



Instituto Politécnico de Coimbra  
*Instituto Superior de Engenharia*

***Análise, caracterização e otimização de materiais em  
equipamentos da Indústria Cimenteira***



Nuno André Antunes Pedro

Relatório de Estágio para a obtenção do Grau de Mestre em  
Equipamentos e Sistemas Mecânicos

Coimbra  
2013



Departamento  
de Engenharia Mecânica

---

---

***Análise, caracterização e otimização de materiais em  
equipamentos da Indústria Cimenteira***

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em  
Equipamentos e Sistemas Mecânicos

**Autor**

**Nuno André Antunes Pedro**

**Orientadora**

**Doutora Cândida Maria dos Santos Pereira Malça**

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Coimbra, Setembro de 2013**

*O sucesso é um professor perverso. Ele seduz as pessoas inteligentes e as faz pensar  
que jamais vão cair.*

***Bill Gates***

## AGRADECIMENTOS

Tudo o que envolveu o trabalho aqui apresentado só foi possível com a contribuição de muitas pessoas que de forma mais ou menos directa me incentivaram e apoiaram nesta importante etapa para mim, por isso quero agradecer:

À Doutora Cândida Malça, na qualidade de minha orientadora, por me ter proporcionado inestimável apoio e orientação que muito estimularam o meu desejo de querer, sempre, saber mais e a vontade constante de querer fazer melhor. Muito obrigada pela total disponibilidade que sempre mostrou para comigo e pelo entusiasmo que demonstrou desde o primeiro dia. Agradeço também a oportunidade que me deu, pois foi uma mais-valia para conseguir concluir este trabalho da melhor forma.

À CIMPOR, por me ter disponibilizado os meios tecnológicos e humanos para que eu pudesse realizar este trabalho. Um especial obrigado a todas as pessoas que me ajudaram dentro da empresa, nomeadamente o meu co orientador Eng.º Joaquim Ganilho e à Eng.ª Teresa, pela disponibilidade e apoio demonstrada ao longo deste estágio. Um sincero obrigado, pela partilha de conhecimentos sobre a fábrica e todo o seu funcionamento.

Ao Eng.º César, Eng.º Joaquim, Eng.º António Andrade, Eng.ª Telma, Eng.ª Susana Mota e Eng.ª Catarina Navarro, um muito obrigado pelas conversas, companheirismo e ajuda, fatores muito importantes na realização deste estágio e que permitiram que cada dia fosse encarado com particular motivação.

Aos colegas, que se tornaram amigos, pelo tempo que tive o privilégio de passar com eles e que muito me ensinaram sobre a vida e a fábrica. Ao Sr. Costa Joaquim, Sr. Lúcio Neves, Sr. Ferraz e todos os outros, um muito Obrigado.

Aos meus colegas do DEM que sempre estiveram presentes quando precisei.

À Professora Irene, que me ajudou bastante no português e me deu dicas muito importantes para melhorar este trabalho.

Também uma referência muito especial aos meus amigos Tiago Palmeira e Vítor Bernardino, pela enorme amizade que criámos. Agradeço-lhes a partilha de bons momentos, a ajuda e os estímulos nas alturas de desânimo.

À minha amiga Adriana, que muito me ajudou Um Muito Obrigado, pelo tempo que me ouviu sobre a tese e as opiniões que me deu, bem como as palavras de incentivo, por ter aturado o meu mau feitio e ter acreditado em mim quando tudo parecia complicado.

À minha melhor amiga Rafaela, pelos longos telefonemas e pelas mensagens de apoio, pela paciência, pela compreensão e ternura que demonstrou ao longo deste tempo de amizade e que nunca deixou de me apoiar, principalmente nas noites de trabalho que sempre me acompanhou e deu-me forças para continuar, mesmo cansado. Muito Obrigado!

Ao meu irmão Filipe, que sempre fez tudo por mim, pelas conversas que tivemos, pelas nossas brincadeiras, pelo seu apoio e compreensão sempre demonstrados, nos momentos de mais nervosismo, pela companhia, pelos momentos de descontração e de boa disposição que permitiram dar-me força para continuar e fazer mais e melhor. Obrigado pela nossa cumplicidade e pela confiança que tens em mim.

À minha namorada, Joana, com quem tenho tido o privilégio de passar os últimos anos, pelas conversas que tivemos, pelas palavras de carinho, de apoio e de incentivo. Pela paciência que tem comigo, pela ajuda e opiniões que me deu ao longo deste trabalho, por todos os sacrifícios que fez para me ajudar, pelo seu amor e o carinho, um muito obrigado do fundo do coração.

Por fim manifesto um profundo agradecimento à minha família, principalmente aos meus pais que sem eles nada disto seria possível, pelos seus ensinamentos sobre a vida que me ajudaram a crescer e a formar-me como pessoa, por estarem sempre presentes nos bons e maus momentos, pela ternura e pelo orgulho com que sempre reagiram aos meus resultados ao longo da minha vida pessoal e académica.

Um MUITO OBRIGADO a todos!

## RESUMO

Este estágio insere-se no âmbito do Mestrado em Equipamentos e Sistemas Mecânicos e tem por objetivo aprofundar a formação do aluno em contexto de trabalho através da sua integração nas atividades de manutenção dos equipamentos mecânicos da Fábrica CIMPOR nomeadamente na otimização da fiabilidade dos equipamentos e no acompanhamento das atividades de manutenção.

A CIMPOR pertencente à empresa SGPS – Cimentos de Portugal e dedica-se fundamentalmente à produção de cimento. A produção de cimento é um processo complexo face aos enormes desafios que decorrem da elevada exigência de qualidade imposta pelos mercados e do cumprimento de parâmetros tradicionais que caracterizam e justificam a contínua procura deste tipo material, tais como a resistência à compressão e à flexão bem como as características estéticas. As exigências de fabrico deste tipo de produto colocam-se não só ao nível da qualidade da matéria-prima utilizada, mas também em termos do funcionamento adequado de toda a linha de produção, revestindo-se de particular importância a manutenção de todos os equipamentos mecânicos. Neste contexto, e dadas as condições de funcionamento adversas a que operam, os equipamentos requerem frequentes e dispendiosas intervenções de manutenção o que constitui um elemento crítico na linha de produção.

Para garantir a operacionalidade dos equipamentos utilizados nos processos produtivos a manutenção assume um papel determinante, influenciando de forma significativa não só o nível de qualidade dos bens produzidos bem como os custos de produção. Uma manutenção planeada, que atua no momento exato, maximizando os meios de produção, é por excelência o modelo ideal para a minimização dos custos de manutenção inerentes. Por um lado, maximizando a utilização dos equipamentos, por outro, minimizando os custos causados por paragens imprevistas ou mesmo por intervenções e substituições desnecessárias. Como tal, é de fundamental importância proceder à caracterização pormenorizada das propriedades mecânicas dos materiais que constituem os referidos equipamentos bem como equacionar a utilização de revestimentos dotados de determinadas especificidades de modo a controlar e/ou evitar o desgaste exagerado a que estão sujeitos.

**Palavras-Chave:** Clínquer, Revestimento, Desgaste, Projecção térmica.

## **ABSTRACT**

This training is inserted under the framework of the Masters Degree in Equipment and Mechanical Systems. It is designated to deepen the student's knowledge within a working environment through its integration in the maintenance activities of mechanical equipment in the factory CIMPOR, particularly in optimizing the reliability of equipment and the monitoring of maintenance activities.

CIMPOR which belongs to the company group SGPS – “Cimentos de Portugal” is fundamentally dedicated to the production of cement. The production of cement is a complex process compared to the enormous challenges arising from the high quality requirements imposed by markets and the compliance with traditional parameters that characterize and justify the continued demand for this type of material such as the resistance to compression and flexing as well as aesthetic characteristics. The maintenance requirements of this type of product are placed not only on the quality of the raw material used but also in terms of the proper functioning of the entire production line with particular importance the maintenance of all mechanical equipment. In this context, and given the adverse operating conditions in which they operate, the equipment need frequent expensive maintenance work, undoubtedly a critical element in the production line.

To ensure the operability of the equipment used in the production process maintenance plays a decisive role, significantly influencing not only the level of quality of goods produced as well as costs of production. Planned maintenance acting at the correct time, maximizing the means of production, is by far the ideal model to minimize the maintenance costs involved. On the one hand, it maximizes the use of equipment, on the other hand it minimizes the costs incurred by unforeseen stoppages or even by unnecessary interventions and substitutions. As such, it is of fundamental importance to make a detailed characterization of the mechanical properties of the materials that make up the referred equipments as well as equating the use of coating endowed with certain specificities in order to control and/ or avoid the undue wear to which they are subject to.

**Keywords:** Clinker, Wear, Coating, Thermal Spraying

# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	ii
RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	v
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABELAS .....	x
SIMBOLOGIA .....	xi
ABREVIATURAS .....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
Enquadramento e objectivos do estágio .....	1
Plano de trabalhos.....	2
Estrutura do Relatório.....	3
2. Funcionamento de uma fábrica de cimento/organização da CIMPOR .....	5
2.1. A Produção de Cimento na CIMPOR.....	5
2.1.1. Exploração de matérias-primas.....	6
2.1.2. Moagem do cru .....	7
2.1.3. Cozedura .....	8
2.1.4. Moagem do cimento .....	12
2.1.5. Emabalagem e expedição.....	13
2.2. Aproveitamento de Resíduos .....	15
2.2.1. Produção de CDR .....	16
2.2.2. Características dos CDR .....	21
2.2.3. Produção de CDR em Portugal Continental .....	23
2.2.4. Os CDR na CIMPOR.....	24
2.3. Desgaste estudado nos equipamentos da Cimpor .....	27
2.3.1. Desgaste por abrasão .....	28
2.3.2. Desgaste por erosão e desgaste por adesão ou fricção.....	32
2.3.3. Soluções minimizadoras dos efeitos do desgaste.....	33
2.4. Aplicação de Revestimentos .....	35
2.4.1. Projecção Térmica .....	36

2.4.1.1. High Velocity Oxygen Fuel Thermal Spray Process (HVOF) .....	40
3. Estudo do desgaste em equipamentos da Cimpor .....	45
3.1. Desgaste no extrator celular - Válvula SASSE .....	45
3.1.1. Preparação da amostra .....	47
3.1.3. Análise microscópia.....	48
3.1.4. Desgaste no extrator celular, 2ªparagem.....	49
3.2. Desgaste das tremonhas das ensacadoras .....	51
3.3. Vantagens da presença do revestimento nas tremonhas .....	53
4. Outros projectos/tarefas realizadas ao longo do estágio.....	55
4.1. Trabalho de organização nos processos da expedição .....	55
4.2. Trabalho na manutenção semestral.....	56
4.3. Verificação das telas transportadoras na parte de expedição.....	58
4.3. Outros trabalhos realizados.....	58
5. Conclusões gerais e trabalhos futuros .....	61
5.1. Principais Conclusões .....	61
5.2. Desenvolvimentos Futuros .....	61
5.3. Conclusão final .....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cronograma representativo das fases do estágio.	3
Figura 2: Processo de fabrico de cimento	6
Figura 3: Representação da 1º fase de fabricação de cimento	7
Figura 4: a) Roda nora da pré homogeneização da linha 1 e 2 b) Roda nora da linha 3, respetivamente.	7
Figura 5: Representação da 2º fase de fabricação de cimento	8
Figura 6: Representação da 3º fase de fabricação de cimento	8
Figura 7: Torre de ciclones do forno, um e dois.	9
Figura 8: Torre de ciclones do forno três, com respetivo pré-calcinador, silo de farinha e entrada do forno.	9
Figura 9: Arrefecedor de satélites (forno três antigo) e arrefecedor de grelhas (forno três novo), respetivamente.	10
Figura 10: Britador de clínquer desmontado e o final do arrefecedor.	11
Figura 11: Moinho de carvão.	11
Figura 12: Representação da fase de moagem de carvão para queima no forno.	12
Figura 13: Representação da 4º fase da fabricação de cimento	13
Figura 14: Representação da 5º fase da fabricação de cimento	14
Figura 15: Embalamento feito com, a) mangas de plástico protetor no pacotão; b) Paletes nas paletizadoras.	14
Figura 16: Processo ilustrativo do fabrico de clínquer e cimento.	15
Figura 17: a) CDR em fluff; b) CDR em pellet; c) CDR em Briquette.	18
Figura 18: Descrição de cada tipo de CDR.	18
Figura 19: Esquema do processo de produção de CDR	20
Figura 20: Diagrama de processo de uma instalação típica de produção doméstico e comerciais na Finlândia	20
Figura 21: Fatores de emissão dos combustíveis convencionais, biomassa e CDR	21
Figura 22: Potencial de produção de CDR, em 2013, com origem em refugos de triagem, TMB e TM de RU.	23
Figura 23: Potencial de produção de CDR a partir de RU, em 2013, em Portugal Continental, por Região.	23
Figura 24: Amostra dos CDR retirados de condutas nas instalações da CIMPOR.	25
Figura 25: “flow sheet” da instalação dos CDR para o forno	26

Figura 26: Diferentes mecanismos de desgaste	27
Figura 27: Representação dos Micro-Mecanismos	29
Figura 28: Relação entre ângulo de ataque e os mecanismos de desgaste abrasivo, para o “microplooughing” e “microcutting”	29
Figura 29: Desgaste a dois e três corpos	30
Figura 30: Abrasão por riscamento ou a baixas tensões	30
Figura 31: Abrasão por moagem ou altas tensões.	31
Figura 32: Transição entre regime de desgaste moderado-desgaste severo	32
Figura 33: Processo de projeção térmica	36
Figura 34: Diferentes tipos de projeção térmica	37
Figura 35: Diferentes tipos de projeção térmica.	38
Figura 36: Forma de projeção por HVOF	41
Figura 37: Funcionamento do HVOF.	42
Figura 38: Alhetas axiais e radiais e forra inferior do extrator celular “SASSE”.	45
Figura 39: Teste de dureza Vickers	46
Figura 40: Microestrutura da amostra que se retirou do forra lateral.	48
Figura 41: Comparação de microestruturas entre o Hardox 400 e a amostra estudada.	49
Figura 42: Forra: a) inferior e b) lateral da válvula respetivamente	51
Figura 43: Tampa de saída com: a) desgaste e b) depois da sua reparação	51
Figura 44: Tremonha da ensacadora 1	52
Figura 45: Interface gráfica da ferramenta computacional desenvolvida	56
Figura 46: Menu de uma das áreas do pacote	56
Figura 47: Tabela de manutenção de um determinado equipamento..	56
Figura 48: Arrefecedor em manutenção	57
Figura 49: Telas da parte da expedição.	58

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Constituintes químicos dos CDR	17
Tabela 2: Composição dos CDR a nível de impacto ambiental.	17
Tabela 3: Comparação das principais características do CDR relativamente a outros combustíveis sólidos	21
Tabela 4: Vantagens e desvantagens na utilização de CDR	22
Tabela 5: Expectativa de consumo de CDR	24
Tabela 6: Expectativa de consumo de CDR	24
Tabela 7: Deficiência no processamento de CDR.	25
Tabela 8: Vantagens dos vários processos de projeção térmica.	39
Tabela 9: Desvantagens dos vários processos de projeção térmica	39
Tabela 10: Comparação de durezas em dois lados distintos da amostra estudada	48
Tabela 11: Composição química do eléctrodo básico	50
Tabela 12: Composição química do eléctrodo duro	50
Tabela 13: Comparação de preço da tremonha com revestimento ou sem o revestimento.	53

## **SIMBOLOGIA**

**dB:** Decibel

**µm:** micrómetro

**m/s:** metros por segundo

**l/min:** litros por minuto

**kgf:** Kilograma força

**mm<sup>2</sup>:** milímetro quadrado

**HRC:** Dureza Rockwell C

**HRC:** Dureza Rockwell B

**HV:** Dureza *Vickers*

**kg/h:** Kilograma hora

**Mj/kg:** Megajoule por Kilograma

**WC-Co:** Carboneto de tungstênio com cobalto

**Ni:** Níquel

**Cr:** Crómio

**Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>:** Carboneto de Crómio 2

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono

## ABREVIATURAS

**PAPERSU:** Planos de Ação do Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos 2007-2016.

**CPS:** Centro de produção de Souselas.

**RIP:** Resíduos Industriais Perigosos

**CDR:** Combustíveis Derivados de Resíduos

**RDF:** *Refused derived fuel*

**RSU:** Resíduos sólidos urbanos

**RU:** Resíduos urbanos

**PDF:** *Plastic derived fuel*

**PPF:** *Paper and plastic fuel*

**RIB:** Resíduos industriais banais

**TMB:** Tratamento mecânico e biológico

**TM:** Tratamento mecânico

**LVT:** Lisboa e Vale do Tejo

**PVD:** *physical vapor deposition*

**CVD:** *Chemical vapor deposition*

**PT:** Projeção térmica

**EUA:** Estados Unidos da América

**HVOF:** *High Velocity Oxygen Fuel*

**HVAF:** *High Velocity Air Fuel*

**HVIF:** *hypersonic velocity impact forging*

**HFPD:** *high frequency pulse detonation spraying*

**MACH:** Unidade de medida de velocidade (Ma)

# 1. INTRODUÇÃO

## Enquadramento e Objetivos do Estágio

A CIMPOR é um grupo cimenteiro internacional com sede e centro de decisão em Portugal, tendo sido recentemente adquirido pelo grupo *Inter cement*. Esta empresa ocupa o décimo lugar no ranking mundial do sector, com uma capacidade de produção superior a 31 milhões de toneladas de cimento por ano. Estando presente em 13 países dos 4 continentes, possui um elevado *know how* técnico e uma forte e consolidada política de investimentos em investigação e desenvolvimento. Posiciona-se na vanguarda do desenvolvimento industrial do seu sector de atividade com produtos de qualidade reconhecida e certificada. O cimento constitui o núcleo central da atividade do grupo, sendo o betão, os agregados, as argamassas e a cal hidráulica produzidos e comercializados numa ótica de integração vertical.

Em Portugal, o grupo CIMPOR detém 4 empresas responsáveis por satisfazer as necessidades dos seus clientes, atendendo às especificidades de cada produto. Assim, nas fileiras dos cimentos e cal hidráulica temos a CIMPOR indústria; nos betões a betão Liz; nas argamassas a Ciarga e, por fim, nos agregados a Agrepor [1]. As exigências de fabrico deste tipo de produtos colocam-se, não só ao nível da qualidade da matéria-prima utilizada, mas também em termos do funcionamento adequado de toda a linha de produção, revestindo-se de particular importância a manutenção de todos os equipamentos mecânicos. Neste contexto, e dadas as condições de funcionamento adversas em que operam, os equipamentos requerem sistemáticas e dispendiosas intervenções de manutenção, o que constitui um elemento crítico na linha de produção. Como tal, é de fundamental importância proceder à caracterização pormenorizada das propriedades mecânicas dos materiais que constituem os referidos equipamentos, bem como equacionar a utilização de revestimentos dotados de determinadas especificidades de modo a controlar e/ou evitar o desgaste exagerado a que estão sujeitos.

Durante as paragens programadas dos equipamentos, foram observadas individualmente as peças dos mesmos e pode constatar-se que, alguns deles, denotavam desgaste. Depois de verificados os materiais dos equipamentos que sofreram desgaste por abrasão, foi-se conhecer o tempo de duração dos equipamentos, nomeadamente, a última vez que foi substituído o material em questão. Após a identificação do problema, a origem e o tempo de vida do material, identificou-se qual o revestimento que seria mais indicado à resolução do problema em questão. Para se fazer um estudo comparativo de durabilidade entre o revestimento atual e outros materiais que não sofreram revestimento, seriam necessários vários meses de estudo. Infelizmente, não foi possível verificar os equipamentos

que foram revestidos no tempo decorrente do estágio, mas, do que foi possível observar, é muito vantajoso, para a empresa, revestir alguns equipamentos.

As atividades de estágio previstas, além de permitirem o contacto com diversos tipos de equipamentos mecânicos e diferentes procedimentos utilizados na sua manutenção, possibilitaram também o desenvolvimento de competências ao nível da resolução de problemas complexos, bem como a participação no projeto de otimização do funcionamento da fábrica.

### Plano de trabalhos

De acordo com a disponibilidade e as necessidades da empresa acolhedora do estágio, propôs-se que as atividades a desenvolver decorressem de acordo com as seguintes fases:

*Fase 1.* Conhecimento do processo de fabrico do cimento;

*Fase 2.* Análise do funcionamento dos equipamentos integrantes da linha de fabrico de cimento, nomeadamente a parte de expedição;

*Fase 3.* Caraterização dos materiais que constituem os equipamentos sujeitos a desgaste exagerado;

*Fase 4.* Estudo e análise de materiais alternativos e possíveis revestimentos a utilizar, com vista a incrementar substancialmente a fiabilidade dos equipamentos;

*Fase 5.* Acompanhamento das atividades da manutenção durante a paragem semestral do forno três;

*Fase 6.* Elaboração do relatório final de estágio.

No cronograma da Figura 1, é possível verificar a distribuição das fases, anteriormente enunciadas, ao longo dos 6 meses de estágio.

