

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E GESTÃO INDUSTRIAL

TESE DE MESTRADO

EURICO AUGUSTO RODRIGUES DE SEABRA

**ESTUDO DE BARREIRAS TÉRMICAS
OBTIDAS POR PROJECCÃO À CHAMA**

Supervisor:

António Pinto Barbedo de Magalhães

Prof. Catedrático do DEMEGI

Agosto de 1996

Esta tese é apresentada como parte dos requisitos exigidos para a obtenção
do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

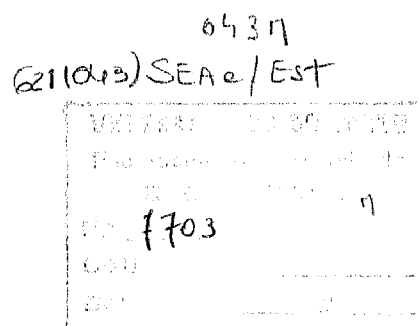
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E GESTÃO INDUSTRIAL

TESE DE MESTRADO

EURICO AUGUSTO RODRIGUES DE SEABRA

**ESTUDO DE BARREIRAS TÉRMICAS
OBTIDAS POR PROJECCÃO À CHAMA**



Supervisor:

António Pinto Barbedo de Magalhães

Prof. Catedrático do DEMEGI

Agosto de 1996

Esta tese é apresentada como parte dos requisitos exigidos para a obtenção
do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

AGRADECIMENTOS:

Ao Prof. Dr. Barbedo de Magalhães pela supervisão empenhada e interessada deste trabalho e ainda, por todos os conselhos dados.

Ao Prof. Dr. Mário Lima do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, pelo acompanhamento atento e interessado ao longo do trabalho.

A todo o pessoal do CETECOFF - INEGI, um sincero e profundo agradecimento pela preciosa ajuda dada na realização do trabalho experimental, em especial, ao Eng.º Ricardo Paiva pelo contributo inestimável na realização dos ensaios de projecção robotizada.

A todos os meus colegas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, por todo o encorajamento manifestado e sugestões dadas, em especial, ao Eng.º Luís Ferreira da Silva pelo apoio incondicional.

Aos meus colegas de Mestrado (Edição 92/93), Eng.º Delfim Monteiro e Eng.º Joaquim Oliveira, uma saudação especial de agradecimento por toda a disponibilidade prestada.

Ao pessoal das oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, pela execução de componentes indispensáveis à realização do trabalho experimental.

Aos meus pais e à minha irmã pelo apoio e incentivo manifestados.

À Alexandra por todo o empenhamento e paciência demonstrados e pelo contributo na revisão do texto.

RESUMO

Este trabalho tem os seguintes objectivos principais:

- ❶ - Estudar a influência de várias variáveis da projecção, como: o material do substrato, o ângulo de projecção e a temperatura de pré-aquecimento na tensão de adesão de revestimentos de Ni-Al-Mo e zircónia.
- ❷ - Fazer um estudo morfológico de revestimentos de Ni-Al-Mo e zircónia, em função do ângulo de projecção e seu relacionamento com as tensões de adesão.

Estudo complementar:

- Estudar a influência do ângulo de projecção na eficiência da deposição de vários materiais (um metálico: Ni-Al-Mo; e dois cerâmicos: zircónia e alumina) e na espessura dos revestimentos e, para isso:

Obtenção da espessura de revestimentos por três métodos: pelo peso do revestimento, por um método não destrutivo que utiliza uma sonda electromagnética por correntes de Eddy e por observação microscópica de cortes do revestimento.

Este trabalho está dividido em duas partes:

1ª - Pesquisa bibliográfica

É realizado inicialmente um estudo dos processos de projecção térmica (Capítulos 1 e 2). Fala-se em seguida da preparação das superfícies para a projecção (Capítulo 3). No Capítulo 4 são estudadas as principais características dos revestimentos obtidos por projecção térmica e por último, descrevem-se métodos de controle da qualidade dos revestimentos (Capítulo 5).

2ª - Trabalho experimental

No Capítulo 6 são descritas as projecções preliminares feitas em placas de latão, com o intuito de obter a eficiência da deposição de materiais de projecção, em função do ângulo de projecção. No Capítulo 7 descrevem-se as projecções feitas em provetes de vários materiais, com várias temperaturas de pré-aquecimento e ângulos de projecção, com a finalidade de determinar o efeito destes parâmetros sobre a tensão de adesão dos revestimentos. No Capítulo 8 são fornecidos os resultados compilados de todas as projecções e é feita a sua discussão.

Por último apresentam-se as principais conclusões (Capítulo 9) e sugestões para trabalhos futuros (Capítulo 10).

Em Anexo, são dados os gráficos de temperaturas adquiridas durante as projecções nos provetes (Anexo I) e a caracterização do equipamento utilizado para a execução do trabalho prático (Anexo II).

ABREVIATURAS:

DEMEGI	-	Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
INEGI	-	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
CETECOFF	-	Fundição e Novas Tecnologias
UM	-	Universidade do Minho
DEM	-	Departamento de Engenharia Mecânica da UM
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
ISO	-	International Organization for Standardization
BS	-	British standards
AFNOR	-	Association Française de Normalisation

ÍNDICE

	pág.
AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABREVIATURAS	III
ÍNDICE	IV
INTRODUÇÃO	VIII

1ª PARTE - PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

1 - PROJECCÃO TÉRMICA	1
1.1 - GENERALIDADES	1
1.2 - DEFINIÇÃO	1
1.3 - VARIANTES DO PROCESSO	1
1.3.1 - Materiais usados na projecção térmica	1
1.3.2 - Processos de projecção	1
1.4 - A ROBÓTICA NA PROJECCÃO TÉRMICA	2
1.4.1 - Concepção da projecção térmica com o robô	2
2 - PROCESSOS DE DEPOSIÇÃO	4
2.1 - COMBUSTÃO	4
2.1.1 - Projecção à chama de arame ou vareta	5
2.1.2 - Projecção à chama de pós	7
2.1.3 - Projecção por detonação	9
2.2 - AQUECIMENTO ELÉCTRICO	10
2.2.1. - Revestimento por arco eléctrico	10
2.2.2. - Revestimento por arco plasma	12
2.2.2.1 - Revestimento por arco plasma não transferido	12
2.2.2.2 - Revestimento por arco plasma transferido	14
2.2.2.3 - Atmosfera controlada	16
3 - PREPARAÇÃO DAS SUPERFÍCIES	18
3.1 - GENERALIDADES	18
3.2 - LIMPEZA E DESENGORDURAMENTO	18
3.2.1 - Desengorduramento por vapor	18
3.2.2 - Decapagem húmida	18
3.2.3 - Outros métodos de limpeza	19

3.3 - CRIAÇÃO DE RUGOSIDADE	19
3.3.1 - Operação de grenalhagem	19
3.3.1.1 - Tipo e tamanho das grenalhas	19
3.3.1.2 - Rugosidade obtida pela grenalhagem	21
3.3.1.3 - Parâmetros da grenalhagem	21
3.4 - PRÉ-AQUECIMENTO	21
3.5 - APLICAÇÃO DA CAMADA DE LIGAÇÃO	23
3.5.1 - Espessuras da camada de ligação	23
3.5.2 - Materiais utilizados para camada de ligação	23
4 - CARACTERÍSTICAS DOS REVESTIMENTOS	24
4.1 - INTRODUÇÃO	24
4.2 - FORMAÇÃO E ESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS	25
4.2.1 - Forma do jacto de projecção	25
4.2.2 - Deposição das partículas	26
4.2.3 - Propriedades dos revestimentos	26
4.2.4 - Aspecto visual dos revestimentos	28
4.2.5 - Forças de adesão	29
4.2.6 - Tensões residuais	29
4.2.7 - Dureza	30
4.2.8 - Resistência à compressão	30
4.2.9 - Resistência ao desgaste	30
4.2.10 - Fadiga	31
4.2.11 - Ductilidade	31
5 - CONTROLO DA QUALIDADE DOS REVESTIMENTOS	32
5.1 - MÉTODOS DE TESTE DESTRUTIVOS	32
5.1.1 - Método padrão para a determinação da força de adesão	32
5.1.2 - Forças de corte	34
5.1.3 - Forças de coesão	35
5.1.4 - Testes de macrodureza	35
5.1.5 - Testes de microdureza	35
5.1.6 - Ensaaios de desgaste	35
5.1.6.1 - Teste de abrasão a dois corpos	36
5.1.6.2 - Teste de abrasão a três corpos	36
5.1.6.3 - Teste de erosão	37
5.1.7 - Ensaaios de fadiga	37
5.1.8 - Testes de resistência à corrosão e oxidação	37
5.1.9 - Testes de resistência ao choque térmico	37

5.2 - MÉTODOS DE TESTE NÃO DESTRUTIVOS	38
5.2.1 - Medidores de espessuras de revestimentos	38
5.2.2 - Métodos luminosos para detectar falhas na ligação	38
5.2.3 - Métodos de medida sonoros	39
5.2.4 - Outros métodos não destrutivos	39

2ªPARTE - TRABALHO EXPERIMENTAL

6 - ENSAIOS PRELIMINARES DE PROJECCÃO À CHAMA ROBOTIZADA PARA DETERMINAR EFICIÊNCIAS DE DEPOSIÇÃO	40
6.1 - OBJECTIVOS:- Determinação de eficiências de deposição e de espessuras de revestimentos em função do ângulo de projecção	40
6.2 - SUBSTRATOS UTILIZADOS	40
6.3 - TRAJECTÓRIA DE DEPOSIÇÃO OU PROJECCÃO	40
6.4 - CÁLCULO DO NÚMERO DE PASSES OU PASSAGENS DE PROJECCÃO	41
6.4.1 - Camada de ligação (Ni-Al-Mo)	42
6.4.2 - Camada de revestimento de zircónia	42
6.4.3 - Camada de revestimento de alumina	43
6.5 - DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS PRELIMINARES DE PROJECCÃO	44
6.5.1 - Camada de ligação (1º e 4º ensaios)	44
6.5.2 - Camada de ligação + zircónia (2º e 5º ensaios)	48
6.5.3 - Camada de ligação + alumina (3º e 6º ensaios)	52
6.6 - DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DOS REVESTIMENTOS	55
6.6.1 - Obtenção da espessura do revestimento através do seu peso	55
6.6.2 - Medidor de espessuras por sonda electromagnética	57
6.6.3 - Por observação microscópica de cortes de revestimentos	59
7 - ENSAIOS DE PROJECCÃO À CHAMA ROBOTIZADA	67
7.1 - OBJECTIVOS E INTRODUÇÃO	67
7.2 - SUBSTRATOS UTILIZADOS	67
7.3 - TRAJECTÓRIA DE DEPOSIÇÃO	70
7.4 - DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS DE PROJECCÃO	70
7.4.1 -Projecção a 90º com pré-aquecimentos de 90 e 120ºC (1º e 2º ensaios)	71

7.4.2 - Projecções a 90 e 65° com um pré-aquecimento de 90°C (3° e 4° ensaios)	77
7.4.3 - Projecção a 30° com um pré-aquecimento de 90°C (5° ensaio)	79
7.5 - ENSAIOS DE ADESÃO	84
8 - COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS E SUA DISCUSSÃO	91
8.1 - ENSAIOS PRELIMINARES DE PROJECCÃO	91
8.2 - ENSAIOS DE PROJECCÃO	102
8.2.1 - Análise dos gráficos de temperaturas	102
8.2.2 - Tensão de adesão dos revestimentos	110
9 - CONCLUSÕES FINAIS	124
10 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	125
ANEXOS	
Anexo I - Gráficos de temperaturas adquiridas durante as projecções nos provetes	
Anexo II - Equipamento utilizado para a execução do trabalho prático	

BIBLIOGRAFIA

INTRODUÇÃO

Uma das aplicações de barreiras térmicas cerâmicas é em coquilhas.

