



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Controlo Dimensional de Placas de Aço AISI 1045 no Ciclo de Produção

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Autor

Rafael Fernandes Duarte

Orientadores

Professora Doutora Cristina Maria Gonçalves dos Santos
Engenheiro António José Alcântara Gonçalves

Júri

Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Presidente **Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro**
Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra

Orientadores **Professora Doutora Cristina Maria Gonçalves dos Santos**
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra
Engenheiro António José Alcântara Gonçalves

Colaboração Institucional



Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A.

Coimbra, Julho, 2015

“Ninguém ignora tudo, ninguém sabe tudo. Por isso, aprendemos sempre.”

Paulo Freire

Aos Meus Pais e Amigos.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar agradecer a minha orientadora, Professora Doutora Cristina Santos, pela disponibilidade e incentivo.

O meu agradecimento ao Engenheiro Ricardo Ribeiro da *TEandM*, por todo o tempo despendido e por todos os ensinamentos durante a minha estadia na empresa.

O meu agradecimento a todos os colaboradores da *TEandM*, pela ajuda prestada durante o procedimento experimental.

O meu agradecimento a todos os professores que fizeram parte do meu percurso académico.

Por último, mas não menos importante, um agradecimento especial à minha família e amigos pelo apoio que me deram durante todo o meu caminho académico.

A todos um enorme agradecimento.

Resumo

O tema da presente dissertação “Controlo dimensional de placas de aço AISI 1045 no ciclo de produção” decorreu do estágio realizado na *TEandM*, Tecnologia e Engenharia de Materiais S.A., e corresponde ao desafio e à necessidade desta empresa em otimizar a linha de produção de revestimentos por *High Velocity Oxy-Fuel*, HVOF.

A aplicação de revestimentos duros do tipo WC-Co em placas, a utilizar na indústria automóvel para prensagem de pós metálicos, originava empenamentos que excediam aproximadamente 80% do valor máximo admissível.

Assim o objetivo deste trabalho é minimizar o valor do empeno que terá de ser inferiores a 0,15mm.

Para tal, foi efetuado o controlo dimensional de placas no seu ciclo de produção. O processamento pela *TEandM* engloba três passos sequenciais, a saber:

- i) Tratamento térmico de cura de material polimérico usado na proteção de furos;
- ii) Decapagem mecânica por jato abrasivo de uma superfície da placa;
- iii) Deposição de revestimento com espessura de 5mm, na superfície previamente decapada.

Das 11 placas estudadas, com geometrias e estados de admissão (novas ou usadas) diferentes, conclui-se que deveria utilizar-se apoios rígidos e valores de pressão elevados durante a etapa de decapagem. Desta forma, o empenamento obtido, em forma convexa, seria compensado pelo empeno, em forma concava, após deposição do revestimento. O melhor resultado foi obtido para a placa 9 que exibiu empeno nulo após ciclo de produção.

Palavras-chave: Placas em aço AISI 1045, Decapagem, HVOF, Revestimento, Controlo Dimensional

Abstract

The present dissertation, titled "Dimensional control of steel plates AISI 1045 in its production cycle" was proposed by *TEandM*, Technology and Materials Engineering S.A, and aimed to optimize the production of thick coatings by High Velocity Oxy-Fuel, *HVOF*.

The deposition of hard WC-Co coatings, by *HVOF*, onto one face of the steel plates, used in automotive industry, originated warped plates exceeding approximately 80% of the maximum permissible value.

So the aim of this study points to obtain warping values less than 0.15 mm.

For that, the dimensional control of several plates was made during its production cycle. The process includes three sequential steps, namely:

- i) heat treatment of the polymeric material used for holes protection;
- ii) mechanical abrasive blasting of a surface of the plate;
- iii) coating deposition, with a thickness of 5mm, on the previously blasted surface.

Eleven plates were studied. The geometry and the admission state (new or used) of the plates were different.

The critical step in the plates production is the abrasive blasting. It is necessary the simultaneous use of a rigid plate support and a high pressure values during this stage. The warped plates in convex shape will be compensated by warping in concave form after coating deposition.

The best result was obtained for the plate 9, which exhibited plastic deformation null after its production cycle.

Keywords Steel plate AISI 1045, HVOF, Coating, Blasting, Dimensional control.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas.....	xi
Siglas	xii
1. Introdução.....	1
2. Tecnologias associadas ao ciclo de produção de placas em aço AISI1045	3
2.1. Laminagem	3
2.2. Fresagem.....	4
2.3. Controlo Dimensional.....	6
2.4. Proteção de furos e entalhes	7
2.5. Decapagem Abrasiva	8
2.6. Deposição de revestimento por <i>HVOF</i>	12
2.7. Retificação	15
3. Procedimento Experimental	16
3.1. Material.....	16
3.2. Controlo Dimensional.....	17
3.3. Proteção de Furos	19
3.4. Processo de Decapagem	21
3.5. Processo por HVOF.....	23
4. Apresentação e discussão de resultados	25
4.1. Estudo preliminar	27
4.2. Ciclo de processamento: alteração de parâmetros	30
5. Conclusões e trabalho futuro.....	41
Referências Bibliográficas	43
Anexo A	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema do movimento do material durante a Laminagem [3].	4
Figura 2.2. Evolução da microestrutura do aço durante o processo de laminagem [2].	4
Figura 2.3. Processo de fresagem [4].	5
Figura 2.4. Fresagem Cilíndrica (a); Fresagem Frontal (b) [4].	5
Figura 2.5. Apalpa folgas [5].	6
Figura 2.6. Régua de aço biselada [6].	7
Figura 2.7. Graus de oxidação de substratos de aço.	9
Figura 2.8. Graus de preparação de substratos de aço, Sa2.	10
Figura 2.9. Graus de preparação de substratos de aço, Sa21/2.	10
Figura 2.10. Graus de preparação de substratos de aço, Sa3.	11
Figura 2.11. Processo de decapagem por jato abrasivo [8].	11
Figura 2.12. Vista em corte da pistola/tocha na deposição por <i>HVOF</i> [10].	13
Figura 2.13. Máquina de projeção térmica do tipo <i>HVOF</i> [12].	14
Figura 2.14. Retificadora plana comercial [14].	15
Figura 3.1. Máquina de Controlo Dimensional 3D [17].	17
Figura 3.2. Localização dos pontos na superfície.	18
Figura 3.3. Instrumentos utilizados na medição manual	18
Figura 3.4. Exemplo da malha e respectivas coordenadas X-Y utilizadas no ciclo de produção das placas.	19
Figura 3.5. a) Exemplo ilustrativo da proteção de furos nas placas; b) Forno de tratamento	20
Figura 3.6. Máquina de decapagem manual disponível na <i>TEandM</i> .	21
Figura 3.7. Interior da cabine da máquina de decapagem por jato abrasivo	22
Figura 3.8. Painéis de acionamento (B) e controlo de fluxos gasosos (A) do equipamento de <i>HVOF</i> .	23
Figura 3.9. Alimentador e regulador de pressão da máquina de <i>HVOF</i> .	24
Figura 4.1. – Metodologia adotada na abordagem dos casos em estudo.	25
Figura 4.2. Representação esquemática do sentido do empenamento.	27
Figura 4.3. Imagem da placa 1 (a) e da placa 2 (b)	28
Figura 4.4. Colocação das placas no processo de decapagem;	31
Figura 4.5. Apoio das placas para deposição de WC-Co por <i>HVOF</i> .	32

Figura 4.6. Apoio rígido das placas durante o processo de decapagem.....	34
Figura 4.7. Geometria da placa 8, PLT 19:218 (II).....	36
Figura 4.8. Geometria da placa 9, PLT 19:330.....	37
Figura 4.9. Danos observados nas placas 10 e 11 no estado de “usadas”; A) na aresta da placa; B) nos furos das placas.	40

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Granulometria do abrasivo para a decapagem [9].	12
Tabela 3.1. Composição química de aços AISI 1045 [15]	16
Tabela 4.1. Resumo dos resultados obtidos para as 11 placas estudadas	26
Tabela 4.2. Valores do empeno obtidos na placa 1 referente à PLT 18.889.	28
Tabela 4.3. Valores do empeno obtidos na placa 2, PLT 18.672.	29
Tabela 4.4. Valores do empeno obtidos na placa 3, PLT 18.883.	30
Tabela 4.5. Valores do empeno obtidos na placa 4, PLT 19.132 (1).....	33
Tabela 4.6. Valores do empeno obtidos na placa 5, PLT 19.132 (2).....	33
Tabela 4.7. Valores do empeno obtidos na placa 6, PLT 19.132 (3).....	33
Tabela 4.8. Valores do empeno obtidos na placa 7, PLT 19:128	35
Tabela 4.9. Valores do empeno obtidos na placa 8, PLT 19:128 (II).....	36
Tabela 4.10. Valores do empeno obtidos na placa 9, PLT 19.330	38
Tabela 4.11. Valores do empeno obtidos na placa 10, PLT 19.484 (1).....	39
Tabela 4.12. Valores do empeno obtidos na placa 11, PLT 19.484 (2).....	39

Siglas

TEandM – Tecnologia, Engenharia e Materiais

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

HVOF – High Velocity Oxy-Fuel

PVD – Physical Vapor Deposition

PA-CVD – Plasma-Assisted Chemical Vapour Deposition

AISI – American Iron and Steel Institute

SA – Sociedade Anonima

EAWS – Electric Arc Wire Spray

APS – Atmospheric Plasma Spraying

PLT – Ordem de Trabalho

1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação surge do estágio curricular realizado pelo autor no âmbito da disciplina de Dissertação do plano curricular do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica.

A *TEandM*, Tecnologia e Engenharia de Materiais S.A. é uma empresa fundada no ano 2000 com instalações industriais no Parque Industrial de Taveiro, Coimbra. A sua principal atividade foca-se na produção de revestimentos técnicos de componentes para aplicações industriais. As técnicas de deposição existentes naquela unidade fabril são a Projeção Térmica, onde se incluem os processos de *HVOF* (High Velocity Oxy-Fuel), *EAWS* (Electric Arc Wire Spraying), a Deposição Física em Fase de Vapor, *PVD* (Physical Vapor Deposition) e ainda a Deposição Química em Fase Vapor Assistida por Plasma, *PA-CVD*. (Plasma Assisted - Chemical Vapour Deposition) [1].

O tratamento e/ou revestimentos de superficiais de componentes mecânicos visa, entre outras, incrementar propriedades como a resistência ao desgaste, a resistência à corrosão simples ou sob tensão, a resistência à fadiga e ainda permitem uma melhoria em termos decorativos.

Um dos trabalhos que a *TEandM* possuía em Fevereiro de 2015 consistia no revestimento de uma das superfícies de placas em aço AISI 1045 com WC-Co por *HVOF*. Este tipo de placas são utilizadas da indústria automóvel e a sua funcionalidade é de servir como placas coletoras de pós metálicos que são conduzidos para diferentes orifícios e aí prensados (de acordo com o design da placa) através de cilindros.

Ora este processo é bastante abrasivo para a superfície da placa em aço, daí a necessidade de se otimizar a dureza da superfície através da deposição de um revestimento à base de carboneto de tungsténio.

O processamento deste tipo de placas pela *TEandM* consiste na aplicação de um isolamento polimérico aplicado na zona dos furos/orifícios, seguido de decapagem para originar uma rugosidade suficiente para a adesão do revestimento a produzir por *HVOF*. O controlo final da espessura do filme é efetuado por retificação.

Cada uma destas etapas ao impor deformações plásticas nas placas induzem tensões residuais, representando um dos fatores primordiais para a distorção observada (isto é, empeno). As placas quando rececionadas podem ser já reutilizadas ou “novas”. No caso de serem reutilizadas, terão que ser retificadas antes da colocação de isolamento. O estudo prende-se no facto de as placas empenarem nas diferentes fases do processo, sendo que, as placas apresentam diferentes comportamentos em cada etapa.

Pelo fato da superfície da placa apresentar empeno não é possível uma deposição homogénea da camada de revestimento. O resultado ideal seria que no final da aplicação do revestimento o seu empenamento fosse inferior a 0,15mm.

O objetivo deste trabalho é determinar uma metodologia de estudo e desenvolvimento para minimizar as distorções em placas submetidas a uma sequência de processos de tratamento de superfície pela *TEandM*.

Em consequência:

- i. Avaliaram-se, por recurso a medições 3D e manuais, as variações dimensionais nos vários estágios de processamento;
- ii. Identificou-se a etapa mais crítica em relação ao empeno;
- iii. Pretende-se um empeno inferior a 0,15mm após a aplicação do revestimento usando o processo de *HVOF*.

Esta dissertação foi subdividida em cinco capítulos.

O primeiro capítulo, compreendeu uma abordagem geral sobre o tema do trabalho e ainda uma breve descrição da empresa e do seu portefólio de produtos.

O segundo capítulo, ficou reservado para o levantamento das várias tecnologias mecânicas utilizadas no ciclo de processamento das placas em estudo. Destaque-se a laminagem, a fresagem, a retificação, a decapagem e produção de revestimentos por *HVOF*.

No terceiro capítulo é indicado o procedimento experimental, complementado com a descrição do funcionamento de todos os equipamentos utilizados neste trabalho.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais resultantes da avaliação dimensional de 11 placas.

Finalmente, no quinto e último capítulo, são tecidas as considerações finais onde se explanam as principais conclusões obtidas com a realização do presente estudo. São ainda apresentadas sugestões para a futura continuidade do trabalho.

2. TECNOLOGIAS ASSOCIADAS AO CICLO DE PRODUÇÃO DE PLACAS EM AÇO AISI1045

Para atingir os objetivos propostos é importante fundamentar o estudo sobre todos os passos incluídos no processamento das placas desde a entrada na *TEandM* até ao envio para o cliente.

