



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

**Restauração da eficiência do processo de arrefecimento de lingotes de
Alumínio – MOZAL**

Autora:

Magaia, Youndy Alice Aurélio

Supervisor da Faculdade

Engº. Dionísio Alfredo Langa

Supervisor da Empresa

Engº. Cremildo Manjate

Maputo, Novembro de 2023



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

Restauração da eficiência do processo de arrefecimento de lingotes de alumínio – MOZAL

Autora

Magaia, Youndy Alice Aurélio

Supervisor

Eng^o. Dionísio Alfredo Langa

Supervisor

Eng^o. Cremildo Manjate

Maputo, Novembro de 2023



**Restauração da eficiência do sistema de arrefecimento de lingotes de
alumínio, MOZAL – Magaia, Youndy**

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROSSIONAL

Declaro que a estudante Youndy Alice Aurélio Magaia, com código 20192233, entregou no dia ___/___/2023 as três copias do relatório de estágio, com a referência _____, intitulado: **Restauração da eficiência do processo de arrefecimento de lingotes de alumínio – MOZAL.**

Maputo ____ de _____ de 2023

Chefe da secretaria

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida, pela saúde, sabedoria, protecção e por permitir ultrapassar os obstáculos enfrentados ao longo de todo o percurso académico.

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos aos meus pais, Aurélio Magaia e Maria Fernanda que nunca deixaram faltar nada, sempre acreditaram em mim, me apoiaram em todos os momentos de tristeza, incerteza e de ansiedade quando pensara em desistir.

Agradeço aos meus irmãos Vânia e Nilton Machava e a minha tia Amélia Zimba, que muito oraram, apoiaram em tudo e incentivaram-me sempre.

O meu profundo agradecimento endereço ao meu supervisor Eng^o. Dionísio Alfredo Langa, pela dedicação, paciência, apoio, amizade e disponibilidade para partilhar o seu vasto conhecimento durante a realização de todo o trabalho.

Endereço o meu muito obrigado à empresa MOZAL por ter apostado em mim, tendo oferecido a Bolsa de estudos e pela oportunidade de estágio, onde pude apreender e crescer não só como formanda, mas também como pessoa. Ao Sr. Dias Bande pelo apreço, pela disponibilidade e acompanhamento necessário durante todo percurso estudantil. Aos meus supervisores da empresa Eng^o. Cremildo Manjate e Eng^o. Naife Muzila pela orientação, pelos ensinamentos e correcções que serviram de alicerce para a realização deste trabalho. Aos colaboradores da empresa por me acolherem da melhor maneira possível e disponibilizarem toda a informação e todo o material necessário para o estudo.

Aos Eng^o. Nelson Maculuve, Eng^o. Izildo Chinhete e Eng^a. Milena Boana agradeço pela colaboração, disposição, amizade e troca de experiências. Aos meus professores da faculdade, sou eternamente grata, sem eles não teria sido fácil esta caminhada.

Agradeço aos colegas da faculdade, por compartilharem comigo momentos incríveis cheios de companheirismo e amizade, em especial as minhas colegas Nélia Zunguene e Welka Cossa que sempre estiveram comigo, dando força e carinho ao longo dos 4 anos. Aos colegas do grupo de estudos: Elton Manhiça, Jordão Jordão, Anatólio Macário e Alexandre Thongole o meu muito obrigada.

Aos familiares, irmãos da igreja e amigos em geral expresso a minha gratidão.

DEDICATÓRIA

À minha mãe,

Maria Fernanda pelo amor incondicional, pelo encorajamento a não desistir desta caminhada e pela mulher guerreira e forte que é, que a cada dia me inspira a ser alguém melhor.

Ao meu pai,

Aurélio Magaia pelo amor, cuidado, apoio inestimável e por fazer de tudo para tornar o meu sonho de ser engenheira uma realidade.

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Youndy Alice Aurélio Magaia, declaro, por minha honra, que o presente projecto de Final do Curso é de minha inteira autoria, não constitui plágio de nenhum trabalho anteriormente realizado e os recursos usados para a realização do mesmo, encontram-se referenciados na bibliografia.

Assinatura

Youndy Alice A. Magaia

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	I
DEDICATÓRIA.....	II
DECLARAÇÃO DE HONRA	III
ÍNDICE DE TABELAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	IX
LISTA DAS ABREVIATURAS UTILIZADAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XIV
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Problemática	1
1.3. Problema.....	2
1.4. Objectivo geral	3
1.5. Objectivos específicos	3
1.6. Hipótese/proposições.....	3
1.7. Perguntas da investigação.....	3
1.8. Justificativa.....	4
1.9. Metodologia.....	4
1.10. Estrutura do trabalho	4
CAPÍTULO 2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1. Conceitos básicos	5
2.1.1. Alumínio.....	5
2.1.2 Bauxite.....	6
2.2. Historial do processo de obtenção do Alumínio.....	7
2.3. Processo de Produção de Alumínio	9
2.3.1. Mineração	9
2.3.2. Refinação	10
2.3.3. Redução	11
2.3.4. Fundição	12
2.4. Fundição contínua – <i>Casthouse</i>	13

2.4.1. Sistema de arrefecimento.....	14
2.4.2. Túnel de arrefecimento	16
2.5. Água de arrefecimento para uso industrial	17
2.5.1 Variáveis da qualidade da água industrial	17
CAPÍTULO 3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO.....	20
3.1. Apresentação da empresa MOZAL	20
3.2. Processo de produção de alumínio da MOZAL	21
3.3. Estado actual do objecto de investigação	22
3.3.1. Processo de fundição de lingotes – <i>Casthouse</i>	22
3.3.2. Processo de arrefecimento da <i>Casthouse</i>	24
CAPÍTULO 4. METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA	27
4.1. Tipo de investigação	27
4.2. População e amostra	27
4.2.1. Instrumentos e procedimentos de recolha de dados	28
4.3. Tratamento e análise de dados.....	30
4.3.1. Análise da granulometria dos detritos	30
4.4. Tecnologia de filtração	31
4.4.1. Escolha do tipo de filtro	31
4.4.2. Escolha do material da estrutura e dos elementos filtrantes.....	32
4.4.3. Escolha do formato e dimensões do casco/estrutura e dos tampos (flanges)	33
4.4.4. Escolha dos cestos	35
4.3.5. Dispositivos de medição da pressão	37
CAPÍTULO 5. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	38
5.1. Apresentação e análise dos resultados.....	38
5.1.1. Linha 1	38
5.1.2. Linha 3	40
5.1.3. Análise da transferência de calor durante o processo de arrefecimento de lingotes – Estado actual de arrefecimento	41
5.1.4. Composição química da água de arrefecimento	43
5.2. Discussão dos resultados	45
5.2.1. Prognóstico de transferência de calor após a instalação do <i>Basket Strainer</i>	48
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	50

6.1. Conclusões.....	50
6.2. Recomendações	50
6.3. Limitações da pesquisa.....	51
6.4. Sugestões para trabalhos futuros	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
BIBLIOGRAFIA	54
ANEXOS	56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Características e propriedades do Alumínio.....	6
Tabela 2: Composição química do Aço A106- Gr. B.	33
Tabela 3: Propriedades mecânicas do Aço A106- Gr. B.....	33
Tabela 4: Composição química do Aço inoxidável SS 304.	33
Tabela 5: Propriedades do Aço inoxidável SS 304.	33
Tabela 6: Dimensões do Basket Strainer.....	34
Tabela 7: Dimensões dos cestos	36
Tabela 8: Parâmetros do processo: 15 de Agosto.....	39
Tabela 9: Parâmetros do processo: 17 de Agosto.....	39
Tabela 10: Dados do processo	42
Tabela 11: Resultados obtidos com a amostra de água de arrefecimento	44
Tabela 12: Características do filtro seleccionado.....	46
Tabela 13: Parâmetros do filtro seleccionado.....	47
Tabela 14: Dados de entrada para o cálculo da transferência de calor	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Rocha Bauxite.....	7
Figura 2: Etapas de produção de Alumínio	9
Figura 3: Diagrama simplificado do processo Bayer para a produção de alumina a partir da bauxite.	10
Figura 4: Desenho esquemático de uma cuba electrolítica.....	11
Figura 5: Ladle durante a operação de sucção do Alumínio no pote.	12
Figura 6: Lingotes de Alumínio.....	13
Figura 7: Modos de transferência de calor.	15
Figura 8: <i>Cooling Tunnel</i>	16
Figura 9: Ilustração da empresa MOZAL.....	20
Figura 10: Apresentação do departamento de fundição – <i>Casthouse</i>	22
Figura 11: Processo de obtenção de lingotes na <i>Casthouse</i>	23
Figura 12: Esquema de arrefecimento de água usada no departamento da <i>Casthouse</i>	24
Figura 14: Esquema do Túnel de arrefecimento.....	25
Figura 15: Consequências de lingotes quentes.	26
Figura 16: Termopar de cabo Tipo K.	28
Figura 17: Sensor de temperatura RTD.	28
Figura 18: Medidor de fluxo de água	29
Figura 19: Amostra da água.....	29
Figura 20: Colecta de amostras das partículas sólidas.	29
Figura 21: <i>Simplex Basket Strainer Type EF</i>	32
Figura 22: <i>Basket Strainer PRFS 520X DN200</i>	35
Figura 23: <i>Screen Basket</i> (cesto).	36
Figura 24: Malha de arame (a), malha de cunha (b), placa perfurada (c).	36
Figura 25: <i>Basket strainer system</i>	47

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva granulométrica das partículas suspensas.	30
Gráfico 2: Curva de perda de pressão.....	34
Gráfico 3: Diferença de temperatura a entrada e saída do Túnel de arrefecimento	38
Gráfico 4: Diferença de temperatura dos lingotes linha 3	40
Gráfico 5: Monitoria do parâmetro TSS.....	45

LISTA DAS ABREVIATURAS UTILIZADAS

ICM	<i>Ingot Casting Machine</i>
LENG	Laboratório de Engenharia
LTV	<i>Ladle Transport Vehicle</i>
LWS	<i>Ladle Workshop</i>
MOZAL	<i>Mozambique Aluminium</i>
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unity</i>
ppm	<i>Particles per million</i>
SSF	<i>Side Stream Filter</i>
TDS	<i>Total Dissolved Solids</i>
TSS	<i>Total Suspended Solids</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Área

C – Carbono

$c_{p,AL}$ – Calor específico do alumínio a pressão constante [$kJ/kg \cdot K$]

Cr – Cromo

D_h – Diâmetro hidráulico [m]

$EEER$ – Eficiência energética de resfriamento

Fe – Ferro

h – Coeficiente de transferência de calor por convecção [$W/m^2 \cdot K$]

K – Condutividade térmica [$W/(m \cdot K)$]

L_c – Comprimento característico [m]

m – Massa [kg]

\dot{m} – Taxa de fluxo de massa [kg/s]

Mn – Manganês

Mo – Molibdénio

n – Coeficiente de Prandtl

Ni – Níquel

Nu – Número de Nusselt

P – Fósforo

Pr – Número de Prandtl

\dot{q} – Fluxo de calor [W/m^2]

Q_{H_2O} – Fluxo volumétrico da água [m^3/h]

Re – Número de Reynolds

S – Enxofre

Si – Silício

$Speed_{conv}$ – Velocidade da transportadora [*lingotes/minuto*]

$T_{H_2O,out}$ – Temperatura da água a saída [°C] ou [K]

$T_{final,desejada}$ – Temperatura final desejada do lingote [°C] ou [K]

$T_{final,ingt}$ – Temperatura final do lingote [°C] ou [K]

T_{o,H_2O} – Temperatura inicial da água [°C] ou [K]

$T_{o,ing}$ – Temperatura inicial do lingote [°C] ou [K]

T_s – Temperatura da superfície [°C] ou [K]

U – Velocidade de escoamento [m/s]

V – Volume [m^3]

ΔT – Diferença de temperatura [°C]

❖ **Simbologia grega**

μ – Viscosidade dinâmica [$kg/m \cdot s$]

$\rho_{H_2O,30^\circ C}$ – Densidade da água a 30°C [kg/m^3]

ρ_{Al} – Densidade do alumínio [kg/m^3]

σ_e – Tensão de escoamento [N/mm^2]

σ_r – Tensão de resistência ruptura [N/mm^2]

γ – Alongamento máximo relativo [%]

RESUMO

A qualidade da água industrial usada na *Casthouse* é crucial no que diz respeito à eficiência de resfriamento do produto final (os lingotes de Alumínio). As partículas sólidas em suspensão existentes na água, criam obstrução nos bocais, bicos, válvulas, condutas e tubos, afectando o funcionamento do processo de arrefecimento. O projecto em causa consiste na análise do processo arrefecimento de lingotes de Alumínio e proposta de instalação de um filtro de cestos, para a retenção de partículas sólidas que comprometem o funcionamento dos equipamentos a montante, de modo a restaurar a eficiência de arrefecimento dos lingotes no Túnel de arrefecimento. O estudo vai abarcar os cálculos de transferência de calor, monitoria de parâmetros do processo, medição da temperatura dos lingotes comparando com a predefinida pelo fabricante, bem como a escolha do filtro adequado para as linhas de fundição. Com este estudo, espera-se melhoria do processo, redução da frequência de paragens das linhas para intervenções da manutenção, limpeza e desobstrução de válvulas, bem como arrefecimento dos lingotes até uma temperatura entre 50 a 60 °C.

PALAVRAS-CHAVE: Arrefecimento de lingotes. Túnel de Arrefecimento. Eficiência de arrefecimento. Restauração do processo.

ABSTRACT

The quality of industrial water used at Casthouse is a crucial when it comes to the cooling efficiency of the final product (the Aluminium ingots). Solid suspended particles in the water create obstruction in nozzles, spouts, valves, ducts and pipes thus, affecting the correct operation of the cooling process. The project in question consists of analyzing the ingots cooling process and proposing the installation of a Basket Strainer to retain solid particles that compromise the operation of upstream equipment, to restore the cooling efficiency of aluminium ingots in Cooling Tunnel. The study will focus on heat transfer calculations, process parameters monitoring, ingots temperature measurement comparing with manufacturer specifications, as well as choosing the appropriate filter for the casting lines. The expectation of this study is to improve the cooling efficiency, reduce the frequency of line stoppages for maintenance interventions which include valves cleaning and unblocking, as well as cooling the ingots to a temperature between 50 and 60 °C.

Keywords: Ingots cooling. Cooling Tunnel. Cooling efficiency. Process restoration.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. Introdução

O presente estudo resulta da pesquisa de campo realizada na empresa MOZAL e representa uma das variantes para culminação do curso de Licenciatura em Engenharia Mecânica, leccionado na Universidade Eduardo Mondlane.

A MOZAL é uma empresa que se encontra em funcionamento há mais de 20 anos. É uma indústria vocacionada na produção de Alumínio primário e posterior exportação. Usa sistemas e tecnologias avançadas nos seus processos, incluindo sistemas de arrefecimento.

O uso do arrefecimento remonta a civilizações antigas que desenvolveram métodos para resfriar alimentos, materiais e produtos. Com a revolução industrial, a industrialização e a produção em larga escala, aumentaram de forma significativa a demanda por processos e tecnologias de arrefecimento mais sofisticados.

Para a obtenção de alumínio primário numa indústria metalúrgica, é necessário que após a obtenção do metal líquido, o lingote seja arrefecido de forma eficiente e dentro dos parâmetros desejados, de modo a garantir a longevidade, as propriedades mecânicas e a segurança durante todo o processo produtivo.

Um dos factores que influencia a diminuição da proficiência dos sistemas de arrefecimento é a qualidade da água industrial. Sabe-se que os processos de arrefecimento, usando a água como fluido refrigerante, são susceptíveis a diminuir o seu desempenho e sua eficiência com o tempo, visto que podem sofrer corrosão intensificada, contaminação microbiana, vazamentos nas tubagens, assim como, sedimentação de partículas sólidas e conseqüentemente obstruções e bloqueios de tubos, bocais e válvulas.

Este trabalho tem como foco a análise do estado actual do sistema de arrefecimento de lingotes, por meio de monitoria de parâmetros do processo, com o intuito de melhoria significativa da eficiência do mesmo, de modo a obter uma temperatura final dos lingotes aproximada à especificação do fabricante.

1.2. Problemática

A água usada na empresa é captada no Rio Umbelúzi e percorre uma distância de aproximadamente 17 km até a MOZAL, por meio de condutas subterrâneas ligadas a 3 bombas centrífugas. De referir que a água é succionada da fonte sem tratamento químico inicial para eliminar a matéria orgânica, não obstante é feito um processo de filtração usando uma malha, apesar de deixar passar partículas sólidas em suspensão, impurezas, material orgânico, detritos e lamas, o que compromete o funcionamento e o tempo de vida das bombas e das condutas.

De um tempo para cá, devido às condições atmosféricas adversas, a qualidade da água vem se deteriorando, tanto que este facto representa elevados custos a organização no que diz respeito à quantidade de produtos químicos a dosear, a contratação de empresas para fazer a manutenção e limpeza de condutas, tanques e outros equipamentos.

A linha de produção da *Casthouse* recebe água, tanto para a solidificação do alumínio líquido em lingotes que acontece na Bacia de arrefecimento, assim como para o arrefecimento dos próprios lingotes no Túnel de arrefecimento – *Cooling Tunnel*, e para componentes de sistemas hidráulicos e termopermutadores de calor.

1.3. Problema

A fábrica vem operando há mais de 20 anos, com o tempo alguns parâmetros de arrefecimento de lingotes apresentam variações em relação os padrões predefinidos pelo fabricante, sendo assim revela-se importante melhorar o actual processo de arrefecimento de lingotes feito por convecção forçada, no Túnel de arrefecimento.

Um dos pontos que diminui a eficiência do processo de arrefecimento é a obstrução de bocais, válvulas, bicos que injectam água para o arrefecimento de lingotes. Essa obstrução no material metálico deve-se a presença de certas partículas sólidas suspensas na água.

Foi calculada uma determinada quantidade de água para o arrefecimento de lingotes num determinado tempo, e quando não é atingida, os lingotes acabam não sendo arrefecidos dentro do intervalo de 500°C a aproximadamente 50°C no túnel de arrefecimento, e saem a uma temperatura entre 60°C a 95°C.

Lingotes quentes representam os seguintes impactos:

- A nível da segurança: há um potencial risco de queimadura por parte dos operários, aquando de colocação de autocolantes de identificação do *bundle*.