Na escolha de materiais para a fabricação de coquilhas tem muita importância a capacidade de estes suportarem temperaturas elevadas, nomeadamente pelo contacto com o ferro fundido no estado líquido. Os materiais cerâmicos devido ao seu tipo de estrutura e ligação são à partida uma hipótese a ter em conta. Mas como estes materiais são inerentemente frágeis veêm a sua utilização limitada em condições de choque mecânico ou térmico.

Por isso, para ultrapassar este problema, fazem-se por diversos métodos revestimentos cerâmicos sobre substratos metálicos de forma a que estes possam suportar as solicitações mecânicas que os cerâmicos por si só não aguentariam.

Aplicam-se revestimentos cerâmicos a diversos materiais metálicos, tanto em condições de oxidação e corrosão à temperatura ambiente, como a temperaturas elevadas, aplicados em componentes de fornos, equipamentos para tratamentos térmicos ou para processamento de substâncias químicas, peças de motores de combustão, etc.

Os revestimentos feitos por projecção térmica têm geralmente espessuras que vão desde os 50 μm até alguns milímetros. A espessura pretendida para o revestimento será um factor importante na selecção do tipo de revestimento adequado, uma vez que nem todos os materiais apresentam as mesmas propriedades a diferentes espessuras.

Geralmente, as propriedades pretendidas para um revestimento que funciona como barreira térmica, são:

- baixa condutividade térmica (evitar a transferência de calor para o material de base);
- proximidade dos valores dos coeficientes de expansão térmica dos elementos cerâmicos e/ou metálicos do revestimento com o substrato;
- resistência a tensões localizadas susceptíveis de resultar fissuras e promover a destruição do revestimento;
- adequada estabilidade da estrutura cristalina às temperaturas de serviço;
- altos valores de reflectividade;
- ser possível efectuar reparações no revestimento depois de estar ao serviço e se danificar.

Os materiais cerâmicos utilizados em barreiras térmicas devem ser porosos, para que a transferência de calor por condução seja baixa (o ar é mau condutor do calor) e com boa resistência a choques térmicos.

Estes materiais são à base de óxidos, carbonetos, nitretos, silicatos e superporcelanas. Um dos materiais mais utilizados em barreiras térmicas é o óxido de zircónio (ZrO_2 - zircónia).

1ª PARTE

PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

1- Projecção térmica

1.1 - Generalidades

A projecção térmica é uma técnica especializada que já tem uma larga utilização tanto na produção como na manutenção. A natureza do processo é verdadeiramente sinérgica porque existem muitos componentes e variáveis envolvidas que quando combinadas correctamente produzem um resultado final muito melhor do que quando se consideram individualmente. Cada componente e variável deve ser bem estudada para permitir uma boa selecção para uma aplicação particular [1].

1.2 - Definição

A projecção térmica é um grupo de processos em que um material metálico ou não metálico é depositado no estado fundido ou semi fundido sob a forma atomizada e acelerada num substrato de modo a se obter uma ligação apenas mecânica, ou mecânica e metalúrgica.

O material a projectar pode estar inicialmente sob a forma de arame, de vareta ou em pó. É posteriormente aquecido pela pistola de projecção que usa como fontes de calor: os gases combustíveis e o arco eléctrico. Durante o aquecimento os materiais tornam-se pastosos ou fundidos, sendo ao mesmo tempo propulsionados por um jacto de gás contra o substrato. As primeiras partículas que atingem a superfície achatam e ancoram nas irregularidades previamente feitas no substrato, em seguida as partículas vão-se empilhando formando o revestimento que tem uma estrutura lamelar [1].

1.3 - Variantes do processo

As principais variantes que existem na projecção térmica estão relacionadas com o tipo de materiais utilizados, de fontes de calor e do método de propulsão dos materiais contra o substrato [1].

1.3.1 - Materiais usados na projecção térmica

Podem ser depositados metais, óxidos, cerâmicas, compostos intermetálicos, alguns plásticos orgânicos e vidros, por um ou mais processos de projecção [1].

1.3.2- Processos de projecção

Os processos da projecção térmica podem dividir-se em dois grupos principais de acordo com o tipo de fonte de aquecimento utilizada (Tab.1.1).

Grupo I (Combustão)	Grupo II (Eléctrico)
Chama	Plasma (arco não transferido)
	Plasma (arco transferido)
Detonação	Arco eléctrico
	Plasma induzido

Tab. 1.1 - Processos de projecção térmica divididos pelos dois grupos principais [1].

1.4 - A robótica na projecção térmica

A projecção térmica com pós ou arame tem sido utilizada há vários anos em aplicações industriais, no entanto e apesar da investigação que tem sido feita para melhorar a fiabilidade do processo, continuam a subsistir problemas relacionados com o processo, especialmente quando a projecção é feita manualmente, tais como [2]:

Problemas de movimentação - Velocidade baixa e variável do deslocamento transversal da pistola aliada a uma variação da distância de projecção que provoca um sobreaquecimento do substrato e uma grande disparidade da espessura do revestimento.

O controle das variáveis do processo - Várias aplicações requerem ajustes das variáveis do processo, tais como: taxa de deposição, distância de projecção, tensão eléctrica e velocidade de alimentação do arame ou pós de projecção.

Problemas ambientais - Este problema ocorre devido ao facto das partículas projectadas terem de atravessar o ar para se depositarem no substrato.

A utilização do robô na projecção permitiu resolver parte destes problemas devido a que permite movimentos precisos e repetíveis e a utilização de um microprocessador permite controlar e gravar na memória as variáveis do processo. Em acréscimo, a projecção com o robô afasta o operador da zona de projecção, o que evita que ele esteja sujeito às partículas que se reflectem do substrato, ao fumo e ao ruído.

1.4.1 - Concepção da projecção térmica com o robô

Argumentos como a segurança do operador, o aumento do volume de produção e a necessidade de haver exactidão de movimentos (que afecta a taxa de deposição), resultaram no desenvolvimento da automatização da projecção térmica.

O largo campo de aplicações que requerem diferentes variáveis de projecção levaram à utilização de um controlador automático.

A automatização está presente hoje nas empresas de todo o mundo. Os robôs tornaram-se na melhor solução quando a presença humana é indesejável, devido a serem controlados por computador e poderem executar com precisão e repetibilidade os movimentos.

Hoje em dia os controladores dos robôs não são só utilizados para controlar os movimentos. Novas tecnologias, tanto de hardware como de software, têm aumentado rapidamente as suas capacidades. Alguns controladores robóticos são fornecidos com dispositivos diversos, os quais podem ser controlados por software, tais como: sistemas de visão artificial, detecção de ponto de partida, sensor de tacto e força.

As tecnologias dos sensores tipo humano (de tacto e visão de máquina) e software de decisão têm melhorado as capacidades robóticas. Em resultado disto, os robôs oferecem as seguintes soluções aos problemas associados ao processo de projecção térmica [2]:

Soluções para a movimentação - Desde que o braço do robô é controlado por um microprocessador, o controlador do robô é capaz de manter constante a distância de projecção e a velocidade transversal. A movimentação pode ser ajustada, programada e gravada na memória do controlador. O operador pode verificar a movimentação do braço sem projectar e em seguida controlar dum local remoto o robô para executar a projecção. Isto abre novas áreas de aplicação como as que possuam superfícies curvas ou fechadas onde o operador humano não pode ver enquanto projecta.

Soluções para o controle das variáveis do processo - Alguns controladores robóticos são fornecidos com memória disponível para futuras aplicações. As instruções para o controle dos periféricos podem ser gravados na forma de subrotinas ou subprogramas. Estes programas que foram introduzidos servem para controlar a velocidade de alimentação do arame ou pó de projecção, a tensão do arco e a corrente dos gases.

2 - Processos de deposição

Os processos de projecção térmica relativamente ao equipamento comercialmente existente podem-se dividir em duas categorias básicas: combustão (chama e detonação) e aquecimento eléctrico (arco eléctrico e plasma) [1].

2.1 - Combustão

O processo de projecção que utiliza a energia térmica proveniente da combustão é conhecido pelo nome de projecção à chama.

Podem ser projectados materiais que não sublimem e que fundam a temperaturas inferiores a 5000°F (2760°C). São utilizados metais, ligas metálicas e cerâmicas que se apresentam sob a forma de arame, de vareta ou de pó [1].

A maior parte das pistolas de projecção à chama podem ser adaptadas de forma a usarem vários tipos de gases combustíveis (acetileno, gás natural, hidrogénio e propano), permitindo variar os custos do processo bem como as propriedades do revestimento. Normalmente a mudança do bocal e/ou válvula de ar são os requisitos necessários para a adaptação da pistola de projecção [3].

As temperaturas máximas atingidas pela chama dependem do gás combustível utilizado, como se ilustra na tabela seguinte (Tab. 2.1).

Combustível / Comburente	Temperatura [°F]	Temperatura [°C]
Propano / oxigénio	4785	2640
Gás natural / oxigénio	4955	2735
Hidrogénio / oxigénio	4875	2690
Acetileno / oxigénio	5625	3100

Tab. 2.1 - Temperaturas da chama em função do tipo de combustível [1].

Um factor de grande importância é a distância de projecção que influencia decisivamente a qualidade do revestimento; estas distâncias vêm tabeladas e dependem essencialmente do material a projectar em que [4]:

- se for demasiado elevada pode ocorrer oxidação do material do revestimento;
- se for demasiado curta há sobreaquecimento da peça a revestir.

O processo de projecção à chama é caracterizado por um baixo investimento, taxas de deposição elevadas e relativa facilidade de manutenção, sendo esta de baixo custo.

Geralmente, o revestimento obtido pelo processo de projecção à chama em relação ao projectado por plasma e arco eléctrico, tem uma menor adesão e uma porosidade mais elevada [3].

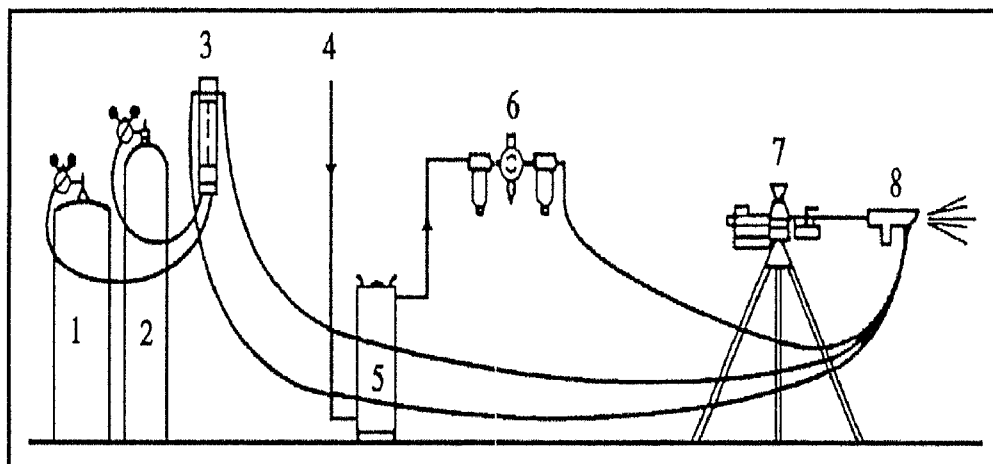
Um dos elementos mais importantes na projecção são as pistolas de projecção à chama, que poderão estar habilitadas a projectar materiais em qualquer uma das seguintes formas:

- Fio de arame ou vareta
- Pó

2.1.1 - Projecção à chama de arame ou vareta

O equipamento para a projecção à chama utilizando arame ou vareta está representado na figura seguinte (Fig.2.1).