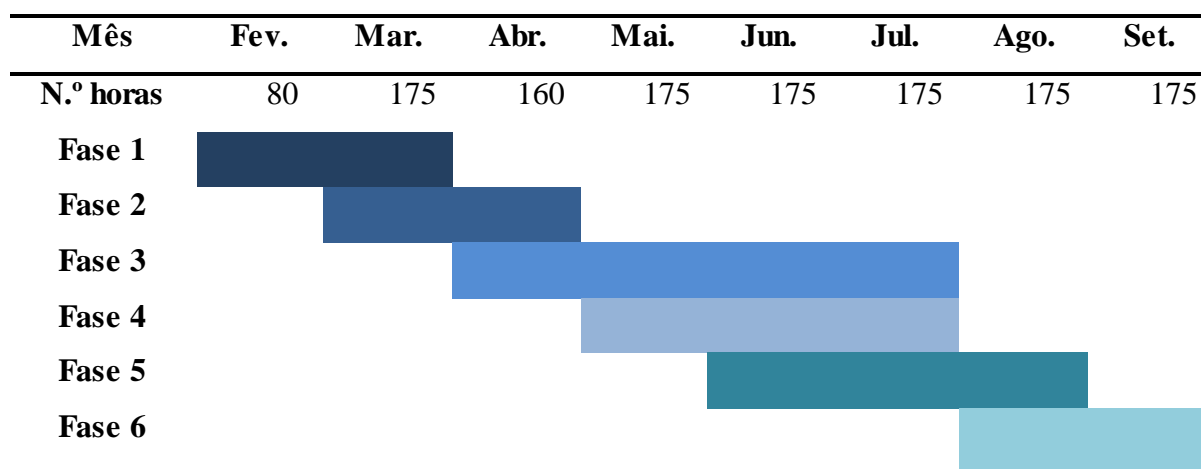


Figura 1: Cronograma representativo das fases do estágio.

## Estrutura do Relatório

O presente relatório está dividido em 5 capítulos.

No primeiro capítulo pretende-se dar a conhecer o fundamento deste estudo, apresentando os objetivos que se pretendem atingir ao longo do estágio. É apresentada também a própria estrutura do relatório de estágio.

No capítulo dois faz-se uma breve introdução à empresa onde foi efetuado o estágio - a CIMPOR -, assim como ao produto produzido - o cimento; falar-se-á do aproveitamento de resíduos na indústria cimenteira, nomeadamente dos CDR (Combustíveis Derivados de Resíduos); apresenta-se o conceito de desgaste, sendo descritos os diversos tipos de desgaste, em especial o tipo de desgaste estudado neste trabalho; descreve-se o que é projeção térmica, as suas vantagens e os vários géneros de projeção térmicas que existem. Dar-se-á maior relevância ao HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*), que foi o processo usado no decorrer do estágio.

No capítulo três descreve-se e apresenta-se a aplicação dos temas referidos anteriormente - aplicação prática dos processos de revestimento para os componentes que sofreram de desgaste.

No capítulo quatro evidenciam-se e explicam-se outros trabalhos levados a cabo durante o estágio.

No capítulo cinco faz-se a análise do trabalho desenvolvido, e serão enunciadas algumas conclusões e perspectivas de trabalho futuro, neste âmbito. Após o capítulo cinco, são apresentadas as referências bibliográficas, que contemplam as fontes pesquisadas e que serviram de base à fundamentação e desenvolvimento da presente dissertação.

Importa referir, nesta fase, que a descrição dos equipamentos de produção de cimento, bem como a descrição de todo o processo de fabrico não são de conhecimento técnico geral, existindo alguma confidencialidade industrial em relação a alguns assuntos; devido à complexidade de algumas fases e/ou equipamentos, teve, também, que se ter algum cuidado na sua abordagem. Assim, todo o processo foi descrito, apenas, com a profundidade necessária para a compreensão deste trabalho.



## 2 Funcionamento de uma fábrica de cimento/organização da CIMPOR em Portugal

### 2.1 A Produção de Cimento na CIMPOR

A CIMPOR indústria é líder no sector no mercado em Portugal. Desenvolve a sua atividade na produção e na comercialização de cimentos e cal hidráulica. Para complementar a gama de produtos, a fornecer aos seus clientes, também comercializa, em saco, argamassas secas Ciarga e cimento branco. Em Portugal, a CIMPOR indústria dispõe de uma capacidade de produção de cimento próxima de 7 milhões de toneladas por ano, repartida por 3 fábricas - Alhandra, Souselas e Loulé. Adicionalmente, a fábrica de cal hidráulica e duas moagens de cimento completam a sua estrutura de produção. Dispondo de 12 entrepostos comerciais, assegura a cobertura geográfica comercial de todo o país.

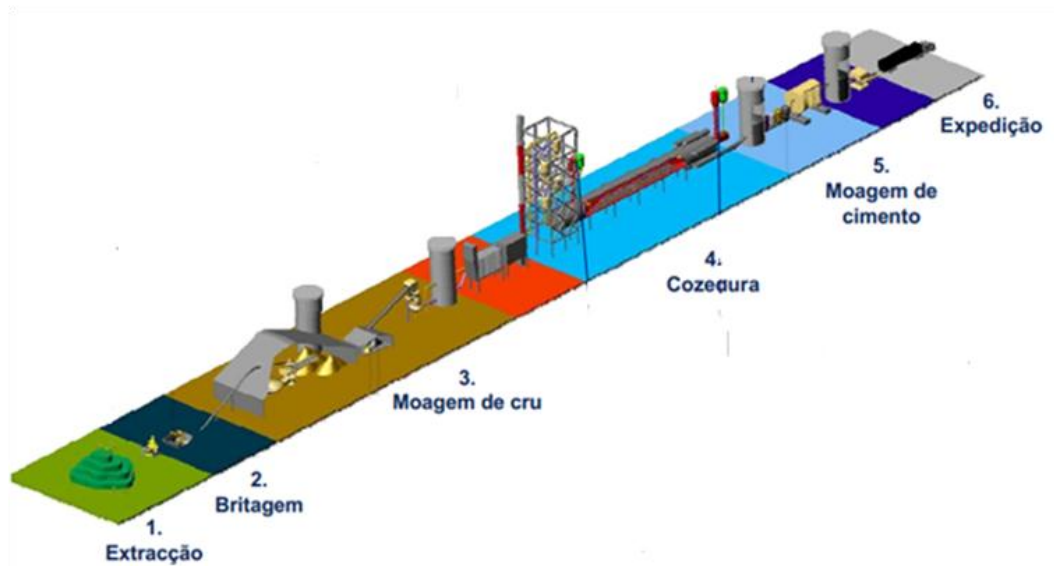
A fábrica de Souselas, onde foi efetuado o estágio, situa-se a cerca de 12 km da cidade de Coimbra. Esta fábrica, ou centro de Produção, detém a maior capacidade instalada de produção anual de cimento em Portugal. Dispondo para isso de 3 linhas de produção de *clínquer*, o que lhe permite produzir até 3,2 milhões de toneladas de cimento por ano.

O cimento, cuja matéria-prima principal é o calcário oriundo da exploração de pedreiras, é um ligante hidráulico - material inorgânico finamente moído - que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz de presa e endurece devido a reações e processos de hidratação. Depois do endurecimento conserva a sua resistência mecânica e estabilidade, mesmo debaixo de água [2].

A figura 2 representa as etapas/fases que constituem, na generalidade, uma linha de produção e expedição de cimento, sendo parte integrante dela apenas um forno. Pese embora a linha de produção de cimento apresentada na figura 2 contemple as cinco fases principais de produção do *clínquer*, há lugar a uma subfase onde se processa a moagem do coque de petróleo que é o principal combustível do forno. Existe ainda uma fase final, a fase de embalamento do cimento. Nas secções seguintes serão descritas pormenorizadamente as referidas fases de produção de cimento de maneira a entender-se o funcionamento da fábrica, bem como a elaboração do produto final.

No Centro de produção de Souselas, como já dito anteriormente, existem três fornos, dos quais apenas dois se encontram em funcionamento. Dois dos fornos (fornos 1 e 2) são idênticos, sendo o seu funcionamento semelhante. O terceiro forno (forno 3), que é o mais recente, apresenta equipamentos mais atuais e mais avançados tecnologicamente e, apesar do seu funcionamento não diferir muito do dos outros dois, apresenta uma capacidade de

produção muito maior. É de salientar que o forno 1 está desativado e o forno 2 começou a trabalhar no decorrer deste estágio, para que o forno 3 parasse para manutenção.



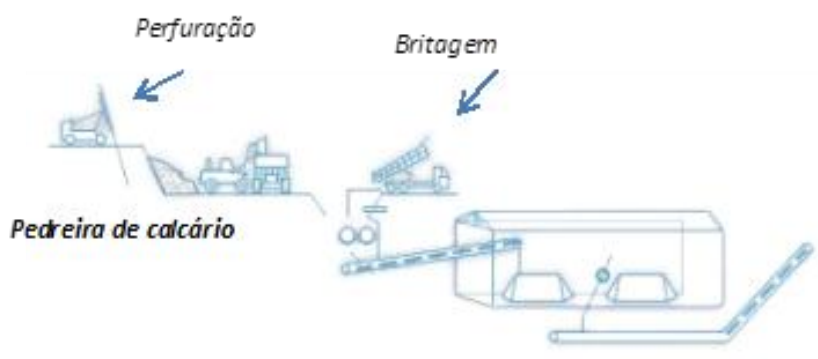
**Figura 2:** Processo de fabrico de cimento [3]

O processo de produção de cimento é um processo complexo que envolve muitas etapas de transformação das matérias-primas iniciais até à obtenção do produto acabado - o cimento. Este processo produtivo pode ser dividido em cinco fases principais. Nos tópicos seguintes serão explicados o funcionamento de cada fase deste processo, que vai da matéria-prima até ao produto final.

### 2.1.1. Exploração de matérias-primas

Após a decomposição da pedra calcária - matéria-prima extraída da pedreira, o material passa por britadores, onde é efetuada a primeira fase de diminuição da granulometria das matérias-primas, de modo a facilitar o seu processo nas fases seguintes. Depois da passagem pela britagem, é feito um controlo da qualidade e da percentagem da mistura das matérias-primas, após o qual, a mistura de matérias-primas segue para um “parque” coberto designado de pré-homogeneização. Este trajeto é esquematicamente representado na Figura 3.

Na pré-homogeneização, as matérias-primas são misturadas de modo a obter-se uma mistura homogénea na percentagem pretendida, e, quando a percentagem pretendida não está de acordo com as exigências do produto, introduzem-se outros produtos chamados matérias-primas de correção. A Figura 4 ilustra a forma como o material é recolhido para ser transportado para o moinho de cru. As figuras 4 a) e 4 b) mostram a diferença entre as “roda noras” existentes na pré - homogeneização 1 e 2, respetivamente.



**Figura 3:** Representação da 1ª fase de fabricação de cimento



**Figura 4:** a) Roda nora da pré homogeneização da linha 1 e 2 b) Roda nora da linha 3, respetivamente

### 2.1.2. Moagem do cru

Após a pré-homogeneização, o material entra numa segunda fase de diminuição de granulometria e começa um processo de desidratação, no qual é retirada uma percentagem elevada de humidade existente nas matérias-primas. Esta fase ocorre na moagem de cru, conforme ilustra a figura 5, e é realizada por moinhos horizontais de bolas (linhas 1 e 2) ou num moinho vertical de galgas (linha 3).

O processo, embora semelhante nos dois tipos de moinhos, difere na maneira de funcionamento; o moinho vertical apresenta melhor eficiência energética e maior capacidade, tendo, no entanto, como desvantagens o custo de aquisição inicial, bem como o custo de manutenção, que são superiores.



**Figura 5:** Representação da 2ª fase de fabricação de cimento

Após passagem pela moagem de cru, o material, agora designado de farinha, é armazenado em silos. Estes silos servem de armazenamento temporário da farinha, onde vai sendo homogeneizada por um sistema de caleiras porosas onde é injectado ar, antes de servir de “alimento” à torre de ciclones. Além disso, devido à capacidade dos silos, existe um intervalo de tempo para se poderem efetuar intervenções no moinho de cru, sem que seja necessário parar o forno.

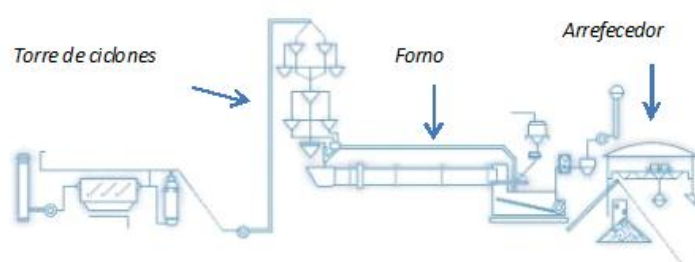
### 2.1.3. Cozedura

A terceira fase de produção começa na torre de ciclones. A farinha passa por um processo de decarbonização à medida que vai descendo para alimentar o forno, conforme ilustrado na figura 6. Esta vai sendo aquecida à medida que passa pelos vários estágios (ciclones) da torre de ciclones.

A figura 7 ilustra os vários estágios da torre de ciclones. A farinha entra no topo da torre e é aquecida, no primeiro estágio de ciclones, a uma temperatura de sensivelmente 400 °C e sai no último estágio, para alimentar o forno a uma temperatura de sensivelmente 900 °C.

Para auxiliar este pré-aquecimento existe, na linha três, um pré-calcinador conforme mostra a figura 8. Este pré-calcinador funciona como um queimador secundário, o qual aquece os gases que passam em co-corrente pela farinha, aquecendo-a mais eficazmente.

No interior do forno, a farinha passa por diversas mudanças químicas até se transformar em *clínquer*. A sua “condução” tem de ser cuidadosa, de modo a conseguir-se criar o *clínquer* nas melhores condições e com a qualidade desejada.



**Figura 6:** Representação da 3ª fase de fabricação de cimento



**Figura 7:** Torre de ciclones do forno, um e dois.



**Figura 8:** Torre de ciclones do forno 3, com respetivo pré-calcinador, silo de farinha e forno.

É fácil ocorrerem variações no processo, cabendo ao operador de comando minimizar essas variações e estar atento a variáveis que indiquem a iniciação de formação de “agarramentos”, assim como a potenciais quedas de crosta no interior do forno. Estas crostas podem danificar o refratário existente no interior do forno podendo, mesmo, em casos extremos, levar à rotura da virola do forno, devido ao seu aquecimento, uma vez que passaria a estar desprotegida da proteção térmica dada pelo refratário.

As diferenças nas dimensões dos fornos, no tipo de torre de ciclones e tipo de arrefecedor e respetivas dimensões fazem com que o forno 3 tenha uma capacidade de produção superior à capacidade de produção combinada dos fornos 1 e 2.

Logo à saída do forno existe um arrefecedor de grelhas, que tem como função arrefecer rapidamente o *clínquer*, de modo a que este mantenha as propriedades desejadas. Este rápido arrefecimento do *clínquer* também torna mais fácil a sua posterior moagem, tornando-o mais reativo e com menor expansibilidade. No CPS (Centro Produção de Souselas), existem arrefecedores de grelhas nas três linhas, sendo que o da linha três foi alterado para este tipo de arrefecedor, com o objetivo de aumentar a sua capacidade de produção e melhorar o seu consumo energético, uma vez que originalmente possuía um arrefecedor de satélites, como é possível observar na figura 9.



**Figura 9:** Arrefecedor de satélites (forno três antigo) e arrefecedor de grelhas (forno três novo), respetivamente.

O *clínquer* que sai dos fornos é arrefecido pelos arrefecedores, passando de seguida por um britador existente no final dos arrefecedores, conforme mostra a figura 10, sendo posteriormente armazenado, tanto em silos, como em armazéns circulares cobertos, designados por stock polar. O *clínquer* pode, assim, ser carregado a granel para o interior de camiões (caso haja o pedido de compra de *clínquer* por parte de um cliente), ou fica armazenado até ser utilizado nas moagens de *clínquer*, para se produzir o produto final, o cimento.

Existe ainda uma fase paralela à instalação principal; esta parte da fábrica é responsável pelo tratamento dos combustíveis utilizados no aquecimento dos fornos existentes. Os combustíveis utilizados são o carvão, o *fuel*, RIP (Resíduos Industriais Perigosos) e CDR (Combustíveis Derivados de Resíduos). A instalação mais recente da fábrica é a instalação que se dedica à queima de CDR. O carvão utilizado é o coque de petróleo que é um derivado da hulha.

O coque de petróleo é moído, no moinho, antes de ser injetado no interior do forno através de um queimador. Esta moagem, como se pode verificar na figura 11, efetua a redução de granulometria do coque de petróleo. Reduzindo a granulometria do carvão, este irá apresentar uma queima mais rápida e mais completa. A fase de moagem é representada na figura 12.

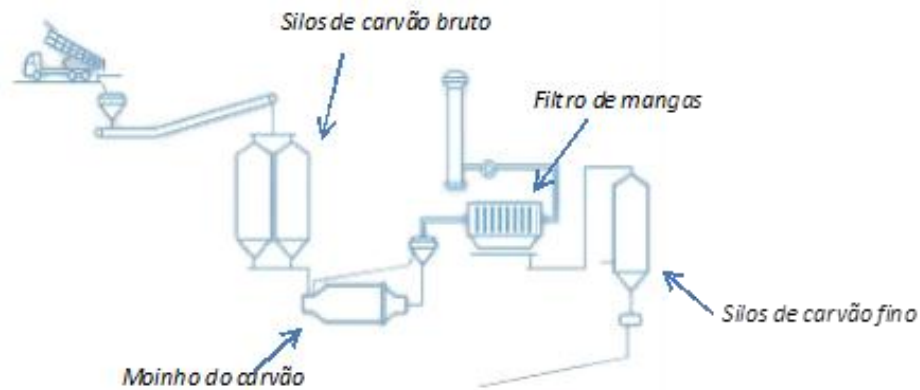
A queima de fuel e coque de petróleo é efectuada nas três linhas do CPS, mas apenas é possível efetuar a queima de combustíveis alternativos na linha três. O CPS possui, para isso, uma instalação de queima de RIP e, recentemente, foi adquirida uma instalação para queima de CDR, que alimenta o queimador principal e o pré-calcinador, sendo este último alimentado com CDR de maior granulometria.



**Figura 10:** Britador de *clínquer* desmontado e o final do arrefecedor.



**Figura 11:** Moinho de carvão.

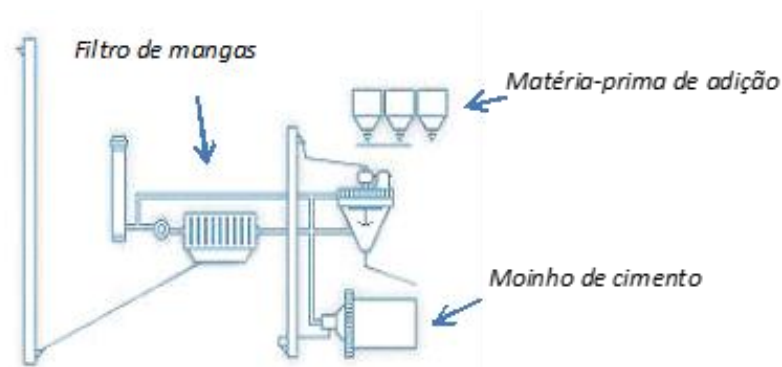


**Figura 12:** Representação da fase de moagem de carvão para queima no forno.

No CPS existem ainda dois silos, um para o armazenamento de gesso e outro para cinzas volantes. O gesso é adicionado, em pequena percentagem, juntamente com o *clínquer* para serem moídos nos moinhos de cimento e tem como função aumentar o tempo de presa, ou seja, aumentar o tempo de manuseamento do cimento antes de este endurecer. Além disso, a adição de cinzas volantes ao cimento tornam a sua hidratação mais lenta, fazendo com que a libertação de calor seja menor, diminuindo, assim, a probabilidade de fissuração do cimento, quando endurecido.

#### 2.1.4. Moagem do cimento

O cimento é, finalmente, produzido quando se procede à mistura e moagem de *clínquer*, gesso, cinzas volantes e outros aditivos. Esta fase verificada na figura 13, ocorre nos moinhos de cimento (moagem de *clínquer*). Estes moinhos são, à semelhança dos moinhos de carvão e alguns moinhos de cru, moinhos horizontais de bolas. Normalmente é também adicionado adjuvante<sup>1</sup> na mistura a moer, uma vez que ajuda a evitar a formação de películas sobre os corpos moentes (bolas), fazendo aumentar o rendimento do moinho.



**Figura 13:** Representação da 4ª fase da fabricação de cimento

<sup>1</sup> Líquido colocado no moinho para o material não se colar aos corpos moentes (bolas).

O CPS possui quatro moinhos de cimento, sendo os moinhos de cimento 3 e 4 os que apresentam maior capacidade de produção, uma vez que são os de maiores dimensões. Os moinhos de cimento 1 e 2, apesar de terem as mesmas dimensões, apresentam rendimentos diferenciados: o menor rendimento do forno 2 deve-se ao facto de possuir um separador dinâmico de 2ª geração, enquanto o forno 1 possui um separador dinâmico de 3ª geração, que lhe aumenta a sua capacidade de produção. Os moinhos são bastante semelhantes ao representado anteriormente na figura 11.

O armazenamento de cimento é efetuado em silos que, à semelhança dos silos de homogeneização, possuem um sistema de fluidificação que evita a acumulação do cimento no seu interior e facilita a sua extração para expedição.

### 2.1.5. Embalagem e expedição

O cimento pode ser expedido de várias maneiras, como se pode verificar na figura 14. Graças aos quatro equipamentos de ensacagem que o CPS possui, pode ensacar-se cimento em unidades de 25, 35 ou 50 kg que são, posteriormente, embalados em paletes e colocados nas paletizadoras, como ilustrado na figura 15b), para se proceder à sua expedição a nível nacional. É de notar que os sacos de 25Kg apenas começaram a ser comercializados recentemente. O cimento que é exportado, maioritariamente por via marítima, é ensacado em unidades de 50 kg e embalado no pacotão. A diferença do pacotão face à paletização reside no facto de se prescindir do uso de paletes, recorrendo-se ao uso de mangas de plástico protetor mais resistente do que as que são utilizadas na paletização, como mostra a Figura 15 a). Estes sacos são expedidos por via-férrea até ao porto-marítimo de Aveiro. O cimento a granel pode, contando com silos próprios para o efeito, ser expedido via rodoviária e/ou via ferroviária [4].