Antes de serem rececionadas pela *TEandM*, as placas foram previamente sujeitas a processos de laminagem e de fresagem, de modo a obter as dimensões e geometrias pretendidas para a aplicação final.

2.1. Laminagem

A laminagem é um processo de deformação plástica de materiais metálicos, onde o material é forçado a passar entre dois rolos com sentidos de rotação diferentes mas com a mesma velocidade de rotação. A distância entre os rolos é pré-estabelecida e é sempre inferior à espessura do material que vai ser deformado. Estes rolos tem a forma de um cilindro, mas podem ter configurações diferentes dependendo do perfil que se pretende obter. [2] A Figura 2.1 ilustra, de uma maneira simples, o processamento de laminagem onde um bloco metálico é forçado a passar entre dois laminadores, reduzindo assim a sua espessura consideravelmente.

Existem dois tipos possíveis de laminagem: laminagem a quente e laminagem a frio.

A laminagem a frio comparativamente à quente é feita normalmente à temperatura ambiente e permite uma melhor precisão dimensional e bom acabamento superficial. Tal é devido em grande parte à reduzida camada de óxido superficial possível de se formar. [2]

A laminagem a quente é usada nas primeiras operações de laminagem efetuadas sobre os lingotes fundidos, com o objetivo de promover reduções de espessura mais elevadas, tendo por objetivo produzir blocos ou placas para o fabrico de barras ou chapas [2].

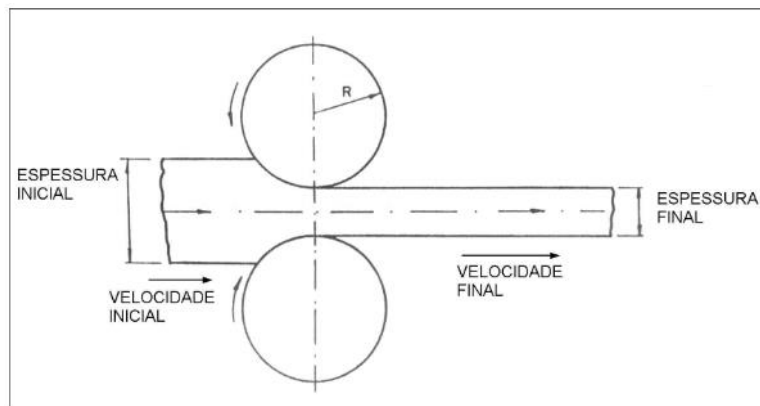


Figura 2.1. Esquema do movimento do material durante a Laminagem [3].

Os grãos alongados e deformados pela ação dos rolos de laminagem, quando passam por um processo de recristalização dinâmica, formam-se novos grãos promovendo a total regeneração da microestrutura. Se a redução de espessura for elevada a recristalização dá-se na região em deformação plástica. Quando a redução de espessura é mais baixa a recristalização surgirá na parte final desta operação de laminagem. A evolução microestrutural na laminagem a quente de aços é ilustrada na Figura 2.2.

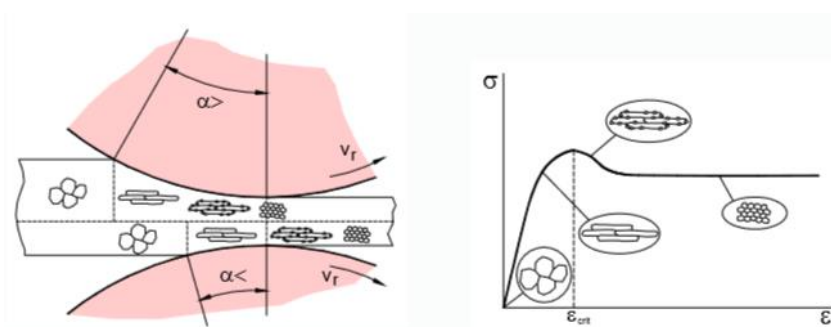


Figura 2.2. Evolução da microestrutura do aço durante o processo de laminagem [2].

2.2. Fresagem

A fresagem é um processo mecânico, que consiste na remoção do excesso de material da superfície da peça a fresar, com o objetivo da superfície apresentar um bom acabamento superficial. Esta técnica combina dois movimentos em simultâneo: movimento

de rotação, associado à ferramenta de corte, e o movimento de avanço, corresponde à mesa onde está colocada a peça [4].

A Figura 2.3. representa esquematicamente o processo de fresagem onde se pode distinguir a combinação dos movimentos associados a esta tecnologia.

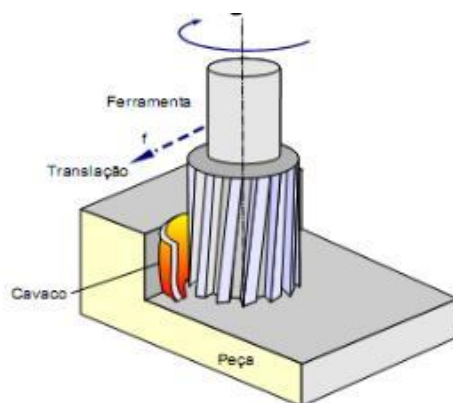


Figura 2.3. Processo de fresagem [4].

A fresagem também pode ser do tipo frontal ou cilíndrica e ainda do tipo concordante ou discordante, tal como se ilustra na Figura 2.4.

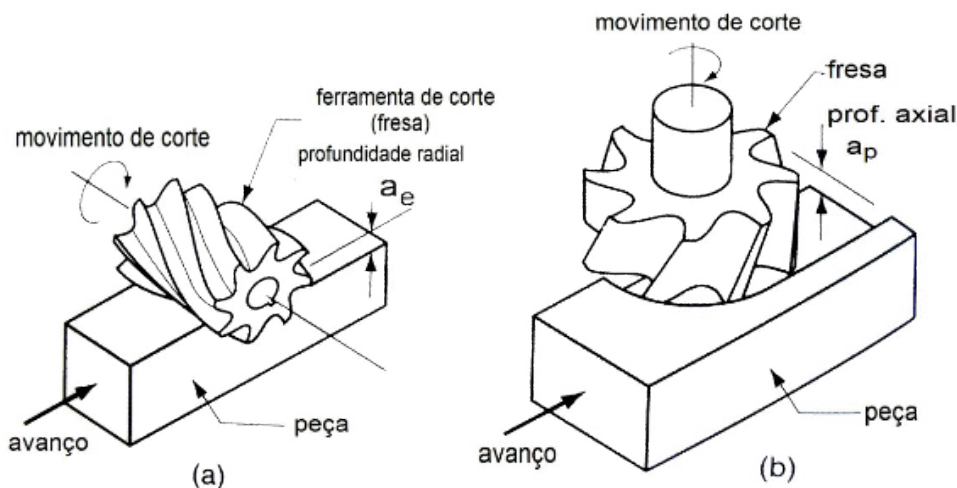


Figura 2.4. Fresagem Cilíndrica (a); Fresagem Frontal (b) [4]

Quando o movimento de rotação e o movimento da máquina estão no mesmo sentido, isto é concordante, a fresagem apresenta pior acabamento, mas o desgaste da ferramenta de corte é menor. No caso de a fresagem ser discordante o movimento de rotação e da máquina

são opostos, originando assim um melhor acabamento superficial mas com maior desgaste da ferramenta de corte.

2.3. Controlo Dimensional

As placas em aço AISI 1045 chegam à *TEandM* embaladas em caixas de madeira. Estas tanto podem ser novas como reutilizadas. São etiquetadas com a respetiva ficha técnica (PLT), que contém todas as instruções de trabalho e eventuais características ou cuidados que a placa estará sujeita enquanto do seu processo na *TEandM*.

As placas iniciam o seu “percurso” por um processo de controlo dimensional, onde são feitas medições em 3D de modo a determinar as medidas e tolerâncias da peça. Os passos utilizados neste trabalho são descritos no capítulo 3, referente procedimento experimental.

Além deste controlo também se realizaram medições utilizando um apalpa folga e uma régua de aço biselada.

O apalpa folgas é um instrumento constituído por várias laminas de espessuras diferentes, tal como se mostra na Figura 2.5.



Figura 2.5. Apalpa folgas [5].

A régua biselada é um instrumento em aço ao carbono, em forma de faca (biselada), temperada e retificada, com o fio ligeiramente arredondado. É utilizada na verificação de superfícies planas [6]. A Figura 2.6 mostra uma régua de aço biselada. De notar que este último método é bastante prático e permite ter uma noção imediata do empenamento da placa.

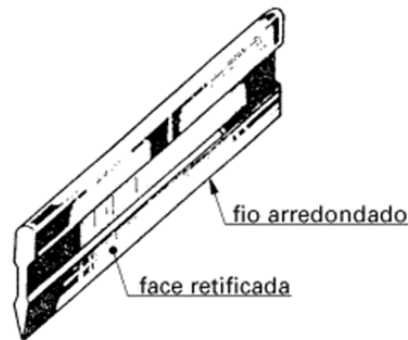


Figura 2.6. Régua de aço biselada [6].

Uma vez conhecidas as dimensões das placas que chegam a *TEandM*, estas são retificadas, caso já sejam placas reutilizadas.

De seguida a placa passará pelos processos de proteção de furos, decapagem e por fim a produção de revestimento por *HVOF*. Estes três processos serão explicados em maior detalhe mais a frente nesta dissertação, visto terem um cariz fundamental para o objetivo final.

2.4. Proteção de furos e entalhes

Tal como foi mencionado anteriormente as placas a estudar possuem vários furos/ orifícios.

De uma forma genérica, a aplicação de isolamento tem como função proteger certas zonas, de modo a que estas mantenham as suas propriedades e geometrias intactas. Neste caso em específico, a proteção tem como principal função impedir que os processos de decapagem abrasiva e de produção de revestimento afetem as zonas com furos/orifícios evitando assim a perda das propriedades e características dimensionais que lhes são exigidas. Funciona como uma espécie de “máscara”, protegendo todas as zonas que não se pretendem revestir.

O material utilizado neste trabalho foi do tipo polimérico, que após aplicação manual exigiu um tratamento térmico de cura (ver capítulo 3).

2.5. Decapagem Abrasiva

Os métodos de preparação de superfícies são, industrialmente, regidos pela norma EN 12944-4.

De entre os métodos por ação mecânica, destaque-se a sequência:

- limpeza manual da superfície, utilizando ferramentas manuais, como sejam escovas de arame, espátulas, lixas, martelos de picar, etc... (norma ISO 8504-3);
- limpeza mecânica, por recurso a:
 - i) ferramentas pneumáticas ou elétricas, de acordo com a norma ISO 8504-3;
 - ii) projeção de abrasivo, norma ISO 8504-2;
 - iii) jato de água (alta pressão entre 70 a 170MPa; muito alta pressão para valores superiores a 170 MPa)

A preparação de uma das superfícies das placas em aço AISI 1045 foi efetuada pela *TEandM* por recurso a decapagem com jato abrasivo (Al_2O_3).

Este processo de tratamento de superfícies consiste em submeter uma peça à projeção controlada de abrasivo metálico (granalha de aço) ou abrasivo mineral (óxido de alumínio) ou de vidro (micro esferas de vidro) em pressão direta.

Cada partícula “imprime” no material uma depressão, cujo valor de deformação plástica varia segundo a natureza do material e da energia cinética da partícula. A energia cinética da partícula depende da velocidade de impacto, do ângulo de projeção, da distância de projeção, do tamanho da granalha, da dureza da granalha e da superfície a revestir [7]. A influência destes fatores serão posteriormente desenvolvidos.

O objetivo principal da decapagem consiste em melhorar a adesão do revestimento à superfície. Assim ocorrem dois fenómenos importante neste processo. Um dos fenómenos é a criação de rugosidade na superfície, esta rugosidade melhora substancialmente a adesão do revestimento. O outro fenómeno trata-se da ativação da superfície, isto é, elimina a camada de oxidação que se cria na superfície, proporcionando assim adesão ao revestimento, devido a este fenómeno o revestimento deve ser feito logo

após a decapagem, caso contrário a superfície volta a oxidar novamente, perdendo assim o efeito da ativação.

De acordo com a norma ISO 8501-1, relativamente aos graus de oxidação de substratos de aço, estes classificam-se do grau A ao grau D, como se ilustra na Figura 2.7.





Grau A	Grau B	Grau C	Grau D
			
<p>Superfície de aço com carepa de laminação aderente íntata, com pouca ou nenhuma oxidação.</p>	<p>Superfície de aço com início de oxidação e da qual a carepa de laminação começou a desprender</p>	<p>Superfície de aço na qual a carepa da laminação já deu lugar a oxidação, podendo o restante ser removido por raspagem.</p>	<p>Superfície de aço onde toda a carepa de laminação foi eliminada e na qual se observa uma corrosão atmosférica severa e generalizada, apresentando <i>pits</i> e alvéolos</p>

Figura 2.7. Graus de oxidação de substratos de aço.

No que concerne os graus de preparação, Figura 2.8, Figura 2.9 e Figura 2.10, de substratos em aço depois de totalmente decapados de revestimentos anteriores, existem 4 grupos, a saber:

- 1) Grau de preparação Sa2, decapagem comercial (Figura 2.8), até que pelo menos 2/3 de qualquer porção de superfície total esteja livre de todo o resíduo visível. A superfície deve apresentar uma cor cinzenta.

- 2) Grau de preparação Sa2 1/2, decapagem a metal quase branco (Figura 2.9), até que o metal fique quase branco de modo a conseguir-se que pelo menos 95% de cada porção da superfície total fique livre de qualquer resíduo visível.
- 3) Grau de preparação Sa3, decapagem a metal branco (Figura 2.10), eliminando completamente ferrugem visível, calamina, revestimentos antigos. Deve apresentar uma cor metálica uniforme.
- 4) Grau de preparação Sa1, que corresponde a uma decapagem ligeira (foscagem com abrasivo), mas que na prática é pouco utilizado.