A utilização de varetas origina que a alimentação do material a projectar seja descontinua.



- 1 - Garrafa de combustível (acetileno, propano ou hidrogénio)
- 2 - Garrafa de oxigénio
- 3 - Caudalímetro dos gases (oxigénio e combustível)
- 4 - Ar comprimido
- 5 - Filtro do ar comprimido
- 6 - Unidade de controle do ar comprimido
- 7 - Alimentador de arame ou vareta
- 8 - Pistola de projecção de arame ou vareta

Fig. 2.1 - Típica instalação de projecção à chama de arame ou vareta [1].

Na projecção de um material que é fornecido sob a forma de arame ou vareta, a pistola tem um sistema de fornecimento de fio. O material a projectar é empurrado por moentes para a entrada da pistola. Estes moentes são accionados por motores eléctricos, motores a ar ou turbinas.

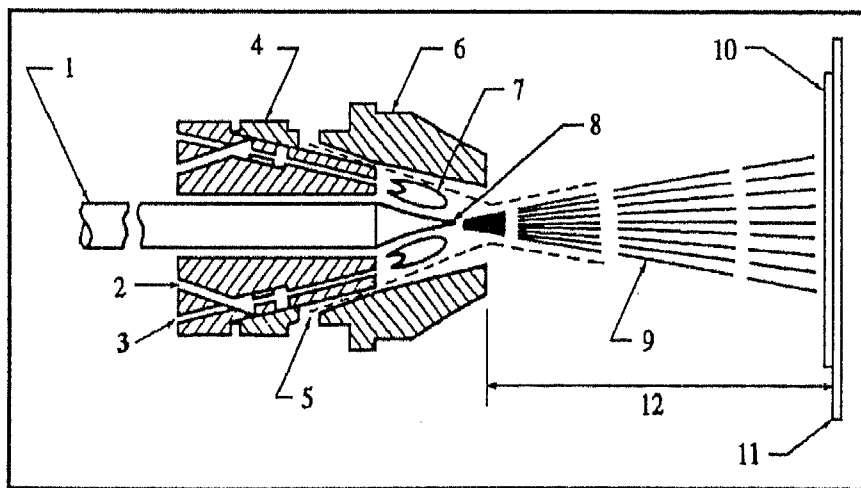
Os gases combustíveis combinados com o oxigénio produzem a chama necessária à projecção. O acetileno é o que permite obter as temperaturas mais elevadas (Tab. 2.1) e por isso é o mais utilizado. No entanto, usam-se temperaturas mais baixas e assim outros combustíveis devido a vantagens económicas.

A chama é apenas usada para fundir o material, sendo assim, é necessário para fazer a projecção, que a chama seja acompanhada por um jacto de gás, usualmente o ar comprimido que atomiza o material fundido e o propulsiona contra a peça a revestir ou substrato. Em aplicações especiais o ar comprimido é substituído por um gás neutro (argon ou azoto) [1].

Os caudais e pressões dos gases geralmente utilizados numa projecção deste tipo são [5]:

- Gás comburente: (oxigénio), caudais entre 1500 e 3800 l/hora para pressões de 1,2 a 3,6 bar;
- Gases combustíveis: (acetileno, propano, hidrogénio ou gás natural), caudais compreendidos entre 600 e 1550 l/hora para pressões de 0,5 a 1,2 bar para o acetileno e 0,5 a 3 bar para o propano;
- Ar comprimido: deve ser filtrado de modo a evitar a presença de óleo, de água e de sujidades. Dependendo do equipamento a utilizar, ele é fornecido com pressões de 3,8 a 5 bar para caudais entre 15 e 35 m³/hora.

Na Figura 2.2 apresenta-se em corte, uma pistola de projecção à chama de arame.



- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1 - Arame ou vareta | 7 - Gases de combustão |
| 2 - Oxigénio | 8 - Arame ou vareta fundido |
| 3 - Gases combustíveis | 9 - Material a projectar atomizado |
| 4 - Boquilha dos gases de combustão | 10 - Revestimento |
| 5 - Ar comprimido | 11 - Substrato preparado |
| 6 - Boquilha do ar comprimido | 12 - Distância de projecção: 102 a 254 mm |

Fig. 2.2 - Corte de uma pistola para a projecção à chama de arame [1].

2.1.2 - Projecção à chama de pós

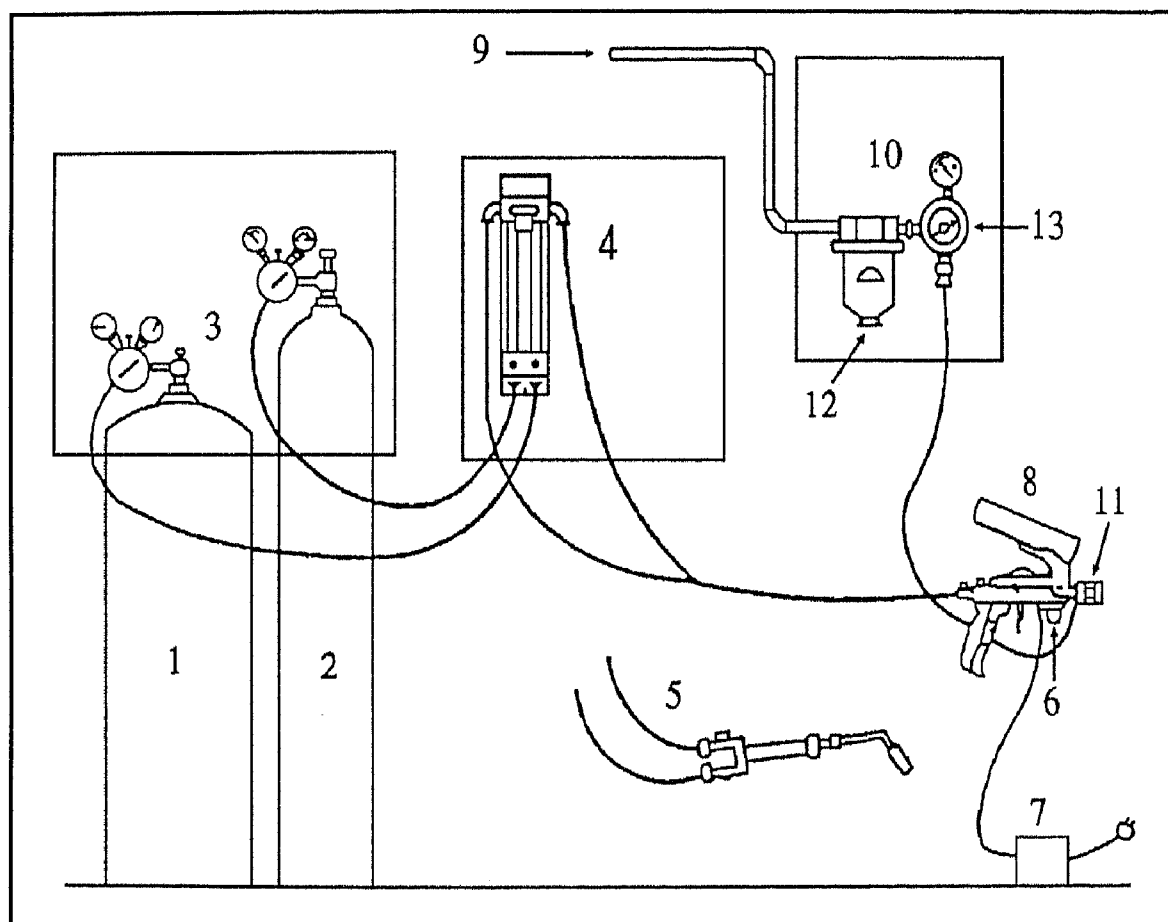
O equipamento utilizado é mais simples e mais compacto comparado com o da projecção à chama de arame.

Os materiais a projectar podem ser metais puros ou ligas, compósitos, carbonetos, cerâmicas ou combinações destes [1].

Utiliza-se para a obtenção da chama os mesmos gases descritos no processo do ponto anterior, sendo de realçar que geralmente os débitos necessários neste tipo de projecção são mais baixos [4].

A troca dum gás combustível por outro, geralmente não implica alterações na pistola, mas requer mudanças nas condições de projecção [1].

A instalação necessária para a projecção à chama de pós está representada na figura seguinte (Fig. 2.3).



- | | |
|-----------------------------------|---|
| 1 - Gás combustível | 8 - Pistola de projecção |
| 2 - Oxigénio | 9 - Ar comprimido |
| 3 - Controle de pressão dos gases | 10 - Unidade de controle de ar comprimido |
| 4 - Caudalímetro de gases | 11 - Arrefecedor |
| 5 - Maçarico de fusão | 12 - Filtro |
| 6 - Vibrador | 13 - Regulador de ar comprimido |
| 7 - Transformador | |

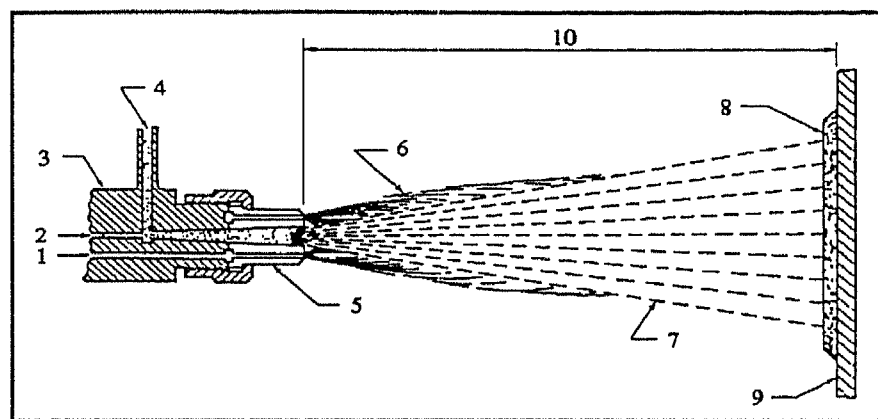
Fig. 2.3 - Típica instalação de projecção à chama de pós [4].

Na projecção de pós, a pistola não necessita de um modo geral de ar comprimido, mas dependendo do tipo de aparelho utilizado e material projectado pode ser ou não necessário [4].

O depósito do pó encontra-se geralmente inserido na própria pistola ou então colocado à parte e ligado a ela [1].

A introdução do pó é despoletada por um gatilho da pistola e pode ser feita por simples gravidade ou com a ajuda de um vibrador. O pó atravessa a baixa velocidade a chama que se produz normalmente a partir da mistura acetileno/oxigénio e quando atinge o estado de fusão, que pode ser total ou parcial, é projectado pela chama contra a peça a revestir [4].

Apresenta-se na figura seguinte (Fig. 2.4) em corte, uma pistola de projecção à chama de pós.



- | | |
|--------------------------|---|
| 1 - Oxigénio | 6 - Chama |
| 2 - Gases combustíveis | 7 - Material atomizado |
| 3 - Pistola de projecção | 8 - Revestimento |
| 4 - Pó | 9 - Substrato (material a revestir) |
| 5 - Boquilha | 10 - Distância de projecção: 102 a 254 mm |

Fig. 2.4 - Corte de uma pistola para a projecção à chama de pós [1].

Devido a que neste processo as partículas a projectar atingem velocidades e temperaturas mais baixas, origina isto geralmente, revestimentos com valores de adesão e coesão mais baixos e com uma maior porosidade, comparativamente com os obtidos com outros processos de projecção [1].