- Ao nível da produção: diminui o tempo de vida dos equipamentos devido a diminuição da resistência das borrachas do *Stacking Robot* (máquina responsável por formar os arranjos de lingotes – *bundle*), assim como diminuição da resistência das cintas plásticas de amarração dos lingotes, isto que compromete a embalagem e transporte.

Não obstante, a própria concepção do túnel, constitui um impasse para o bom funcionamento, visto que dificulta as intervenções de manutenção: é um local confinado no seu interior e de difícil acesso, com um pequeno espaço de manobra, tanto que fica condicionado o manuseamento de válvulas, mangueiras e tubos que transportam água, pela parte de cima do túnel devido na presença de plataformas.

1.4. Objectivo geral

Restaurar a eficiência do processo de arrefecimento de lingotes de Alumínio – Mozal.

1.5. Objectivos específicos

Com este trabalho, pretende-se:

- Analisar a eficiência do processo actual de arrefecimento de lingotes em duas linhas de produção;
- Propor a instalação dum sistema de filtração para a separação de partículas sólidas do fluido de refrigeração; e
- Melhorar o índice de arrefecimento dos lingotes a saída do túnel de arrefecimento.

1.6. Hipótese/proposições

Hipótese nula: Se há obstrução de válvulas e bicos de injeção de água em algumas secções do túnel, então os lingotes não são arrefecidos até ao nível desejado.

Hipótese alternativa: A ausência de uma estratégia de manutenção aplicável, pode compactuar para a deficiência no arrefecimento do lingote.

1.7. Perguntas da investigação

Que factores influenciam para que os lingotes não sejam arrefecidos até a temperatura desejada?

De que forma a mudança da velocidade das transportadoras proporciona um arrefecimento adequado dos lingotes?

Será que a composição da água influencia o depósito de quantidades consideráveis de partículas solidas nas condutas, na bacia e no túnel de arrefecimento?

1.8. Justificativa

Considera-se pertinente o estudo e avaliação do processo actual de arrefecimento de lingotes, com o intuito de propor melhoria do mesmo e trazer ganhos a empresa, uma vez que o túnel de arrefecimento é uma componente imprescindível ao processo final de obtenção de Alumínio, sob ponto de vista de que permite consolidar a solidificação do lingote e arrefecê-lo de 500 °C a 50 °C, uma temperatura adequada para manter a resistência da cinta de amarração do *bundle* (arranjo de lingotes) bem como reduzir o potencial risco de queimaduras por parte do operário aquando da colocação do rótulo com identificação do *bundle*.

1.9. Metodologia

Como metodologia para a elaboração do projecto, tem-se:

- Colecta de informações e conhecimentos técnico-científicos, adquiridos através do intercâmbio entre a estudante e colaboradores da empresa;
- Sessões de consulta ao Supervisor da faculdade, ao Supervisor do estágio, Especialistas do processo, Superintendentes e alguns colaboradores da empresa; e
- Pesquisas individuais nos manuais da empresa e as consultas em páginas fidedignas da *internet*.

1.10. Estrutura do trabalho

O presente trabalho encontra-se subdividido em 6 capítulos principais, começando com o capítulo introdução em que se faz uma abordagem mais ampla dos tópicos que norteiam o tema em questão, bem como a relevância da elaboração do estudo.

O segundo capítulo abarca a descoberta e evolução da indústria e as etapas de produção do alumínio, bem como a importância do processo de arrefecimento na indústria.

O terceiro capítulo dedica-se à apresentação da empresa MOZAL e contextualiza o leitor ao problema de investigação.

O capítulo 4 dá ênfase a metodologia usada de forma de alcançar os objectivos acima propostos.

O capítulo 5 é reservado a apresentação, análise e discussão dos resultados da investigação.

No último capítulo são descritas as conclusões e recomendações do estudo.

CAPÍTULO 2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Conceitos básicos

2.1.1. Alumínio

Depois da sílica, o Alumínio é o segundo elemento mais abundante presente na crosta terrestre, sendo o mais moderno dos metais comuns. No entanto, apenas 8% do Alumínio está presente como elemento metálico, o restante está presente como argila, solo e rochas que não pode ser extraído (Sukla e Pradhan 2019, 3).

O Alumínio foi isolado em 1825 e introduzido ao público em 1855. O seu desconhecimento ao longo do tempo, deve-se ao facto de que, ao contrário de outros elementos metálicos (Cobre ou Ferro), ele não ocorre naturalmente em sua forma metálica, existindo sempre em combinação com outros elementos, principalmente o Oxigênio, com o qual forma um óxido extremamente duro, conhecido como alumina (Mártires 2001, 2).

O Alumínio é um metal leve, macio, resistente, fácil de moldar, apresenta um aspecto metálico branco, que tem um revestimento fino de um óxido não reactivo e muito aderente que protege o Alumínio de corrosão e é um óptimo condutor de electricidade.

Por não ser magnético, o alumínio é frequentemente utilizado como protecção em equipamentos electrónicos. Além disso, o metal não produz faíscas, o que é uma característica muito importante para garantir sua utilização no armazenamento de substâncias inflamáveis ou explosivas, bem como em camiões-cisterna de transporte de combustíveis.

Por ter uma elevada resistência à corrosão, o Alumínio tem a seguinte aplicabilidade: em artigos domésticos, embalagens, folhas de alumínio, latas de bebidas e antitranspirantes. É amplamente utilizado na indústria aeroespacial para confecção da fuselagem de aeronaves. Devido a baixa densidade, aliada a elevada condutividade eléctrica, o metal em causa veio revolucionar a indústria, a medida que é usado como cabos e fios para a transmissão eléctrica (Mártires 2001).

Tabela 1: Características e propriedades do Alumínio, Metals Handbook.

Propriedade	Descrição
Símbolo químico	Al
Número atômico	13
Massa atômica	26.982
Temperatura de fusão	660 °C
Ponto de ebulição	2519 °C
Densidade	2,71 g/cm ³
Módulo de elasticidade	69 000MPa
Coefficiente de expansão Linear	23 × 10 ⁻⁶ m/°C
Condutividade térmica	0.56 cal/cm °C
Condutividade eléctrica	62 (IACS)%
Número de isótopos	22, sendo Al –27 o mais estável
Estado físico	Sólido

2.1.2 Bauxite

O nome bauxite deriva do nome da localidade *Les Bauxs*, no sul da França, onde foi descoberto, pela primeira vez em 1821, por Berhier. O termo é genérico, referindo-se a um minério ou a uma mistura de minerais ricos em óxidos de Alumínio hidratados formada pela erosão de rochas ricas neste elemento, como nefelina, feldspato, serpentina, argilas, entre outros (Ferrari 2008, 12).

A formação da bauxite resulta da decomposição de rochas alcalinas, provocada pela infiltração de água das chuvas nas rochas ao longo de milhões de anos. A coloração avermelhada desse minério é determinada pela presença de óxidos de ferro. Sendo assim, as rochas que apresentam de 2% a 4% de óxido de ferro são chamadas de bauxite branca, enquanto aquelas que possuem até 25% de óxido de ferro são chamadas de bauxite vermelha.



Figura 1: Rocha Bauxite.

Fonte: infoescola.com

A bauxite é a principal fonte natural de Alumínio e a maior parte de sua extracção mundial é destinada à obtenção desse elemento. Para que seja economicamente aproveitável, a bauxite deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio.

A bauxite é o único minério a ser utilizado na produção de alumínio à escala industrial. Encontra-se próxima à superfície, com uma espessura variável, dependendo de sua formação geológica, ocorrendo geralmente em faixas variando de 3 a 6 metros, o que possibilita sua extracção a céu aberto com a utilização de retroescavadeiras (Mártires 2001).

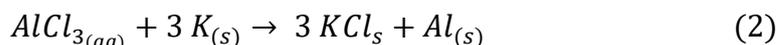
2.2. Historial do processo de obtenção do Alumínio

É reconhecido, que há mais de 7 mil anos, fabricantes de peças cerâmicas, na Pérsia, utilizavam um tipo de barro contendo óxido de alumínio. Os egípcios e os babilônios utilizavam outros minerais contendo alumínio na fabricação de cosméticos e produtos medicinais.

A história inicial do alumínio começa por volta de 1808, quando uma forma impura foi identificada por Humphrey Davy na Grã-Bretanha. Em 1825, o físico alemão Hans Christian Oersted da Dinamarca produziu quantidades mínimas do metal e dois anos mais tarde Freidrich Wöhler, da Alemanha, descreveu um processo de produção de Alumínio como sendo um pó por reacção de Potássio com cloreto de alumínio anidro (Lumley, 2011).

Segundo Mártires (2001), a primeira obtenção industrial do alumínio por via química foi realizada por Henri Sainte-Claire Deville, em 1854 usando uma versão melhorada do processo de Wöhler.

Antigamente, para originar o Alumínio metálico, tratava-se a alumina com ácido clorídrico, gerando o cloreto de Alumínio, que era colocado para reagir com Potássio ou Sódio metálicos, causando a seguinte redução do composto mostrada abaixo:



Entretanto, esse método era muito caro e ineficiente, por isso o alumínio era considerado um metal raro e precioso.

Todavia, em 1886, o americano Charles M. Hall e o francês Paul Héroult, de modo separado, desenvolveram o método citado acima, em que se utilizava a electrólise ígnea, daí que o método passou a ser chamado de Processo de Hall-Héroult.

O ponto chave que eles descobriram era como fazer o óxido de alumínio ficar no estado líquido para assim conseguir realizar a sua electrólise ígnea, pois o problema era que o ponto de fusão acima de 2000 °C. Eles utilizaram um fundente, de nome minério criolita ($Na_3Al_3F_6$), que foi capaz de baixar a temperatura de fusão do óxido de alumínio para cerca de 1000 °C. Isso representou um grande avanço, uma vez que abriu o caminho para a produção económica de alumínio, que começou por volta de 1890 (Lumley, 2011).

Uma etapa essencial do processo, foi a extracção de alumina (Al_2O_3) a partir de bauxite, tendo sido desenvolvido um método eficiente para o fazer, por Karl Joseph Bayer em 1888.

Até hoje, os processos Bayer e Hall-Héroult continuaram a ser os métodos mais económicos para a produção de quantidades comerciais de Alumínio, e são o alicerce da indústria de Alumínio (Lumley, 2011).

Cardoso, *et al* (2011, 37) afirma que nos anos 1990, a África do Sul e o Oriente Médio emergiram como produtores de Alumínio, sendo o baixo preço do carvão energético e a abundância de gás natural associado à produção de petróleo, factores determinantes para a sua participação na produção mundial.

Em Moçambique, o projecto MOZAL, foi estabelecido em 1998, que implicava a construção de uma fundição primária com capacidade de produzir 250 000 ton/ano, e entrou em funcionamento em 2000, e opera até aos dias de hoje com uma produção anual de aproximadamente 570 mil toneladas anuais.

2.3. Processo de Produção de Alumínio

O processo de obtenção de alumínio compreende 4 etapas principais: inicia-se com a mineração da bauxite, em seguida produz-se o óxido de anidro (alumina) a partir da bauxite (processo de Bayer), passando assim ao Processo de Hall-Héroult que consiste em reduzir a alumina em alumínio por meio de electrólise fundida. A última fase é o processo de fundição, em que o metal líquido obtido é solidificado e arrefecido em forma de lingotes e pronto para exportação.

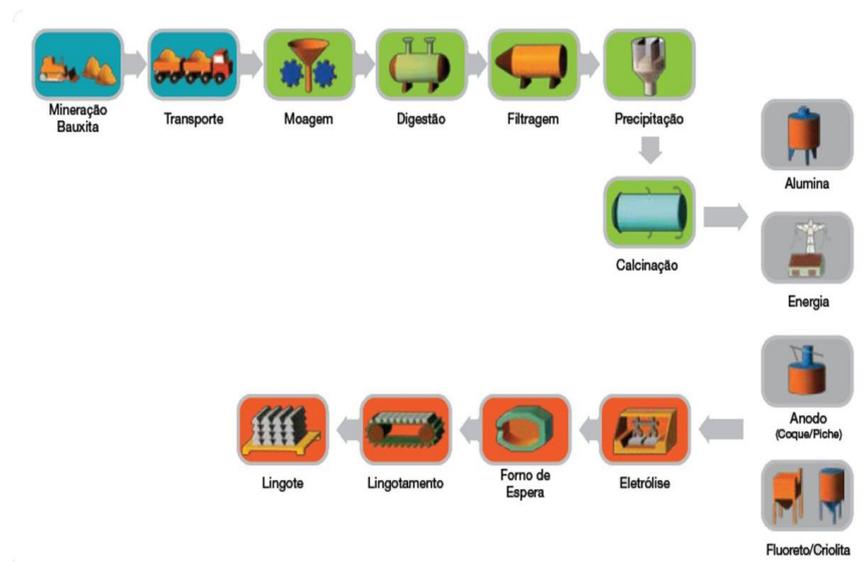


Figura 2: Etapas de produção de Alumínio

Fonte: Mártires, 2001

2.3.1. Mineração

Conforme Massara (2004), a bauxite é localizada em países tropicais como Guiné, Austrália, Brasil, Jamaica e Índia, que em conjunto possuem aproximadamente 70% das reservas mundiais.

Antes que se inicie a extração da bauxite, toda a terra e a vegetação que se acumulam sobre os depósitos de bauxite são removidas por meio de máquinas motoniveladoras. Geralmente, a bauxite é encontrada na superfície do solo e extraída por meio de escavadeiras, transportada e armazenada. De salientar que em minas mais profundas, é necessária, a utilização de explosivos.

Após a extração, a bauxite passa por processos como a britagem, moagem, lavagem e secagem de acordo com o nível de concentração, para a remoção de impurezas como argila e a areia (Cardoso, *et al* 2011, 41).

Uma característica importante é a proximidade entre a mina e a unidade de refinação, ponto que contribui para a redução dos custos de transportes (Massara 2004, 8).

2.3.2. Refinação

Segundo Massara (2004, 7-9), o químico austríaco Karl Josef Bayer, em 1887, desenvolveu um processo de refinação bastante econômico, que ficou conhecido como processo Bayer. Abaixo se apresenta o esquema do processo Bayer e a sua descrição detalhada:

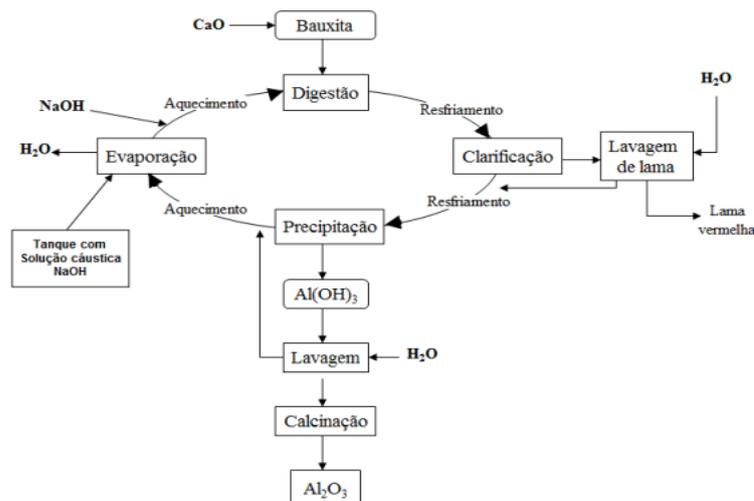


Figura 3: Diagrama simplificado do processo Bayer para a produção de alumina a partir da bauxite.

Fonte: Massara, 2004

- ❖ **Preparação:** redução controlada das dimensões da bauxite.
- ❖ **Digestão:** caracterizada pela obtenção de alumina a partir da moagem da bauxite e de seguida mistura com soda cáustica, cal e água, sob pressão e calor, fazendo com que a alumina se dissolva como aluminato de sódio ($NaAlO_2$).
- ❖ **Separação** entre o material cristalizado (a alumina hidratada) e o resíduo (barro vermelho). Originalmente a separação das impurezas era feita através de filtração, porém actualmente, dilui-se e decanta-se o chamado Licor de Bayer e retira o barro vermelho.
- ❖ **Precipitação:** o licor é transferido para tanques de aço, onde é misturado à finas partículas de hidróxido de alumínio por um período que pode variar entre 20 a 80 horas, em constante agitação, causando a solidificação da alumina, formando cristais que são facilmente separados da solução, lavados e secos.

- ❖ **Calcinação:** os cristais são submetidos as altas temperaturas para alcançar o ponto de fusão sendo o produto final um pó branco fino com alto teor de pureza.

De salientar que 10% da Alumina produzida no Mundo requer altos padrões de pureza, pois além ser a base de produção do alumínio metálico, tem utilizações diversas como em abrasivos, refractários, velas de motores a combustão, e na sua forma hidratada, como tratamento de água para o consumo humano e industrial, retardante de chamas e pasta de dente, e o restante é utilizado na produção de alumínio.

2.3.3. Redução

A alumina produzida é o principal insumo para a produção do alumínio metálico. Trata-se de um processo electrolítico através de corrente eléctrica, descoberto em 1886, por Paul Louis Toussaint Héroult (Normandia, França) e Charles Martin Hall (Ohio, EUA) e ficou conhecido como processo Hall-Héroult.

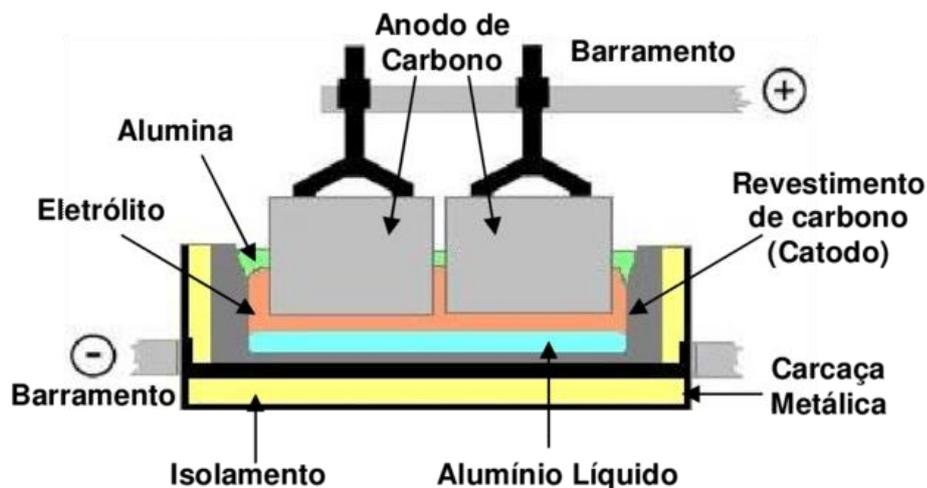


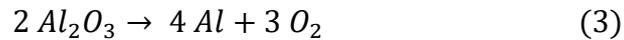
Figura 4: Desenho esquemático de uma cuba electrolítica.