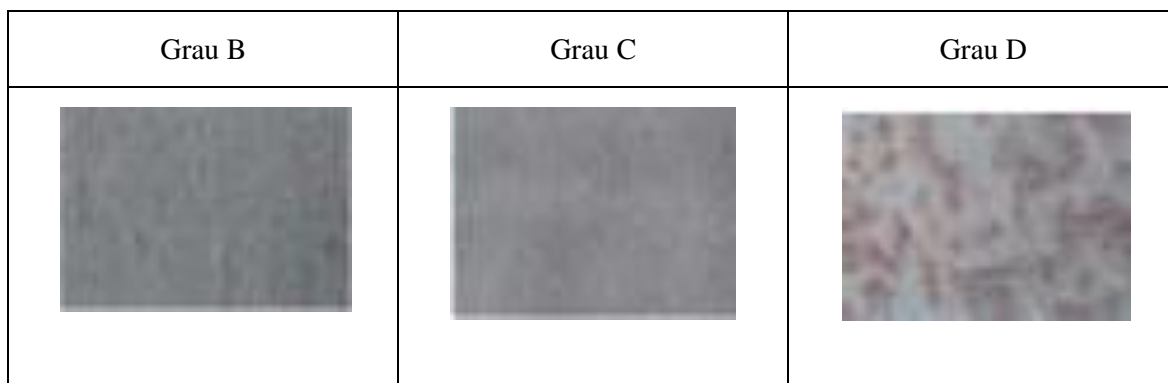


Figura 2.8. Graus de preparação de substratos de aço, Sa2.

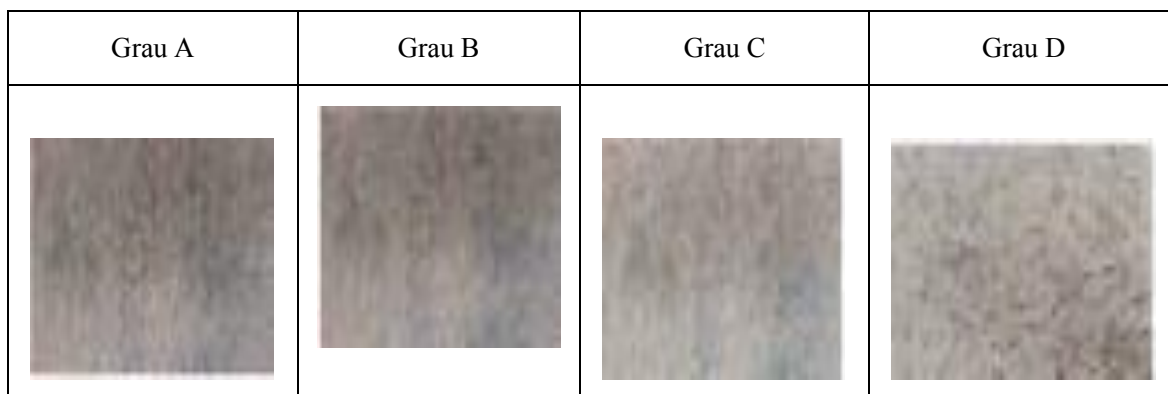


Figura 2.9. Graus de preparação de substratos de aço, Sa2 1/2.


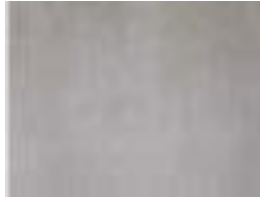


Grau A	Grau B	Grau C	Grau D
			

Figura 2.10. Graus de preparação de substratos de aço, Sa3.

As máquinas de decapagem, Figura 2.11, podem projetar o abrasivo (usualmente designado por granalha) através de ar comprimido em sistema “venturi” (pressão direta) ou através de turbina mecânica movida eletricamente.



Figura 2.11. Processo de decapagem por jato abrasivo [8].

No processo de decapagem, como já referimos anteriormente, os parâmetros que fazem variar os resultados obtidos são o tamanho da granalha, a dureza da granalha, a dureza da superfície, a velocidade de impacto dos grãos na peça, a distância de impacto e o ângulo de projeção. Visto tratar-se de um processo manual, é muito difícil precisar a distância de impacto e o ângulo de projeção. Assim, os únicos parâmetros que podem ser alterados serão o tamanho de grão do abrasivo e a velocidade de impacto, que é dada através da pressão inserida no bocal.

Quanto maior a velocidade de impacto, maior será a rugosidade na superfície. Quanto maior a distância de projeção menor será a rugosidade. Relativamente ao ângulo de incidência, se o bocal estiver perfeitamente perpendicular à superfície os “danos”

provocados na superfície serão maiores criando mais rugosidade, quanto mais inclinado o bocal estiver relativamente a superfície, a rugosidade vai ser menor.

Em relação ao tamanho das partículas, apresenta-se na Tabela 2.1 a classificação da granulometria.

Quanto maior a mesh (unidade de medida do sistema imperial) menor é o tamanho das partículas de abrasivo, sendo mesmo designados pós os materiais granulados com mesh superior a 440, Tabela 2.1. De referir que quanto maior o tamanho da partícula, maiores os “danos” provocados na superfície da placa. Quanto maior a dureza da superfície, menor será a rugosidade.

Tabela 2.1. Granulometria do abrasivo para a decapagem [9].

Granulometria	Mesh
Muito grosso	6 – 10
Grosso	12 – 24
Médio	30 – 80
Fino	90 – 180
Muito fino	220 – 320
Pós	440 – 600

2.6. Deposição de revestimento por *HVOF*

Obtida uma superfície limpa, homogênea, sem produtos de oxidação e de rugosidade conhecida, esta está apta a receber um “novo” material: o revestimento, cuja boa aderência, continuidade e homogeneidade de propriedades ditará a longevidade dessa superfície.

A *TEandM* tem a capacidade de sintetizar vários tipos de revestimentos técnicos, nomeadamente os produzidos por *HVOF*, *APS* (Atmospheric Plasma Spraying) e por *EAWS*.

Neste trabalho os revestimentos foram produzidos por *HVOF* e o material depositado foi do sistema binário WC-Co.

O *HVOF* enquadra-se no grupo das técnicas por projeção térmica, isto é, partículas finamente divididas de um material, metálico ou não, no estado fundido, são projetadas a grande velocidade por um jato de gás sobre a superfície de um substrato

convenientemente preparado, que no caso em estudo foi precedido pelo processo de decapagem abrasiva.

Para a projeção de gás de combustão a altas velocidades utiliza-se o procedimento de combustão contínua ou combustão pulsada. Para o caso do *HVOF* o processo de combustão é classificado como contínuo. Trata-se de um processo a frio, pelo que a temperatura das placas ronda os 120°C. O pó injetado axialmente é levado pelos gases produzidos pela combustão de uma mistura sob pressão O_2 / C_3H_8 . As temperaturas da chama são próximas dos 2750°C, a velocidade dos gases atinge 1200 a 2200 $m.s^{-1}$, sendo que a das partículas se situa na ordem dos 800 $m.s^{-1}$. A combustão sob pressão fornece uma chama estável mantendo o substrato aquecido.

Distorções térmicas e modificações macroestruturais intervêm em peças finas [7]. O *HVOF* exige um sistema de arrefecimento que garanta bastante eficácia. O processo encontra-se ilustrado de forma esquemática na Figura 2.12.

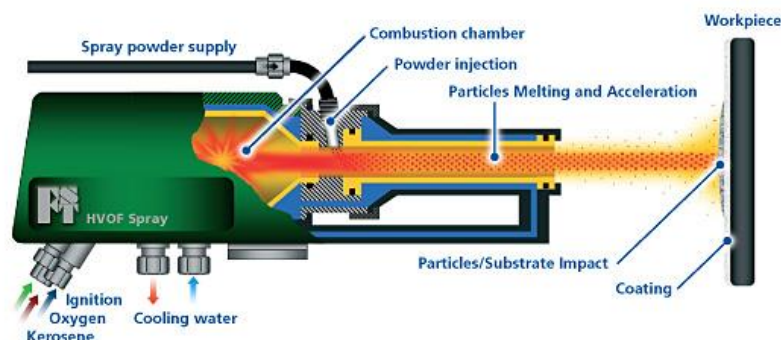


Figura 2.12. Vista em corte da pistola/tocha na deposição por *HVOF* [10].

Como se pode concluir da análise da Figura 2.12, as partículas fundidas embatem a grandes velocidades na superfície da peça a revestir, transformando-se em lamelas finas que se adaptam à geometria da superfície subjacente. As partículas/ lamelas “agregam-se” umas às outras formando uma camada estratificada após o arrefecimento. A ligação entre o revestimento e o substrato é do tipo químico [7].

É importante referir novamente que a aderência do revestimento é influenciada pela rugosidade que a superfície apresenta. A medida da aderência é definida na norma NF EN 582.

Os procedimentos de combustão a grande velocidade originam revestimentos porosos, de teor em óxidos e tensões residuais baixos, assegurando ao mesmo tempo uma melhor adesão. Este processo destina-se à execução de revestimentos anti desgaste de elevada qualidade, caracterizados por alta dureza (~ 1.200 HV), baixa porosidade (0,5 - 1%) e alto índice de adesão ao substrato (superior a 80MPa). As espessuras usualmente produzidas através desta aplicação encontram-se entre 50 a 400 μ m [11].

Os objetivos da aplicação de revestimentos duros são melhorar a resistência das superfícies, tanto ao nível do desgaste (abrasão, atrito e erosão) como também na corrosão e oxidação. As propriedades de condução térmica, elétrica ou magnética também podem ser alteradas pela presença revestimentos espessos à superfície de substratos metálicos. O aspeto estético das superfícies também pode ser melhorado, embora esta característica esteja vinculada aos denominados filmes finos decorativos.

Todas estas melhorias, devidas à presença de uma camada externa produzida por *HVOF*, tem como consequências uma maior longevidade dos componentes, redução dos tempos de paragem para manutenção, aumentado assim de uma forma geral a produtividade e a qualidade do produto final. Neste caso em particular, o revestimento tem como principal função melhorar a resistência ao desgaste.

A Figura 2.13 representa a máquina *HVOF*, sendo de destacar o robô (assinalado pela letra A) que manipula a pistola que faz aplicação do revestimento na peça.



Figura 2.13. Máquina de projeção térmica do tipo *HVOF* [12].

Neste trabalho, após a aplicação do revestimento, todas as placas seguiram para o processo de retificação, de forma a reduzir a espessura do revestimento de 0,5mm para 0,3mm.

2.7. Retificação

O processo de retificação é feito em uma máquina denominada retificadora. Trata-se de um processo abrasivo, que tem como objetivo criar um bom acabamento superficial e proporcionar exatidão nas dimensões da peça [13].

Existem dois tipos de retificadoras: a plana e a cilíndrica universal.

Na *TEandM* é utilizada uma retificadora plana.

A retificadora plana tem como função retificar superfícies planas e oblíquas. Em superfícies cilíndricas internas e externas são usadas retificadoras cilíndricas universais. A Figura 2.14 mostra uma retificadora plana típica.



Figura 2.14. Retificadora plana comercial [14].

O processo tecnológico de retificação pode ser usado duas vezes no ciclo de processamento das placas em aço AISI1045, caso se tratem de placas usadas.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem como objetivo descrever todo o procedimento experimental efetuado de forma a obter resultados para posterior análise.

As placas chegam à *TEandM* provenientes do fornecedor onde são laminadas e fresadas. O procedimento experimental associado a estas duas tecnologias não se inclui neste trabalho.

Às placas rececionadas na *TEandM* é-lhes atribuída um número de ordem (PLT). As placas ficam em espera na zona de “peças em execução” até ser possível iniciar o seu tratamento superficial.

3.1. Material

As placas em estudo são em aço ao carbono, AISI 1045, cuja composição típica está compilada na Tabela 3.1. A espessura das placas rondava os 14 mm.

Tabela 3.1. Composição química de aços AISI 1045 [15]

% pd	C	Si	Mg	P	S
Aço AISI 1045	0,37 - 0,44	0,6 (máx)	0,6 - 0,9	0,04 (máx)	0,005 (máx)

A nível de propriedades típicas, o aço AISI 1045 possui [16]:

Densidade = 7,87 g/cm³;

Condutividade térmica a 20°C = 49 Wm°K⁻¹;

Módulo de elasticidade (E), a 20°C = 200 GPa;

Coefficiente de dilatação térmica = 12,1x10⁻⁶ °C⁻¹;

Dureza = 163 HB.

3.2. Controlo Dimensional

Antes de iniciar o processamento e após cada fase são feitas medições ao nível de empeno nas placas. As medições são feitas através de um apalpa folgas e através de controlo 3D, para posteriormente serem comparados os resultados obtidos em cada tipo de medição. Inicialmente não se procedeu ao controlo 3D, mais tarde percebeu-se que seria uma solução viável.

Selecionado a ponta de medição/apalpação com diâmetro de 3mm, procedeu-se da seguinte forma:

1. Calibração da máquina de medição 3D;
2. Limpeza da superfície (é importante fazer sempre uma limpeza prévia visto que quaisquer partículas indesejadas nas superfícies podem provocar erros);
3. Colocação da peça (exige bastante precisão para não ocorrerem erros a nível do posicionamento da ponta de medição);
4. Elaboração do programa (fornecer as coordenadas de medição);
5. Medição (após a elaboração do programa, a ponta de medição vai atuar fazendo as medições);
6. Recolha de dados.

Uma máquina muito semelhante à usada na *TEandM* está representada na Figura

3.1.



Figura 3.1. Máquina de Controlo Dimensional 3D [17].

