



IPS Instituto
Politécnico de Setúbal
Escola Superior de
Tecnologia de Setúbal

Pedro Miguel
Brás Loureiro

ANÁLISE DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA DE ESCÓRIA DE SIDERURGIA

RELATÓRIO DO PROJETO DO MESTRADO EM
ENGENHARIA E GESTÃO DE ENERGIA NA
INDÚSTRIA E EDIFÍCIOS

ORIENTADOR
Professor Paulo Fontes

Dezembro 2023

Pedro Miguel
Brás Loureiro

ANÁLISE DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA DE ESCÓRIA DE SIDERURGIA

JÚRI

*Presidente: Professor João Francisco Fernandes,
ESTSeúbal/IPS*

*Orientador: Professor Paulo Marques Fontes,
ESTSeúbal/IPS*

*Arguente: Professor Nuno Costa Pereira,
ESTSeúbal/IPS*

Dezembro 2023

Agradecimentos

Agradeço a orientação, disponibilidade e interminável paciência do docente Paulo Fontes. As suas sugestões e orientações foram essenciais para a realização deste trabalho.

Tenho uma dívida de gratidão com o Doutor Philippe Bollinger, representante da Agência Municipal de Energia do Seixal. A sua boa vontade e cordialidade foram uma marca a imitar. A sua disponibilidade e apoio técnico foram imprescindíveis e agradeço-lhe também ter sugerido esta ideia para o trabalho que executei.

Este relatório é dedicado à minha família, que sempre esteve presente para me apoiar e a quem devo a possibilidade de concretizar os meus estudos.

Resumo

O aumento da população mundial tem provocado uma procura crescente por energia, a qual para ser suprida, acarreta como consequência enormes custos económicos e ambientais. A energia por constituir um bem escasso, por vezes difícil de produzir, armazenar e utilizar quando é necessário, tem-se tornado uma questão relevante no cenário económico mundial. Os processos mais comuns e antigos que os países e sociedades tem utilizado são poluidores, provocam acumulação de gases com efeito de estufa na nossa atmosfera e em consequência provocam degradação do nosso meio ambiente.

Neste contexto, a produção do aço é uma das grandes indústrias consumidoras de energia do planeta, constituindo-se também em uma das mais poluidoras, sendo a escória um resíduo sobranete desse processo de produção do aço.

O objetivo deste trabalho é minimizar o efeito para o meio ambiente da produção do aço focando a nossa atenção na escória, um produto pouco nobre que resulta da produção do aço. A escória produz-se a altas temperaturas e, após a sua transformação, a energia é dissipada para o ambiente. Tendo em conta que não se está a aproveitar o calor da mesma, seria vantajoso usá-lo para outros fins.

Assim sendo, este estudo foi realizado com o intuito de elaborar um procedimento que possibilite aproveitar a energia da escória. Desta forma, apresentam-se alguns métodos de recuperação do calor das escórias após a solidificação, os quais são realizados com água ou ar.

Neste relatório apresenta-se um processo de recuperação do calor por contacto entre o ar e a escória, para que numa fase posterior seja possível transferir esse calor para a água.

Abstract

The increase in the world population has caused an increasing demand for energy, which, in order to be supplied, brings with it enormous economic and environmental costs. Energy, as it is a scarce good, sometimes difficult to produce, store and use when necessary, has become a relevant issue on the global economic scene. The most common and oldest processes that countries and societies have used are polluting, causing the accumulation of greenhouse gases in our atmosphere and consequently causing degradation of our environment.

In this context, steel production is one of the largest energy-consuming industries on the planet, and is also one of the most polluting, with slag being a residue left over from this steel production process.

The objective of this work is to minimize the effect on the environment of steel production by focusing our attention on slag, a not very noble product that results from steel production. Slag is produced at high temperatures and after its transformation the energy is dissipated into the environment. Taking into account that you are not taking advantage of its heat, it would be advantageous to use it for other purposes.

Therefore, this study was carried out with the aim of developing a procedure that makes it possible to harness the energy of slag. Therefore, some methods of recovering heat from solidified slag after cooling are presented, which are carried out with water or air.

This report presents a heat recovery process through contact between air and molten slag, so that at a later stage it is possible to transfer this heat to water.

Índice

Agradecimentos	I
Resumo	III
Abstract	IV
Índice	V
Índice de Figuras	VI
Índice de Tabelas	VII
Listagem de Abreviaturas	VII
1. Introdução	1
1.1. Motivação.....	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Organização do trabalho	5
2. Revisão de Literatura	6
2.1. Produção de Aço no Mundo.....	6
2.2. Tecnologia da Produção de Aço e Produção de escória de siderurgia	7
2.3. Estudos existentes sobre escórias com componente experimental.....	10
2.4. O projeto Reslag.....	12
2.5. Megasa, Siderurgia Nacional do Seixal.....	13
3. Casos de Estudo	16
3.1. Desenvolvimento do sistema de recuperação de calor da escória de siderurgia.....	16
3.2. Processo de rolo duplo de solidificação contínua.....	18
3.3. Esboço da planta piloto para recuperação de calor da escória.....	22
3.4. Possibilidade de recuperar calor sensível da escória em instalações tipo tambor.....	23
4. Análise de Resultados	25
4.1. Apresentação do Protótipo.....	25
4.2. Apresentação dos Cálculos.....	26
4.2.1. Cálculo da Troca de Calor entre a escória e o ar.....	30
4.2.2. Permutador de Calor Ar-Água.....	35
4.3. Processo de Análise de hipóteses.....	42
5. Conclusões	49
6. Referências Bibliográficas	51

Índice de Figuras

Figura 1 - Principais subprodutos sólidos de fabricação de aço.....	1
Figura 2 - Aproveitamento de calor para energia útil.....	3
Figura 3 - Esquema de princípio do sistema de aquecimento de águas.....	4
Figura 4 - Gráfico da distribuição de calor residual de alta temperatura da siderurgia	7
Figura 5- Escória no estado sólido.....	8
Figura 6 - Logotipo do projeto REslag.....	12
Figura 7 - Logotipo do Grupo Megasa.....	13
Figura 8 - Vista aérea da Siderurgia Nacional do Seixal.....	14
Figura 9 - Armazenamento da escória. Vista aérea.....	15
Figura 10 - O projeto COURSE 50, como delineado pela Japan Iron and Steel Federation....	17
Figura 11 - Vista da planta desenhada	19
Figura 12 - Diagrama esquemático do equipamento de solidificação da escória.....	20
Figura 13 - Estado da escória após cair no poço.....	21
Figura 14 - Planta do projeto de recuperação do calor	21
Figura 15 - Desenho do protótipo.....	24
Figura 16 - Detalhe do sistema de permutação entre o Ar e a Água.....	25
Figura 17 - Temperatura morna do ar exterior no concelho do Seixal (Ano - 2021).....	28
Figura 18 - Sistema de permuta Ar-Água.....	35
Figura 19 - Espaçamento considerado entre a tubagem de água.....	40
Figura 20 - Vista de cima do contentor, pormenorizando a tubagem de água.....	41
Figura 21 - Gráfico das possibilidades no processo de análise.....	47
Figura 22 - Gráfico dos casos mais favoráveis da temperatura de saída da água mais favoráveis para a instalação	47
Figura 23 - Gráfico de comparação da temperatura de saída da água com a sua massa.....	48

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Preço de venda de vários tipos de escória.....	11
Tabela 2 - Resumo dos dados relevantes para o cálculo da escória como material TES na indústria.....	28
Tabela 3 - Propriedades da água saturada.....	38
Tabela 4 - Variáveis para o processo iterativo.....	44

Listagem de Abreviaturas

BF – Blast Furnace (Alto forno);

LMTD – Diferença média logarítmica de temperaturas;

C_p – Capacidade térmica;

N_u – Número de Nusselt;

R_e – Número de Reynolds;

P_r – Número de Prandtl;

AQS – Águas Quentes Sanitárias;

NTU – Taxa de transferência de calor nos permutadores;

ASIC – Agregado siderúrgico inerte para construção;

IA – Inteligência Artificial;

GGBS/GGBFS – Ground granulated blast furnace slag (escória granulada de alto-forno);

1. Introdução

A indústria produtora e transformadora do aço é um dos segmentos industriais que mais consome energia, existindo uma necessidade de aproveitarmos os materiais, de modo a não gerar tanto desperdício [1].

O ferro e o aço são produtos de grande relevância na economia, pois atuam como principais impulsionadores do desenvolvimento, devido ao seu uso generalizado nas infraestruturas modernas da indústria [2]. No entanto, a indústria siderúrgica é caracterizada por ser um setor com um intensivo consumo de energia, o que atrai cada vez mais estudos de novas tecnologias para melhoramento de rendimento em termos energéticos.

A World Steel Association publicou um relatório estatístico em 2019, a indicar que a produção total mundial de aço bruto e o uso aparente de aço foi cerca de 1,88 e 1,89 bilhões de toneladas, respetivamente [3], [4].

Um grande número de subprodutos entre os quais a poeira, lodo e escória poderão ser gerados durante a produção de ferro e aço [5]. A World Steel Association estimou que 90% destes subprodutos sólidos produzidos são escórias, o que pode ser observado na figura 1. A temperatura de saída da escória de alto-forno (BF – Blast Furnace) situa-se entre 1450°C e 1650°C, o que significa que este subproduto carrega uma grande quantidade de energia térmica [3], [4].

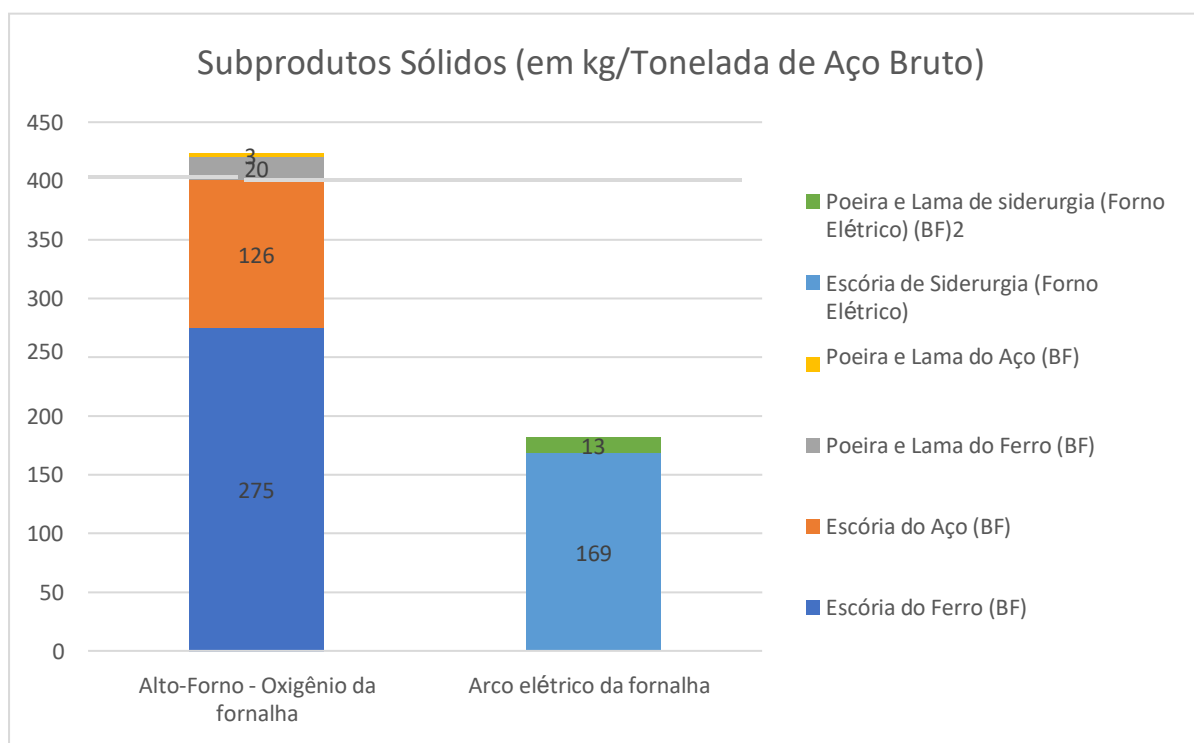


Figura 1 - Principais subprodutos sólidos de fabricação de aço [5]

Considerando que cada tonelada de aço bruto é acompanhada pela produção de 0,3 toneladas de escória de alto-forno [1], pode-se inferir, a partir dos dados de produção de 2019, que o montante produzido de escória de alto-forno é de aproximadamente 243 milhões de toneladas.

Cada tonelada escória contém aproximadamente 1770 MJ de energia térmica, o que equivale à energia calorífica em 0,058 toneladas de carvão [3], [4]. Assim sendo, existe uma quantidade de energia da ordem de 14,1 milhões de toneladas de carvão que podem ser recuperadas na escória de alto-forno, de maneira a criar uma fonte de energia.

Com o objetivo de diminuir a temperatura da escória após a sua utilização, é normalmente utilizada a água fria. Entretanto, este sistema não é o mais indicado, tendo em conta, que é necessária uma grande quantidade de água. Assim sendo, com o objetivo de poupar água e reutilizar energia, foram realizados estudos de novas tecnologias para a recuperação de calor das escórias [1].

Como resultado, desde a década de 1970, foram criados uma série de métodos de granulação, como tampos rotativos, têmpera de ar e granulação centrífuga de forma a serem propostos para produzir pequenas partículas de escória para que assim fosse possível extrair a energia térmica com um meio de arrefecimento [6].

As formas de conversão de energia térmica são classificadas como método físico ou método químico [6].

i) O método físico é um método tradicional de recuperação de calor que utiliza um processo de troca de calor com o fluido .

ii) O método químico combina a recuperação de calor residual com uma reação endotérmica para recuperar o calor da escória fundida. No entanto, o processo químico combinado de recuperação de calor é mais complexo, pelo que tem resultado num desenvolvimento mais lento [2].

Para além disso, os outros problemas da escória são a sua cristalização interna e o facto de a temperatura da escória não ser uniforme, ou seja, a condutividade térmica varia muito entre a escória a alta temperatura e a baixa temperatura durante o processo de arrefecimento [1].

O objetivo principal deste trabalho será desenvolver uma aplicação de tecnologia de recuperação de calor da escória, de modo a poder usar a energia para outros fins.

1.1. Motivação

A escória, depois do processo de transformação do aço encontra-se a temperaturas muito elevadas e essa energia acabará por ser dissipada no processo de arrefecimento das escórias. É nesta fase da sua existência que a escória pode ser útil como fonte de calor para outros processos.

A possibilidade de aproveitar o calor da escória, é interessante do ponto de vista técnico, porque torna a produção do aço mais rentável e sustentável. A energia que hoje se dissipa poderá ser aproveitada noutros processos de modo a gerar energia de forma circular, como podemos ver na Figura 2 [7].

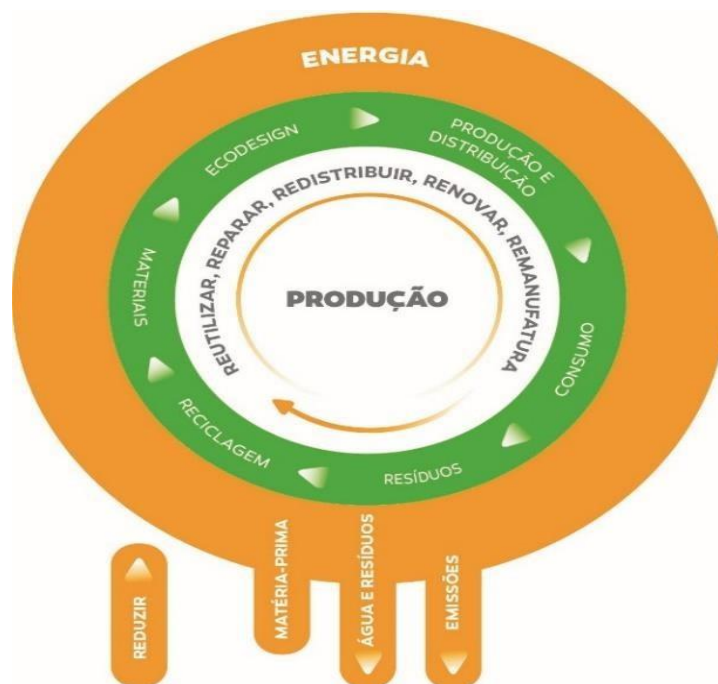


Figura 2 - Aproveitamento de calor para energia útil [7]

1.2 Objetivos

Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um projeto de recuperação de calor para aplicar na Siderurgia Nacional do Seixal de forma aproveitar a energia da escória para aquecer água. Essa água aquecida poderá ser utilizada noutras indústrias vizinhas. Este sistema de permuta promissor permitirá um processo tecnológico mais limpo, quer isto dizer, com um menor consumo de outros combustíveis.