Fonte: Mártires, 2001.

No processo Hall-Héroult, o alumínio é obtido pela redução electrolítica da alumina dentro de um forno conhecido por cuba electrolítica. Este processo atinge temperaturas superiores a 900°C, no banho electrolítico onde se imerge, à medida que o ânodo de grafite é consumido. O transporte e imersão deste ânodo na cuba é realizada por uma haste metálica por onde se conduz a corrente eléctrica necessária ao processo (Mártires, 2001).

A alumina é misturada com fluoretos e essa mistura é submetida à electrólise ígnea em fornos electrolíticos. A passagem de corrente eléctrica faz com que o Alumínio se separe da solução e o oxigênio seja liberado. Assim, o alumínio líquido a aproximadamente 950°C, com grau de

pureza de 99.8%, se deposita no fundo do forno e depois é aspirado através de sifões. A reacção de obtenção do Alumínio pode ser representada pela seguinte equação:



Cardoso *et al* (2011) salienta que na produção do alumínio líquido é necessário que ocorra, nas cubas, a quebra de crostas e alimentação dos fornos, de modo a assegurar que o teor de alumina no banho fique sob controle.

2.3.4. Fundição

Após o processo de redução, a retirada do metal líquido é feita a cada 24 ou 48 horas, sendo necessário o uso de cadinho (*ladle*). O bico ou tubo do *ladle* é introduzido na crosta do pote de modo a succionar o metal líquido. O *ladle* é transportado por camiões até o sector de fundição (*Casthouse*).

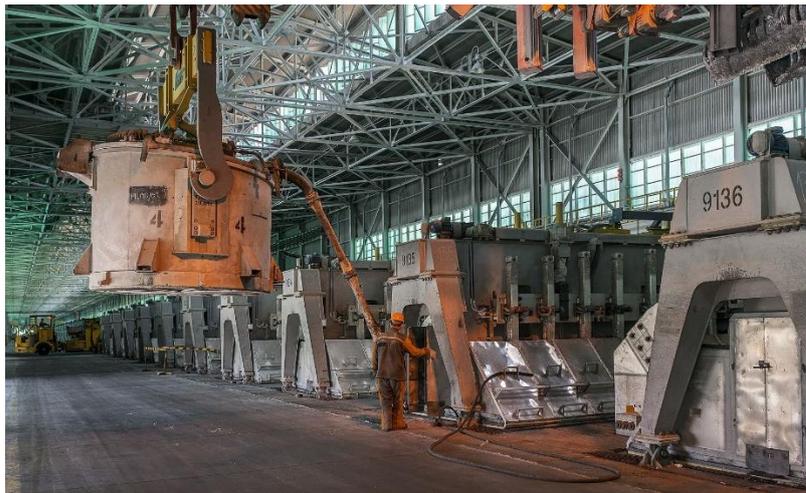


Figura 5: *Ladle* durante a operação de sucção do Alumínio no pote.

Fonte: aluminiumleader.com

O Alumínio líquido obtido no processo Hall-Héroult contém impurezas como Silício, Ferro, cobre e outros elementos. Mesmo as menores quantidades de aditivos podem ter um impacto drástico nas propriedades finais do Alumínio, dado que é na *Casthouse* que são removidas as misturas, por meio de processos de refinação, como a refinação electrolítica ou por fusão, para obter um Alumínio com maior pureza.

A última fase do processo de obtenção de Alumínio caracteriza-se pela fundição propriamente dita, em que o metal líquido tem a sua temperatura reduzida, sendo depositado em fornos de

espera. Nesta fase, outros materiais podem ser adicionados, de acordo com a finalidade que será dada à liga de alumínio.

Massara (2004, 10) reitera que o metal líquido é vazado em formas, cujo material depende do que será produzido, até se solidificar, e para tal, a influência do controle de temperatura para manter a fluidez é vital. Abaixo são apresentados conjunto de lingotes de Alumínio embalados na forma de *bundles*.



Figura 6: Lingotes de Alumínio.

Fonte: adaptado de Hydo.com

2.4. Fundição contínua – *Casthouse*

De acordo com Baldam (2014), Fundição é um processo de fabricação de peças com formas simples ou complexas por meio da fusão da matéria-prima, sendo o metal líquido despejado em moldes, cujas cavidades têm forma e configurações aproximadas as da peça pretendida, onde arrefece e solidifica, tomando a forma da mesma.

O metal líquido preenche totalmente a cavidade do seu molde, já proporcionando uma peça semiacabada, sendo o processo mais econômico no processo de conformação mecânica do material.

Os tipos mais comuns são: a fundição por gravidade, por centrifugação, por pressão, fundição de precisão ou cera perdida, assim como, a fundição contínua.

A **Fundição contínua**, ou por outra, o **Lingotamento contínuo**, segundo Silva (2013), consiste no vazamento de material líquido em moldes com geometria mais simples, por exemplo, quadradas, cilíndricas e/ou retangulares.

Watanabe (2012) afirma que **lingotes** são blocos sólidos de metal, obtidos por meio do processo de fundição de metal líquido, apresentando forma geralmente rectangular ou cilíndrica. Os lingotes são uma forma comum de armazenamento e transporte do metal antes de serem utilizados em processos industriais.

Os lingotes de Alumínio possuem diferentes tamanhos e pesos, dependendo das especificações da indústria e do uso final. Eles são amplamente utilizados como matéria-prima para a fabricação de peças, produtos e componentes em diversas indústrias como automotiva, aeroespacial, construção, electrónica, embalagens e muitas outras. Os lingotes podem ser posteriormente processados por meio de laminação, extrusão, forjamento ou outros métodos para obter as formas desejadas antes de serem utilizados na produção de diferentes produtos de Alumínio.

O Lingotamento contínuo na *Casthouse* compreende as seguintes fases: a refusão do alumínio nos fornos de espera, o vazamento do metal líquido, a solidificação do metal nos moldes, o arrefecimento dos lingotes, organização dos lingotes, armazenamento para posterior exportação do metal.

No que concerne ao lingotamento contínuo, é parte crucial do processo o arrefecimento ou resfriamento dos lingotes para melhor segurança e manuseamento dos mesmos.

2.4.1. Sistema de arrefecimento

O resfriamento é o processo pelo qual um objecto ou substância perde calor e diminui sua temperatura. É uma forma de **Transferência de calor** que ocorre quando um corpo com maior temperatura transfere energia térmica para um corpo com temperatura mais baixa. A transferência de energia, como calor, ocorre do meio de maior temperatura para o de menor temperatura e cessa quando os dois meios atingem a mesma temperatura (Çengel 2012, 17).

Abaixo são descritos e ilustrados os tipos de transferência de calor.

1. **Condução:** é a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as partículas vizinhas adjacentes menos energéticas, como resultado da interação entre elas. Ou seja, há transferência de calor através do contacto directo entre materiais (Çengel 2012, 17).
2. **Convecção:** é o modo de transferência de energia entre a superfície sólida e a líquida ou gás adjacente, que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e de movimento de um fluido.

Segundo Incropera (2008), além de transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão), a energia também é transferida através do movimento global ou macroscópico do fluido. Esse movimento do fluido está associado ao facto de que, em um instante qualquer, um grande número de moléculas está se movendo colectivamente ou como agregado. Tal movimento, na presença de um gradiente de temperatura, contribui para a transferência de calor.

A convecção é chamada **forçada** se o fluido é forçado a fluir sobre a superfície por meios de meios externos, como ventilador, bomba ou vento. Em contrapartida a convecção é **natural** ou **livre** se o movimento do fluido é causado por forças de flutuação induzidas por diferenças de densidade, decorrentes da variação da temperatura no fluido (Çengel 2012, 25).

3. **Radiação:** é a energia emitida sob a forma de ondas electromagnéticas como resultado das mudanças nas configurações electrónicas de átomos ou moléculas. Ao contrário da condução e da convecção, a transferência de calor por radiação não exige um meio interveniente (Çengel 2012, 27).



Figura 7: Modos de transferência de calor.

Fonte: Mundo educação.

O resfriamento é um processo fundamental em diversas áreas da ciência, tecnologia, indústria e vida quotidiana, desempenhando um papel importante na preservação, conforto e funcionamento adequado de materiais e sistemas.

Nas indústrias metalúrgicas, uma forma eficaz de arrefecer lingotes, é a partir de convecção forçada usando a água como fluido de trabalho num equipamento apropriado, como o túnel de arrefecimento.

2.4.2. Túnel de arrefecimento

Um Túnel de arrefecimento, também conhecido como *Cooling Tunnel*, é um equipamento utilizado para reduzir rapidamente a temperatura produtos ou materiais em linhas de produção. É geralmente utilizado em indústrias alimentícias, farmacêuticas, metalúrgicas e de plásticos, onde o rápido arrefecimento é necessário para processos de produção eficientes (Dötsch 2005).

O túnel de arrefecimento consiste em uma estrutura que contém um sistema de transporte, como cintas ou correias transportadoras, por onde os produtos passam enquanto são expostos a um fluido refrigerante, geralmente o ar frio ou água. Ilustra-se, abaixo o modelo de um túnel de arrefecimento.



Figura 8: *Cooling Tunnel*.

Fonte: Dalavechia, 2017.

Os túneis de arrefecimento podem ser ajustados para controlar a velocidade do transporte, a temperatura do ar, a humidade e outros parâmetros, de acordo com as necessidades específicas do produto e do processo de fabricação.

Em geral, os túneis de arrefecimento são utilizados nas indústrias devido as inúmeras vantagens que proporcionam aos processos produtivos, como:

- Aumento da produtividade, a medida que há redução do ciclo produtivo devido a tempo de arrefecimento mais curto.
- Preservação e controle da qualidade, por exemplo, nas indústrias alimentícias, onde a exposição prolongada ao calor quer ser evitada.
- Consistência, visto que os produtos recebem um tratamento de arrefecimento uniforme ao longo de todo processo.

- Permite uma maior segurança, uma vez que na metalurgia são usados para resfriar peças quentes até temperaturas seguras de manuseio, evitando queimaduras ou outros acidentes.
- Economia de energia em comparação com outros métodos de arrefecimento mais lentos.

É importante ressaltar que cada aplicação de túnel de arrefecimento pode ter características específicas, dependendo do sector industrial e do tipo de produto a ser arrefecido. Portanto, os projectos e parâmetros operacionais devem ser personalizados de acordo com as necessidades e exigências de cada processo de produção.

Nas indústrias de produção de alumínio, mais concretamente na *Casthouse*, o túnel de arrefecimento é um equipamento industrial projectado especificamente para resfriar lingotes metálicos, por meio de água fria. Este facto permite aumentar a resistência mecânica do metal bem como minimizar os defeitos superficiais, como por exemplo rachaduras ou segregação de elementos, bem como reduzir o consumo de energia.

2.5 . Água de arrefecimento para uso industrial

A água é parte essencial de muitos processos de fabricação e produção em diversas indústrias, visto que pode ser empregue para resfriar máquinas, equipamentos e produtos, assim como manter a temperatura em níveis adequados de modo a garantir a eficiência e a segurança das operações.

Segundo Holmes (1996, 86), o termo **qualidade da água** é utilizado para descrever as propriedades físicas, químicas, biológicas e estéticas da água que determinam a sua aptidão para uma variedade de utilizações e para a protecção dos ecossistemas aquáticos. Muitas destas propriedades são controladas ou influenciadas por constituintes que são dissolvidos ou suspensos em água.

A água de arrefecimento deve seguir parâmetros específicos de qualidade para garantir que não cause corrosão ou incrustação em equipamentos e máquinas. Isso geralmente envolve a remoção de minerais e impurezas que podem afectar negativamente o seu desempenho.

2.5.1 Variáveis da qualidade da água industrial

Neste ponto são apresentados alguns parâmetros físicos e químicos que são determinantes para a qualidade da água do processo de arrefecimento em indústrias metalúrgicas.

❖ pH

O potencial hidrogeniônico (pH) representa a intensidade das condições ácidas ou alcalinas do meio líquido, por meio da medição da presença de iões hidrogênio (Lira 2014, 20).

Segundo Magara (2004), as peças metálicas utilizadas nos sistemas de água de arrefecimento podem sofrer corrosão com valores de pH mais baixo, enquanto o sistema terá deposição de incrustações a um valor de pH mais elevado. Assim, o valor do pH da água de arrefecimento deve ser controlado num intervalo de 7.8 a 8.4.

❖ Dureza

A dureza indica a concentração de catiões multivalentes em solução na água. Os catiões mais frequentemente associados à dureza são os de cálcio e magnésio (Ca^{+2} , Mg^{+2}) e, em menor escala, ferro (Fe^{+2}), manganês (Mn^{+2}), estrôncio (Sr^{+2} ,) e alumínio (Al^{+3}).

❖ Alcalinidade

A alcalinidade é uma medida da capacidade de neutralização de ácidos e, sendo também uma indicação do teor de bases. Os iões que normalmente contribuem para a alcalinidade da água são o bicarbonato (HCO^-) e o carbonato (CO^{-2}), e em valores de pH elevados, o hidróxido (OH^-). Concentrações elevadas de alcalinidade e dureza são conducentes à formação de incrustações.

❖ TSS

Os sólidos em suspensão na água consistem em matéria inorgânica e orgânica, como argila, partículas ou matéria mineral em suspensão, e uma combinação de produtos de decomposição e organismos vivos. A quantidade de matéria em suspensão encontrada nos rios que drenam uma bacia hidrográfica reflecte geralmente o grau de erosão do solo (Monteiro, 2020). Os sólidos em suspensão dão origem à turvação da água e os efeitos podem ser agudos, todavia reversíveis através de processos mecânicos ou químicos.

❖ TDS

A concentração de TDS na água é a medida da quantidade total de sal inorgânico dissolvido na água. Em conjunto com o pH, a temperatura e outras propriedades da qualidade da água, como a dureza total e a alcalinidade totais, os TDS desempenham um papel importante na determinação do potencial de corrosão ou potencial de incrustação de uma fonte de água.

❖ **Turbidez**

A turbidez pode ser definida como uma medida do grau de interferência à passagem da luz através do líquido. A alteração à penetração da luz na água decorre na suspensão, sendo expressa por meio de unidades de turbidez, também denominadas unidades de Jackson ou nefelométricas (Lira 2014).

❖ **Condutividade eléctrica**

A condutividade é a expressão numérica da capacidade de uma água conduzir a corrente eléctrica. A condutividade da água aumenta à medida que mais sólidos dissolvidos são adicionados. Altos valores podem indicar características corrosivas da água (CETESB 2017).

CAPÍTULO 3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO

3.1. Apresentação da empresa MOZAL

O presente estudo surge no âmbito do Estágio Profissional, realizado na empresa de Fundição de Alumínio a MOZAL S.A, de Abril à Novembro de 2023, como melhoria do arrefecimento de lingotes na última etapa do processo de produção.



Figura 9: Ilustração da empresa MOZAL.

Fonte: MOZAL

A empresa Mozal, que se localiza no Parque Industrial de Beluluane à 20 km a oeste da cidade de Maputo, dedica-se a produção e exportação de lingotes de Alumínio. Os lingotes produzidos são destinados à refusão e utilizados como matéria-prima para indústrias de Alumínio secundário.

Como empresa, compreende duas repartições, sendo, uma responsável pelos departamentos de produção: o Carbono, a Redução, a Manutenção, o Tratamento & Logística, a Engenharia e o departamento de Fundição, e outra repartição de serviços, subdividido em: Assuntos Corporativos, Saúde, Segurança & Meio Ambiente, Tecnologia e Informação, Desenvolvimento de Negócio, Recursos Humanos e Finanças.

A MOZAL tem como objectivo fazer a diferença através do desenvolvimento de recursos naturais e preservação do meio ambiente, com vista a melhorar a vida da comunidade e das gerações vindouras. Não obstante, a empresa preocupa-se com a segurança, bem-estar e

formação do colaborador, criando as melhores condições no ambiente de trabalho, uma vez que, os seus principais valores são:

- ❖ O **Cuidado**: “Preocupam-se com pessoas, com as comunidades das quais fazem parte e com o mundo do qual dependem”;
- ❖ A **Confiança**: “Cumpram com seus compromissos e confiam uns nos outros para fazer a coisa certa”;
- ❖ A **União**: “Valorizam a diferença e partilham abertamente, sabendo que juntos são melhores”; e
- ❖ A **Excelência**: “São corajosos e desafiam-se a ser os melhores no que importa”.

3.2. Processo de produção de alumínio da MOZAL

O processo de produção de alumínio na companhia, é complexo e compreende estágios principais, descritos a seguir:

1. Recepção de matéria-prima (alumina, coque e alcatrão), vinda da Terminal de carga do Porto da Matola, e é armazenada em silos e tanques.
2. Produção de Ânodos de Carbono no departamento do *Carbon*: compreende desde a formação da pasta, compactação e moldagem, dando origem ao ânodo verde que a posterior sofre cozedura para ganhar resistência e melhorar as suas propriedades eléctricas. De seguida, ocorre a fixação da haste (condutor eléctrico) do ânodo já cozido.
3. No departamento da *Reduction*, ocorre o processo de redução, em que a alumina fluorada é convertida em alumínio fundido em células electrolíticas (potes) por meio de electricidade e banho electrolítico, constituído por alumina, trifluoreto de alumínio e criolita (este último que reduz o ponto de fusão da alumina).
4. O transporte do metal líquido, obtido na redução, através de LTV e posterior transferência para o forno de espera, que subsequentemente se dá o processo de moldagem em forma de lingotes e a solidificação dos mesmos, no departamento de *Casthouse*.
5. Arrumação sistemática dos lingotes em atrelados de camiões e transporte para a terminal de carga do porto da Matola para exportação do material.