Figura 14: Representação da 5ª fase da fabricação de cimento



a)

b)

**Figura 15:** Embalamento feito com; a) mangas de plástico protetor no pacotão; b) Paletes nas paletizadoras.

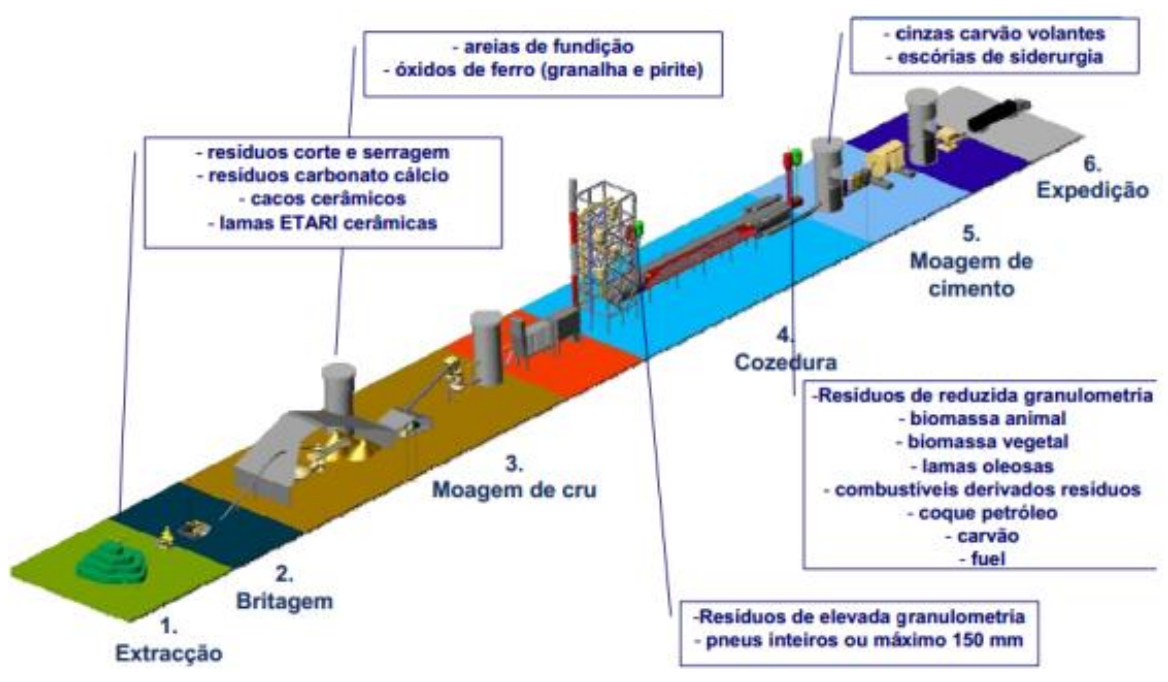
## 2.2 Aproveitamento de Resíduos

Os resíduos são aproveitados no processo de fabrico de *clínquer* e cimento. Neste processo, estes podem ser tratados e utilizados como matérias-primas secundárias ou combustíveis alternativos em quase todas as secções de produção, como ilustra o diagrama da Figura 16.

A CIMPOR, como já foi referido anteriormente, utiliza os CDR e os RIP como processo de queima de resíduos. Este processo é altamente vantajoso para a empresa, visto que consegue adquirir estes combustíveis a custo mais reduzidos que o coque de petróleo, reduzindo assim o custo de produção. Outra vantagem deve-se ao facto de baixar as emissões de CO<sub>2</sub>, mantendo um nível aceitável nos parâmetros de ambiente [5].

O processo de RIP é utilizado exclusivamente no queimador principal, ao contrário dos CDR que são usados no queimador principal no pré-calcinador.

A Figura 16 representa a título ilustrativo, o processo de fabrico que poderá ocorrer na empresa CIMPOR.



**Figura 16:** Processo ilustrativo do fabrico de *clínquer* e cimento [3].

A sigla CDR - combustível derivado de resíduos – que no inglês toma a forma de RDF – *refused derived fuel* - é a designação genérica dos combustíveis obtidos a partir de resíduos, não obedecendo a características técnicas especiais. O CDR tem sido largamente utilizado como combustível de substituição em várias instalações de coíncineração.

Outras definições utilizadas para CDR são [6]:

- Combustível produzido por separação, fragmentação e processamento de resíduos mistos;
- Combustível preparado por separação de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) e processamento da fração com maior poder calorífico em *pellets* de uso comercial;
- Resíduos que tenham sido parcialmente separados e classificados previamente à sua queima.

A problemática dos CDR remonta a quando da crise petrolífera de 1973. Assim, como resultado da abertura do mercado a estes combustíveis de substituição, foram criados, um pouco por toda a Europa, sistemas de garantia de qualidade para este produto.

A produção de resíduos, ao longo dos anos, tem vindo a aumentar, tornando-se necessário minimizar essa produção para assegurar uma gestão sustentável.

A substituição dos combustíveis fósseis não-renováveis por CDR é uma das principais alterações na indústria cimenteira mundial, reduzindo, assim, as suas emissões de dióxido de carbono. Esta prática é também reconhecida como uma oportunidade de negócio, uma vez que permite a valorização energética dos resíduos e a redução dos custos com combustíveis para as empresas. Este tipo de combustível é fundamentalmente utilizado em fornos de cimento e em centrais de energia elétrica pois, ao utilizar-se CDR, beneficia-se de um combustível de substituição de origem renovável.

### 2.2.1 Produção de CDR

De acordo com o “decreto Ronchi” [7], CDR é um material com as seguintes características, como se verifica na tabela 1:

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
<u>Poder calorífico inferior (PCI) mínimo</u>	<i>Kj/kg</i>	<i>15000</i>
<u>Humidade máxima</u>	<i>%p/p</i>	<i>25</i>
<u>Cinzas máximas</u>	<i>%p/p – base seca</i>	<i>20</i>
<u>Cloro máximo</u>	<i>%p/p</i>	<i>0,9</i>
<u>Enxofre máximo</u>	<i>%p/p</i>	<i>0,6</i>
<u>Chumbo volátil</u>	<i>mg/kg – Base seca</i>	<i>200</i>
<u>Crómio máximo</u>	<i>mg/kg – Base seca</i>	<i>100</i>
<u>Chumbo solúvel</u>	<i>mg/kg – Base seca</i>	<i>300</i>
<u>Manganês máximo</u>	<i>mg/kg – Base seca</i>	<i>400</i>

<u>Níquel máximo</u>	<i>mg/kg – Base seca</i>	40
<u>Arsénio máximo</u>	<i>mg/kg – Base seca</i>	9
<u>Cádmio + mercúrio máximo</u>	<i>mg/kg – Base seca</i>	7

**Tabela 1:** Constituintes químicos dos CDR.

A tabela 2 representa a composição de resíduos considerados para a avaliação do impacto ambiental [8]:

<b>Constituinte</b>	<b>Fração mássica (%)</b>	<b>PCI (MJ/Kg)</b>
<u>Papel e cartão</u>	24,5	13,22
<u>Madeira</u>	6,0	13,87
<u>Plástico</u>	19,0	26,18
<u>Vidro e inertes</u>	3,5	0
<u>Metais</u>	3,5	0
<u>Fração orgânica</u>	31,5	1,719
<u>Finos</u>	12,0	4,395
<u>Resíduos não recicláveis</u>	100	10,11

**Tabela 2:** Composição dos CDR a nível de impacto ambiental.

De acordo com a origem, são muitas as tipologias de CDR. Estas tipologias são geralmente aplicadas quando o CDR é obtido a partir de fluxos específicos de resíduos, o que se verifica aquando da utilização de resíduos industriais banais, para este fim. Alguns exemplos são:

- i) PDF (*plastic derived fuel*) – combustível derivado do plástico;
- ii) PPF (*paper and plastic fuel*) – combustível de papel e plástico.

No caso do CDR a partir de RSU estas tipologias não são aplicáveis.

De acordo com a forma, os CDR distinguem-se conforme representados na figura 17 e categorizado na figura 18.



Figura 17: a) CDR em fluff; b) CDR em pellet; c)CDR em Briquette. [9]

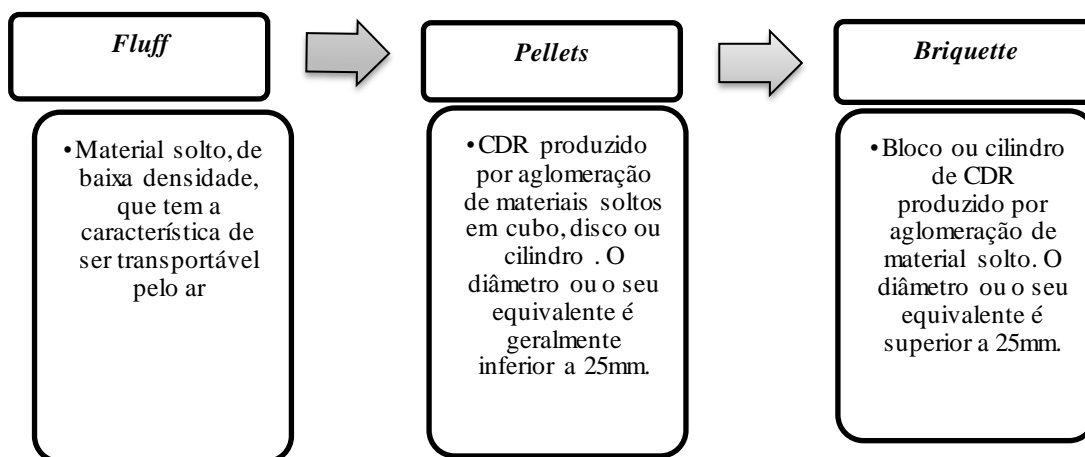


Figura 18: Descrição de cada tipo de CDR.

A produção de CDR inicia-se com a separação dos resíduos com maior poder calorífico das restantes frações. Esta separação poderá ser feita por [10]:

- Separação na fonte – através de recolha em diferentes sacos e contentores, ou separação simples em duas frações, húmida e seca, em dois sacos de cores diferentes, usualmente transparentes, que são depois separados, via ótica, na instalação de preparação de CDR;
- Separação em instalações de produção de CDR a partir de RSU – através de processos físicos.

Para a separação, a partir de RSU, da fração de maior potencial calorífico que poderá ser utilizada como CDR, poderão ser utilizadas duas tecnologias base [11]:

- Tratamento mecânico e biológico (TMB) – na fase de pré-tratamento mecânico de uma unidade TMB são separados metais e inertes, sendo a fração orgânica extraída para posterior valorização orgânica por compostagem, associada ou não a digestão anaeróbia. Também é produzida uma fração residual com um elevado poder calorífico composta, na sua maioria, por resíduos secos de plásticos, papel e têxteis que se podem destinar à produção de CDR;
- Processo de estabilização seca – os fluxos de metais e inertes são separados dos resíduos e estes são secos (e estabilizados) por um processo de compostagem, resultando uma massa residual com elevado poder calorífico, adequado à combustão.

Uma linha de produção de um CDR é composta por uma sequência de operações unitárias realizadas em série. Estas operações têm como objetivo separar os componentes indesejados e condicionar a matéria combustível, de modo a obter CDR com as características desejadas.

Os principais processos utilizados nas instalações de produção de CDR estão representados na figura 19 e constam fundamentalmente das seguintes fases:

- i) Separação mecânica e seleção de fluxos;
- ii) Redução de tamanho das partículas;
- iii) Secagem, homogeneização e densificação;
- iv) Embalamento e armazenamento.

Dependendo do nível da qualidade que se pretende atingir, podem ser feitas diferentes sequências de operações unitárias. Dado que o metal é um material não utilizado no processamento de CDR, é necessário fazer a sua separação. Este procedimento é feito no separador magnético (metais ferrosos) e no separador de *Eddy* (metais não ferrosos), sendo este material, posteriormente, reciclado. Também, com alguns plásticos que não têm as características desejadas para serem utilizados no processamento de CDR, como se pode verificar na figura 20 – processamento de CDR na Finlândia.

Relativamente à fração existente de resíduos orgânicos, esta está sujeita a lavagem e a tratamento biológico: os resíduos são separados por *coarse inerts* e posteriormente utilizados para compostagem como areias.

É possível concluir que os CDR, usados para a queima em fornos industriais, não possuem nem material orgânico nem metálico (ferroso ou não ferroso).

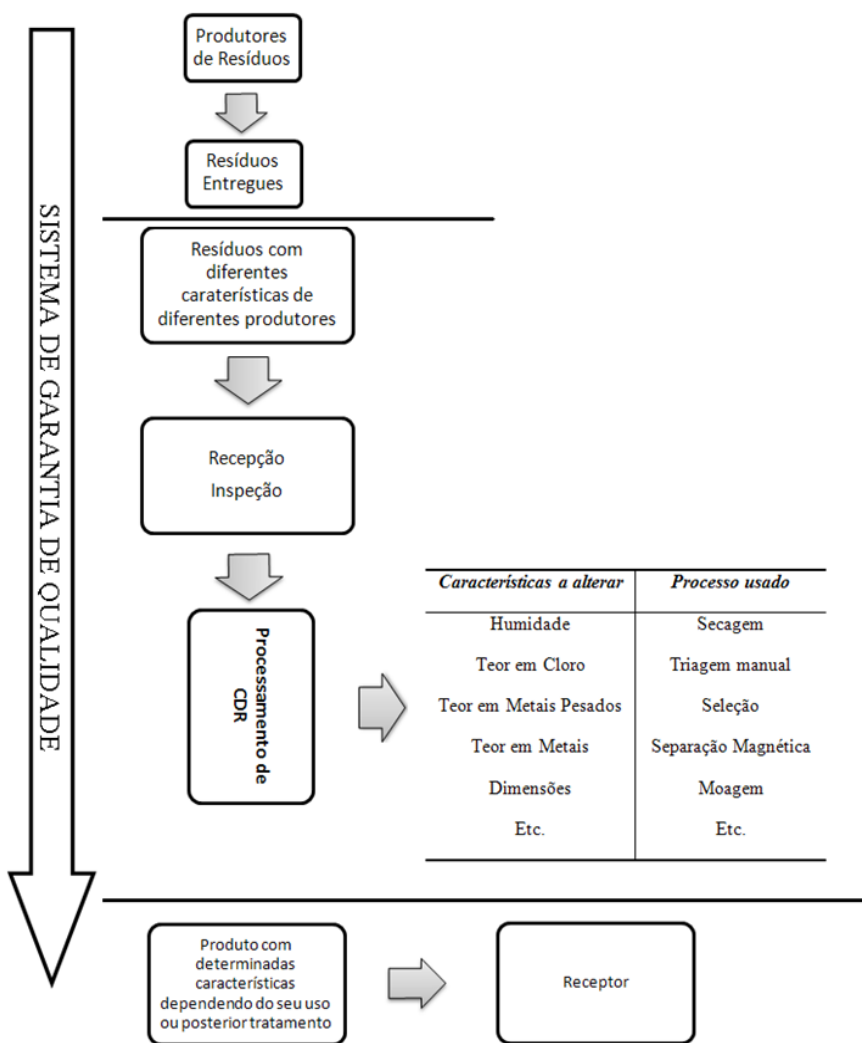


Figura 19: Esquema do processo de produção de CDR [12].

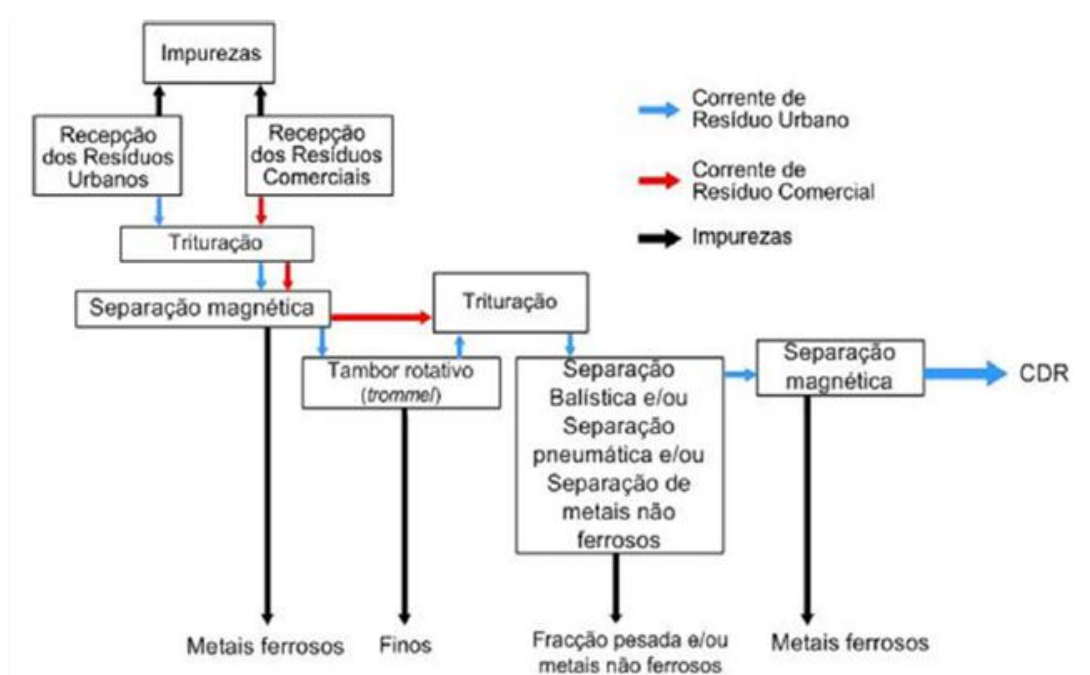


Figura 20: Diagrama de processo de uma instalação típica de produção doméstico e comerciais na Finlândia [11].

## 2.2.2 Características dos CDR

As características físico-químicas e biológicas de um CDR são definidas consoante a sua composição. Esta varia segundo:

- A origem (urbana, industrial ou construção);
- O sistema de recolha (indiferenciado ou separação na fonte);
- O tratamento aplicado (maior ou menor eliminação de contaminantes).

A Tabela 3 apresenta, resumidamente, as principais características do CDR enquanto combustível, comparativamente com o carvão (que representa os combustíveis fósseis tradicionais) e com dois tipos de biomassa que são utilizados como combustíveis renováveis.

Parâmetro <sup>a)</sup>	Carvão (Antracite) <sup>b)</sup>	Aparas Pinheiro <sup>b)</sup>	Casca de Eucalipto <sup>b)</sup>	CDR <sup>c)</sup>
PCI <sup>d)</sup> (MJ/kg)	33.17	16.99	14.90	18.06
Humidade (% m/m)	1.90	9.30	12.00	18.00
Cinzas (% m/m)	2.80	0.30	4.20	15.00
Cloro (% m/m)	0.08	0.01	0.23	0.91
Enxofre (% m/m)	0.79	0.02	0.04	0.14

<sup>a)</sup> Os valores são apresentados na base tal qual produzidos (húmida, com cinzas)

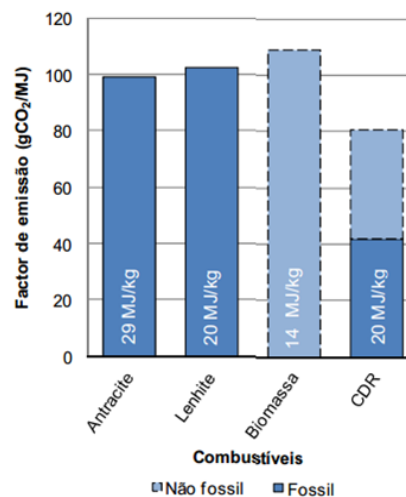
<sup>b)</sup> Fonte: Phyllis (2010)

<sup>c)</sup> Características médias de um CDR, analisado no laboratório do IST

<sup>d)</sup> Poder Calorífico Inferior

**Tabela 3:** Comparação das principais características do CDR relativamente a outros combustíveis sólidos [12].

A Figura 21 apresenta os fatores de emissão do CDR, em comparação com os combustíveis fósseis. A substituição de lenhite por CDR, com conteúdo energético similar, permite minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> em cerca de 20 MJ/kg em termos absolutos e, contabilizando só o CO<sub>2</sub> não renovável, a redução é de 60 MJ/kg. A biomassa é a que emite mais CO<sub>2</sub>, ou seja, 110 MJ/kg.



**Figura 21:** Fatores de emissão dos combustíveis convencionais, biomassa e CDR [13].

As centrais de biomassa podem ser consumidoras de CDR, já que este pode constituir até 10% (em termos de energia) do combustível utilizado. Naturalmente, todas estas instalações deverão possuir tecnologia para a utilização de CDR e cumprirem os normativos legais relativos à incineração e co-incineração de resíduos específicos de cada setor. Na tabela 4 resume as vantagens e as desvantagens desta tecnologia.

A co-incineração de CDR, em unidades industriais, pode determinar ganhos em termos de emissões de CO<sub>2</sub> que poderão representar reduções de 16% até valores acima dos 50% de redução TMB.