Para atenuar estes problemas utilizam-se as seguintes variações na projecção à chama de pós [1]:

- 1 - Utilização de ar comprimido para levar o pó para a chama;
- 2 - Uso de ar comprimido para acelerar as partículas a projectar;
- 3 - Alimentação do pó através dum tubo pressurizado com gás neutro, ligado à pistola;
- 4 - Dispositivos para se obterem à pressão atmosférica maiores acelerações para as partículas a projectar.

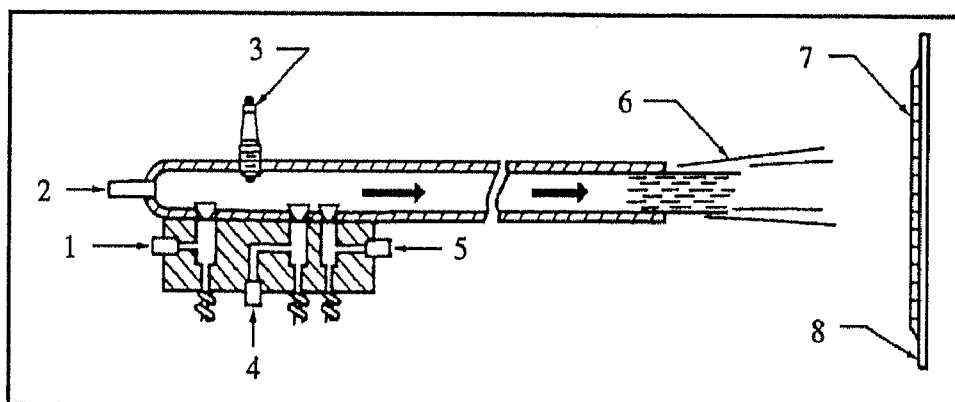
Todos estes refinamentos destinam-se a incrementar a taxa de deposição e a velocidade das partículas a projectar, conseguindo-se assim, a melhoria da aderência e a diminuição da porosidade dos revestimentos [1].

O processo designado em inglês por - HIPER VELOCITY OXIFUEL (HVOF), é uma variante da projecção à chama de pós que projecta as partículas a velocidades mais elevadas, devido à utilização de ar comprimido e de uma corrente de azoto que transporta o pó para a chama [4].

2.1.3 - Projecção por detonação

O princípio de funcionamento da pistola de projecção por detonação difere dos outros tipos de projecção por combustão. A projecção por detonação utiliza a energia da explosão de uma mistura de um gás combustível com o oxigénio [1].

A pistola de detonação, representada na figura 2.5, consiste num longo tubo onde o pó é introduzido juntamente com os gases da combustão. Após a ignição da mistura, ocorre uma explosão formando uma onda de choque que acelera e aquece as partículas, ejectando-as para fora do tubo de encontro ao substrato. As partículas atingem aproximadamente uma velocidade de 760 m/s [1].



- | | |
|---------------------|---------------------------------|
| 1 - Purga de Azoto | 5 - Oxigénio |
| 2 - Pó | 6 - Material atomizado |
| 3 - Ignição | 7 - Revestimento |
| 4 - Gás combustível | 8 - Substrato (peça a revestir) |

Fig. 2.5 - Desenho esquemático da pistola de projecção por detonação [1].

Após cada explosão a câmara e o tubo são purgadas por uma corrente de azoto. A temperatura atingida pela chama situa-se à volta dos 3315°C, enquanto que a temperatura do substrato é mantida abaixo dos 150°C, devido à utilização dum sistema de arrefecimento com dióxido de carbono (CO₂) [1].

Múltiplas detonações durando cerca de 1 segundo cada, vão originando a formação do revestimento com a espessura especificada, com o substrato a rodar ou a passar em frente à pistola. As espessuras obtidas variam entre 0,05 a 0,50 mm [1]. O revestimento apresenta uma rugosidade média aritmética de cerca de 3 µm [4].

Os revestimentos assim obtidos são muito densos, duros (cerca de 1300 HV) e muito aderentes (85 N/mm² a 175 N/mm²). Os materiais mais vulgarmente projectados pelos canhões de detonação são carbonetos de tungsténio incorporando um ligante metálico (80 Ni - 20 Cr ou Co) [4].

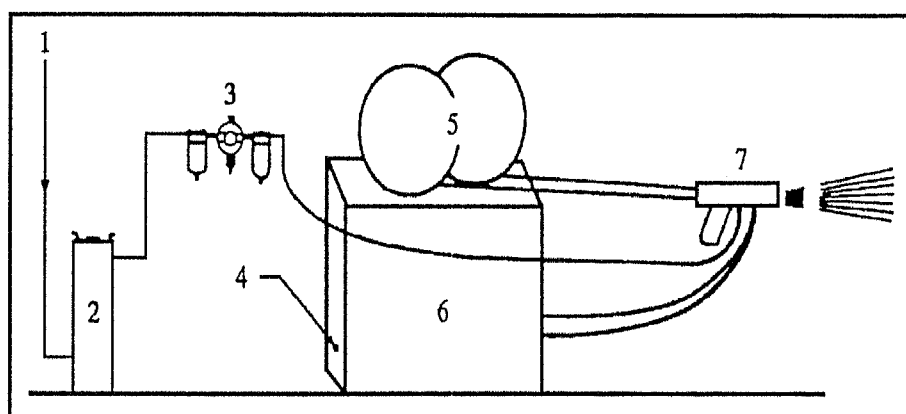
A elevada velocidade que as partículas atingem origina que os revestimentos apresentem forte adesão e uma porosidade baixa, tendo assim excelentes acabamentos superficiais [1].

Este equipamento é utilizado numa sala isolada, devido ao elevado ruído sonoro produzido pelo canhão que ultrapassa os 150 dB. Actualmente o procedimento é completamente automático e controlado remotamente [1].

2.2 - Aquecimento eléctrico

2.2.1 - Revestimento por arco eléctrico

A instalação necessária para a projecção por arco eléctrico está representada na figura seguinte (Fig. 2.6).



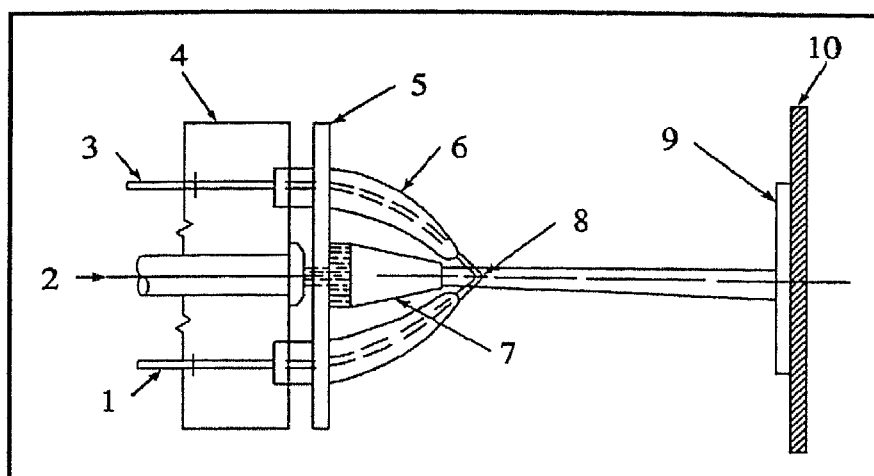
- 1 - Ar comprimido
- 2 - Filtro do ar comprimido
- 3 - Unidade de controle de ar comprimido
- 4 - Entrada de corrente alternada (AC)
- 5 - Bobinas de arame (alimentador)
- 6 - Fonte de alimentação contínua (DC)
- 7 - Pistola de projecção por arco eléctrico

Fig. 2.6 - Típica instalação de projecção por arco eléctrico [1].

Este tipo de projecção utiliza apenas materiais na forma de arame.

O aquecimento e a fusão dos materiais ocorre quando salta um arco eléctrico entre dois eléctrodos consumíveis carregados de cargas contrárias. O metal fundido é depois projectado a alta velocidade por intermédio de um jacto de ar comprimido [1].

Na figura 2.7 apresenta-se um corte de uma pistola de projecção por arco eléctrico.



- | | |
|----------------------|----------------------------------|
| 1 - Arame | 6 - Guiamento do arame |
| 2 - Entrada de ar | 7 - Boquilha |
| 3 - Arame | 8 - Formação do arco eléctrico |
| 4 - Câmara isolada | 9 - Material projectado |
| 5 - Placa reflectora | 10 - Substrato (peça a revestir) |

Fig. 2.7 - Corte de uma pistola para a projecção por arco eléctrico [3].

As temperaturas atingidas pelo arco eléctrico são muito elevadas (superiores a 4000°C), excedem o ponto de fusão dos materiais que projecta, ocorrendo volatilização no caso da utilização de alumínio e de zinco [1].

Este processo está limitado à utilização de arames de aproximadamente 1,5 mm de diâmetro, relativamente dúcteis e condutores. Também não é prática comum a projecção de carbonetos, nitretos e óxidos por arco eléctrico [3].

A projecção por arco eléctrico é particularmente indicada para a deposição rápida de revestimentos poucos espessos em componentes de grandes dimensões [1].

Os materiais mais utilizados na projecção são o zinco, o alumínio, o cobre e certos aços ($\cong 0,2\%C$). Podem-se obter revestimentos compósitos se alimentarmos a pistola com dois arames de materiais diferentes [4].

O processo de projecção por arco eléctrico apresenta algumas vantagens em relação aos outros tipos de projecção. Geralmente os revestimentos apresentam maiores forças de adesão, para alguns materiais ($> 69 \text{ MPa}$). Maiores taxas de deposição, para o caso de ligas à base de níquel já se atingiram 55 Kg/h. Também o aquecimento do substrato é menor neste caso comparadamente com outros processos, devido a inexistência da chama que atinge o substrato. O processo em si é económico, devido às baixas potências eléctricas requeridas (tensões entre 18 e 40 V e intensidades entre 100 e 400 A) [3].

A tensão constante é o normalmente utilizado, devido a que a sua variação provoca uma instabilidade no arco eléctrico e um aumento do tamanho das partículas projectadas; por isso, deve-se manter uma voltagem constante, para assim se produzir um revestimento regular e denso.

Existe uma unidade de controle que incorpora reguladores e interruptores necessários para a monitorização e controle dos circuitos que operam a pistola [1].

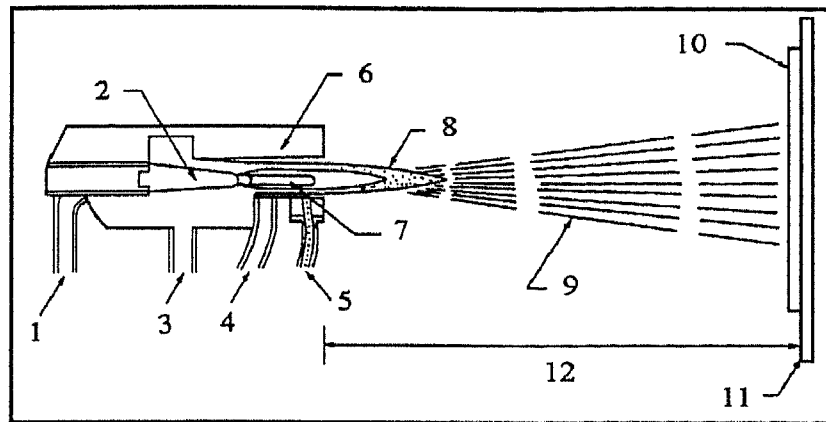
2.2.2 - Revestimento por arco plasma

A utilização dos revestimentos obtidos por projecção por plasma tem sido incrementada nestes últimos anos, devido às cada vez maiores exigências requeridas para os revestimentos e também ao aparecimento de novos equipamentos que reduziram os custos de operação [3].