Durante este processo, o departamento de Tratamento e Logística (T&L), participa em todas as fases, tratando: fumos no *Fume Treatment Centre*, gases no *Gas Treatment Centre* e banho electrolítico no *Bath Plant*, bem como, analisando diferentes tipos de amostras das diferentes áreas de produção.

3.3. Estado actual do objecto de investigação

3.3.1. Processo de fundição de lingotes – *Casthouse*

O processo de fundição de lingotes é a etapa final do processo de produção de alumínio. O metal líquido extraído dos potes, é encaminhado à *Casthouse* para tomar a forma de lingotes, depois são agrupados e embalados formando um arranjo de lingotes chamado de *Bundle* para a posterior serem transportados ao Porto. Revela-se essencial que os lingotes apresentem uma consistência no que diz respeito ao tamanho e a qualidade, preconizando o facto de que os *bundles* devem ser embalados correctamente de modo a permitir uma chegada segura ao cliente.

A *Casthouse* é constituída essencialmente por 4 sectores de produção ilustrados e descritos, a seguir:



Figura 10: Apresentação do departamento de fundição – *Casthouse*. a-LWS; b. Fornos de espera; c. Linhas de fundição; d. Planta de tratamento e arrefecimento de água.

Fonte: MOZAL.

- ❖ LWS – responsável pela limpeza, preparação e inspecção dos *ladles* tanto de metal como de banho a fim de estarem prontos para o seu posterior uso.
- ❖ Fornos de espera – para conservação da temperatura do Alumínio líquido para posterior fundição.
- ❖ Linhas de produção, também chamadas de ICM, onde são formados os lingotes. Este departamento tem 5 linhas de produção enumeradas de 1 a 5, sendo cada uma equipada por dois fornos de espera.
- ❖ Planta de arrefecimento e tratamento de água industrial.

O processo de produção de lingotes de Alumínio que ocorre na *Casthouse*, pode ser ilustrado na figura abaixo.

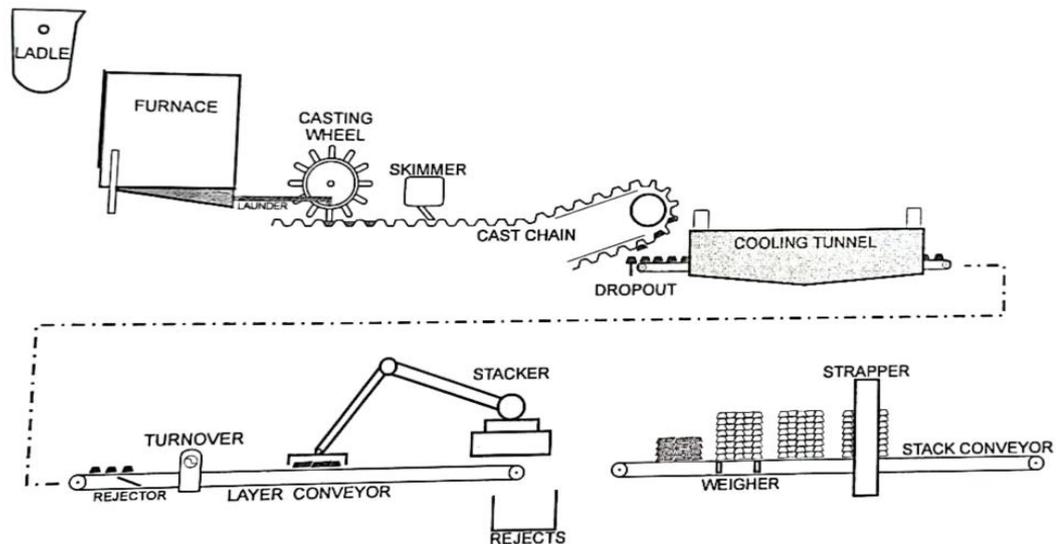


Figura 11: Processo de obtenção de lingotes na *Casthouse*

Fonte: MOZAL.

Depois do processo de Hall-Héroult, na redução, o alumínio é extraído dos potes para os *ladles* (cadinhos), estes que são transportados por veículos especiais, os LTV's, a uma temperatura de aproximadamente 960°C e são transferidos para os fornos de espera. O forno recebe alumínio sólido de modo a estabilizar a temperatura até níveis de operação (730°C – 770°C).

De seguida, a partir de um canal – *launder*, o metal sai do forno e passa pelo *Casting wheel* de modo a ser doseado e vazado para os moldes. É necessário que seja retirada uma camada de óxido na superfície do metal ainda líquido (*Skimming*).

Por meio de uma transportadora de correntes, passa-se ao processo de solidificação do Alumínio nos moldes onde espera-se que a temperatura baixe até aos 500°C. O processo de troca de calor acontece por meio de convecção natural: a parte inferior do molde encontra-se submersa em água, que passa pelas bacias de arrefecimento, ao passo que, o alumínio troca calor com o ar atmosférico pela parte superior.

Após a solidificação do metal líquido no molde, segue-se a zona de desmoldação (*Drop out Area*), onde, por meio da gravidade, se desmolda o lingote e este passa para o túnel de arrefecimento, onde a temperatura deve reduzir de 500 à 50°C. Depois de arrefecidos, é necessário que os lingotes sejam organizados em linhas por meio de *Stacking Robot*, que faz um arranjo ou configuração padrão com 44 lingotes, chamado de *Bundle*. Os *bundles* são

pesados e embalados por meio de cintas plásticas de amarração (*strap*) e prontos para serem carregados nos caminhões com vista a serem transportados e encaminhados ao Porto.

3.3.2. Processo de arrefecimento da *Casthouse*

A água usada na MOZAL é captada no rio Umbelúzi, pré-tratada e decantada, posteriormente é armazenada em dois reservatórios de água industrial com capacidade de 3000 m^3 cada. Em seguida a água passa para a planta de tratamento e arrefecimento da *Casthouse*, onde, primeiro ocorre um processo de filtração na ordem de 10% por um sistema de filtro de areia (SSF), depois o doseamento de químicos, anticorrosivos e biocidas, sendo que a posterior, por meio de tubagens, a água segue as linhas de fundição de alumínio para arrefecimento dos lingotes.

A planta de tratamento e arrefecimento de água usa um ciclo aberto com recirculação. Começa com a entrada de uma quantidade de $35\text{ m}^3/h$ de água fresca vinda dos reservatórios de água industrial, que entra em contacto com a água quente proveniente das linhas, num reservatório denominado *Hotwell*, que é aberto por cima, trocando calor com o ar atmosférico por convecção natural. Em seguida a água é filtrada e por meio de bombas centrífugas é succionada para as torres de arrefecimento (*Coldwell*) onde são doseados químicos para tratá-la, e encaminhada para as linhas. Depois de arrefecidos os lingotes, a água volta à estação de tratamento e um novo ciclo se inicia, sendo que aproximadamente $11\text{ m}^3/h$ de água são descartados de modo a manter as propriedades da água nos padrões exigidas pelo processo.

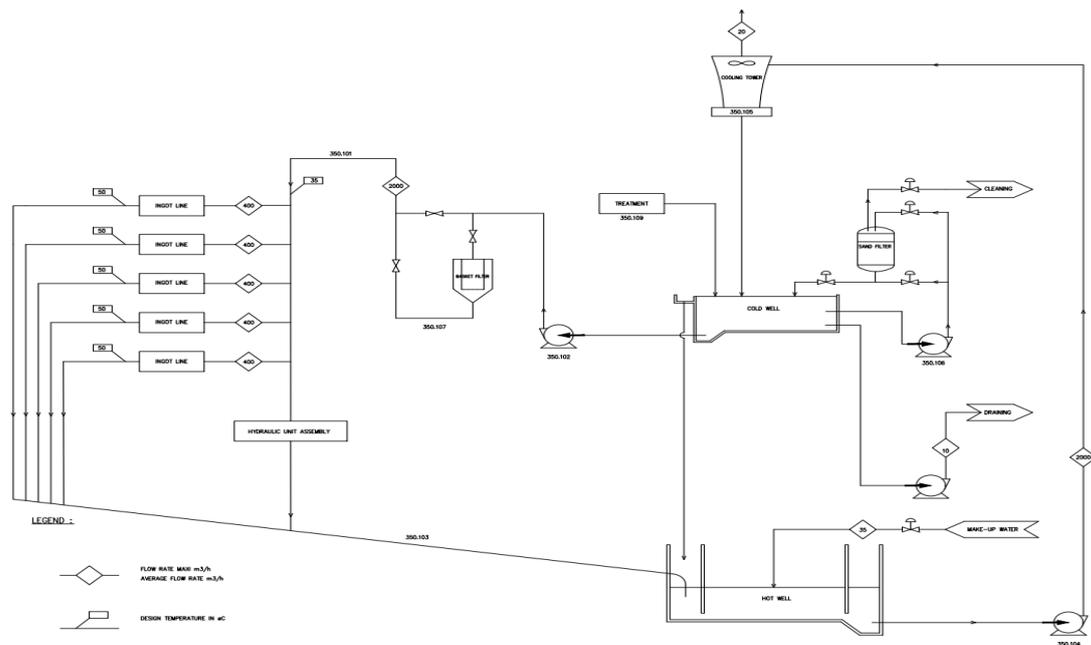


Figura 12: Esquema de arrefecimento de água usada no departamento da *Casthouse*.

Fonte: MOZAL.

Devido a capacidade volumétrica do SSF, somente 10% de toda água é realmente filtrada, tanto que sólidos suspensos e matéria orgânica acabam não sendo retidos, e interferem o processo de arrefecimento de lingotes.

A quantidade de água dedicada ao arrefecimento dos lingotes por linha é de $200\text{ m}^3/h$ e devido a presença de sólidos na tubagem, o volume total para o funcionamento do Túnel de arrefecimento fica comprometido.

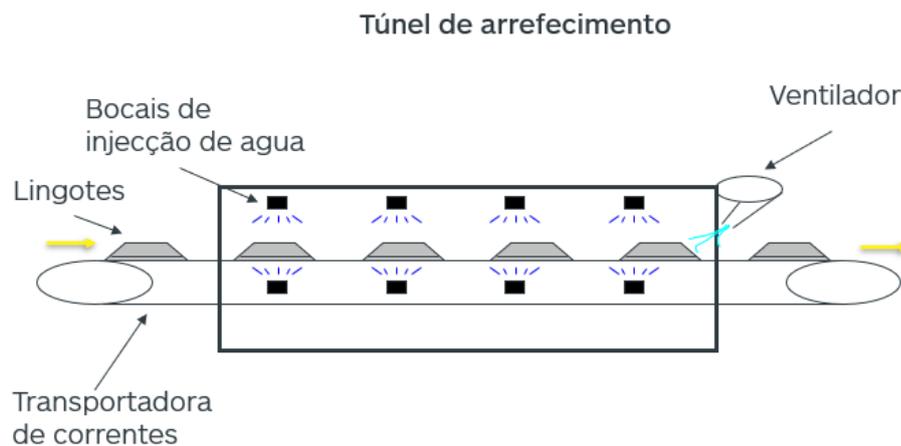


Figura 13: Esquema do Túnel de arrefecimento.

Fonte: Mozal

Após o vazamento e processo de solidificação do alumínio nos moldes, os lingotes devem ser arrefecidos de 500°C até 50°C no Túnel de arrefecimento, em contrapartida, constatou-se que saem do túnel a uma temperatura entre 60°C a 95°C , temperatura esta que é superior a desejada e fora dos padrões aceitáveis. Este facto causa potenciais problemas à produção, a medida que, a presença de lingotes quentes diminui o tempo de vida dos restantes equipamentos da linha, aumenta os custos de produção uma vez que as cintas de amarração (*straps*) perdem sua resistência e deve-se re-embalar os *bundles* para que não haja desintegração dos mesmos, ocorre desgaste das borrachas do *Stacking Robot*, assim como, os autocolantes de perigo e de identificação dos *bundles* queimam e devem ser impressos novamente. Além da produção, os lingotes quentes representam um potencial risco de queimaduras aos operários.

Abaixo são ilustrados alguns dos pontos acima mencionados relativos a presença de lingotes quentes à saída do túnel de arrefecimento.



Figura 14: Consequências de lingotes quentes: a. queima dos autocolantes de identificação do *bundle*, b. desgaste das borrachas do *Stacking Robot*.

A baixa taxa de arrefecimento dos lingotes deve-se a presença de partículas sólidas que se depositam nas bacias, nas condutas e tubagens do circuito de arrefecimento, que causam obstrução das válvulas, dos bocais pressurizados de jactos de água no túnel de arrefecimento, das bombas de recirculação de água e em outros equipamentos.

Como mencionado no capítulo anterior, níveis altos de TSS afectam a qualidade da água, visto que a presença de sólidos em suspensão no abastecimento de água é uma das principais causas de obstrução nos tubos e acaba interferindo o funcionamento normal do equipamento e pode contribuir para a sua deterioração. Os sólidos em suspensão são abrasivos e causam falhas nos vedantes da bomba, rolamentos ou válvulas e controlos. A obstrução é geralmente encontrada nos sistemas de produção de vapor e de água de arrefecimento, pode provocar bloqueios e impedir a circulação dos fluídos.

CAPÍTULO 4. METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

Como forma de resolver a questão de obstrução de bocais e válvulas tem-se como proposta a escolha de uma unidade ultrafiltradora de modo a não permitir que as partículas sólidas passem para o Túnel de arrefecimento, restaurando assim a eficiência do processo de arrefecimento.

4.1. Tipo de investigação

A pesquisa de campo feita, consistiu na colecta directa de dados na Oficina de Fundição, por intermédio de entrevistas, questionários, testes e observações participativas, com o intuito de apurar informações em contextos reais e proporcionando uma compreensão mais aprofundada dos fenómenos.

Para além disso, é feita uma investigação experimental, uma abordagem mais controlada, de forma a avaliar a eficiência actual do processo de arrefecimento de lingotes de Alumínio, por meio de monitoria de parâmetros do processo como a temperatura da água e dos lingotes, a velocidade de escoamento e a vazão volumétrica.

4.2. População e amostra

As linhas de produção 4 e 5 foram instaladas mais recentemente e a linha 2, aquando da realização do projecto, encontrava-se indisponível devido as actividades de destruição e remodelação da estrutura do túnel de arrefecimento, no mês de Agosto, de maneira que, a investigação foi feita nas restantes linhas (1 e 3) que apresentam os maiores problemas de arrefecimento de lingotes.

Como forma de se atingir os objectivos propostos para este projecto, das 5 linhas tem-se como população-alvo 2 linhas de produção de lingotes de Alumínio.

Para a Amostragem, recorre-se a todo processo de arrefecimento das linhas 1 e 3, onde serão monitorados os seguintes parâmetros:

- ❖ A temperatura do lingote à entrada e à saída do Túnel de arrefecimento;
- ❖ A temperatura da água à entrada e à saída do Túnel de arrefecimento;
- ❖ A vazão de água à entrada do Túnel de arrefecimento;
- ❖ Composição química da água à entrada e à saída do Túnel de arrefecimento, onde se dará ênfase aos níveis de concentrações como: TDS, TSS, o pH, a Condutividade, a Dureza e a Alcalinidade.

- ❖ Composição granulométrica das partículas sólidas.

4.2.1. Instrumentos e procedimentos de recolha de dados

Para cada tipo de amostra, serão usados procedimentos e instrumentos diferentes para a recolha dados:

- ❖ **Temperatura do lingote à entrada e à saída do Túnel de arrefecimento**

O procedimento consistiu em medir a temperatura de 10 lingotes consecutivos à entrada e saída do equipamento, usando o Termopar de cabo digital e de contacto tipo K, de modo a aferir o comportamento deste parâmetro durante 4 dias úteis num período de 4 semanas, dependendo da disponibilidade da linha no que concerne às paragens para intervenções da manutenção.



Figura 15: Termopar de cabo Tipo K.

- ❖ **A temperatura da água à entrada e à saída do Túnel de arrefecimento**

Este parâmetro foi monitorado a partir dos painéis que permitem a visualização da temperatura que é medida por meio de termopares RTD existentes no equipamento.

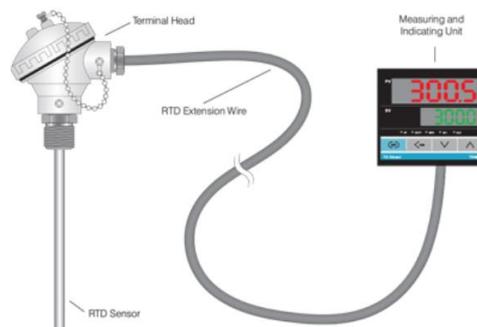


Figura 16: Sensor de temperatura RTD.

Fonte: Directindustry

❖ **A vazão de água à entrada do Túnel de arrefecimento**

Este parâmetro foi monitorado a partir dos painéis que permitem a visualização do fluxo de água medido por meio de medidores de fluxo existentes na empresa.



Figura 17: Medidor de fluxo de água

❖ **Composição química da água à entrada e à saída do Túnel de arrefecimento**

De modo a aferir a composição química, foram colectadas no dia 18 de Julho duas amostras da água de arrefecimento e foram analisadas no Laboratório de Controle e Qualidade Swiss-Lab.



Figura 18: Amostra da água.

❖ **Composição granulométrica das partículas sólidas**

De modo a fazer um correcto dimensionamento do filtro é necessário conhecer a granulometria das partículas. Para tal foi colectada uma amostra de detritos no dia 27 de Julho de 2023 para proceder com o ensaio de granulometria no LENG.

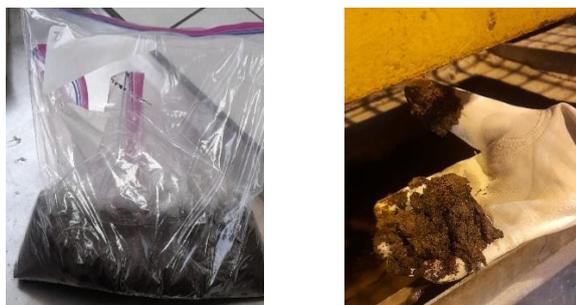


Figura 19: Colecta de amostras das partículas sólidas.

4.3. Tratamento e análise de dados

Depois de recolhidas as amostras, procedeu-se com o tratamento dados e análise das amostras de modo a constituir as variáveis de entrada para a escolha da unidade ultrafiltradora.