Vantagens	Desvantagens
<p>Aumenta a autossuficiência energética nacional;</p> <p>Minimiza a deposição de resíduos em aterro, aumentando o tempo de vida útil dos mesmos;</p> <p>A nível europeu há experiência e tecnologia disponível para a produção de CDR de qualidade, a custos competitivos, e para a sua transformação em energia;</p> <p>Reduz as emissões de CO<sub>2</sub>;</p> <p>Apresenta um preço concorrente no mercado dos combustíveis fósseis;</p> <p>Liberta quotas de emissões para o cumprimento do Protocolo de Quioto.</p>	<p>RC&amp;D tem a concorrência de outros CDR mais competitivos obtidos também a partir de RIB (resíduos industriais banais) (ex.: pneus);</p> <p>O mercado nacional para CDR não se encontra estruturado e existe falta de enquadramento normativo para a certificação dum CDR;</p> <p>Os processos de produção de CDR utilizados devem ser selecionados de forma rigorosa, uma vez que as melhorias, que em algumas fases de tratamento se possam introduzir na qualidade do combustível, podem aumentar os custos de produção.</p>

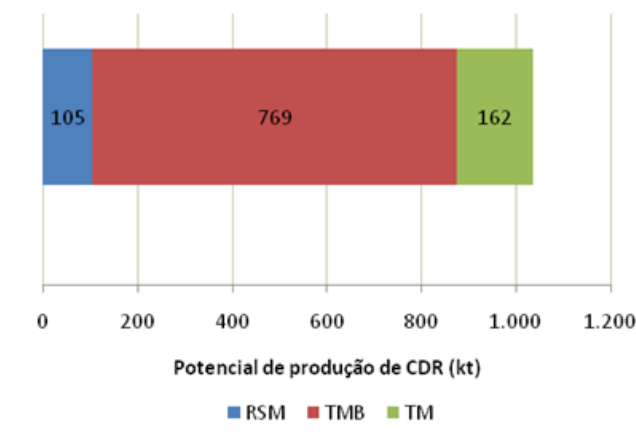
**Tabela 4:** Vantagens e desvantagens na utilização de CDR.

### 2.2.3 Produção de CDR em Portugal Continental

De acordo com a informação disponível, nos Planos de Ação do Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos 2007-2016 (PAPERSU), as novas unidades de TM e TMB previstas deveriam entrar em funcionamento em 2012-2013, esperando-se que, neste momento, a produção de CDR esteja em pleno [14].

Tendo ainda como base as projeções apresentadas nos PAPERSU, em termos de produção de resíduos, estima-se que o potencial de resíduos urbanos para produção de CDR, em 2013, chegue a 1,0-1,2 milhões de toneladas, considerando os rejeitados e refugos de unidades de triagem, de TM e de TMB de resíduos urbanos.

Do quantitativo apurado, conforme ilustrado na Figura 22, cerca de 74%, 16% e 10%, em média, tem origem, respetivamente, nos refugos das unidades de TMB, de TM e de triagem de RU (resíduos urbanos). A figura 23 mostra a distribuição geográfica deste potencial, e na tabela 5, podemos observar a quantidade de resíduos urbanos que cada zona de Portugal produz, assim como o seu potencial de produção de CDR.



**Figura 22:** Potencial de produção de CDR, em 2013, com origem em refugos de triagem, TMB e TM de RU [14].



**Figura23:** Potencial de produção de CDR a partir de RU, em 2013, em Portugal Continental, por Região.

(kt/ano)	Norte	Centro	LVT	Alentejo	Algarve
RU produzidos	1.613	809	1.879	322	397
Potencial de produção de CDR	204-241	270-327	424-486	68-82	70-71

**Tabela 5:** Expectativa de consumo de CDR.

Verifica-se que as Regiões Norte e Centro apresentam valores de potencial de produção de CDR semelhantes, seguidas da Região de Lisboa e Vale do Tejo (LVT) que apresenta o maior potencial. A Região do Alentejo apresenta um potencial reduzido, o qual está associado à dimensão da área de intervenção, que se traduz numa grande dispersão. Por fim, a Região do Algarve apresenta um potencial semelhante ao do Alentejo.

A Tabela 6 quantifica a expectativa de consumo de CDR obtidos a partir de diversas origens, apresentando diferentes características [14].

Unidades	Consumo potencial de CDR (t/ano)
<b>Sector de gestão de resíduos</b>	
Incineração dedicada de CDR <sup>a)</sup>	350.000
Incineração dedicada de CDR (co combustão de lamas)	640.000
<b>Outros sectores de atividade económica</b>	
Sector industrial (cimento, cerâmica, papel)	635.000
Sector de produção de energia <sup>b)</sup>	100.000
<b>Total</b>	<b>1.725.000</b>

**Tabela 6:** Expectativa de consumo de CDR [14].

<sup>a)</sup> Reforço de capacidade das instalações de incineração dedicada de RU.

<sup>b)</sup> O valor apresentado refere-se apenas às centrais de biomassa concedidas, no pressuposto de que numa central de biomassa cada MW instalado consome cerca de 10.000 t de biomassa/ano.

## 2.2.4 Os CDR na CIMPOR

Nas instalações da CIMPOR é possível ocorrerem problemas na queima dos CDR devido à presença de material metálico nos CDR, como se verifica na Figura 24, o que faz com que os vários equipamentos da instalação sofram um desgaste bastante acentuado. Esta falha é comum na qualidade dos CDR, o que tem forte impacto no serviço ao consumidor.

Esta situação pode ser corrigida através de várias tecnologias, como se pode observar na tabela 7.



**Figura 24:** Amostra dos CDR retirados de condutas nas instalações da CIMPOR.

<b>Deficiência no processamento</b>	<b>Ação recomendada</b>
Deficiência na combustão devido à dimensão dos CDR	Trituração
Contendo teor de metais não ferrosos elevado	Separador de Eddy
Existência de metais ferrosos	Separador magnético
Teor em cloro elevado	Separados por infra – vermelhos
Humidade elevada	Secagem

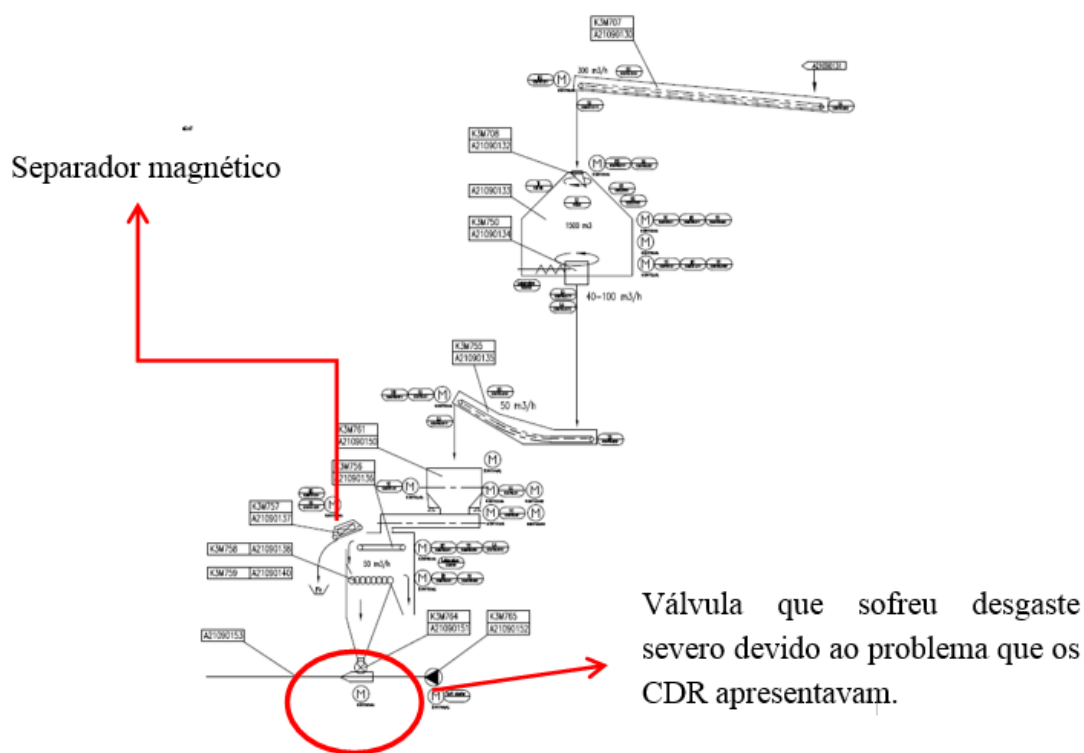
**Tabela 7:** Deficiência no processamento de CDR.

Na CIMPOR, os CDR têm uma instalação própria. A sua instalação é dividida em duas partes, a instalação que alimenta o pré calcinador e a instalação que alimenta o forno. As instalações são diferentes, visto que, para o pré calcinador, os CDR são de uma granulometria elevada, e para o forno, os CDR são bastante mais finos. A única parte comum nas duas instalações é a zona de recepção dos CDR e os transportadores para o cimo dos silos, onde estes vão ser armazenados. No cimo dos silos existem várias válvulas e transportadores que, controlados na sala de comando, e consoante o tipo de CDR que está a ser descarregado, vão enchendo os silos.

A instalação que alimenta o pré-calcinador é constituída por 2 silos de 1500m<sup>3</sup> cada. O pré calcinador recebe os CDR através de um elevador que transporta os CDR a granel e os “despeja” para dentro da camara de fumos do pré calcinador.

Na instalação que alimenta o forno, só existe um silo de 1500m<sup>3</sup> e o forno recebe os CDR através de uma supressora, basicamente um compressor que injeta ar para “lançar” os CDR por uma tubagem até ao forno, para que entrem sobre pressão, com vista a melhorar o rendimento do forno. Na figura 26, pode-se verificar a planta da instalação dos CDR, a parte que envia os CDR para o forno.

Um dos problemas de que se irá falar num capítulo mais à frente, nesta tese, é o problema da válvula que doseia os CDR para a supressora que está no fim da linha dos CDR, como se pode verificar na figura 25. Como foi dito anteriormente, outro dos problemas desta instalação é o material metálico que passa na instalação que desgasta os equipamentos. Para minimizar este problema, instalação da CIMPOR está provida de um separador magnético para a “apanha” de metais ferrosos como se pode ver na figura em baixo.

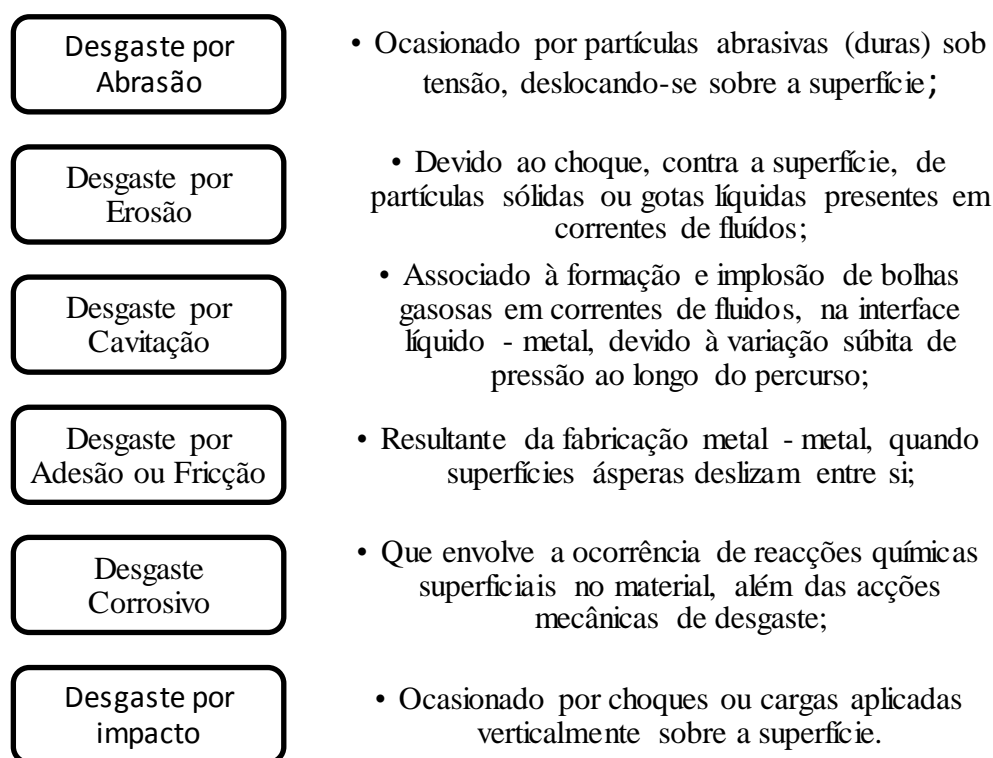


**Figura 25:** “flow sheet” da instalação dos CDR para o forno.

### 2.3. Desgaste estudado nos equipamentos da CIMPOR

Para estudar o desgaste nos equipamentos da CIMPOR apresentados no capítulo 3 é necessário, primeiramente entender, o significado do fenómeno, assim como os diferentes tipos e origem que lhe estão associados.

O desgaste ocorre por consequência do movimento relativo entre duas superfícies em contacto ou pela ação de agentes de superfície de natureza mecânica e/ou química e tem como resultado a perda de sucessivas camadas externas de material [15]. Existem, tal como resumido na figura 26, diferentes mecanismos de desgaste.



**Figura 26:** Diferentes mecanismos de desgaste [16].

Cada forma de desgaste provoca a remoção de material por um ou mais mecanismos diferentes, sendo o de adesão e o de abrasão os mais importantes sob o ponto de vista de interações mecânicas. O desgaste por abrasão é o mecanismo de desgaste mais comum. Estima-se que 50% dos problemas de desgaste, na indústria, são devido à abrasão [17].

Embora o desgaste seja um problema real requerendo, por vezes, soluções muito dispendiosas, existem aplicações em que o desgaste é usado como uma mais-valia. Exemplo disso é a utilização em limas, papel abrasivo, tecidos abrasivos e rebolos (rodas abrasivas), como também para polimento e lapidação, entre outros. Assim, a simplicidade e a

repetibilidade do processo de desgaste abrasivo torna o seu uso bastante atrativo, sendo este processo amplamente utilizado em operações de acabamento [18].

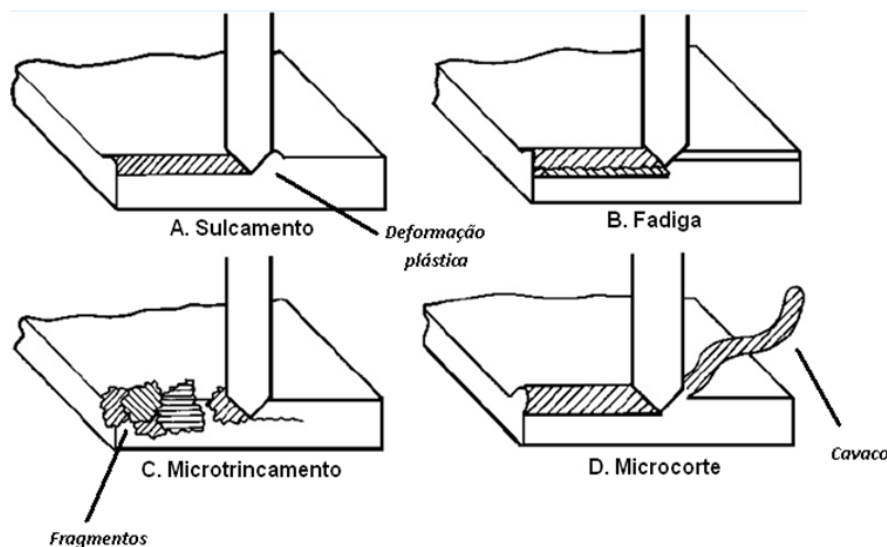
Nos equipamentos estudados neste trabalho verificou-se que o desgaste que mais afeta os equipamentos será o desgaste por abrasão, e, possivelmente, o desgaste por erosão e/ou desgaste por adesão ou fricção.

### 2.3.1 Desgaste por abrasão

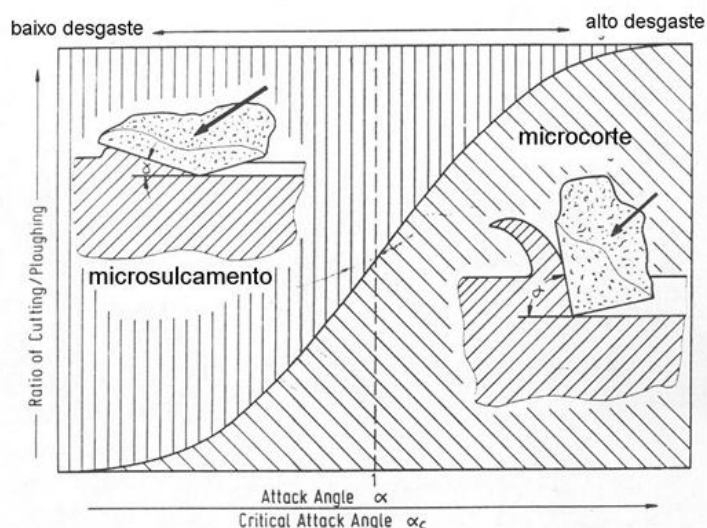
O desgaste por abrasão ocorre quando uma superfície rugosa e dura, ou uma superfície macia, contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície mais macia, produzindo (*ploughs*) uma série de sulcos nessa superfície desgastando, assim, as peças e equipamentos. Este tipo de desgaste também ocorre devido a protuberâncias em ambas as superfícies.

O desgaste causado pelo impacto e pela ação abrasiva de partículas duras é um problema importante em muitas aplicações industriais e, em particular, nas áreas de agricultura, mineração, mineral processamento, movimentação de terra, e no caso deste trabalho, na indústria cimenteira, etc. [19]. Existem sistemas cujo processo predominante de desgaste é o desgaste abrasivo. Podemos encontrar este tipo de desgaste em sistemas hidráulicos com sujidade, extrusoras, cavidades de moldes, entre outros [20]. No caso deste estágio, o estudo deste tipo de desgaste foi identificado na válvula de extractor celular na parte dos CDR, na tremonha de enchimento das bicas, na parte da expedição, e como será dito posteriormente, no arrefecedor de *clínquer* que está instalado no final do forno 3, entre outros.

Existem, como mostra a figura 27, fundamentalmente quatro micro-mecanismos responsáveis pelo desgaste abrasivo. O “*microploughing*” e o “*microcutting*” são os mecanismos principais em materiais com maior ductilidade, já o mecanismo de “*microcracking*” é normal em materiais mais frágeis. A ocorrência dos mecanismos de “*microploughing*” e “*microcutting*” depende do ângulo de ataque das partículas abrasivas. O “*microcutting*” ocorre a partir de um ângulo de ataque crítico. Este ângulo é obtido em função do material que está a ser desgastado e das condições de teste. A transição do mecanismo de “*microploughing*” para “*microcutting*” depende também do coeficiente de atrito. Normalmente, o mecanismo passa de “*microploughing*” para “*microcutting*” através do aumento da dureza do material que está a ser desgastado, como se pode verificar na figura 28 [21]. Aumentos de dureza resultam na passagem de “*microcutting*” para “*microcracking*”.



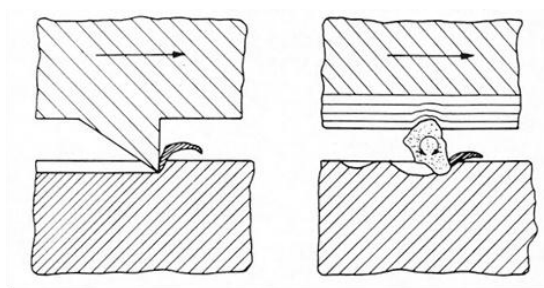
**Figura 27:** Representação dos Micro-Mecanismos [22]



**Figura 28:** Relação entre ângulo de ataque e os mecanismos de desgaste abrasivo, para o "microploughing" e "microcutting" [23].

O desgaste por abrasão pode ser classificado de várias maneiras, como a 2 ou a 3 corpos, baixa ou alta tensão e abrasão suave ou rígida [24]. As várias classificações estão corretas, visto que cada uma classifica características diferentes do desgaste. Podemos ainda acrescentar a classificação de abrasão não controlada, caso de uma retroescavadora, e controlada, no caso de decapagem em tambor rotativo.

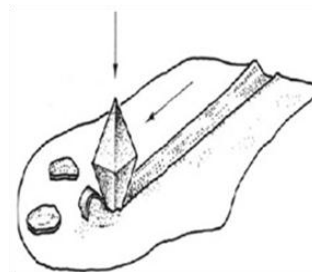
Estas duas primeiras formas de desgaste que foram enunciados anteriormente, uma envolvendo uma superfície dura e rugosa e a outra um grão duro e abrasivo, são conhecidas como processo de desgaste abrasivo a dois corpos e processo de desgaste abrasivo a três corpos, respetivamente, como mostra a Figura 29.



**Figura 29:** Desgaste a dois e três corpos [25].

Na abrasão a dois corpos as partículas abrasivas são movidas livremente sobre a superfície do material como a areia numa calha. No desgaste abrasivo de três corpos as partículas abrasivas agem como elementos de interface entre o corpo sólido e o contra corpo [26]. O desgaste, quando envolve três corpos, é cerca de duas a três vezes menor do que quando envolve dois corpos, pois, no caso de três corpos, devido à variação no ângulo de ataque, apenas uma pequena porção das partículas causa desgaste [27].

Como referido anteriormente, o desgaste pode ainda ser classificado, como desgaste por abrasão a altas e a baixas tensões. No desgaste por abrasão em baixa tensão a superfície apresenta-se riscada consequência da acção de partículas duras e agudas ou de uma outra superfície aguda e dura que abrem sulcos à superfície como se pode observar na figura 30.