O desenvolvimento das turbinas e dos motores dos foguetes, exigem para os materiais de revestimento, condições mais severas de funcionamento. Na maior parte das vezes para se conseguirem essas condições, tem de se recorrer à utilização de óxidos e carbonetos que requerem um equipamento de projecção térmica capaz de produzir temperaturas superiores às que os materiais conseguem suportar em funcionamento. A projecção por plasma desenvolveu-se de modo a satisfazer essas necessidades. Também originou o nascimento duma nova família de materiais de revestimento e aplicações técnicas, para uma grande variedade de utilizações industriais [1].

2.2.2.1 - Revestimento por arco plasma não transferido

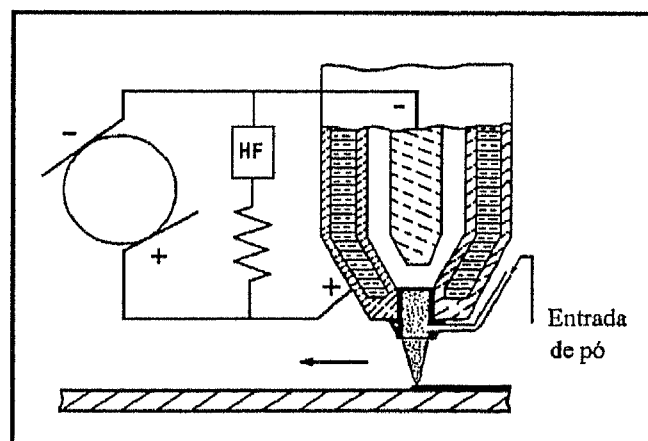
Este processo utiliza materiais em pó e plasma (gás ionizado quente). Os geradores de plasma conseguem atingir temperaturas controladas que excedem o ponto de fusão da maioria dos materiais. Na projecção por plasma, um gás ou uma mistura de gases, é injectado entre um arco eléctrico que se forma entre um cátodo de tungsténio e um ânodo (orifício em cobre), que estão alinhados coaxialmente (ver figura 2.8). O gás que sai do orifício é aquecido a temperaturas (2200 a 8300°C) muito mais altas do que as obtidas com a chama de combustão (ver tabela 2.1). Durante o aquecimento o gás é ionizado parcialmente, produzindo-se assim o plasma. Logo que o plasma sai da pistola, as moléculas dissociadas do gás diatómico recombina-se e libertam calor. O pó que é introduzido no plasma, funde e é propulsado na forma atomizada a elevada velocidade contra o substrato [1].



- | | |
|--|---|
| 1 - Ligação ao polo negativo e saída de água | 7 - Plasma |
| 2 - Electrodo de tungsténio (cátodo) | 8 - Material a projectar atomizado |
| 3 - Gás para formar o plasma | 9 - Revestimento |
| 4 - Ligação ao polo positivo e entrada de água | 10 - Substrato preparado |
| 5 - Entrada de pó com gás de suporte | 11 - Distância de projecção 64 a 152 mm |
| 6 - Electrodo de cobre (ânodo) | |

Fig. 2.8 - Corte de uma pistola de projecção por arco plasma [1].

Na figura seguinte (Fig. 2.9) está exemplificado o modo de funcionamento da projecção por arco plasma não transferido.



HF - ignição de alta frequência

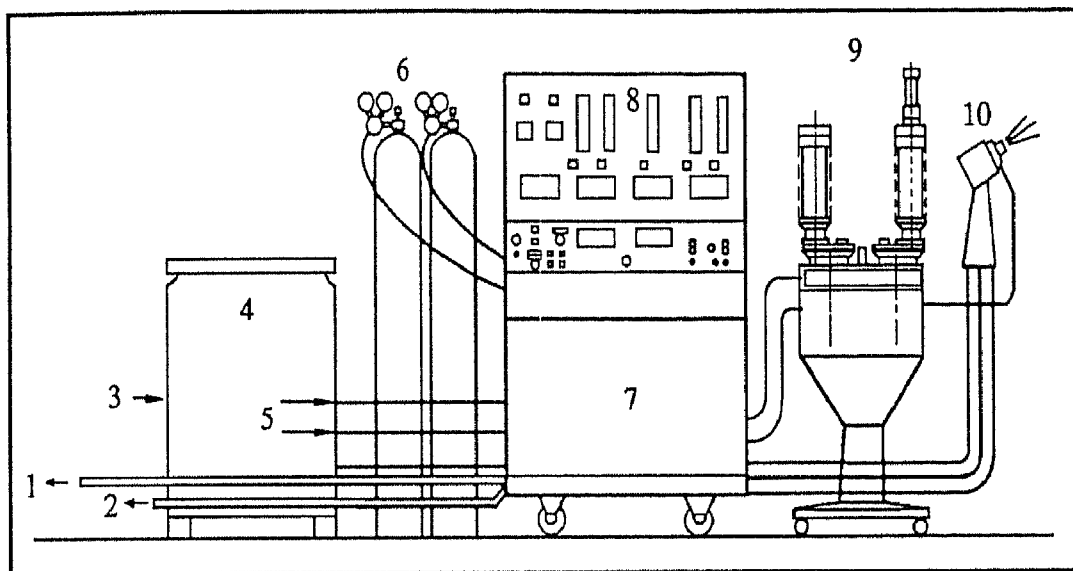
Fig. 2.9 - Modo de funcionamento por arco plasma não transferido [4].

Depois da descarga se ter dado, o plasma pode conduzir correntes contínuas acima dos 2000 A, e com uma tensão aproximadamente entre 30 e 80 V. Uma pistola de plasma normal tem uma potência de 40 kW mas podem ir até aos 80 kW, podendo as partículas projectadas atingir uma velocidade duas vezes superior à do som (600 m/s) [3].

Para formar o plasma primário usa-se o nitrogénio ou o argon. Um segundo gás (hidrogénio ou hélio) pode ser utilizado para aumentar a potência calorífica e a velocidade do plasma [1].

A proporção da mistura dos gases, o caudal dos gases, a corrente do arco eléctrico e o tipo de orifício, condicionam a potência calorífica, a temperatura e a velocidade do jacto do plasma. O arco produz-se com corrente contínua, proveniente duma fonte rectificadora de alimentação. Uma central de controlo regula a potência eléctrica, o caudal do gás plasmogénico e da água de arrefecimento, de modo a que o processo funcione com fiabilidade e precisão [1].

Uma instalação tipo para projecção por arco plasma é apresentada na figura seguinte (Fig. 2.10).



- | | |
|--|---|
| 1 - Entrada de água de arrefecimento | 6 - Gases plasmogénicos |
| 2 - Saída de água de arrefecimento | 7 - Ignição de alta frequência |
| 3 - Entrada de corrente alternada (AC) | 8 - Painel de comando |
| 4 - Fonte de alimentação contínua (DC) | 9 - Alimentadores de pó |
| 5 - Saída de corrente contínua (DC) | 10 - Pistola de projecção por arco plasma |

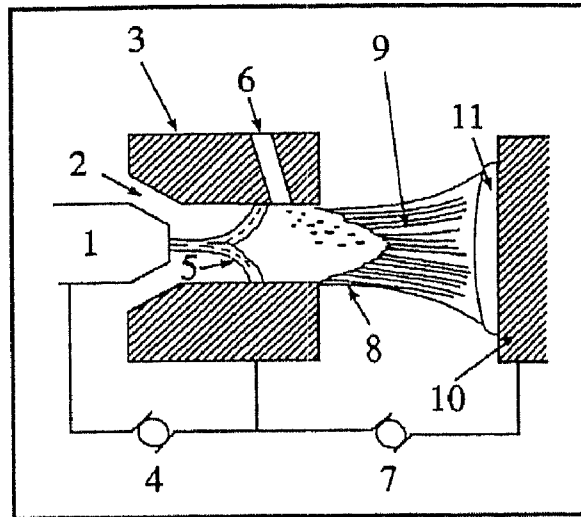
Fig. 2.10 - Desenho duma instalação típica para projecção por arco plasma [1].

2.2.2.2 - Revestimento por arco plasma transferido

A projecção por plasma de arco transferido é uma combinação de soldadura com projecção térmica. É introduzido material sob a forma de pó ou arame no fluxo do arco plasma. O material fundido ao atingir o substrato, arrefece, solidifica e dilui-se no metal (caso da soldadura) [1].

Neste processo, o arco eléctrico que se forma no eléctrodo não consumível ultrapassa o orifício e é levado pelo plasma até ao substrato condutor, que faz de ânodo. Usualmente os materiais que se projectam são o níquel-cobalto ou aços de composições químicas semelhantes aos usados na projecção à chama [1].

Na figura seguinte (Fig. 2.11) está representado o processo de projecção por arco plasma transferido.



- 1 - Eléctrodo de tungsténio (cátodo)
- 2 - Gás inerte
- 3 - Eléctrodo de cobre (ânodo) arrefecido a água
- 4 - Fonte de alimentação contínua do arco
- 5 - Arco eléctrico
- 6 - Entrada do pó
- 7 - Fonte de alimentação contínua da fusão
- 8 - Plasma
- 9 - Material a projectar atomizado
- 10 - Substrato (ânodo)
- 11 - Revestimento fundido

Fig. 2.11 - Modo de funcionamento por arco plasma transferido [3].

De todos os métodos de projecção térmica este é o que permite obter as maiores espessuras por passe (6,35 mm) para o revestimento e com uma taxa de deposição de 9 Kg/h. Também o consumo de energia é menor comparado com o arco plasma não transferido [3].

Devido a que ocorrem no meio de um gás neutro a fusão do material e a sua deposição, leva à inexistência de escórias que são uma fonte de impurezas e assim o revestimento obtido é espesso e uniforme. Comparadamente com os outros processos de projecção, o depósito por este método é mais localizado, mais denso e ligado metalúrgicamente ao substrato. No entanto é mais limitada a selecção dos materiais a projectar bem como dos substratos [1].

As desvantagens deste processo devem-se a que o substrato faz parte do sistema e assim aquece muito, sendo inevitável uma alteração na sua microestrutura [3].

O processo de projecção por plasma de arco transferido é particularmente utilizado para revestir substratos condutores de forma repetitiva, devido a ser facilmente automatizável [1].

Este processo é usado em aplicações que exijam superfícies duras, como por exemplo: válvulas de assentamento, charruas, máquinas para a indústria mineira e petrolífera, etc [3].

2.2.2.3 - Atmosfera controlada

A utilização duma atmosfera controlada possibilita melhorar a qualidade e a adesão dos revestimentos [1].

A projecção térmica usando uma atmosfera neutra com ou sem uma câmara de baixa pressão, passou a ser cada vez mais utilizada pela indústria de revestimentos particularmente para a indústria aeronáutica. A atmosfera inerte (rodear as partículas fundidas e abominadas com gás neutro) e sistemas de projecção de plasma a baixa pressão têm vindo a ser desenvolvidos, para serem meios eficazes de projectar complexos revestimentos à base de níquel, cobalto, crómio, alumínio e ítrio, capazes de suportar elevadas temperaturas. Apesar dos revestimentos produzidos pelos dois processos apresentarem algumas semelhanças, as propriedades físicas variam consideravelmente [1].

A câmara de projecção em atmosfera neutra é utilizada com dois objectivos [3]:

- Para confinar os materiais de projecção perigosos e impedir a formação de óxidos que ocorrem na projecção à pressão atmosfera.