Para escolher o filtro é necessário que se tenham dados e variáveis de entrada, como:

- ❖ Vazão e viscosidade do fluído a ser filtrado;
- ❖ Tamanho (granulometria) das partículas ou detritos; e
- ❖ A pressão operacional e a diferença de potencial do sistema.

4.3.1. Análise da granulometria dos detritos

A partir da amostra retirada das partículas sólidas, procedeu-se com o ensaio de granulometria no LENG, de modo a aferir as dimensões dos grãos, para um correcto dimensionamento das malhas ou crivos do filtro.

Como resultado do tratamento dos dados da tabela de ensaio de granulometria que se encontra no anexo 1, abaixo apresenta-se o gráfico ou a curva granulométrica das partículas sólidas.

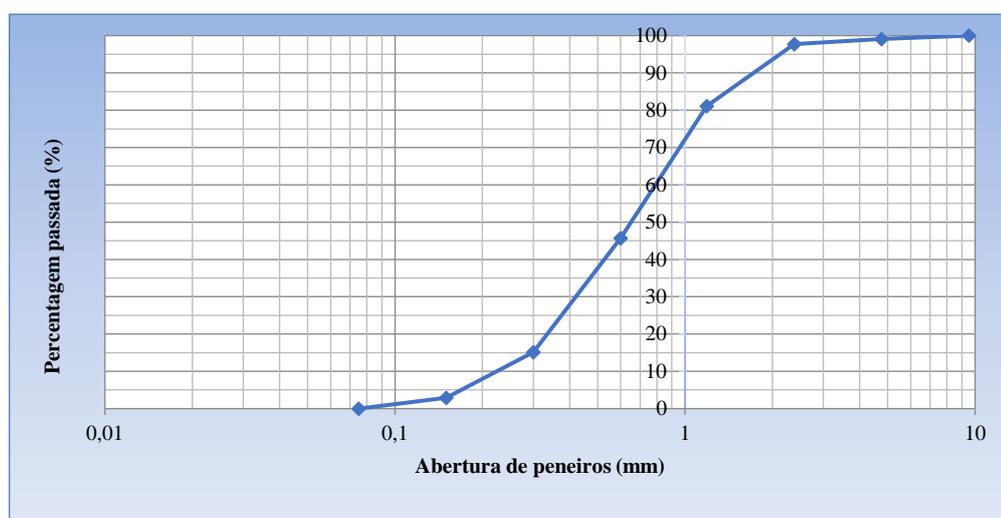


Gráfico 1: Curva granulométrica das partículas suspensas.

Para uma amostra inicial de 350g de detritos, a partir deste gráfico acima, pode se analisar que para uma abertura dos crivos de cerca de 9.52 mm, toda a quantidade de partículas sólidas passa para os subsequentes peneiros. A medida que há diminuição das dimensões da malha, percebe-se que a percentagem de material que passa vai diminuindo até aos 0.075 mm, esta é a dimensão mínima dos detritos. Logo, pelo gráfico, o intervalo de granulometria dos detritos encontra-se entre 9.52mm e 0.075mm.

4.4. Tecnologia de filtração

A tecnologia de separação de misturas, por meio da filtração consiste essencialmente de uma separação por permeação onde o sólido é separado do líquido ou gás fazendo a mistura passar através de uma superfície porosa, chamada meio filtrante.

Segundo Castro (2005), filtração é o processo de passagem de um fluido através de um meio poroso para remoção de matéria em suspensão. No processo de tratamento de água, a matéria a ser removida inclui sedimentos em suspensão, argila, coloides, além de microrganismos, como algas, bactérias e vírus.

Devido a presença de partículas sólidas e da recorrente falha e obstrução das válvulas e dos bocais de água pressurizados, que conseqüentemente resulta numa taxa de arrefecimento fora dos padrões, o presente projecto tem como proposta a instalação de uma unidade ultrafiltradora de água antes da entrada no Túnel de arrefecimento.

Como metodologia, adoptaram-se os seguintes passos para escolha do equipamento:

1. Escolha do tipo de filtro;
2. Escolha do material da estrutura e dos elementos filtrantes;
3. Escolha do formato e dimensões do casco/estrutura e dos tampos (flanges);
4. Dimensionamento dos cestos; e
5. Dispositivos de medição da pressão.

4.4.1. Escolha do tipo de filtro

Escolhe-se o filtro de Cesto – *Simplex Basket Strainer or Basket Filter type EF* pois proporciona uma facilidade de remoção das partículas, possibilita uma fácil limpeza e manutenção dos elementos filtrantes, é de fácil manuseio, permite a protecção aos sistemas industriais, a integridade dos equipamentos e acessórios (tubos, uniões, válvulas), representa um modelo mais compacto, moderno e é idealmente adequado para operações a longo prazo.

O filtro proposto apresenta unidades ou cestos por onde passa a água vinda da planta de arrefecimento e tratamento, sendo que os detritos ficam ali retidos, e o filtrado passa para a tubulação e por meio de bocais e válvulas, a água alimenta o Túnel de arrefecimento e os lingotes são arrefecidos.

O diferencial de pressão aumenta quando os filtros oferecem resistência a passagem da água, quando isto acontece, é necessário fazer a limpeza dos filtros, segundo uma estratégia de manutenção bem definida.

Grande vantagem deste tipo de filtro é que possibilita operações de maiores vazões.



Figura 20: *Simplex Basket Strainer Type EF*.

Fonte: Catálogo Industrialfabrik, Schneider

4.4.2. Escolha do material da estrutura e dos elementos filtrantes

❖ Estrutura

Para escolher o material do equipamento, deve-se ter em conta as condições de funcionamento do equipamento: altas pressões e altas velocidades do fluxo de água, choques e temperaturas médias, bem como o meio corrosivo (água industrial). O factor económico também se deve tomar em consideração na escolha do material: em detrimento de se escolher um aço inox para estrutura, escolhe-se um aço de construção ao carbono revestido de material anticorrosivo (Zinco), de modo a não encarecer o custo de aquisição do equipamento.

Pelo catálogo, anexo 2, escolhe-se para os tubos, a tampa e flanges o aço de construção ao Carbono da norma ASTM A106 – Gr B com as seguintes especificações descritas nas tabelas abaixo:

Tabela 2: Composição química do Aço A106- Gr. B. Fonte catálogo MACSTEEL ASTM

Elemento	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni
%	0.25- 0.3	0.29- 1.06	0.048	0.058	0.1 (min)	0.4	0.15	0.4

Tabela 3: Propriedades mecânicas do Aço A106- Gr. B. Fonte catálogo MACSTEEL ASTM

Propriedade	σ_e (N/mm ²)	σ_r (N/mm ²)	γ (%)
Valor	240	415	20

❖ Elementos filtrantes (cestos)

Pelo catálogo (ver anexo 3) escolhe-se o aço inoxidável da norma ASTM SS - 304 pois é um material resistente à corrosão e usado para peças que trabalham no meio de agressividade média, uma vez que na água industrial são doseados químicos durante o seu tratamento.

O aço inoxidável possui as seguintes especificações:

Tabela 4: Composição química do aço inoxidável SS 304. Fonte catálogo MACSTEEL ASTM

Elemento	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
%	0.8	0.2	0.045	0.03	1	18	10

Tabela 5: Propriedades do Aço inoxidável SS 304. Fonte: catálogo MACSTEEL ASTM

Propriedade	σ_e (N/mm ²)	σ_r (N/mm ²)	γ (%)	Dureza (HB)
Valor	310	600	40 – 60	170

4.4.3. Escolha do formato e dimensões do casco/estrutura e dos tampos (flanges)

Para escolha da estrutura, procede-se com a determinação hidráulica do tamanho, com base nas curvas de queda de pressão, presente no catálogo do fabricante do filtro.

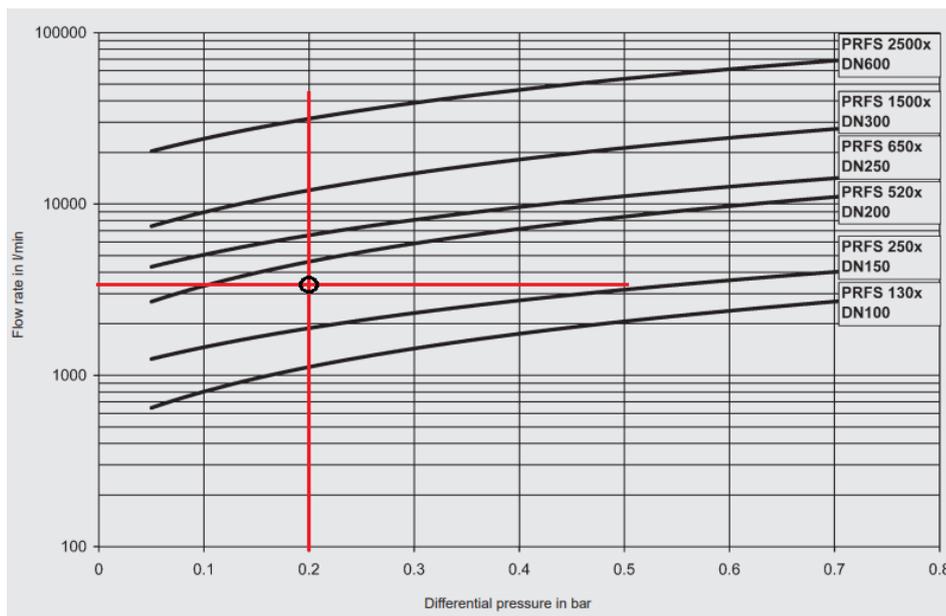


Gráfico 2: Curva de perda de pressão

Segundo o fabricante, para uma pressão de operacional de 4.5 a 5 bar, a diferença de pressão inicial para os *Basket filters* limpos, não deve exceder 0.2 bar.

Daí que, para uma vazão de $200 \text{ m}^3/h$, equivalente a 3333.3 l/min , escolhe-se o modelo de filtro imediatamente acima de modo a deixar uma margem de segurança, que é o PRFS 520X DN200 cujas dimensões em milímetros são descritas na tabela e representadas na figura abaixo:

Tabela 6: Dimensões do *Basket Strainer*. Fonte: Catálogo HYDAC Internacional.

DN1	DN2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	H1	H2
200	200	325	325	1000	635	270	400	1330	1235

H3	H4	L1	D1	D3	D4	E1	E2
750	1670	12	406	379	22	G1/4	G3/4

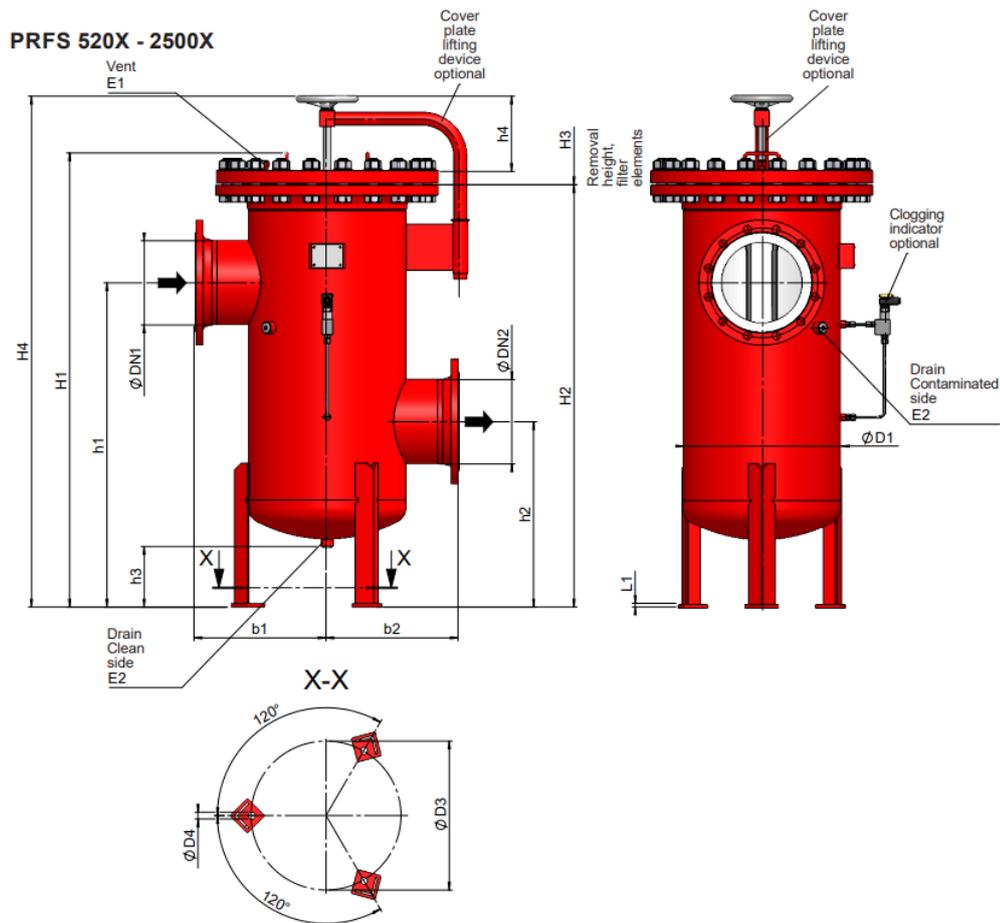


Figura 21: *Basket Strainer* PRFS 520X DN200.

Fonte: Catálogo HYDAC International

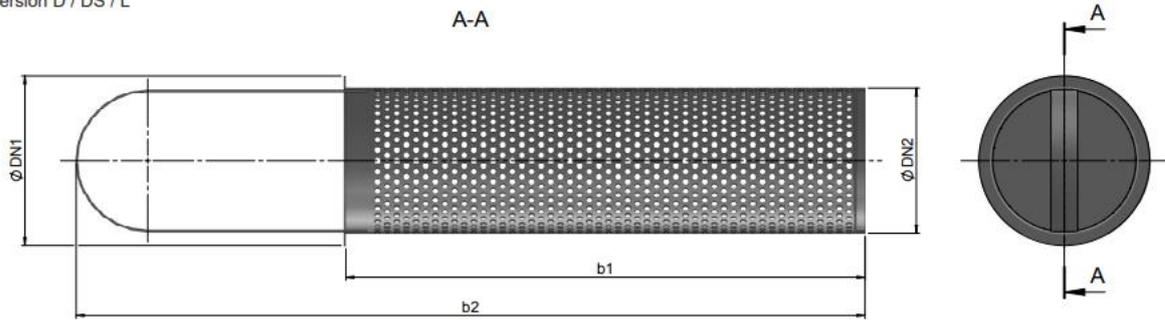
4.4.4. Escolha dos cestos

Para se proceder com a escolha dos *screen baskets*, é necessário que: o menor diâmetro do cesto seja menor ou igual à menor dimensão dos grãos dos detritos:

$$D_{min,matha} < Granulometria_{min,detritos}$$

Para o modelo de filtro escolhido **PRFS 520X DN200**, segundo o catálogo do fabricante, tem-se, no interior da estrutura, o uso de 3 *screen baskets* (cestos) com diferentes perfurações, da série **SK-3-DS-40-K**, cujas especificações e dimensões são ilustradas a seguir:

Version D / DS / L



Specifications in millimetres.

Figura 22: *Screen Basket* (cesto).

Fonte: Catálogo HYDAC Internacional

Tabela 7: Dimensões dos cestos

Modelo	DN1	DN2	b1	b2
SK-3-DS-40-K	160	137	486	738

Cada cesto é equipado por 3 crivos, cujas dimensões são as seguintes:

- ❖ *Chemicron Wire mesh* – Malha de arame *Chemicron*: 60 μm ;
- ❖ *Wedge wire* – malha de cunha: 100 μm ; e
- ❖ *Perforated plate* – placa perfurada: 3000 μm .



Figura 23: Malha de arame (a), malha de cunha (b), placa perfurada (c).

Fonte: adaptado

4.3.5. Dispositivos de medição da pressão

Outro componente importante deve ser tomado em consideração, aquando do dimensionamento dos filtros são os dispositivos de medição de pressão, estes que indicam a pressão a entrada e saída do equipamento. A pressão é um parâmetro importante, pois é o indicador que permite aferir o estado dos cestos filtrantes, pois se o diferencial máximo de pressão for atingido no equipamento, significa que se deve proceder com a limpeza e/ou manutenção dos cestos, sob o risco do *Basket Strainer* perder sua eficiência de filtração e comprometer o volume de água necessário para o funcionamento do Túnel de arrefecimento.

CAPÍTULO 5. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Apresentação e análise dos resultados

No capítulo anterior, foi apresentada a metodologia de resolução do problema, em que se deu enfoque a colecta de dados como temperatura do lingote, a temperatura da água a entrada e a saída do equipamento, o fluxo volumétrico da água na tubagem, a velocidade da transportadora, assim como, a composição química da água de arrefecimento. Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento deste estudo nas linhas 1 e 3 de produção de alumínio no departamento da *Casthouse*.

5.1.1. Linha 1

A colecta de dados baseou-se no apuramento das temperaturas de 10 lingotes consecutivos na zona de desmolde, onde a temperatura deve variar num intervalo de 400°C a 500°C no máximo, assim como a área depois do Túnel de arrefecimento, onde se espera uma temperatura aproximada de 50°C. Não só a temperatura dos lingotes, mas também outros parâmetros foram levados em consideração durante a amostragem, como o fluxo volumétrico e a temperatura da água antes e depois do arrefecimento.

O gráfico a seguir, mostra os valores médios da diferença de temperaturas dos lingotes a nível do Túnel de arrefecimento, num total de 4 semanas.