O sistema que se pretende dimensionar consiste num arrefecimento das escórias através do ar, sendo depois o ar quente utilizado num permutador para aquecimento da água, conforme a figura 3.

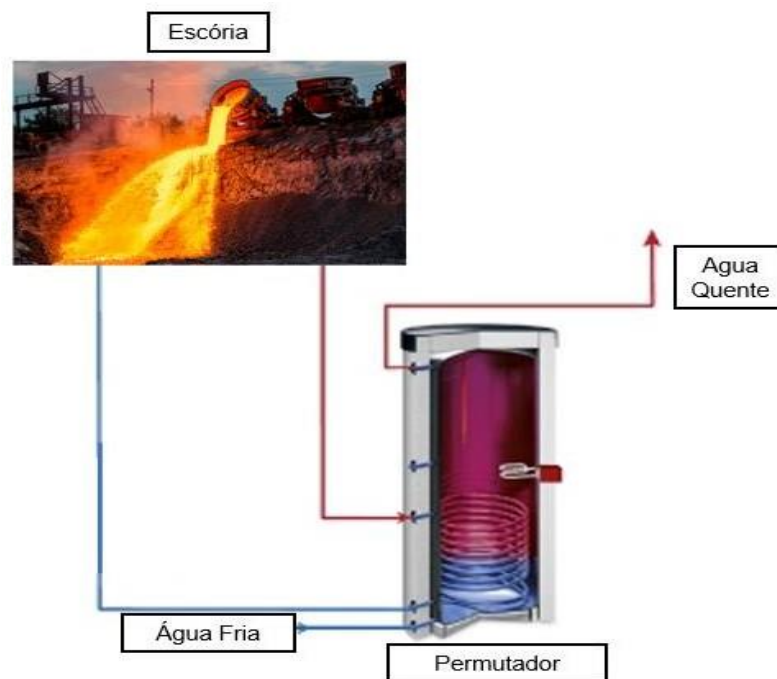


Figura 3 - Esquema de princípio do sistema de aquecimento de água
[adaptado pelo autor [27]]

Objetivos Específicos

- Avaliar a rentabilidade do aproveitamento do calor da escória para o pré-aquecimento de água na produção de vapor. Sendo assim, ao aquecer a água com o calor da escória é possível utilizar noutras instalações fabris nas proximidades da Siderurgia Nacional do Seixal, de modo a contribuir para a redução do consumo de energia.

- Promover uma candidatura a um projeto de financiamento de uma instalação piloto do modelo estudado e desenvolvido a ser instalado na Siderurgia Nacional do Seixal.

1.3 Organização do trabalho

Este relatório está organizado em 5 capítulos. Neste primeiro capítulo realiza-se uma introdução na qual se relata a importância que tem a produção e a recuperação da energia da escória para o meio ambiente. Para além disso, são apresentados os motivos que contribuíram para a realização deste trabalho, assim como os objetivos que se pretende alcançar.

No segundo capítulo, demonstra-se uma revisão de literatura a qual apresenta o estado de arte sobre a escória e quais os processos de recuperação de energia existentes. Neste âmbito, são apresentadas algumas das características da escória e soluções que estão a ser desenvolvidas para envolver este produto na economia circular. Em seguida, ainda no segundo capítulo, apresenta-se o projeto RESLag, um projeto europeu que demonstra como a escória pode ser utilizada por setores industriais que não estão diretamente relacionados com a metalurgia. Apresenta-se ainda, a indústria siderúrgica portuguesa, mais especificamente a Siderurgia Nacional do Seixal, integrante do Grupo MEGASA e na parte final do capítulo são apresentados alguns estudos publicados com a componente experimental sobre escória.

O capítulo 3 dedica-se a descrever o desenvolvimento do projeto deste trabalho, neste contexto apresenta-se como se pode desenvolver um sistema de recuperação de calor da escória, de seguida é mostrado como é realizado o design de um sistema piloto para reaproveitar o calor da escória.

O quarto capítulo apresenta e realiza a análise de resultados, sendo possível verificar a planta piloto desenhada para aproveitar o calor sensível da escória na Siderurgia Nacional do Seixal. Também são demonstrados os cálculos necessários para validar o projeto, os quais contemplam os balanços de massa e energia e o dimensionamento do equipamento, sendo ainda descrito uma análise de hipóteses para os permutadores.

Apresenta-se, por fim, no último capítulo, a materialização da conclusão do estudo, resumindo os principais resultados obtidos, apresentando os contributos práticos para a Siderurgia Nacional do Seixal e formulando propostas de investigação futura.

2 – Revisão de Literatura

Estado da arte

2.1 – Produção de Aço no Mundo

Ao longo da Antiguidade, o forjamento do aço era feito de forma totalmente rudimentar, em fornos rústicos. Existem registos de alto-fornos de pequenas dimensões muito antigos, que foram construídos na China da dinastia Han, no Século I a.C., apesar de terem sido encontrados artefactos férreos neste país com datações relativas ao Século V a.C, o que sugere a ocorrência de altos-fornos em épocas pretéritas ao que se supõe atualmente [1].

Na Europa Antiga existem registos de que o ferro foi fundido pelos gregos, celtas, romanos e cartagineses. Contudo, foi na Catalunha, durante o século VIII, que a fundição foi significativamente melhorada, com a introdução de uma técnica que adicionou um sistema de foles para bombear o ar no interior do alto-forno, o que permitiu produzir um ferro de melhor qualidade [6].

Durante a Idade Média, tem-se registos de alto-fornos construídos na Suécia ocidental, entre os anos de 1150 a 1350. Estes altos-fornos primitivos, a exemplo dos chineses, eram muito ineficientes, quando são comparados com os atuais. Foram também identificados altos-fornos dos séculos XIII a XV na Alemanha, nomeadamente na Vestfália [6].

Entretanto, esta técnica foi sendo dominada pelo homem e no início do XIX, ingleses, suecos e alemães da Saxônia já exibiam uma tradição em siderurgia, com centenas de altos-fornos de pequenas dimensões construídos nestes países [6].

Nos séculos seguintes, apareceram as siderúrgicas, que passaram a utilizar tecnologias para incrementar as formas de se fabricar o aço, sendo que com o passar dos anos, esse processo tem ficado cada vez mais automatizado [6].

No ano de 2021, o mundo produziu 1.951.924 milhares de toneladas de aço [1]. Neste mesmo período, Portugal produziu, de acordo com a mesma fonte, 1.953 milhares de toneladas de aço. Podemos assim dizer que a indústria do aço é um pilar essencial da economia, pois é um produto vital para o funcionamento de muitas outras indústrias [1].

Para produção desta quantidade de aço, a indústria siderúrgica consome 4 a 5% de toda a energia produzida no planeta, o que significa que esta indústria é um dos segmentos industriais que mais consome energia no mundo. Este cenário apresenta como consequência um impacto muito significativo no ambiente pois por cada tonelada de aço que se produz, emite-se na atmosfera, cerca de 1,9 toneladas de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases com efeito de estufa [1].

2.2 – Tecnologia na Produção de Aço e Produção de Escória na Siderurgia

A produção de aço é considerada uma atividade de alto risco, pois realiza as suas operações trabalhando com material em estado líquido a altas temperaturas. Neste âmbito, o mercado da siderurgia é tão competitivo como qualquer outro, sendo fundamental encontrar maneiras de se diferenciar dos principais concorrentes, por isso as empresas deste setor têm realizado investimentos em tecnologia e inovação [9].

Atualmente, é possível trabalhar com sensores que obtêm os dados e as informações que são interpretadas pela Inteligência Artificial (IA), otimizando a linha de produção e criando sinergias em toda a instalação. Existe uma grande variedade de sistemas eletrônicos de medição e monitoramento registrado, de modo a interagir com a rede e usar parâmetros de máquina para controlar a produção e garantir a qualidade. Todo este arsenal tecnológico facilita o planejamento de paragens para manutenção, aumenta a produtividade e garante a melhor qualidade para a produção do aço [6].

Para além disso, diversas otimizações têm sido adotadas utilizando tecnologias que aumentam a eficiência energética e reduzem as emissões de gases de efeito estufa. Dentre estas tecnologia, podemos destacar a implantação de novos queimadores, os quais possibilitam uma redução significativa da emissão de óxidos de azoto [6].

Os resíduos de alta temperatura provenientes da indústria do aço são encontrados de diferentes formas: como escórias fundidas (produto de siderurgia e produto de alto-forno), como gás residual e numa variedade de outros produtos, conforme pode ser observado na Figura 4 [1].

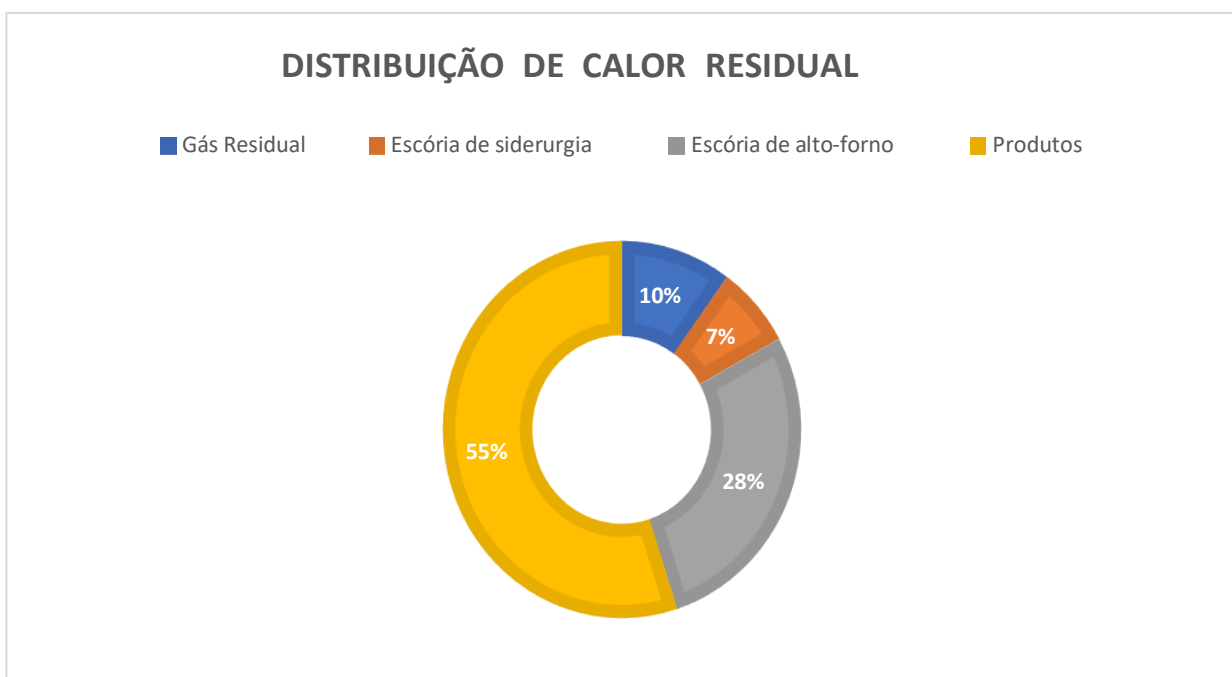


Figura 4 - Gráfico da distribuição de calor residual de alta temperatura da siderurgia [1]

A escória derretida existe como subproduto resultante do processo de siderurgia encontrando-se a temperaturas extremamente elevadas. Por consequente, transporta uma grande quantidade de calor de alta qualidade devido à temperatura elevada, o qual representa 10% da energia residual da indústria siderúrgica e 35% do calor residual de alta temperatura [1]. A quantidade de calor gerada pelo processo siderúrgico é transferida para a escória, a qual é ainda um dos poucos recursos de calor de alta temperatura que não tem sido possível utilizar, pois as tecnologias de recuperação de calor estão ainda num estágio muito imaturo.

Num contexto em que a preocupação com a poupança de energia e com a redução da emissão de gases com efeito de estufa e gases poluentes é uma questão fundamental para a sustentabilidade, a possibilidade de recuperar o calor residual nos processos de siderurgia é um tema de grande valia e por isso, esta solução tem atraído a atenção de muitos investigadores que estão a envolver-se no desenvolvimento de tecnologias de recuperação do calor na indústria siderúrgica [1].

Escória na Siderurgia

Os minérios de metal como o ferro, cobre, chumbo, alumínio e outros metais são encontrados e extraídos da Terra num estado impuro e por vezes estão misturados com silicatos de outros metais. No processo de fundição e quando o ferro ou o aço são expostos a temperaturas elevadas, as impurezas separam-se do metal fundido e podem ser removidas [1]. A massa composta por esses componentes que são impurezas para o ferro e aço, ao arrefecer, produz a escória conforme pode ser observado na Figura 5.



Figura 5 - Escória no estado sólido, ou seja, à temperatura ambiente [28]

São encontrados dois tipos de escória: escória de alto-forno e escória de aço. A escória de alto-forno é conhecida como escória produzida em alto-forno ou escória BF. Esta escória resulta do processo de fundição.

A escória BF é descarregada a uma temperatura entre os 1450°C a 1550°C. A energia total transportada por esta escória equivale em termos energéticos a cerca de 1 770 MJ de energia por tonelada de escória BF, o que corresponde a 13% do consumo no processo de alto-forno.

A escória tem mais utilidades para além de transportar calor residual de alta temperatura. Este resíduo é um tipo de matéria-prima que pode ser amplamente utilizada no cimento, na indústria vidro-cerâmica, no betão misto pronto, no betão asfáltico, no material de estrada e em agregado de construção. Como exemplo podemos citar que a escória utilizada nos compostos de cimento pode evitar a emissão de até 0,8 toneladas de CO₂ por tonelada de cimento pelas cimenteiras [8].

A forma como a escória sólida é usada depende do processo selecionado para proceder ao seu arrefecimento: ao ar ou através de água. Neste contexto, o processo de arrefecimento da escória através da água não é ambientalmente sustentável, porque causa o desperdício de muita água, na ordem de uma tonelada e meia de água para cada tonelada de escória processada.

Para além disso, pode provocar também nuvens ácidas, o que causa poluição atmosférica. Por esse motivo, o processo em que a escória arrefece ao ar tem sido bastante estudado desde a década de 1980 [8].

Contudo, um dos principais problemas que a escória possui é a sua baixa condutividade, o que causa dificuldades quando se pensa em processos de recuperação de calor, por isso é necessário inicialmente reduzir a escória a pequenos granulados, para que seja possível obter um arrefecimento mais rápido e também solidificar os granulados com ar. Este processo de solidificação com ar pode ser executado com uma quantidade de meios mecânicos, tais como: a granulação de jatos de ar, tambores rotativos ou discos giratórios.

O calor é geralmente recuperado ao soprar ar para extrair calor de granulados suspensos de escória, ou a partir de granulados sólidos de escória numa "packed bed" para produzir ar quente. Noutro processo, uma pequena parte do calor pode ser recuperada ao passar um líquido que provoque arrefecimento através de tubos de caldeira inseridos no granulador para produzir vapor [8].

Nos últimos anos a produção de escória de aço no mundo foi superior a 70 milhões de toneladas por ano, com uma taxa de produção de escórias de cerca de 0,08 a 0,15 toneladas por tonelada de aço produzida. Perceber-se então que a recuperação do calor residual da escória será uma prioridade e motivo de estudos e ensaios num futuro muito próximo.