Os materiais de projecção perigosos estão divididos em dois grupos [3]:

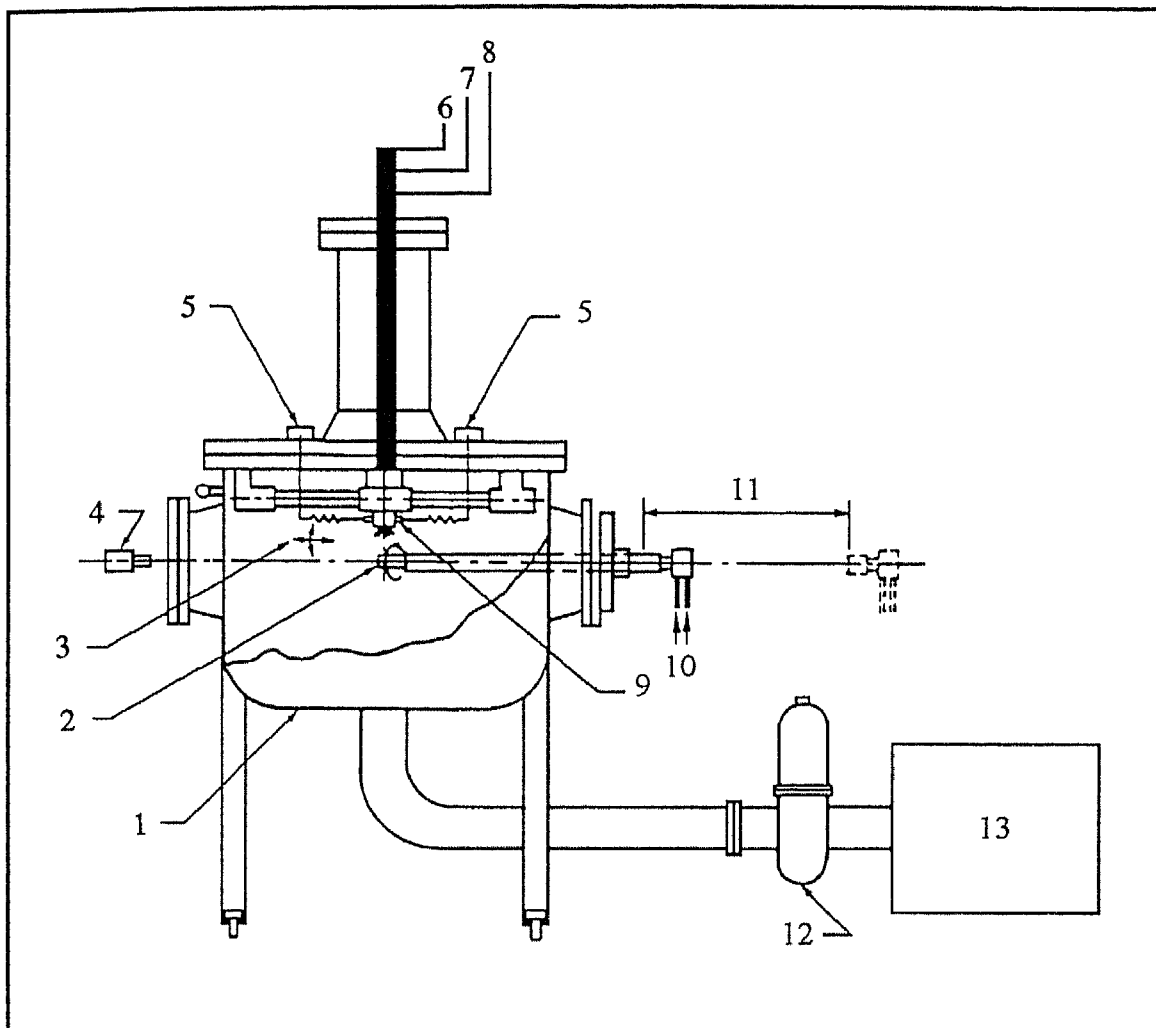
- Tóxicos (berílio e suas ligas);
- Piróforicos (magnésio, titânio, lítio, sódio e zircónia), que tendem a arder quando são purificados pelo processo de projecção por plasma.

Atmosfera neutra numa câmara de baixa pressão oferece grandes vantagens relativamente ao plasma convencional com atmosfera neutra mas à pressão atmosfera tais como [3]:

- Deposita revestimentos com óptimas propriedades físicas;
- O material projectado mantém a sua composição química original;
- Revestimentos com maiores forças de adesão devido a que, a elevada temperatura atingida pelo substrato provoca a difusão do depósito;
- Maior eficiência na deposição, devido a que as partículas passam mais tempo na zona de aquecimento do plasma;
- Por o sistema ser fechado, diminuem claramente os problemas relacionados com os pós libertados, bem como pelo ruído produzido.

Normalmente a câmara, é levada através duma bomba de vácuo até uma pressão de 10^{-2} a 10^{-3} Pa, sendo depois enchida com argon seco de elevada pureza. O pó projectado tende a ser limpo (sem humidade e impurezas), devido a que, o gás inerte provoca a redução dos óxidos superficiais [3].

Representa-se na figura seguinte (Fig. 2.12), uma instalação típica para a projecção térmica por plasma em atmosfera controlada.



- 1 - Câmara de baixa pressão
- 2 - Movimentos motorizados da peça a revestir
- 3 - Movimentos motorizados da pistola
- 4 - Unidade de leitura de temperaturas
- 5 - Alimentador de pó
- 6 - Alimentação da pistola com corrente contínua
- 7 - Água de arrefecimento da pistola
- 8 - Gases plasmogénicos
- 9 - Pistola de projecção por plasma
- 10 - Água de arrefecimento da peça a revestir
- 11 - Curso de trabalho da peça a revestir
- 12 - Filtro
- 13 - Bomba de vácuo

Fig. 2.11 - Desenho de um sistema de projecção por plasma em atmosfera controlada [1].

3 - Preparação das superfícies

3.1 - Generalidades

A preparação das superfícies é a fase mais crítica na operação de projecção térmica. A qualidade da adesão dos revestimentos é fortemente dependente da limpeza e da rugosidade do substrato. O tipo de substrato bem como o material do revestimento, são factores determinantes na escolha do modo de preparação da superfície.

Em componentes mecânicos muito solicitados torna-se indispensável à priori, uma inspecção do substrato por métodos não destrutivos, para detectar falhas. Os revestimentos obtidos por projecção térmica não eliminam as fissuras existentes no substrato, nem lhe acrescentam resistência mecânica.

3.2 - Limpeza e desengorduramento

A primeira fase na preparação das superfícies para a projecção térmica, consiste na remoção de todos os contaminantes superficiais, como: óleos, gorduras, tintas e óxidos, que prejudicam a adesão do revestimento.

3.2.1 - Desengorduramento por vapor

O desengorduramento por vapor quente é muito usado porque é um método eficiente e económico, na eliminação de contaminantes orgânicos. Os substratos devem ser encharcados durante 15 a 30 minutos, para remover os óleos existentes, nos interstícios e poros superficiais. Materiais porosos como os ferros fundidos grafiticos têm de estar mais tempo embebidos [1].

Se os objectos são muito grandes para o desengorduramento por vapor e submersão em detergentes quentes, a limpeza manual com solventes é a única possível. Os solventes normalmente utilizados para tal são o percloroetileno, tricloroetileno e tricloroetano, devido a questões de segurança para os operadores.

3.2.2 - Decapagem húmida

Utiliza ar comprimido para projectar uma pasta abrasiva húmida, composta por água e partículas abrasivas do tipo alumina de granulometria de 200 a 1200 µm.

Esta decapagem utiliza-se para [1]:

- Remover rebarbas provenientes da fundição;
- Eliminar produtos de corrosão;
- Retirar materiais depositados anteriormente;
- Criar rugosidade nas superfícies para serem revestidas por plasma ou por arco eléctrico.

3.2.3 - Outros métodos de limpeza

Também se pode utilizar outros métodos tais como limpeza por ultra-sons, decapagem por jacto abrasivo a seco, decapagem ácida, limpeza com escova de aço e evaporação num forno.

3.3 - Criação de rugosidade

Após a limpeza, é preciso criar uma rugosidade na superfície, para as partículas fundidas ou em estado pastoso ancorarem melhor, permitindo assim, a obtenção dum revestimento com melhor adesão mecânica.

O aumento da rugosidade das superfícies incrementa a adesão dos revestimentos, devido a que [1]:

- Origina tensões compressivas no revestimento;
- Promove a interligação das camadas do revestimento;
- Aumenta a área de ligação;
- Descontamina a superfície.

Para a obtenção do valor necessário para a rugosidade, a técnica mais utilizada é a decapagem por jacto abrasivo propulsionado por ar comprimido, mais conhecida por grenalhagem.

3.3.1 - Operação de grenalhagem

3.3.1.1 - Tipo e tamanho das grenalhas

O efeito da decapagem por jacto abrasivo depende do tipo e o do tamanho da grenalha. Partículas duras e afiadas produzem os melhores resultados. Todos os abrasivos devem ser secos e limpos de óleos, feldspatos e de outros contaminantes.

A selecção apropriada da grenalha depende da dureza do substrato. Os óxidos refractários com pontas aguçadas podem embeber-se em substratos macios como os de alumínio. As grenalhas de ferro endurecido que geralmente fracturam com o impacto, são indicadas para substratos com durezas inferiores a 40-45 HRc. Estas grenalhas criam normalmente maiores tensões nos substratos do que as de alumina, por esta razão não devem ser utilizadas em substratos de pequena espessura. A alumina deve ser utilizada em substratos duros como os de aço martensítico.

Na tabela seguinte (Tab. 3.1) estão descritos alguns tipos de grenalhas comercializadas.

Tipo de abrasivo	Natural ou sintético	Maior(es) componente(s) químico(s)	Forma	Densidade [kg/m ³]	Dureza HRc (Rockweel C)
Aço endurecido	Sintético	Ferro	Angular	7650	100
Ferro endurecido	Sintético	Ferro	Angular	7400	97
Alumina virgem	Sintético	Alumínio	Cúbica	3800	76
Alumina reciclada	Sintético	Alumínio	Cúbica	3760	66
Granada	Natural	Ferro e sílica	Cúbica	4090	54
Escória mineral	Sintético	Alumínio, sílica e ferro	Cúbica	2790	39
Sílex	Natural	Sílica	Muito angular	2610	33
Areia de sílica	Natural	Sílica	Cúbica	2610	23
Areia de sílica	Natural	Sílica	Angular	2630	10
Carbonetos de silício	Sintético	Carbonetos de silício	Em blocos	3810	43
Areia padrão	Natural	Sílica	Angular	2620	16

Tab. 3.1 - Características dos abrasivos normalmente utilizados na grenalhagem [1].

A rugosidade final das superfícies é função do tamanho das grenalhas, por isso, os abrasivos são fornecidos em várias dimensões. Partículas pequenas permitem a preparação de uma maior área de substrato por hora. Partículas grandes removem mais rapidamente material do substrato e criam rugosidades maiores.

Os tamanhos recomendados são para [1]:

- Substratos metálicos: 20 a 60 mesh;
- Substratos de plástico: 60 a 100 mesh.

Designação mesh (Nº)	Abertura da malha do crivo [µm]
20	850
40	425
60	256
80	180
100	150
140	106
200	75
230	63
325	45

Tab. 3.2 - Relação entre designação mesh e abertura da malha do crivo [4].

3.3.1.2 - Rugosidade obtida pela grenalhagem

A rugosidade superficial adequada à maior parte dos revestimentos obtidos por projecção térmica é de 2,5 μm a 13 μm . Em aplicações especiais como em substratos metálicos finos, a rugosidade tem de ser limitada a 1,3 μm . Para revestir substratos de plástico, com materiais de baixo ponto de fusão como o zinco, a rugosidade deve ser no mínimo de 6 μm . A adesão dos revestimentos normalmente aumenta com a rugosidade até aos 10 μm , altura em que o incremento passa a ser diminuto. A melhor adesão do revestimento ocorre quando a rugosidade do substrato é $\frac{3}{4}$ do diâmetro das partículas projectadas [1].