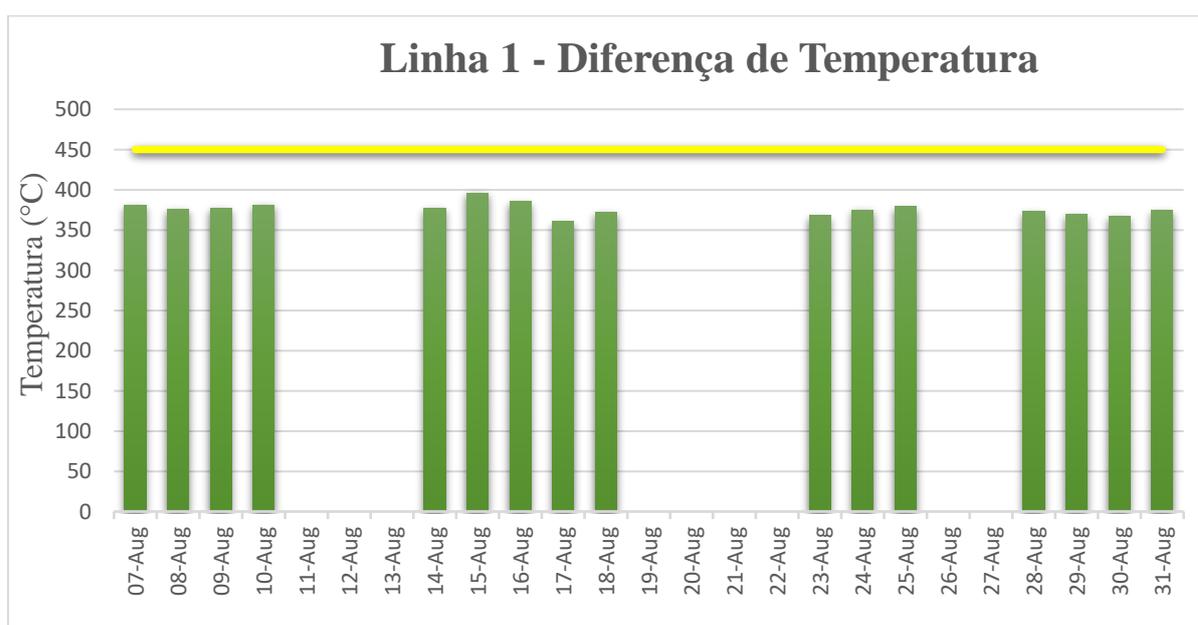


Gráfico 3: Diferença de temperatura a entrada e saída do Túnel de arrefecimento

Com gráfico 3 pode-se analisar a situação actual do arrefecimento dos lingotes na linha 1, quanto maior a diferença de temperatura a entrada e a saída do equipamento, maior a eficiência do sistema de resfriamento. Nos primeiros dias de amostragem (semana 1), verificam-se valores próximos entre si no intervalo de 375°C e 382°C, o mesmo acontece na semana 4 em que a diferença de temperaturas assume os valores entre 366°C e 375°C. Na semana 2 a variação de temperatura não apresenta um padrão determinado, apresenta flutuações de valores, sendo que em menos de 3 dias foi possível se ter o pico e o menor valor de eficiência do equipamento, no gráfico.

Tabela 8: Parâmetros do processo: 15 de Agosto

15.08			
$Speed_{conv} = 15 \text{ ling}/\text{min}$ $T_{o,H_2O} = 29^\circ\text{C}$;			
$T_{H_2O,out} = 55^\circ\text{C}$; $Q_{H_2O} = 188 \pm 1 \text{ m}^3/\text{h}$			
Lingote	$T_{ing,in}$	$T_{ing,out}$	ΔT
1	449.9	57.7	392.2
2	452.3	59.9	392.4
3	458.7	63.1	395.6
4	457.1	62.4	394.7
5	457	61.9	395.1
6	462.4	65.3	397.1
7	461.2	64.9	396.3
8	463.4	66.6	396.8
9	467.2	69	398.2
10	473.7	73.6	400.1
\bar{x}	460.29	64.44	395.8

Tabela 9: Parâmetros do processo: 17 de Agosto

17.08			
$Speed_{conv} = 15 \text{ ling}/\text{min}$ $T_{H_2O,in} = 35^\circ\text{C}$;			
$T_{H_2O,out} = 61^\circ\text{C}$; $Q_{H_2O} = 179 \pm 1 \text{ m}^3/\text{h}$			
Lingote	$T_{ing,in}$	$T_{ing,out}$	ΔT
1	443.9	83.1	360.8
2	438.4	79.7	358.7
3	435.1	75.8	359.3
4	444.1	83.9	360.2
5	434.4	72.4	362
6	437.1	77.6	359.5
7	439	79.9	359.1
8	450.3	86.2	364.1
9	446.1	84.1	362
10	439.5	82.1	357.4
\bar{x}	440.8	80.5	360.3

As tabelas acima, representam os dias com maior e menor taxa arrefecimento em termos de temperatura (15 e 17 de Agosto) encontrados no gráfico 3. É possível analisar que a uma velocidade da transportadora de 15 unidades/min e sendo debitado um fluxo de aproximadamente $188 \pm 1 \text{ m}^3/\text{h}$ consegue-se uma variação de 395.8°C como média de arrefecimento, em contrapartida, à mesma velocidade da transportadora, mas com um fluxo de $179 \pm 1 \text{ m}^3/\text{h}$ têm-se variações de temperatura de lingotes no intervalo de 357 a 365°C , com este ponto se conclui que quanto maior o fluxo debitado maior a eficiência de arrefecimento.

Uma outra abordagem, pode ser levada a cabo, quando se tem em conta a média das temperaturas e o fluxo da água de arrefecimento. Com a tabela do anexo 5, verifica-se pouca variação do diferencial da temperatura da água, mesmo com a oscilação dos outros parâmetros.

5.1.2. Linha 3

A mesma abordagem desencadeada na linha 1, foi feita na linha 3, colectaram-se dados do processo de arrefecimento de 10 lingotes consecutivos, e assumindo valores médios, foi possível obter os resultados ilustrados no gráfico a seguir:

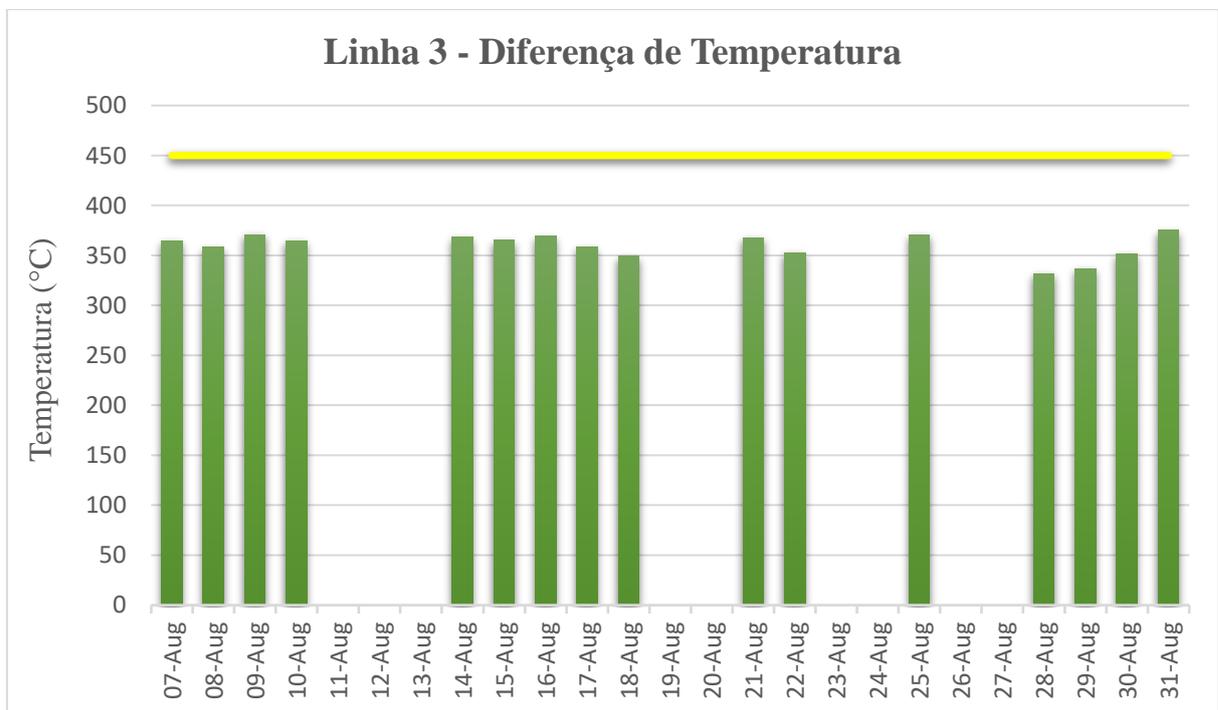


Gráfico 4: Diferença de temperatura dos lingotes linha 3

Olhando para o gráfico, pode-se concluir que o Túnel de arrefecimento da linha 3 apresenta valores de diferença de temperatura altos relativamente à linha 1, todavia não sejam os valores predefinidos pelo fabricante.

A descida brusca do dia 28, que se estendeu nos dois dias seguintes, explica-se pelo facto da válvula de entrada de água de recirculação encontrar-se fechada após a paragem da linha para intervenções de manutenção programada, e como consequência os lingotes não foram devidamente arrefecidos e apresentavam um intervalo de temperaturas entre 123°C à 133°C. Depois de aberta a válvula, no 31 de Agosto atingiu-se um nível de arrefecimento consideravelmente alto, o que permite concluir que a interrupção ou insuficiência da água em algumas secções do túnel, também é um factor determinante para eficiência de processo de arrefecimento dos lingotes, associada à obstrução de válvulas.

Ver anexo 7, para visualização elucidativa dos parâmetros médios do processo de arrefecimento da linha 3.

À saída do Túnel de arrefecimento, os lingotes desta linha apresentam temperaturas muito elevadas, na ordem de 70°C a 130°C. Olhando a média da diferença de temperatura da água de (± 7) à entrada e à saída do túnel, constata-se que a troca de calor entre os lingotes e a água não efectiva, e mesmo com fluxos de água aproximados de $200 \text{ m}^3/\text{h}$ não se obtém o nível esperado de arrefecimento. O que prova que devido à condutas e válvulas bloqueadas, o lingote não recebe a mesma quantidade de água em todas as secções do túnel, e consequentemente não é atingido um índice desejável de arrefecimento.

5.1.3. Análise da transferência de calor durante o processo de arrefecimento de lingotes – Estado actual de arrefecimento

Com os resultados obtidos com a monitoria do equipamento, importa analisar a transferência de calor durante o processo de arrefecimento de lingotes. De salientar que, os cálculos efectuados são baseados em valores aproximados e considerando as condições extremas, são cálculos estimativos de modo a ter valores que se aproximam a realidade.

Suposições

- ❖ Existem condições de operação em regime permanente.
- ❖ Assumem-se valores constantes das propriedades do Alumínio para a temperatura média.
- ❖ A transferência de calor por radiação é desprezada.

Abaixo apresenta-se a tabela de dados de entrada do processo.

Tabela 10: Dados do processo

Grandeza	Descrição	Grandeza	Descrição
Caudal médio volumétrico da água	$Q_{H_2O} = 184.42 m^3/h$	Temperatura inicial do lingote	$T_{o,lingt} = T_s = 448.68^\circ C = 721.68K$
Temperatura inicial da água de resfriamento	$T_{o,H_2O} = 30^\circ C = 303K$	Massa do lingote	$m = 24.3kg$
Densidade da água	$\rho_{H_2O,30^\circ C} = 996 kg/m^3$	Densidade do alumínio	$\rho_{Al} = 2702 kg/m^3$
Condutividade térmica da água	$K = 0.615 W/m \cdot K$	Calor específico	$c_{p,AL} = 903 J/kg \cdot K$
Número Prandtl	$Pr = 5.42$	Volume do lingote	$V = 0.009m^3$
Viscosidade dinâmica	$\mu = 0.798 \cdot 10^{-3} Kg/m \cdot s$	Número de válvulas	22
Área da tubagem	$A = 0.001579m^2$	Diâmetro Hidráulico	$D_h = l = 114mm$

Em seguida se efectua o cálculo de algumas grandezas importantes para a transferência de calor até ao cálculo da eficiência do processo de arrefecimento.

- ❖ Cálculo da velocidade de escoamento do fluido

$$U = \frac{Q}{n_v * A} = 1.47 m/s$$

- ❖ Cálculo do número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho_{H_2O,30^\circ C} * U * L_c}{\mu} = 210274.48$$

- ❖ Cálculo do número de Nusselt

Para o número de Reynolds encontrado, a fórmula de Nusselt toma os seguintes valores:

$$Nu = C * Re^m * Pr^n$$

$$Nu = 0.207 * Re^{0.805} * Pr^{\frac{1}{3}} = 913.85$$

- ❖ Cálculo do coeficiente de transferência de calor

$$h = \frac{Nu * K}{D_h} = 4929.96$$

- ❖ Cálculo do fluxo de calor por unidade de área \dot{q}

$$\dot{q} = h * (T_{o,lingt} - T_{o,H_2O}) = 2064076.87 \text{ W/m}^2$$

- ❖ Tendo o fluxo por unidade, obtém-se a temperatura final do lingote

$$\dot{q} = \dot{m} * c_{p,AL} * (T_{o,lingt} - T_{final,lingt})$$

$$T_{final,ing} = T_{o,ing} - \frac{\dot{q}}{\dot{m} * c_{p,AL}} = 351.51\text{K} = 78.51^\circ\text{C} \approx 79^\circ\text{C}$$

- ❖ Eficiência do processo de arrefecimento de lingotes

$$EER = \frac{T_{o,ing} - T_{final,lingt}}{T_{o,ing} - T_{final,desejada}} = \frac{721.7 - 351.5}{721.7 - 323} = 92.8\%$$

A temperatura de 50°C é a temperatura ideal de arrefecimento dos lingotes, e representa o valor no qual se atinge o nível máximo de eficiência do processo, visto que a temperaturas mais baixas, os autocolantes de identificação dos *bundles* não aderem a superfície do lingote, e temperaturas mais elevadas comprometem a segurança e os equipamentos subsequentes da linha.

Nas condições actuais de funcionamento e segundo os parâmetros médios do processo, consegue-se uma temperatura final do lingote de 78°C, uma temperatura elevada e fora das especificações desejadas.

5.1.4. Composição química da água de arrefecimento

Também importa analisar o resultado obtido aquando da colecta de amostra de água referenciada no capítulo anterior. Os resultados da amostragem são mostrados no anexo 7.

O sistema de arrefecimento da *Casthouse* é um sistema de recirculação aberto, e existe um padrão definido de acordo com as especificações do funcionamento do sistema. É importante garantir que a água atenda a padrões de qualidade específicos e seja adequada para o uso pretendido.

Para a amostra de água que fora retirada, foram analisados os seguintes parâmetros físicos e químicos: a Turbidez, os TDS, os TSS, o pH, a condutividade, a alcalinidade e a dureza da água.

Tabela 11: Resultados obtidos com a amostra de água de arrefecimento

	Turbidez (ppm)	Condutividade (us/cm)	pH	TDS (mg/l)	TSS (mg/l)	Alcalinidade Total (mg/l)	Dureza (mg/l)
Padrão	<15	1600 - 1800	7.8-8.4	<450	<15	<450	<450
Resultados Laboratório (18.07)	15.2	1124	7.86	598	27	123	467

Comparando os resultados obtidos no laboratório, pode se tirar as seguintes ilações:

- ❖ A concentração de TDS na água é a medida da quantidade total de sal inorgânico dissolvido na água. Neste caso, o TDS apresenta um resultado acima do intervalo admissível, ou seja, na ordem de 33% além do recomendado. Segundo Holmes (1996, 91), para o valor entre 450 e 800 *mg/l*, em termos de condição dos equipamentos e estruturas, há possibilidade de pequenos danos como resultado de corrosão e incrustação.
- ❖ O TDS não deve ser observado como um parâmetro isolado, deve ser feita correlação entre o TDS, a condutividade, dureza da água, o pH e a alcalinidade pois representam em conjunto, um potencial de corrosão e incrustação. O sistema de tratamento da água de arrefecimento contempla o uso de produtos químicos para corrigir ou retardar o processo de corrosão e de incrustação.
- ❖ Os valores de condutividade, de pH e de alcalinidade encontram-se dentro dos intervalos predefinidos para uso operacional na *Casthouse*.
- ❖ Em relação aos TSS, sólidos suspensos, constatou-se que este parâmetro apresenta um desvio de 12 *mg/l* além do predefinido, um total de 27 *mg/l*, valor consideravelmente alto. Conforme o Holmes (1996, 83) para o valor compreendido entre 20 – 50 *mg/l*, em termos de condição dos equipamentos e estruturas, tem-se danos moderados a significativos devido a incrustações e/ou MIC, o que constitui interferência moderada à significativa ao processo.
- ❖ Dado que a Turbidez é provocada por partículas em suspensão, e o parâmetro TSS está fora do intervalo aceitável, era de se esperar que este parâmetro assumisse um valor também muito fora dos padrões, mas somente ultrapassou o *setpoint* em 0.2 *NTU*.

Abaixo apresenta-se o gráfico dos TSS em relação ao mês de Julho.

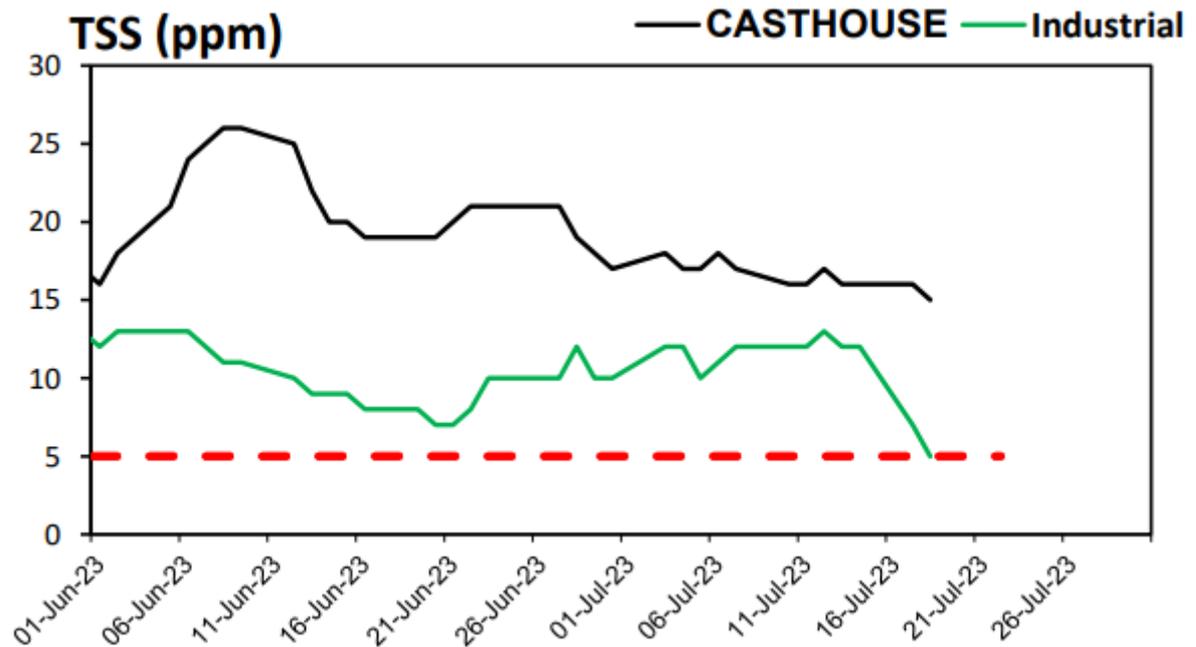


Gráfico 5: Monitoria do parâmetro TSS.