Para se obter o valor do empeno da superfície através da medição 3D, foram medidos 9 pontos em posições estratégicas da placa. A diferença entre os pontos que

apresentam valor máximo e o valor mínimo será o empeno presente na superfície. Mostra-se através da Figura 3.2 um exemplo da colocação dos pontos.

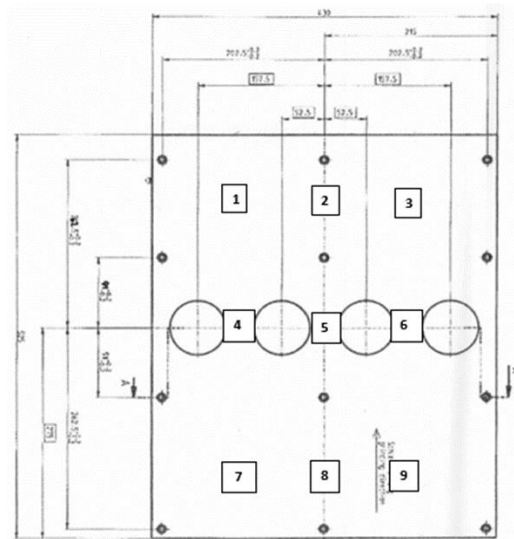


Figura 3.2. Localização dos pontos na superfície.

Para o caso da medição manual, os instrumentos de medição utilizados foram o apalpa folgas e uma régua biselada, tal como se mostra na Figura 3.3. Este método consiste em fazer passar as laminas do apalpa folgas entre a superfície da placa e a face arredondada da régua de aço biselada. Desta forma, obtém-se o valor da espessura da lâmina que permite a passagem entre a superfície e a face da régua.



Figura 3.3. Instrumentos utilizados na medição manual

Para fixar a régua sempre na mesma posição, em cada um dos estágios do ciclo de produção das placas e simultaneamente minorar o erro de medição, fez-se uma “malha” do tipo X-Y na superfície da placa, tal como se ilustra na Figura 3.4.

As coordenadas utilizadas nas medições serão apresentadas no capítulo 4. De referir que cada placa teve a sua própria malha, função da geometria.

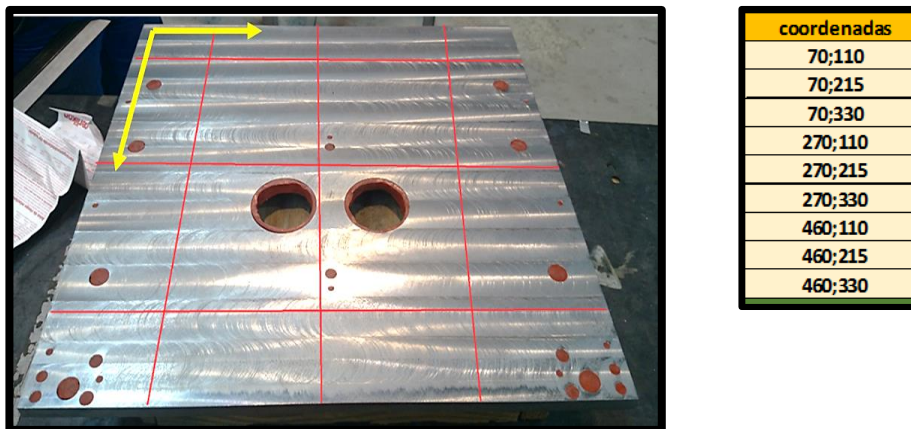


Figura 3.4. Exemplo da malha e respetivas coordenadas X-Y utilizadas no ciclo de produção das placas.

Quando a régua de aço biselada é colocada sobre as linhas horizontais é denominada folga horizontal, caso a régua seja colocada sobre as linhas verticais é denominada folga vertical.

3.3. Proteção de Furos

O primeiro passo do ciclo de produção de placas em aço AISI 1045, pela *TEandM*, é a proteção de todos os furos. O objetivo final é evitar danos, durante o processo de decapagem abrasiva, que iriam exigir uma posterior retificação e consequentemente o aumento do tempo de preparação e custo final das placas.

Os vários estágios utilizados neste processo foram os seguintes:

1. Retirar as rebarbas provenientes do processo de furação (ter em atenção as especificações da peça “Sharp edge”, neste caso as arestas tem que ser vivas);
2. Limpar os furos com um líquido desengordurante (acetona);
3. Aplicar uma massa polimérica, tal como se ilustra na Figura 3.5 a);
4. Retirar o excedente de material evitando que fique na superfície da placa;
5. Efetuar o tratamento térmico de cura.

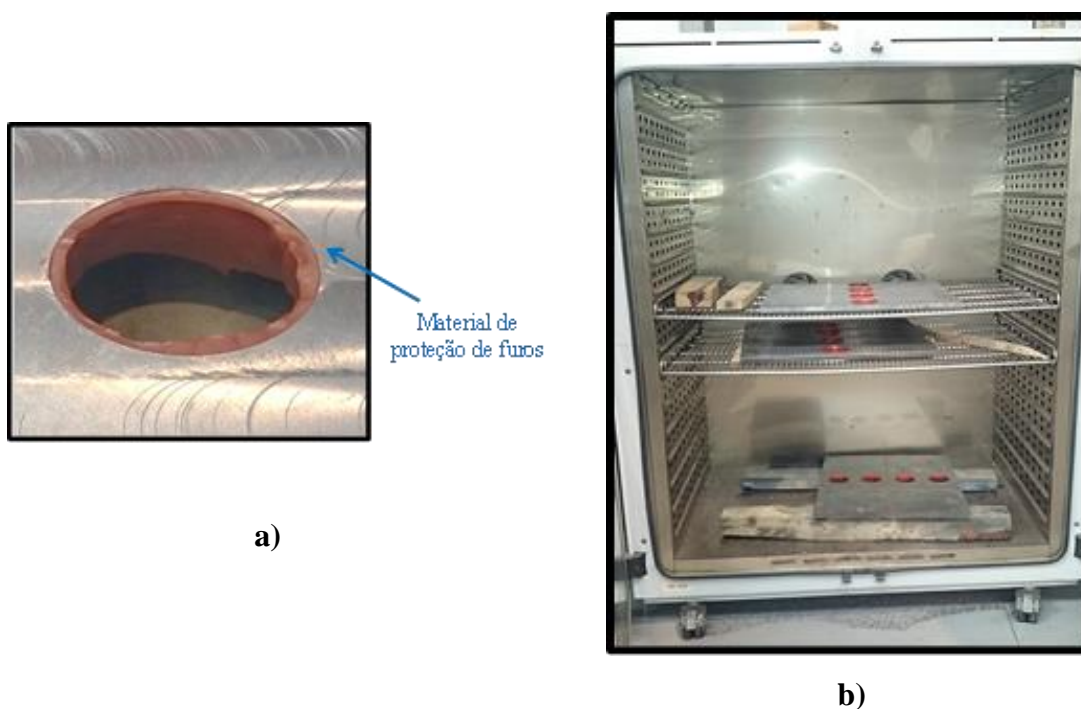


Figura 3.5. a) Exemplo ilustrativo da proteção de furos nas placas; b) Forno de tratamento

A reação de polimerização do material polimérico foi efetuada isotermicamente a 120°C durante 2 horas em forma da *TEandM*, colocando as placas sobre suportes em madeiras e sempre com a superfície a revestir para cima (Figura 3.5 b).

As variáveis passíveis de serem alteradas nesta etapa, do ciclo de produção de placas, limitam-se apenas a uma: a velocidade de arrefecimento desde a temperatura de cura até à temperatura ambiente.

Neste trabalho, foram selecionadas 2 condições que serão denominadas de arrefecimento lento e rápido. Após 2 horas de tratamento se a porta do forno for imediatamente aberta, conclui-se que o seu arrefecimento é rápido comparativamente aquele que se obtém deixando as placas arrefecerem no interior do forno fechado.

3.4. Processo de Decapagem

No processo de decapagem, a *TEandM* utiliza uma máquina por sistema “venturi”, de pressão direta e de utilização manual.

O abrasivo usado foi o corindo comercial de 24 mesh (abrasivo do tipo natural, Al_2O_3).

A

Figura 3.6 mostra a máquina que foi utilizada neste trabalho, onde A representa o regulador de pressão, que pode chegar aos 8bar no máximo; B assinala o ponto onde o operador faz o manuseamento da operação e C representa o pedal de acionamento da operação. Na parte lateral, esta máquina apresenta uma porta de acesso a cabine, onde se insere a peça para ser manuseada em B.

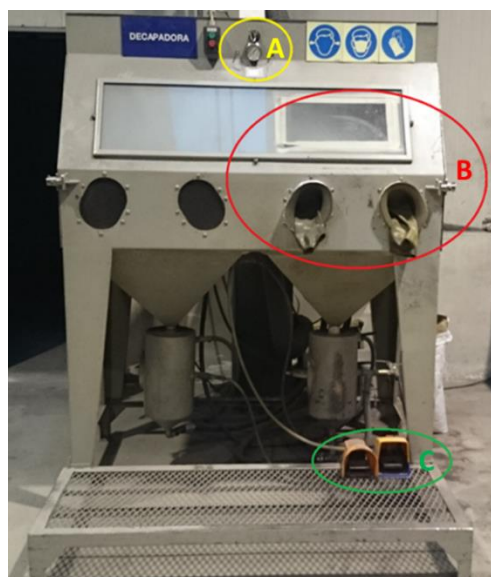


Figura 3.6. Máquina de decapagem manual disponível na *TEandM*.

O interior da cabine utilizada neste estudo pode ser visualizado na

Figura 3.7. A alimentação de material abrasivo é feita na cabine, cria-se um sistema de recirculação do corindo, de forma ao seu aproveitamento ser máximo e não haver desperdícios.

O processo de decapagem das placas foi efetuado da seguinte forma:

1. Colocar uma fita isolante (fibra de Al) à volta da placa, para servir de isolante;
2. Alimenta-se com corindo (24 mesh);
3. Iniciar a decapagem da placa;
4. Após a decapagem, faz-se uma inspeção da peça para verificar a existência de zonas com mais brilho. Pode repetir-se a operação até que não se observem zonas com brilho.



Figura 3.7. Interior da cabine da máquina de decapagem por jato abrasivo

Como já referimos anteriormente, nesta fase, os parâmetros que fazem variar os resultados obtidos são o tamanho da gralha, dureza da gralha, dureza da superfície, a velocidade de impacto dos grãos na peça, a distância de impacto e o ângulo de projeção.

Visto se tratar de um processo manual, é muito difícil precisar o a distância de impacto e o ângulo de projeção. Sendo assim os únicos parâmetros que podem ser alterados serão o tamanho de grão, a velocidade de impacto que é dada através da pressão inserida no bocal e a superfície de apoio das placas durante o processo. Normalmente são utilizados pressões de 5bar ou de 8bar neste processo.

O que se pretende nesta etapa é variar os parâmetros referidos e verificar as alterações no empenamento com estas variações, fazendo uma posterior análise dos resultados obtidos, tentando encontrar um padrão de comportamento das placas.

3.5. Processo por HVOF

Para iniciar a aplicação do revestimento é necessário fixar a placa numa estrutura metálica dentro da cabine. Após a fixação procede-se à programação do robot para a peça pretendida, existe uma interface que o operador manipula para este fim.

Concluído o programa, dá-se início ao processo. A Figura 3.8, relativa ao painel de controlo do equipamento *HVOF*, mostra um quadro inferior (designado pela letra B) adstrito ao acionamento da máquina e à paragem de emergência. O quadro superior, designado por A, permite o controlo dos níveis dos gases usados na deposição: oxigénio, combustível e ar da chama. Neste trabalho, os níveis utilizados foram os indicados pela *Sulzer Metco*.



Figura 3.8. Painéis de acionamento (B) e controlo de fluxos gasosos (A) do equipamento de *HVOF*.

A **Figura 3.9** ilustra o alimentador do equipamento *HVOF* no que concerne o material a depositar. O cilindro vertical, designado pela letra A, contendo o material sob a forma de pó (WC-Co) está acoplado a um regulador de pressão, de modo a regular da quantidade de material a depositar na placa (designada pela letra B).

A máquina contém ainda dois cronómetros que contabilizam, respetivamente, o tempo total de funcionamento da máquina e o tempo de cada processo.



Figura 3.9. Alimentador e regulador de pressão da máquina de *HVOF*.

Como já foi referido anteriormente, os parâmetros de deposição, i) composição da chama e a sua ii) velocidade, são estipulados pela *Sulzer Metco*. Assim as alterações dos parâmetros de deposição ficam restritas apenas ao tempo de formação do filme.

As várias etapas utilizadas neste trabalho na deposição de revestimentos WC-Co, foram as seguintes:

1. Fixação da placa (a placa é fixada em dois apoios na zona central);
2. Programação do robô;
3. Iniciação da síntese do revestimento;
4. Paragens para medição de espessura do revestimento (com auxílio de um paquímetro).

A deposição da camada de revestimento poderia ser efetuada em dois modos distintos, designados neste trabalho por:

- 1) Modo contínuo (1 fase): deposição da camada de 0,5mm de revestimento de num só processo.
- 2) Modo intermitente (2 fases): deposição de 0,25mm de revestimento, paragem do processo e retorno do processo quando a placa se encontrar à temperatura ambiente.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Como foi anteriormente mencionado as placas em aço AISI 1045 são sujeitas a um pré-processamento pelo fornecedor (laminagem e fresagem) e só posteriormente são enviadas à *TEandM* para tratamento de superfície.

A metodologia adotada neste estudo encontra-se representada no fluxograma da **Figura 4.1**, ou seja, fez-se o controlo dimensional das placas em cada fase do seu ciclo de processamento.