**Figura 30:** Abrasão por riscamento ou a baixas tensões [28].

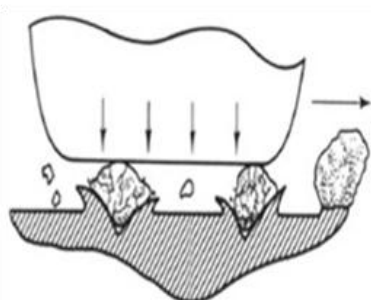
Exemplos de abrasão por baixas tensões, são equipamentos para tratamento mineral, as partículas deslizantes em calhas, etc. [29]. Existe algumas características da abrasão a baixa tensão como por exemplo:

- As taxas de abrasão diminuem à medida que a dureza da superfície, submetida a abrasão, aumenta;
- As taxas de abrasão diminuem com a redução do tamanho do abrasivo. Abaixo de um tamanho de partícula de  $3\mu\text{m}$ , acaba o desgaste abrasivo, iniciando-se o desgaste por polimento, não ocorrendo mais a formação de micro-junções;

- As taxas de abrasão aumentam muito, se a dureza do abrasivo for mais de duas vezes a dureza da superfície que sofre abrasão;
- A microestrutura dos metais afeta a abrasão, pois a presença de microconstituintes duros diminui a abrasão;
- Os elastómeros têm maior resistência à abrasão a baixas tensões do que os metais, pois deformam-se elasticamente;

No desgaste por abrasão com altas tensões define-se “arranhamento” como a deformação plástica e cratera (buracos ou “*pits*”) marcadas na superfície. Normalmente, é o desgaste mais acentuado, pois este produz deformações plásticas e ranhuras profundas na direção do movimento, como se observa na figura 31. Exemplos típicos de sistemas submetidos a desgaste por abrasão de alta tensão são moagem de minerais, equipamentos para terraplanagem entre outros [29].

As características da abrasão a alta tensão são similares às da abrasão a baixa tensão, tendo algumas características próprias como a resistência à compressão da superfície é mais importante, pois ao resistir a este tipo de desgaste, a resistência à compressão da superfície deve ser maior do que a resistência à compressão do abrasivo.



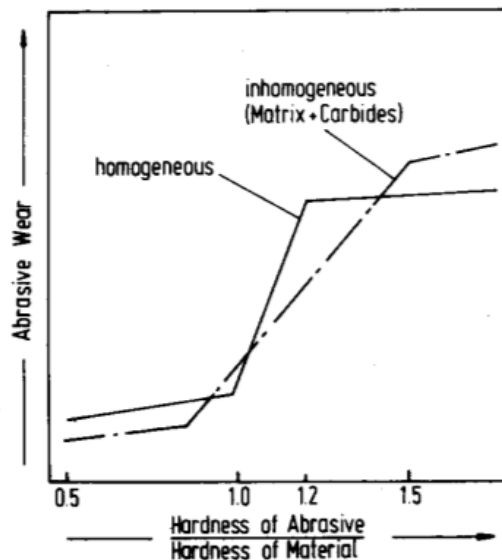
**Figura 31:** Abrasão por moagem ou altas tensões [28].

Outra característica do desgaste por abrasão é a dureza dos materiais. Quando a dureza do material desgastado ultrapassa a dureza do abrasivo o volume de material desgastado cai rapidamente tendendo para zero à medida que a dureza aumenta [30]. Esse facto pode ser explicado por uma característica do processo de desgaste por abrasão que deve estar sempre presente: nenhum abrasivo desgastará algo mais duro que ele mesmo. A quantidade de material removido por abrasão decresce quando a dureza do material que sofre a abrasão tende para a dureza do abrasivo [15]. A transição no modo de abrasão, de desgaste suave para severo, dá-se quando o quociente Dureza Abrasivo / Dureza do material abrasivo é superior a 1,2 [15]. Sob regime de desgaste suave, como o polimento com abrasivos macios, dá-se

abrasão por deformação plástica, uma vez que os pequenos sulcos formados não originam fratura. Este é considerado um regime dúctil de desgaste, sem indentação e onde o avanço de tensões e/ou pequenos ciclos de fadiga controlam o desgaste, com formação de fragmentos laminados por fratura frágil após a deformação plástica e as fendas subsuperficiais [31].

Todas as formas de desgaste abrasivo têm em comum a forte influência da dureza das partículas na rapidez de abrasão resultante do material desgastado. Partículas com dureza menor do que os da superfície de desgaste resultam numa velocidade de abrasão muito inferior à das partículas mais duras [32].

O desgaste abrasivo de metais pode ser classificado de acordo com a dureza do metal,  $H$ , em relação à dureza abrasiva,  $HA$ . Embora a relação  $H/HA$  seja amplamente utilizada para separar os mecanismos de resistência à abrasão, não é o único parâmetro que afeta a transição entre a intensidade de desgaste severo e suave. [32]. Como se pode visualizar na figura 32, a transição entre regime de desgaste moderado para desgaste severo ocorre quando a relação entre as durezas da partícula abrasiva e do material se tornam maiores que 1 [33].



**Figura 32:** Transição entre regime de desgaste moderado-desgaste severo [33].

### 2.3.2 Desgaste por erosão e desgaste por adesão ou fricção

Alguns dos equipamentos presentes nas instalações da Címpor, referidos no capítulo 2.1, apresentavam não só desgaste por abrasão mas também outros tipos de desgaste, como desgaste por erosão e desgaste por adesão ou fricção.

O desgaste por erosão deve-se à acção individual ou conjunta de partículas sólidas, líquidas ou de gases que animadas de quantidade de movimento, colidem na superfície em

desgaste forçando a sua desagregação. Os factores que influenciam a erosão são, de acordo com a referência [34], a velocidade de embate; o ângulo de incidência; a massa das partículas; a reactividade química das amostras; a temperatura da superfície e do agente erosivo e o tipo de erosivo (composição, forma e dimensões, dureza, etc.). O desgaste por adesão ocorre quando existe formação e quebra das ligações interfaciais adesivas. Cavidades para extrusão, cames e seguidores, engrenagens, mancais, ferramentas de corte são alguns exemplos de componentes que sofrem frequentemente desgaste adesivo.

O desgaste adesivo pode ocorrer quando as superfícies deslizam uma contra a outra. A alta pressão local entre as rugosidades em contato resulta em deformação plástica, adesão e consequentemente a formação de junções localizadas. O deslizamento relativo entre as superfícies em contato causa ruptura destas junções e frequentemente transfere material de uma superfície para outra. Isto pode aumentar o risco de sobrecarga devido à tensão, velocidade ou temperatura. A formação de junção no local do contato entre as duas superfícies pode ser formada por adesão ou coesão. A coesão une as superfícies através de uma solda e do desaparecimento da interface entre as duas superfícies, enquanto que a adesão preserva a interface na junção [34].

### **2.3.3 Soluções minimizadoras dos efeitos do desgaste**

Dado que peças ou equipamentos desgastados produzem um trabalho de má qualidade, torna-se necessária a sua reparação ou a sua substituição, a fim de restaurar o nível de qualidade inicial. Em muitos casos, os custos associados a falhas, devido ao desgaste e os custos de manutenção, são extremamente elevados, afetando negativamente o desempenho global de produtividade industrial [35]. Assim, uma única melhoria na resistência ao desgaste das peças ou equipamentos faz com que o seu tempo de vida útil seja maior, o que será uma grande conquista para a indústria, nomeadamente para a CIMPOR neste caso em particular.

Os revestimentos proporcionam, frequentemente, um meio muito eficiente para conseguir propriedades que seriam difíceis ou impossíveis de obter com materiais monolíticos. A utilização de revestimentos pode, no entanto, ser impedida pela falta de dados de desempenho relevantes que permitam, a um desenhador, seleccionar um revestimento especial que possa satisfazer os requisitos de uma aplicação específica [36].

Os carbonetos são de particular importância na resistência à abrasão, principalmente em materiais como os aços e ferros fundidos brancos ligados. A sua influência está relacionada com a dureza, tamanho e distribuição que os caracteriza. Carbonetos duros, e finamente dispersos aumentam a resistência ao desgaste, enquanto os grosseiros a diminuem.

As soluções encontradas através da aplicação de cordões de soldadura como revestimentos têm-se revelado eficientes, tanto para prevenir, como para minimizar ou recuperar os mais diversos componentes das diferentes formas de desgaste. Ao mesmo tempo, é possível salientar que a soldadura de revestimento tem como um dos maiores campos de aplicação a prevenção, a minimização e a recuperação de peças e componentes sujeitas ao desgaste por abrasão. No decorrer deste estágio, foi necessário usar a soldadura com o objetivo de esta revestir alguns materiais, visto que os processos disponíveis tinham a desvantagem de não serem resistentes ao desgaste por erosão, como será verificado no próximo capítulo.

## 2.4 Aplicação de Revestimentos

A aplicação de revestimentos em engenharia tem como finalidade melhorar as características das superfícies dos materiais. O desenvolvimento de novos processos e materiais é um dos principais desafios tecnológicos industriais, uma vez que ocorre uma procura constante de componentes que respondam às necessidades crescentes do mercado quanto à resistência, ao desgaste e/ou à corrosão e ao menor custo possível.

Tendo em conta estas necessidades, a CIMPOR não é excepção nestes parâmetros, tendo também a necessidade de usar estes processos para continuar competitiva e fazer face aos mercados atuais. A aplicação de determinados processos de produção de revestimentos na CIMPOR é impraticável em virtude das dimensões dos equipamentos. Assim, processos como a eletrodeposição, o PVD e o CVD (deposição física e química de vapor respetivamente), apesar de produzirem revestimentos duros com elevada resistência ao desgaste, não são passíveis de utilização na maioria dos componentes dos equipamentos da CIMPOR.

O processo mais vantajoso a escolher será o processo de projecção térmica ou soldadura, devido a estes funcionarem em equipamentos de elevadas dimensões. O processo mais utilizado no desenrolar deste trabalho foi a projecção térmica.

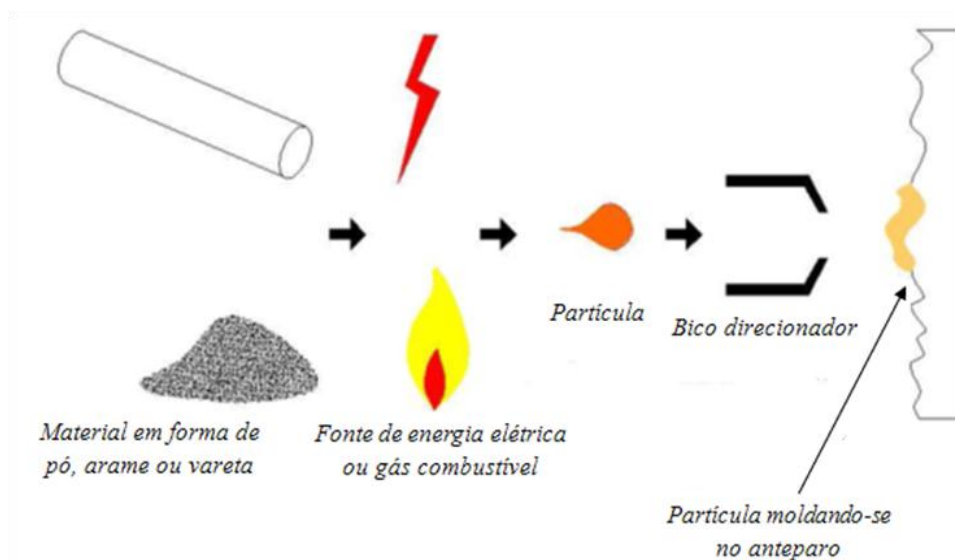
A Projeção Térmica (PT) ou metalização é um termo genérico dado a um conjunto de processos que utilizam uma fonte de calor para derreter o material em forma de arame, pó ou vareta. O material fundido ou semi-fundido é projetado para uma superfície através da expansão de gases, cujas partículas se extinguem, rapidamente, após o impacto com a superfície. Este processo foi inventado, em 1896, pelo suíço Dr. Max *Ulrich Schoop*, com o propósito de proteger estruturas metálicas da corrosão. Após 1930, inicia-se, nos EUA, o uso deste processo em grande escala, para a proteção contra o desgaste e a recuperação de componentes em geral.

As primeiras referências ao uso de processos de PT são do início do século XX quando o primeiro maçarico oxiacetilénico foi modificado para aplicação com pós e arames metálicos. Desde então, houve evoluções permanentes de equipamentos e materiais de deposição e, hoje, muitas aplicações de projecção térmica são já consideradas um clássico de utilização em diversos segmentos industriais.

### 2.4.1 Projeção Térmica

O desenvolvimento da tecnologia de PT baseia-se na necessidade de aumentar a vida útil de sistemas e das suas respetivas peças, face ao elevado custo de componentes de reposição. Ao longo do tempo, com o avanço das pesquisas no desenvolvimento de novos materiais, os revestimentos começaram a ser utilizados não só para incrementar a resistência ao desgaste, à corrosão, à oxidação, como também para proporcionarem isolamento térmico elétrico e/ou condutibilidade.

A PT tem equipamentos altamente versáteis o que permite à engenharia um número quase ilimitado de revestimentos para uma variedade enorme de aplicações industriais [37]. Para a aplicação deste método é necessário que se tenha o material em forma de pó, arame ou vareta, uma fonte de energia para fundir as partículas e transferir energia cinética e, ainda, um tipo de bico para direcionar a aplicação contra o substrato, conforme mostra figura 33.



**Figura 33:** Processo de projeção térmica [38].

Na PT os materiais depositados são levados a um estado fundido ou semi-fundido, através de uma fonte de calor gerado no bico de uma pistola apropriada. Logo após a fusão, o material na fase de solidificação (na forma de partículas) é acelerado por gases, sob pressão, contra o substrato/componente a ser revestido. As colisões contra a superfície a ser revestida deformam as partículas, que aderem ao material base; as partículas depositadas, constituídas por pequenas partículas deformadas, com forma de ‘panquecas’, formam “camadas” em direção paralela ao substrato, criando lamelas [39].

As necessidades tecnológicas e económicas atuais contribuem para que a projeção térmica se encontre em fase de desenvolvimento, em diversos países. Isso ocorre devido à

preocupação existente, por parte de algumas empresas como a CIMPOR, em prolongar a vida útil dos componentes expostos a vários tipos de ambiente mais rigorosos. Independentemente do processo de projeção utilizado, a projeção térmica pode ser, como mostra a figura 34, dividida em quatro grupos.

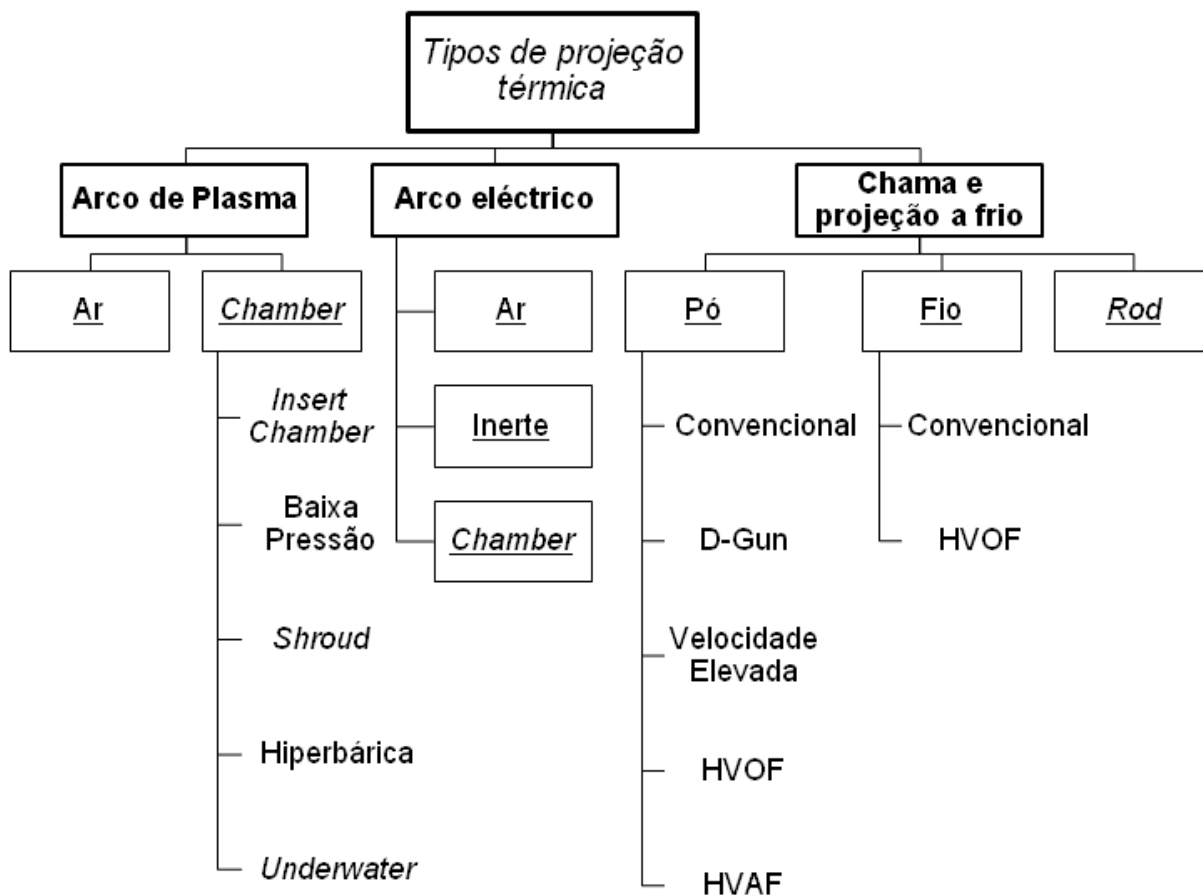
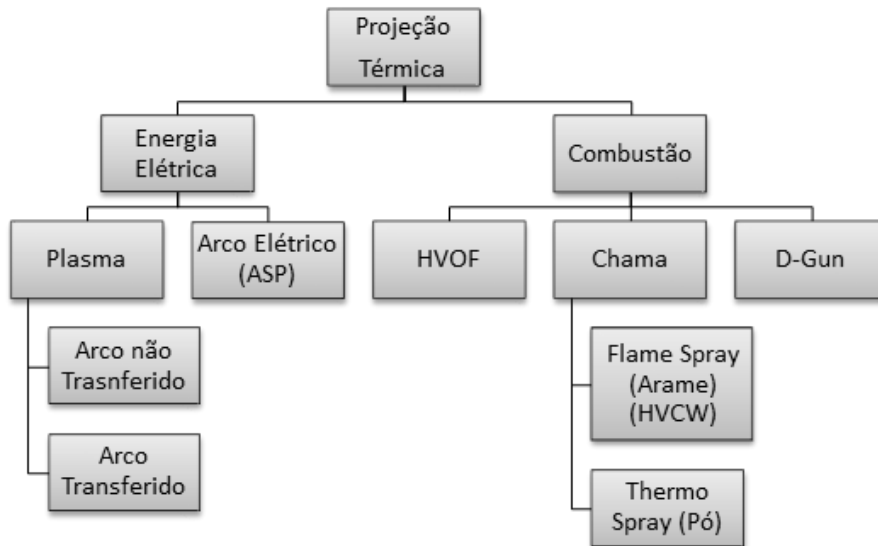


Figura 34: Diferentes tipos de projeção térmica [38].

A PT pode ainda ser classificada de acordo com o tipo de fonte energética utilizada. Assim, podemos distinguir os processos de PT que utilizam chama e os que recorrem à energia eléctrica como fonte de energia, como ilustrado na Figura 35.

Exemplo de algumas das aplicações da PT são as chumaceiras, os rotores e as bombas de turbinas, os motores a jacto, dispositivos médicos, componentes agrícolas e dispositivos eletrónicos. A aplicação de revestimentos por PT é utilizada, muitas vezes, na manutenção de componentes. No caso deste estágio, a PT serviu para as tremonhas das ensacadoras que enchem os sacos de cimento, para o arrefecedor de clínquer, entre outros.



**Figura 35:** Diferentes tipos de projeção térmica [38].

As vantagens e desvantagens mais significativas de alguns processos de PT são apresentadas resumidamente nas tabelas 8 e 9, respectivamente. O mais utilizado, e o único utilizado na CIMPOR para aplicar revestimentos resistentes ao desgaste, é o processo de projeção oxicomustível de alta velocidade, conhecido como HVOF. Sendo um dos mais utilizados, principalmente na aplicação de carbonetos [40].

<b>Detonação</b>	Excelente ligação com o substrato
	Camada com baixo índice de porosidade; Grau de acabamento muito bom durante os trabalhos posteriores.
<b>Chama Oxiacetilénica</b>	Permite a aplicação de 3 tipos de camadas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ligas para camadas fundidas, resistentes a corrosão e oxidação;</li> <li>• Ligas com carbetos, recomendados onde as condições de abrasão são severas;</li> <li>• Ligas com cerâmicas, resistentes ao desgaste, calor e abrasão e também funcionam como isolantes térmicos e elétricos.</li> </ul>
<b>Arco elétrico</b>	Maior aderência; Maior coesão entre as partículas; Maior velocidade de deposição chegando a aplicar 30 kg/h. Materiais mais usados são: aço inoxidável martensítico e austenítico, bronze, alumínio, cobre, molibdênio e carbetos.

