



**JULIA RIBEIRO DE OLIVEIRA
LETÍCIA MACHADO LEÃO PAES DA ROSA**

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO NO TRATAMENTO
TÉRMICO DE TARUGOS DE ALUMÍNIO**

**LAVRAS – MG
2022**

**JULIA RIBEIRO DE OLIVEIRA
LETÍCIA MACHADO LEÃO PAES DA ROSA**

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO NO TRATAMENTO TÉRMICO DE
TARUGOS DE ALUMÍNIO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof^ª. Dr^ª. Natália Maira Braga Oliveira

Orientadora

**LAVRAS – MG
2022**

JULIA RIBEIRO DE OLIVEIRA
LETÍCIA MACHADO LEÃO PAES DA ROSA

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO NO TRATAMENTO TÉRMICO DE
TARUGOS DE ALUMÍNIO**

**ENERGY RECOVERY IN THE HEAT TREATMENT OF ALUMINUM
BILLETS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Aprovado em 13 de abril de 2022.
Dr^a. Natália Maira Braga Oliveira UFLA
Dr. Gilson Campani Junior UFLA
Dr^a. Suellen Mendonça Nascimento UFLA

Prof^a. Dr^a. Natália Maira Braga Oliveira
Orientadora

LAVRAS – MG
2022

Dedico este trabalho à toda minha família, sobretudo à minha mãe que não mediu esforços para que minha educação viesse em primeiro lugar.

Aos meus amigos de curso que tornaram os anos longe de casa mais leves e que me foram família por onde passei. À querida amiga Letícia Leão pela parceria intermitente que será levada por toda a vida. Estes também são resultados dos seus esforços.

Dedico - Júlia

À minha família que sempre foi minha fortaleza, especialmente à minha mãe, meu padrasto e minha avó que sempre zelaram por mim. Aos meus amigos e colegas que sempre estiveram por mim e tornaram esses anos felizes; especialmente à Júlia que estará comigo até o último instante da minha graduação e, sem ela, este trabalho não seria possível.

Dedico – Letícia

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Alcoa Alumínio e aos colaboradores da Refusão de Poços de Caldas que contribuíram diretamente para que pudéssemos enriquecer o trabalho e finalizar esta fase.

Agradecemos também a todos os professores que estiveram dispostos a nos repassar seus conhecimentos e nos preparar para as próximas etapas de nossas vidas profissionais, em especial a nossa orientadora que nos amparou e nos conduziu com muita paciência e sensibilidade.

Finalmente, agradecemos às nossas famílias por todo apoio e incentivo integral durante todos os anos de curso.

RESUMO

O alumínio é o segundo elemento metálico mais abundante na crosta terrestre, e se tornou um grande competidor econômico devido a sua gama de aplicações, inclusive de engenharia, e por apresentar vantagens em relação a outros metais, como sua leveza, combinada à baixa relação massa/resistência, alta durabilidade e infinita reciclagem, os quais são fatores que fizeram do alumínio e seus produtos responsáveis por quase 7 % do PIB Industrial Brasileiro em 2019. Como matéria-prima, o alumínio pode passar por processos industriais gerando inúmeros produtos secundários, tais como: latas, ferramentas, papel alumínio, elementos estruturais, caldeiras etc., e, a partir da versatilidade desses materiais, é possível que eles sejam utilizados em diversos campos de aplicação, como: construção civil, transportes, embalagens, energia, máquinas e equipamentos, bens de consumo, entre outros. No entanto, sua alta maleabilidade e baixa dureza tornam necessário um processo industrial que altere suas propriedades físicas e mecânicas, a fim de atender sua aplicação final. Esse pode envolver etapas como refundição de alumínio primário, mistura com anteligas, solidificação em moldes e tratamento térmico, sendo esta última etapa responsável pela maior parte do consumo de energia elétrica do processo, se tornando, conseqüentemente, um gargalo da indústria de processamento de alumínio. Dessa forma, este trabalho aborda um problema real da indústria metalúrgica e propõe uma melhoria no aproveitamento energético, que resulta em redução no custo pela diminuição do consumo de energia elétrica. Assim, a fim de fundamentar a proposta para o processo escolhido, foi feito o mapeamento de todas as etapas do processamento, levantamento de dados das condições do tratamento térmico, proposta de implementação da sugestão apresentada e análise de viabilidade técnica-econômica. A proposta de melhoria envolve reutilização de corrente de processo que seria descartada durante o tratamento térmico de tarugos de alumínio da série 6XXX, produzidos através da refusão de alumínio primário, a fim de aumentar a eficiência do processo como um todo. Essa proposta de aproveitamento energético visou reduzir a quantidade de energia utilizada, através de reestruturação dos próprios equipamentos já existentes. Seu objetivo foi examinar o potencial para melhorar e otimizar a troca de calor entre fontes de aquecimento e resfriamento, a fim de reduzir a quantidade de utilidades consumidas. Em um cenário otimista, foi estimada a redução em uma hora de aquecimento do forno de homogeneização, através do reciclo da corrente de saída da câmara de resfriamento para o estaleiro, com a finalidade de pré-aquecer os tarugos que aguardam nessa estrutura. A melhoria proposta se mostrou economicamente viável por possuir entre 7 e 12 dias para retorno do investimento para os cenários analisados, se firmando como um projeto de implementação imediata. Com isso, a proposta aprimora o processo produtivo de tarugos de alumínio, mitigando os gastos despendidos no tratamento térmico e, conseqüentemente, reduzindo a demanda de recursos naturais, o que torna o processo produtivo de tarugos de alumínio da liga 6XXX economicamente mais competitivo.

Palavras-chave: Consumo energético. Eficiência. Refusão de alumínio. Tratamento térmico. Análise de viabilidade.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processamento do alumínio e seus produtos.	10
Figura 2 - Consumo de alumínio e seus produtos por segmento no ano de 2019.	11
Figura 3 – Consumo de alumínio no Brasil (a) per capita e (b) total.....	12
Figura 4 - Balança comercial do alumínio no Brasil.....	13
Figura 5 - Processo Bayer.	17
Figura 6 - Produtos de alumínio: (a) lingotes e (b) tarugos.....	18
Figura 7 - Fluxograma do processo produtivos de tarugos de alumínio.	19
Figura 8 - Sucatas utilizadas para refusão na produção de tarugos de alumínio: (a) perfil prensado; (b) metal drenado solidificado e (c) pés e cabeças serrados.	21
Figura 9 - Elementos de liga do alumínio 6XXX: (a) pastilha de cromo; (b) barras de magnésio; (c) pepitas de silício e (d) pastilhas de cobre.	22
Figura 10 - Solubilidade do hidrogênio em alumínio a pressão atmosférica.....	24
Figura 11 - Mesa de moldes do modelo <i>hot-top</i> DC.	26
Figura 12 - Representação do trajeto do metal do forno até a mesa de moldes.	27
Figura 13 - Formação do grão.	28
Figura 14 - Serragem das extremidades do tarugo: (a) cabeça; (b) pé e (c) acabamento.	29
Figura 15 - Diagrama de fases Al-Mg ₂ Si.	30
Figura 16 - Equipamentos usados no tratamento térmico: (a) forno de solubilização à resistência elétrica e (b) câmara de resfriamento.	32
Figura 17 - Visão geral dos equipamentos envolvidos no tratamento térmico: (a) carro de locomoção de carga; (b) forno de homogeneização; (c) câmara de resfriamento e (d) estaleiro de espera.....	33
Figura 18 – Feixes estocados aguardando embarque.	33
Figura 19 - Comparação do preço da tarifa energética industrial em US\$/MWh de diferentes países.	35
Figura 20 – Ilustração dos cenários (a) atual e (b) proposto.	38
Figura 21 - Centro da carga a 25,3 °C no início do tratamento térmico.	41
Figura 22 - Centro da carga a 163,5 °C cerca de 1 h após início do tratamento térmico.	41
Figura 23 - Consumo médio de energia elétrica para tratamento térmico por tonelada de carga de liga leve no mês de março de 2022.	42
Figura 24 - Início da etapa de encharque, completando cerca de 10 h de rampa para elevar a temperatura do centro da carga de 25 °C a cerca de 554 °C.	42
Figura 25 - Dimensões da câmara de resfriamento.	44
Figura 26 - Exemplo de estufa revestida com tijolo e manta cerâmica refratária.	45
Figura 27 - Centro da carga a 25,3 °C no início do tratamento térmico.	48
Figura 28 - Centro da carga a 123 °C após 37 minutos de tratamento térmico.....	48
Quadro 1 - Classificação das séries de alumínio por elemento de liga principal.....	14
Quadro 2 - Especificação dos tratamentos térmicos.....	15

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1	O alumínio	10
2.2	A importância competitiva do alumínio	11
2.3	Relevância econômica do setor	12
2.4	Ligas de alumínio.....	13
2.5	Processo produtivo do alumínio primário.....	15
2.6	Processo produtivo de tarugos de alumínio	18
2.6.1	Carregamento dos fornos.....	20
2.6.2	Adição dos elementos de liga	21
2.6.3	Transferência do metal	23
2.6.3.1	Desgaseificação e remoção de álcalis	23
2.6.3.2	Adição de refinadores de grãos	24
2.6.3.3	Filtragem	24
2.6.3.4	Passagem pela mesa de moldes.....	25
2.6.3.5	Solidificação do metal.....	27
2.6.4	Serragem das extremidades.....	28
2.6.5	Tratamento térmico.....	29
2.6.6	Embalagem e estocagem do material.....	33
2.7	Aproveitamento energético.....	34
3	METODOLOGIA	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é o terceiro elemento mais encontrado na crosta terrestre e suas propriedades, como leveza, alta condutividade elétrica, grande resistência à corrosão e baixo ponto de fusão, permitem que seja amplamente utilizado para a produção de diversos itens, como ligas metálicas, laminados e extrudados (ABAL, 2007).

Considerando a quantidade e o valor do metal empregado, o uso do alumínio excede o de qualquer outro metal, com exceção do ferro. O material é importante em múltiplas atividades econômicas, desde o uso da alumina no tratamento de água até produtos da indústria metalúrgica, aeronáutica, farmacêutica e alimentar (CARDOSO et al., 2011).

Outro fator relevante sobre o alumínio, e que o torna mais vantajoso em relação a outros materiais, é a possibilidade de infinita reciclagem. Segundo dados do International Aluminium Institute (IAI), o processo de reciclagem utiliza apenas 5% da energia elétrica e libera somente 5% das emissões de gás de efeito estufa, quando comparado com a produção de alumínio primário (ABAL, 2008).

Além da obtenção primária do alumínio, o processamento secundário ocorre partindo da reciclagem de sucata e/ou refusão de alumínio primário, e constitui uma fonte de produção do metal muito valorizada atualmente, pois resulta em economia de energia elétrica, já que diferente do processamento primário, não envolve a eletrólise da alumina.

O processo de fabricação de tarugos pela refusão de alumínio primário consiste basicamente na transformação de fase do metal, seguida da adição de elementos de liga, solidificação em moldes e, por fim, tratamento térmico, que confere ao material determinadas características, por meio do aquecimento, permanência em determinada temperatura e/ou resfriamento controlado, proporcionando modificações nas propriedades das ligas pela alteração do tipo e proporção dos elementos nelas presentes (FREITAS, 2014).

A maioria das ligas de alumínio podem ter suas propriedades mecânicas, estabilidade dimensional ou resistência à corrosão melhoradas por meio de tratamentos térmicos, que são realizados visando remover ou reduzir as segregações e controlar algumas características metalúrgicas (VERRAN; MORAES; VERRI, 2005).

No entanto, essa etapa demanda um alto gasto energético devido à variação de temperatura a que os tarugos de alumínio devem ser submetidos, para que o tratamento térmico seja eficiente. Visto que a tarifa da energia elétrica destinada ao setor industrial no Brasil é um infortúnio, que torna o mercado brasileiro desvantajoso frente ao internacional, faz-se

necessário propor soluções que mitiguem o gasto despendido no processo, sendo esse um ponto interessante de abordagem.

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade técnica-econômica de uma readequação no processo de tratamento térmico de tarugos de alumínio da série 6XXX (contendo silício e magnésio como elemento de liga), produzidos através da refusão de alumínio primário, propondo um aproveitamento energético. Com a implementação das alterações propostas, espera-se reduzir os gastos despendidos no tratamento térmico, conseqüentemente reduzindo a demanda de recursos naturais, já que haverá uma diminuição no consumo de energia e redução da necessidade de fontes externas de calor.

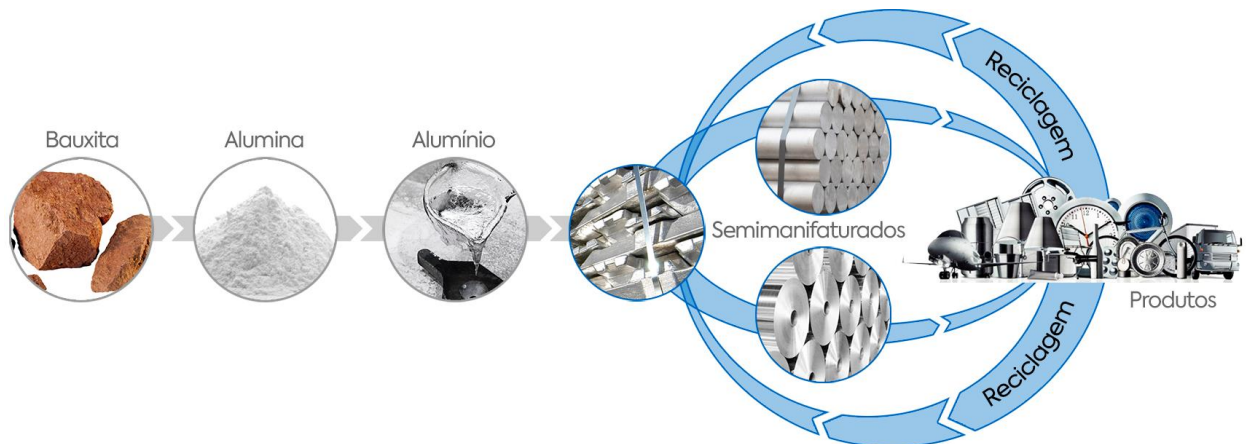
Ou seja, este trabalho consiste na investigação de um problema real da indústria do alumínio, para o qual serão propostas soluções, com análise econômica, tomando como base conceitos de Engenharia Química.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O alumínio

A obtenção do alumínio na forma metálica se inicia na mineração da bauxita, seguida do beneficiamento. Após moída, a bauxita segue para refinaria, local em que passa por tratamentos químicos que visam a extração de impurezas e dão origem à alumina, produto intermediário do processamento. A etapa seguinte consiste na transformação da alumina em alumínio primário, na forma metálica, por meio da eletrólise (HUFNAGEL, 1992). A sequência do processamento do minério ao subproduto do metal está apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Processamento do alumínio e seus produtos.

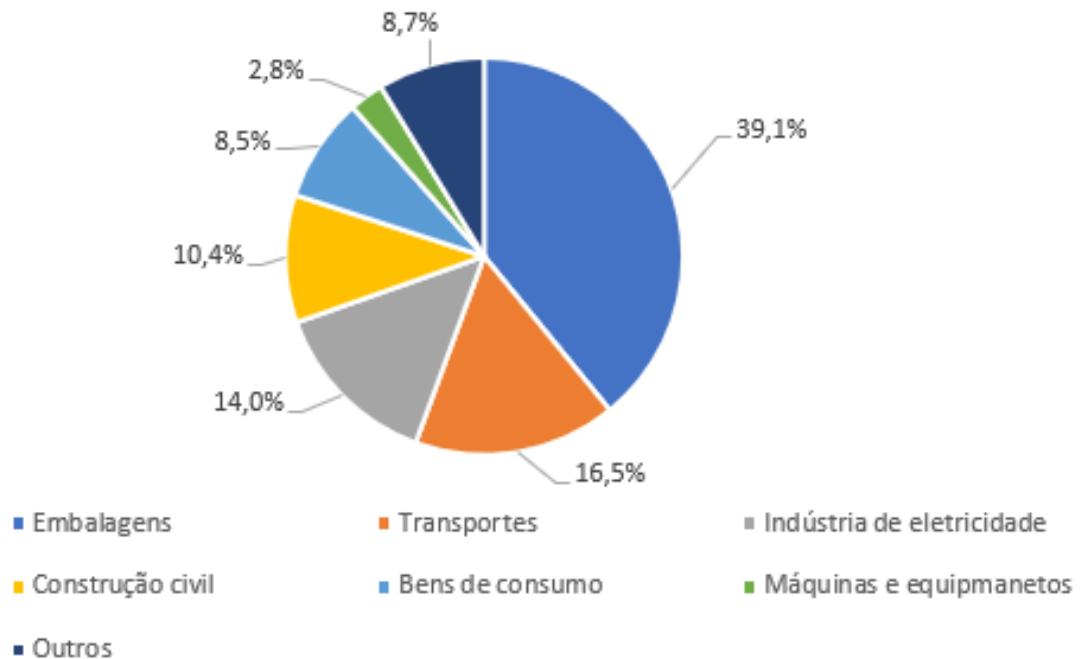


Fonte: ABAL (2021).