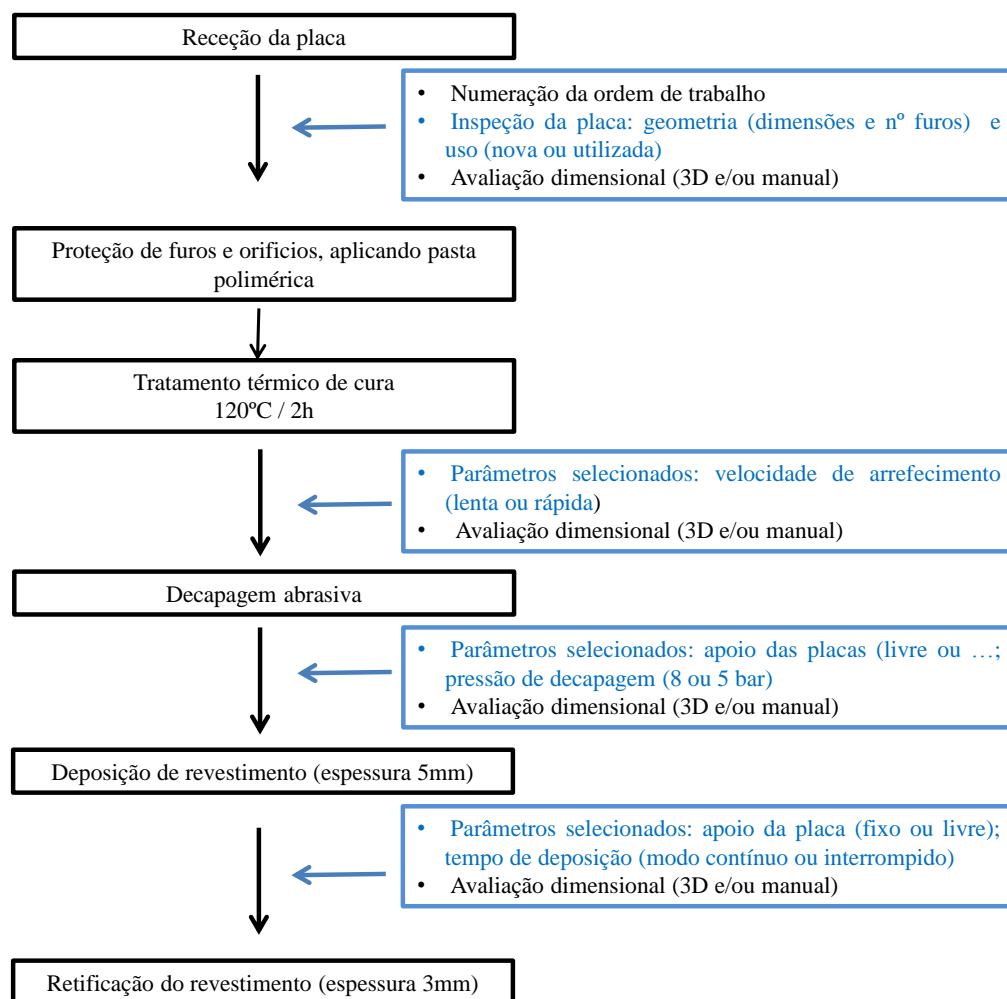


Figura 4.1.– Metodologia adotada na abordagem dos casos em estudo

É importante referir que as placas estudadas foram rececionadas em dois estados físicos distintos: “novas” e “usadas”.

As placas apresentavam geometrias diferentes, pelo que os resultados obtidos foram, também, diferentes, embora em algumas situações os parâmetros usados no ciclo de produção tivessem sido os mesmos. A geometria é um fator importante no empeno, nomeadamente, a espessura e o número e distribuição de furos nas placas. Todas as geometrias são exibidas de forma completa no Anexo A.

Apresentam-se na **Tabela 4.1** os valores de empenamento obtidos nas 11 placas estudadas, associados às diferentes etapas de processamento conforme mostrado no fluxograma da **Figura 4.1**

Tabela 4.1. Resumo dos resultados obtidos para as 11 placas estudadas

Amostra	PLT	Empenamento [mm]	Isolamento	Empenamento [mm]	Decapagem	Empenamento [mm]	HVOF	Empenamento [mm]
1	18_889	-	Arref. Rápido	0	8bar	0,12↑	2 fases	0,07↓
2	18_672	-	Arref. Rápido	0,07↓	8bar	0,07↑	2 fases	0,08↓
3	18_883	0,1↓	Arref. Rápido	0,12↓	8bar/espuma	0,07↑	1 fase	0,14↓
4	19_132 (1)	0,124↓	Arref. Rápido	0,08↓	8 bar	0,041↑	2 fases/apoio livre	0,231↓
5	19_132 (2)	0,05↓	Arref. Rápido	0,052↓	8bar/espuma	0,051↑	2 fases/apoio livre	0,25↓
6	19_132 (3)	0,047↓	Arref. Rápido	0,037↓	5bar/espuma	0,07↑	2 fases/apoio livre	0,27↓
7	19_218 (1)	0,04↓	Arref. Lento	0,04↓	8 bar/chapa	0,09↑	1 fase	0,05↓
8	19_218 (2)	0	Arref. Lento	0,09↓	8 bar/chapa	0,08↑	1 fase	0,09↓
9	19_330	0	-	0	8 bar/chapa	0,08↑	1 fase	0
10	19_484(1)	0	-	0	8bar/chapa	0,08↑	2 fases	0,14↓
11	19_484(2)	0	-	0	8bar/chapa	0,08↑	2 fases	0,17↓

As setas junto aos valores do empenamento indicam o sentido do empeno, visto que apresenta-se sempre de uma forma regular (no mesmo sentido), e não de uma forma irregular (em sentido variados), ou seja, formando uma ondulação. As setas representadas para cima “↑” significam que a placa se encontra convexa, no caso contrário quando as setas estão representadas para baixo “↓” a placa encontra-se côncava, esta análise é sempre feita na superfície da placa a revestir, visto ser esta a face em estudo e de maior interesse. A **Figura 4.2** mostra de forma esquemática os sentidos de empenamento das placas de aço AISI 1045.

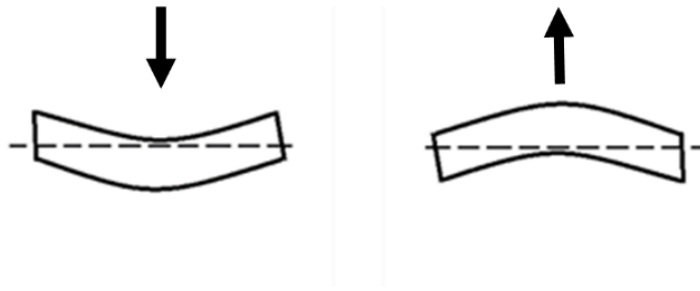


Figura 4.2. Representação esquemática do sentido do empenamento

No final do processo os valores a verde representam as placas com um empenamento aceitável (inferior aos 0,15mm pretendidos pela *TEandM*). Os valores a vermelho indicam as placas com um empenamento superior a 0,15mm, não aceitável para o objetivo proposto.

Os valores das amostras 1 e 2, correspondendo às PLT 18.889 e PLT 18.672 respetivamente, encontram-se a cinzento porque se tratam de placas onde não foi feita qualquer interferência, simplesmente se fez um acompanhamento destas de modo a conhecer e familiarizar o processo. Por essa razão não foram retirados os valores do controlo dimensional do empenamento na fase inicial do ciclo de produção, isto é, à chegada da placa à *TEandM*.

4.1. Estudo preliminar

O controlo dimensional de placas em aço AISI1045 no seu ciclo de produção iniciou-se pelo acompanhamento das placas 1 e 2, relativas às PLT 18.889 e PLT 18.672, respetivamente.

A inspeção visual mostrou que as placas eram novas, ou seja, iriam ser submetidas pela primeira vez a tratamento de uma das superfícies pela *TEandM*, S.A..

A geometria das duas placas era diferente (anexo A). Destaque-se, por exemplo, a perfuração circular, tal como se mostra nas imagens da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** Enquanto a placa 1 possuía 4 furos de diâmetro 70mm e 12 furos roscados, a placa 2 apresentava apenas 2 furos, $\phi = 70\text{mm}$, e 20 furos roscados.



a)

b)

Figura 4.3. Imagem da placa 1 (a) e da placa 2 (b)

Os resultados obtidos durante o ciclo de produção destas placas, recorrendo a medições por apalpa folgas e régua (ver Capítulo 3), estão compilados nas **Tabela 4.2** e **Tabela 4.3** referentes à PLT 18.889 e à PLT 18.672, respetivamente.

Os parâmetros usados no ciclo de produção das placas 1 e 2 foram os mesmos, ou seja, foi imposta uma velocidade rápida de arrefecimento após tratamento térmico de cura, seguido de decapagem abrasiva à pressão de 8 bar e a deposição do revestimento WC-Co, com espessura final 5mm, foi efetuada em 2 fases.

Tabela 4.2. Valores do empeno obtidos na placa 1 referente à PLT 18.889.

PLT 18:889	ISOLAMENTO		DECAPAGEM		HVOF	
	Arrefecimento Rápido		8 Bar		2 Fases	
coordenadas	vertical	horizontal	vertical	horizontal	vertical	horizontal
70;110	0	0	-0,1	-0,04	0	0
70;215	0	0	-0,12	-0,04	0	0
70;330	0	0	-0,08	-0,07	0	0
270;110	0	0	0	0	0	-0,07
270;215	0	0	0	0	0	-0,05
270;330	0	0	0	0	0	-0,06
460;110	0	0	0	-0,07	0	0
460;215	0	0	-0,06	0	0	0
460;330	0	0	-0,09	-0,09	0	0
empenamento	0		0,12		0,07	

Tabela 4.3. Valores do empeno obtidos na placa 2, PLT 18.672.

PLT 18:672	ISOLAMENTO		DECAPAGEM		HVOF	
	Arrefecimento Rápido		8 Bar		2 Fases	
coordenadas	vertical	horizontal	vertical	horizontal	vertical	horizontal
100;70	0	0	0	-0,07	0	0
100;250	0	-0,05	0	0	-0,07	0
100;400	0	0	0	0	0	0
245;70	0	0	0	0	0	-0,04
245;250	0	-0,07	0	0	-0,07	-0,05
245;400	0	0	0	0	0	-0,05
430;70	0	0	0	-0,07	0	0
430;250	0	-0,07	-0,06	0	-0,08	0
430;400	0	0	-0,06	0	0	0
empenamento	0,07		0,07		0,08	

É importante referir que a produção de revestimento em modo não contínuo (denominado neste trabalho por 2 fases), em oposição ao habitualmente adotado pela *TEandM*, resultou de um contratempo inesperado. A falta de gás combustível (O_2) durante a deposição por *HVOF*, quando a espessura do filme era de ~ 3 mm, obrigou à paragem do processo. O posterior recomeço, para se obter a espessura final de 5 mm, só ocorreu após várias horas de paragem (~ 12 horas).

A análise das **Tabela 4.2** e **Tabela 4.3** permite concluir que a passagem entre o processo térmico de cura e o de decapagem originou um empenamento das placas 1 e 2 de 0,19 e 0,14 mm, respetivamente.

Como mostra na **Tabela 4.3**, a placa 2 apresenta uma variação dimensional de 0,07mm logo após a aplicação do isolamento originando um empeno, de forma côncava. Após a decapagem com Al_2O_3 usando uma pressão de 8 bar, o desvio passa para 0,07mm mas em sentido contrario, ou seja, assume uma forma convexa. Conclui-se assim, que a variação dimensional associada a estes dois procedimentos foi de 0,14mm. A avaliação das dimensões desta placa depois da aplicação do revestimento, volta a tomar a forma côncava, similar à obtida após aplicação do isolamento, mas com um empeno de 0,08mm. Assim a variação dimensional associada a passagem da decapagem e HVOF assume o valor de 0,15mm.

Neste primeiro estudo, verificou-se que as placas 1 e 2 cumpriam o requisito de um empeno inferior a 0,15mm. Como se tratou do primeiro estudo pensou-se que os bons resultados estariam associados aos parâmetros utilizados, isto é, produção do filme em duas fases com o consequente alívio de tensões, ou o uso de uma pressão elevada de decapagem (8bar) em oposição ao que normalmente utilizado pela na *TEandM*, (5bar)

Este estudo prévio mostrou que os parâmetros usados no tratamento de superfície influenciam as variações dimensionais finais das placas. Assim para atingir os objetivos finais a que nos propusemos foram usados diferentes parâmetros nos vários passos do ciclo de produção.

4.2. Ciclo de processamento: alteração de parâmetros

A primeira medida que foi tomada no ciclo de produção de placas em aço AISI1045 foi a substituição do tipo de apoio das placas durante o processo de decapagem. Tal como é ilustrado nas imagens da **Figura 4.6**, os apoios rígidos de madeira habitualmente utilizados pelos técnicos da *TEandM* (Figura 4.4 a)) foram substituídos por bases flexíveis (**Figura 4.7 b**)) de material polimérico (“esferovite”). O objetivo desta alteração foi tornar o processo de decapagem minimizar as tensões exercidas na placa de modo a evitar um empenamento tão elevado. Num primeira fase pretendia-se diminuir o empenamento em cada processo.

O controlo dimensional incidiu a sobre a placa 3, PLT 18.883, cujos resultados obtidos estão compilados na **Tabela 4.4**. Importa referir que se tratava de uma placa usada e a produção do revestimento WC-Co foi efetuada em modo contínuo até ao valor final de espessura de 5 mm.

Tabela 4.4. Valores do empeno obtidos na placa 3, PLT 18.883.