3.3.1.3 - Parâmetros da grenalhagem

Adicionalmente ao tipo e ao tamanho da grenalha, existem outras variáveis importantes como: a pressão do ar comprimido, o ângulo de grenalhagem, a abertura do bico, a distância de projecção e o tempo.

Indicam-se na tabela seguinte (Tab. 3.3) os parâmetros geralmente utilizados, na obtenção das rugosidades requeridas para os substratos de aço e de plástico.

Tamanho da grenalha [mesh]	Material da grenalha	Pressão de grenalhagem [kPa]	Diâmetro do bico [mm]	Tipo de máquina	Material do substrato	Rugosidade aritmética (Ra) [μm]
20	Alumina	414	7,9	Pressão	Aço	13
60	Carbonetos de silício ou alumina	414	7,9	Sucção	Aço inoxidável	6
80	Alumina	414	7,9	Pressão	Plástico	6

Tab. 3.3 - Condições normalmente usadas na operação de grenalhagem [1].

A pressão do ar comprimido varia entre 207 e 690 kPa, dependendo do tipo de substrato, da rugosidade pretendida, do caudal, peso e tamanho das partículas abrasivas e da máquina e abertura do bico utilizados. No caso de substratos macios como os de alumínio, ligas de cobre, bronze e plástico, deve-se utilizar ar comprimido com baixa pressão e grenalha fina.

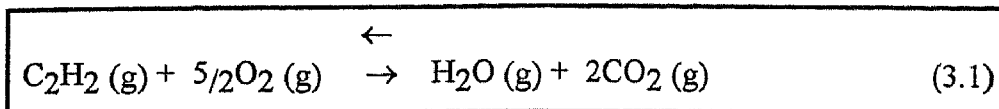
A distância de projecção varia dos 100 aos 300 mm, a abertura do bico de 6 a 10 mm e o ângulo de grenalhagem deve estar compreendido entre 75 e 90°.

3.4 - Pré-aquecimento

O pré-aquecimento é sempre considerado parte integrante da preparação do substrato. Serve para reduzir as tensões residuais dos revestimentos obtidos por projecção térmica, devido à expansão que provoca no substrato.

Um dos factores que influencia a adesão do revestimento e que deve ser tido em consideração é o seguinte:

Um dos dois produtos finais da chama oxiacetilénica é o vapor de água (de acordo com a reacção seguinte 3.1) e é o único produto final da chama oxihidrogénica.



Quando a chama da pistola de projecção encontra uma superfície fria o vapor de água condensa e a superfície fica molhada. Isto não é sempre aparentemente visível com o acetileno mas é bem notado com o hidrogénio. Quando as partículas fundidas metálicas ou cerâmicas, atingem a superfície molhada, o filme de água é instantaneamente vaporizado e ocorre uma violenta explosão por baixo das partículas, o que origina a diminuição da adesão do revestimento. A primeira camada do revestimento é a parte fundamental do depósito por isso condensados na superfície devem ser evitados a todo o custo.

Os testes feitos levam a afirmar que com o substrato à temperatura de 90°C, não se formam condensados mensuráveis. Em pequenos trabalhos o pré-aquecimento pode ser feito pela própria pistola de projecção à chama, em grandes trabalhos é mais eficiente a utilização duma fonte de calor externa. Em ambos os casos é essencial uma chama limpa (sem impurezas) e recomenda-se o uso de pistolas de chama oxiacetilénica [6].

Os metais e cerâmicas aderem melhor a superfícies quentes do que frias, para um qualquer valor de rugosidade superficial do substrato. No entanto um pré-aquecimento excessivo pode conduzir à oxidação da superfície que provoca uma fraca adesão do revestimento. Por isso, nunca se deve aquecer as superfícies de modo a alterar a sua cor visível.

O pré-aquecimento expande o substrato e é importante por duas razões [6]:

- ❶ - A combinação de substratos frios com baixo coeficiente de expansão térmica com uma rápida expansão dos revestimentos (no intervalo de tempo que levam a aquecer até fundir), origina que o revestimento fique sujeito a forças compressivas que o afastam do substrato. Isto ocorre devido ao revestimento estar "ancorado" nas rugosidades do substrato e assim ao dilatar tem que empolar, já que não pode expandir-se longitudinalmente (Fig. 3.1 a)).
- ❷ - A projecção em substratos de elevados coeficientes de expansão térmica, provoca grandes expansões no revestimento, devido ao facto, de estar sujeito a forças de tracção (originadas pela elevada dilatação do substrato) que podem provocar a ocorrência de fissuras no revestimento (Fig. 3.1 b)).

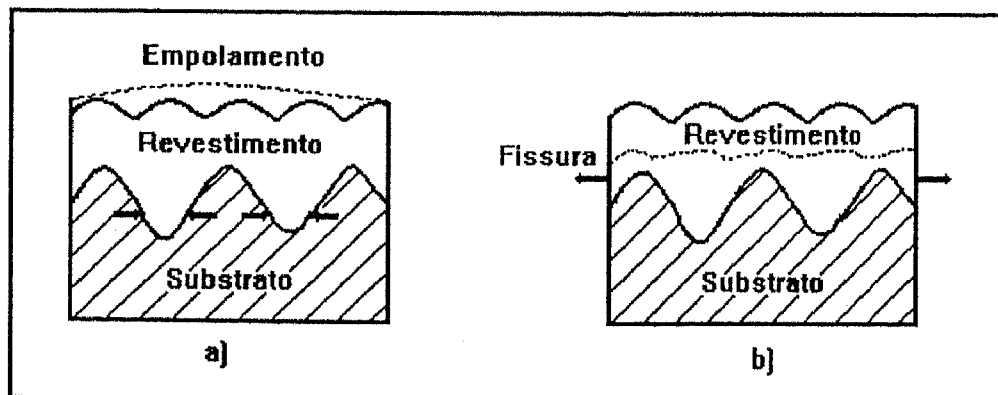


Fig. 3.1 - a) Substrato com baixo coeficiente de expansão térmica.
b) Substrato com elevado coeficiente de expansão térmica.

3.5 - Aplicação da camada de ligação

A utilização de camadas de ligação é outro método de preparação do substrato.

Numa grande gama de condições, certos materiais de revestimentos aderem forte a camadas de ligação limpas e lisas. Para se obterem os melhores resultados, o substrato deve ser grenalhado antes da projecção da camada de ligação ou camada intermédia.

A utilização da camada de ligação, é particularmente indicada para substratos muito finos e/ou duros, que não possam ser grenalhados.

Frequentemente, o material da camada de ligação é escolhido de forma a melhorar a adesão do revestimento e a permitir uma boa protecção do substrato.

3.5.1 - Espessuras da camada de ligação

A utilização de camada de ligação, muitas vezes limita a espessura do revestimento, posteriormente projectado.

A espessura projectada de camada de ligação deve ser suficientemente espessa para cobrir todo o substrato, normalmente de 0,08 a 0,18 mm [1]. Não é aconselhável a utilização de espessas camadas de ligação já que além de serem mais caras também têm adesões mais baixas.

3.5.2 - Materiais utilizados para camada de ligação

Os materiais comercializados, que permitem ser utilizados para camadas de ligação incluem, o molibedénio e o níquel-crómio e suas ligas. A projecção destes materiais promove uma ligação metalúrgica com o substrato, caracterizada por difusão, mistura, ou atracção intermolecular ou intergranular, normalmente mais forte que a ligação mecânica [3].

A tabela seguinte (Tab. 3.4) apresenta as mais típicas camadas de ligação com as respectivas temperaturas limites de serviço.

Material de camada de ligação	Temperatura limite de serviço	
	[°F]	[°C]
Molibedénio	600	315
80 Ni - 20 Al	1150	620
95 Ni - 5 Al	1850	1010
80 Ni - 20 Cr	2300	1260
94 NiCr - 6 Al	1800	980

Tab. 3.4 - Temperaturas limites de utilização de algumas camadas de ligação [1].

O níquel-alumínio é usado em muitas aplicações devido a suportar elevadas temperaturas e ser fácil de projectar na maioria dos substratos. Os materiais, tais como: o alumínio, estanho e zinco são indicados para servirem de camada de ligação em substratos de plástico, porque assim estão sujeitos a baixas temperaturas. O níquel-crómio é particularmente utilizado em utilizações que requeiram barreiras térmicas em condições de alta temperatura (1260 a 1316°C), devido a resistir melhor a choques térmicos que os outros materiais de camada de ligação [1].

4 - Características dos revestimentos

4.1 - Introdução

Para se perceber as características do depósito projectado, é necessário conhecer a cinética dos vários processos de projecção, com os seus combustíveis e materiais de projecção. Adicionalmente às condições de operação associadas ao processo de projecção, devem ser consideradas as características dos materiais em bruto utilizados, especialmente no caso de se tratarem de pós, tais como a forma, tamanho e densidade das partículas e o tipo de óxidos contidos. É muito importante o conhecimento das temperaturas de fusão e vaporização dos materiais de revestimento, porque restringem as suas aplicações bem como ditam as condições de projecção. Por exemplo, para a alumina pura, o intervalo de temperatura de transição líquido-vapor é apertado, e a vaporização pode ocorrer em condições de sobreaquecimento, produzido-se assim um revestimento muito poroso. O critério básico é que as partículas devem fundir completamente sem excessiva vaporização, e que permaneçam fundidas até atingirem o substrato. Apesar de ser mais fácil a fusão completa de partículas pequenas ($<5 \mu\text{m}$), elas levantam problemas na injeção adequada ao sistema de aquecimento.

Nos sistemas de projecção por plasma com alimentação externa de pós, o gradiente de velocidades da elevada energia do plasma, restringe a entrada de partículas finas na zona quente. Além disso, muitas partículas são transportadas para a periferia do jacto de plasma e assim não fundem o suficiente antes do impacto. Mais, as partículas pequenas arrefecem muito rapidamente e podem antes do impacto solidificar parcialmente.

Alguns modelos simplificados têm vindo a ser propostos para descrever a fusão das partículas sólidas num jacto de gás quente. Para se conseguir realizar a fusão das partículas no jacto de gases quentes, é necessário entrar em consideração com inúmeras variáveis do material do revestimento, tais como, o coeficiente de transferência de calor, a condutividade térmica e a temperatura de fusão. Estes valores foram combinadas numa equação de condução térmica e dinâmica do gás com o seguinte resultado [1]:

$$\frac{S \cdot (K \cdot \Delta T)^2}{V \cdot \mu} \geq \frac{L^2 \cdot D^2}{16 \cdot p} \quad (4.1)$$

(Jacto) (Partícula)

onde:

- S - Distância de projecção
- K - Condutividade térmica da camada de revestimento
- ΔT - Diferença de temperatura entre a camada de revestimento e o substrato
- V - Velocidade do jacto de gás
- μ - Viscosidade do jacto de gás
- L - Capacidade calorífica da partícula por unidade de volume à temperatura de fusão
- D - Diâmetro médio da partícula
- p - Massa específica da partícula

De acordo com a equação (4.1), existe um tempo crítico de permanência da partícula no jacto de gás bem como um tamanho crítico para que a fusão seja completa. O tempo de permanência da partícula no jacto de gás é determinada pela velocidade do gás, energia (condutividade térmica) e distância de projecção.

Entre C e C encontra-se a zona central que é circular ou oval e é aonde o revestimento é mais espesso e denso. O depósito na zona identificada como A-B é extremamente poroso. O revestimento projectado final contém uma mistura de material de cada uma das zonas, devido a que, durante a projecção existe movimento relativo entre a pistola e o substrato.