O estudo sobre tecnologias de recuperação de calor de resíduos de alta temperatura, nos quais podemos incluir a escória derretida, desempenha um papel vital na procura dos objetivos de poupança de energia e redução de emissões poluentes na indústria do aço [8].

Neste sentido, para a indústria do aço é muito importante continuar os estudos sobre as tecnologias de recuperação de calor de resíduos de alta temperatura da escória. Estas tecnologias são essenciais para ajudar na poupança de energia e na redução de emissões poluentes nesta indústria.

2.3 – Estudos existentes sobre escórias com componente experimental

A escória granulada de alto-forno ou GGBS/GGBFS (ground granulated blast furnace slag) é um subproduto da indústria metalúrgica obtido pela fusão e arrefecimento da escória de ferro, que concentra impurezas removidas do banho fundido [12].

Esta escória é produzida a partir do processo de produção do ferro-gusa dentro de um alto-forno siderúrgico. Nesta metodologia, o alto-forno é inicialmente carregado apenas com carvão e na sequência é adicionada, na parte superior do alto-forno, uma mistura do minério de ferro (hematite, Fe_2O_3), calcário (CaCO_3) e carvão, ao passo que, na parte inferior do alto-forno, uma corrente de ar quente é inserida, sendo responsável pela combustão incompleta do carvão, o que produz monóxido de carbono (CO) [12].

Assim sendo, o monóxido de carbono (CO), irá reagir com o Fe_2O_3 originando óxido ferroso (FeO), juntamente com dióxido de carbono e a partir disso, o óxido ferroso reagirá com o monóxido de carbono, formando ferro metálico [12].

Esta é uma das duas camadas formadas no alto-forno, que se constitui na mais densa, contendo cerca de 2 a 5 % de carbono e servirá posteriormente, para formar aço, que se constitui em uma liga metálica formada por aproximadamente 98,5 % de ferro, carbono, silício, enxofre e oxigênio. De forma concomitante, existe a formação de uma camada no alto-forno, a qual é menos densa, denominada, escória de alto-forno [12].

Dados da Steel Industry and the Environment revelam que são produzidas em média, 0,385 toneladas de escória por tonelada de ferro. Neste sentido, a geração mundial de escória de alto forno é estimada em 750 milhões de toneladas para uma produção anual de 1,95 mil milhões de toneladas de aço [6].

Inúmeros autores revelam que a grande geração de resíduos de escória tem promovido a necessidade da realização de estudos com o objetivo de melhorar o ciclo produtivo e adequar o seu destino [6]. Neste sentido, o setor da construção civil tem-se revelado um segmento que apresenta um grande potencial para utilização destes resíduos, principalmente em função do grande volume de matéria-prima que consome. Assim sendo, esta utilização pode apresentar, para além da vantagem ecológica, uma construção com custos mais reduzidos [6].

No entanto, não existe um padrão rigorosamente definido de granulometria, formato e outras características físico-químicas destes resíduos, e neste contexto são necessárias amostragens criteriosas para determinar a variabilidade das escórias e ainda testes para avaliar a potencialidade de aplicação deste resíduo, o que na realidade são fatores que restringem a sua aplicação [8].

O valor mineral das escórias metalúrgicas varia amplamente com base também nas propriedades químicas e físicas da escória como fatores regionais, como disponibilidade de agregado natural, demanda por materiais de construção, tais como o cimento, dentre outros fatores. Na tabela 1, apresentam-se os preços típicos dos vários tipos de escórias e suas utilizações [6].

Tabela 1 – Preço de Venda de vários tipos de Escória [6]

Tipo de Escória	Faixa de Preço (US\$/Ton)	Média de Preço (US\$/Ton)
Escória Alto Forno granulada moída	11- 110	60
Escória Alto Forno arrefecida a ar	3,5 – 13	7,5
Escória de aço (agregado)	0,5 – 35	5,5
Abrasivos de escória de cobre	150 - 300	220

Neste âmbito, em função das suas características, as escórias vêm sendo empregues como agregados de maiores dimensões para betão de asfalto para base de autoestradas, lastro de ferrovias e estabilização de solos. Estas aplicações já são amplamente realizadas em vários países, nomeadamente nos Estados Unidos, México, China e no Brasil, que são países que apresentam um extenso parque siderúrgico.[8]

No contexto de aplicação das escórias nas estradas, diversas misturas de escória têm sido utilizadas em substituição da areia ou pó de pedra, promovendo a diminuição da extração de recursos naturais não renováveis, tais como a areia e rochas, para além da redução do impacto ambiental causado pela extração mineral destes materiais [24].

Existem ainda estudos de utilização da escória para cobertura de ruas e estradas desprovidas de pavimentação, ou seja, em leito natural, o que tem permitido uma drenagem da água das chuvas para o solo mais eficiente, reduzindo a formação de bolhas de lama que impedem a circulação de automóveis [24]. Para além disso, várias investigações realizadas nos Estados Unidos e no Brasil relatam que a escória possui uma capacidade de correção da acidez do solo e por conter vários nutrientes para as plantas, nomeadamente o cálcio, o magnésio e o silício, podem ser utilizadas na agricultura como corretivo do solo e, também, como fertilizante [24].

2.4 O projeto REslag

A União Europeia tem estado preocupada em ajudar as empresas a investirem na poupança de energia e na redução de emissões de gases com efeitos de estufa. Para os estados-membros da comunidade europeia é muito importante reduzir o impacto que a produção das escórias cria e simultaneamente, melhorar a produção de energia no espaço europeu [10].

Inserido neste pensamento, a União Europeia tem promovido a produção de energia por fontes renováveis e simultaneamente dado prioridade máxima às políticas relacionadas com a integração de medidas minimizadoras dos efeitos das alterações climáticas [10].

Nesta conjuntura criou-se o projeto REslag em setembro de 2015, o qual se encontra alinhado com os desafios descritos no programa WASTE-1-2014: rumo a uma economia circular através da simbiose industrial e é financiado pelo programa europeu Horizonte 2020. Na figura 6, pode-se visualizar o logotipo do projeto [11].



Figura 6 - Logotipo do projeto REslag [11]

A indústria siderúrgica europeia gerou no ano de 2010 um montante aproximado de 21,8 milhões de toneladas de escória de aço. Cerca de 76% dessa quantidade foi reciclada em aplicações como agregados para a construção civil ou materiais rodoviários [11].

No entanto, esses setores não utilizaram a totalidade da escória produzida neste período. Do percentual de 24% restantes de escória, 2,9 milhões de toneladas foram depositados em aterro e 2,3 milhões de toneladas foram armazenados pelas próprias siderúrgicas. Este percentual que anualmente é depositado em aterros representam um grave risco ambiental, tendo em conta que ocupa um grande volume nos aterros, por isso o principal propósito do REslag é demonstrar que outros setores industriais conseguem fazer um uso eficaz das escórias depositadas em aterro [12].

O projeto Reslag demonstrou que existem benefícios ambientais muito importantes resultantes do uso ativo da escória em processos industriais. Os investigadores no REslag desenvolveram um conceito de recuperação de calor de baixo custo baseado em escória para grandes indústrias que necessitam de energia térmica, como a produção do aço [12].

2.5 Megasa, Siderurgia Nacional do Seixal

O Grupo MEGASA, que tem o seu logotipo representado na figura 7, é hoje um conjunto de empresas que teve origem familiar na década de 1930, sendo especializado na produção e distribuição de produtos siderúrgicos longos. A sede do Grupo está localizada em Narón, na Corunha, Espanha. O Grupo MEGASA tem um quadro de pessoal constituído por 1 249 colaboradores integrados nas várias instalações de produção e unidades de distribuição na Península Ibérica no ano de 2020 [13]. Tem uma capacidade instalada de mais de 3 milhões de toneladas e produz, com fornos de arco eléctrico, uma vasta gama de aços longos: varão de aço nervurado, fio-máquina e rede electro soldada.



Figura 7 - Logotipo do Grupo Megasa [13]

A unidade fabril alojada no Seixal é denominada SN Transformados e é mais conhecida como a Siderurgia Nacional do Seixal. Esta unidade fabrica bobinas de fio laminado a frio, redes electro soldadas com configurações normais ou especiais a partir de aço nervurado, liso laminado a frio ou varão nervurado laminado a quente. Podemos ver uma fotografia aérea da implantação da Siderurgia Nacional do Seixal na Figura 8.



Figura 8 - Vista aérea da Siderurgia Nacional do Seixal
[13]

De acordo com a Memória de Sustentabilidade (2020) [13] o Grupo Megasa tem uma elevada preocupação com a poluição que provoca. Por isso entre muitas outras medidas que podemos encontrar neste documento são para reduzir o impacto da geração de resíduos. o Grupo Megasa aposta na implementação de medidas para melhorar as instalações e os processos de fabrico, e valoriza processos inovadores para a reutilização desses mesmos resíduos. A preocupação do grupo com o meio ambiente é muito significativa e em 2020 conseguiram uma taxa de reutilização de 97,88% dos seus resíduos [13].

Este grupo industrial, o Grupo Megasa, produz dois tipos de escória, a escória branca e a escória negra. A escória branca é totalmente reutilizada no processo produtivo, evitando o gasto de outros recursos de origem natural. As escórias negras são o principal resíduo destas fábricas, mas podem ser valorizadas num processo de hidratação e processamento mecânico. As escórias negras são transformadas em Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC) que é vendido para vários efeitos na construção civil. Outra forma de pouparem o meio ambiente tem a ver com a matéria-prima que usam para servir de base ao aço que produzem nomeadamente as sucatas. Os produtos comercializados por este grupo económico, em particular, possuem entre 80 e 100% de matéria reciclada [13].

A escória pode ser retirada das empresas produtoras e colocada em aterros como o que podemos ver na Figura 9.



Figura 9 - Armazenamento da escória. Vista aérea [13].

A escória é um dos produtos valiosos para grupos empresariais como a HARSCO, uma multinacional sediada nos Estados Unidos e que tem uma subsidiária em Portugal. A Harsco Environmental tem sede na Maia e filial no Seixal [14]. A Harsco tem uma parceria com a Siderurgia Nacional para quem faz a recolha das escórias através dos serviços que presta de limpeza, arrefecimento, britado, separado por tamanhos e certificação das escórias. Com as escórias a Harsco cria o ASIC (Agregado Siderúrgico Inerte para Construção) apresentado acima [14].

O ASIC permite poupar cerca de 75% do dinheiro face à pedra, a alternativa natural para usar na construção. Quando usado nas estradas o ASIC permite alargar o tempo útil do pavimento até 15 anos, quando sem ASIC o pavimento da estrada tem uma durabilidade de 8 anos. O ASIC tem maior durabilidade, é mais barato e é eco sustentável porque é feito com resíduos que seriam poluição no seu estado natural. Este material está a ser usado em Portugal por autarquias e empresas de construção civil [15].

A multinacional Harsco trabalha com o objetivo de transformar produtos que descartamos como lixo em material útil e produtivo, capaz de permitir eco sustentabilidade às nossas ações no planeta [14].

Este projeto nasceu da necessidade expressa pela Agência de Energia do Município do Seixal e pela Harsco Environmental a trabalhar na Siderurgia Nacional, da necessidade de estudar a possibilidade de recuperar o calor que a escória transporta no processo de separação do aço e transformar esse calor em energia para fornecer a empresas a outras entidades. [14], [15].

3. Casos de Estudo

Neste capítulo irão ser abordados alguns dos estudos identificados sobre a recuperação de calor das escórias aproveitando o conhecimento para posteriormente desenvolver o modelo deste projeto.

Em 3.1 vamos perceber como se pode desenvolver um sistema de recuperação de calor da escória e como o Japão está na vanguarda dos estudos para reaproveitar a escória de siderurgia. Em 3.2 irá perceber-se como se pode desenhar um projeto para reaproveitar o calor da escória e em 3.3 irá-se ver um esboço de uma planta piloto para recuperar o calor da escória. Finalmente, percebe-se como se pode aproveitar o calor da escória através de instalações tipo tambor, finalizando com a possibilidade da recuperação do calor sensível do mineral.

3.1 Desenvolvimento do sistema de recuperação de calor da escória de siderurgia

No Japão as metas de redução de emissões estão entre as mais audaciosas do planeta e as empresas neste país parecem estar mais próximo de conseguir recuperar calor na produção do aço [16].

A pressão da opinião pública e a legislação ambiental tem impulsionado a indústria siderúrgica a desenvolver soluções para reduzir os impactos da produção siderúrgica no meio ambiente sem perda de competitividade na produção desses mesmos produtos [16].

De acordo com a bibliografia, o desenvolvimento tecnológico é a chave para solucionar a necessidade de reduzir as emissões globais de dióxido de carbono [16].

A redução da emissão de gases com efeitos de estufa é uma questão de estado e do setor industrial no Japão. Não é de surpreender que este país esteja na vanguarda do estudo de soluções mais amigas do ambiente na indústria siderúrgica.

O governo japonês criou a iniciativa Cool Earth50 para incentivar o uso de tecnologias economizadoras de energia e compatibilizar a proteção ambiental com o crescimento económico [17].

O objetivo deste programa é mitigar as emissões de CO₂ em 30% até 2050. No Japão, a indústria siderúrgica é responsável por 12,4% do total de emissões de CO₂ para a atmosfera deste país [17].

Mas como as siderurgias no Japão já atingiram níveis muito eficientes de redução da emissão de gases com efeito de estufa, a investigação virou-se para outro eixo com o desenvolvimento de tecnologias para uma produção siderúrgica harmonizada com o meio ambiente no programa COURSE 50 (CO₂ Ultimate reduction in steelmaking process by innovative technology for Cool Earth50) [17].

O projeto COURSE 50 foi implementado e financiado pelo New Energy and Industrial Technology Development Organization (ou NEDO) e está em progresso na fase 2 (2018-2025). Alguns dos seus projetos dão usos inusitados às escórias, como podemos ver no projeto da Nippon Steel Corporation: CO₂ uptake and carbon storage as blue carbon by utilizing steel slag [21].

Esta empresa tem em fase de testes uma solução que permite melhorar a taxa de absorção de CO₂ nos ecossistemas marinhos usando a escória produzida nas siderurgias [21], por exemplo.

Os recursos deste projeto talvez permitam chegar mais longe e converter a energia contida nas escórias de alto-forno em energia para aquecimento. Como podemos ver na figura 10, o desenvolvimento de tecnologias para aproveitar o calor desperdiçado é um dos eixos de investigação relacionados com as escórias. O outro eixo é a captura de CO₂ através de separação ou recuperação do CO₂ produzido nos fornos.