Fonte: Laboratório Aquarel

A tendência do gráfico é de assumir valores acima dos 15 mg/l, que vai além da especificação e que acelera a taxa de bloqueio das tubagens e válvulas do Túnel de arrefecimento e interfere no funcionamento do sistema de arrefecimento de lingotes. Este aumento explica-se pelo facto de apenas 10% do volume total da água ser filtrada, sendo que devido a magnitude de utilização e de ciclos de água, as partículas e certos detritos, passam para o equipamento e interferem no funcionamento do sistema de arrefecimento.

5.2. Discussão dos resultados

O Túnel de arrefecimento foi concebido de maneira a arrefecer os lingotes de uma temperatura aproximada de 500°C aos 50°C, funcionando com uma vazão de entrada de 200m³/h de água a temperatura de até 35°C, tendo uma velocidade da transportadora de arrefecimento de 17 lingotes/min. O equipamento é constituído por duas secções de arrefecimento, a saber:

- ❖ Secção de água de recirculação, para evitar choque térmico do metal já solidificado; e
- ❖ Secção da água fresca vinda da estação de arrefecimento e tratamento.

A linha 1 tem a particularidade de funcionar a 15 lingotes/min, com esta velocidade, se esperava que os lingotes, devido ao maior tempo de exposição ou contacto com a água, fossem

arrefecidos até o nível desejado, mas analisando o gráfico 3, os valores das medições mostram outra realidade.

Contudo, foi feita inspecção e monitoria do equipamento e verificou-se que os diâmetros efectivos das válvulas e bocais de injeção reduziram e água passa com dificuldades em algumas secções do túnel. Assim sendo, o valor do fluxo que é impulsionado, não é o fluxo debitado de maneira uniforme em todas as secções do Túnel de arrefecimento, o que confirma o problema recorrente de obstrução causados por substâncias que se sedimentam nas condutas bem como a progressiva incrustação nas tubagens.

A linha 3 funciona com uma velocidade de produção de 17 lingotes/min, segue a especificação do fabricante, mas em contrapartida, o tempo de exposição dos lingotes à água é menor. Analisando o anexo 6, a temperatura de saída do lingote apresenta flutuações, tendo uma média de 88°C, sabendo que se atinge 100% de efectividade do processo a 50 °C, esta linha de produção não apresenta condições desejáveis para um arrefecimento dos lingotes, o que aumenta os custos de produção e reduz o tempo de vida dos equipamentos que entram em contacto com o lingote quente, como as transportadoras, os sensores e o *Stacking Robot*.

Para o problema de obstrução de bocais, válvulas, bicos que injectam água para o arrefecimento de lingotes no Túnel de arrefecimento, é proposta a instalação de um *Basket Strainer*, cujas especificações encontram-se descritas na tabela abaixo, de acordo com os pontos levantadas no capítulo 4.

Tabela 12: Características do filtro seleccionado.

	Aspecto	Descrição
Estrutura (o casco)	Tipo	Simplex Basket Strainer Type EF
	Modelo	PRFS 520X DN200
	Material	ASTM A106 – Gr B
Material filtrante (Basket)	Serie	SK-3-DS-40-K
	Material	ASTM SS - 304
	Unidades	3
	Malhas	
	· <i>Chemicron Wire mesh</i>	60 µm
	· <i>Wedge wire</i>	1000 µm
	· <i>Perforated plate</i>	3000 µm

Tabela 13: Parâmetros do filtro seleccionado

Especificação da linha		Filtro seleccionado	
Vazão volumétrica	200 m ³ /h	Vazão volumétrica	120 – 300 m ³ /h
Pressão operacional ICM	≤ 4.8 bar	Pressão operacional	≤ 6 bar
Granulometria _{min,detritos}	75 μm	D _{min,malha}	60 μm

Com a instalação do *Basket Strainer* espera-se aumentar o tempo de vida da conduta principal, diminuir os níveis de obstrução nas válvulas e bocais, retardar o fenómeno de incrustação nos tubos e conseqüentemente diminuir os custos de manutenção e prolongar a vida útil de todo o equipamento.

Este dispositivo apresenta medidor de pressão, que é o factor que permite visualizar o estado de saturação no interior do mesmo, ou seja, indica quando os cestos estão cheios e deve ser feita uma intervenção para manutenção e limpeza.

O *Basket Strainer* instalado é dotado de um sistema alternativo para casos em que o filtro apresente indisponibilidade ou bloqueie durante o funcionamento do Túnel de arrefecimento. Este sistema permite que durante a processo de fundição de alumínio, mesmo com indisponibilidade do *Basket Strainer* a água passe por outra conduta e chegue ao equipamento de modo a não parar a linha e continuar com a produção dos lingotes.

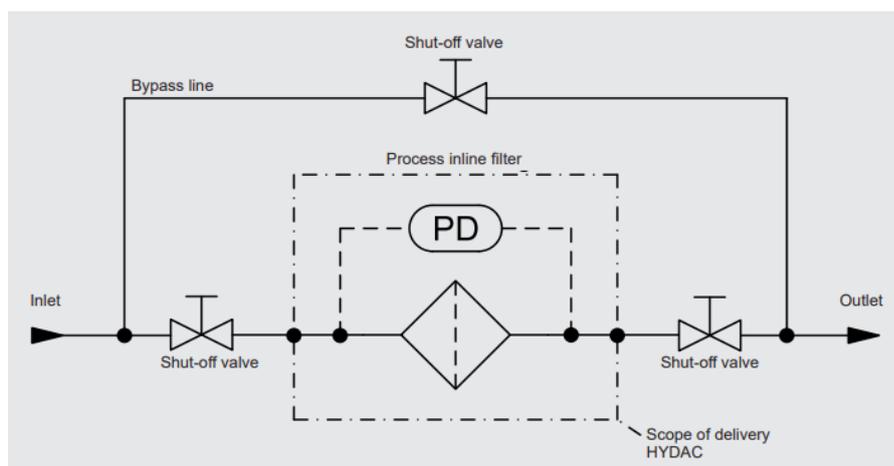


Figura 24: *Basket strainer system.*

Fonte: Catálogo HYDAC International

5.2.1. Prognóstico de transferência de calor após a instalação do *Basket Strainer*

Este ponto tem em vista a dar a conhecer a taxa de melhoria do índice de resfriamento do lingote, depois da instalação do *Basket Strainer*.

Suposições

- ❖ Existem condições de operação em regime permanente
- ❖ Assumem-se valores constantes das propriedades do Alumínio para a temperatura média.
- ❖ A transferência de calor por radiação é desprezada.

Tabela 14: Dados de entrada para o cálculo da transferência de calor

Grandeza	Descrição	Grandeza	Descrição
Caudal médio volumétrico da água	$200 \text{ m}^3/h$	Temperatura inicial do lingote	$T_{ing,in} = T_s = 450^\circ\text{C} = 723\text{K}$
Temperatura da água de resfriamento	$T_{H_2O,in} = 30^\circ\text{C} = 303\text{K}$	Massa do lingote	24.3kg
Densidade da água	$\rho_{H_2O,30^\circ\text{C}} = 996 \text{ kg/m}^3$	Densidade do Alumínio	$\rho_{Al} = 2702 \text{ kg/m}^3$
Condutividade térmica da água	$K = 0.615 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	Calor específico do Alumínio	$c_{p,AL} = 903 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$
Número Prandtl	$Pr = 5.42$	Volume do lingote	0.009 m^3
Viscosidade dinâmica	$\mu = 0.798 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m} \cdot \text{s}$	Número de válvulas	22
Área da tubagem	$A = 0.001579 \text{ m}^2$	Diâmetro Hidráulico	$D_h = l = 114\text{mm}$

- ❖ Cálculo da Velocidade de escoamento do fluido

$$U = \frac{Q}{n * A} = 1.6 \text{ m/s}$$

- ❖ Cálculo do número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho_{H_2O,30^\circ\text{C}} * U * L_c}{\mu} = 227939.82$$

- ❖ Cálculo do número de Nusselt

Para o número de Reynolds encontrado, a fórmula de Nusselt toma os seguintes valores:

$$Nu = C * Re^m * Pr^n$$

$$Nu = 0.207 * Re^{0.805} * Pr^{\frac{1}{3}} = 975.16$$

- ❖ Cálculo do coeficiente de transferência de calor

$$h = \frac{Nu * K}{D_h} = 5260.73$$

- ❖ Cálculo do fluxo de calor por unidade de área \dot{q}

$$\dot{q} = h * (T_{ing,in} - T_{H2O,in}) = 2209505.12 \text{ W/m}^2$$

- ❖ Tendo o fluxo por unidade, obtém-se a temperatura final do lingote:

$$\dot{q} = \dot{m} * c_{p,AL} * (T_{o,ing} - T_{final,ing})$$

$$T_{final,ing} = T_{o,ing} - \frac{\dot{q}}{\dot{m} * c_{p,AL}} = 326.75\text{K} = 53.75^\circ\text{C} \approx 54^\circ\text{C}$$

- ❖ Eficiência do processo de arrefecimento

$$EER = \frac{T_{o,ing} - T_{final,ing}}{T_{o,ing} - T_{final,desejado}} = \frac{721.7 - 326.7}{721.7 - 323} = 99.1\%$$

Com a instalação do *Basket Strainer*, assumindo que os tubos são novos, que o diâmetro nominal continua inalterado sem nenhum material sedimentado e com os mesmos parâmetros do processo, espera-se um ganho de 6.3% de eficiência do processo de arrefecimento. E que a temperatura final do lingote baixe até aproximadamente 54°C. O valor esperado de temperatura, o valor que torna o processo de arrefecimento a operar a 100% é 50°C.

Estimativa do orçamento para instalação do filtro

Aquisição do equipamento	Valor (Mts)
Estrutura	344,160.88
Cestos filtrantes	102,831.81
Consumíveis	26,000.00
Subtotal	472,992.69
Soldador (12h)	6,264.00
Supervisor (12h)	9,768.00
Serralheiro (12h)	6,024.00
Subtotal mão-de-obra	22,056.00
Total geral	968,041.38

Este orçamento total de 968,041.38 Meticais representa um valor viável, em detrimento de construir uma nova planta com tecnologia avançada usando 3 a 4 filtros de areia e carvão fino com capacidade de filtrar toda quantidade de água requerida no processo de arrefecimento.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

Neste trabalho foi feita uma análise do comportamento do processo de arrefecimento dos lingotes em duas ICM do departamento de fundição, a partir da monitoria de parâmetros do processo como a temperatura, a vazão e a velocidade de escoamento da água. Foi possível perceber que nenhuma das linhas consegue arrefecer devidamente o lingote até a temperatura desejada de 50°C, e algumas vezes o lingote sai do túnel, a uma temperatura de 100°C, que representa o dobro do desejado.

De salientar que os 50°C desejados representam o valor máximo que se possa baixar, uma vez que se usa o calor remanescente para permitir que os autocolantes de identificação do *bundle* possam aderir ao lingote e não borrar a tinta dos códigos de barras. Acima desta temperatura, o funcionamento normal dos equipamentos subsequentes da linha fica comprometido.

Foi analisado o impacto que a qualidade da água, mais concretamente ligada aos parâmetros físicos (os TSS), pode trazer aos sistemas de arrefecimento desde agravar taxa de incrustação assim como, bloqueios e obstruções nos equipamentos e trocadores de calor.

Fez-se o estudo da eficiência do processo actual de arrefecimento de lingotes, dando ênfase a análise da transferência de calor que ocorre durante o processo.

De acordo com o estudo efectuado, foi feita escolha e proposta de instalação de unidade ultrafiltradora em todas as linhas de fundição. Com a instalação do filtro consegue-se a restauração da eficiência do sistema de arrefecimento de lingotes, numa percentagem final de 99.1%.

Com este trabalho, foi possível melhorar a taxa de arrefecimento em 6.3% e a saída do túnel os lingotes que antes eram arrefecidos num intervalo de 70 – 95°C, espera-se que sejam arrefecidos até 54°C.

6.2. Recomendações

Uma vez que este trabalho é de carácter didático e se tem como projecção, a restauração do processo de arrefecimento de lingotes do departamento da *Casthouse*, através da redução da taxa de bloqueios dos tubos e válvulas, abaixo destacam-se aspectos que podem complementar e ampliar o estudo.

- ❖ Substituição das principais condutas, tubos e bocais, aquando da instalação do filtro, de modo a estender o tempo de vida útil do equipamento e evitar futuros problemas de obstruções acentuados.
- ❖ Realização de uma análise da viabilidade económica da implantação.
- ❖ Elaboração de uma estratégia de manutenção que vá de acordo com o carácter de operações desempenhadas na *Casthouse*.

6.3. Limitações da pesquisa

- ❖ A disponibilidade das linhas, constituiu uma limitação para a colecta de amostras de temperatura dos lingotes em alguns dias, isto devido as paragens programadas para manutenção preventiva que acontece de 3 em 3 semanas.
- ❖ Insucesso na identificação dos reagentes químicos para fazer a análise da composição química, orgânica e inorgânica das partículas sólidas suspensas encontradas na água de arrefecimento.
- ❖ Impossibilidade de fazer o balanço energético para a determinação do coeficiente de performance do Túnel de arrefecimento.

6.4. Sugestões para trabalhos futuros

- ❖ Análise da proficiência do SSF existente na planta de tratamento e arrefecimento de água industrial.
- ❖ Estudo da eficiência dos trocadores de calor dos sistemas hidráulicos dos fornos de espera.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BALDAM, Roquemar, Estefano Viera, 2012, *Fundição: Processos e Tecnologia Correlatas*, São Paulo, Érica Editores.
2. CARDOSO, José, Pedro Carvalho, Paulo Fonseca, Marcelo Silva, e Marco Rócio, 2011, *A indústria do alumínio: estrutura e tendências*, s.n, Biblioteca digital, BNDES.
3. CASTRO, Kevin, Gary Logsdon, Stephen R. Martin, 2005, *High-Rate Granular Media Filtration*, Em *Water Treatment Plant Design*, American Water Works Association - AWWA, 4 ed, McGraw-Hill, USA.
4. ÇENGEL, Yunnus, Afshin Ghajar, 2012, *Transferência de Calor e Massa*, Mc. Graw Hill, 4 ed., USA.
5. CETESB – Companhia Ambiental Do Estado De São Paulo, 2017, Apêndice E: *Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade*, Em *Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo*, Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>, consultado em Setembro de 2023.
6. DÖTSCH, Erwin, 2005, *Melting processes for non-ferrous metals*, Em *Handbook of Thermoprocessing Technologies*, Vulkan-Verlag, Rep. of Germany.
7. FERRARI, Ricardo Bulcão, 2008, *Caracterização de liga metálica a base de alumínio – magnésio obtida por método convencional após tratamentos termomecânicos visando estruturas microcristalinas*, Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, Brasil.
8. HOLMES, S., ed. 1996, *South African Water Quality Guidelines*, Em *Industrial Use*, Department of Water Affairs and Forestry, 2 ed, Pretória, Republic of South Africa, ISBN 0-7988-5338-7 1996.
9. INCROPERA, Frank P., et al, 2008, *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 6 ed, LTC, Rio de Janeiro.
10. LIRA, Osman, 2014. *Manual de Controle de Qualidade da Água para Técnicos que trabalham em ETAS*, Departamento de Saúde Ambiental, Fundação Nacional de Saúde, Ministério da Saúde, Brasília.
11. LUMLEY, Roger, 2011, *Introduction to aluminium metallurgy*, Em *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.
12. MAGARA, Yassumoto, 2004, *Water Quality Standards*, Hokkaido University, Sapporo, Japan, (s.n).

13. MÁRTIRES, Raimundo, 2001, *A descoberta do Alumínio*, Balanço Mineral Brasileiro, Brasil, sn.
14. MASSARA, Vanessa, 2004, Tese de Doutorado, *Produção de Alumínio sob o ponto de vista de consumo de energia*, Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, Brasil.
15. MONTEIRO, Lucas, 2020, *Sistema de Monitoramento da Qualidade da água em tempo real*, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, Brasil.
16. SILVA, Lino, Deise Shibata, 2013, *Lingotamento Contínuo*, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade De São Paulo.
17. SUKLA, Lala, Debabrata Pradhan, 2019, *Alumina & Bauxite: Bayer Process and Non-conventional Processing*, Em *The Minerals Metals & Materials Series, Light Metals*, Avonmore, PA, USA.
18. WATANABE, Henrique, 2012, *Análise da curva de resfriamento da liga AA 356*, Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica, Guaratinguetá.
19. <https://www.hydro.com/pt-BR/imprensa/noticias/2019/albras-lanca-nova-liga-de-aluminio-primario-na-feira-da-industria-do-para/>, último acesso 18 de Agosto de 2023.
20. https://www.aluminiumleader.com/production/how_aluminium_is_produced/, último acesso 18 de Agosto.
21. <https://www.infoescola.com/rochas-e-minerais/bauxite/> último acesso 10 de Julho.