O alumínio é o elemento metálico mais encontrado no planeta Terra. O metal possui ponto de fusão de 660 °C, conta com massa específica de 2,70 g/cm³ e é protegido por uma camada delgada de óxido que lhe garante resistência à corrosão. Além de não apresentar propriedades magnéticas, o que faz com que o elemento possa ser empregado em materiais eletrônicos com a finalidade de proteção (ABAL, 2021).

O alumínio, como matéria-prima, pode passar por processos industriais gerando inúmeros produtos secundários tais como: latas, ferramentas, papel alumínio, elementos estruturais, caldeiras, etc. e, a partir da versatilidade desses materiais, é possível que eles sejam utilizados em diversos campos de aplicação, tais como: construção civil, transportes, embalagens, energia, máquinas e equipamentos, bens de consumo, etc. Sua aplicação nesses setores no ano de 2019 pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 - Consumo de alumínio e seus produtos por segmento no ano de 2019.



Fonte: Adaptado de ABAL (2020).

No entanto, para a maioria das aplicações finais, a baixa dureza do alumínio torna necessário um processo industrial que altere suas propriedades físicas e mecânicas, a fim de atendê-las. Tal processo tem como principais etapas a adição de elementos de liga e o tratamento térmico, para aquelas em que se cabe.

Dentre as diversas classificações adotadas para o alumínio, a principal divisão feita é em relação à sua composição química, nesse sentido, o sistema de classificação da *The Aluminum Association Inc.* separa as ligas em oito séries. A série abordada neste trabalho é a 6XXX, composta majoritariamente por silício e magnésio e representante de mais de 80 % das ligas de alumínio destinadas à extrusão, sendo bastante utilizada em estruturas soldadas, arquitetura e equipamentos automobilísticos (AL-MARAHLEH, 2006).

2.2 A importância competitiva do alumínio

Devido a sua baixa densidade, o alumínio possui muitas aplicações, as quais necessitam de material leve, sendo ele escolhido frente ao aço e ao cobre, por exemplo. Sua temperatura de fusão é significativamente inferior à desses dois metais, fazendo com que sua fundição demande menos energia e seja mais econômica para a indústria. Seu baixo módulo de elasticidade garante alta ductibilidade, enquanto suas condutibilidades térmica e elétrica ficam

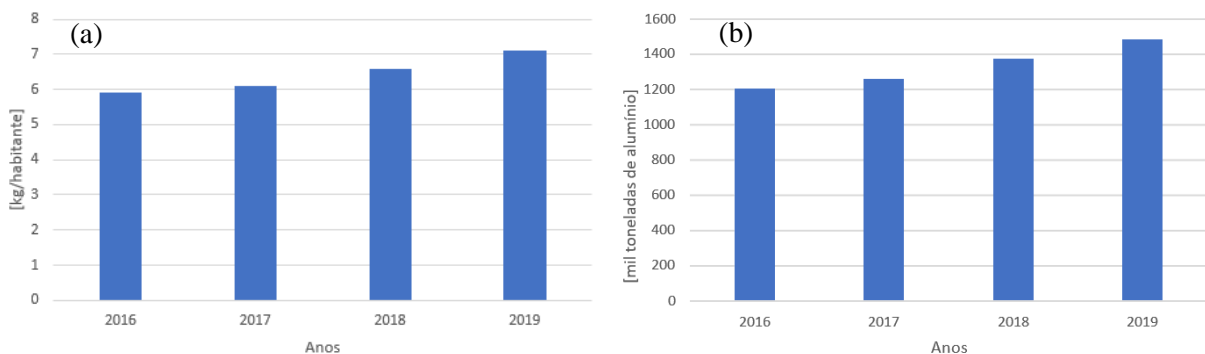
entre as do aço e do cobre, fazendo com que o metal seja utilizado para aplicações específicas.

No entanto, dentre as propriedades do alumínio, a maior vantagem é a infinita reciclabilidade. A reciclagem do alumínio na indústria brasileira foi de 56 % frente à média mundial de 25,9 % em 2018, de acordo com o anuário da Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2019). Esse reaproveitamento é muito benéfico, pois permite que as sucatas sejam reinseridas no processo fabril sem perder suas propriedades essenciais, além de reduzir a quantidade de lixo gerado e gerar economia de recursos naturais e energia.

2.3 Relevância econômica do setor

Em 2019, o faturamento da indústria do alumínio foi de R\$ 83,6 bilhões, de acordo como anuário da Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2019), o que correspondeu a 1,2 % do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro e um crescimento de 5,3 % em relação ao ano anterior. O consumo per capita, assim como o consumo doméstico, vem crescendo ao longo dos últimos anos, sendo um indicativo que cada vez mais os consumidores brasileiros fazem o uso de alumínio e seus subprodutos, como pode ser visto pelos gráficos representados nas Figuras 3 (a) e 3 (b), respectivamente.

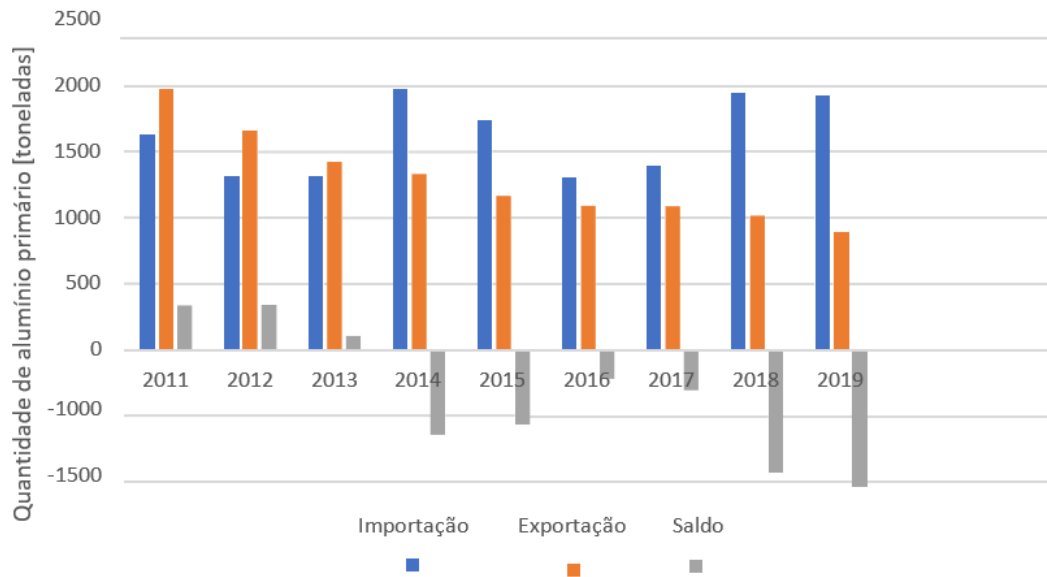
Figura 3 – Consumo de alumínio no Brasil (a) per capita e (b) total.



Fonte: Adaptado de ABAL (2019).

Ao se tratar da balança comercial do alumínio e seus produtos nos anos de 2011 a 2019 (ABAL, 2019), representada na Figura 4, percebe-se que o saldo, ou seja, a diferença entre as exportações e as importações vem se tornando, nos últimos anos (2018 e 2019), significativamente mais negativo, o que indica que o Brasil tem importado mais do que exporta o metal, desde 2014, com aumento significativo do déficit. Ou seja, há um apelo para que seja produzida uma maior quantidade do mesmo.

Figura 4 - Balança comercial do alumínio no Brasil.



Fonte: Adaptado de ABAL (2019).

2.4 Ligas de alumínio

As ligas metálicas podem ser divididas entre fundidas, as quais são fabricadas a partir da fusão do alumínio e seus elementos de liga, seguida de transferência para um molde, ou forjadas, quando produzidas por deformação plástica. A Associação Brasileira de Normas Técnicas regulamenta pela NBR 6834 (ABNT, 2006) que a nomenclatura para as ligas de alumínio seja composta por 4 dígitos, em que o primeiro representa o principal elemento de liga, seguido pela modificação na liga, quando existente, simbolizada pelo segundo dígito, e os últimos dois dígitos apresentam a concentração de alumínio. As ligas fundidas se diferenciam por um ponto entre os dois últimos dígitos na nomenclatura.

A utilização de uma liga é benéfica pois garante, por vezes, propriedades mais vantajosas que o alumínio puro para determinadas aplicações. Os elementos ligantes podem ser subdivididos em dois grupos, sendo o primeiro o conjunto de elementos que garante a característica predominante da liga, que pode ser: resistência à corrosão, resistência mecânica, maleabilidade etc., enquanto o segundo grupo é composto por elementos que assistem à liga, garantindo-lhe o controle da microestrutura e também das impurezas. O sistema de classificação da The Aluminum Association Inc. separa as ligas em oito séries, classificadas de acordo com o principal elemento de liga presente, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação das séries de alumínio por elemento de liga principal.

Série	Principal elemento de liga
1XXX	Não há (alumínio puro)
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Lítio, Ferro, Cobre, Magnésio e Estanho

Fonte: Adaptado de Mondolfo (2013).

Como mostra o Quadro 1, os tarugos da série 6XXX têm como principais elementos de liga o magnésio e silício, sendo o primeiro responsável por promover o aumento de algumas propriedades mecânicas desejáveis, como a capacidade de endurecimento por deformação, e o segundo por aumentar a fluidez do alumínio líquido. Quando adicionado junto com o magnésio, o silício forma ligas tratáveis termicamente, reduzindo a temperatura de fusão e diminuindo os índices de contração durante o processo de solidificação, mitigando a ocorrência de trincas internas (MAZOLANI, 1995).

Além disso, ligas de alumínio-magnésio (série 5XXX) são amplamente utilizadas em aplicações que requerem um acabamento de superfície brilhante, por obter excelente resposta ao acabamento químico, resistência à corrosão e ótimas combinações com ductibilidade (KAUFMAN; ROOY, 2004).

Uma das principais vantagens de se trabalhar com materiais metálicos é a possibilidade de alterar as propriedades mecânicas, principalmente aumentando dureza e resistência, tornando-o mais adequado a um determinado processo ou uso final, sem modificação da composição química, apenas através de um ciclo de tratamento térmico (ASM, 1984).

As ligas de alumínio também podem ser divididas em dois outros grupos: tratáveis e não tratáveis termicamente. As ligas não tratáveis são aquelas que não são passíveis de aumento da resistência mecânica a partir da realização de tratamentos térmicos, porém podem ser endurecidas por trabalho a frio. Já as ligas tratáveis termicamente apresentam aumento da resistência mecânica por tratamento térmico, a partir de ciclos controlados de aquecimento e resfriamento (ABAL, 2004).

Para que uma liga seja termicamente tratável, é necessário que tenha em sua composição

elementos cuja solubilidade no alumínio aumente com a temperatura e seja baixa em temperaturas próximas à ambiente. Nesse caso, com a ação de elementos como o cobre, magnésio-silício e magnésio-zinco é possível melhorar as propriedades mecânicas das ligas, através de um ciclo de tratamento térmico de solubilização, precipitação e/ou envelhecimento (SCHUITEK, 1997).

A partir das condições metalúrgicas nas ligas de alumínio, há uma subdivisão em que as ligas submetidas a um tratamento térmico também são classificadas com a letra T, seguida de um ou mais dígitos. Essa classificação é explicada no Quadro 2.

Quadro 2 - Especificação dos tratamentos térmicos.

Tipo	Especificação do primeiro dígito
T1	Solubilização parcial e envelhecimento natural
T2	Recozimento
T3	Solubilização total e deformação a frio
T4	Solubilização total e envelhecimento natural
T5	Envelhecimento artificial
T6	Solubilização total e envelhecimento artificial
T7	Solubilização e estabilização
T8	Solubilização, deformação a frio e envelhecimento artificial
T9	Solubilização, envelhecimento artificial e deformação a frio
T10	Conformado a quente, resfriado, envelhecido artificialmente e encruado

Fonte: Adaptado de Roy e Lindem (1990).

2.5 Processo produtivo do alumínio primário

A produção do alumínio ocorre através de um processo industrial ao qual a bauxita é submetida, conforme ilustrado na Figura 1. A bauxita é um minério e, para a produção economicamente viável do alumínio, é necessário que contenha em sua composição, pelo menos, 30 % de óxido de alumínio (Al_2O_3) utilizável (ABAL, 2021).

Há três etapas que integram a mineração da bauxita, que é a fase inicial da produção do alumínio; são elas: retirada estratégica de solo e vegetação, remoção da parte mineral do solo, composta por lateritas e argila, seguida do beneficiamento que, por sua vez, consiste na britagem, lavagem (quando necessário) do minério, para redução de sílica, e secagem.

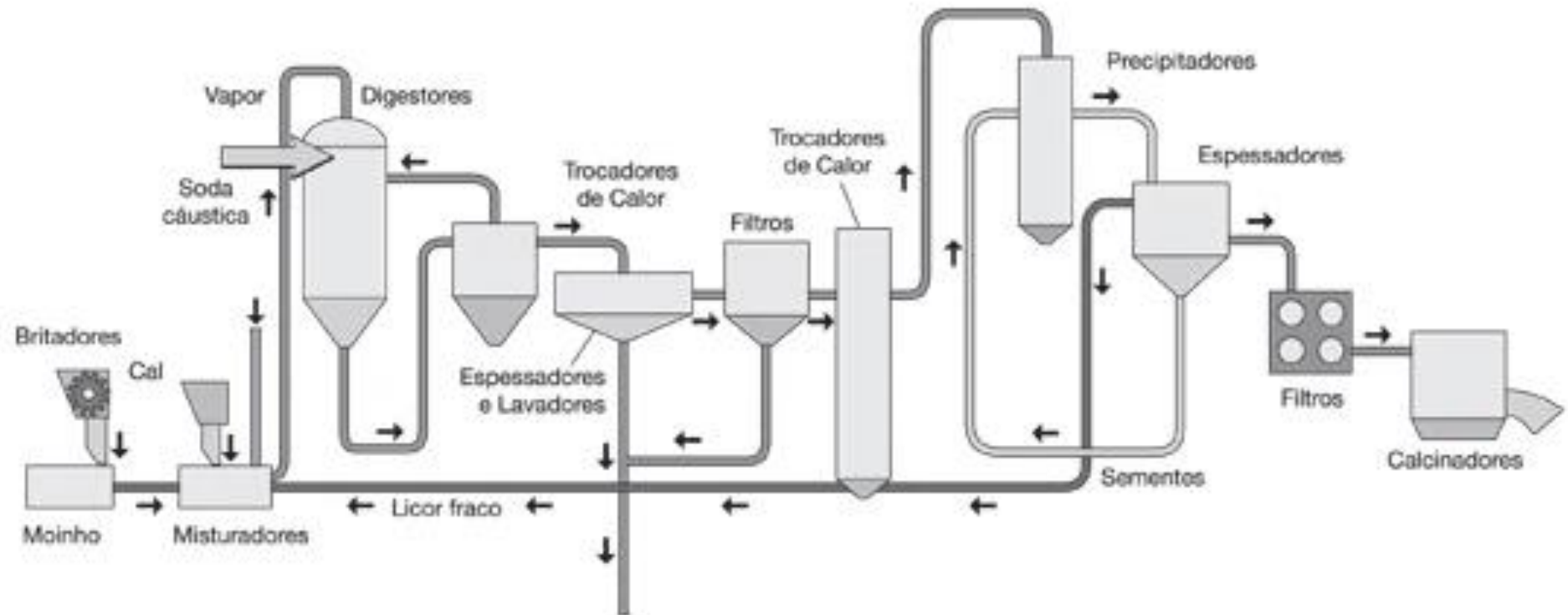
O processo produtivo do alumínio a partir da bauxita já extraída da natureza, após a mineração, conta com mais duas etapas: refino e redução.