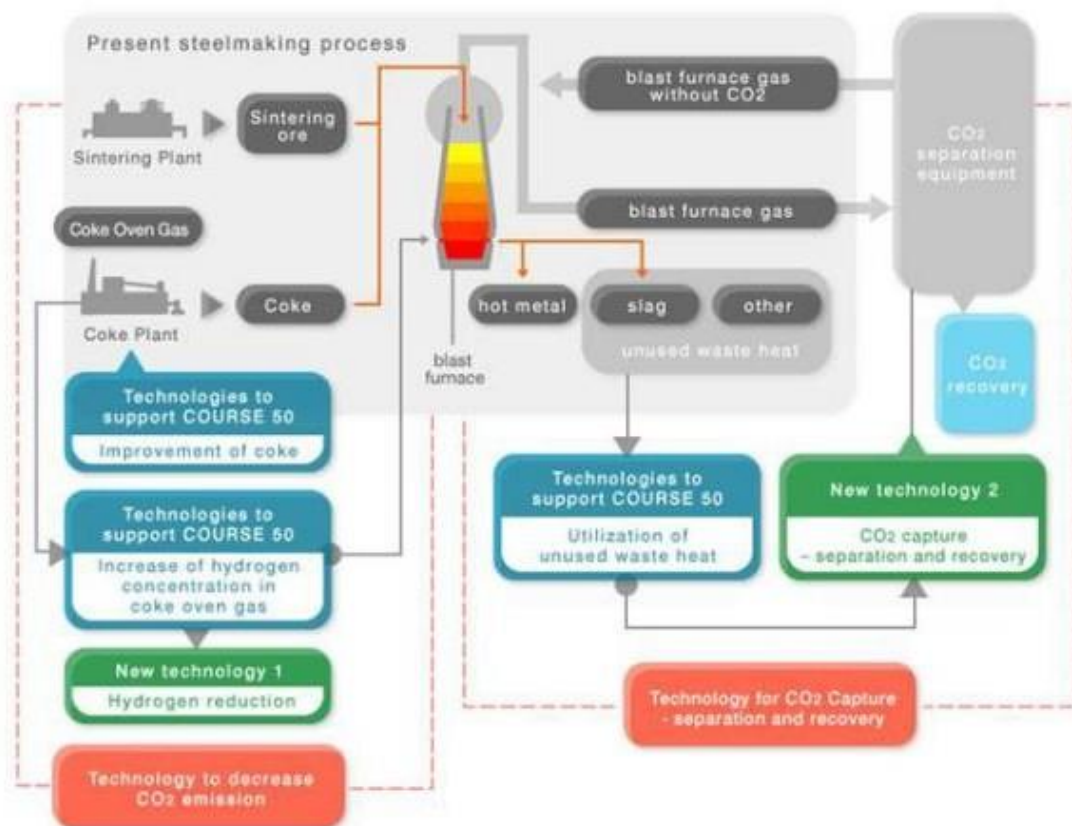


Figura 10 - O projeto COURSE 50, como delineado pela Japan Iron and Steel Federation [17]

O plano de investigação do COURSE 50 é importante porque mostra a intenção de desenvolver novas tecnologias para a captura e aproveitamento deste calor desperdiçado até agora. Ao aproveitar o calor desperdiçado nesta fase do processo de purificação do aço, aproveita-se um recurso até aqui não utilizado, o que vai reduzir a produção de dióxido de carbono que seria gerado por outras fontes não renováveis em sistemas de aquecimento [17].

Os autores esperam que se possa aproveitar os fundos disponíveis no projeto Course 50 para esboçar um projeto-piloto para a solidificação da escória que permita aproveitar o calor sensível da escória [17], [18].

3.2 Processo de rolo duplo de solidificação contínua

Nas tecnologias de recuperação do calor da escória que foram desenvolvidas até agora, os procedimentos de esmagamento das escórias são uma das etapas mais importantes. Na fase inicial das pesquisas sobre granulação seca, a maioria dos trabalhos incidiram nos métodos de esmagamento mecânico. O tambor rotativo foi o mais utilizado destas técnicas [16].

Os autores apresentaram o seu próprio projeto-piloto para aproveitar o calor da escória no processo de produção de aço dentro do projeto COURSE 50. Para estes autores, o principal desafio foi recuperar o calor sensível da escória de uma forma eficiente porque a escória tem uma baixa condutividade térmica.

Estes autores propuseram um processo em que primeiro se produz a escória num formato de folha, num processo contínuo executado por um sistema de rolos duplos arrefecidos a água sendo depois a água arrefecida num permutador com ar. O objetivo do processo desenvolvido é obter uma taxa de recuperação de calor de 30% ou mais, e de recuperar gás a altas temperaturas de 140°C ou superiores [16].

Os autores começaram por desenvolver primeiro um protótipo para um projeto-piloto de solidificação contínua de escória utilizando uma planta de rolo duplo (Figura 11).

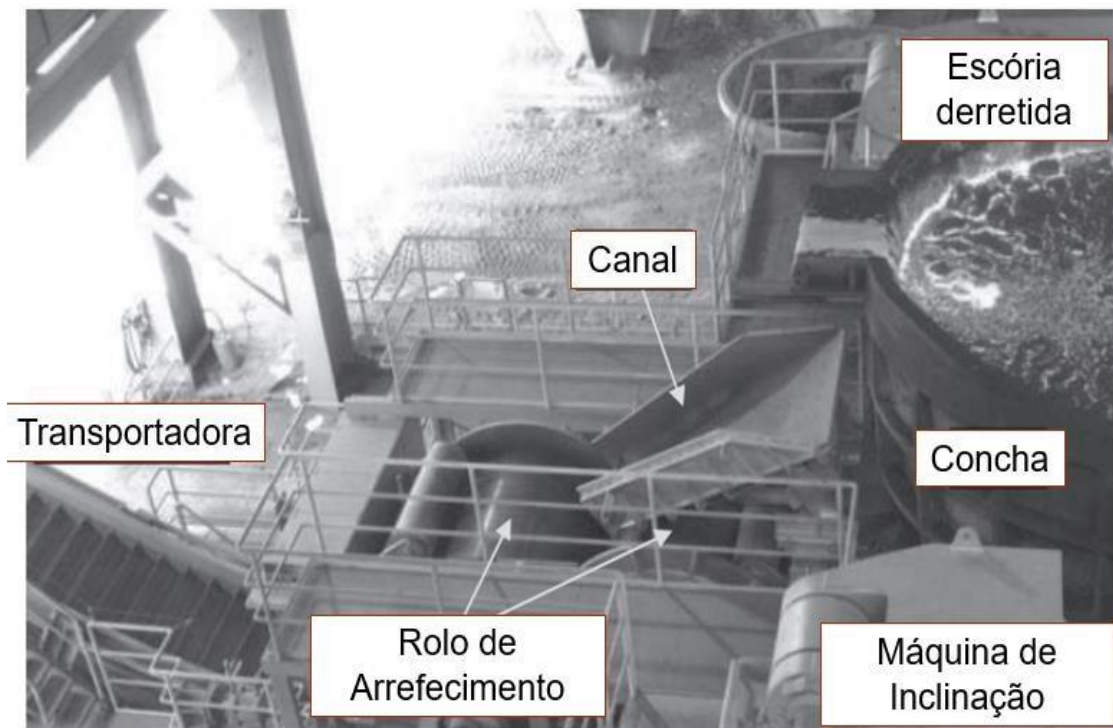


Figura 11 - Vista da projeto piloto [16]

A instalação de rolo duplo consiste, tal como o nome indica, na utilização de dois rolos que solidificam a escória de uma forma contínua e por uma máquina de inclinação que garante um fornecimento contínuo de escória líquida para os rolos, e uma transportadora que transporta a escória feita pelos rolos [16].

Nesta instalação os dois rolos de arrefecimento são colocados em contacto e cada um deles é rodado na direção externa e em consequência a escória é puxada para cima pelos rolos. Para melhorar o arrefecimento da escória, os rolos de arrefecimento são feitos de cobre e estão equipados com um sistema interno de arrefecimento com água [16].

Dado que a concha fornece aos rolos um fluxo constante de escória fundida de uma tonelada por minuto com 5 milímetros de espessura para a folha de escória no estado solidificado, foram desenvolvidos rolos a grande escala, com um diâmetro externo de 1,6 metros e 1,5 metros de largura.

O sistema de arrefecimento da escória está esquematizado na Figura 12. A escória em estado líquido presente na concha é vertida num fluxo constante através de uma máquina que inclina a concha e a escória cai por um canal para os rolos de arrefecimento. Os rolos são rodados na direção externa e a escória que arrefeceu e solidifica na superfície do rolo onde é puxada para cima à medida que os rolos rodam. Quando estes rolos rodam 180° a escória cai para a esteira ou transportadora.

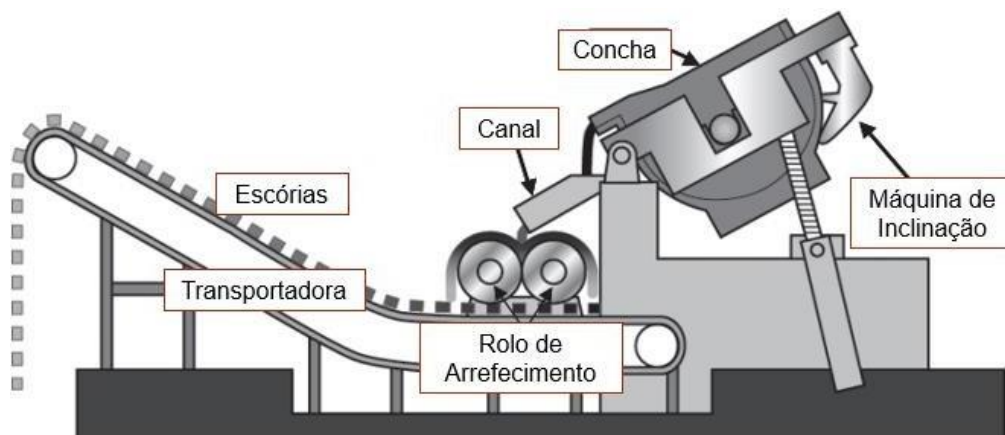


Figura 12 - Diagrama esquemático do equipamento de solidificação da escória [16]

Esta transportadora serve para transportar a escória solidificada e que ainda está a altas temperaturas e por isso a esteira é feita de aço inoxidável e por baixo está equipada com bicos de spray de água para arrefecimento. Quando a escória atinge a extremidade da esteira transportadora a escória cai num poço onde fica a arrefecer, pelos processos de aspersão de água ou arrefecimento natural (ao ar) sendo depois removida.

A temperatura da escória nos rolos e na transportadora foi medida através de termografia infravermelha, e em ambos os casos se assumiu uma emissividade de 0,92 [16].

Quando a escória solidificou nos rolos, a temperatura superficial da escória diminuiu entre 200 a 250°C. Quando a escória passou para a transportadora, a sua temperatura diminuiu ligeiramente e quando chegou ao final da transportadora, a escória estava com cerca de 1100°C. Este ensaio demonstrou que é possível garantir a temperatura necessária da escória, a 1000°C ou mais, para recuperar o calor sensível da escória [16].

Na Figura 13 podemos observar a estrutura da escória no estado sólido, e após a sua passagem pela transportadora e queda no poço. Ao cair no poço estilhaçou-se em bocados mais pequenos. Verificou-se que a superfície que esteve em contacto com o rolo era plana e dura enquanto o seu verso, o lado da folha que não esteve em contacto com o rolo era porosa e áspera [16].

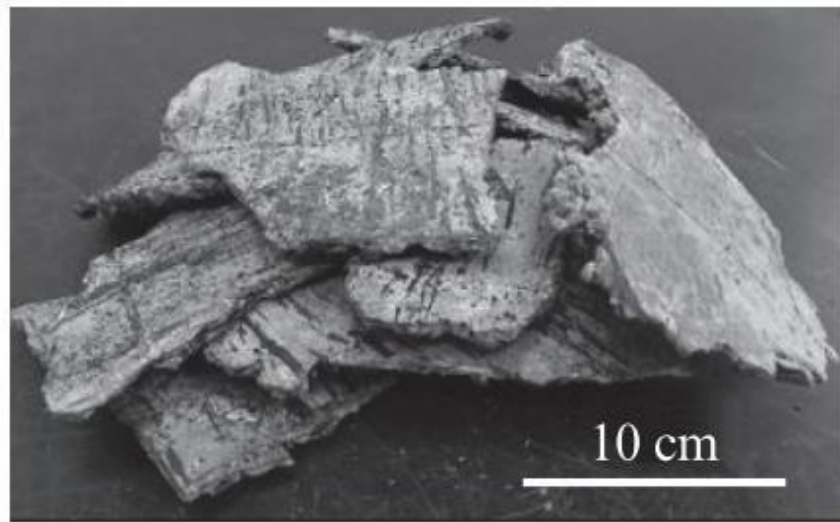


Figura 13 - Estado da escória após cair no poço [16]

3.3 Esboço da planta piloto para recuperação de calor da escória

Após testar a solidificação da escória no ensaio anterior, os autores propuseram construir um equipamento para proceder à recuperação do calor da escória de siderurgia. A instalação piloto está desenhada na figura 15:

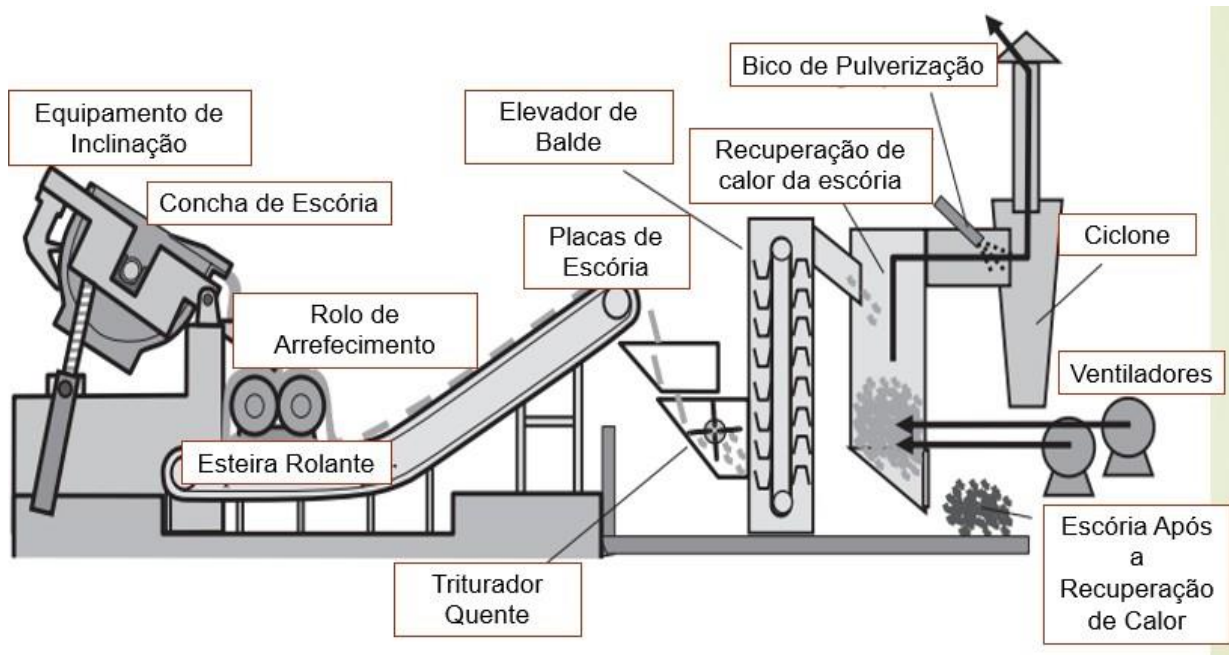


Figura 14 - Planta do projeto de recuperação do calor sensível de escória siderúrgica [16]

Esta instalação piloto de recuperação do calor da escória entra em ação quando a escória está a ser transportada pela esteira rolante. A escória é desviada para uma rampa de deslizamento e no fundo é triturada por um simples triturador para ficar do tamanho adequado. Essa escória triturada vai ser colocada em baldes de um elevador de baldes e entra assim no processo de recuperação de calor [16].

O calor é trocado ao soprar ar na escória compactada na câmara de recuperação de calor através dos dois ventiladores. A recuperação do calor é então avaliada, medindo a temperatura do gás recuperado.

Como o modelo foi construído em escala de laboratório e não em condições de fábrica, não está equipado com equipamento de utilização de calor (como uma caldeira, por exemplo), pelo que o gás de recuperação do calor foi arrefecido com pulverização de água, após avaliação das suas propriedades. O gás é libertado depois de lhe serem removidas as partículas em suspensão (pó) através de um ciclone. A câmara de recuperação de calor foi desenhada como um quadrado para facilitar o carregamento e descarregamento da escória [16].

3.4 Possibilidade de recuperar calor sensível da escória em instalações tipo tambor

A metalurgia é uma das indústrias de consumo intensivo de energia. Para fundir uma tonelada de aço gasta-se aproximadamente 450 kg de coque. Em simultâneo, cerca de 14% da energia é formada como calor sensível de aço e escória. Tendo em conta a entalpia do aço e da escória pode-se calcular que de calor da escória para aproveitamento varia entre os 4,5 e 9% do calor total [19].