BIBLIOGRAFIA

1. ALVES, Álvaro, 2017, *Extracção de Alumina – Uma Avaliação dos Parâmetros Influentes*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal do Pará, Brasil.
2. CASTRO, Bruno, 2015, *Avaliação da corrosão em operações de remoção de incrustações carbonáticas*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
3. DALAVECHIA, André, 2017, *Optimização da Performance de Congelamento de Produtos Frigoríficos em Túneis Contínuos*, Tese de monografia, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Panambi, Brasil.
4. EVANGELISTA, Adônis, Jefferson Silva, 2020, *Processo de fundição e sua versatilidade na fabricação de peças*, Revista Científica Multidisciplinar do Núcleo do Conhecimento, Ano 05, ed. 03, Vol 11, 21-50. ISSN: 2448-0959.
5. GOTO, Adriano Mitsuo, 2016, *Análise pelo método dos elementos finitos da fixação Haste-Anodo empregado na cuba eletrolítica Hall-Hérault*, Universidade Federal do Maranhão.
6. MAJEKODUNMI, S. O, Olorunsola E., 2014, *Review of Some Recent Advances on Filtration in Pharmaceutical Industry*, Departament of Pharmaceutical Technology, University of Uyo, Uyo, Vol. 9, Nigeria.
7. MATIAS, Rafael, 2017, *Análise da influência da condição de entrada de lingotes e de retorno de fundição de alumínio no processo de fusão de um forno de fusão tipo soleira seca*, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
8. NASCIMENTO, Paulo, 2019, *Dimensionamento de Filtros Rápidos Por Gravidade de uma Estação de Tratamento de Água de Ciclo Completo*, Trabalho de conclusão de curso, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.
9. OLIVEIRA, Cesar, 2010, *Alteração das Propriedades Superficiais do Alumínio via Electrólise a Plasma*, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista.
10. SELWYN, Lyndsie, ed. 2019, *Aluminum: Modern Metal in Cultural Heritage*, Em “*Aluminum: History, Technology and Conservation*”, Washington, D.C.
11. SILVA, Bruno, 2017, *Efeito da corrosão de tubulações de aço galvanizado na pressão de um sistema de distribuição de água*, Monografia, Universidade de Goiânia, Brasil.

12. SILVA, Cristina, 2018, *Caracterização de agregados*, Apostila de Práticas de Laboratório, Universidade Regional Integrada, Campus Erechim.
13. TÂMEGA, Fábio, 2017 *Fundição de processos siderúrgicos*, Brasil, Editora e Distribuidora Educacional S.A. ISBN 978-85-8482-818-0.
14. TITOV, Yu. A. Stepánov, 1981, *Tecnología Del Proceso De Fundicion*, Editorial Mir, Moscú.

ANEXOS

ANEXO 1: TABELA DE RESULTADOS DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA

Diâmetro dos Crivos		Partículas sólidas			
		Massa retida	Massa retida	Massa retida acumulada	Massa que passa
(inch)	(mm)	(g)	(%)	(%)	(%)
4	4.76	3	0.9	0.9	99.1
8	2.38	5	1.4	2.3	97.7
16	1.19	58	16.6	18.9	81.1
30	0.6	124	35.4	54.3	45.7
50	0.3	107	30.6	84.9	15.1
100	0.15	43	12.3	97.1	2.9
200	0.075	10	2.9	100.0	0.0
Total		350	100.0	-	-

ANEXO 2: CATÁLOGO MACSTEEL PARA ESCOLHA DO MATERIAL DA ESTRUTURA



Metric conversions
 10 000lb/in² = 68.95 MPa
 100MPa = 14 500lb/in²

Material	API/ASTM Specifications			Chemical compositions %								Stress (min)	
	No	Grade	Form	Carbon	Mangan	Phos (max)	Sulph (max)	Silicon	Chrome	Molyb	Nickel	Tensile MPa	Yield MPa
Carbon Steel	AP15L	A	Line Pipe	0.21 max	0.90 max	0.040	0.050					331	207
Carbon Steel	AP15L	B	Line Pipe	0.26 max	1.15 max	0.040	0.050					413	241
Carbon Steel	AP15L	X42	Line Pipe	0.28 max	1.25 max	0.040	0.050					413	289
Carbon Steel	AP15L	X52	Line Pipe	0.30 max	1.35 max	0.040	0.050					455	358
Carbon Steel	AP15L	X60	Line Pipe	0.26 max	1.35 max	0.040	0.050					517	413
Carbon Steel	A106	A	Pipe	0.25 max	0.27/0.93	0.048	0.058	0.10 min	0.40	0.15	0.40	330	205
Carbon Steel	A234	WPA	Fittings	0.25 max	0.27/0.93	0.048	0.058	0.10 min				330	205
Carbon Steel	A106	B	Pipe	0.30 max	0.29/1.06	0.048	0.058	0.10 min	0.40	0.15	0.40	415	240
Carbon Steel	A234	WPB	Fittings	0.30 max	0.29/1.06	0.050	0.058	0.10 min				415	240
Carbon Steel	A106	C	Pipe	0.35 max	0.29/1.06	0.048	0.058	0.10 min	0.40	0.15	0.40	485	275

ANEXO 3: PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO AÇO INOX 304/304L

M 304 / 304L Stainless Steel Data In-Depth

304 is used in all industrial, commercial and domestic fields because of its good corrosion resistance, mechanical properties, weldability and chemical composition.

- Applications:** Tanks and containers for a large variety of liquids and solids.
 Process equipment in: mining, chemical, cryogenic, food, dairy and pharmaceutical industries.
- Fabrication:** Easy to work S304 responds well to hardening by cold working.
 Typical operations include: bending, forming, deep drawing and upsetting.
- Specify:** **304L**, the low carbon variety for intergranular corrosion in the heat-affected zone.

Chemical Composition (ASTM A240)

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
304	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0 -	8.0 -
	max					20.0	10.5
304L	0.03	max	max	max	max	18.0 -	8.0 -
	max					20.0	12.0

Typical properties in annealed condition

The properties quoted in this publication are typical of mill products and unless indicated should not be regarded as guaranteed minimum values for specification purposes.

1. Mechanical properties at room temperature

		304		304L	
		Typ	Min	Typ	Min
Tensile Strength	MPa	600	515	590	485
Proof Stress (0.2% offset)	MPa	310	205	310	170
Elongation (% in 50mm)		60	40	60	40
Hardness (Brinell)		170		170	
Endurance (fatigue) limit	MPa	240		240	

2. Properties at elevated temperatures

The values given refer to 304. Values for 304L are not given because strength values fall rapidly above 425°C.

Short time elevated temperature tensile strength

Temperature	°C	600	700	800	900	1000
Tensile Strength	MPa	380	270	170	90	50

Creep Data

Stress for a creep rate of 1% in 10 000 hours						
Temperature	°C	550	600	650	700	800
Tensile Strength	MPa	120	80	50	30	10

Recommended Maximum Service Temperature

(Oxidising Conditions)	
Continuous Service	925°C
Intermittent Service	850°C

3. Properties at subzero temperature 304 / 304L

Temperature	°C	-78	-161	-196
Proof Stress (0.2% offset)	MPa	300/180	380/220	400/220
Tensile Strength	MPa	1100/950	1450/1200	1600/1350
Impact Str (Charpy V)	J	180/175	160/160	155/150

4. Corrosion Resistance - Aqueous

For specific conditions, consult Macsteel Trading. As a rough guide, the examples are given for certain pure acid-water mixtures

Temperature °C	20°C					
	10	20	40	60	80	100
Concentration (% by mass)						
Sulphuric acid	2	2	2	2	1	0
Nitric acid	0	0	0	0	2	0
Phosphoric acid	0	0	0	0	0	2
Formic acid	0	0	0	0	0	0

Temperature °C	80°C					
	10	20	40	60	80	100
Concentration (% by mass)						
Sulphuric acid	2	2	2	2	2	2
Nitric acid	0	0	0	0	1	2
Phosphoric acid	0	0	0	0	1	2
Formic acid	0	1	2	2	1	0

- 0 = resistant - corrosion rate less than 100µm/year.
- 1 = partly resistant - corrosion rate 100µm to 1000µm/year.
- 2 = non-resistant - corrosion rate more than 1000µm/year.

Atmospheric

The performance of 304 compared with other metals is shown in the following table. Corrosion rates are based on 10 years exposure.

Environment	Corrosion rate (µm/year)		
	304	Aluminium-3S	Mild Steel
Rural	0.0025	0.025	5.8
Marine	0.0076	0.432	34.0
Marine-industrial	0.0076	0.686	46.2

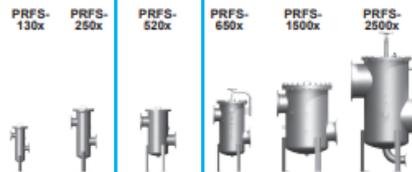
Thermal Processing Resistance

- a. Annealing Heat from 1010°C to 1120°C and cool rapidly in air or water. For best corrosion resistance ensure the final annealing temperature is above 1070°C.
- b. Stress Relieving Stress relieve 304L at 450°C - 600°C for one hour with little danger of sensitisation. A low stress relieving temperature of 400°C maximum must be used for 304.
- c. Hot Working Initial forging and pressing 1150°C - 1260°C
 Finished temperature 900°C - 925°C
 Upsetting operation finish 930°C - 980°C

All hotworking operations should be followed by annealing.

HYDAC INTERNATIONAL

Process screen basket filter PRFS



Specifications	
Nominal size:	DN 50 – DN 800
Q _{v, max.} :	3600 m ³ /h
p _{s, max.} :	16 bar
Filtration ratings:	25 – 10000 µm

1. GENERAL

Product description

- Screen basket filter
- Used as coarse filter, bypass filter or pre-separator

Screen basket technology

- Screen basket insert with bracket
 - Chemicon®
 - Wire mesh: 25 to 1000 µm
 - Wedge wire: 50 to 3000 µm
 - Perforated plate: 3000 to 10000 µm

Product advantages

- High filtration performance
- Simple handling
- Robust filter materials are ideally suited to long-term operation
- Cleanable filter materials
- Low operating costs
- Numerous equipment options
- Particles cannot enter the clean side when the basket is changed
- Also available as a change-over duplex filter

Technical data, filter housing								
Size	Port dimensions	Materials			p _{s, max.} ³⁾ [bar]	T _{s, max.} ²⁾ [°C]	Weight [kg]	Volume [l]
		Stainless steel ¹⁾	Carbon steel					
			Corrosion protection, internal					
		Without	With					
130x	DN 50 / 65 / 80 / 100 / 125 / 150	•	•	•	6 / 10 / 16	-10 to +90	70	26
250x	DN 100 / 125 / 150 / 200 / 250	•	•	•			115	46
520x	DN 150 / 200 / 250	•	•	•	6 / 10 / 16	-10 to +90	186	118
650x	DN 200 / 250 / 300	•	•	•			280	225
1500x	DN 250 / 300 / 350 / 400 / 500	•	•	•	6 / 10 / 16	-10 to +90	540	440
2500x	DN 350 / 400 / 500 / 600 / 700	•	•	•			930	1350

Technical data, screen basket inserts							
Series	No. of screen baskets	Screen basket type	Overall filter area [cm ²]	Filter materials and filtration ratings [µm]			Permitted differential pressure [bar]
				Chemicon® wire mesh, reinforced with perforated plate	Wedge wire	Perforated plate	
130x	1	SK-3-...	2035	25	50	3000 5000 10000	6
250x	1	SK-4-...	2850	40	100		
				60	200		
				80	300		
				100	500		
520x	3	SK-3-....	6105	150	1000		
				200	2000		
				250	3000		
650x	4	SK-4-....	11400	500	3000	3000 5000 10000	6
1500x	7	SK-4-....	19950	250	2000		
				500	3000		
				1000			
2500x	5	SK-5-....	37000	1000			

¹⁾ Stainless steel: 1.4301 or similar (group 304), stainless steel 1.4571 or similar (group 316)

²⁾ Internally coated housing
T_{s, max.} +60 °C – higher temperature on request

³⁾ Higher pressure ranges on request

ANEXO 5: RESULTADOS DE MONITORIA DE PARÂMETROS DO PROCESSO –
 LINHA 1, T em °C e Q em m^3/h .

Data	$T_{ling,out}$	$T_{ling,in}$	ΔT_{ing}	Q_{H_2O}	$T_{H_2O,out}$	$T_{H_2O,in}$
7-Aug	455.7	74.9	380.8	199.0	56.9	31.2
8-Aug	459.6	83.9	375.8	186.0	56.5	29.9
9-Aug	450.0	73.1	376.9	181.0	54.4	28.6
10-Aug	450.4	69.4	381.0	188.0	54.8	29.2
11-Aug	-	-	-	-	-	-
12-Aug	-	-	-	-	-	-
13-Aug	-	-	-	-	-	-
14-Aug	443.6	75.5	368.1	174.0	51.1	27.7
15-Aug	460.3	64.4	395.9	188.0	55.5	29.3
16-Aug	445.0	59.5	385.5	186.0	51.8	26.7
17-Aug	440.8	80.5	360.3	179.0	61.9	35.3
18-Aug	452.1	79.9	372.2	178.0	54.4	28.2
19-Aug	-	-	-	-	-	-
20-Aug	-	-	-	-	-	-
21-Aug	-	-	-	-	-	-
22-Aug	-	-	-	-	-	-
23-Aug	442.2	74.4	367.8	185.0	54.3	28.7
24-Aug	442.1	67.3	374.8	187.0	51.8	26.7
25-Aug	451.2	72.4	378.8	172.0	55.2	30.4
26-Aug	-	-	-	-	-	-
27-Aug	-	-	-	-	-	-
28-Aug	440.3	67.6	372.7	178.0	54.4	28.2
29-Aug	437.0	67.8	369.2	187.0	55.5	29.3
30-Aug	447.3	80.4	367.0	191.0	54.6	28.7
31-Aug	455.4	81.0	374.4	193.0	58.0	32.0
Média	448.3	73.2	375.1	184.5	55.1	29.4

ANEXO 6: RESULTADOS DA MONITORIA DE PARÂMETROS DO PROCESSO –
 LINHA 3, T em °C e Q em m^3/h .

Data	$T_{ling,out}$	$T_{ling,in}$	ΔT_{ling}	Q_{H_2O}	$T_{H_2O,out}$	$T_{H_2O,in}$
7-Aug	431.6	67.2	364.4	176.0	40.2	34.1
8-Aug	438.3	79.4	358.9	199.0	36.6	30.9
9-Aug	448.6	77.9	370.7	199.0	36.1	29.3
10-Aug	445.2	80.5	364.7	189.0	35.5	29.2
11-Aug	-	-	-	-	-	-
12-Aug	-	-	-	-	-	-
13-Aug	-	-	-	-	-	-
14-Aug	443.6	75.5	368.1	201.0	31.4	27.9
15-Aug	444.4	79.1	365.3	199.0	35.7	29.2
16-Aug	451.8	82.5	369.3	200.0	33.7	26.8
17-Aug	440.9	82.7	358.2	200.0	34.4	28.2
18-Aug	440.1	91.0	349.1	188.0	41.1	32.9
19-Aug	-	-	-	-	-	-
20-Aug	-	-	-	-	-	-
21-Aug	451.7	83.8	367.9	216.0	33.6	27.0
22-Aug	436.4	83.8	352.6	215.0	36.5	30.6
23-Aug	-	-	-	-	-	-
24-Aug	--	-	-	-	-	-
25-Aug	452.7	82.0	370.8	196.0	45.9	36.8
26-Aug	-	-	-	-	-	-
27-Aug	-	-	-	-	--	-
28-Aug	461.7	129.9	331.8	174.0	41.5	30.8
29-Aug	461.0	124.0	337.0	197.0	44.8	35.5
30-Aug	456.4	105.2	351.2	216.0	36.8	28.8
31-Aug	457.4	82.1	375.3	199.0	38.8	32.4
Média	447.6	87.9	359.7	197.8	37.7	30.6

ANEXO 7: RESULTADOS DA AMOSTRA DE ÁGUA DE ARREFECIMENTO

Fonte: SwissLab



ANALYSIS REPORT NR: 10663

Client:	Mozal S.A.R.L	Version:	1
Address:	Beluluane Industrial Park	Test Report:	Final
Client nr:	4	Sampling Date:	18/07/2023
Sample Type:	Water	Reception Date:	18/07/2023
Sampling Point:	Mozal Plant - Casthouse	Analysis Start:	18/07/2023

Test	Analytical Method	Units	Limit Value	Sample 18829	Sample 18830
				Casthouse	Industrial Water
Physical - Chemical					
Determination of pH	MI.IT/SwissLab/FQL/007/Rev.05	Sorensen	—	7.86	7.84
Conductivity*	SWEWW 2510D:2017	µs/cm	—	1124	490
Total Dissolved Solids*	NP.IT/SwissLab/FQL/008	mg/L	—	598	256
Total Suspended Solids*	SMEWW 2640B:2017	mg/L	—	27	10
Turbidity*	SMEWW 2130B:2017	NTU	—	15.2	3.1
Total Alkalinity*	SMEWW 2320B:2017	mg/L	—	123	110
Calcium Hardness*	SMEWW 2340C:2017	mg/L	—	220	89
Total Hardness*	SMEWW 2340C:2017	mg/L	—	467	202

ANEXO 8: ENTREVISTA

ENTREVISTA

Esta entrevista surge no âmbito de recolha de informação para a realização de uma pesquisa para o Relatório de Estágio de culminação do Curso de Licenciatura em Engenharia Mecânica, realizado na empresa Mozal no departamento da Casthouse.

O público-alvo são os superintendentes de produção e manutenção, bem como os engenheiros do processo, para uma abordagem mais aprofundada no que concerne a actual situação do processo de arrefecimento da Casthouse.

Processo de arrefecimento da Casthouse

1. Qual é o estado actual do sistema de arrefecimento de lingotes?
2. O sistema de arrefecimento de lingotes é eficiente?
3. Quais os principais problemas enfrentados no que concerne ao arrefecimento de lingotes?
4. Que impactos o arrefecimento deficiente pode trazer à produção?
5. Qual é a importância do sistema de recirculação da água?

Aspectos técnicos e do processo

1. Qual é o efeito da velocidade da transportadora (*conveyor speed*) no arrefecimento dos lingotes?
2. Porque se opera com um *setpoint* de vazão de água de $200\text{m}^3/\text{h}$?
 - 2.1. Que implicações a alteração desse parâmetro traria aos sistemas operacionais com destaque aos sistemas de abastecimento de água?
3. Como a temperatura da água afecta o arrefecimento dos lingotes?
4. Como garante-se a manutenibilidade e limpeza do *Cooling Tunnel*, sendo um espaço confinado e de difícil acesso?
5. Será que a qualidade da água afecta a integridade dos equipamentos?
6. De quanto em quanto tempo há troca dos bocais e válvulas injectoras de água no Túnel?
 - 6.1. Qual é a principal causa dessa troca das válvulas e bocais?