O refino é consumado através do processo Bayer, comumente utilizado no Brasil,

obtendo-se alumina calcinada a partir da bauxita. O esquema desse processo está representado na Figura 5. Ele foi criado em 1888 por Karl Josef Bayer na Austrália e consiste em tratar a bauxita a uma temperatura de 240 °C através de soluções de hidróxido de sódio.

Pela Figura 5, tem-se que a primeira etapa é a britagem, que visa reduzir a granulometria da bauxita. A partir daí, o minério vai para os moinhos, sendo moído junto com uma solução de soda cáustica. Iniciando a etapa de refino, essa pasta de soda cáustica com bauxita é aquecida em tanques digestores, com adição de mais soda cáustica e cal (CaO), a fim de solubilizar a alumina presente na bauxita. Com a alumina solubilizada, a solução parte para a etapa de clarificação, em que acontece a separação da solução dos resíduos sólidos. Os sólidos mais grosseiros (também chamados de areia) são separados dos mais finos, de forma que o espessador separa os mais finos e o ciclone as areias. Essa solução que sai dos espessadores é o licor concentrado ou licor rico, que segue para etapa de precipitação. Já o licor fraco, que tem baixa concentração de alumina, retorna aos misturadores, sendo mais uma vez combinado com a solução de soda cáustica e cal, visando maior recuperação da alumina. O licor rico passa então por um trocador de calor para ser resfriado e entra nos precipitadores, local em que se dá início à cristalização da alumina. O produto dos precipitadores é o hidróxido de alumina que após a calcinação, e conseqüente remoção de sua umidade, é convertido em alumina.

Figura 5 - Processo Bayer.



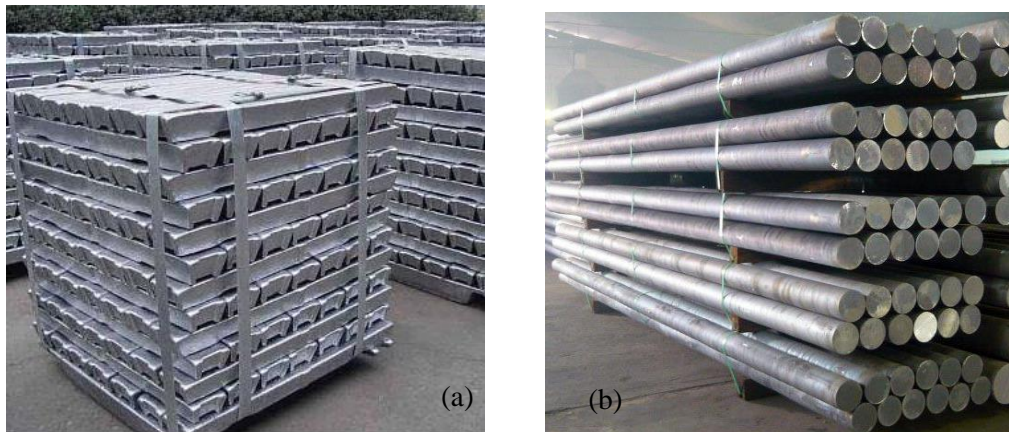
Fonte: Adaptado de ABAL (2021).

A última parte para a produção de alumínio é a redução da alumina. Inicialmente, a alumina é colocada em um banho de fluoreto de alumínio e criolita fundida, dentro de uma cuba alimentada com baixa tensão (entre 4 e 5 V); ocorrendo, então, a reação química apresentada na Equação 1.



Na cuba, o ânodo do carbono atrai o oxigênio da alumina, tornando-se o dióxido de carbono, e há formação de alumínio líquido, o qual se precipita na base do recipiente. Esse alumínio líquido é o alumínio primário, o qual é transferido para a refusão, para ser transformado em lingotes ou tarugos, como ilustrado da Figura 6.

Figura 6 - Produtos de alumínio: (a) lingotes e (b) tarugos.

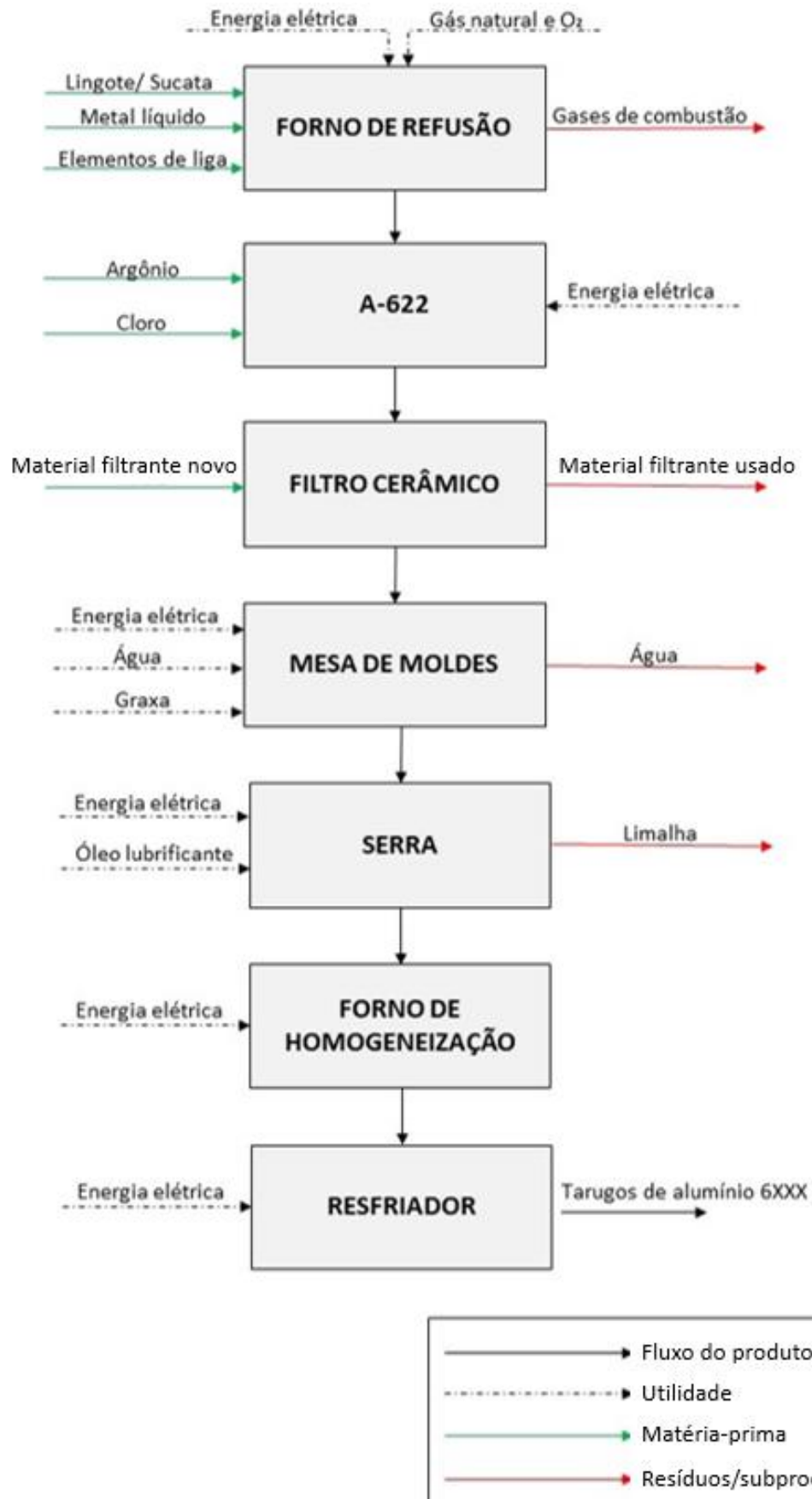


Fonte: ABAL (2022).

2.6 Processo produtivo de tarugos de alumínio

O fluxograma na Figura 7 ilustra todo o processo produtivo de tarugos através da refusão de alumínio primário, que pode ou não ser combinado com sucata.

Figura 7 - Fluxograma do processo produtivo de tarugos de alumínio.



Fonte: Das autoras (2022).

O alumínio líquido é carregado nos fornos de refusão e depois segue para etapas de filtração, moldagem e tratamentos que visam garantir a qualidade da liga e, conseqüentemente, do tarugo. As etapas representadas na Figura 7 serão abordadas detalhadamente na sequência.

2.6.1 Carregamento dos fornos

O carregamento do forno pode ser feito tanto com metal primário (lingotes de alumínio), quanto com a combinação de lingotes com sucata.

As sucatas usadas devem atender requisitos mínimos de qualidade, segurança e embalagem, não sendo permitidas sucatas contaminadas com outros metais, como zinco e chumbo, e sendo priorizadas as geradas no processo de extrusão, também chamadas de sucata de mercado. O uso de sucatas como insumo na produção de tarugos é fator decisivo na competitividade da empresa, já que o custo comercial é significativamente menor do que o de lingotes, além do impacto ambiental atrelado (GIRARD, 2010).

No entanto, o uso de sucata pode trazer conseqüências que devem ser consideradas no processo. A composição exata da sucata é majoritariamente desconhecida, de forma que o forno pode ser contaminado com elementos químicos indesejáveis durante a produção de tarugos, como os da série 6XXX. Além disso, a forma física da sucata impacta diretamente na taxa de refusão (toneladas refundidas por hora) e na geração de escória, tendo relação direta com a perda de fusão (razão da massa final do metal solidificado e da massa do material carregado no forno). As perdas de fusão dependem das dimensões do material metálico colocado no forno, sendo que a principal variável que afeta a perda é a espessura do refugo, pois quanto mais leve for o material e quanto maior a área superficial, maiores serão as perdas devido a exposição do metal líquido à atmosfera rica em oxigênio, criando uma camada de óxido de alumínio, também chamada de borra ou *dross* (ABAL, 2006).

Na Figura 8, estão apresentadas imagens de sucatas que podem ser usadas no carregamento do forno. A Figura 8 (a) é do produto resultante da extrusão que não passou nos critérios de qualidade. Já a Figura 8 (b) representa a sucata que é obtida durante a transição de ligas diferentes, que é retirada do processo visando evitar contaminação do produto, e a Figura 8 (c) é a sucata obtida na serragem de extremidades; etapa essa que será detalhada na seção 2.6.4.

Figura 8 - Sucatas utilizadas para refusão na produção de tarugos de alumínio: (a) perfil prensado; (b) metal drenado solidificado e (c) pés e cabeças serrados.



(a)



(b)



(c)

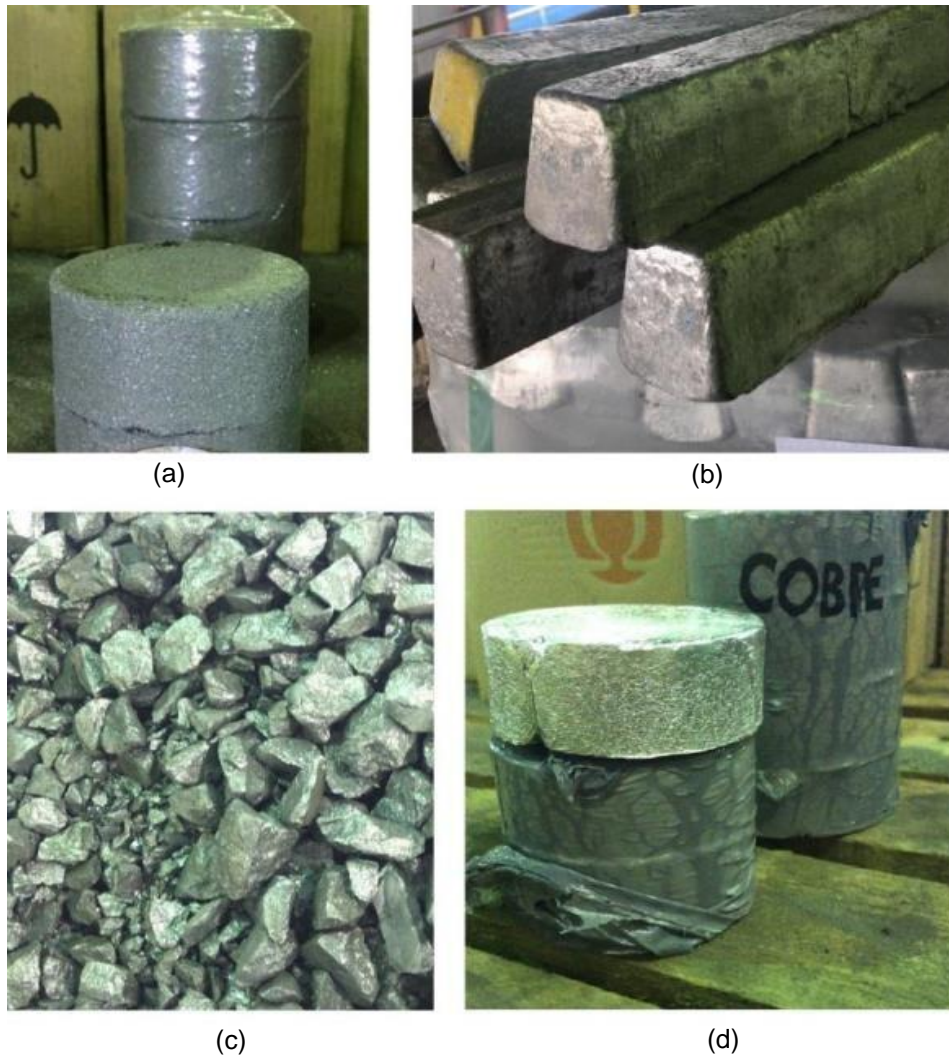
Fonte: Das autoras (2022).

2.6.2 Adição dos elementos de liga

Com o alumínio já refundido, os elementos de liga – chamados de anteligas – são adicionados, a fim de se obter a composição química desejada. O grande alcance das ligas, com diversas aplicações, oferece ao mercado uma grande variedade de combinações de resistências mecânica, à corrosão e ao ataque de substâncias químicas, condutibilidade elétrica, usinabilidade, ductibilidade e formabilidade (AGREDA, 2005).

Como ilustrado na Figura 9, os tarugos de alumínio da série 6XXX têm em sua composição o magnésio (Figura 9 b) e o silício (Figura 9 c), como principais elementos de liga, mas outros elementos também podem ser adicionados a essa série, que são o manganês, titânio, cromo (Figura 9 a), cobre (Figura 9 d) e ferro (ZHONG, ROMETSCH e ESTRIN, 2014).

Figura 9 - Elementos de liga do alumínio 6XXX: (a) pastilha de cromo; (b) barras de magnésio; (c) pepitas de silício e (d) pastilhas de cobre.



Fonte: Das autoras (2022).

Após a adição dos elementos de liga, o forno é agitado, a fim de contribuir na dissolução dos elementos e na homogeneização da composição e da temperatura do metal líquido.

Antes de iniciar a transferência do metal preparado para a mesa de moldes, é feita uma análise da composição química, para certificar se o composto está atendendo aos requisitos mínimos e máximos da liga que está sendo produzida. Para isso, retira-se uma pequena amostra do metal líquido, que é posteriormente solidificada e analisada por espectrometria ótica em um laboratório destinado exclusivamente para isso. O resultado obtido é comparado com o resultado de uma amostra padrão de mesma liga e, estando dentro dos limites aceitáveis, segue-se para próxima etapa.

2.6.3 Transferência do metal

Com o forno preparado, a próxima etapa do processo é a transferência do metal para a mesa de moldes, comumente chamada de vazamento do metal. Durante esse percurso, o metal passa por quatro tratamentos imprescindíveis para garantir sua qualidade: desgaseificação, remoção de álcalis, adição de refinador de grãos (que são cristais isolados na matéria em estado sólido) e filtragem, os quais serão descritos a seguir.