Enquanto o calor do aço é parcialmente utilizado no alto-forno da siderurgia, o calor da escória não está a ser utilizado atualmente. Além disso, são gastos recursos energéticos e capitais significativos para arrefecer as escórias na sua transformação. Por exemplo, na fábrica Novolipetsk Steel, uma sucursal da NLMK, onde se produzem 80% de todos os produtos de aço da NLMK e 18% de todo o aço da Rússia (NLMK, 2022), existem 6 trincheiras com área total de 18.900 m² que são usadas para arrefecimento escória líquida produzida em alto-forno [19].

O calor (Q) disponível na escória pode ser avaliado com base na equação:

$$Q = C_{p_{ls}} \cdot (T_i - T_{cr}) + \lambda_s + C_{p_{ss}} \cdot (T_{cr} - T_t) \quad (1)$$

Em que:

$C_{p_{ls}}$ – Capacidade térmica específica de escória líquida, kJ/(kg·K), (1,28 kJ/(kg·K));

$C_{p_{ss}}$ – Capacidade térmica específica de escória sólida, kJ/(kg·K), (1,09 kJ/(kg·K));

λ_s – Calor específico da cristalização da escória (240 kJ/kg) [3, 4];

T_i – Temperatura de escória na saída do forno, °C. (1500 °C);

T_t – Temperatura final de escória, °C. (20 °C);

T_{cr} – Temperatura de cristalização, °C. (1050 °C).

Ao substituir os valores conhecidos na equação 1 por esses valores obtemos:

$$\begin{aligned} Q &= 1,28 \times (1500 - 1050) + 240 + 1,09 \times (1050 - 20) \leftrightarrow \\ \leftrightarrow Q &= 1939 \text{ kJ/kg} = 1,939 \text{ GJ/t} \end{aligned} \quad (2)$$

Uma instalação tipo tambor com um elevador em roda tem assim a possibilidade de arrefecer a escória e assim usar este material para gerar calor para aquecimento de água.

4 Análise de resultados

4.1 Apresentação do protótipo

Com o objetivo de recuperar parte do calor da escória projetou-se neste trabalho um protótipo de um equipamento para promover essa recuperação do calor da escória, figura 15. Após o processo de transformação do aço pela fábrica, neste caso a Siderurgia Nacional do Seixal, a escória, que resulta do processo de refinação do aço, segue em estado sólido para um permutador onde se vai processar a recuperação do calor da escória. A conduta possui um triturador que irá desfazer a escória para poder ser utilizada no processo seguinte de recobro das estradas, melhorando assim a qualidade da escória para outros processos.

O depósito dispõe de um ventilador que irá insuflar ar através de uma conduta, de maneira que seja possível fazer trocas de calor da escória para o ar, enquanto a escória estiver em queda até ao triturador.

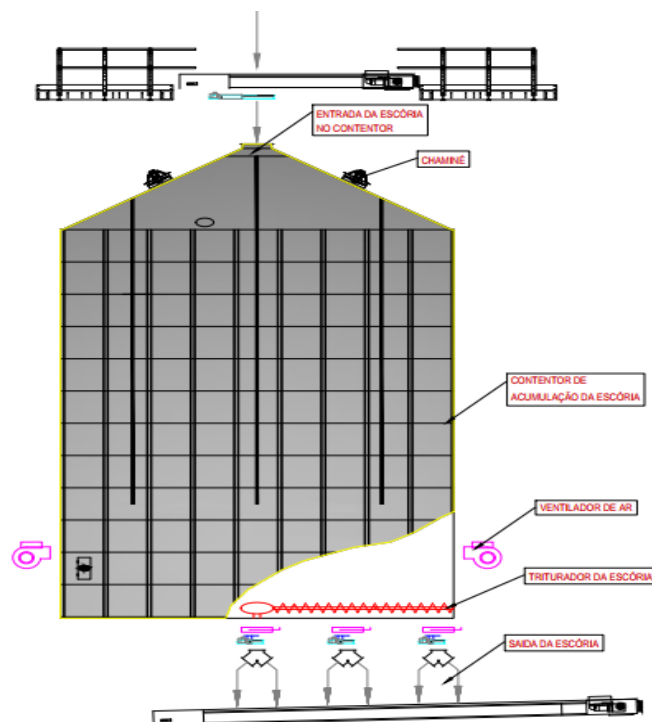


Figura 15 - Desenho do protótipo [adaptado pelo autor]

Neste trabalho será dimensionado o permutador ar-escória de modo que seja possível trocar calor da escória para o ar.

Na fase seguinte será utilizado um permutador ar-água, que será dimensionado neste trabalho para transferir calor do ar para um circuito de água que será aquecida no permutador. Na Figura 17 mostra-se em detalhe o permutador ar-água.

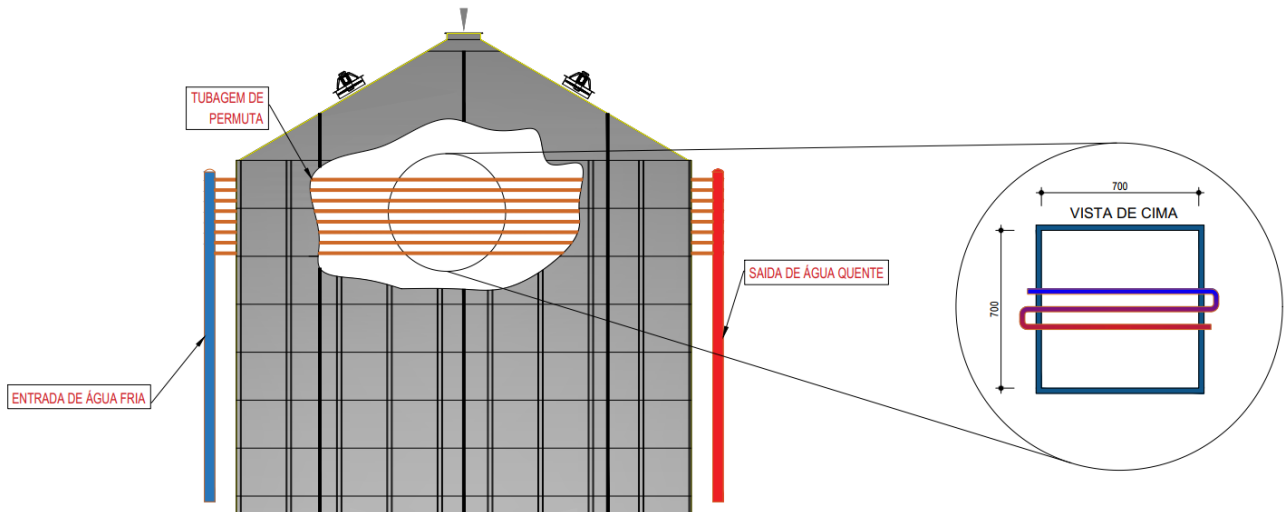


Figura 16 - Detalhe do sistema de permuta entre o Ar e a Água (adaptado pelo autor)

4.2 Apresentação de cálculos

Os permutadores são equipamentos que facilitam os processos de troca de energia entre dois ou mais fluidos. Esses fluidos podem estar separados por uma parede sólida que evita a mistura dos dois fluidos ou podem estar diretamente em contacto.

Os permutadores são equipamentos bastante utilizados nas indústrias para fazer aquecimento e condicionamento de ambientes, em recuperadores de calor, em processos químicos, entre outros. Neste equipamento existe transferência de calor entre uma substância quente e uma substância mais fria [20]. Sendo os permutadores extensivamente usados nas indústrias, reutilizando energia com o benefício para a indústria e para o meio ambiente [20].

Como os permutadores são utilizados para aquecimento ou arrefecimento de fluidos, para a manutenção de temperaturas em máquinas e em muitas outras aplicações, é de destacar o uso de permutadores de calor na área do conforto térmico, especialmente quando dedicados para o aquecimento e arrefecimento de ar. Os permutadores de calor são classificados de acordo com o equipamento usado e de acordo com o processo de transferência que utilizam para funcionar. Neste âmbito, temos as seguintes classificações:

a) Classificação quanto à direção do escoamento dos fluidos:

- Equi-corrente ou em paralelo: os fluidos movem-se no mesmo sentido, isto é, ambos os fluidos entram e saem pelo mesmo lado do permutador

- Contra-corrente: os fluidos movem-se em sentidos contrários e entram por extremidades opostas do permutador

- Correntes cruzadas: os fluidos movem-se perpendicularmente;

b) Classificação com base na aplicação:

- Sem mudança de fase dos fluidos

- Com mudança de fase dos fluidos:

- Condensadores;
- Evaporadores;
- Caldeiras, ebulidores, destiladores;

Nos permutadores de calor, a transferência de calor é realizada por meio de um processo convectivo e condutivo entre os dois fluidos, no qual o fluido com a temperatura mais alta transfere parte da sua energia para o fluido que apresenta uma temperatura mais baixa [20]. O balanço global de energia em permutador de calor é definido pela seguinte equação:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (\Delta T)_{ln} \quad (3)$$

Em que: \dot{Q} → Potencia térmica (W);

U → Coeficiente de global de transferência de calor, W/(m²K);

A → Área de superfície de transferência térmica (m²);

ΔT → Diferença de temperatura média entre os fluidos (K);

O coeficiente global de transferência de calor (U) de um permutador indica a capacidade de transferência de calor que este terá e combina os mecanismos de convecção e condução, responsáveis pela transferência de calor entre o fluido quente e o fluido frio. [20]. Assim sendo, este coeficiente global deve ter em consideração as diferentes resistências térmicas de condução térmica, de convecção através dos fluidos, e as resistências de contacto entre diferentes materiais.

Para os cálculos da troca de calor foi necessário considerar a capacidade térmica da escória, expressa a partir do C_p , que é de 0,9 kJ/(kg.K) como se pode ver na tabela 2 [21], uma vez que o valor não varia significativamente com a temperatura.

Tabela 2 - Resumo dos dados relevantes para o cálculo da escória como material TES na indústria [21]

Temperatura°C	C_p [kJ/(kg*K)]
200-300	0.9
300-400	0.9
500-600	0.9
500-1000	0.9
>1000	0.9

Para este estudo foi necessário perceber a quantidade de escória produzida, mas a entidade envolvida não facultou esses dados. Assim, assumiu-se que o caudal da escória para o protótipo seria de 5000 kg/h. Ao utilizar a fórmula apresentada de seguida foi possível calcular a perda de energia da escória quando arrefecida até à temperatura ambiente:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_i - T_f) \quad (4)$$

Em que:

\dot{m} → Caudal mássico da escória, kg/s;

C_p → Capacidade térmica, J/(kg.K);

T_i → Temperatura inicial da escória, °C;

T_f → Temperatura final do ar, °C;

$$\dot{m} = \frac{5000}{3600} \cong 1,39 \text{ kg/s} \quad (5)$$

Como sabemos que a Siderurgia Nacional do Seixal localiza-se no espaço físico do concelho do Seixal, averiguou-se que a temperatura do ar, no exterior, ao longo do ano de 2021, nesta localização geográfica, esteve sempre no intervalo entre os 8°C e os 28°C, o que pode ser observado na figura 17. Podendo-se assim, considerar que para este caso de estudo, a temperatura do ar no exterior, para esta região, é de 20°C.

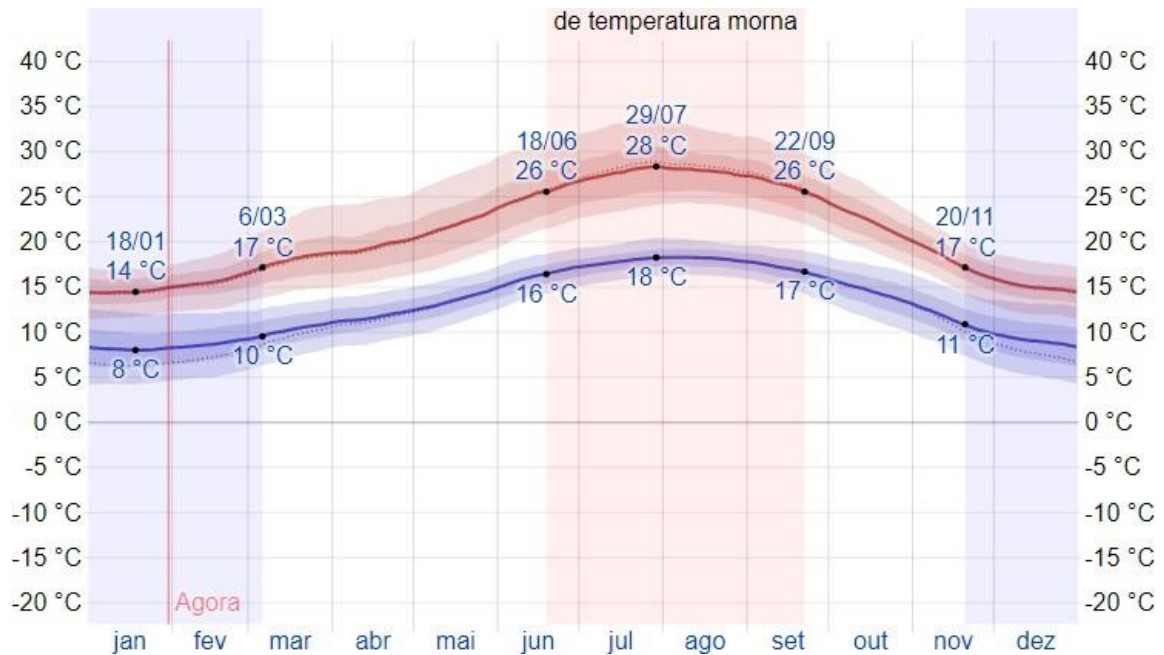


Figura 17 - Temperatura do ar exterior no concelho do Seixal, durante o ano de 2021

Para o cálculo da potencia térmica disponível da escória utilizou-se para a temperatura inicial a temperatura de cristalização de 1050°C.

A partir da utilização da fórmula 4, realiza-se a substituição dos dados por informações que já são conhecidos, verificando-se que a potência máxima possível de retirar à escória é de:

$$\dot{Q} = 1,39 \times 900 \times (1050 - 20) = 1\,287,5 \text{ kW} \quad (6)$$

4.2.1 - Cálculo de troca de calor entre a escória e o ar

É necessário estimar a área de transferência de calor entre escória e o ar. Para isso, adotou-se que as dimensões de cada fragmento de escória, são de 10 cm de largura por 10 cm de comprimento e uma espessura de 2 cm, tendo-se obtido então, um volume de $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ e uma área exterior de $0,028 \text{ m}^2$.

Em seguida, estimou-se que o tempo no qual a escória permaneceria no protótipo seria de 45 segundos sendo a massa média de escória no seu interior de:

$$m_{escória} = 1,39 \times 45 \cong 62,5 \text{ kg} \quad (7)$$

Considerando a massa volúmica da escória de 1700 Kg/m^3 obteve-se o seguinte volume de escória:

$$v_{escória} = \frac{62,5}{1700} \cong 3,68 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \quad (8)$$

Obtendo-se assim o número de peças:

$$N^{\circ} \text{ de Peças} = \frac{3,68 \times 10^{-2}}{2 \times 10^{-4}} \cong 183 \text{ Un} \quad (9)$$

O volume de escória no depósito será aproximadamente de $3,68 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ o que equivale a cerca de 183 fragmentos com uma área exterior total para a troca de calor de:

$$A = 0,028 \times 183 \cong 5,14 \text{ m}^2 \quad (10)$$

Para calcular as temperaturas de saída do ar e da escória utilizou-se o método ϵ -NTU, que se demonstrou eficaz, sendo adotado por vários autores [20].

O método NTU, conhecido como o método do número de unidades de transferência, é usado para calcular a taxa de transferência de calor nos permutadores de calor quando não há informações suficientes para calcular a diferença média de temperatura entre fluido e o sólido, designada por diferença média logarítmica de temperaturas (LMTD).