PLT 18:883	INICIAL		ISOLAMENTO		DECAPAGEM		HVOF	
	vertical	horizontal	vertical	horizontal	vertical	horizontal	vertical	horizontal
coordenadas								
70;110	0	0	0	0	-0,07	0	-0,07	0
70;215	-0,1	0	-0,12	0	0	0	-0,14	0
70;330	0	0	0	0	0	0	0	0
270;110	0	-0,08	0	0	0	0	-0,05	-0,1
270;215	-0,1	-0,08	-0,12	-0,05	-0,04	0	-0,12	-0,1
270;330	0	-0,08	0	0	0	0	-0,07	0
460;110	0	0	0	0	0	0	-0,06	0
460;215	-0,1	0	-0,12	0	-0,05	0	-0,06	0
460;330	0	0	0	0	0	-0,04	-0,14	-0,1
empenamento	0,1		0,12		0,07		0,14	

A geometria da placa 3, PLT 18.883, era similar à da placa 1 previamente estudada (tabela 4.1), isto é, placa tinha uma espessura de 14mm e possuía 4 furos de diâmetro 70 mm.

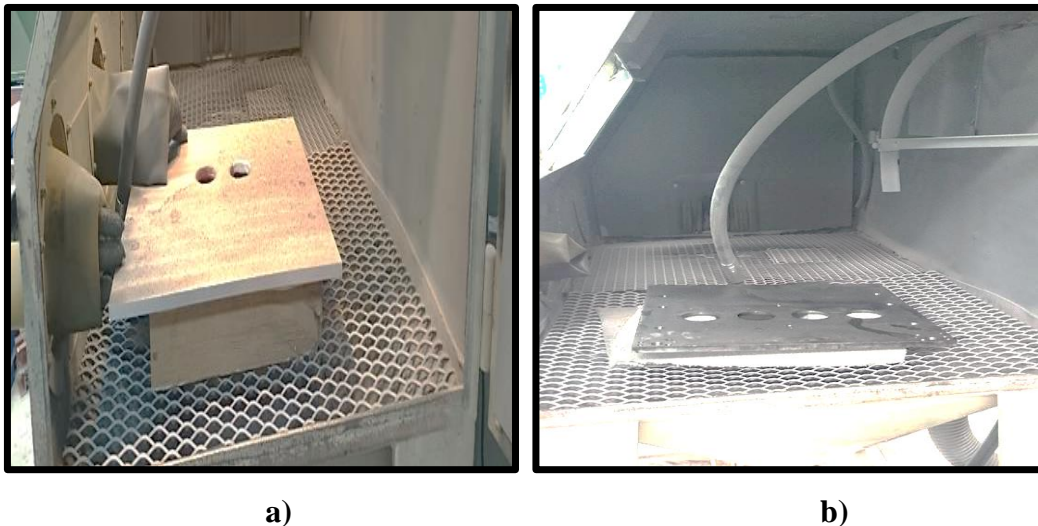


Figura 4.4. Colocação das placas no processo de decapagem;
a) apoio fixo e b) apoio flexível

A análise da **Tabela 4.4** permite concluir que a placa 3 exibiu um empeno inicial de 0,1mm (em forma côncava). Este comportamento contrasta com o da placa 1, em que o não se registou nenhum empeno. Tal poderá ser atribuído ao tempo de vida das placas; enquanto a placa 1 era uma placa nova, a nº 3 tratou-se de uma placa já utilizada. Analisando as variações nas diferentes coordenadas após a aplicação e tratamento a 120°C de material isolante de furos, verifica-se que existe uma pequena alteração de 0,02mm, passando a um empeno de 0,12mm. O passo seguinte, decapagem, foi realizado a pressões elevadas de 8 bar com apoio flexível. A variação medida foi agora de 0,19mm. A placa 3 adquiriu a forma convexa associada a um empenamento de 0,07mm. O revestimento WC-Co com espessura de 0,5mm, produzido sem interrupção, provocou uma variação de 0,21mm. Assim, o valor de empeno associado à placa 3, 0,14mm (ver Tabela 4.1) satisfaz o limite imposto (< 0,15 mm).

Na ordem de trabalho PLT 19.132 estão incluídas três placas iguais, designadas 4, 5 e 6. A geometria destas placas era similar à anteriormente apresentada pela PLT 18.883 (placa 3) da **Figura 4.3 a)**.

O processamento final do revestimento WC-Co foi o mesmo para as três placas e consistiu em interrupção a meio da produção e alteração do modo de apoio das placas durante a formação do revestimento, tal como se pode observar na imagem da **Figura 4.5**.



Figura 4.5. Apoio das placas para deposição de WC-Co por HVOF.

Os parâmetros usados na proteção dos furos também se mantiveram nas três placas, ou seja, aquecimento isotérmico em estufa a 120°C/2h seguido de arrefecimento rápido (abertura da porta do forno após termino do ciclo térmico, ver capítulo 3).

A diferença entre as três placas recai nos parâmetros do processo de decapagem. Na placa 4 a decapagem foi realizada à pressão de 8 bar sem apoio; a placa 5 foi decapada à mesma pressão mas usando apoio foi em espuma; enquanto na última placa, PLT 19.132 (3) utilizou-se um valor de pressão de decapagem menor, 5bar e manteve-se o seu apoio em estrutura flexível. Para esta última placa, placa 6, a variação dimensional foi obtida por recurso à máquina de medição 3D, assim como ao método manual (ver capítulo 3).

Apresentam-se nas **Tabela 4.5** a **Tabela 4.7** os resultados obtidos no ciclo de produção destas três placas.

A placa 4 apresentou um empeno inicial de 0,124mm. Este valor é reduzido para 0,08mm após o tratamento térmico de cura, ambos com forma côncava, **Tabela 4.5**. Valores do empeno obtidos na placa 4, PLT 19.132 (1), Depois de realizada a decapagem a 8 bar, a variação foi de 0,12mm, passando assim a um valor de 0,041mm com forma convexa. A

aplicação do revestimento com espessura 0,5mm promoveu um empenamento de 0,231mm em forma côncava, com uma variação de 0,271mm em relação à decapagem.

Tabela 4.5. Valores do empeno obtidos na placa 4, PLT 19.132 (1)

PLT 19:132 (1)	INICIAL	ISOLAMENTO	DECAPAGEM	HVOF
		arrefecimento rápido	8 bar	2 fases/ apoio livre
1	13,919	13,892	13,844	14,538
2	13,899	13,871	13,855	14,505
3	13,902	13,879	13,843	14,514
4	13,814	13,824	13,859	14,397
5	13,804	13,812	13,854	14,346
6	13,826	13,835	13,852	14,429
7	13,829	13,867	13,829	14,362
8	13,795	13,833	13,823	14,307
9	13,803	13,839	13,818	14,313
empenamento	0,124	0,08	0,041	0,231

Tabela 4.6. Valores do empeno obtidos na placa 5, PLT 19.132 (2)

PLT 19:132 (2)	Inicial	Isolamento	Decapagem	HVOF
		arrefecimento rápido	8 bar/ espuma	2fases/ apoio livre
1	13,573	13,576	13,57	14,232
2	13,576	13,584	13,595	14,28
3	13,569	13,583	13,568	14,33
4	13,551	13,558	13,605	14,176
5	13,54	13,545	13,619	14,122
6	13,537	13,532	13,6	14,08
7	13,551	13,545	13,587	14,111
8	13,539	13,537	13,592	14,098
9	13,532	13,536	13,574	14,165
empenamento	0,044	0,052	0,051	0,25

Tabela 4.7. Valores do empeno obtidos na placa 6, PLT 19.132 (3)

PLT 19:132 (3)	INICIAL	ISOLAMENTO	DECAPAGEM	HVOF
		Arref. Rápido	5 bar / espuma	2 fases / apoio livre
1	13,78	13,764	13,806	14,46
2	13,754	13,749	13,778	14,333
3	13,771	13,778	13,79	14,374
4	13,768	13,776	13,817	14,286
5	13,748	13,758	13,817	14,274
6	13,78	13,78	13,834	14,408
7	13,773	13,784	13,787	14,33
8	13,733	13,747	13,765	14,221
9	13,743	13,766	13,764	14,231
empenamento	0,047	0,037	0,07	0,239

Em relação à placa 5, PLT 19.132 (2), pode observar-se que, à semelhança da placa 4, a variação dimensional antes e após a colocação tratamento de cura não é

significativa. Este comportamento das placas de aço AISI 1045 foi registado em todos os estudos e estava associado sempre a deformações em forma côncava.

Após a realização da decapagem a 8 bar com apoio em espuma, verificou-se que a placa sofreu um empeno de 0,051 (convexa), obtendo-se assim uma variação de 0,1mm. Esta variação foi inferior ao registado na placa 1, sem apoio em espuma (ver Tabela 4.1). A aplicação de revestimento na superfície previamente decapada induziu um empeno de 0,25mm, com uma variação de 0,03 em relação ao passo antecedente de decapagem.

A análise dos resultados compilados na **Tabela 4.7** relativa à placa 6 confirma o que havia sido obtidos nas placas anteriormente estudadas, ou seja, o tratamento térmico a 120°C durante 2h para cura do material de proteção dos não induz empenos significativos nas placas, independentemente do tipo de geometria.

O valor de empeno na placa 6 após aplicação do revestimento foi de 0,07 com forma convexa. Para este caso os valores medidos pelos métodos manual e pela máquina de controlo 3D foram distintos. Sendo que, pela medição manual os valores foram de 0,08mm (côncavo) após aplicação do isolamento e 0,03mm (convexo) após a decapagem.

Na PLT 19:132 os resultados obtidos ficaram aquém das expectativas, independentemente dos valores de pressão usados na decapagem. Este facto pode ser atribuído à má opção de retirar o apoio durante o processo de aplicação do revestimento.

Face a estes resultados, o procedimento seguinte consistiu em decapagem abrasiva alta pressão, 8bar, com apoio rígido seguido de deposição de revestimento de uma forma continua e retomando os apoios inicialmente usados na *TEandM*. A **Figura 4.6** mostra a placa apoiada numa base rígida durante o processo de decapagem abrasiva.



Figura 4.6. Apoio rígido das placas durante o processo de decapagem.

Para a PLT 19:132 (placa 7) decidiu-se alterar completamente o processo de decapagem. O objetivo era o de provocar o máximo de empenamento no sentido convexo de modo a tentar compensar este empenamento na aplicação de revestimento. Sendo que, com um apoio de espuma o processo criou menos tensões na placa, ao usar um apoio rígido (neste caso foi usado uma simples chapa de metal disponível na fábrica) criaria mais tensões e conseqüentemente maior empenamento. Os resultados obtidos na placa 7, PLT 19:218, encontram-se compilados na **Tabela 4.8**. A geometria desta placa era similar à da PLT 19.132. De referir que neste caso as medições de empeno foram efetuadas quer por controlo 3D quer por apalpa folgas. Todavia os resultados obtidos foram bastante semelhantes em ambos os procedimentos, optando-se por colocar na **Tabela 4.8** as medições obtidas por 3D.

Tabela 4.8. Valores do empeno obtidos na placa 7, PLT 19:128

PLT 19:218	INICIAL	ISOLAMENTO	DECAPAGEM	HVOF
		Arrefecimento Lento	8 bar /apoio rígido	1 fase
1	13,373	13,37	13,42	13,882
2	13,388	13,376	13,434	13,903
3	13,421	13,414	13,446	13,912
4	13,401	13,406	13,484	13,932
5	13,392	13,402	13,494	13,937
6	13,404	13,413	13,496	13,903
7	13,397	13,422	13,421	13,896
8	13,379	13,394	13,42	13,897
9	13,376	13,396	13,408	13,883
empenamento	0,048	0,052	0,088	0,055

Embora na placa 7 o arrefecimento após a aplicação do isolamento nos furos tenha sido do tipo lento (as portas da estufa só foram abertas quando a temperatura próxima da ambiente, ver Cap. 3) confirma-se uma vez mais que as alterações dimensionais nesta etapa são irrelevantes. Tal como seria de esperar houve uma variação dimensional elevada associada ao processo de decapagem de 0,14mm. A placa 7 passou de um empeno de 0,052mm (côncava) para 0,088mm com forma convexa. A variação dimensional obtida após aplicação do filme de WC-Co veio confirmar a hipótese anteriormente formulada, isto é a deposição do revestimento com 0,5mm em modo contínuo anulou o empeno obtido na decapagem a altas pressões com apoio rígido. O empenamento final da placa 7 de 0,055mm é inferior ao limite pré estabelecido de 0,15mm (ver tabela 4.1)

Face a este resultado tão favorável, o passo seguinte foi tentar replicar as mesmas condições de processamento em placas posteriormente rececionadas pela *TEandM*, placas 8 a 11.

A placa 8, PLT 19.218 (II), apresentava uma geometria diferente das anteriormente estudadas, tal como se pode observar na

Figura 4.7. Esta placa tinha a particularidade de apresentar uma espessura mais fina na zona dos furos, sendo a espessura na zona dos furos de 7mm. Os valores de empenamento obtidos por recurso a apalpa folgas e régua, estão compilados na **Tabela 4.9.**

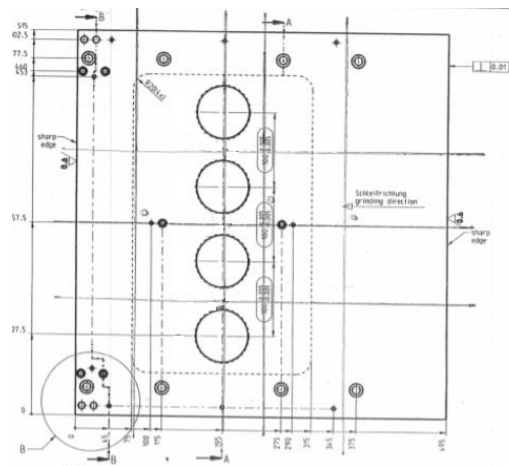


Figura 4.7. Geometria da placa 8, PLT 19:218 (II).