2.6.3.1 Desgaseificação e remoção de álcalis

Primeiro, o metal entra no filtro chamado A-622, como ilustrado na Figura 8, o qual é composto por um compartimento interno e um rotor acoplado, espaço em que são inseridos gás cloro e gás argônio.

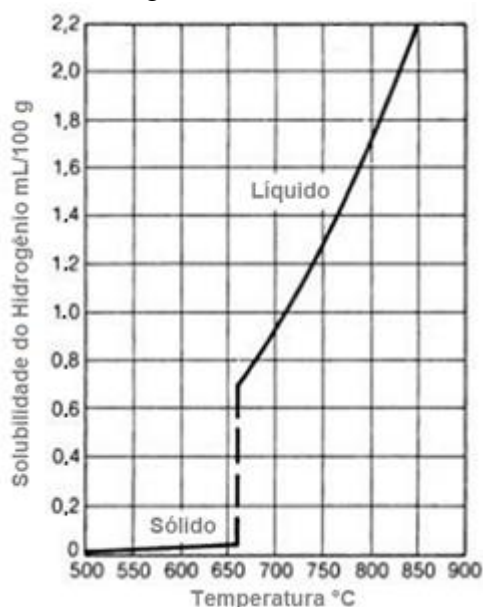
A função do gás cloro, que é inerte, é formar grande quantidade de pequenas bolhas, as quais, quando em contato com inclusões (que são compostos não metálicos dissolvidos no alumínio líquido e que resultam em mudanças indesejadas em suas propriedades), se aderem a elas, arrastando-as até a superfície. Os álcalis (sódio, lítio e cálcio) acompanham o metal e carregam impurezas que podem ser provenientes da sucata, inclusões exógenas, que incluem partículas refratárias e sílica, e partículas endógenas, que são óxidos, espinélios, carbetos, boretos e cloretos, colaborando assim na purificação do metal (ABAL, 2005).

Já o gás argônio tem como função remover o hidrogênio dissolvido no alumínio. As ligas de alumínio no estado líquido são muito suscetíveis à absorção de hidrogênio. No entanto, durante a solidificação, ocorre uma brusca redução dessa solubilidade, fazendo com que grande parte do hidrogênio seja segregado, formando pequenos poros ao longo de todo o tarugo, o que compromete a qualidade do produto (CALLISTER, 1997).

Para evitar esse problema, é necessário desgaseificar o metal através do borbulhamento do gás inerte argônio, o qual abaixa o teor de hidrogênio no metal líquido, arrastando as partículas sólidas de inclusões de óxidos. Neste processo, o gás é afetado pelo movimento rotativo do filtro, gerando um número elevado de bolhas (ABAL, 2006).

Pela Figura 10, é possível observar que a solubilidade do hidrogênio no alumínio aumenta com o incremento da temperatura, sendo o comportamento próximo ao exponencial quando o metal se encontra na fase líquida.

Figura 10 - Solubilidade do hidrogênio em alumínio a pressão atmosférica.



Fonte: Adaptado de Kalfaman e Roy (2004).

2.6.3.2 Adição de refinadores de grãos

Outro tratamento primordial na produção de tarugos de alumínio é a adição de refinadores de grãos, que visa obter uma microestrutura homogênea ao longo de todo o material, com grãos globulares, dúcteis e refinados, de forma que as propriedades mecânicas sejam melhoradas (SIGWORTH; KUHN, 2007).

Geralmente, dois tipos de refinadores são adicionados: o TiB_2 (diboreto de titânio) e o TiC (carboneto de titânio). Os elementos do tipo TiB_2 são bons nucleantes e possuem baixa solubilidade no alumínio líquido, além do fato de que o boro aumenta a resistência à fadiga e contribui com o acabamento superficial do tarugo. Já o carbono, apesar de ter efeito similar ao boro, não é tão estável quanto o TiB_2 , mas é importante na redução de trincas. De modo que a combinação dos dois elementos fornece um refino ideal da microestrutura (MCCARTNEY, 1989).

Os refinadores de grãos são adicionados na forma de vergalhões, que são injetados durante toda a passagem do metal líquido, até o término do vazamento, e seu mecanismo de refino envolve o aumento da nucleação do alumínio sólido, seguido da restrição de crescimento dos grãos (MCCARTNEY, 1989).

2.6.3.3 Filtragem

A filtragem é a última etapa antes do metal chegar até a mesa de moldes, sendo a última barreira para conter possíveis inclusões.

O filtro utilizado é o de cerâmica, CFF (*Ceramic Foam Filter*), o qual é confeccionado com impregnação de espuma de poliuretano reticulado com argamassa cerâmica mais aglutinante, seguida por queima da espuma orgânica e cozimento da cerâmica, para produzir uma ligação em alta temperatura. Seus poros podem ter tamanhos diversos, e a escolha depende da qualidade do material que está sendo refundido, que tem relação direta com o volume de inclusões (FRITZSCH, 2011).

O modelo tortuoso do filtro é para que o volume do filtrado diminua com o aumento da velocidade de fluxo, sendo que dentro do filtro há regiões mais turbulentas e regiões cujo fluxo é laminar, pois os poros variam de tamanho e quanto mais fino forem, melhor e mais adequada será a remoção de partículas finas (MARTINS; AUDREY; CUMMINGS, 1996).

2.6.3.4 Passagem pela mesa de moldes

A escolha de qual será o sistema de moldes usado considera requisitos de fluidez do metal, resistência à quebra da camada de solidificação (sangria) e minimização das tendências de encolhimento, que leva a características internas indesejáveis (KAUFMAN; ROOY, 2004).

O vazamento do alumínio líquido na forma de tarugos mais comum é através do resfriamento direto (DC, *Direct Chill*), o qual pode ser horizontal ou vertical. Nesse método, o alumínio se solidifica em contato com um molde refrigerado por água (ABAL, 2006). Estima-se que mais da metade da produção do alumínio acontece através do processo de resfriamento direto (ESKIN, 2008).

O vazamento cujo topo dos moldes é aberto e rodeado por um anel refratário é chamado de *hot-top*. Esse anel reduz as perdas de calor, proporcionando um acabamento superficial melhor nos tarugos e reduzindo a zona de segregação inversa (ESKIN, 2008).

Ao atingir a mesa de moldes, o alumínio vaza pelas cavidades presentes, as quais são constituídas de anel de grafite, anel de isolamento, borracha vedadora e cone d'água. Para a escolha desses materiais, deve-se atentar ao fato de que eles não podem reagir com o alumínio, não podem ser suscetíveis a corrosão, necessitam suportar elevadas temperaturas e lubrificação constantes (LAWRENCE, 1994).

O metal líquido, ao entrar em contato com o anel de grafite, passa pela sua primeira solidificação, contraindo-se. No entanto, a parte interior do tarugo ainda está líquida e fica recoberta pela casca solidificada. A parte líquida interna faz com que a casca do tarugo refunda, até que ocorra o contato com o fluxo de água, havendo a segunda solidificação. Durante o vazamento, todos os tarugos são resfriados pelo cone d'água, que possui temperatura média

de 17 °C, com uma vazão constante, sem oscilações de fluxo em todos os pontos da superfície do molde, reduzindo assim as perdas de calor e garantindo uniformidade e bom acabamento superficial (ESKIN, 2008).

Todos os moldes são conectados sobre uma mesa, a qual possui um pistão hidráulico na parte inferior, iniciando o processo de descida à medida que o metal escoava sobre o molde, forma-se então, verticalmente em poços abaixo da mesa, tarugos; um em cada dos trinta moldes disponíveis na mesa ilustrada na Figura 11.

Figura 11 - Mesa de moldes do modelo *hot-top* DC.



Fonte: Das autoras (2022).

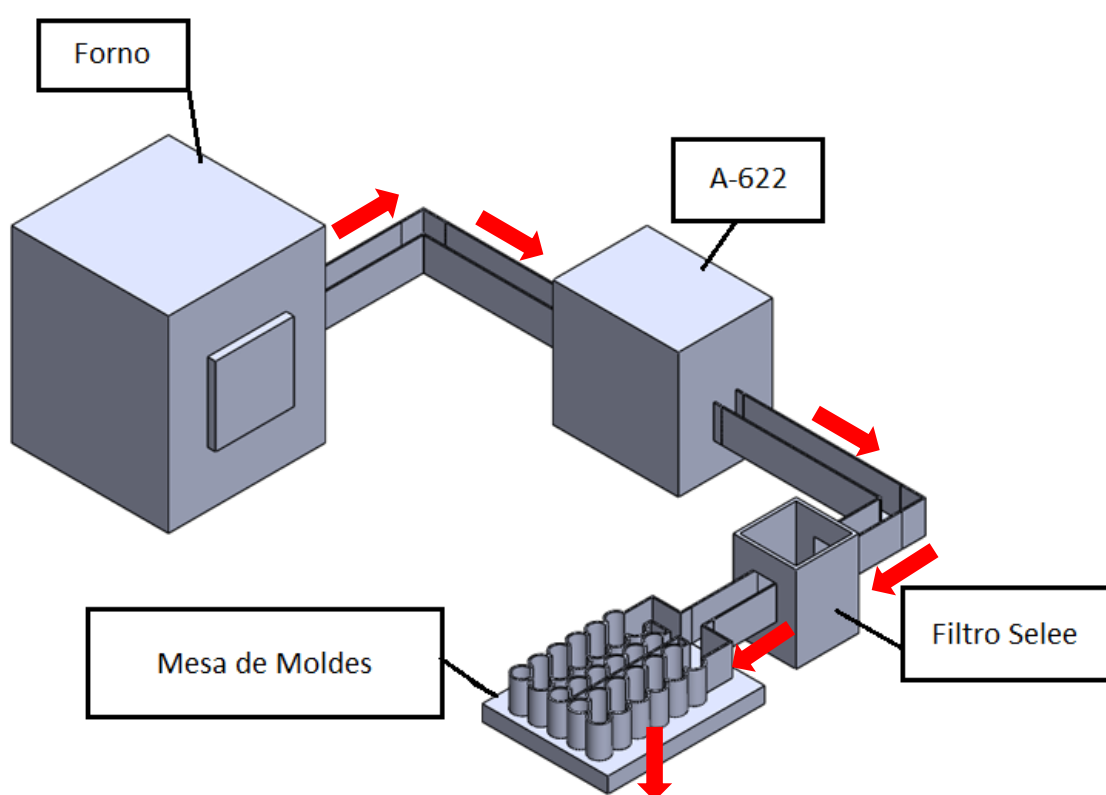
As variáveis de processo que afetam a troca térmica no interior dos moldes e a solidificação do tarugo são a temperatura do metal, a velocidade de vazamento e o fluxo de água usada na troca térmica.

Quanto maior for a temperatura do metal durante o vazamento, mais grosseira será a estrutura granular e maior será a porosidade do produto final. Além disso, se a temperatura do metal for muito alta, vai ocorrer sangria, pois não haverá tempo suficiente para o metal formar a casca do tarugo e então vazará metal líquido dentro do poço, prejudicando, muitas vezes, todos os tarugos da mesa de moldes, causando empenamento. Caso a temperatura esteja abaixo da ideal, tende a haver um congelamento, ou seja, os tarugos se solidificam prematuramente, antes mesmo de percorrer os moldes, comprometendo assim a calha, a mesa e os moldes (NADELLA et. al., 2008). Também é importante que a velocidade de vazamento

atenda a especificação, pois, quando superior, não há tempo hábil para que a solidificação ocorra e, se inferior, a solidificação será prematura e o tarugo não será formado. Já o fluxo de água precisa ser constante em todos os tarugos e em todo seu comprimento, pois é responsável pela solidificação do seu interior.

Na Figura 12, está representado o trajeto que o metal percorre, desde o forno de refundição até a mesa de moldes, passando pelos filtros A-622 e CFF (neste caso, do fabricante Selee), correspondendo às quatro etapas iniciais do fluxograma da Figura 7.

Figura 12 - Representação do trajeto do metal do forno até a mesa de moldes.



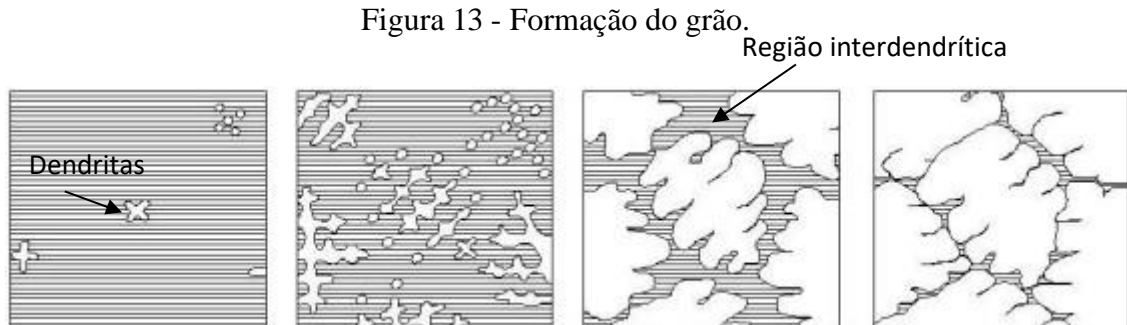
Fonte: Das autoras (2021).

2.6.3.5 Solidificação do metal

Como ilustrado na Figura 10, por volta de 660 °C, o alumínio começa a se solidificar ao formar uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e conforme o resfriamento vai acontecendo e o alumínio ultrapassa a barreira *liquidus*, os átomos de alumínio começam a formar pequenos cristais, chamados dendritas, os quais continuam crescendo até que se encontram umas com as outras e o grão então é formado, ultrapassando a barreira *solidus*.

No entanto, a solubilização dos elementos de liga e refinadores é maior no metal líquido do que no sólido, de forma que, conforme o resfriamento vai acontecendo, os solutos vão sendo

expulsos das dendritas e o material sólido fica rico em solutos intermetálicos nas regiões interdendríticas, como exemplificado na Figura 13 (PIPANO, 2016).



Fonte: PERRELA (2008).

A heterogeneidade química, que resulta da redistribuição de solutos durante a solidificação de uma liga metálica, é conhecida como segregação. Se a segregação é numa escala dos braços das dendritas ou de alguns poucos grãos, é chamada de microsegregação. Quando se discute macrosegregação, consideram-se escalas que variam de alguns milímetros a vários centímetros (CAMPOS FILHO; DAVIES, 1978).

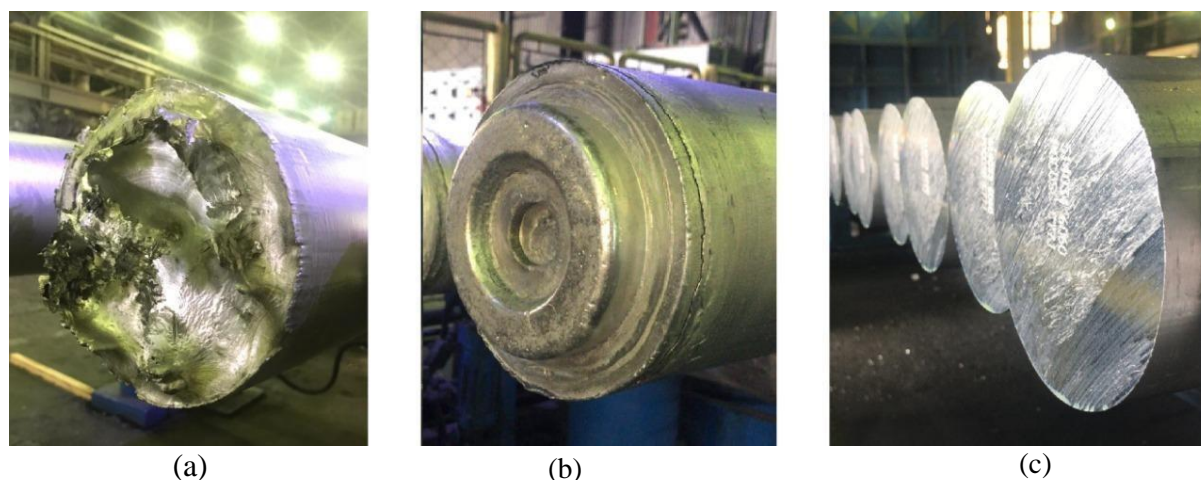
Dessa forma, os grãos formados possuem gradiente de composição química (o qual varia do centro para periferia), resultante da redistribuição de soluto durante a solidificação, e esse fenômeno é conhecido como microsegregação. Essa é uma característica do processo que deve ser controlada, já que tem relação direta com a eficiência na extrusão, acabamento superficial e propriedades mecânicas dos produtos finais (CAMPOS FILHO; DAVIES, 1978).