É importante referir que este método se baseia em dois números adimensionais em que o NTU é o número de unidades de transferência de calor e o C a relação de capacidades térmicas, que é calculado a partir da seguinte fórmula:

$$NTU = \frac{A \cdot U}{C_{menor}} \quad (11)$$

$$C = \frac{C_{menor}}{C_{maior}} = \frac{(\dot{m} \cdot C_p)_{menor}}{(\dot{m} \cdot C_p)_{maior}} \quad (12)$$

Em que:

A → Área (m²)

C_{menor} → Capacidade térmica menor entre os dois Fluidos

U → Coeficiente global de transmissão de calor

Para uma primeira abordagem de cálculos, serão arbitrados alguns valores, de modo, a efetuar cálculos preliminares da capacidade térmica dos fluidos.

A capacidade térmica é a grandeza física que permite determinar a relação entre a quantidade de calor fornecida a um corpo e a variação de temperatura observada neste, podendo-se assim, calcular com a seguinte equação [20]:

$$C = m \cdot C_p \quad (13)$$

$$C_{escória} = 1,389 \times 900 \cong 1250 \text{ J/s } ^\circ\text{C} \quad (14)$$

Para este caso de estudo, foi atribuído ao caudal do ar a insuflar pelo ventilador um valor de 3000 m³/h, o que equivale a 1,02 kg/s. O valor considerado para o Cp do ar, considerando que está a temperatura ambiente, cerca de 20 °C, é de 1012 J/ (kg.K) [20]. Assim sendo, determina-se que a capacidade térmica do ar é de:

$$C_{ar} = 1,02 \times 1012 \cong 1029 \text{ J/s } ^\circ\text{C} \quad (15)$$

Desta forma, a capacidade térmica maior dos dois componentes é o da escória e a menor é a do ar. Podendo-se então visualizar a relação entre ambas:

$$C = \frac{1029}{1250} \cong 0,82 \quad (16)$$

Estimando com base na literatura [20] que o coeficiente de base a convecção forçada entre o ar e a escória é de 100 W/ (m². °C). O coeficiente global de transmissão de calor, U, é igual ao coeficiente de convecção, h, é igual a 100 W/ (m². °C) devido ao entre contato direto entre a escória e o ar.

$$NTU = \frac{5,14 \times 100}{1029} \cong 0,50 \quad (17)$$

As eficiências relacionadas aos vários tipos de permutadores em função do NTU e do C foram apresentadas inicialmente por Kays e London [20]. Os valores foram apresentados tanto na forma de correlação quanto no formato gráfico. Desta forma, pode-se utilizar, a correlação para os permutadores contracorrente que será o mais aproximado deste caso:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{(-NTU(1-C))}}{1 - C e^{(-NTU(1-C))}} \quad (18)$$

De acordo com os cálculos anteriores chegou-se ao seguinte valor para a eficiência do permutador:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{(-0,82(1-0,50))}}{1 - 0,82e^{(-0,82(1-0,50))}} \leftrightarrow \varepsilon \cong 0,34 \quad (19)$$

Sabemos que a eficiência do permutador (ε) é calculada com a seguinte fórmula, se o elemento quente for o elemento de menor capacidade:

$$\varepsilon = \frac{m_q \cdot C_{p_q} \cdot (T_{q_1} - T_{q_2})}{m_q \cdot C_{p_q} \cdot (T_{q_1} - T_{f_1})} \leftrightarrow \quad (20)$$

$$\leftrightarrow \varepsilon = \frac{T_{q_1} - T_{q_2}}{T_{q_1} - T_{f_1}} \quad (21)$$

No caso de o elemento frio ser o de menor capacidade, a fórmula a utilizar é a seguinte:

$$\varepsilon = \frac{m_f \cdot C_{p_f} \cdot (T_{f_2} - T_{f_1})}{m_f \cdot C_{p_f} \cdot (T_{q_1} - T_{f_1})} \leftrightarrow \quad (22)$$

$$\leftrightarrow \varepsilon = \frac{T_{f_2} - T_{f_1}}{T_{q_1} - T_{f_1}} \quad (23)$$

Com estes dados podemos escrever a seguinte fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta T (\text{fluido de menor } mc)}{\Delta T (\text{máximo permutador})} \quad (24)$$

Simplificando:

$$\varepsilon = \frac{t_s - t_e}{T_e - t_e} \quad (25)$$

t → Fluido de menor capacidade térmica;

e → Entrada;

T → Fluido de maior capacidade térmica;

s → Saída;

Alterando os dados na equação podemos obter a temperatura de saída do ar:

$$\leftrightarrow t_{sar} = \varepsilon \cdot (T_e - t_e) + t_e \leftrightarrow \quad (26)$$

$$\leftrightarrow t_{sar} = 0,34 \times (1050 - 20) + 20 \leftrightarrow \quad (27)$$

$$\leftrightarrow t_{sar} \cong 373 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Obtendo a temperatura de saída do ar é possível determinar a temperatura de saída da escória através da igualdade entre potências cedida pela escória e a potência cedida pelo ar. Sendo desenvolvido pela seguinte fórmula [22]:

$$\dot{Q}_{perdida} = \dot{Q}_{ganha} \leftrightarrow \quad (28)$$

$$\leftrightarrow m_e \cdot C_{pe} \cdot \Delta T_e = m_{ar} \cdot C_{par} \cdot \Delta T_{ar} \leftrightarrow \quad (29)$$

Podemos usar os dados já obtidos na fórmula:

$$1,39 \times 900 \times (1050 - T_{se}) = 1,02 \times 1012 \times (528 - 20) \leftrightarrow \quad (30)$$

$$\leftrightarrow T_{s_{escória}} \cong 764 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Neste caso o ar entra a 20 °C e sai a 373°C logo a temperatura média é dada por:

$$T_{média\ ar} = \frac{373 + 20}{2} \cong 196,5^\circ\text{C} \quad (31)$$

Logo, tem de se refazer os cálculos com o C_p do ar á temperatura de 196,5 °C, pois arbitrou-se o valor do C_p inicialmente a 20 °C. Assim sendo o valor para o C_p do ar para este caso é de 1033 kJ/(kg.K).

Podendo assim calcular a temperatura de saída do ar para este valor:

$$C_{ar} = 1,02 \times 1023 \cong 1040 \text{ J/s } ^\circ\text{C} \quad (32)$$

Desta forma, a capacidade térmica menor dos dois componentes é o da escória e a maior é a do ar. Podendo-se então visualizar a relação entre ambas:

$$C = \frac{1040}{1250} \cong 0,83 \quad (33)$$

$$NTU = \frac{5,14 \times 100}{1040} \cong 0,49 \quad (34)$$

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{(-0,83(1-0,49))}}{1 - 0,83e^{(-0,83(1-0,49))}} \leftrightarrow \varepsilon \cong 0,34 \quad (35)$$

$$\leftrightarrow ts ar = 0,34 \times (1050 - 20) + 20 \leftrightarrow \quad (36)$$

$$\leftrightarrow ts ar \cong 371 \text{ } ^\circ C$$

Tendo em conta que os resultados da segunda iteração foram muito pertos do primeiro cálculo, não será necessário fazer uma nova iteração. Assumindo assim que o valor para a temperatura de saída do ar é de 371 °C para os próximos cálculos.

4.2.2 Permutador de calor Ar-Água

Com a estimativa da permuta de calor entre a escória e o ar podemos avançar para o estudo da permuta de calor entre o ar e a água, para que assim seja aproveitado este calor para consumo de águas quentes, conforme o esquema da figura 18.

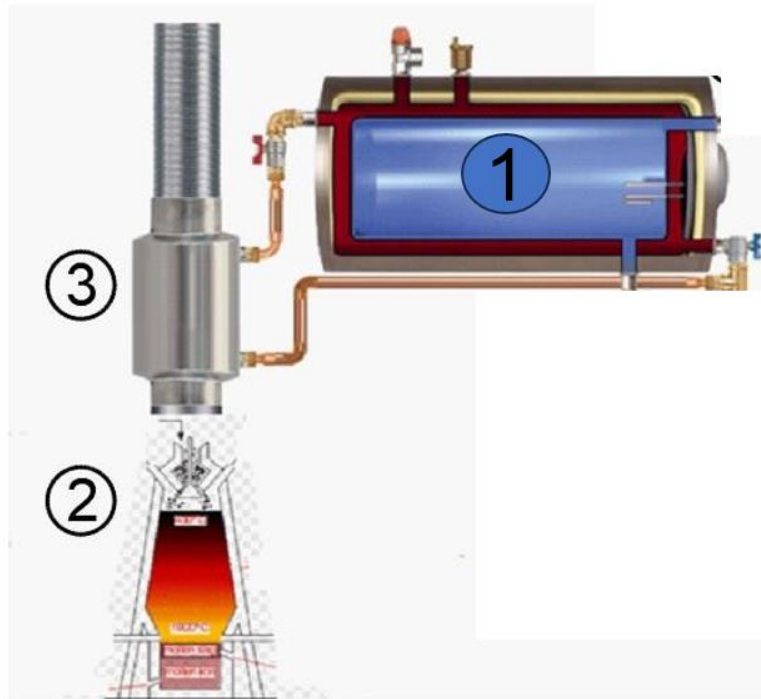


Figura 18 - Sistema de permuta Ar-Água

Em que:

- 1 – Depósito de acumulação;
- 2 – Permutador de calor Escória-Ar;
- 3 – Permutador de calor Ar-Água;

O ar quente depois de ser aquecido pela escoria vai ao encontro de um permutador de tubos por onde circula a água a ser aquecida. Depois de atravessar os tubos, a água aquece e permite assim que seja distribuída para os consumidores.

O coeficiente global de transferência de calor deve levar em conta a transferência de calor por convecção, a área de permuta e a resistência térmica dos tubos [18].

O coeficiente U é uma função da resistência térmica, que para um tubo é descrita com a equação seguinte [18]:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{A_i \cdot h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi kl} + \frac{1}{A_e \cdot h_e}} \quad (37)$$

Mas nos casos de tubos existe área interior, U interior para a água e existe área exterior e U exterior para o ar, assim sendo, iremos usar a fórmula do U interior:

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi kl} + \frac{A_i}{A_e} \cdot \frac{1}{h_e}} \quad (38)$$

Nesta fase do estudo será necessário dimensionar o caudal de água e a dimensão da tubagem, visto que já temos os dados sobre o caudal de ar. Será adotado uma tubagem com diâmetro 11 mm de diâmetro interior e a velocidade de água na tubagem será de 0,5 m/s, de forma a limitar a perda de carga no circuito. Assumindo que a água da rede se encontra a uma temperatura de 15°C utilizar-se-á a massa volúmica da água de 957 kg/m³ e o valor de 0,0011kg/(m.s) para viscosidade da água a 15 °C [20].

O regime de escoamento laminar ou turbulento depende principalmente da relação entre as forças inerciais e as forças viscosas do fluido, denominada por Número de Reynolds (Re). Este número serve para todos os tipos de escoamentos, mas com estas características adequa-se aos escoamentos internos de tubos circulares, o número de Reynolds é expresso por:

$$Re = \frac{\rho \times D_i \times v}{\mu} \quad (39)$$

Em que:

μ → Viscosidade dinâmica do fluido, kg/(m.s);

D_i → Diâmetro interno, m;

Re → Número de Reynolds;

Para a convecção no interior dos de tubos o valor de R_e é de:

$$R_{e_{\text{água}}} = \frac{957 \times 0,011 \times 0,5}{0,0011} \leftrightarrow \quad (40)$$

$$\leftrightarrow R_{e_{\text{água}}} = 4785$$

O escoamento é turbulento tendo em conta R_e é maior 2300.

O outro parâmetro fundamental para o cálculo da transferência de calor é o número de Prandtl (P_r), expressando a relação entre a difusão de quantidade de movimento e a irradiação de quantidade de calor dentro do próprio fluido.

O número de Prandtl é um número adimensional importante para os estudos de transferência de calor por convecção. Este número foi assim nomeado em homenagem ao físico alemão Ludwig Prandtl (1875-1953) que elaborou a seguinte fórmula:

$$P_r = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (41)$$

Em que:

P_r → Número de Prandtl;

C_p → Capacidade térmica, J/(kg.K);

μ → Viscosidade dinâmica do fluido, kg.(m.s);

k → Condutividade térmica, W/(m.K);

Tendo em conta que muitos dos valores de Pr dos vários fluidos estão tabelados não foi necessário calcular, assim sendo, o valor de tabela para o Pr da água é de 8,09 assumindo uma temperatura de 15°C como se pode verificar na tabela abaixo.

Tabela 3 - Propriedades da água saturada (Cengel, 2002)

Temp. (°C)	Pressão de Saturação (P _{sat} Kpa)	Densidade (kg/m ³)		Entalpia de Vaporização (KJ/Kg)	Calor		Condutividade Térmica (KW/m.k)		Viscosidade Dinâmica (μ.kg/m.s)		Número de Prandt (Pr)	
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
0,01	0,6113	999,8	0,0048	2.501	4.217	1.854	0,561	0,0171	1,792 x 10 ⁻³	0,922 x 10 ⁻⁵	13,5	1,0
5,0	8721	999,9	0,0068	2.490	4.205	1.857	0,571	0,0173	1,519 x 10 ⁻³	1,792 x 10 ⁻⁵	11,2	1,0
10	1,2276	999,7	0,0094	2.478	4.194	1.862	0,580	0,0176	1,307 x 10 ⁻³	0,946 x 10 ⁻⁵	9,45	1,0
15	1,7051	999,1	0,0128	2.466	4.185	1.863	0,589	0,0179	1,138 x 10 ⁻³	0,959 x 10 ⁻⁵	8,09	1,0
20	2,339	998,0	0,0173	2.454	4.182	1.867	0,598	0,0182	1,002 x 10 ⁻³	0,973 x 10 ⁻⁵	7,01	1,0

Tendo calculado os números de Reynolds e os números de Prandtl para a água podemos usar, para escoamento no interior dos tubos cilíndricos, a equação de Dittus-Boelter, com a qual será possível determinar o número de Nusselt (Nu), o qual também é um número adimensional. [26]

$$N_u = 0,023 \cdot R_e^{0,8} \cdot P_r^{0,4} \quad (42)$$

Assim sendo, ao substituir obtemos:

$$N_{u_{\text{água}}} = 0,023 \times 4785^{0,8} \times 8,09^{0,4} \leftrightarrow \quad (43)$$

$$\leftrightarrow N_{u_{\text{água}}} \cong 46,65$$

Obtendo o Nu da água podemos calcular os valores para o coeficiente de convecção interno pela equação (45):

$$N_u = \frac{h \cdot D}{k} \leftrightarrow \quad (44)$$

$$\leftrightarrow h = \frac{N_u \cdot k}{D} \quad (45)$$

E obtemos os valores de h interno para a água tendo em conta que o seu escoamento é no interior dos tubos:

$$h_{interno} = \frac{46,65 \times 0,589}{0,011} \leftrightarrow \quad (46)$$

$$\leftrightarrow h_{interno} \cong 2497,7 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{k})$$

Para o cálculo número de Reynolds do Ar considerou-se um valor para diâmetro exterior dos tubos de 14 mm. Considerando que a instalação teria 6 colunas de tubos, cada um com 3 passagens por dentro do permutador, é possível fazer o cálculo da velocidade do ar, deste permutador com seguinte fórmula:

$$v = \frac{V}{A_p - A_t} \quad (47)$$

A_p – Área de secção da conduta

A_t – Área ocupada pela tubagem de água

Assumindo que o caudal de ar é de 3 000 m³/h e que as dimensões da conduta serão de 700 por 700 [mm], a velocidade assume assim o valor de:

$$v = \frac{\frac{3000}{3600}}{(0,7 \times 0,7) - (0,014 \times 0,7 \times 3 \times 6)} \leftrightarrow \quad (48)$$

$$\leftrightarrow v = 2,66 \text{ m/s}$$

Sabendo que o ar entra em contacto com diâmetro exterior do tubo, o diâmetro será de 14 mm, e usando a viscosidade do ar de $2,18 \times 10^{-5} \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{s})$ e uma massa volúmica de $0,95 \text{ kg} / \text{m}^3$ a uma temperatura de 371°C, podendo assim, utilizar a fórmula de Reynolds para o exterior:

$$Re_{ar} = \frac{0,95 \times 0,014 \times 2,66}{2,18 \times 10^{-5}} \leftrightarrow \quad (49)$$

$$\leftrightarrow Re_{ar} = 1613$$

Para este fluido teremos um valor Pr de 0,7 a uma temperatura de 371°C. Para o ar que é um escoamento exterior de um banco de tubos a fórmula do Nu é a seguinte:

$$N_u = C \cdot R_e^n \cdot P_r^{1/3} \quad (50)$$

Para usar esta equação é necessário definir o espaçamento entre tubos dentro do contentor, assim sendo considerou-se o espaçamento da figura 19.