Tabela 4.9. Valores do empeno obtidos na placa 8, PLT 19:128 (II)

PLT 19:218 (II)	INICIAL		DECAPAGEM		HVOF	
			8bar/apoio rígido		1 fase	
coordenadas	vertical	horizontal	vertical	horizontal	vertical	horizontal
10;16	0	0	0	0,08	0	0
10;26	0	0	0	0	0	0
10;36	0	0	0	0,07	0	0
30;16	0,03	0,09	0	0	0	0,08
30;26	0,04	0,09	0	0	0	0,08
30;36	0,03	0,08	0	0	0	0,04
42;16	0	0	0	0	0	0
42;26	0	0	0	0	0	0
42;36	0	0	0	0,07	0	0
empenamento	0,09		0,08		0,08	

Nesta placa 8 devido ao pouco tempo para cumprir o prazo de entrega apenas se colocou o silicone nos orifícios a proteger da placa sem posterior tratamento térmico em forno a 120°C. Como as variações dimensionais foram irrelevantes em todas as placas anteriormente estudadas e apresentadas consideram-se que a reação de cura a 120°C não induz alterações significativas nas dimensões desta placa. Como se pode observar na **Tabela 4.9**, esta placa possuía um empeno inicial de 0,09mm (côncavo). A decapagem posterior a 8 bar com um apoio rígido originou um empeno de 0,08mm (convexo) associado a uma variação dimensional de 0,17mm. Este resultado é ligeiramente diferente do obtido na PLT 19.218, tal pode ser atribuída à diferença de espessura da zona dos furos, sendo menor nesta placa. Todavia a variação dimensional enquadra-se dentro dos limites pré-estabelecidos.

A ordem de trabalho PLT 19.330 referente à placa 9, foi realizada ao mesmo tempo e nas mesmas condições que a ordem PLT 19.218 (II) da placa 8. Todavia, importante salientar que a geometria destas duas placas, 8 e 9, era diferente. A geometria da placa 9 encontra-se na **Figura 4.8** e como se pode concluir esta possui apresenta 4 furos de diâmetro 70mm.

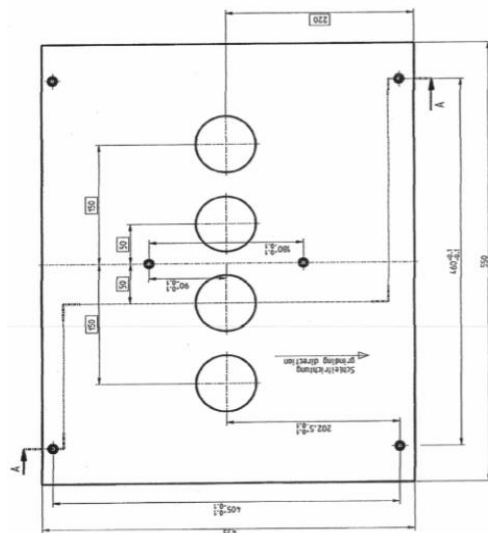


Figura 4.8. Geometria da placa 9, PLT 19:330.

Os resultados obtidos por medição através de apalpa folgas e régua, estão sumariados na **Tabela 4.10**.

Em oposição à placa 8, a placa 9 foi rececionada sem qualquer empeno, como se pode concluir da análise da **Tabela 4.10**. A decapagem promoveu um empenamento de 0,08mm em forma convexa e o posterior tratamento de superfície por deposição de revestimento anulou o empeno. Este foi, sem dúvida, o melhor resultado obtido neste estudo.

Tabela 4.10. Valores do empeno obtidos na placa 9, PLT 19.330

PLT 19:330	INICIAL		DECAPAGEM		HVOF	
	vertical	horizontal	8bar / apoio rígido		1 fase	
coordenadas	vertical	horizontal	vertical	horizontal	vertical	horizontal
10;18	0	0	0	0,06	0	0
10;28	0	0	0	0,05	0	0
10;38	0	0	0	0,06	0	0
22;18	0	0	0	0	0	0
22;28	0	0	0	0	0	0
22;38	0	0	0	0	0	0
35;18	0	0	0	0,08	0	0
35;28	0	0	0	0,06	0	0
35;38	0	0	0	0,08	0	0
empenamento	0		0,08		0	

Como o período de estágio ainda se prolongou foram ainda estudadas mais duas placas relativas à ordem de trabalho PLT 19:484, encontrando-se na **Tabela 4.11** e **Tabela 4.12** os valores de empenamento obtidos para as placas 10 e 11, respetivamente.

A geometria destas duas últimas placas era igual entre si e à da placa 8 (ver **Figura 4.7**).

Inicialmente as placas não apresentavam qualquer empenamento, como se pode concluir pela análise das **Tabela 4.11** e **Tabela 4.12**. O empeno obtido após o processo de decapagem com 8bar e apoio rígido é o mesmo para ambas as placas, 0,08mm (convexo). Após aplicação do revestimento o empenamento teve uma variação maior do que o espectável em ambos os casos, com um valor de 0,14mm para a PLT 19.484 (1) e 0,17mm para a PLT 19.484 (2), côncavo em ambas. Para os parâmetros usados nestas placas esperavam-se melhores resultados.

Tabela 4.11. Valores do empeno obtidos na placa 10, PLT 19.484 (1)

PLT 19:484 (1)	INICIAL		DECAPAGEM		HVOF	
			8 bar / apoio rígido		2 fases	
coordenandas	vertical	horizontal	vertical	horizontal	vertical	horizontal
10;16	0	0	0	-0,08	0	0
10;26	0	0	0	-0,08	-0,1	0
10;36	0	0	0	-0,08	0	0
30;16	0	0	0	0	0	-0,09
30;26	0	0	0	0	-0,14	-0,12
30;36	0	0	0	0	0	-0,09
42;16	0	0	0	-0,08	0	0
42;26	0	0	0	-0,08	-0,1	0
42;36	0	0	0	-0,08	0	0
Empenamneto	0		0,08		0,14	

Tabela 4.12. Valores do empeno obtidos na placa 11, PLT 19.484 (2)

PLT 19:484 (2)	INICIAL		DECAPAGEM		HVOF	
			8 bar / apoio rígido		2 fases	
coordenandas	vertical	horizontal	vertical	horizontal	vertical	horizontal
10;16	0	0	0	-0,08	-0,1	0
10;26	0	0	0	-0,08	-0,16	0
10;36	0	0	0	-0,08	-0,1	0
30;16	0	0	0	0	0	0
30;26	0	0	0	0	-0,17	-0,06
30;36	0	0	0	0	0	0
42;16	0	0	0	-0,08	0	0
42;26	0	0	0	-0,08	0	0
42;36	0	0	0	-0,08	0	0
Empenamneto	0		0,08		0,17	

O facto de estes valores não terem sido os mais desejáveis mesmo utilizando os mesmos parâmetros que em PLT anteriores com resultados ótimos deve-se essencialmente a dois fatores:

1. À geometria das placas, em especial a espessura na zona dos furos ser reduzida torna muito mais fácil as variações dimensionais.
2. O fato de estas duas placas terem sido já revestidas várias vezes dificulta também bastante o controlo dimensional, pois já foram retificadas várias vezes diminuindo a sua espessura. Pode observar-se na **Figura 4.9** que tanto as arestas

da placa (A) como a zona dos furos (B) estão bastante danificadas, o que mostra um uso já muito elevados.

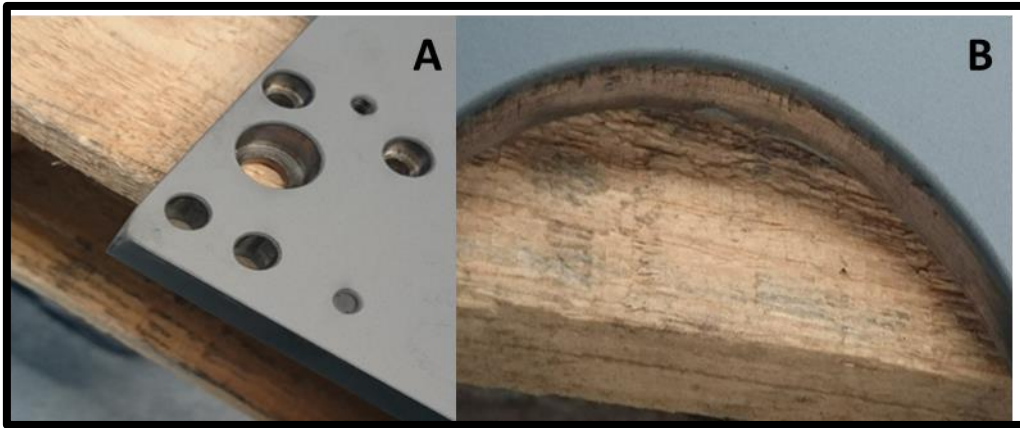


Figura 4.9. Danos observados nas placas 10 e 11 no estado de “usadas”; A) na aresta da placa; B) nos furos das placas.

5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

As principais conclusões relativas ao empeno de placas de aço AISI 1045 durante o tratamento de superfície que inclui, proteção de furos, decapagem e deposição de filme de WC-Co são as seguintes:

- As placas apresentam empenos diferentes em função da sua geometria e/ou do pré-processamento (“nova” ou “usada”).
- O tratamento térmico de cura do material polimérico usado na proteção dos furos e orifícios, a 100°C/ 2 horas, induz um empeno não relevante nas placas analisadas.
- É através do controlo dimensional na etapa de decapagem que se consegue controlar o empeno final. Durante o processo de decapagem são induzidas tensões de compressão na placa. Estas tensões tem maior concentração na zona dos furos o que provoca um empeno no sentido convexo. Conclui-se que seria benéfico criar o máximo de tensões de compressão possível nesta etapa. Para isso a pressão utilizada é a máxima disponível (8bar) e a placa é apoiada num apoio rígido.
- A deformação convexa que ocorre durante a decapagem é anulada pela presença à superfície do filme duro. Há diferença de coeficiente de dilatação térmico entre o filme WC-Co e o substrato de aço. O coeficiente de dilatação do filme é mais baixo do que o do substrato. Durante o aquecimento criam-se forças de tração que anulam o empeno convexo proveniente da decapagem. Durante o arrefecimento forças de compressão induzidas na placa formam o empeno côncavo que se verifica após a aplicação do revestimento *HVOF*.
- A melhor placa das estudadas foi a PLT 19.330. Este facto tem como consequências ter sido rececionada sem empeno, o processo de decapagem foi realizado com apoio rígido, a 8 bar de pressão e a placa apresenta uma geometria mais compacta do que as restantes.
- Em relação ao aspeto económico, pode revelar-se, sem problemas de confidencialidade, que trabalhos extras, fora da empresa, para retificação de três

placas custaram aproximadamente 3000€. Pode concluir-se também que a compra de uma retificadora para a empresa foi benéfica, deixando de depender e custear trabalhos a terceiros, passou a gerir o seu próprio serviço nestas ou outro tipo de peças

Finalmente, para dar continuidade ao estudo efetuado, propõe-se como trabalhos futuros:

- Aprofundamento do estudo, usando não placas reais, mas provetes e avaliar o estado de tensões induzidas para cada passo do processamento.
- Proceder a simulação do comportamento das placas através de um software seria também bastante interessante, esta forma de resolver o problema foi também pensado para a resolução do problema iniciando até um modelo em ADINA.