2.6.4 Serragem das extremidades

Após o vazamento e solidificação do metal na forma de tarugos na mesa de moldes, eles são levados para a serragem das extremidades.

O descarte das extremidades é justificado por questões de qualidade, acabamento e conformabilidade do produto; fatores esses que têm relação direta com a eficiência da extrusão (MORESCHI, 2019). Na Figura 14 é exemplificado o acabamento do tarugo após a serragem, destacando a cabeça na Figura 14 (a), o pé na Figura 14 (b) e o acabamento, após realizada a serragem, na Figura 14 (c).

Figura 14 - Serragem das extremidades do tarugo: (a) cabeça; (b) pé e (c) acabamento.



Fonte: Das autoras (2021).

O início da formação do tarugo (também chamado de pé) é a região composta pelo metal que escoou primeiro pela calha, a qual pode conter mais impurezas. Ademais, o pé, ilustrado na Figura 14 (b), é a região com maior concentração de tensões, o que aumenta a suscetibilidade a trincas internas. Já no final do vazamento, responsável por formar o que é chamado de cabeça do tarugo, ilustrada na Figura 14 (a), é comum que haja a necessidade de conduzir o metal restante nas calhas até o molde, sendo mais um ponto de entrada de inclusões. Além disso, tanto o início quanto o final do vazamento acontecem em condições de maior turbulência, aumentando ainda mais a ocorrência de inclusões (NADELLA et al., 2008).

Na teoria, existem divergências sobre o comprimento necessário a ser serrado dos pés e cabeças para garantir o descarte das inclusões, mas este deve variar entre uma e três vezes o diâmetro do tarugo, resultando no acabamento ilustrado na Figura 14 (c) (SPALLAROSSA, 2008).

As partes serradas são chamadas de sucata interna de processo, como ilustrado na Figura 8 (c), retornam posteriormente para o forno de refusão. Isso também acontece com a limalha, que é um conjunto de pequenas partículas de alumínio resultante do processo de fricção durante a serragem.

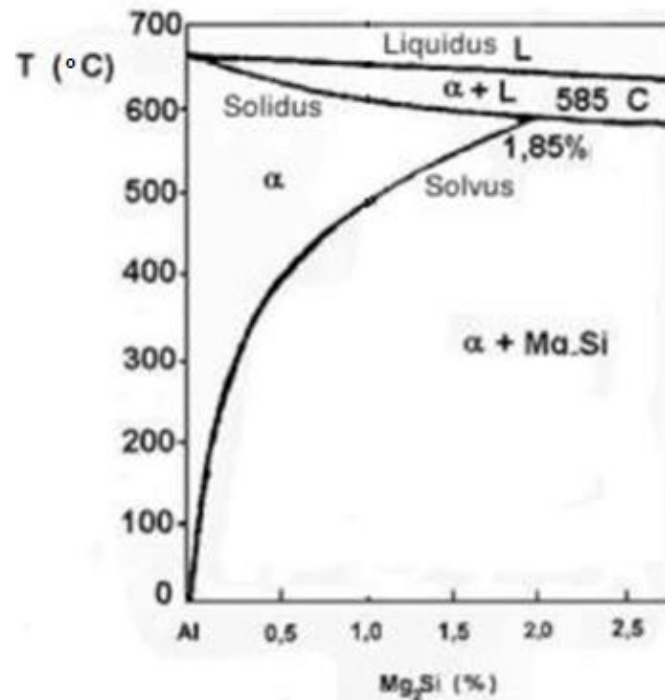
2.6.5 Tratamento térmico

O tratamento térmico mais comum para série 6XXX é o T4 (Quadro 2), que na primeira etapa consiste em aquecer o material a temperaturas da ordem de 500 °C, permitindo a dissolução dos elementos de liga na matriz de alumínio, de forma a obter uma solução sólida supersaturada. O processo de solubilização ocorre em uma temperatura elevada (próxima à

temperatura de fusão de 650 °C) por um certo período de tempo, promovendo processos de difusão no estado sólido. Este processo permite uma dissolução de fases solúveis, ou seja, ocorre uma movimentação da massa a nível atômico, dando lugar a uma difusão na matriz de alumínio (HUARACA, 2021).

O diagrama ternário AlSiMg pode ser simplificado pelo diagrama quase-binário Al-Mg₂Si, representado na Figura 15. Nesse diagrama, estão representadas as curvas de *solidus* e *liquidus*, bem como a curva *solvus*, que indica o limite de solubilidade do Mg₂Si no Al, sendo 1,85 % à temperatura eutética (590 °C). Ao diminuir a temperatura, as solubilidades do Mg e do Si diminuem ao longo da linha *solvus* (HUARACA, 2021).

Figura 15 - Diagrama de fases Al-Mg₂Si.



Fonte: Adaptado de Roy e Lindem (1990).

Ao aquecer a liga até uma temperatura elevada, situada entre as linhas *solvus* e *solidus*, durante um determinado período de tempo, os processos de difusão no estado sólido são promovidos, permitindo que os elementos de liga se apresentem dissolvidos na matriz de alumínio. Para que a difusão seja completa, é essencial que a liga permaneça tempo suficiente na gama de temperaturas definida (SOARES, 2009). Caso contrário, a dissolução dos elementos de liga pode não ser completa, prejudicando posteriormente a formação de precipitados endurecedores. Esta situação pode induzir uma precipitação inconsequente e indesejada, que não ocorrerá em toda a extensão do material e que comprometerá a

distribuição e tamanho dos precipitados, afetando de forma significativa a resistência mecânica final da liga (CAMPBELL,2008).

Após a solubilização, o metal está em uma situação instável, em que os elementos de liga tendem a sair da solução, formando precipitados. Estes, sendo finos e bem distribuídos, bloqueiam o movimento das discordâncias e endurecem o material. Portanto, uma vez alcançado o estado de solubilização total, é necessário manter os elementos de liga em solução sólida, à temperatura ambiente. Neste sentido, é realizada a têmpera, que consiste basicamente no arrefecimento rápido da liga solubilizada, sem interrupções, até à temperatura ambiente. Desta forma, são impedidos os processos de difusão e a solução sólida é conservada (SCHUITEK, 1997).

De acordo com a literatura, para a série 6XXX, as temperaturas de solubilização relatadas variam entre 530 e 560 °C, com um tempo de encharque (isto é, momento em que não há variação na temperatura) que pode variar entre 2 e 4 horas. Para que a etapa de têmpera seja bem sucedida, é necessária uma taxa de resfriamento de 200 °C/h na primeira hora, logo após a conclusão da etapa de solubilização (ASM, 1991; KAUFMAN,2000). Concluída a primeira hora de resfriamento, o fluxo dos ventiladores não é interrompido, pois a desmontagem da carga tratada envolve contato físico dos operadores com os tarugos, de forma que é necessário que esses sejam resfriados a temperaturas mais baixas para evitar acidentes e queimaduras. No entanto, em termos de qualidade interna do produto, o ciclo de resfriamento poderia ser interrompido após a primeira hora.

É imprescindível que os fatores que alteram o processo de endurecimento sejam levados em consideração, como velocidade de resfriamento, tempo de aquecimento e temperatura, porque a maior quantidade possível de solução é retida com um delta de distorção, devido ao choque térmico, permitindo um baixo nível de tensões internas residuais, o que ajuda o material a não ter trincas causadas por um resfriamento abrupto (HUARACA, 2021).

As ligas de alumínio são tratadas termicamente em fornos de câmara a ar ou banhos de sais fundidos. Qualquer que seja o meio de aquecimento empregado, uma avaliação é requerida para assegurar a efetividade do tratamento térmico e também para que não haja superaquecimento. Além disso, os componentes do forno que ficam significativamente mais quentes do que o material a ser tratado devem possuir proteção metálica, com espessura máxima de 6,35 mm, para prevenir efeitos adversos de radiação (KAUFMAN; ROOY, 2004).

Os fornos podem ser aquecidos a óleo, a gás ou a partir de resistências elétricas, sendo este último o mais comum. No processo avaliado, o forno é como representado na Figura 16 (a). Já a câmara, na qual o tarugo passa por resfriamento, está representada na Figura 16 (b).

Figura 16 - Equipamentos usados no tratamento térmico: (a) forno de solubilização à resistência elétrica e (b) câmara de resfriamento.



Fonte: Das autoras (2021).

Após o tratamento térmico de solubilização e têmpera, segue-se o passo final: o envelhecimento, que consiste em aquecer o material a temperaturas consideradas baixas e mantê-lo assim por um longo período de tempo. Quer seja natural ou artificial, o envelhecimento aumenta de forma significativa as propriedades mecânicas das ligas de alumínio. A maioria destas ligas sofrem um endurecimento natural após a têmpera, sendo a cinética de precipitação afetada pela temperatura ambiente (KAUFMAN; ROOY, 2004).

Geralmente, as ligas da série 6XXX passam pelo processo de envelhecimento apenas após a extrusão, de forma que o tratamento térmico do tarugo consiste na etapa de homogeneização e têmpera. Isso acontece em razão da busca pela maior eficiência de extrusão, já que é preferível que o tarugo ainda não se encontre na sua fase com maior dureza, para que a extrudabilidade seja mais fácil e exija menor esforço da matriz de extrusão. Dessa forma, após o processamento do tarugo, o produto já extrudado passa pela etapa de envelhecimento.

Além do forno e da câmara de resfriamento, dispostos como mostrado nas Figuras 17 (b) e 17 (c) outra estrutura que compõe essa etapa do processo é o estaleiro de espera, apresentado na Figura 17 (d). O estaleiro consiste em uma estrutura que tem como função acomodar a carga que aguarda o final do ciclo do forno para então iniciar seu tratamento. Geralmente, o estaleiro está localizado ao lado do forno ou da câmara, sendo uma base de ferro que possui a mesma altura do carro que movimenta as cargas, este último ilustrado na Figura 17 (a).

Figura 17 - Visão geral dos equipamentos envolvidos no tratamento térmico: (a) carro de locomoção de carga; (b) forno de homogeneização; (c) câmara de resfriamento e (d) estaleiro de espera.



Fonte: Das autoras (2022).

2.6.6 Embalagem e estocagem do material

Após finalizado o tratamento térmico dos tarugos, os mesmos são encaminhados para balança, sendo amarrados com fita de poliéster em feixes e estocados no pátio como apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Feixes estocados aguardando embarque.



Fonte: Das autoras (2022).

Após inspeção final de qualidade, os tarugos de alumínio da série 6XXX são liberados para embarque e destinados para o processo de extrusão, que é feito com prensas hidráulicas que empurram o material e geram produtos com variadas formas e diferentes complexidades geométricas, de acordo com a necessidade do mercado (GONÇALVES, 2003).

2.7 Aproveitamento energético

A integração de processos é uma família de metodologias que cobre um escopo amplo de tarefas, e visa combinar várias partes do processo, ou processos completos, para reduzir o consumo de recursos e/ou emissões nocivas para o ambiente (KLEMEŠ; KRAVANJA, 2013). Dentre essas metodologias, tem-se a integração energética como uma das ferramentas utilizadas.

Em meados do século XX, já se procurava uma abordagem que conseguisse otimizar o consumo energético das plantas industriais (LINNHOFF, 1989). Surgiu então o conceito de integração energética, a qual consiste no aproveitamento máximo das correntes já existentes no processo, fazendo com que o consumo de utilidades (água de resfriamento, vapor de aquecimento etc.) seja reduzido e, conseqüentemente, haja a redução dos gastos operacionais e emissões relacionadas a trocas térmicas.

Assim, uma possível solução para aproveitamento de energia em processos é a integração energética, a qual é uma ferramenta que tem várias definições, quase invariavelmente referindo-se às combinações térmicas de fluxos de processo, em estado estacionário ou operações em batelada, para obter recuperação de energia via troca de calor. Sendo assim, seu objetivo é examinar o potencial, para melhorar e otimizar a troca de calor entre fontes de aquecimento e resfriamento, a fim de reduzir a quantidade de utilidades, juntamente com os custos e emissões relacionados (KLEMEŠ; KRAVANJA, 2013).

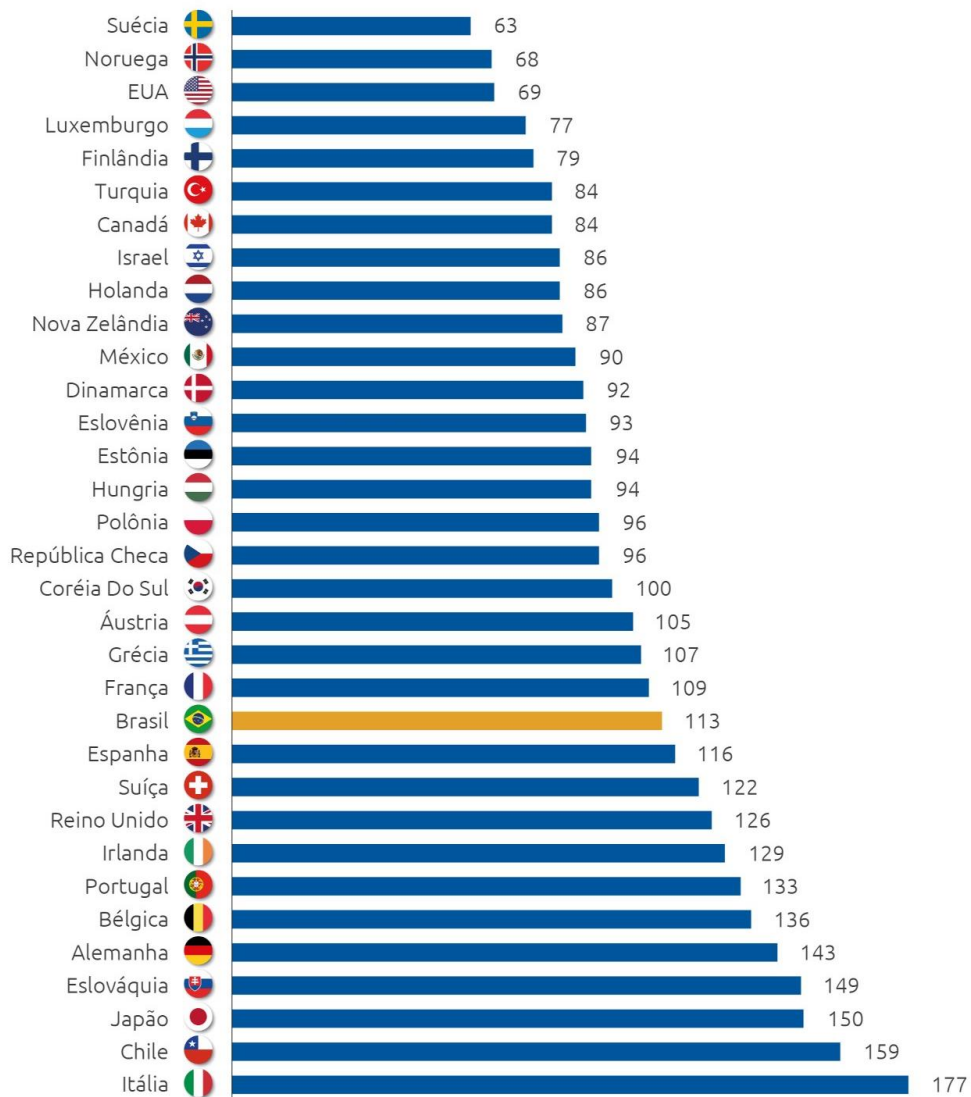
Dentre as ferramentas de integração energética, tem-se análise *Pinch*, que consiste em uma análise térmica baseadas na primeira e segunda leis da termodinâmica. A metodologia faz o uso de ferramentas gráficas e analíticas, para a escolha do ponto *Pinch*, auxiliando na síntese de uma rede de trocadores de calor, com máxima troca térmica (SOUZA NETO, 2005).