<b>HVOF</b>	Menor porosidade Maior dureza Menor quantidade de óxidos Melhor resistência ao desgaste Maior adesão
<b>Plasma</b>	Propriedades físicas e metalúrgicas das camadas depositadas superiores às aplicadas pelos outros processos Porosidade reduzida Melhor aderência Menor conteúdo de óxidos

**Tabela 8:** Vantagens dos vários processos de projeção térmica [41]

<b>Detonação</b>	Operações devem ser controladas a distância; Ambiente necessita proteção acústica; Altíssimo nível de ruído, acima de 150 dB.
<b>Chama Oxiacetilénica</b>	Oxidação das partículas quando transportadas pelo ar comprimido; Aderência prejudicada; Necessário o uso de gás inerte para transporte das partículas.
<b>Arco elétrico</b>	Possui as mesmas características da chama oxiacetilénica;
<b>HVOF</b>	Devido utilização dos combustíveis (propileno, propano ou querosene), requer maior atenção a segurança da instalação.
<b>Plasma</b>	Melhor qualificação do operador; Proteção extra ao operador, devido à energia liberada.

**Tabela 9:** Desvantagens dos vários processos de projeção térmica [41]

Existe também, um grande número de diferentes processos utilizados na produção e recuperação de peças, de equipamento e estruturas que é abrangido pela soldadura. De forma geral a soldadura é considerada como um método de união, embora em determinadas situações seja usada como um processo de corte. Porém, muitos processos de soldadura, ou variação desta, são usados para depositar determinado tipo de material sobre uma determinada superfície, visando a recuperação de peças desgastadas ou a formação de um revestimento com características especiais. No caso da CIMPOR este processo serviu para fazer o enchimento e produzir o revestimento de equipamentos que estavam desgastados. No caso do

enchimento, a aquisição seria bastante dispendiosa, por outro lado, no caso do revestimento, o desgaste é devido à erosão.

O processo de soldadura utiliza a deposição de materiais, previamente selecionados, com características específicas para as condições de trabalho em causa. As suas propriedades podem ser direcionadas para a reconstrução de partes de equipamentos danificados por situações rígidas de abrasão ou outros. É importante salientar que, durante o ciclo de aquecimento e arrefecimento, podem aparecer alterações no processo de deposição por soldadura, devido à falta de uniformidade nas características de expansão e contração dos metais base e de deposição. Assim, a escolha do revestimento ideal e do processo de aplicação é fundamental, tendo em conta fatores como o custo e a eficiência a médio e longo prazo, entre outros.

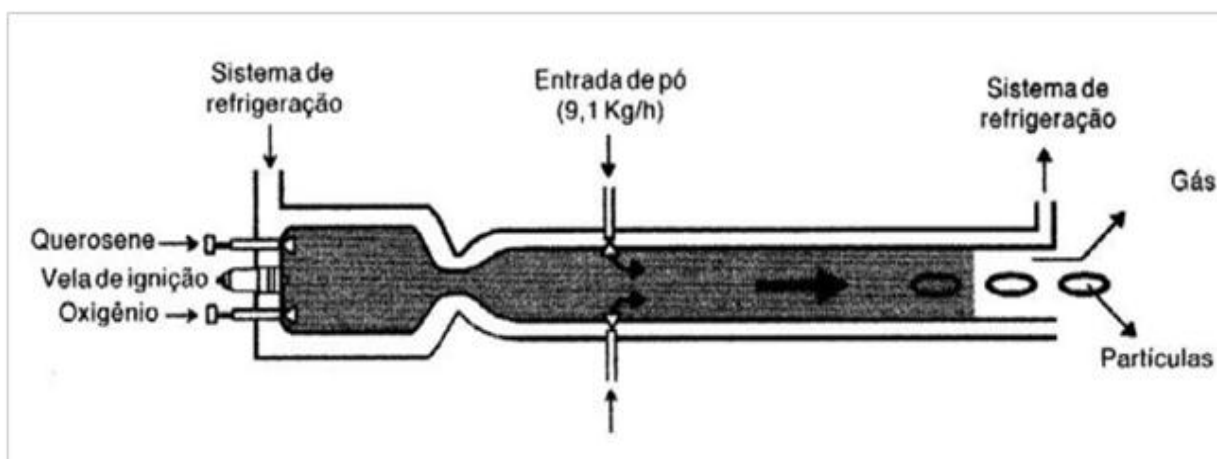
#### **2.4.1.1 High Velocity Oxygen Fuel Thermal Spray Process (HVOF)**

A denominada chama de alta velocidade, desenvolvida no final da década de 70 e início da década de 80 do século passado, é um dos mais modernos processos de PT por combustão. Este processo tem como principal objetivo aumentar a energia cinética da chama e conseqüentemente a pressão, projetando partículas de pó a velocidades superiores até sete vezes a velocidade do som, dependendo do combustível usado [42].

O processo de HVOF baseia-se na conservação de energia cinética das partículas, pós metálicos ou cerâmicos extrafinos, previamente aquecidas na passagem pela chama, devido à desaceleração causada pelo impacto contra o substrato. Como consequência deste forte impacto, há uma elevação significativa de aderência do depósito sobre a base, eliminando praticamente qualquer porosidade residual [43]. Na Figura 36 encontra-se representado um esquema simples desta tecnologia.

Os combustíveis usados neste processo incluem o hidrogénio, o propileno, o propano, o acetileno, o metilo-acetileno, o propadieno e o gás natural, isto quando a chama é formada por gás. Quando a chama formada for de combustível líquido, então o combustível usado será o querosene.

A razão de escoamento do oxigénio/gás combustível é o que determina a temperatura que atinge a chama, e.g., a mistura oxigénio/acetileno (1,5:1 em volume) alcança 3170°C e a de oxigénio/propileno (4:1 em volume) alcança 2900°C. Ao atingirem-se estas temperaturas, o bocal e a câmara de combustão têm que ser arrefecidos de forma constante, em geral, isso é feito com água.



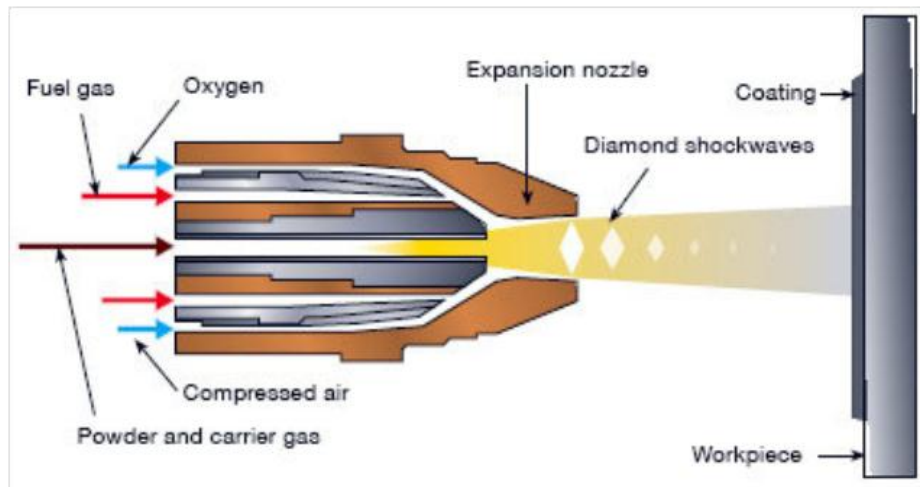
**Figura 36:** Forma de projeção por HVOF [38].

O processo HVOF é uma evolução do processo *D-Gun*, também supersónico e que atua com explosões sucessivas projetando partículas, utilizando a combustão confinada e um bico tipo *venturi*, estendido para aquecer e acelerar o material de revestimento em pó. Este processo é baseado num sistema de combustão interna de alta pressão, idêntico a um motor a jato em miniatura. Na sua alimentação, o material em pó, que é transferido por nitrogénio e introduzido no bocal axialmente, é contínuo e uniforme e quando misturado com oxigénio a alta pressão (que dentro da câmara é introduzido na chama quente) produz um jato de gás supersónico que vai até aos 2000m/s (ou seja MACH 5) e 2800°C (podendo chegar aos 3100°C, segundo alguns autores) [44]. A câmara de combustão e o bocal são arrefecidos em água.

Devido à alta velocidade que a chama atinge, o tempo de permanência das partículas na câmara é baixo, fazendo com que a transferência de calor para partículas grandes não seja o suficiente. Por este motivo, as partículas de pó devem ser bastante finas e com pouca variação de tamanho. A característica mais interessante deste sistema é a presença, na chama, de uns “losangos”, a que se dá o nome de “*Diamond shocks*” ou, como se pode ver na figura 36, “*Diamond shockwaves*”, que resultam da velocidade da chama. Cada “*Diamond shock*” corresponde a um MACH, ou seja, quantos mais “*Diamond shock*” tiver, mais velocidade tem a chama e o respetivo revestimento [45].

O processo de HVOF tem várias variações, entre eles estão o HVAF (*high velocity air fuel*), o HVIF (*hypersonic velocity impact forging*) e o HFPD (*high frequency pulse detonation spraying*). Estes processos não foram usados no decorrer deste estágio, estando aqui só a título informativo. O HVAF (*high velocity air fuel*) é semelhante ao processo original, mudando o facto de a combustão não ser sustentada por oxigénio, mas sim por ar, e a tocha ser arrefecida por este mesmo ar e não por água. Dado que este processo é compacto,

pode ser dividido em módulos, sendo assim possível que se use em campo - é o único processo (da “família” dos HVOF) que pode ser portátil.



**Figura 37:** Funcionamento do HVOF [46].

O HVIF (*hypersonic velocity impact forging*) é um processo igual ao HVOF, mudando só a temperatura dos gases de combustão, que é mantida mais baixa para evitar a fusão das partículas de pó, por mais pequena que seja. A fusão ocorre somente na hora do impacto com o substrato, através da conversão de energia cinética da partícula em calor, resultando numa baixa porosidade e menos óxidos aprisionados.

O HFPD (*high frequency pulse detonation spraying*) é um processo baseado no conceito de propulsão pulsada de aeronaves e no processo de projeção por detonação. Sendo que a tocha é projetada para produzir explosões cíclicas dos gases e dos pós. O sistema de projeção térmica não apresenta partes mecânicas móveis, sendo provido de válvulas aerodinâmicas que proporcionam auto geração de alimentação discreta de gases e pós para cada ciclo [46].

A qualidade dos revestimentos produzidos por HVOF depende de vários parâmetros como a forma, o tamanho e a distribuição das partículas de pó, assim como da proporção dos gases combustíveis aditivos, da velocidade relativa com que se desloca a pistola de projeção-substrato e da quantidade de pó que entra na chama. Estas são variáveis de maior influência na qualidade do revestimento final e, como consequência, responsáveis pela estrutura do material obtido [48]. É possível com esta tecnologia aplicar, por exemplo, WC em camadas de 0,3mm com porosidade residual menor do que 1%. A espessura do revestimento poderá, dependendo das solicitações a que será submetido, atingir os 4mm de espessura.

Uma das ligas mais usadas para aplicações de desgaste tem sido a liga WC-Co [49], por vezes, ligada a outros elementos como Ni e Cr, no intuito de oferecer melhores

---

caraterísticas de resistência à combinação de fenómenos com a corrosão com desgaste associado [50]. As composições típicas estão entre 8 a 30 % de conteúdo da liga matriz, que serve, primariamente, como ligante para as partículas de carboneto [51].

Os revestimentos produzidos por HVOF apresentam uma resistência ao desgaste semelhante a materiais sintetizados de carboneto [51]. Contudo, carbonetos de vários tipos são bastante adequados para aplicações, pois não requerem significante fusão para se depositar e formar uma superfície efetiva contra o desgaste. Os revestimentos por HVOF são, geralmente muito densos, com níveis de porosidade tipicamente inferiores a 0,5%, dando origem a excelentes revestimentos do ponto de vista de resistência à corrosão. Os revestimentos produzidos por esta técnica apresentam maior dureza, aderência ao substrato, durabilidade e maior possibilidade de espessuras do que os revestimentos produzidos por outros processos de PT como e.g. CVD, PVD, electrodeposição, entre outros. [52]. Uma grande vantagem deste processo é a sua capacidade de projetar partículas semi-fundidas a altas velocidades, até 2000 m/s, o que resulta num revestimento de excelente qualidade caracterizado por apresentar uma elevada densidade, uma elevada aderência ao substrato, uma baixo teor de óxidos e uma baixa porosidade [53].

As principais desvantagens associadas a este processo é o seu elevado consumo de combustível e oxigénio, os consumos variam entre os 40 a 60 l/min nos gases combustíveis e no oxigénio poderá chegar aos 430 l/min, e o ruído que decorre do seu funcionamento, rondando os 140dB mas podendo chegar aos 145dB. Devido a esta última desvantagem, o seu funcionamento é feito numa sala isolada acusticamente, para a segurança e saúde das pessoas.

Importante ainda referir que este processo não foi aplicado nas instalações do CPS, mas sim numa empresa especializada neste tipo de revestimento que forneceu os seus serviços ao CPS no decorrer deste estágio. Foi realizada uma visita às instalações dessa empresa, tendo como objetivo facilitar a aprendizagem deste processo.

Tal como acontece para a maioria dos processos de PT, os revestimentos produzidos por HVOF podem ser incorporados na conceção de componentes complexos e que necessitem de resistência ao desgaste e proteção à corrosão com camadas isentas de porosidades, como já foi referido anteriormente. No CPS, este processo é bastante vantajoso devido ao material que é produzido na fábrica, o cimento. A passagem deste material nos equipamentos provoca um desgaste bastante severo nestes, o que é fundamental este processo ser introduzido na manutenção dos equipamentos no CPS. Assim, este processo, além das aplicações que já foram ditas, pode ser usado em componentes de alta tecnologia característicos da indústria aeronáutica, aeroespacial e petroquímica mas também em componentes mais simples, como

sejam dispositivos médicos utilizados para a realização de cirurgias que requerem propriedades dielétricas de alto desempenho. Pode ser usado em parafusos utilizados nas máquinas de colheitas agrícolas, assegurando que os elementos permanecem conectados. Existem, ainda, indústrias que utilizam o HVOF para dispositivos eletrónicos.

### 3. Estudo do desgaste em equipamentos da CIMPOR

#### 3.1. Desgaste no extrator celular - Válvula SASSE

O extrator celular, geralmente definido por válvula SASSE e que se encontra no final da instalação dos CDR, é um equipamento onde os problemas devidos à presença de um exagerado desgaste são frequentes e cujas consequências nefastas na linha de produção são indiscutíveis. Esta válvula serve para dosear o material e impedir a subida de gases/ar da supressora. Como funciona com ar comprimido, sofre um desgaste considerável devido à presença de materiais de natureza metálica nos CDR, como referido anteriormente. Devido à falha de produtividade e fugas na válvula, procedeu-se assim à sua reparação. Durante a sua reparação verificou-se que o desgaste tinha afectado vários componentes da válvula como as alhetas radiais e axiais, as forras laterais internas, a forra inferior, entre outros, como se pode observar na Figura 38. Todo o desgaste verificado ocorreu por abrasão e por impacto do material duro que estaria contido nos CDR - metais ferrosos, não ferrosos e sílicas, vulgos vidros. Estes materiais, após passarem pela válvula e serem encostados às forras laterais, provocam desgaste por abrasão, e quando são projetados pelo compressor – supressora até ao forno a parte inferior da válvula sofre um desgaste acentuado por abrasão e por erosão ou impacto.



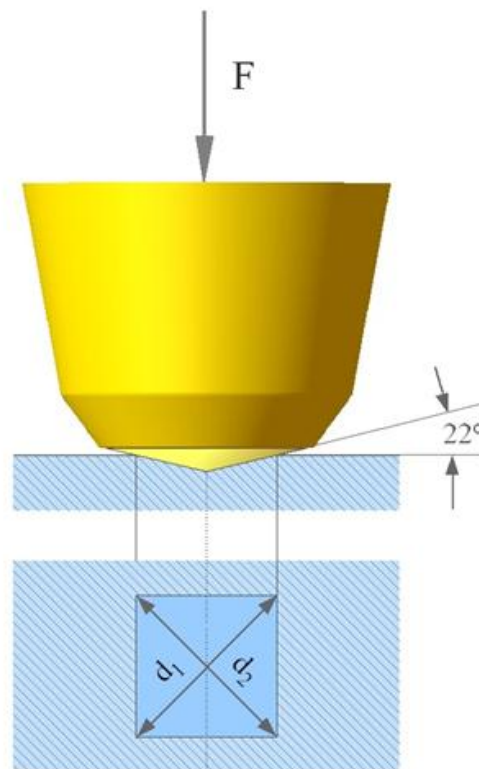
**Figura 38:** Alhetas axiais e radiais e forra inferior do extrator celular “SASSE”.

O material que sofreu desgaste foi substituído por material novo de igual espessura e com iguais características químicas e físicas às do material que foi substituído. De salientar que, apenas, a forra inferior foi substituída por um material com maior espessura, dado o desgaste excessivo que apresentava. Como a paragem da válvula foi forçada, não houve tempo para analisar o problema mais detalhadamente. Foram retiradas apenas informações como por exemplo, a zona que sofria mais desgaste, o equipamento mais desgastado, entre

outros, e amostras para que na próxima reparação fosse possível, com maior eficácia, melhorar a resistência ao desgaste da válvula.

Para averiguar o tipo de material que constitui as forras laterais foram retiradas, utilizando um serrote de fita mecânica, amostras que devidamente colocadas numa base de resina foram, posteriormente, observadas ao microscópio e submetidas a ensaios de dureza utilizando um indentador *Vickers*. Com a observação do tipo de microestrutura e com o valor da dureza em profundidade pretendia-se apurar, em primeira instância, a constituição do material das forras e/ou se, a amostra tinha sido submetida a algum tratamento térmico ou a algum tipo de revestimento.

O teste de dureza *Vickers* é um método de classificação de dureza de materiais, baseado num ensaio laboratorial. Neste método é usada uma pirâmide de diamante com um ângulo de diedro de 136° que é comprimida, com uma força arbitrária "F", contra a superfície do material, como se pode verificar na figura 39. A área da superfície impressa pela medição é dada pelo produto entre as suas diagonais [54].



**Figura 39:** Teste de dureza *Vickers*

A dureza *Vickers* (HV) é dada por:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 1,8544 \frac{F}{d^2}$$

Onde,

$$d = \frac{d_h + d_v}{2}$$

### 3.1.1 Preparação da amostra

A preparação das amostras, para efetuar a análise da microestrutura e os ensaios de dureza, foi iniciada com o processo de polimento da superfície da amostra, diminuindo-se progressivamente a granulometria da lixa. Assim, o processo começou com a utilização de uma lixa de 250, polindo a amostra num sentido, depois, virando-a 90°, polindo-se noutro sentido para ficar uniforme. Repetiu-se este procedimento com uma lixa de 500 e, por último, com uma de 1000. No final, para ficar com um acabamento tipo “espelho”, a amostra foi polida com pasta de diamante de granulometria 3µm.

Depois do polimento, verificou-se a olho “*nu*” que a amostra apresentava um “risco” em todo o seu comprimento. Inicialmente, pensou-se que a amostra teria um revestimento todavia, dada a regularidade do dito “risco”, ele seria, provavelmente, consequência do processo de laminagem da chapa. A inexistência de revestimento é confirmada pela realização dos ensaios de dureza, apresentados na secção 3.1.2.

### 3.1.2 Ensaios de dureza

Os testes de dureza foram realizados no equipamento gentilmente disponibilizado pelo grupo de Construções Mecânicas do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Os resultados do teste de dureza realizados, constantes da Tabela 10, espelham a diferença de durezas nas duas zonas estudadas, o “substrato” e o “revestimento” da amostra. Fez-se 10 medições em cada metade da amostra para se comparar as durezas. Calculou-se a média, os máximos e os mínimos das medições. Conclui-se que a dureza é aproximadamente 400Hv, o que para um aço comercial é um valor muito elevado, visto que um aço de construção normal deverá apresentar durezas próximas dos 220Hv [55].

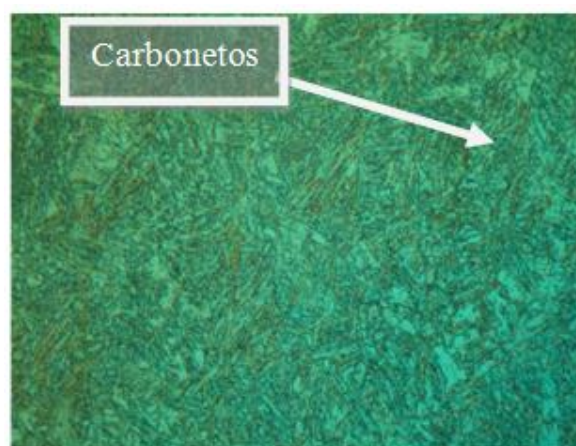
Em virtude dos ensaios terem sido efetuados no “substrato” e no “revestimento”, e não se verificarem alterações significativas nos valores de dureza, pôde-se concluir que a hipótese da existência de um revestimento não fará, aparentemente, muito sentido.