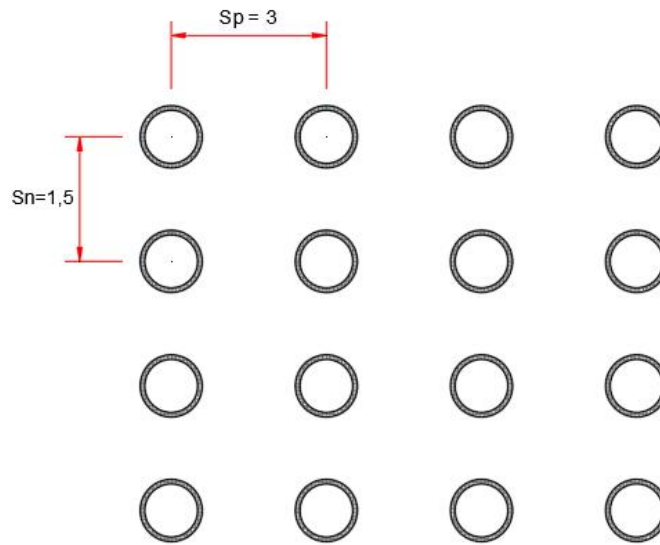


Figura 19 – Espaçamento considerado entre a tubagem de água [adaptado pelo autor]

Assim sendo, considerando este espaçamento entre tubagem retirou-se da tabela de correlação modificada de Grimson para a referência de calor entre tubos da referência [20], o valor de 0,396 para o C e o valor de 0,584 para o n , podendo assim substituir na fórmula.

$$N_u = 0,396 \cdot R_e^{0,584} \cdot P_r^{0,33} \quad (51)$$

$$N_{u_{ar}} = 0,396 \times 1613^{0,584} \times 0,7^{0,33} \leftrightarrow \quad (52)$$

$$\leftrightarrow N_{u_{ar}} \cong 26,3$$

Retirando da tabela o valor de $0,031 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ para a condutividade do ar a uma temperatura de 371°C , podemos calcular o h externo tendo em conta o valor de número de Nusselt:

$$h_{\text{externo}} = \frac{26,3 \times 0,031}{0,014} \leftrightarrow \quad (53)$$

$$\leftrightarrow h_{\text{externo}} \cong 58,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Define-se que cada tubo de água tem 2,1 metros de comprimento, tendo em conta que passa por 3 vezes pelo centro da conduta do permutador, como mostra a imagem:

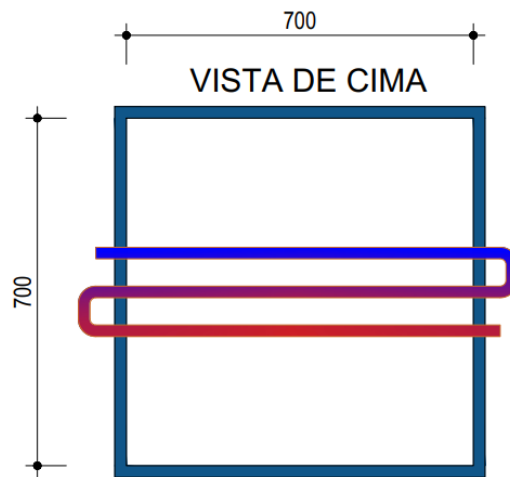


Figura 20 – Vista de cima da conduta, pormenorizando a tubagem de água (adaptado pelo autor)

Considerando que iremos colocar 12 tubos e que cada um tem 2,1 m assumindo que cada tubo faz 3 passagens pela conduta do permutador, pode-se assim, usar a fórmula (38) para determinar o coeficiente de transferência de calor entre os dois fluidos. Considerando que a condutividade térmica do tubo de cobre é de $401 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [18].

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{2497,7} + \frac{(10 \times \pi \times 0,011 \times 2,1) \times \ln\left(\frac{0,014}{0,011}\right)}{2\pi \times 401 \times 2,1 \times 12} + \frac{(12 \times \pi \times 0,011 \times 2,1)}{(12 \times \pi \times 0,014 \times 2,1)} \times \frac{1}{58,1}} \quad (54)$$

$$\leftrightarrow U_i = 71,8 \text{ W}$$

Agora, com o coeficiente de transferência de calor, pode-se utilizar novamente o método ϵ -NTU para possibilitar o cálculo das temperaturas finais do ar e da água após a troca de calor entre os mesmos elementos. Admitindo que o caudal da água é dado pelo seguinte cálculo:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \cdot N^{\circ} \text{ de tubos} \quad (55)$$

Em que:

\dot{m} → Caudal de água, kg/s;

ρ → massa volúmica, Kg/m³;

A → Área de passagem da água, m²;

v → Velocidade, m/s

Assumindo que a água da rede se encontra a uma temperatura de 15°C irá-se utilizar a massa volúmica da água será de 957 kg/m³ [20]. O caudal de água total será de:

$$\dot{m}_{\text{água}} = 957 \times 0,5 \times \pi \left(\frac{0,011}{2} \right)^2 \times 12 \leftrightarrow \quad (56)$$

$$\leftrightarrow \dot{m}_{\text{água}} = 0,55 \text{ kg/s}$$

Tendo assim todos os dados para usar o método ϵ -NTU:

$$C_{\text{água}} = 4185 \times 0,55 \cong 2283,7 \text{ J/(s. } ^{\circ}\text{C)} \quad (57)$$

Obtendo que para uma temperatura de 371 °C o Cp do ar é de 1009 J/(kg.s.°C) e uma massa volúmica de 0,5664 kg/m³, calculou-se o seu valor de C:

$$C_{\text{ar}} = 1009 \times 0,833 \times 0,5664 \cong 476,2 \text{ J/(s. } ^{\circ}\text{C)} \quad (58)$$

$$C = \frac{476,2}{2283,7} = 0,21 \quad (59)$$

De seguida será necessário calcular a área interior do tubo de modo a podermos a seguir calcular o valor de NTU:

$$A = D \cdot N^{\circ} \text{ tubos} \cdot \pi \cdot L \quad (60)$$

$$A_i = 0,011 \times 12 \times \pi \times 2,1 \leftrightarrow \quad (61)$$

$$\leftrightarrow A_i = 0,87 \text{ m}^2$$

Em que L é o comprimento do tubo, considerando a dimensão da conduta, m. Consegue-se assim calcular o NTU:

$$NTU = \frac{0,87 \times 71,8}{476,2} \cong 0,131 \quad (62)$$

Para este caso que é um permutador de correntes cruzadas irá-se utilizar a seguinte formula de correlação:

$$\varepsilon = 1 - e^{\left(-\frac{1}{C} \cdot (1 - e^{-CNTU})\right)} \quad (63)$$

$$\varepsilon = 1 - e^{\left(-\frac{1}{0,21} \cdot (1 - e^{-0,21 \times 0,131})\right)} \leftrightarrow \quad (64)$$

$$\leftrightarrow \varepsilon = 0,122$$

Calculando assim a temperatura de saída do ar:

$$t_{s_{ar}} = (\varepsilon \cdot (T_e - t_e)) + t_e \leftrightarrow \quad (65)$$

$$\leftrightarrow t_{s_{ar}} = (0,122 \times (15 - 371)) + 371 \leftrightarrow \quad (66)$$

$$\leftrightarrow t_{s_{ar}} \cong 327,4 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Podendo agora calcular a temperatura de saída da água:

$$\dot{m}_{ar} \cdot C_{p_{ar}} \cdot \Delta T_{ar} = \dot{m}_{água} \cdot C_{p_{água}} \cdot \Delta T_{água} \leftrightarrow \quad (67)$$

$$\leftrightarrow 0,47 \times 1009 \times (371 - 327) = 0,55 \times 4185 \times (T_{s_{água}} - 15) \leftrightarrow \quad (68)$$

$$\leftrightarrow T_{s_{água}} = 24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Desta forma iremos calcular a temperatura média para perceber se é necessário fazer nova iteração:

$$T_{média_{água}} = \frac{15 + 24}{2} \cong 19,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (69)$$

$$T_{média_{ar}} = \frac{327 + 371}{2} \cong 349 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (70)$$

Tendo em conta, estes valores de temperatura média para o ar e para a água não é necessário fazer nova interação porque os valores são muito aproximados e faria com que os valores da viscosidade e condutividade dos fluidos fossem iguais.

- A temperatura final do ar é de 327°C;
- A temperatura final da água é de 24°C;
- Assim, chega-se à conclusão que com esta geometria não é possível aquecer muito a água;
- Quanto às potências trocadas, no primeiro permutador o valor é de:

$$\dot{Q}_1 = 1,02 \times 1012 \times (371 - 20) = 362 \text{ kW} \quad (71)$$

E no segundo permutador a potência trocada foi de:

$$\dot{Q}_2 = 0,47 \times 1009 \times (371 - 327) = 21 \text{ kW} \quad (71)$$

- Quer isto dizer que a potencia trocada no segundo permutador foi 17% da energia trocada no primeiro permutador;
- Verifica-se um valor muito baixo para NTU no permutador ar-água, quer isto assim dizer, que este permutador está sub-dimensionado para a recuperação de calor, pelo que será necessário um trabalho futuro de otimização deste segundo permutador.
- Consegue-se perceber que a temperatura do ar após a permuta de energia com a água continua com uma temperatura alta pelo que será possível utilizar esta energia para outro tipo sistema ou instalação;
- De modo, a podermos obter resultados de potencias mais elevadas analisa-se, no capítulo seguinte, os dados que possam variar, obtendo assim, os valores mais favoráveis;

4.3 Processo de Análise de hipóteses

O processo de análise de hipóteses é uma metodologia de tentativa e erro que permite a melhoria do resultado final quer este seja um produto ou um processo. Este método é muito utilizado no meio industrial pois proporciona o desenvolvimento paulatino do processo, sendo ajustadas todas as variáveis da metodologia, para se obter resultados mais credíveis.

Este processo utiliza um plano que se vai refinando e melhorando ao longo das tentativas, sendo adotado em várias áreas do conhecimento. Este tipo de processo permite a produção de resultados efetivos e confiáveis, sendo utilizado com frequência em problemas da vida real.

Assim sendo, foi criada uma matriz para os dados de algumas variáveis do estudo, no sentido de encontrar a solução com melhores resultados para este sistema. Desta forma, iremos variar os dados, da seguinte forma:

- a) Caudal de escória por hora: este dado varia consoante a produção da siderurgia, tendo em conta que a siderurgia não esta sempre com a mesma quantidade de produção;
- b) Área da escória: cada pedra tem o seu formato. Muitas vezes a escória apresenta-se em pedras de formato irregular, por isso a área de cada pedra poderá variar;
- c) Temperatura do ar exterior: não é possível controlar as temperaturas do ambiente exterior, e estas temperaturas podem variar muito ao longo do dia;
- d) Caudal de ar: esta variante irá ser controlada pelo ventilador;
- e) Dimensões do conduta: as dimensões vão influenciar o resultado final, pois irá influenciar a velocidade do ar;
- f) Velocidade da água: quanto maior for a velocidade, maior será o caudal da água;
- g) Secção da tubagem: a tubagem irá também influenciar o caudal da água;
- h) Quantidade de tubos dentro do depósito: esta variável irá alterar a área de permuta entre a água e o ar.

Tendo-se estas variáveis em atenção criou-se uma matriz uniformemente espaçada para cada variável, de modo a ser coerente no estudo, como se pode verificar na tabela seguinte.

Tabela 4 - Variáveis para o processo iterativo

Variável	Justificação	Possibilidades
a)	Consoante a produção da fábrica. A instalação tem horas a produzir mais e menos escória;	$a=\{5000;10000;15000;20000\}$ kg/h
b)	Cada pedra escória tem a suas dimensões, por isso é necessário variar o tamanho.	$b=\{0,05;0,1;0,15\}$ m
c)	Temperatura do ar exterior no concelho do Seixal durante o ano (ver Figura 16)	$c=\{12;16;20;24\}$ °C
d)	Foram consideradas várias hipóteses de ventilador para este estudo.	$d=\{1000;4000;7000;10000\}$ m ³ /h
e)	É necessário variar a dimensões do depósito para perceber o que influencia com o protótipo	$e=\{0,5;1,5;2,5\}$ m
f)	Ter atenção a velocidade maxima aceitável na tubagem de cobre, que é de 1,5 m/s.	$f=\{0,5;1,0;1,5\}$ m/s
g)	Secções de tubagem de cobre para água, existe tubagem de maior dimensão, mas para este tipo de instalação estas foram as consideradas	$g=\{0,011;0,026;0,033\}$ m
h)	O valor máximo de tubos não pode ser maior para não estrangular a passagem do ar	$h=\{1;15;30\}$ un

Para cada conjunto de possibilidades foram calculadas as soluções possíveis. Usou-se todo o processo e fórmulas referidas anteriormente para o estudo do protótipo, foram considerados todos os valores de variáveis inscritos acima, o que tornou possível, através da análise dos resultados, verificar qual a variável que tem maior impacto.

Considerando todos estes dados, obtivemos 20.736 resultados para a temperatura de saída da água, para a temperatura de saída da escória e para a temperatura de saída do ar.

Elaborou-se um gráfico, o qual está representado na figura 21 apresentada de seguida, o qual foi projetado depois do cálculo das múltiplas possibilidades, para perceber quais os vetores que terão maior relevância para efetuar uma melhor recuperação de calor para obter as temperaturas mais elevadas para a água à saída do permutador. Considerou-se que os resultados mais relevantes para o projeto seria uma temperatura entre 30°C e 45°C, tendo em conta, que o objetivo do protótipo é aquecer água.

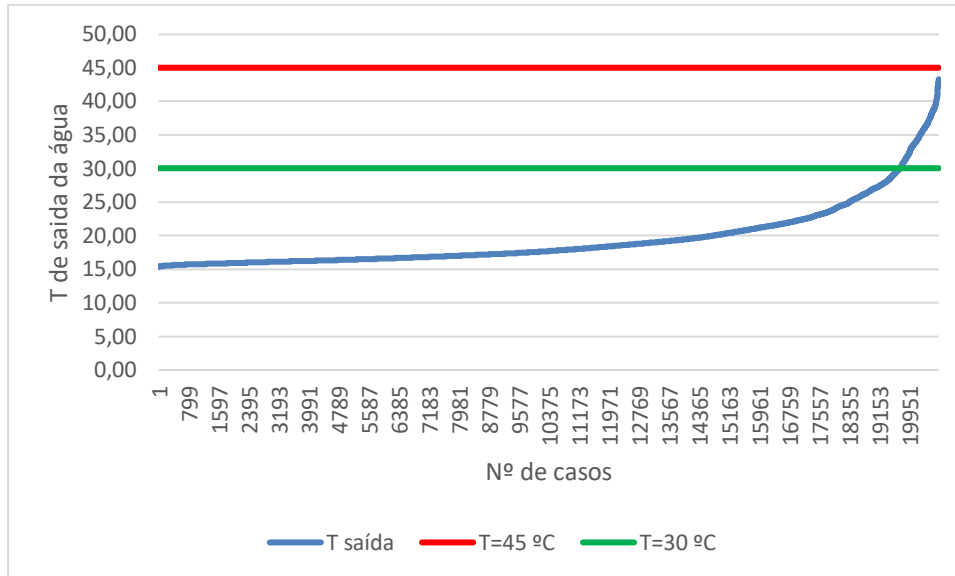


Figura 21 - Gráfico das possibilidades no processo de análise [Adaptada pelo autor]

A partir da observação do gráfico constata-se que a temperatura de saída da água não excede os 45 °C mesmo variando os valores. Isto deve-se pelo facto de anteriormente o permutador ar-água ter valores de NTU demasiado baixos, implicando que o permutador está subdimensionado.