Entretanto, nem sempre é possível a execução de uma integração energética em processos fabris, uma vez que a metodologia conta com uma série de pré-requisitos. Outra solução comum é a otimização do processo, também em questão energética, e que se diferencia da integração energética em relação aos pré-requisitos, uma vez que a otimização não abrange apenas a combinação de fluxos térmicos de projeto. Ademais, frente a isso, um aproveitamento energético visa reduzir a quantidade de utilidades despendidas no processo impactando em

redução de custo e impactos ambientais e aumento da eficiência produtiva e competitividade econômica.

Cabe ressaltar que a energia elétrica industrial possui um valor diferente da energia elétrica residencial. Quando comparado o preço do MWh brasileiro frente a outros países, como pode ser visto na Figura 19, percebe-se que o valor brasileiro está acima de vários outros países, fazendo com que o mercado internacional seja competitivamente mais atrativo, uma vez que o produto final possui insumos mais baratos. Sendo assim, são necessários esforços para reduzir custos energéticos e tornar o mercado nacional mais competitivo.

Figura 19 - Comparação do preço da tarifa energética industrial em US\$/MWh de diferentes países.



Fonte: Agência de Notícias da Indústria (2021).

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento do trabalho consistiu na identificação de gargalos no processo de produção dos tarugos de alumínio 6XXX, conforme fluxograma da Figura 7, mais especificamente em relação aos fluxos de energia, uma vez que foi observado seus impactos nos custos do processo e na competitividade do setor, já que o custo com essa utilidade no Brasil é relativamente mais alto que no mercado estrangeiro do alumínio, conforme exposto na Figura 19. Em termos de energia elétrica, a etapa de tratamento térmico foi identificada como a com maior demanda energética, dado que os fornos operam com gás natural e as outras etapas que utilizam energia elétrica, como aquecimento de cadinhos, estufa para aquecimento de lingotes, possuem consumo desprezível frente a demanda do tratamento térmico.

Atualmente, os tarugos, os quais estão a temperatura ambiente, ficam no estaleiro, Figura 17 (d), aguardando sua entrada no forno, ilustrado na Figura 17 (b), e posteriormente vão para a câmara de resfriamento, como mostrada na Figura 17 (c), seguindo para a estocagem ao final. A câmara utiliza ar atmosférico como corrente de processo para resfriar os tarugos, que saem do forno a cerca de 560 °C, descartando uma corrente de ar quente na atmosfera.

Identificado o problema, partiu-se para a avaliação de possíveis soluções, sendo propostas três metodologias de aproveitamento energético: análise *Pinch*, inclusão de uma corrente de reciclo de ar quente para o forno de homogeneização e inclusão de uma corrente de reciclo de ar quente para o estaleiro. Desejou-se, então, reduzir a quantidade de energia elétrica utilizada no processo a partir de alteração no *layout* dos equipamentos e reaproveitamento de energia, aprimorando as disposições das correntes de processo.

Dados foram extraídos do sistema supervisor, banco de dados que tem como finalidade armazenar dados relevantes do processo produtivo, da empresa que conta com a problemática descrita, para que, a partir de cálculos, fosse possível encontrar uma solução para economia de energia elétrica por ciclo, além de quantificar o investimento necessário para readequação do *layout* dos equipamentos.

Posteriormente, foi calculada a viabilidade técnica-econômica da melhoria proposta, analisando as dificuldades de implementação, levando em conta o cenário atual da área produtiva e calculando qual o investimento necessário em matéria-prima e mão de obra para readequação da estrutura. Com isso, foi possível analisar o tempo de retorno do investimento, para então concluir se é a melhoria proposta de fato é viável.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira proposta pensada foi a utilização da análise *Pinch*. Porém, essa abordagem requer pré-requisitos do processo para que seja passível a sua aplicação. Esses pré-requisitos são: um conjunto de correntes frias, outro de correntes quentes, além de utilidades disponíveis. O método *Pinch* tem como objetivo encontrar o melhor pareamento entre as correntes de processo visando reduzir as utilidades gastas, no entanto, como o processo abordado conta com apenas duas correntes um único pareamento é possível, não sendo praticável a aplicação dele.

Entretanto, mesmo a análise *Pinch* não sendo possível, ainda assim pôde-se propor melhorias que buscavam a otimização energética do processo. Pensou-se em uma proposta que contava com a construção de uma estrutura de reciclo da corrente de saída da câmara de resfriamento, Figura 17 (c), para a entrada no forno, Figura 17 (b), fazendo com que o ar aquecido na câmara fosse reaproveitado para no aquecimento no forno. Conseqüentemente, a quantidade de energia elétrica cedida pelas resistências do forno seriam reduzidas, uma vez que o ar utilizado no processo entraria mais quente do que o ar a temperatura ambiente, como ocorre no cenário atual. Porém, há inviabilidade dessa proposta, dado que a operação atual conta com operações em batelada, sem utilizar fluxo de ar no interior do forno de homogeneização, o que leva a um aproveitamento de calor, e o fluxo de operação proposto precisaria ser contínuo.

No cenário atual, o processo em batelada permite que uma quantidade fixa de ar entre no forno a temperatura ambiente e seja aquecida até a temperatura de encharque, trocando calor com às resistências e com os tarugos. Ou seja, após o alcance da temperatura de encharque, o ar e os tarugos ficam em equilíbrio térmico, de forma que as resistências praticamente não são acionadas. Com isso, há economia de energia, comparando com uma operação em fluxo contínuo, a qual demandaria que as resistências operassem durante todo o tratamento térmico, dada a circulação de ar e troca de calor dele com o ambiente.

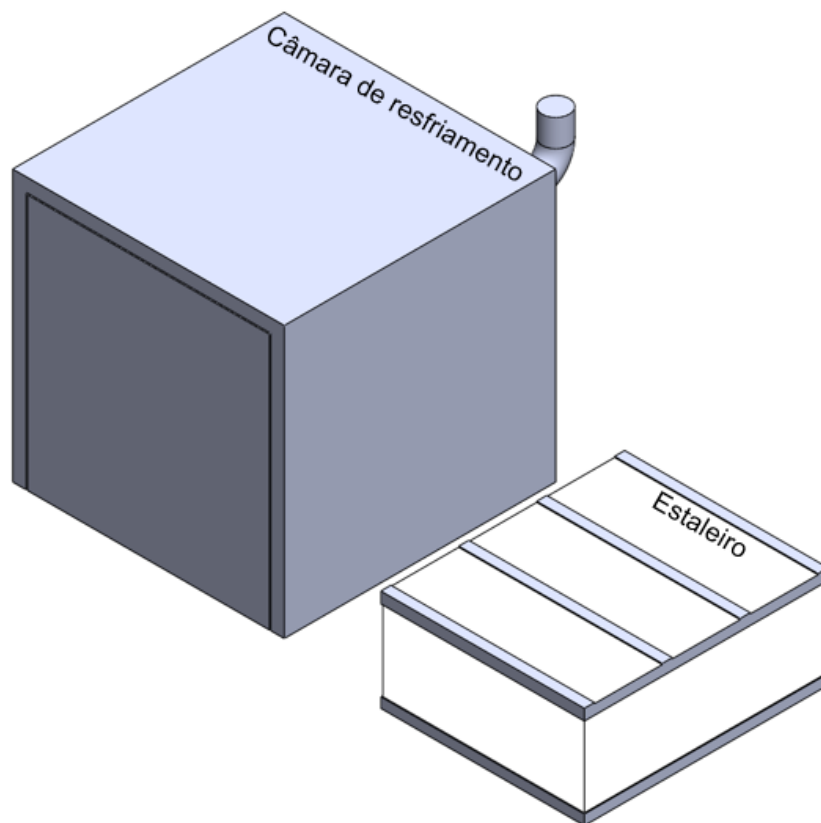
Pensou-se, então, em outra forma de aproveitar o calor que é desperdiçado na etapa de resfriamento. Ao invés de utilizar a energia para o aquecimento do ar de entrada do forno, propõe-se o desvio dessa corrente de processo para o pré-aquecimento da carga, que aguarda o tratamento térmico no estaleiro ilustrado na Figura 17 (d). Dessa forma, a oportunidade de otimização identificada foi o aproveitamento da energia retirada durante o arrefecimento da carga, após a saída do forno de homogeneização, no pré-aquecimento dos tarugos que estão aguardando para iniciar o tratamento térmico.

Para esse aproveitamento energético, sugere-se a construção de uma estrutura ao redor do estaleiro a fim de vedar o equipamento e permitir o desvio da corrente de ar de saída da

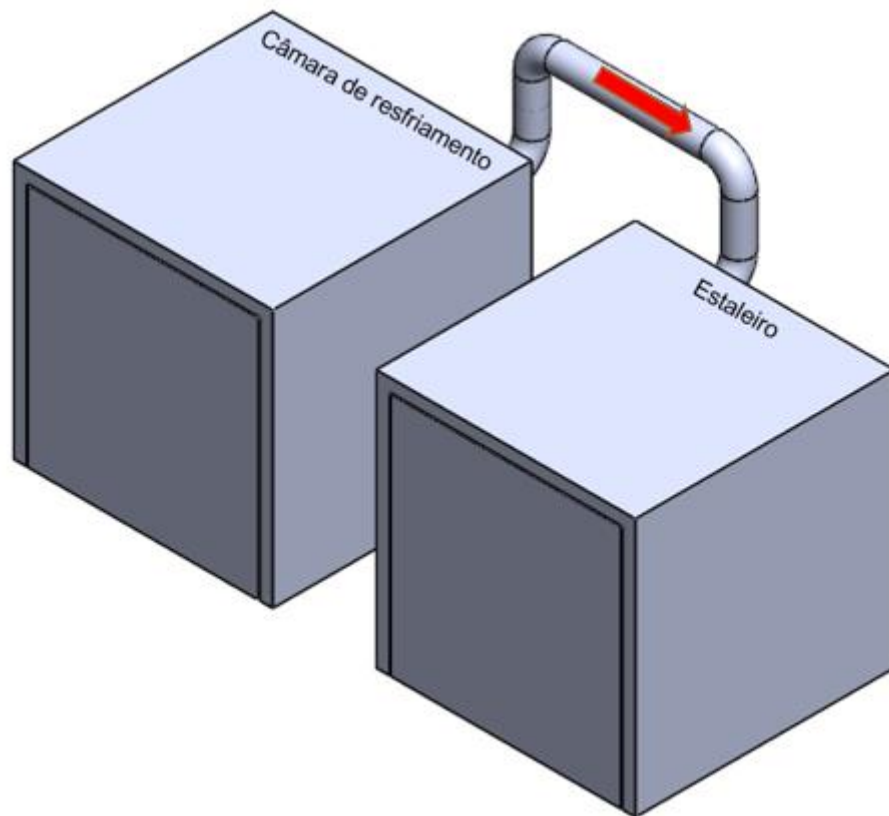
câmara. A utilização do ar quente da saída da câmara de resfriamento na primeira hora, período que precisa contar com uma taxa de resfriamento mínima de 200 °C/h, fará com que a temperatura dos tarugos que aguardam no estaleiro aumente e que, conseqüentemente, eles entrem mais quentes no forno de homogeneização e, por isso, precisem de menos tempo de aquecimento.

Essa melhoria envolveria apenas readequação da estrutura do estaleiro e redirecionamento da corrente de ar que sai da câmara de resfriamento, como ilustrado na Figura 20 (b), mas não impactaria na mudança de regime de funcionamento do forno. A seguir, tem-se uma ilustração para comparação entre a condição atual de funcionamento, Figura 20 (a), e a proposta de aproveitamento, representada na Figura 20 (b).

Figura 20 – Ilustração dos cenários (a) atual e (b) proposto.



(a)



(b)

Fonte: Das autoras (2022).

Considerando que a temperatura é espacialmente uniforme nos cilindros, que é o formato dos tarugos de alumínio resultantes do processo, pode-se utilizar a Equação 2, que é a equação fundamental da calorimetria, a qual define a quantidade de calor absorvida ou liberada por um corpo após variar sua temperatura, para quantificar a quantidade de calor disponível na primeira hora de resfriamento na câmara. Além disso, foi feita a consideração de que o calor armazenado em ambas as estruturas da Figura 20 (b) é o mesmo.

$$Q=m.c_p.\Delta T \quad (2)$$

Na Equação 2, Q é a quantidade de calor, m a massa de alumínio dentro do estaleiro, c_p o calor específico do alumínio e ΔT a variação de temperatura no estaleiro.

Durante o arrefecimento dos tarugos na câmara de resfriamento, a primeira hora é o período que apresenta a maior taxa de resfriamento, sendo a temperatura reduzida de 560 °C para 360 °C, conforme explicado anteriormente. Sendo assim, apenas a primeira hora de resfriamento será aproveitada no pré-aquecimento dos tarugos que aguardam no estaleiro o início da etapa de aquecimento. Para controlar esse processo, será instalada uma válvula com

fechamento automático na tubulação utilizada para transferir o ar quente da câmara para o estaleiro. Seu comportamento estará vinculado ao início do resfriamento da carga, dado a partir de informações do sistema supervisório de controle de processo utilizado pela empresa.

O volume médio por carga tratada é de 50 toneladas e, de acordo com Callister (2006), o calor específico da liga de alumínio 6063 é 899 J/(kg °C), valor esse que foi utilizado como referência para cálculo da quantidade de calor, como mostra a Equação 3.

$$Q = 50.000 \text{ Kg} \cdot 899 \text{ J}/(\text{Kg } ^\circ\text{C}) \cdot (560 - 360 \text{ } ^\circ\text{C}) = 8990 \text{ MJ} \quad (3)$$

Considerando que há perda de cerca de 30 % dessa quantidade de calor para a tubulação, paredes e portas do estaleiro a ser construído, como fator de ajuste de projeto, a quantidade de calor final disponível é de 6293 MJ.

Sabendo a quantidade de calor disponível, calculou-se, como mostra a Equação 4, a temperatura que o tarugo no estaleiro consegue atingir, T_f , uma vez que ele entra a cerca de 25 °C, que é a temperatura ambiente.

$$6293 \cdot 10^6 \text{ J} = 50000 \text{ Kg} \cdot 899 \text{ J}/(\text{Kg } ^\circ\text{C}) \cdot (T_f - 25) \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow T_f = 165 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

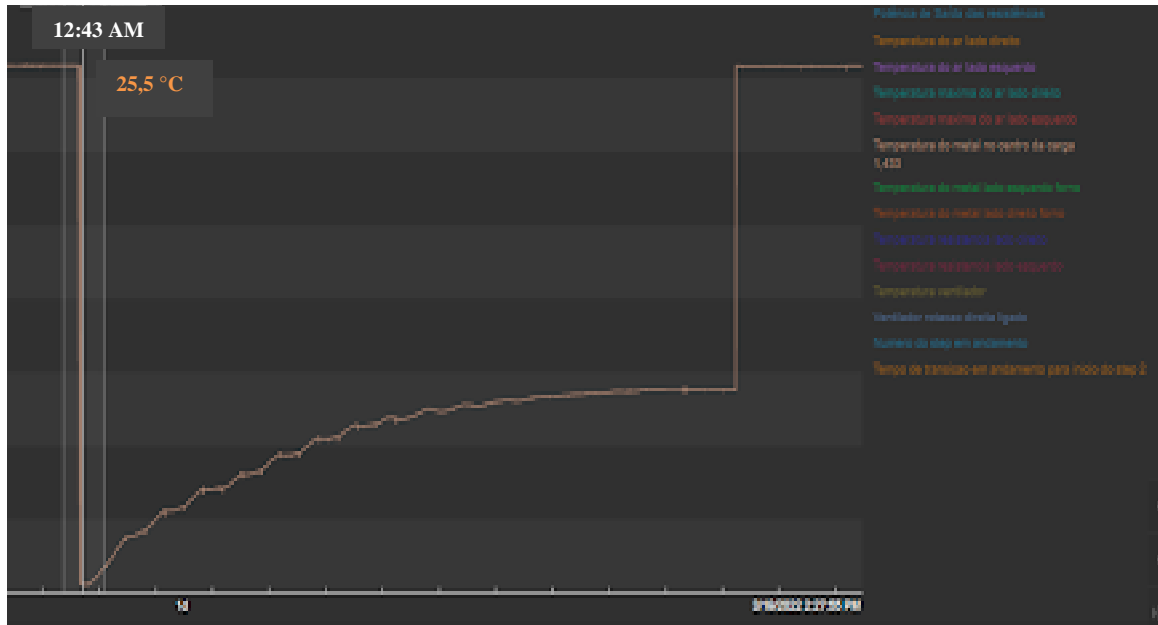
Com base em dados reais levantados no processo abordado, durante a transição de carga do forno até a câmara de resfriamento a carga perde em média 1,32 % de sua temperatura, pela troca térmica com o ar ambiente.

