia presente em um forno de fusão.
- Estudar mais a fundo o processo de combustão e apresentar uma forma de utilizar o calor dos gases de combustão para pré-aquecer o ar de combustão, e assim, aumentar a eficiência de combustão.

REFERÊNCIAS

- ALCOA. **MAKING ALCOA ALUMINUM**. 3. ed. Itapissuma: ALCOA, 2005.
- ASTM B881-17. **Standard terminology relating to aluminum - and magnesium -alloy products**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/B881.htm>. Acesso em: 14 jun. 2019.
- BRATU, V.; GABA, A.; STOIAN, E. V. **Natural gas consumption reducing in aluminum melting furnaces by heat recovery of flue**. Targoviste, Romania, 2016.
- CNI. **Gás Natural: uma alternativa para uma indústria mais competitiva**. 2014. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A8182A14939ECF401497AF939096C87>. Acesso em: 14 jun. 2019.
- COPERGÁS. **Copergás: Produtos**, 2019. Produtos. Disponível em: <https://www.copergas.com.br/produtos/>. Acesso em: 14 jun. 2019.
- DIAS, M. T. L. **Estudo e otimização do processo de fusão da SLM**. 2013. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade do Porto, Cidade do Porto, Portugal. 2013.
- DINIZ, H.; MOREIRA, B.; SOARES, G. **WCM premium class: programa de mentoria com especialista em WCM**. 1. ed. Recife, 2019.
- FELICE, F. De; PETRILLO, A.; MONFREDA, S. **Improving operations performance with world class manufacturing technique: a case in automotive industry**. Casino, Itália, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/54450>. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/operations-management/improving-operations-performance-with-world-class-manufacturing-technique-a-case-in-automotive-indus>. Acesso em: 05 jul. 2019.
- FIorenze, M. et al. Gás natural potencialidades de utilização no Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 10, n. 10, p. 2251-2265, 2013.
- FORTUNA, J. et al. Processo Bayer de obtenção de alumina como ferramenta para o ensino de conceitos de estequiometria. In: Encontro Nacional de Ensino de Química, 16.; Encontro de Educação Química da Bahia, 10., Salvador, Bahia, 2012. **Anais [...]**. Salvador: Sociedade Brasileira de Química, 2012.
- GREEN, J. A. S.; **Aluminum recycling and processing: for energy conservation and sustainability**. Ohio: ASM International, 2007.
- HATCH, J. E. **Aluminum: properties and metallurgy**. Ohio: Aluminum Association Inc. 1984.

IGHODALO, O. A.; AJUWA, C. I. **Heat balance determination for a gas-fired furnace for melting non-ferrous metals**. Ekpoma, Nigéria, 2011.

LAZIC, L.; VARGA, A.; KIZEK, J. **Analysis of combustion characteristics in a aluminium melting furnace**. Kosice, 2004.

MELTON, T. **THE BENEFITS OF LEAN MANUFACTURING What Lean Thinking has to Offer the Process Industries**. Chester, Reino Unido, 2005.

MME. “**Balanco Energético Nacional 2019**”. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2019. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acesso em 8 jun. 2019.

MURINO, T.; NAVIGLIO, G.; ROMANO E. **A world class manufacturing implementation model**. Napoli, Itália, 2012.

NIECKELE, A. O.; NACCACHE, M. F. **Combustion performance of an aluminum melting furnace operating with natural gas and liquid fuel**. Rio de Janeiro, 2010.

NIECKELE, A. O.; NACCACHE, M. F. **Performance of the combustion process inside an aluminum melting furnace with natural gas and liquid fuel**. Orlando, 2015.

NIECKELE, A. O.; NACCACHE, M. F.; GOMES, M. S. P. **Numerical Modelling of an Industrial Aluminum Melting Furnace**. Rio de Janeiro, 2004.

PALUCHA, K. World Class Manufacturing model in production management. **International Scientific Journal**, v. 58, p 227-234, 2012.

PIERCEY, D. G.; KLAPOETKE, T. M. Nanoscale aluminum-metal oxide (thermite) reactions for application in energetic materials. **Central European Journal of Energetic Materials**, v. 7, n. 2, p. 115-129, 2010.

PORTAL DA INDÚSTRIA. “**Eficiência energética na indústria: o que foi feito no Brasil, oportunidades de redução de custos e experiência internacional**”. Brasília, 2009. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_24/2012/09/05/220/20121126132514523849i.pdf>. Acesso em 1 jul. 2019.

REED, R. J. **NORTH AMERICAN COMBUSTION HANDBOOK**. 3Ed. Vol 1. Cleveland, 1986.

RIAN, G.; SOLHEIM, A. **Refractories for molten aluminum contact part I: thermodynamics and kinetics**. Porsgrunn, 2002.

ROHDIN, P.; THOLLAND, P.; SOLDING, P. **Barriers to and drivers for energy efficiency in the Swedish foundry industry**. Linkoping, Sweden. 2007.

ROHSENOW, W. M.; HARTNETT, J. P.; CHO, Y. I. **HANDBOOK OF HEAT TRANSFER**. 3Ed. USA: MCGRAW-HILL. 1998.

ROZZA, G. L. **Estudo comparativo do uso de redes neurais artificiais e regressão linear múltipla para a previsão da concentração cáustica em uma etapa do processo de fabricação de alumina**. UFPR, 2015

STUMP, T.; VATAVUK, J. A construção naval em ligas de alumínio. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, v. 1, n. 1, p. 9-20, 2015.