Sabendo que os melhores valores são para uma temperatura de saída da água superior a 30 °C iremos só analisar esses dados, percebendo assim, quais as variáveis mais favoráveis para a instalação:

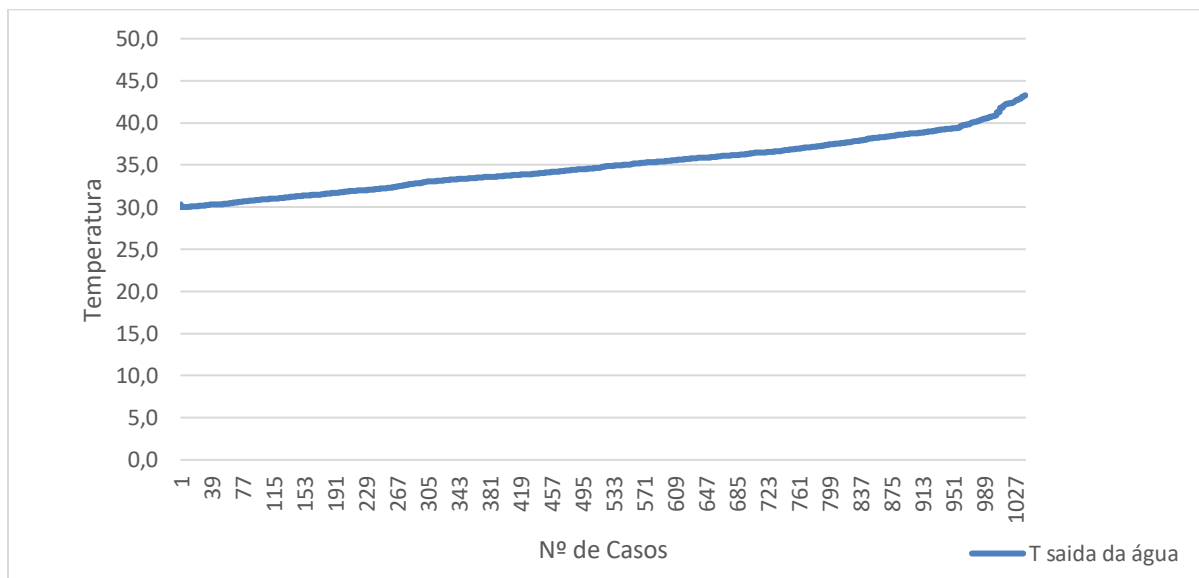


Figura 22 - Gráfico dos casos mais favoráveis da temperatura de saída da água mais favoráveis para a instalação [Adaptada pelo autor]

Conseguindo assim perceber, que dos 20 736 casos só 1040 é que são relevantes para o nosso estudo. Percebe-se que para estes valores da velocidade da água e a secção da tubagem manteve-se a mesma, com um valor de 0,5 m/s para a velocidade e uma secção de 11 mm para a tubagem.

Podendo assim verificar, com estes números de casos, que o fator mais condicionante para a instalação é o caudal de água, porque quanto menor for esse caudal de água, maior será a temperatura de saída da mesma.

Quer isto dizer que apesar de termos um valor de temperatura de quase 45°C, temos um caudal de água muito baixo, como se pode verificar no gráfico.

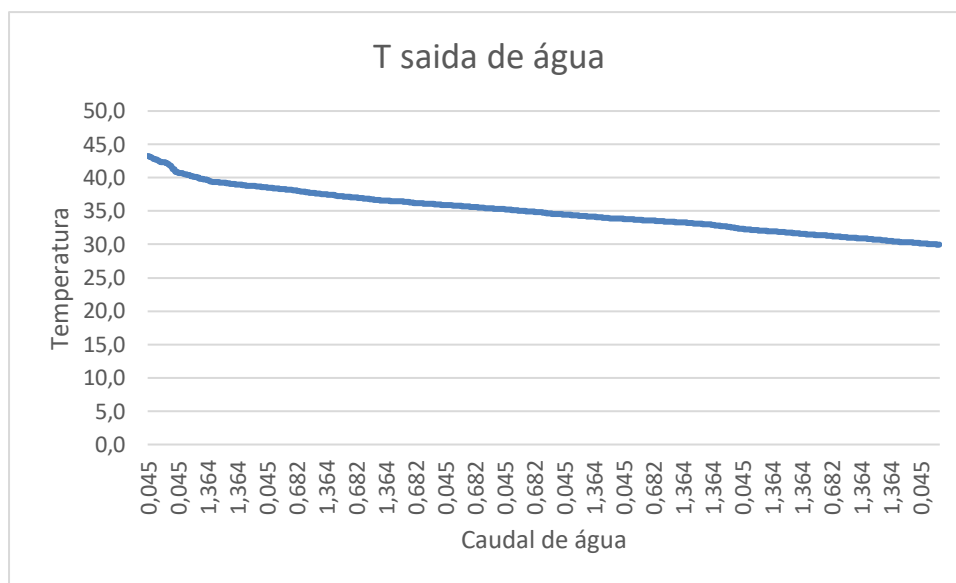


Figura 23 - Gráfico de comparação da temperatura de saída e caudal de água [Adaptada pelo autor]

Somando a isso, existe o facto de que teremos sempre perdas de energia pela tubagem, apesar da tubagem estar isolada. Mas é possível mesmo com estes valores de temperatura, a água ter utilidade como por exemplo um pré-aquecimento de água.

A partir de uma análise pormenorizada ao gráfico de todas as hipóteses presentes e tendo em conta todos os critérios, percebemos quais são os fatores que têm uma maior relevância para promover maior permutador de calor.

Outra das variáveis que irá influenciar a área de permuta é as dimensões do permutador. Ao aumentar as dimensões permutador, o comprimento da tubagem de cobre será incrementado e com isso aumentamos o comprimento da tubagem, logo, teremos uma maior área de permuta, mas velocidade menor do ar, que implicaria um menor coeficiente de convecção.

Com o objetivo de aumentar a área de permuta, e apesar de cada peça de escória a cair na conduta ter o seu formato e a sua área, a peça de escória perfeita para este fim será a peça de escória menor, porque quanto menor for a escória, maior a área de transferência com o ar.

O aumento do caudal da matéria com uma maior quantidade de energia e a diminuição da matéria com menor quantidade de energia irá sempre influenciar o processo no sentido de haver uma maior quantidade de troca de energia.

A variável que se considerou menos influenciadora é a temperatura do ar exterior. No concelho do Seixal a diferença entre as temperaturas máximas e mínimas é baixa, ou seja, a região apresenta uma baixa amplitude térmica e por isso esta variável não tem muita relevância nos resultados. É importante salientar que, muito provavelmente, nos momentos em que o alto-forno esteja a produzir baixos níveis de escória, este sistema de recuperação de calor não seja o ideal devido às suas características e especificações.

Entretanto, a partir do momento em que a indústria siderúrgica tenha uma produção de escória elevada e que a instalação esteja dimensionada de modo a acompanhar essa produção de escória, poderemos recuperar o calor e teremos um menor gasto de energia noutros sistemas de produção de água quente. Percebemos que com esta instalação é possível criar um procedimento para aquecimento de águas quentes aproveitando uma energia se iria dissipar no ambiente, sem qualquer utilização ou aproveitamento, promovendo assim uma nova e nobre utilização desta energia, a partir do aproveitamento do calor da escória.

5. Conclusões

Em função das empresas siderúrgicas já estarem a operar em níveis de melhorar de eficiência energética, a energia desperdiçada da escória tornou-se um ponto de atenção para refinar e apurar os processos de aproveitamento de energia nas siderurgias. Contudo, esta utilização apresenta alguns problemas, os quais limitam os processos que se podem usar para aproveitar o calor da escória.

Neste âmbito, o presente estudo teve como objetivo desenvolver uma solução de recuperação do calor da escória, com a finalidade de aproveitar esta energia para produzir água quente. Esta questão é especialmente relevante, pois o calor da escória, produzido a partir de energia de alto custo, está na maioria das siderurgias, a ser dissipado no meio ambiente, não sendo reaproveitado.

Para possibilitar este reaproveitamento, o projeto realizou o dimensionamento de um pequeno protótipo, materializado na forma de um sistema de permutadores térmicos em conjunto com vários requisitos técnicos e mecânicos, o qual envolveu vários cálculos e ainda o processo de análise de hipóteses, que é uma metodologia de tentativas que permite o desenvolvimento gradual do processo, sendo ajustadas todas as variáveis, com o intuito de se obter resultados mais credíveis.

Este protótipo demonstra que com uma geometria similar é possível aproveitar um pouco do calor da escória em processo conjugado com dois sistemas, em que o sistema inicial envolve a permuta de calor entre a escória e o ar, ao passo que, o segundo processo é um sistema que permite a troca de calor entre o ar e a água, a qual vai ser aquecida e enquadrada como água quente.

Com este sistema obteve-se valores para a temperatura de saída da água, apesar de ter aquecido, isto deve-se a facto do valor de NTU do segundo permutador demasiado baixo, quer assim dizer, que este permutador está subdimensionado, sendo assim necessário o desenvolvendo de um estudo para a otimização da instalação. Mas apesar de não se ter conseguido aquecer muito a água, tem-se valores bastante significativos para a temperatura de saída do ar, podendo-se aproveitar a energia do ar para outros equipamentos ou instalações

O processo de análise de resultados permitio constatar 20 736 possibilidades para os mecanismos de recuperação do calor da escória. Verificando-se que o caudal da água têm muita influencia no dimensionamento do segundo permutador, tendo em conta que influencia o valor do NTU..

Apesar de os resultados finais não serem os esperados, o presente trabalho nos permitiu concluir que, com um sistema idêntico ao que foi demonstrado, é possível rentabilizar a energia envolvida no processo siderúrgico transformando-a em calor para aquecer a água.

Desta forma, a água quente produzida a partir dos processos referidos anteriormente, poderá ser usada para outras instalações, permitindo assim uma sensível economia do consumo de energia e ainda uma diminuição dos gastos com a utilização de combustíveis fósseis, promovendo uma redução na emissão dos gases de efeito estufa e na preservação do meio ambiente, tornando-se rentável com o passar do tempo.

Neste contexto, constata-se que o presente estudo apresenta relevância, pois conseguiu contribuir com o cálculo e o dimensionamento de um protótipo que promove a economia circular, através da recuperação da energia no processo de produção do aço, que se constitui um dos setores industriais mais relevantes do mundo e que consome quantidades consideráveis de energia.

6. Referências Bibliográficas

- [1] H. Zhang *et al.*, “A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry,” *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 956–966, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.02.019.
- [2] Worldsteel association, “Climate change and the production of iron and steel Transforming steel production,” 2020.
- [3] G. Bisio, “Energy recovery from molten slag and exploitation of the recovered energy,” *Energy*, vol. 22, no. 5, pp. 501–509, 1997, doi: 10.1016/S0360-5442(96)00149-1.
- [4] M. Barati, S. Esfahani, and T. A. Utigard, “Energy recovery from high temperature slags,” *Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 5440–5449, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.07.007.
- [5] J. Wettestad and L. A. Løchen, “Steel industry,” *Corp. Responses to EU Emiss. Trading Resist. Innov. or Responsib.*, pp. 209–251, 2013, doi: 10.1201/9781420003840-24.
- [6] M. Barati, S. Esfahani, and T. A. Utigard, “Energy recovery from high temperature slags,” *Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 5440–5449, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.07.007.
- [7] Comisión Europea, 2018
- [8] Xie, D., & Jahanshahi, S. (2008, October). Waste heat recovery from molten slags. In Proceedings of the 4th international congress on science and technology of steelmaking, Gifu, Japan (Vol. 68, p. 674677).
- [9] Tiberg N. Heat recovery from molten slag. A new Swedish granulation technique. In: Millhone J, Wills E, editors. Conference heat recovery from molten slag. A new Swedish granulation technique, vol. 2. Berlin (Germany): Springer Verlag; 2010. p. 1837–42.
- [10] Becattini, V., Motmans, T., Zappone, A., Madonna, C., Haselbacher, A., & Steinfeld, A. (2017). Experimental investigation of the thermal and mechanical stability of rocks for high-temperature thermal energy storage. *Applied Energy*, 203, 373-389.
- [11] Marti, J., Geissbühler, L., Becattini, V., Haselbacher, A., & Steinfeld, A. (2018). Constrained multi-objective optimization of thermocline packed-bed thermal-energy storage. *Applied Energy*, 216, 694-708.

- [12] Krüger, M., Haunstetter, J., Knödler, P., & Zunft, S. (2018). Slag as inventory material for a thermal energy storage (TES): material investigation and thermo-mechanical consideration. *Energy Procedia*, 155, 454-463.
- [13] MEGASA. (2022). Memória de sustentabilidade 2020. Obtido de MEGASA: https://www.megasa.com/data/WebData/Products/SOSTENIBILIDAD/SOSTENIBILIDAD/2728_592_PT.pdf
- [14] Harsco Environmental. (2022). Obtido de Harsco Environmental: <https://www.ecoasic.com/pt/harsco>
- [15] Nunes, E. (13 de 09 de 2016). Harsco: como fazer dinheiro do "lixo" e ajudar o ambiente. Obtido de Dinheiro Vivo: <https://www.dinheirovivo.pt/empresas/harsco-como-fazer-dinheiro-do-lixo-e-ajudar-o-ambiente-12848780.html>
- [16] Tobo, H., Shigaki, N., & Hagio, Y. (2014). Development of heat recovery system from steel making slag. *JFE Technical Report*, 19, 126-132.
- [17] Tonomura, S., Kikuchi, N., Ishiwata, N., Tomisaki, S., & Tomita, Y. (2016). Concept and current state of CO₂ ultimate reduction in steelmaking process (COURSE 50) Aimed at sustainability in the Japanese steel industry. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2, 191-199.
- [18] ARM COR. (2022). The principles behind our heat recovery systems. Obtido de ARM COR Air solutions: <https://armcor.com.au/news/energy-recovery-understanding-principles/>
- [19] Sorokin, y. v., Demin, B. L., Smirnov, L. A., & Shcherbakov, Y. N. (2021). Possibility of slag sensible heat recovery on drum-like installations. *KnE Materials Science*, 6(1), 586-592.
- [20] Cengel, Y.A. (2002) *Heat Transfer: A Practical Approach*. 2nd Edition, McGraw-Hill, New York.
- [21] Nippon Steel Corp. Heat Recovery from Slag. Japan Patent, 81,151,7881981.
- [22] Foanene, A., & Diaconu, B. (2016). First Law of Thermodynamics. *Annals of the Constantin Brancusi University of Targu Jiu-Letters & Social Sciences Series*, (2).
- [23] Incropera, F.P. & DeWitt, D.P., *Introduction to Heat Transfer*, 4th Ed., Wiley, 2002

- [24] Castelo Branco, V. T. F., 2004, Caracterização de Misturas Asfálticas como Uso de Escória de Aciaria como Agregado. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
- [25] R. E. Izzaty, B. Astuti, and N. Cholimah, Optical fiber telecommunications V A components and subsystem. Academic Press, 1967.
- [26] Nowak, M. (2013). An interactive procedure for aggregate production planning. *Croatian Operational Research Review (CRORR)*, 4, 247-257
- [27] Mapa de obra. Entenda como funciona a reatividade das escórias. Obtido de Mapa de Obra: <https://www.mapadaobra.com.br/inovacao/reatividade-das-escorias/> (12.12.2023)
- [28] MFRURAL. Fornecimento de escória de alto forno. Obtido de MFRURAL: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/335237/escoria-de-alto-forno> (12.12.2023)