Dessa forma, considerando que a carga contida no estaleiro tenha comportamento análogo, sua temperatura após a movimentação até o forno reduzirá cerca de 2 °C. Além da consideração de que não haverá perda de calor dos tarugos no ambiente interior ao estaleiro, isso é, o estaleiro será vedado com material refratário de forma a se comportar como um ambiente isolado ideal.

Portanto, o tarugo que antes entrava no forno de homogeneização a 25 °C passaria a entrar a 163 °C, representando uma redução no tempo de aquecimento e, conseqüentemente, na energia necessária para que o tratamento térmico seja completado. No cenário atual, em que o tarugo entra no forno a aproximadamente 25 °C, é necessária uma hora de aquecimento para que o tarugo alcance a temperatura equivalente a sua temperatura de entrada no forno de aquecimento no cenário otimizado, que é prevista como igual a 163 °C. Isso pode ser observado pelas temperaturas do centro da carga reportadas pelo supervisório, tanto no início do

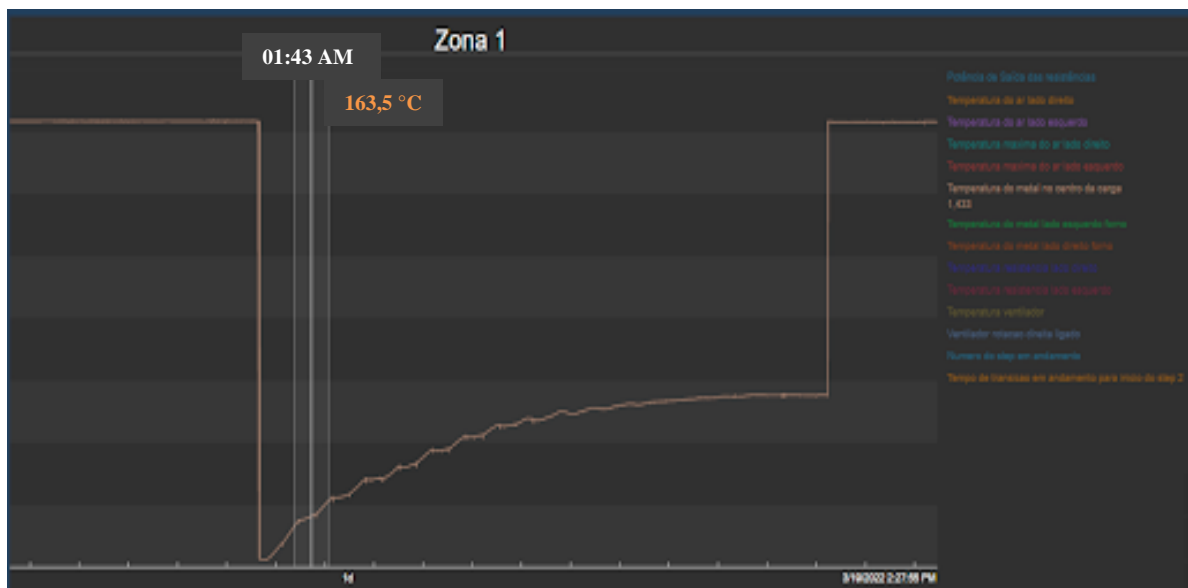
tratamento térmico pelo cenário atual (Figura 21) quanto após uma hora de aquecimento no forno (Figura 22). De modo que essa seria a economia oferecida no tempo de aquecimento e que representaria redução do consumo de energia elétrica, ao implementar a melhoria proposta.

Figura 21 - Centro da carga a 25,3 °C no início do tratamento térmico.



Fonte: Adaptado de ALCOA (2022).

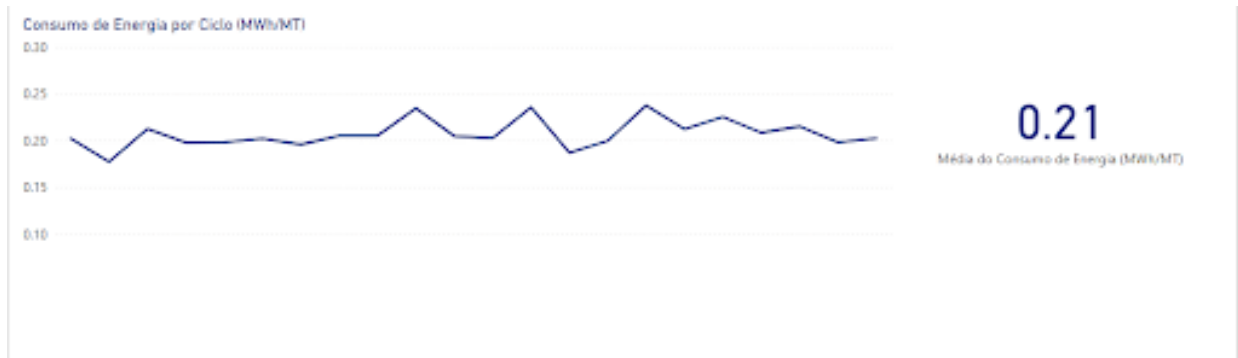
Figura 22 - Centro da carga a 163,5 °C cerca de 1 h após início do tratamento térmico.



Fonte: Adaptado de ALCOA (2022).

De acordo com dados reais do processo, apresentado na Figura 23, o consumo médio de energia elétrica foi de 0,21 MWh/T para produção de ligas no mês de março de 2022.

Figura 23 - Consumo médio de energia elétrica para tratamento térmico por tonelada de carga de liga no mês de março de 2022.

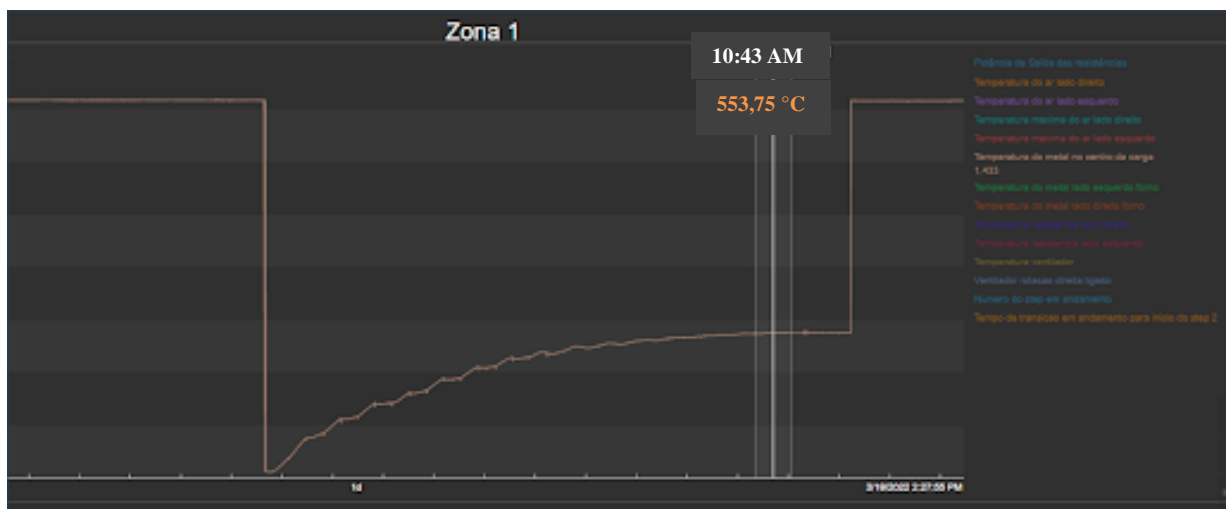


Fonte: Adaptado de ALCOA (2022).

É importante ressaltar que a energia necessária no tratamento térmico, como o dado apresentado na Figura 23, se refere quase que completamente a rampa de aquecimento, já que uma vez alcançada a temperatura de encharque, o ar no interior do forno se encontra em equilíbrio térmico com o tarugo, de forma que nesse momento a utilização das resistências pode ser desprezada em comparação ao consumo durante a fase de aquecimento, pois essas quase não são acionadas.

Portanto, sabendo que o tempo total de aquecimento até a temperatura de encharque - que varia entre 550 e 560 °C - é de 10 horas, conforme Figura 24, e ainda adotando a consideração de que toda esse consumo de energia se concentra na etapa de aquecimento, é possível calcular qual será a economia em energia elétrica oferecida.

Figura 24 - Início da etapa de encharque, completando cerca de 10 h de rampa para elevar a temperatura do centro da carga de 25 °C a cerca de 554 °C.



Fonte: Adaptado de ALCOA (2022).

Portanto, uma carga que antes gastaria 10 horas de aquecimento, com a melhoria proposta passará a necessitar de 9 horas de aquecimento. Isso significa, em termos de energia elétrica, simbolizada por E, uma economia de 10,5 MW por ciclo, como mostra a Equação 5.

$$E = 0,21 \text{ MWh/T} \cdot 50 \text{ T} \cdot (10 - 9) \text{ h} \rightarrow E = 10,5 \text{ MWh/ciclo} \quad (5)$$

Levando em conta que o preço médio do MWh no Brasil em 2021, como apresentado na Figura 19, foi de 113 dólares e adotando a conversão de 5,00 R\$/US\$ (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2022). Assim, a economia estimada em reais, por ciclo, seria de R\$ 5932,50.

Dessa forma, sabendo qual o ganho relativo da proposta, é preciso calcular qual seria o investimento necessário para readequação do *layout*, para então concluir se o projeto é viável ou não financeiramente.

No entanto, além da redução de gasto, é importante ressaltar que a proposta de melhoria também viabiliza aumento de produtividade, já que reduz o tempo necessário de aquecimento em uma hora, conforme demonstrado acima.

A principal alteração no *layout* que seria necessária é a vedação do estaleiro, que hoje conta apenas com uma base, como ilustrado na Figura 17 (d). Na Figura 25, é demonstrada a dimensão atual da câmara de resfriamento, a qual é utilizada como referência, levando à sugestão de que a vedação do estaleiro siga os mesmos parâmetros.

Figura 25 - Dimensões da câmara de resfriamento.



Fonte: Das autoras (2022).

Como mostra a Figura 25, a câmara de resfriamento é retangular e possui 3,6 m de comprimento, 4 m de altura e 6 m de profundidade. Logo, serão necessárias duas placas de 24 m² para vedação das laterais do estaleiro, outra de 21,6 m² para vedação da parte superior da estrutura, que passará a ser denominada estufa, e duas placas de 14,4 m² para vedação do fundo e confecção da porta frontal, totalizando 98,4 m² de estrutura.

Visando redução na dissipação de calor, toda a estrutura de vedação do estaleiro consistirá numa carcaça metálica revestida com material refratário, como ilustrado na Figura 26. Como nessa etapa do processo a temperatura não ultrapassa 600 °C, uma carcaça metálica de aço atenderá às condições do tratamento e serão usados dois materiais para compor o revestimento: manta cerâmica combinada com tijolos refratários.

Figura 26 - Exemplo de estufa revestida com tijolo e manta cerâmica refratária.



Fonte: Amplitherm (2022).

O material mais comum, devido ao seu custo-benefício, empregado nessas situações é o aço ASTM A36, que possui ponto de fusão em torno de 1500 °C e apresenta boa resistência mecânica, aumentando seu tempo de vida útil nesta aplicação para a qual está sendo proposto.

Além da vedação do estaleiro, confeccionando a estufa, será necessário alterar a tubulação que sai da câmara. Atualmente, a tubulação é direcionada para a atmosfera, como mostra a Figura 20 (a), sendo o ar do resfriamento eliminado para atmosfera. De acordo com a disposição atual dos equipamentos, será necessária uma tubulação de 1 m para direcionar essa corrente de ar para o estaleiro, como representado na Figura 20 (b).

Para readequação da tubulação de saída de ar da câmara de resfriamento, a qual será revestida apenas com manta cerâmica refratária, será mantido o diâmetro atual de 25 cm, simbolizado por d . Sendo assim, a área superficial necessária (A) para tubulação com 1 m de comprimento (h) será como calculada na Equação 6.

$$A = \pi \cdot d \cdot h \rightarrow A = 1,58 \text{ m}^2 \quad (6)$$

De acordo com SC Aços, a placa de aço ASTM A36 com 10 mm de espessura possui aproximadamente 80 kg/m² e o preço da tonelada desse material é de 500 dólares (SC AÇOS, 2022). Dessa forma, seriam necessários 7,88 T para construção da carcaça da estufa e mais 0,13 T para a tubulação, totalizando em 8,00 T, o que implicaria em um custo de US\$ 4000 com matéria-prima para estrutura metálica e tubulação. Considerando uma cotação de R\$ 5/US\$, o custo final seria de aproximadamente R\$ 20.000.

Já para o revestimento da estrutura metálica do estaleiro, o tijolo refratário utilizado em fornos industriais, que suporta temperaturas de até 1250 °C, custa em média R\$ 13,00 e tem dimensões de 23 x 11,4 cm com 5 cm de espessura (LEROY MERLIN, 2022). Logo, 0,26 m² de revestimento de tijolo refratário tem um custo de R\$ 130,00. Considerando que será necessário revestir 98,4 m², o custo total com o revestimento de tijolos será de R\$ 49.200,00.

A manta de fibra cerâmica, que tem dimensões de 2000 x 610 mm e espessura de 13 mm, suporta temperaturas de até 1260 °C e custa cerca de R\$ 79,00 (TERMOFRAX, 2022). Considerando a necessidade de revestir 98,4 m² de estrutura metálica, mais 1,58 m² de tubulação, o custo total com essa matéria-prima será de R\$ 6474,00.

Logo, o investimento total despendido com matéria-prima para adequação do *layout* do estaleiro, mudando a estrutura representada na Figura 20 (a) para como ilustrado na Figura 20 (b), será de R\$ 75674,00 conforme compilado na Tabela 1.

Tabela 1 – Orçamento final da proposta, contemplando matéria-prima e mão de obra.

Investimento	Custo
Carcaça metálica (Aço ASTM A36)	R\$ 20.000,00
Revestimento de tijolos	R\$ 49.200,00
Revestimento de manta refratária	R\$ 6.474,00
Custo com matéria-prima	R\$ 75.674,00
Mão de obra (30%)	R\$ 22.702,20
Total	R\$ 98.376,20

Fonte: Das autoras (2022).

Com base em projetos de construção de fornos similares, como o proposto por Machado (2011), adotou-se como estimativa que o custo com mão de obra varia entre 25-30 % do custo da matéria-prima. Portanto, foi considerado um custo de R\$ 22.702,20 com mão de obra, totalizando em um investimento de R\$ 98.376,20 com o projeto, conforme apresentado na Tabela 1.

Portanto, sabendo o investimento total necessário (Tabela 1) para implementação da melhoria e o ganho relativo, é possível calcular a viabilidade de implementação do projeto, bem como o tempo de retorno, denominado tempo de *payback*.

Como demonstrado, considerando a economia de R\$ 5932,50 para cada ciclo de tratamento térmico, serão necessários 17 ciclos para que o investimento seja recuperado. Com a redução das horas totais de tratamento de 10 h para 9 h, será possível tratar 2,67 cargas por dia, de forma que serão necessários 7 dias para recuperação do valor investido na readequação da estrutura proposta.

O valor necessário de investimento para readequação dos equipamentos, como apresentado na Tabela 1, pode ser considerado baixo para uma indústria de grande porte e, concomitantemente, por apresentar tempo de *payback* muito reduzido, considera-se que o projeto é extremamente viável economicamente e pode ser implementado de forma imediata.