Substrato		Revestimento	
Medições	Dureza (HV)	Medições	Dureza (HV)
1	406	1	426
2	431	2	426
3	438	3	416
4	420	4	406
5	422	5	420
6	428	6	423
7	435	7	410
8	419	8	407
9	430	9	410
10	427	10	409
Média	425,6	Média	415,30
Máx.	438	Máx.	426
Min.	406	Min.	406
Desv. Padrão	9,25	Desv. Padrão	7,90

**Tabela 10:** Comparação de durezas em dois lados distintos da amostra estudada.

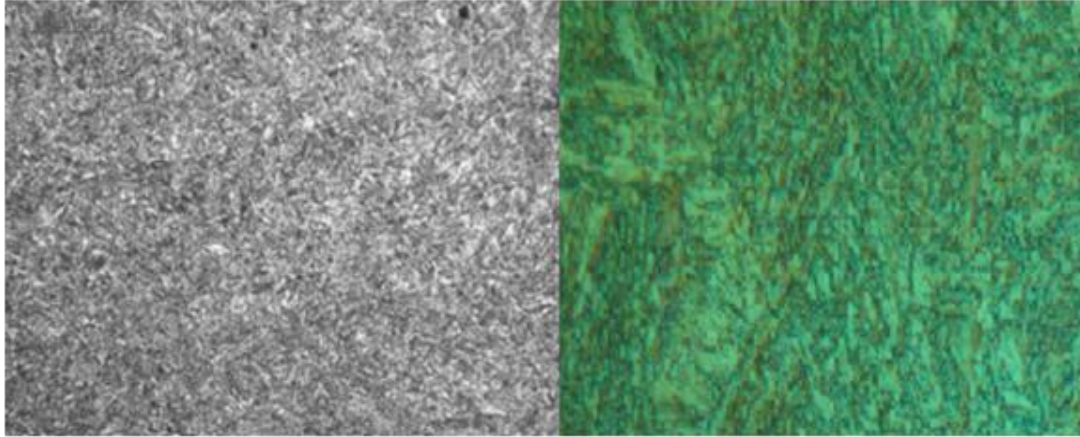
### 3.1.3 Análise microscópica

A microestrutura visualizada no microscópio ótico foi a ilustrada pela Figura 40, onde é possível observar que os grãos são bastante finos, sendo notória a presença de carbonetos. Após a visualização da microestrutura no microscópio e com os valores de dureza obtidos, suspeitou-se que poderia ser um aço mais duro que o normal. Pensou-se, então, no aço *Hardox*. Dado que a dureza do material era na ordem dos 400Hv, pensou-se no *Hardox 400*, pois, para além de a dureza ser a mesma, também a sua microestrutura é parecida com a que foi observada.



**Figura 40:** Microestrutura da amostra que se retirou do forro lateral.

Durante a pesquisa efetuada, foi possível ver a microestrutura do *Hardox 400*, e conseguimos verificar que o material em causa poderá ser, de facto o *Hardox 400*, visto que as microestruturas são muito idênticas; na Figura 41 é possível fazer uma comparação entre as 2 microestruturas, a do *Hardox 400* e a da amostra recolhida, e verifica-se o que se suspeitava.



**Figura 41:** Comparação de microestruturas entre o *Hardox 400* e a amostra estudada.

### 3.1.4 Desgaste no extrator celular, 2ª paragem

Após três meses e meio, durante a paragem do forno, fez-se uma nova intervenção de manutenção à válvula com o objetivo de quantificar o desgaste sofrido. Verificou-se um desgaste bastante acentuado, visto o intervalo de tempo ser curto em relação à última paragem, o que obrigou a uma intervenção urgente. O desgaste acentuou-se nos mesmos locais do que na última reparação. Para que o custo da reparação não fosse muito elevado, efectuou-se o enchimento e o revestimento por soldadura nas zonas mais afectadas. A vantagem de se escolher a soldadura para o revestimento do material é devido ao facto de não haver perigo do revestimento se soltar do substrato, como acontece com o processo de projecção térmica HVOF. No caso das forras laterais, devido ao seu desgaste ser bastante acentuado, fez-se primeiramente um enchimento com eléctrodo básico e, em seguida, o revestimento com um eléctrodo duro para incrementar significativamente a resistência ao desgaste. Na forra inferior, como aconteceu na primeira paragem, o desgaste era tão elevado que foi necessário substituir o material por um novo que foi de imediato revestido com um eléctrodo duro. Os eléctrodos usados foram, no caso do eléctrodo básico, o *EUROTROD BN 18* e, no caso do eléctrodo de material duro, o *EUROTROD HD 70*. As tabelas 11 e 12 resumem a composição química do eléctrodo básico e do eléctrodo duro, respetivamente. O eléctrodo básico AWS A5.1: E 7018.1 H4 é um eléctrodo para revestimento básico, que se aplica de modo universal em soldadura de alta qualidade, em estruturas metálicas, em construção e reparação

de máquinas e em caldeiras e peças vazadas [56]. O eléctrodo duro DIN 8555/E 4-UM-60 GPT, aplicável em ferramentas de corte, forjagem, estampagem, feiras, rolos de laminagem e peças sujeitas a desgaste a quente ou a frio, é um eléctrodo para revestimento, que serve para recobrimentos sujeitos a abrasão com choque e temperatura. Este eléctrodo apresenta uma dureza de 60 a 64 HRC, que, comparando com as tabelas de conversão para HV, corresponderá a uma dureza de aproximadamente 697 a 800 HV [56].

Como se pode verificar na composição química do eléctrodo duro, conforme apresentado na Tabela 12, a existência e.g. do vanádio e do tungsténio, e até do molibdénio, conduz ao aumento da dureza do material e, conseqüentemente, a um incremento significativo na resistência ao desgaste.

Composição química (%)				
<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
= 0,07	= 1,35	= 0,65	<0,02	<0,02

**Tabela 11:** Composição química do eléctrodo básico.

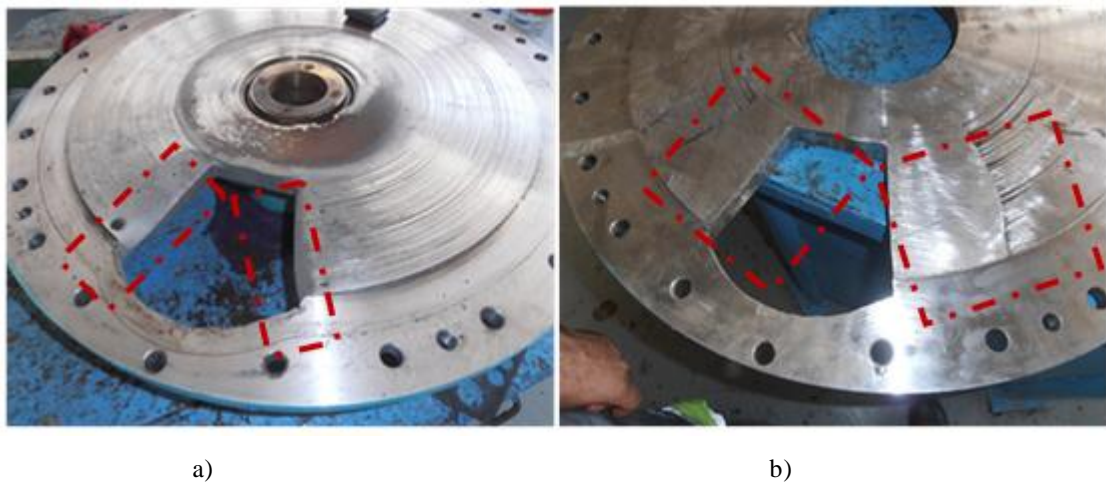
Composição química (%)						
<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>	<i>W</i>
0,90	0,50	0,50	4,00	8,50	0,90	1,10

**Tabela 12:** Composição química do eléctrodo duro.

Como já foi dito anteriormente, nas forras laterais foi efectuado o enchimento com eléctrodo básico devido ao preço da forra lateral ser bastante dispendioso. O seu enchimento, foi feito só em metade da forra, no local onde sofria maior desgaste. A forra foi ligeiramente retificada, como mostra a figura 42, para que o rotor se encaixasse mais facilmente na válvula, mesmo tendo alhetas axiais ajustáveis. A forra inferior não sofreu retificação devido ao espaço que tinha do rotor. A tampa de saída, que sofreu bastante com o impacto devido ao seu desgaste acentuado, foi recuperada, posteriormente, com enchimento. Na Figura 43, verifica-se a diferença entre a tampa da válvula com desgaste e a tampa com o enchimento com a devida retificação.



**Figura 42:** Forra: a) inferior e b) lateral da válvula respetivamente.



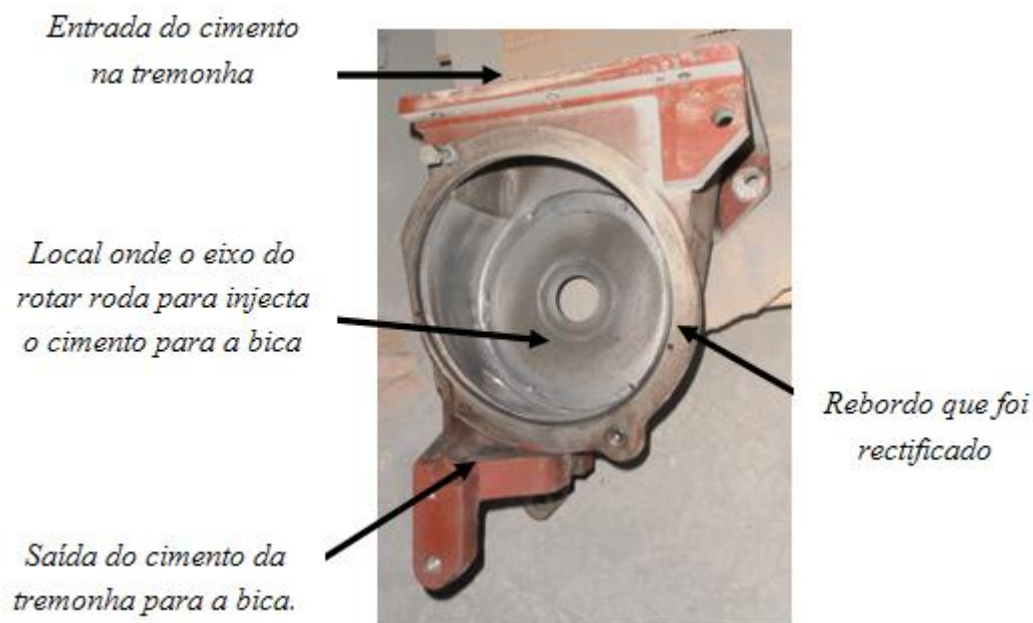
**Figura 43:** Tampa de saída com: a) desgaste e b) depois da sua reparação.

### 3.2. Desgaste das tremonhas das ensacadoras

Na CIMPOR existem quatro ensacadoras, cada uma delas com 8 “bicas” que enchem oito sacos ao mesmo tempo. As ensacadoras funcionam em movimento rotativo e vão enchendo os sacos enquanto rodam. Antes de chegarem ao ponto inicial, os sacos estão cheios, e a “cadeira” da ensacadora, local onde cada saco é apoiado, “expulsa-o” para o transportador que o conduz até à paletizadora ou, alternativamente, ao pacotão.

O sistema de enchimento das “bicas” funciona do seguinte modo: *i)* o cimento cai numa tremonha, como a ilustrada pela Figura 44, que tem no seu interior um rotor acionado

por um moto-reductor; ii) este rotor é o responsável pela injeção de cimento no saco, fazendo-o encher em menos de 360°, para que a “cadeira” possa ficar livre de modo a receber outro saco.



**Figura 44:** Tremonha da ensacadora 1

Durante a pausa para a manutenção anual da parte de expedição, a ensacadora 1 foi desmontada, tendo sido preciso substituir muitos equipamentos devido ao desgaste de fadiga e de abrasão dos materiais, tendo sido, por isso, motivo de estudo. Aquando da desmontagem das tremonhas, verificou-se que estas estavam com um desgaste muito severo, encontrando-se mesmo furadas de um lado ao outro. Pelos documentos, que foi possível consultar, concluiu-se que teria decorrido um ano e meio desde a última vez que as tremonhas tinham sido trocadas e que a ensacadora não teria revestimento, ao contrário das outras ensacadoras que, no ano de 2007, foram revestidas com revestimento cerâmico, através do processo de HVOF.

Quando se fez a manutenção da ensacadora 2, o seu revestimento já tinha saltado devido ao tempo de trabalho que a ensacadora estava a funcionar, e já tinha desgastado as paredes das tremonhas. Teve portanto de se efectuar um enchimento por soldadura para que, em primeira instância, se pudessem recuperar as paredes da tremonha para que, posteriormente, fosse possível aplicar um revestimento. Depois das tremonhas terem vindo da empresa responsável pelo enchimento, seguiram directamente para a empresa responsável pelo revestimento por projecção térmica, não tendo sido verificado a qualidade do trabalho da soldadura que requeria cuidados especiais dada a reduzida espessura da parede da tremonha. Depois das tremonhas terem sido rectificadas e revestidas vieram para o CPS onde se verificou que apresentavam uma das paredes fragilizada que, com o aquecimento a que a peça

fora sujeita devido ao enchimento, sofrera um pequeno empeno, o qual era suficiente para que as cotas finais fossem alteradas e a sua instalação se tornasse praticamente impossível. Embora a sua retificação fosse necessária, esse procedimento iria fragilizar ainda mais o equipamento, visto que as paredes iriam sofrer algum desbaste por torneamento. Mas o maior problema seria o facto de a tremonha ter levado já o revestimento dado que a sua geometria não podia ser alterada corria-se o risco de danificar o revestimento. O problema foi resolvido, visto que a única parte da tremonha que seria rectificadado, seria o rebordo, onde a tampa que fecha a tremonha, encaixa. Esta parte da tremonha não estava revestida, por isso foi mais acessível a sua rectificação e conseqüentemente a sua montagem.

Os principais tipos de materiais para revestimento, que possuem alta dureza em temperatura ambiente, alta dureza a quente e ainda condições de resistirem ao desgaste por *fretting* aliando resistência à corrosão, citados pela literatura, são: WC-Co, WC-Ni, WC-Co-Cr, WC-Cr-Ni e Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr. Estes materiais têm as características de possuírem carbonetos que lhe conferem uma elevada dureza. Esses carbonetos estão imersos em uma matriz relativamente tenaz/dúctil de Co, Ni, Co-Cr ou Ni-Cr que têm como função a união das partículas, além de possuírem resistência à corrosão. São estas características que explicam a escolha do revestimento utilizado. O revestimento utilizado nas tremonhas foi o WC (carboneto de tungsténio) com 12% de Cobalto e com 0,3mm de espessura. É necessário dizer também que este revestimento foi escolhido pela empresa que executou o revestimento.

### 3.3. Vantagens da presença do revestimento nas tremonhas

O preço de uma tremonha nova ronda os 1100€, enquanto o revestimento de cada tremonha, produzido pelo processo HVOF, foi de, aproximadamente, 300€. Estes valores, apresentados na Tabela,13 apenas a título ilustrativo, são informação confidencial da fábrica.

	<i>Preço (€)</i>	<i>Preço do conjunto (€)</i>	<i>Tempo de vida (Anos)</i>	<i>Preço por ano (€/ano)</i>
Revestimento	≈300	≈1400	≈6	≈250
Tremonha	≈1100	≈1100	≈1,5	≈733

**Tabela 13:** Comparação de preço da tremonha com revestimento ou sem o revestimento.

Comparando os preços da tremonha e do revestimento concluiu-se que, monetariamente, é mais rentável usar o revestimento, até porque a sua vida útil sofre um aumento de quase cinco vezes mais. Existem, ainda, outros parâmetros a ter em conta, como é o caso da mão-de-obra. De cada vez que o material do equipamento estiver parado para

substituição, a fábrica não estará a produzir, logo não terá rentabilidade. Para que o preço seja mais reduzido, o tempo de vida das tremonhas com revestimento deveria ser de 5 anos. Concluído este tempo fazia-se a manutenção, retirando-se as tremonhas, fazendo-se um novo revestimento e voltando-se a instalar as mesmas tremonhas, com novo revestimento, sem ser preciso o enchimento por soldadura, evitando assim os problemas que foram descritos anteriormente.

Fazendo uma análise à avaliação desta situação, no final de 10 anos ter-se-ão gasto 1700€, visto que a tremonha seria a mesma, fazendo-se, apenas e só, um novo revestimento. Se o tempo de vida for de 6 anos, a tremonha sofrerá um grande desgaste, começando a deteriorar-se, sendo necessário fazer-se o seu enchimento como foi descrito anteriormente, o que aumenta a factura em cerca de 400€. Conclui-se que o revestimento em equipamentos na indústria, nomeadamente no CPS, é deveras importante, visto que o seu custo a médio e a longo prazo é bastante reduzido, comparando ao preço de equipamentos novos.

## 4. Outros projetos/tarefas realizadas ao longo do estágio

Durante o estágio, não foram desenvolvidas, apenas, projetos/tarefas relacionados com desgaste. Nos seis meses que durou o estágio, foram feitos vários trabalhos no âmbito da manutenção programada da linha de fabrico, assim como trabalhos para otimização de equipamentos existentes.

Este capítulo descreve os trabalhos efetuados, apresentando-se um breve resumo do que foi feito e respetivas conclusões.

### 4.1. Trabalho de organização nos processos da expedição

Como foi referido no plano de trabalhos, *Fase dois*, fez-se uma análise do funcionamento dos equipamentos integrantes da linha de fabrico de cimento, nomeadamente no que concerne à parte de expedição.

Após a compreensão mais pormenorizada do processo, leram-se os manuais de instruções respeitantes ao funcionamento de cada máquina, tendo-se constatado que os mesmos estavam desorganizados e que eram de difícil acesso. Outra dificuldade encontrada foi na organização da manutenção preventiva da fábrica que é feita através de um programa chamado SAP (Sistemas, aplicações e produtos em processamento de dados). Este programa informático é muito utilizado por outras empresas, para a sua própria organização. O inconveniente deste programa é ser ainda complexo e não existir ninguém, na fábrica, com formação na área, para o poder utilizar de forma eficiente. Dado que o Excel, comparativamente ao SAP, é uma ferramenta de trabalho mais simples que está acessível a todas as pessoas, foi utilizado para a criação de um mapa de manutenções de certos equipamentos. Assim, foi desenvolvida uma ferramenta computacional simples que permitia o registo do agendamento e realização das tarefas de manutenção, possibilitando, também, através de hiperligações, o acesso ao manual de instruções de cada equipamento.

A partir de uma tabela de Excel e da imagem da fábrica fizeram-se hiperligações, podendo-se ir para todos os locais ligados à expedição, ficando-se, assim, a conhecer os equipamentos existentes em cada local específico, o manual de instruções, a manutenção programada e também o dia em que seria a próxima manutenção.

Na figura 45 é possível observar o interface inicial onde se pode aceder às várias secções da expedição. Na figura 46, consegue-se observar o menu de uma das áreas (pacotão).

Na figura 47, é possível verificar os componentes de um determinado equipamento, tendo-se acesso à tabela da manutenção preventiva, assim como à hiperligação para o processo do equipamento.



Figura 45: Interface gráfica da ferramenta computacional desenvolvida.

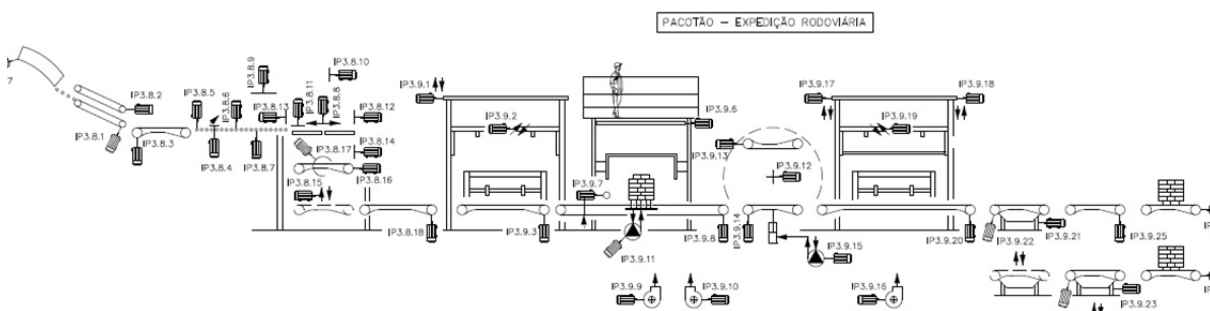


Figura 46: Menu de uma das áreas do pacotão.

7	ITEM	EQUIPAMENTO	COMPONENTE	DESIGNAÇÃO	VAN	ES*	FC	FR	T	PER	Data Inic	Controlo
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	POLIES P12.14	PL6940132.110: VERIFICAR O ESTADO, DESGASTE E FUNCIONAMENTO		P	182	O	093		25-03-2002	Executar 23-09-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	CABOS/AÇO P13	PL6940132.110: VERIFICAR O ESTADO		P	182	O	093		25-03-2002	Executar 23-09-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	MOLA/PRESSÃO P15	PL6940132.110: VERIFICAR O ESTADO		P	182	O	093		25-03-2002	Executar 23-09-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	ROLETOS P8.9	PL6940132.110: LIMPAR E SUBSTITUIR OS DANIFICADOS		P	91	O	093		24-06-2002	Executar 23-09-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	TELA P10	PL6940132.110: ENSAIAR EQUIPAMENTO, INSPECCIONAR E ALINHAR		F	91	O	093		24-06-2002	Executar 23-09-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	TAMBIMANDADO	CONTROLAR O DESGASTE E FIXAÇÃO		P	182	O	093		25-03-2002	Executar 23-09-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	TAMBIMANDADO	ABRIR, LIMPAR, CONTROLAR O ESTADO ROLAMENTOS E CHUMACEIRA		P	364	O	093		24-09-2001	Executar 23-09-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	TAMBIMANDADO	LIMPAR, REAPERTAR CHUMACEIRA E ROLAMENTOS		P	182	O	093		25-03-2002	Executar 23-09-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	SISTEMA/TENSOR	CONTROLAR O ESTADO E BENEFICIAR		P	182	O	093		25-03-2002	Executar 23-09-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	CORRENTE(S) P4	PL6940132.110: CONTROLAR O ESTADO, LIMPAR, LUBRIFICAR E AJUSTAR		P	45	O	093		02-06-2002	Executar 17-07-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	CARRETOS P2.3	PL6940132.110: VERIFICAR O ESTADO, FIXAÇÃO, ALINHAMENTO E BENEFICIAR		P	182	O	093		25-03-2002	Executar 23-09-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	TAMBIMANDANTE	CONTROLAR O DESGASTE E FIXAÇÃO		P	182	O	093		25-03-2002	Executar 23-09-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	TAMBIMANDANTE	ABRIR, LIMPAR, CONTROLAR O ESTADO ROLAMENTOS E CHUMACEIRA		P	364	O	093		24-09-2001	Executar 23-09-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	TAMBIMANDANTE	LIMPAR, REAPERTAR CHUMACEIRA E ROLAMENTOS		P	182	O	093		25-03-2002	Executar 23-09-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	M/REDUTOR P1	PL6940132.110: LIMPAR, REAPERTAR E ELIMINAR FUGAS DE ÓLEO		P	364	O	093		24-09-2001	Executar 23-09-2002
4	IP3.3	TRANSP TELA ENT SUP	M/REDUTOR P1	PL6940132.110: VERIFICAR TEMPERATURA		P	182	O	093		25-03-2002	Executar 23-09-2002

Figura 47: Tabela de manutenção de um determinado equipamento.