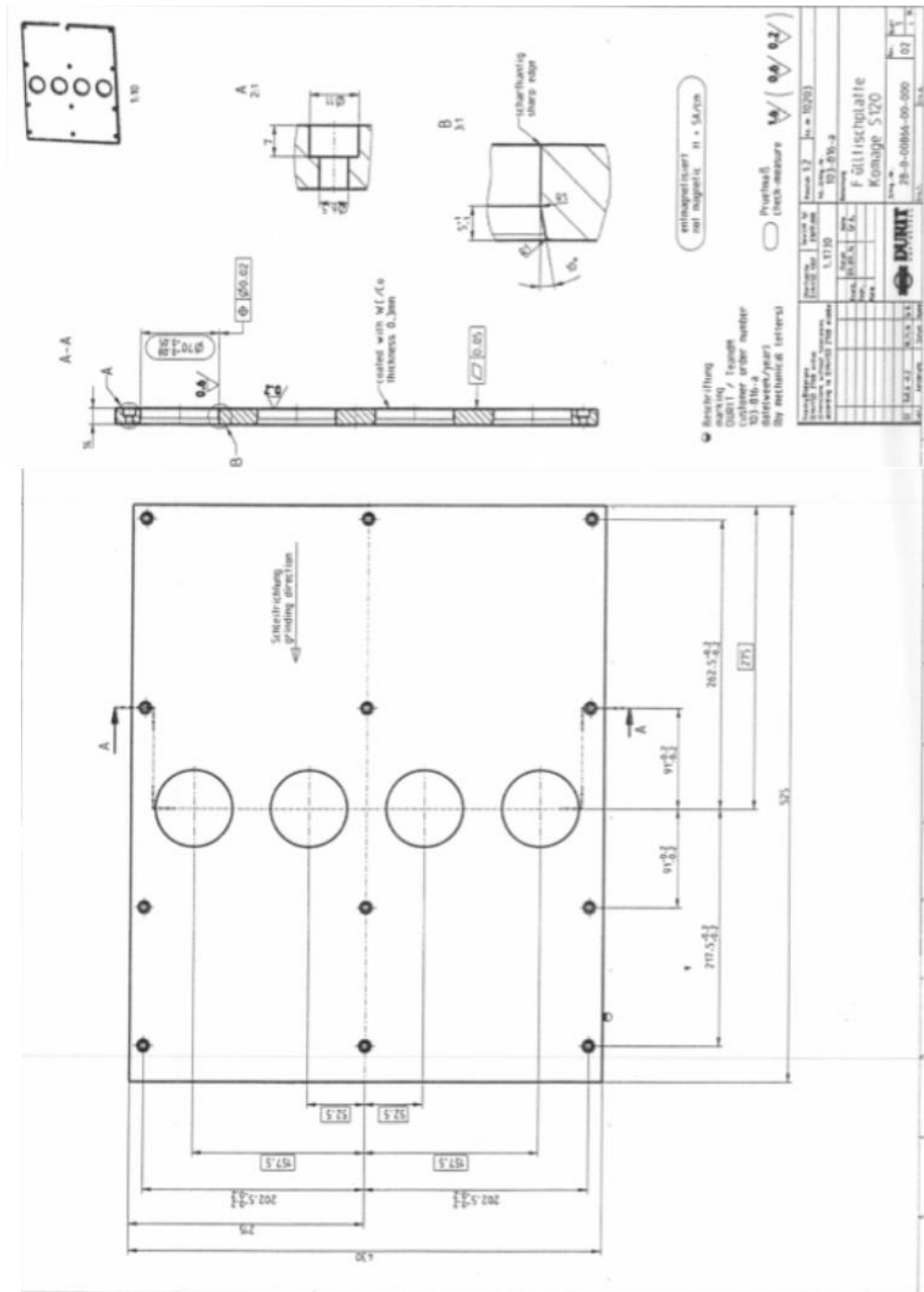
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TEandM. *Missão*. Obtido de TEandM: <http://www.teandm.pt/missao.html>; acessido em 3 de Março 2015
- [2] Alberto Feres. (3 de Julho de 2015). Obtido de Alferto Feres:
http://www.albertoferes.com.br/menu_esquerdo/downloads/mecanica/Metrologia%20A14.pdf
- Barralis, J., & Maeder, G. (2010). *Prontuário da Metalurgia*. Lisboa: Calouse Gulbenkain.
- Coniex. (4 de Março de 2015). *Decapagem*. Obtido de Coniex:
<http://www.coniex.pt/pt/catalogo/go/tratamento-superficies-decapagem-jacto-abrasivo>
- IST. (10 de Abril de 2015). *Laminagem*. Obtido de
<http://web.ist.utl.pt/~L52491/4ano/ep/material-apoio/slides/Cap16.pdf>
- IST. (3 de Março de 2015). *Laminagem*. Obtido de IST:
<http://web.ist.utl.pt/~L52491/4ano/ep/material-apoio/slides/Cap16.pdf>
- Sakharova, A. N., Prates, P. A., Oliveira, M. C., Antunes, J. M., & Fernandes, J. V. (2011). A Simple Method for Estimantion of Residual Stresses by Depth-Sensing Indentation.
- Shepard, A. P., & Ingham, H. S. (s.d.). *Flame Spray Handook*. New York: Metco Inc.
- TEandM. (1 de Março de 2015). *Missão*. Obtido de TEandM: <http://www.teandm.pt/missao.html>
- TEandM. (5 de Abril de 2015). *TEandM*. Obtido de HVOF: http://www.teandm.pt/hvof_T.htm
- [7] Barralis, J., & Maeder, G. (2010). *Prontuário de Metalurgia, 2ªEdição*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.; páginas 169, 172 e 173
- [8] DRACO. *Ar comprimido*. Obtido de DRACO:<http://www.draco.pt/draco/draco/catalogo/Decapagem-Granalhagem/GranalhagemCDGREN>; acessido em 1 de Julho de 2015
- [9] Universidade de Coimbra. (s.d.). *Aplicações de Abrasivos*. Obtido de Nónio:
[file:///C:/Users/Rafael/Downloads/Aula04_TP3_FURACAO_RETIFICACAO%20\(1\).pd](file:///C:/Users/Rafael/Downloads/Aula04_TP3_FURACAO_RETIFICACAO%20(1).pd)
- [10] Flame Spray Technologies. *HVOF - High Velocity Oxi-Fuel*. Obtido de Flame Spray Teconologies: <http://www.fst.nl/hvof-high-velocity-oxygen-fuel/>; acessido em 4 de Abril de 2015

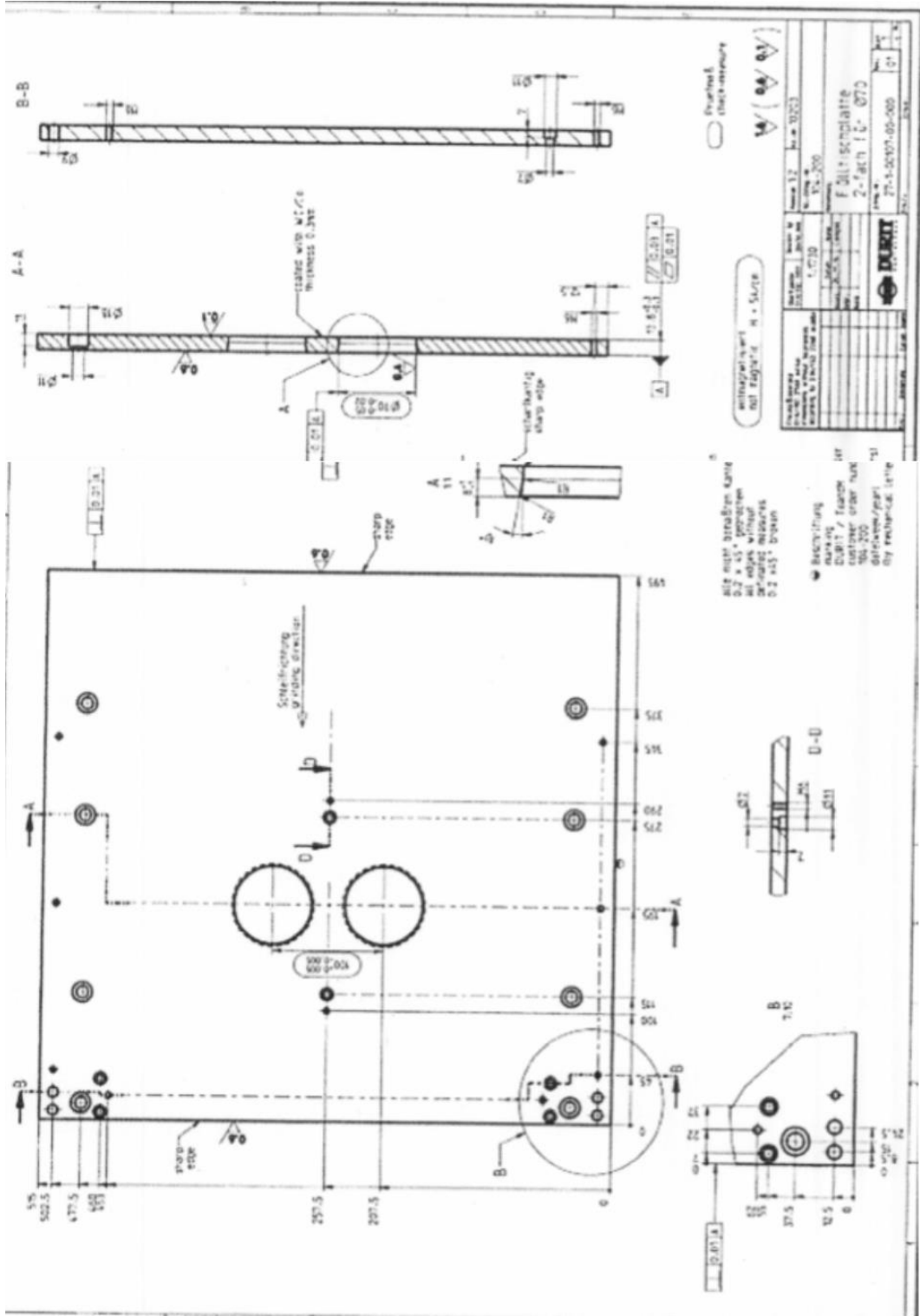
- [11] TEandM. *HVOF - High Velocity Oxi-Fuel*. Obtido de TEandM: http://www.teandm.pt/hvof_T.htm; acessido em 20 de Março de 2015
- [12] Direct Industry. *supersonic flame insulation spraying unit/ liquid fuel*. Obtido de Direct Industry: <http://www.directindustry.com/prod/amt-ag/product-65513-1308373.html>; acessido em 27 de Março de 2015
- [13] ESSEL. *Retificação: conceitos e equipamentos*. Obtido de ESSEL: <http://www.essel.com.br/cursos/material/01/ProcessosFabricacao/54proc3.pd>; acessido em 2 de Julho de 2015
- [14] Recife máquinas. *Retifica Plana Veker 6030-A*. Obtido de Recife máquinas: ESSEL. Retificação: conceitos e equipamentos. Obtido de ESSEL: <http://www.essel.com.br/cursos/material/01/ProcessosFabricacao/54proc3.pd>; acessido em 2 e Julho de 2015
- [15] Silva, R. A., & Neto, A. F. (5 de Dezembro de 2012). Estudo da Microestrutura do Aço SAE 1045 Para Melhoria da Usinabilidade. Uma Proposta Para Gestão dos Processos de Usinagem. *The 4th International Congress on University-Industry Cooperation*, página 7.
- [16] Sumitec. *Acero Grado Maquinaria*. Obtido de Sumitec: <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%201045.pdf>; acessido em 10 de Abril de 2015
- [17] Nova Didacta. *Produtos de Medição*. Obtido de Nova Didacta: http://www.novadidacta.com.br/produtos-categoria-produto.php?id_cate=12&id_sub=141&id_prod=1109; acessido em 6 de Maio de 2015

ANEXO A

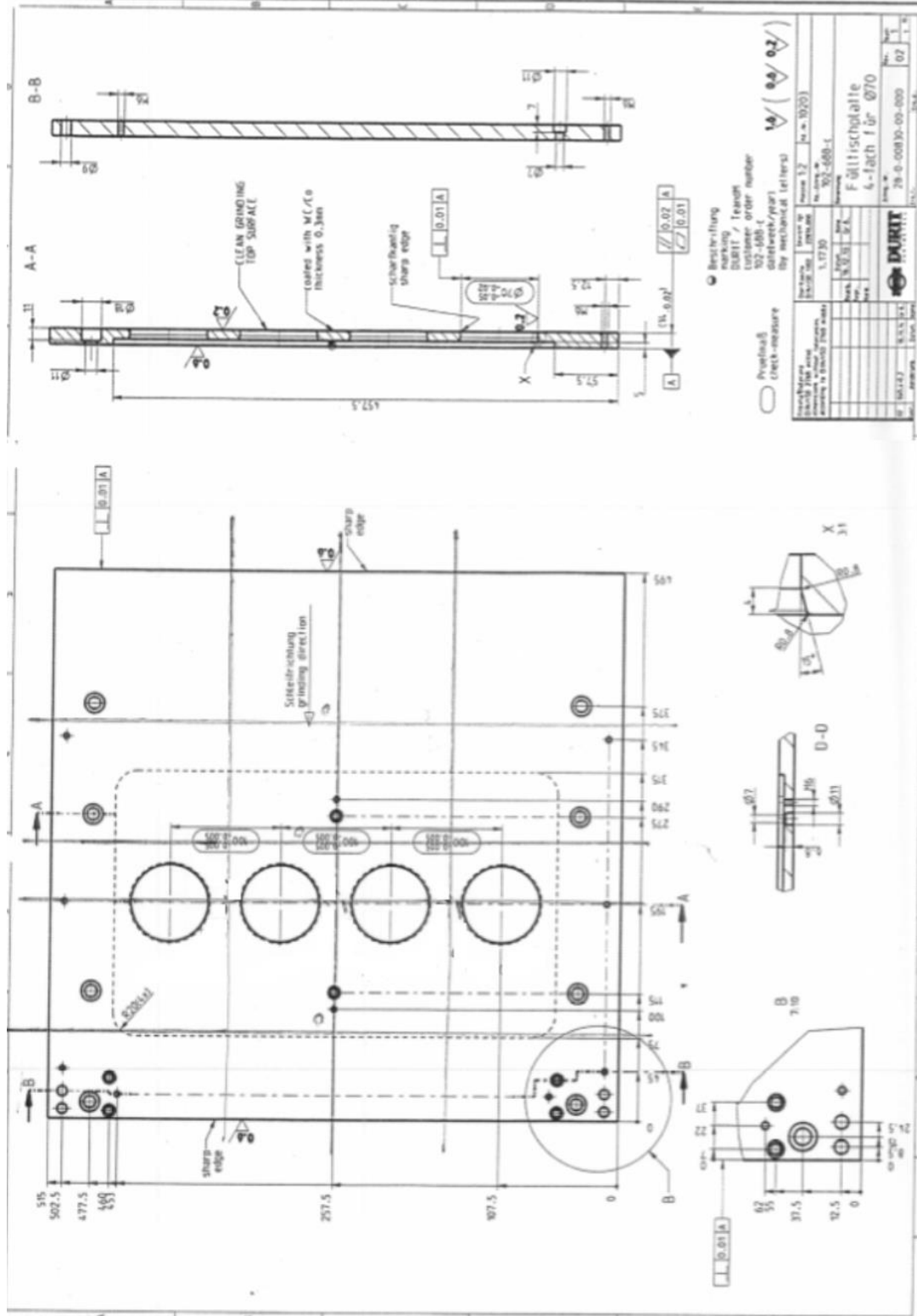
Placa 1 (PLT 18.889); PLT 19.218; PLT 18.883; PLT 19.132



Placa 2 (PLT 18.672)



PLT 19.218 (II); PLT 19.484



PLT 19.330