No entanto, a fim de se propor uma análise mais conservadora e menos otimista do projeto, os cálculos da economia com energia elétrica foram refeitos considerando uma perda de 50 % do calor retirado na saída da câmara de resfriamento, e não mais 30 % como foi sugerido anteriormente.

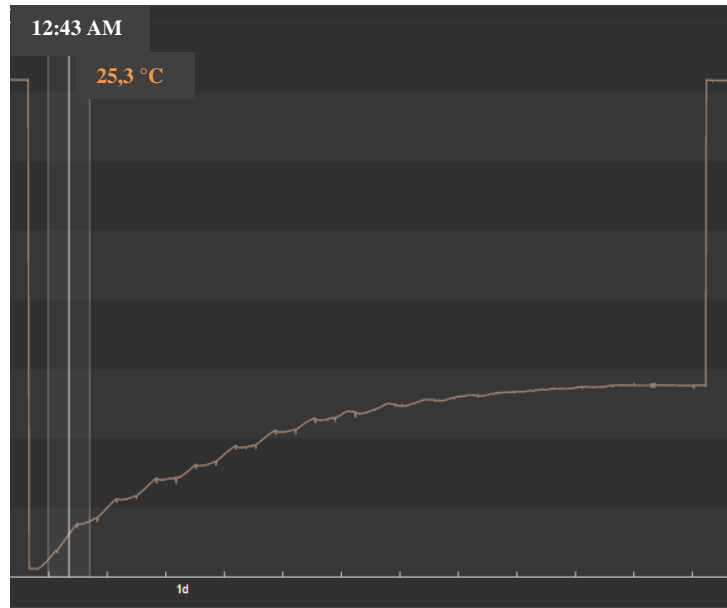
Retomando ao valor obtido na Equação 3 e considerando 50 % de perdas, agora a energia disponível para o pré-aquecimento da carga que aguarda no estaleiro seria de 4495 MJ. Dessa forma, a temperatura máxima que os tarugos atingirão na etapa de pré-aquecimento no estaleiro (T_f) será de 125 °C, como mostra a Equação 7.

$$4495 \cdot 10^6 \text{ J} = 50000 \text{ Kg} \cdot 899 \text{ J}/(\text{Kg } ^\circ\text{C}) \cdot (T_f - 25) ^\circ\text{C} \rightarrow T_f = 125 ^\circ\text{C} \quad (7)$$

Adotando a mesma perda de 1,32 % da temperatura durante a transição da carga do estaleiro até o forno de homogeneização, a nova temperatura de entrada do tarugo no forno será de 123 °C.

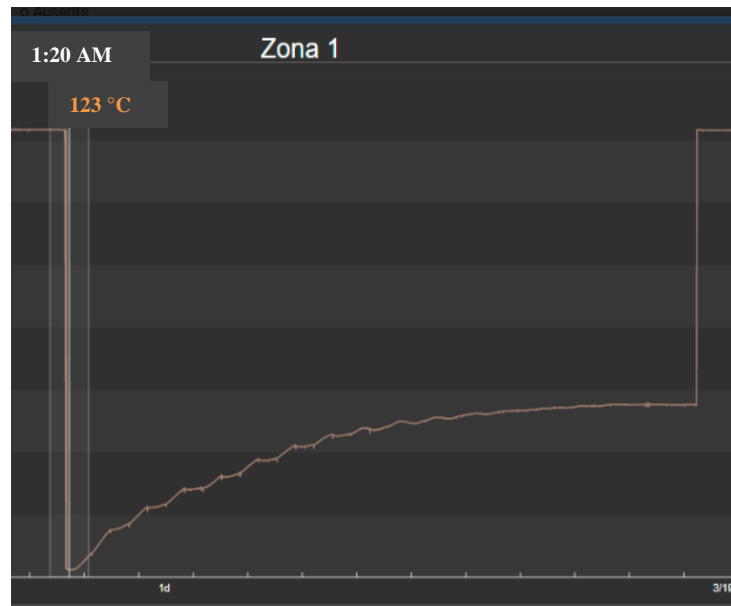
Com os dados do supervisório do processo, fornecidos pela empresa, é possível observar que o tempo de aquecimento necessário para elevar a temperatura do tarugo de 25 °C para 123 °C, temperaturas essas que estão representadas nas Figuras 27 e 28, respectivamente, é de aproximadamente 37 minutos.

Figura 27 - Centro da carga a 25,3 °C no início do tratamento térmico.



Fonte: Adaptado de ALCOA (2022).

Figura 28 - Centro da carga a 123 °C após 37 minutos de tratamento térmico.



Fonte: Adaptado de ALCOA (2022).

Portanto, uma carga que antes gastaria 10 horas de aquecimento, com a melhoria proposta e as perdas estimadas, passará a necessitar de 9,38 horas de aquecimento. Isso significa, em termos de energia elétrica (E), uma economia de 6,51 MWh por ciclo, conforme cálculo da Equação 8.

$$E = 0,21 \text{ MWh/T} \cdot 50 \text{ T} \cdot (10 - 9,38) \text{ h} \rightarrow E = 6,51 \text{ MWh/ciclo} \quad (8)$$

Adotando o mesmo preço de 113 dólares para o MWh industrial brasileiro e considerando o fator de conversão de 5,00 R\$ / US\$, a economia nesse segundo cenário seria de R\$ 3678,15 por ciclo de tratamento. E, nessas condições, o tempo de *payback* do projeto seria de 12 dias.

Isto posto, ainda que adotando condições conservadoras para o projeto, é possível constatar que se trata de uma melhoria que traz ganhos bastante consideráveis para a empresa e que possui investimento relativo baixo.

Como a melhoria exige apenas uma readequação da estrutura já existente do estaleiro, o projeto também tem vantagens em questão de tempo de execução.

Além disso, sugere-se que como solução provisória, até como teste inicial da melhoria proposta, que o fluxo de saída da câmara de ar seja direcionado para a atual estrutura do estaleiro. Ou seja, que ele seja direcionado para baixo, e não para cima como ilustrado na Figura 20 (a), fazendo com que o ar quente da saída da câmara de refrigeração circule entre a carga que aguarda tratamento no estaleiro. Feito isso, os resultados podem ser acompanhados pelo sistema supervisor do processo durante pelo menos um mês, para observação dos impactos e quantificação da economia de energia gerada. Assim, essa medida servirá inclusive como pré-avaliação da implementação final.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O custo da energia elétrica industrial no Brasil é um fator impactante na competitividade do mercado interno em relação ao mercado externo do alumínio, fato que é comprovado pelo saldo negativo da balança comercial do alumínio e seus produtos. Sendo assim, faz-se necessário que as empresas brasileiras que processam esse metal pensem em alternativas para reduzir a demanda dessa utilidade, visando diminuição no custo de seus produtos.

A fim de eliminar ou reduzir gastos desnecessários, é importante que todas as etapas do processo produtivo de fabricação de tarugos de alumínio sejam bem controladas, consequentemente garantindo que o produto ofereça critérios mínimos de qualidade e competitividade.

Nesse cenário, este trabalho buscou estudar todas as etapas de produção e, de forma mais minuciosa, aquela em que foi identificada maior demanda por energia elétrica. A proposta de melhoria, em sua elaboração, consistiu no estudo das correntes quentes e frias e dos equipamentos envolvidos no tratamento térmico dos tarugos de alumínio, sendo aprimorada conforme o processo era estudado mais a fundo e os desafios envolvidos na solução de um problema real da indústria iam surgindo. Primeiro, sugeriu-se a integração energética das correntes através do método *Pinch*, mas a ideia foi invalidada quando se constatou que tal metodologia exigia um número mínimo de três correntes de processo, se mostrando inviável para esta aplicação. Posteriormente, foi apontada a possibilidade de aproveitamento da energia retirada na etapa de resfriamento do tratamento térmico para aquecimento da corrente de entrada do forno de homogeneização, mas tal melhoria decorreria na necessidade de mudança de regime de operação do forno, o que acabaria implicando em um acréscimo da demanda de energia elétrica, estando, portanto, em desacordo com o objetivo do trabalho.

Finalmente, a sugestão foi o reaproveitamento da corrente de saída da câmara de resfriamento para pré-aquecimento dos tarugos que aguardam o tratamento térmico no estaleiro, visando a redução no tempo total de aquecimento e, consequentemente, a redução na demanda de energia elétrica.

Foram feitas duas análises, uma mais otimista e uma mais conservadora, e ambos os resultados se mostraram satisfatórios. Os dois cenários apresentaram um curto tempo de retorno do investimento necessário para implementação: 7 e 12 dias de *payback*, respectivamente, com redução de até uma hora de tratamento térmico no cenário otimista. E, embora os dados usados para os cálculos tenham sido dados reais do processo, acredita-se que até mesmo um cenário ainda mais conservador do que o adotado apresente ganhos significativos, por apontar também

aumento na produtividade da etapa de tratamento térmico e, conseqüentemente, do processo.

Portanto, mesmo com as dificuldades que foram surgindo no decorrer do desenvolvimento do trabalho, reconhece-se que o estudo apresentou resultados eficazes e que devem instigar as empresas do setor metalúrgico a considerar as adequações propostas em suas operações.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DE NOTÍCIAS DA INDÚSTRIA. **Portal da indústria**, 2021. Custo da energia elétrica para indústria. Disponível em:

<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/inovacao-e-tecnologia/custo-da-energia-eletrica-para-industria/>. Acesso em: 17 de fev. de 2022.

AGREDA, N. J. L. Isochronal study of Al-Mg, Al-Mn, and Al-Mn-Mg alloys using electrical resistivity and thermoelectric power. **Materials Research**, São Carlos, v.8, n. 1, p1-15, 2005.

ALCOA ALUMÍNIO SA. **Supervisório de processo**. Informação do software utilizado para controle do processo produtivo. Poços de Caldas, 2022.

AL-MARAHLEH, G. Effect of heat treatment on the distribution and volume fraction of Mg₂Si in structural aluminum alloy 6063. **Metal Science and Heat Treatment**, v. 48, n. 5, p. 205-209, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). **Metals Handbook**. 9th ed. MetalsPark, Ohio, 1984. v. 1. 793 p.

AMPLITHERM. Engenharia e Instalações Industriais. **Tijolo refratário industrial**. Disponível em: <https://www.amplitherm.com.br/tijolo-refratario-industrial>. Acesso em 30 de abr. de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6834**: Alumínio e suas ligas: classificação da composição química. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL. **Guia técnico do alumínio**: Extrusão, Laminação, Tratamento Térmico. 1. ed. São Paulo: ABAL, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO - ABAL. **Guia técnico do alumínio**: Fundamentos e Aplicações. v. 2. São Paulo: ABAL, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO - ABAL. **Guia técnico do alumínio**: Reciclagem. v.12. São Paulo: ABAL, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL. **Guia técnico do alumínio**: Transporte rodoviário de produtos e resíduos perigosos. 1. ed. São Paulo: ABAL, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL. **Guia técnico do alumínio**: Tratamento do metal líquido. v. 9. 1. ed. São Paulo: ABAL, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO - ABAL. **Processos de Produção**, 2022. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/>. Acesso em: 20 de nov. de 2021.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **BCB GOV**, 2022. Fechamento diário do dólar. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/fechamentodolar>. Acesso em: 12 de mar. de 2022.

CAMPBELL, F.C.- **Elements of Metallurgy and Engineering Alloys**. Asm International, 2008. ISBN 9780871708670.

CAMPOS FILHO, Mauricio Prates; DAVIES, Graeme John. **Solidificação e fundição de metais e suas ligas**. Livros Técnicos e Científicos, 1978.

CARDOSO, José Guilherme da Rocha et al. A indústria do alumínio: estrutura e tendências. **BNDES Setorial** – Insumos Básicos, v. 33, p. 43-88, 2011.

ESKIN, Dmitry G. **Physical metallurgy of direct chill casting of aluminum alloys**. CRCpress, 2008.

FREITAS, Paulo Sergio de; **Tratamento térmico dos metais: da teoria à prática**. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2014.

FRITZSCH, Robert. **Filtration of Aluminium Melts using Ceramic Foam Filters (CFF) and Electromagnetic Field**. 2011. Tese (Mestrado profissional). Institute for Material Teknologi.

GIRARD, Guillaume et al. **Furnace operation: A gold mine in your casthouse**.In: Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2010. p. 77-84.

HUARACA, Nieves Carolina Pillajo. **Efeito do tratamento térmico T4 e T6 sobre microestrutura e dureza da liga de alumínio da série 6061**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2021.

HUFNAGEL, W. **Manual del aluminio**. Reverté, 1992.

KAUFMAN, J. G. Introduction to aluminum Alloys and Tempers. **ASM International**, 2000.

KAUFMAN, J. Gilbert; ROOY, Elwin L. Aluminum alloy castings. Properties, Processes and Applications, **ASM International**, 2004.

LAWRENCE, H. Van Vlack. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. 4. ed. Rio de Janeiro, Editora Campus. 1994.

LEROY MERLIN. **Tijolos refratários**, 2022. Disponível em: <https://www.leroymerlin.com.br/tijolos-refratarios/>. Acesso em: 16 de mar. de 2022.

MACHADO, Pedro. **Fabricação da estrutura metálica do forno elétrico número 3 da aciaria da gerdau rio-grandense**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA em Gestão de Projetos) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

MARTINS, L. C. B.; AUBREY, L. S.; CUMMINGS, B. **Effect of pre-heat and priming on the proper start-up of ceramic foam filters**. Selee Corporation & Alumax of South America Inc, 1996.

MAZOLANI, F.M. **Aluminum and its alloys**. Aluminum alloys structures. 2. ed. London: FN Spon, 1995. ch.1, p.1-43.

MCCARTNEY, David G. Grain refining of aluminium and its alloys using inoculants. **International Materials Reviews**, v. 34, n. 1, p. 247-260, 1989.

MORESCHI, Bruno Sobral. **Produção de tarugos de alumínio: diagnóstico e tratamento da eficiência do processo**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2019.

NADELLA, R.; ESKIN, D. G.; DU, Q.; KATGERMAN, L. Macrosegregation in direct-chill casting of aluminium alloys. **Progress in Materials Science**, v. 53, p. 421 – 480, 2008.

PERRELLA, C. **Solidificação do alumínio**. Alcoa Aluminum Inc. Pittsburgh, 2008, 61 p.

PIPANO, Thiago Freitas et al. **Impacto na camada de refusão e segregação inversa de tarugos de alumínio da série 6xxx com mudanças realizadas no molde de vazamento**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, Minas Gerais, 2016.

ROOY EL, Linden J. H. L. Van. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. ASM Metals Handbook, v. 2, p. 3330 – 3345, 1990.

SC AÇOS. **Produtos**, 2022. Disponível em: <http://www.scacos.com.br/produtos.php>. Acesso em: 04 de mar. de 2022.

SCHUITEK, Aloisio Jose. **Usinabilidade de ligas de alumínio tratáveis termicamente**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SIGWORTH, Geoffrey K.; KUHN, Timothy A. Grain refinement of aluminum casting alloys. **International Journal of Metalcasting**, v. 1, n. 1, p. 31-40, 2007.

SOARES, M. R. N. **Efeitos dos ciclos de envelhecimento no comportamento de ligas de alumínio**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

SOUZA NETO, J. N. **Metodologia para aplicação de integração energética numa planta industrial**. 2005. 72 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

SPALLAROSSA, Marco. Hot billet saw: a real innovation in handling equipment. **Aluminium International Today**, v. 20, n. 5, p. 86, 2008.

TERMOFRAX. **Mantas**, 2022. Disponível em: <https://www.termofrax.com.br/site/default.asp?TroncoID=816064&SecaoID=515271&SubsecID=206373>. Acesso em: 16 de mar. de 2022.

VERRAN, G. O.; MORAES, A. C.; VERRI, A. A. **Influência da composição química na resistência à corrosão em ligas de alumínio de fundição.** In: XV Seminário de Iniciação Científica da UDESC, 2005, Joinville. Anais do XV Seminário de Iniciação Científica da UDESC. Joinville: UDESC, 2005. v.1.

ZHONG, Hao; ROMETSCH, Paul; ESTRIN, Yuri. Effect of alloy composition and heat treatment on mechanical performance of 6XXX aluminum alloys. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 24, n. 7, p. 2174-2178, 2014.