## 4.2. Trabalho na manutenção semestral

No acompanhamento das atividades de manutenção, durante a paragem semestral do forno três, verificou-se que as grelhas do arrefecedor de *clínquer* estavam bastante corroídas

devido à passagem do *clínquer* a altas temperaturas. Visto que, em todas as paragens semestrais, as grelhas são substituídas e como a área abrangida pelo desgaste é relativamente grande, seria bastante vantajoso fazer o seu revestimento, aumentando, assim, o seu tempo de vida útil. Tentou-se, então, descobrir que tipo de desgaste estaria no arrefecedor, com o intuito de ser feito o seu revestimento para que a sua substituição não fosse semestral. Na figura 48 observa-se a área que o arrefecedor ocupa e o trabalho que é necessário desenvolver para ser feita a substituição destas mesmas grelhas.



**Figura 48:** Arrefecedor em manutenção.

Apesar de se ter despendido algum tempo na procura de uma solução, não foi possível apurar que tipo de desgaste estaria ali manifestado. Isto deve-se a um leque variado de fatores, tais como, altas temperaturas, desgaste por abrasão e o desgaste por erosão que teve nas grelhas. Assim, foi necessário optar por outras medidas para poder resolver o problema. Foi solicitado a duas empresas que revestissem algumas grelhas, de modo a testar qual seria o revestimento mais vantajoso para o trabalho em questão. Em virtude do elevado preço que está associado ao processo de revestimento forma apenas revestidas 5 grelhas, para que, na próxima paragem, se pudesse concluir qual dos dois revestimentos aguentara mais. Os revestimentos foram efetuados com o mesmo material, o qual não me foi possível identificar devido a confidencialidade das empresas, e, apesar de aplicados com processos diferentes, estes eram bastante semelhantes.

Uma das empresas fez as grelhas por projeção térmica por HVOF, enquanto a outra aplicou o revestimento por soldadura. A opção tomada para resolver o problema está relacionada com o facto de nenhum dos intervenientes envolvidos conseguir concluir se as

grelhas sofriam de desgaste por erosão ou por outro tipo de desgaste. Assim, realizaram-se dois processos antagónicos para tentar solucionar este problema. Este facto das grelhas serem revestidas com dois processos diferentes tem haver com o facto dos revestimentos produzidos por HVOF são pouco resistentes ao impacto e os resultantes do processo de soldadura muito resistentes como foi apresentado no capítulo anterior.

### 4.3. Verificação das telas transportadoras na parte de expedição

Quando ocorreu a paragem semestral do forno três, foi pedido para que fosse feito o levantamento da quantidade, em metros, dos transportadores de tela que existissem em armazém, assim como o estado dos transportadores existentes na parte da expedição. Depois de se visualizar cada transportador individualmente, concluindo-se que algumas telas sofriam desgaste, tendo estas sido encaminhadas para reparação. Concluiu-se também que a quantidade de metros de tela em armazém era insuficiente para a substituição de todos os transportadores, tendo, então, sido necessário encomendar mais metros de tela. A figura 49 ilustra as telas que foram verificadas.

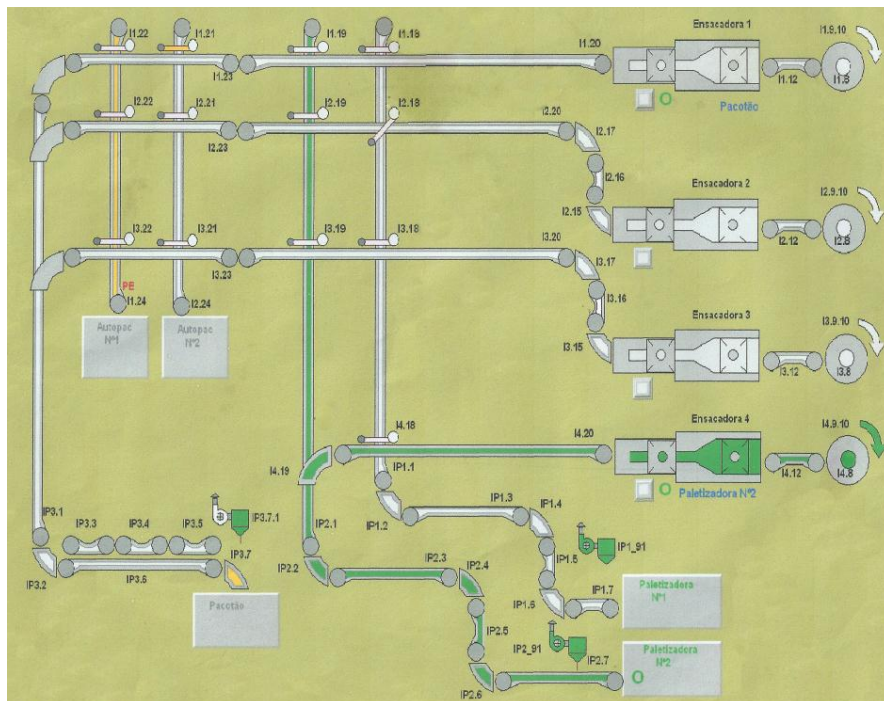


Figura 49: Telas da parte da expedição.

### 4.4. Outros trabalhos realizados

Para complementar a excelente experiência que foi estagiar numa empresa tão conceituada como a CIMPOR, foram realizados vários trabalhos que não estão inteiramente

relacionados com o tema tratado neste relatório, mas não foram menos importantes no aprofundar da formação académica em contexto de trabalho na indústria.

Foi possível acompanhar a construção de uma estrutura metálica para suportar um quadro elétrico, este será o quadro das instalações do novo pacotão, que será montado no final do presente ano.

Outro trabalho a que se assistiu, foi a instalação de um mecanismo para destruir sacos que foram rejeitados por não obedecerem às normas estipuladas. Este mecanismo contempla um transportador de tela, que serve para o transporte de sacos para o interior da tremonha, onde será destruído. Esta estrutura está auxiliada por uma bomba de sucção de ar que ajuda o operador a transportar os sacos do pacotão e/ou paletizadora para o transportador. Este mecanismo foi instalado devido à poluição constante que se fazia sentir na fábrica, pois este tipo de trabalhos ainda não é robotizado ou possui qualquer ajuda. Sem este sistema, os trabalhadores tinham de passar horas a destruir sacos, o que poderia causar problemas de saúde devido ao pó fino do cimento.



## 5. Conclusões gerais e trabalhos futuros

### 5.1. Principais Conclusões

Relativamente ao trabalho da tremonha, na parte da expedição, conclui-se que a presença do revestimento lhe garante maior longevidade, sendo mais económico o processo de substituição do revestimento ou mesmo a aplicação de um novo revestimento do que a substituição por uma nova tremonha, como ficou demonstrado neste trabalho.

Sobre o trabalho no extrator celular, válvula SASSE, a conclusão possível é que a válvula e todo o equipamento da zona dos CDR terão uma vida útil muito maior, sendo o seu desgaste muito menos acentuado, se os CDR vierem do fornecedor “limpos”, - sem material metálico e vidros -, o que possibilita a diminuição do número de paragens, aumentando, assim, o rendimento do forno.

Relativamente à intervenção efetuada no arrefecedor de clínquer, tal como foi referido anteriormente, não podem, para já, ser retiradas conclusões visto que a próxima paragem do arrefecedor ocorre no final do presente ano.

### 5.2. Desenvolvimentos Futuros

Dadas as especificidades da indústria cimenteira a larga maioria dos equipamentos que a integram sofre um desgaste acentuado provocando a sua paragem prematura. Como tal, o estudo de outros processos de produção de revestimentos e de outros tipos de revestimentos é impreterível dado o impacto que o fenómeno de desgaste tem na indústria cimenteira. Pese embora os revestimentos constituam uma solução no incremento do comportamento ao desgaste nem sempre são solução, tal como ficou demonstrado com o problema da instalação de CDR que sofria desgaste por impacto e abrasão. Entendido o problema, um trabalho futuro seria estudar a instalação dos CDR com mais pormenor, identificando e resolvendo o problema da separação de materiais não desejados. Uma opção a considerar poderia passar por alterar a forma como o íman apanha o material metálico e a sua localização. Como o íman se situa no final da instalação, isto implica que o material “contaminado” passe por toda a instalação com material metálico, sem haver nada que o recolha.

Outro problema deve-se ao facto do íman estar por cima de um transportador, o que faz com que o material chegue em “monte”, dificultando a captação destes

materiais; sendo o material metálico de tamanho reduzido, se estiver no fundo da pilha, o íman não terá “força” para o magnetizar, o que faz com que este continue e danifique a restante instalação. Acresce ainda que o íman só consegue recolher material metálico ferroso, sendo, então, necessário outro sistema de recolha de material não ferroso não desejável. Como foi dito anteriormente neste relatório, os materiais metálicos não ferrosos podem ser recolhidos através de um processo que se chama “separador de *Eddy*”. Um separador *Eddy Current* é composto por uma correia transportadora acionada pelo tambor de retorno e um sistema de rotor indutivo com ímanes permanentes que geram campos magnéticos variáveis, de alta frequência, através do tambor de cabeceira. Estes campos criam fortes correntes de “*Foucault*” nas partículas de metais não-ferrosos que os atravessam, induzindo, nos mesmos, campos magnéticos opostos aos campos externos, sendo lançadas para fora do fluxo de material transportado [57].

Outro sistema possível de adotar seria a utilização de um processo através de ar comprimido, ou seja uma caleira porosa. Neste sistema, o material deslizaria por uma chapa furada, tendo, por baixo, compressores que soprem o material para cima, fazendo com que o material pretendido subisse e entrasse numa conduta mais alta. Este sistema impediria a subida do material pesado - metálico ferroso e não ferroso -, caindo no final da caleira para um contentor, podendo, por fim, ser transportado para a sucata.

### **5.3. Conclusão final**

No início do estágio, como já foi referido, foram propostos alguns objetivos para serem atingidos ao longo da duração do estágio. A duração limitada do estágio, em comparação com os problemas encontrados durante o mesmo, tornou inviável a conclusão de alguns estudos realizados, nomeadamente se os revestimentos aplicados em determinados equipamentos foram uma mais-valia para à empresa.

Além do trabalho realizado, no âmbito do tema que se tratou nesta tese, pode-se referir que a experiência foi bastante positiva, devido ao facto de trabalhar numa indústria e poder aplicar todos os conceitos que aprendi ao longo dos anos da minha formação académica, possibilitando-me, ainda, a aquisição de novas competências técnicas e humanas.

Pode concluir-se que os objetivos propostos para este estágio foram globalmente atingidos, apesar do trabalho de investigação ser merecedor de mais tempo e mais estudos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] [http://www.cimporportugal.pt/default.aspx?lang=pt&id\\_class=8&name=Homepage](http://www.cimporportugal.pt/default.aspx?lang=pt&id_class=8&name=Homepage) (Disponível em Julho)
- [2] [http://www.cimpor.pt/artigo.aspx?lang=pt&id\\_object=29&name=Producao--cimento](http://www.cimpor.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=29&name=Producao--cimento) (Disponível em Julho)
- [3] [http://www.secil.pt/pdf/Gestao\\_Residuos\\_no\\_Grupo\\_SECIL\\_20110216.pdf](http://www.secil.pt/pdf/Gestao_Residuos_no_Grupo_SECIL_20110216.pdf) (Disponível em Agosto)
- [4] SOARES, A.C., Relatório 2º semestre (CIMPOR)
- [5] IEA BIOENERGY (2003). Municipal Solid Waste and its Role in Sustainability - a position paper prepared by IEA Bioenergy. IEA Bioenergy. <http://www.ieabioenergy.com/>
- [6] ARCHER, E., BADDELEY, A., KLEIN, A., SCHWAGER, J., WHITING, K. (2005a). Mechanical - biological - Treatment: A guide for decision makers - Processes, Policies and Markets, Annexe B - Issues Arising out of the Regulatory & Policy Framework, version 1.0. United Kingdom, Juniper Consultancy Services, Ltd.
- [7] EKHOLM, E. (2005). RDF treatment methods in finland, in jateseminaari, 2-3 November 2005, Tallin (Estonia).
- [8] GENDEBIEN, A., LEAVENS, A., BLACKMORE, K., GODLEY, A., LEWIN, K., WHITING, K.J., DAVIS, R. (2003). Refuse derived fuel, current practice and Perspectives. Final Report B4-3040/2000/306517/MAR/E3. WRc ref: CO5087-4. European Commission - Directorate General Environment, Bruxelas.
- [9] DIAS, SUSETE MARTINS, SILVA, RITA BARROS, BARREIRO, FILIPE, COSTA, MÁRIO, Avaliação do potencial de produção e utilização de CDR em Portugal Continental, 2006.
- [10] STEINER, M. (2005). Status of Mechanical-Biological Treatment of Residual Waste and Utilization of Refused-Derived Fuels in Europe, in Conference "The future of residual Waste Management in Europe", 17-18 November, Luxemburgo
- [11] <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/832603/1/Avaliacao%20da%20Estabilidade%20Biologica%20de%20Combustivel%20Derivado%20de%20Residuo.pdf> (Disponível em Julho)

- [12] GLORIUS, T., TUBERGEN, J., PRETZ, T., KHOURY, A, UEPPING, R. (2005). BREF "Waste Treatment" Solid Recovered fuels. European Recovered Fuel Organization and Institute and Chair of Processing and Recycling of solid Waste, RWTH Aachen.
- [13] [https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.endseurope.com%2Fdocs%2F90604a.doc&ei=J11EUqrCGsKO7AaunIGADg&usg=AFQjCNE6UjRjgRtnesA0kV5kE\\_Sco7o0CA&bvm=bv.53217764,d.ZGU&cad=rja](https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.endseurope.com%2Fdocs%2F90604a.doc&ei=J11EUqrCGsKO7AaunIGADg&usg=AFQjCNE6UjRjgRtnesA0kV5kE_Sco7o0CA&bvm=bv.53217764,d.ZGU&cad=rja) (Disponível em Julho)
- [14] WILÉN, C., SALOKOSKI, P., KURKELA, E., SIPILA, K. (2004). Finnish Report on best available techniques in energy production from solid waste fuels. Finnish Environment Institute, Finlândia.
- [15] Apontamentos das aulas teóricas da cadeira de Desgaste e Corrosão do professor João Miguel Carrapichano.
- [16] J.HALLING et al, *Principles of Tribology*, The Macmillan Press Ltd., 1975
- [17] T.S. Eyre, Wear characteristics of metals, *Tribology International* 10 (1976) 203–212.
- [18]
- [19] SUNDSTROM, ANN; RENDÓN, JOSÉ; OLSSON, MIKAEL. Wear behavior of some low alloyed steels under combined impact/abrasion contact conditions, 2001
- [20] GAHR, ZUM, *Microstructure and Wear of Materials*, 1987, p.93
- [21] TYLCAK, J.H., *Abrasive wear*, ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology, Vol. 18, ASM International, 1992.
- [22]
- [23] GAHR, ZUM, *Microstructure and Wear of Materials*, 1987, p.98
- [24] J.D. Gates, Two-body and three-body abrasion: a critical discussion, *Wear* 214 (1998) 139–146.
- [25] [emc5714.orestes.prof.ufsc.br/apostila\\_resistenciaaodesgaste.doc](http://emc5714.orestes.prof.ufsc.br/apostila_resistenciaaodesgaste.doc) (Disponível em Setembro)
- [26] GAHR, ZUM, *Microstructure and Wear of Materials*, 1987, p.96
- [27] A.D. Sarkar, *Wear of Metals*, Pergamon Press, Oxford, 1976, p. 2
- [28] <http://www.rijeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste> (Disponível em Setembro)

- [29] BOURITHIS, L.; PAPADIMITRIOU, G., Three body abrasion wear of low carbon steel modified surfaces, 2005.
- [30] KRUSCHOV, M. M., and Babichev, M. A., Friction and Wear in Machinery translation by the AMEicon Society of mechanical Engineers from the Russian, Machinistrinia.
- [31] J.L. Basse, *Wear*, **76**, 1991
- [32] PINTAUDE, E. ALBERTIN, A. SINATORA, A review on abrasive wear mechanisms of metallic materials, in: Abrasion 2005: Proceedings of International Conference – Abrasion 2005
- [33] <http://moodle.stoa.usp.br/file.php/1066/2010/PMT2200plenaria2desgasteem2010.pdf>
- [34] J.A. Schey, Tribology in Metalworking, American Society for Metals, 1979
- [35] RIBEIRO, L., et al., Abrasion wear behaviour of alloyed and chilled cast irons, 2011.
- [36] FILDES, J.M., et al. Evaluation of the wear and abrasion resistance of hard coatings by ball-on-three-disk test methods, 2012
- [37] COUTO, L.C., *Aspersão térmica na construção metálica ciência e arte*, 2006
- [38] Professor Ramón S. Cortés Paredes, Dr. Eng , *Aspersão térmica*, 2009,
- [39] KORPIOLA, K.; VUORISTO, P., Effect of HVOF Gas Velocity and Fuel to Oxygen Ratio on the Wear Properties of Tungsten Carbide Coatings. *Thermal spray: Practical Solutions for Engineering Problems*, Ed. C. C. Berndt, ASM International, Materials Park, Oh, USA, 1996.
- [40] BROWNING, J. A., Viewing the future of high-velocity oxifuel and high-velocity air fuel thermal spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 8, n. 3, 1993.
- [41] GIMENES, L, SANTOS, E. F, TOLEDO, L. B, CARRILHO, M. S. Comparativo entre os processos de aspersão térmica na manutenção. <http://www.infosolda.com.br/nucleo/downloads/pb.pdf> (Disponível em Abril)
- [42] KREPSKI, R.P., *thermal Spray Coatings Applications in the chemical Process Industries*, NACE International, Texas, USA, 1993
- [43] DORFMAN, M. R.. "Thermal Spray". *Advanced Materials & process*, vol.160, n.10, 2002

- [44] THORPE, R., KOPECH, H.& GAGNE, N., HVOF Thermal Spray Technology, *Advanced Materials and Processes*, vol. 157, n. 4, 2000.
- [45] [http://www.mbicoatings.com/content.cfm/Coatings/HVOF-Coatings/category\\_id/102/page\\_id/152](http://www.mbicoatings.com/content.cfm/Coatings/HVOF-Coatings/category_id/102/page_id/152)
- [46] <http://www.thermalspray.com/hvof-coating/> (Disponível em Setembro)
- [47] LIMA, C.C., TREVISAN, R., *Aspersão térmica: Fundamentos e aplicações*. 2ª Edição, 2007.
- [48] FREIRE, F. *Avaliação de Revestimentos Aplicados por Aspersão Térmica para Proteção Contra o Desgaste de Ponteiros de Risers*. Dissertação de Mestrado, UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. Abril, 2002.
- [49] ] KORPIOLA, K.; VUORISTO, P., Effect of HVOF Gas Velocity and Fuel to Oxygen Ratio on the Wear Properties of Tungsten Carbide Coatings. *Thermal spray: Practical Solutions for Engineering Problems*, Ed. C. C. Berndt, ASM International, Materials Park, Oh, USA, 1996.
- [50] BERGER, L.M., VUORISTO, P., MANTYLA, T., KUNERT, W., LENGAUER, W.& ETTMAYER, P., Microstructure and properties of WC-Co-Cr coatings, *Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems*, C.C Berndt Editor, ASM Intl., Ohio, USA, 1996.
- [51] THORPE, R., KOPECH, H.& GAGNE, N., HVOF Thermal Spray Technology, *Advanced Materials and Processes*, vol. 157, n. 4, 2000.
- [52] TUCKER, R. C., An overview of alternative coatings for wear and corrosion resistance *Proceedings of the 15th ITSC-*, May 25-29, Nice, France, vol. 1, 1998.
- [53] LIMA, C.R., *Estudo e caracterização de revestimentos para desgaste aplicados por aspersão térmica e chama oxicom bustível de alta velocidade-HVOF*, 2001.
- [54] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Dureza\\_Vickers](http://pt.wikipedia.org/wiki/Dureza_Vickers) (Disponível em Setembro)
- [55] [ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec\\_NOTURNO/TM343/07catalogo\\_acos\\_gerdau.pdf](ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM343/07catalogo_acos_gerdau.pdf) (Disponível em Setembro)
- [56] <http://www.electroxi.com/pdf/soldadura/ELECTRODOS.pdf> (Disponível em Setembro)
- [57] [http://www.steinert.com.br/Separador\\_MetaisNF.pdf](http://www.steinert.com.br/Separador_MetaisNF.pdf) (Disponível em Setembro)