4.2.2 - Deposição das partículas

Durante o processo de projecção, as partículas são sobreaquecidas e impelidas com elevada velocidade (80 a 800 m/s dependendo do processo de projecção) contra o substrato. A porosa morfologia geralmente obtida na projecção, resulta do rápido esmagamento das partículas projectadas sobreaquecidas, independente da projecção ser feita directamente no substrato ou em camadas anteriores. Isto é conhecido como esmagamento-arrefecimento.

É importante conhecer a taxa de arrefecimento nos típicos processos de projecção. Outros factores devem ser considerados, tais como: a variação do tamanho das partículas, a sua localização no jacto quente e no caso de partículas metálicas, a formação de filmes óxidos.

Foi estudado o efeito do esmagamento das partículas fundidas por Billard e Gardeman/Hecht, projectando-as contra um vidro. Nestas experiências, uma lâmina de vidro foi passada rapidamente em frente do jacto e devido à solidificação das partículas, pôde-se examinar através dum microscópio a sua forma final (as partículas estavam ovalizadas) [1].

4.2.3 - Propriedades dos revestimentos

A maior vantagem da projecção térmica, prende-se com o facto de permitir obter revestimentos, aplicáveis a diferentes tipos de solicitações. Um dado material pode ser projectado de forma a produzir um revestimento duro ou macio, poroso ou denso. Esta versatilidade levanta algumas dificuldades quando queremos comparar propriedades catalogadas de revestimentos [1].

Os revestimentos obtidos por projecção térmica utilizam-se para proteger peças contra a corrosão, a oxidação, o desgaste (por adesão, abrasão e erosão) e altas temperaturas (barreiras térmicas). Também se utilizam na reparação de peças mecânicas fazendo enchimentos nas partes desgastadas.

Sendo de realçar, que o material projectado não confere resistência mecânica ou estrutural a uma peça que seja frágil. Só serve para aumentar a espessura (recuperando uma cota) e para proteger a superfície original.

Apresentam-se nas tabelas seguintes (Tab.^{as} 4.1, 4.2 e 4.3), algumas propriedades de revestimentos obtidos por projecção térmica que devem, no entanto, ser vistas como informação genérica.

Tipo de revestimento	Temperatura de fusão [°C]	Calor específico [J/(Kg.K)]	Coefficiente de expansão [m/m.°C]	Coefficiente de imissividade	Resistência ao choque térmico	Composição química [%]
Alumina	1982	0,067 (32-1700°C)	$2,3 \times 10^{-6}$ (21-1230°C)	0,8-0,4 (200-1000°C)	Boa	óxido de alumínio puro 98,6 Al ₂ O ₃
Zirconato de bário	2688	-----	$1,9 \times 10^{-6}$ (21-1100°C)	-----	-----	-----
Zirconato de cálcio	2340	-----	$2,6 \times 10^{-6}$ (21-1100°C)	-----	-----	-----
Óxido de crómio	1649	0,048 (16-1480°C)	$2,8 \times 10^{-6}$ (21-1090°C)	0,8-0,9 (100-1200°C)	Moderada	85 Cr ₂ O ₃
Aluminato de magnésio	1927	0,06 (21-1000°C)	$2,5 \times 10^{-6}$ (21-1090°C)	0,7-0,3 (100-1200°C)	Boa	98 MgO-Al ₂ O ₃
Zirconato de magnésio	2138	-----	$2,2 \times 10^{-6}$ (21-1100°C)	-----	-----	-----
Zirconato de estrôncio	2799	-----	$2,6 \times 10^{-6}$ (21-1100°C)	-----	-----	-----
Zircónia	2482	0,042 (27-1400°C)	$2,7 \times 10^{-6}$ (21-1230°C)	0,7-0,3 (200-1000°C)	Muito boa	ZrO ₂ +2% HfO ₂ +3,5-5% CaO
Silicato de zircónio	1648	0,04	$2,3 \times 10^{-6}$ (21-590°C)	0,7-0,3 (200-1000°C)	Boa	65 ZrO ₂ 34 SiO ₂

Tab. 4.1 - Propriedades térmicas e químicas de revestimentos cerâmicos (material de projecção em forma de arame) [1].

Tipo de revestimento	Forma cristalográfica	Massa específica [Kg/m ³]	Microdureza Knoop	Porosidade [%]
Alumina	Tipo gama	3300	2000	8,0
Zirconato de bário	Cúbica	5250	-----	10,0
Zirconato de cálcio	Cúbica	4414	-----	5,7
Óxido de crómio	Hezagonal	4600	1900	4,0
Aluminato de magnésio	Cúbica	3300	-----	6,0
Zirconato de magnésio	Cúbica	4520	-----	4,8
Zirconato de estrôncio	Ortorrômbica	4710	-----	9,8
Zircónia	Cúbica	5200	1000	8,0
Silicato de zircónio	Cúbica ZrO ₂ em vidro silicioso	3800	1000	8,0

Tab. 4.2 - Propriedades físicas e metalúrgicas de revestimentos cerâmicos (material de projecção em forma de arame) [1].

Tipo de revestimento	Resistência à compressão		Tensão de adesão ao aço		Deformação % de alongamento por unidade de comprimento (0,5 mm de espessura de revestimento)
	[Ksi]	MPa	[psi]	MPa	
Alumina	[37]	255	[1000]	6,89	0,7
Zirconato de bário	-----	-----	[1153]	9,5	-----
Zirconato de cálcio	-----	-----	[1125]	7,76	-----
Óxido de crómio	[105]	724	-----	-----	1,3
Zirconato de magnésio	-----	-----	[1000]	6,89	-----
Zirconato de estrôncio	-----	-----	[1129]	7,78	-----
Zircónia	[21]	145	[1000]	6,89	1,4
Silicato de zircónio	-----	-----	[1000]	6,89	0,7

Tab. 4.3 - Propriedades mecânicas de revestimentos cerâmicos (material de projecção em forma de arame) [1].

4.2.4 - Aspecto visual dos revestimentos

Os revestimentos obtidos por projecção térmica apresentam dois tipos diferentes de acabamento. Em certos casos, a rugosidade do revestimento é maior do que a do substrato grenalhado.

O rugosímetro indica normalmente para os revestimentos, valores de rugosidade aritmética (Ra), da ordem dos 2,5 aos 38 μm [1].

Na tabela seguinte (Tab. 4.4), indicam-se rugosidades de revestimentos, em função do tipo de projecção térmica utilizada.

Processo de projecção térmica	Rugosidades do revestimento [Ra]
Plasma de alta potência e detonação	1,5 a 2,2 μm
Plasma normal	2,5 a 12,5 μm
À chama de pós	25 a 38 μm
Arco eléctrico (pressão de atomização baixa)	3,2 mm

Tab. 4.4 - Rugosidades de revestimentos obtidos por vários processos de projecção [1].

A rugosidade obtida pelo revestimento, depende do tamanho dos pós projectado, quanto mais finos menos rugoso.

4.2.5 - Forças de adesão

A adesão do revestimento está relacionada com as interações que ocorrem entre as partículas projectadas e o substrato. Os mecanismos de ligação dividem-se em três categorias: mecânicos, metalúrgicos-químicos e físicos. A adesão é uma combinação das três. As partículas fundidas que se projectam no substrato grenalhado, achatam e conformam-se à rugosidade da superfície e aderem mecanicamente entre si e às asperezas do substrato. O mecanismo de adesão é metalúrgico-químico, quando a difusão e a mistura ocorrem, incluindo a formação de componentes intermetálicos e soluções sólidas. A adesão das partículas no substrato é sobretudo mecânica, isto enfatiza a importância duma superfície bem preparada, para se conseguir uma boa ligação.

Os materiais auto-ligantes (molibdénio, tântulo e ligas níquel-alumínio), exibem tensões de adesão maiores que 17 MPa. Por esta razão, eles são utilizados como camadas de ligação para subsequentes revestimentos. A boa adesão conseguida pelos materiais auto-ligantes é devida à fusão localizada e à sua diluição no substrato. O calor necessário à reacção provém das partículas fundidas projectadas e o grau de fusão-difusão é dependente da velocidade de arrefecimento das partículas [1].

4.2.6 - Tensões residuais

Como em outros tipos de depósitos, os revestimentos obtidos por projecção térmica contêm tensões residuais, que resultam da contracção que ocorre no arrefecimento e solidificação. As tensões residuais existem dentro do próprio corpo e não resultam de forças externas. A magnitude destas tensões depende do coeficiente de expansão térmica do material do revestimento.

As tensões residuais raramente originam problemas em revestimentos finos, mas podem causar fissurações nos depósitos espessos, sobretudo naqueles que utilizam materiais de revestimento com altos coeficientes de expansão térmica.

Os métodos que reduzem as tensões residuais nos revestimentos também reduzem as tensões de corte na ligação, e são os seguintes [1]:

- Dilatar o substrato antes da projecção, através dum pré-aquecimento;
- Escolher materiais para o substrato e revestimento, com baixos coeficientes de expansão térmica;
- Criar uma macrorugosidade no substrato para limitar a magnitude das tensões.

As tensões que ocorrem nos revestimentos são devidas à contracção individual das partículas, quando solidificam no substrato. Momentaneamente as partículas fundidas entram em contacto íntimo com partículas sólidas e frias, e assim, elas vão contrair na mesma proporção no tempo de pausa entre deposições, originando a acumulação de tensões. As forças de contracção criadas devido às variações térmicas, originam variações dimensionais e são largamente responsáveis pelo aparecimento de tensões residuais na projecção térmica.

A interface revestimento/substrato é sujeita a tensões de corte. Para se obter uma boa adesão dos revestimentos, só devem ser toleradas tensões normais à ligação, senão, podem ocorrer roturas na interface. Isto limita a espessura máxima de qualquer revestimento, porque as tensões de corte são proporcionais à espessura do depósito [1].

4.2.7 - Dureza

Os revestimentos obtidos por projecção térmica apresentam uma estrutura heterogénea, com óxidos e poros. Como resultado disto, os valores de macrodureza são menores dos que os obtidos com o mesmo material, tanto no estado puro de fundição ou de forjamento. A dureza dos depósitos projectados é determinada por testes de macro ou de microdureza. A macrodureza é a medida da resistência do depósito todo à penetração e é mensurável por testes de dureza Brinell ou Rockwell. A dureza numa partícula individual é medida por um teste de microdureza como o de Knoop, em que são usadas cargas de 50 a 100 g, ficando a impressão confinada a uma só partícula.

Os valores de macrodureza não são uma indicação verdadeira da dureza do revestimento, mas são uma indicação geral para a qualidade do revestimento. No caso de revestimentos metálicos uma dureza elevada é prenúncio de um depósito oxidado.

Em adição aos testes de dureza com penetrador, são também utilizados testes de dureza com arranhador para controlar a resistência dos revestimentos ao desgaste por fricção.

4.2.8 - Resistência à compressão

Os revestimentos obtidos por projecção térmica suportam maiores forças de compressão do que de tracção. A resistência à compressão é uma propriedade importante no uso de revestimentos em chumaceiras de rolamento, flanges e em encaixes de entalhes circulares. A resistência à compressão de alguns revestimentos cerâmicos está indicada na tabela 4.3 (pág. 28).

Os revestimentos finos são mais apropriados do que os depósitos espessos para transmitirem forças de compressão. Os revestimentos não fracturam quando são sujeitos subitamente a carregamentos de compressão.

4.2.9 - Resistência ao desgaste

Os revestimentos obtidos por projecção térmica são utilizados para aumentar a resistência ao desgaste de substratos macios.

Na deterioração das superfícies com a utilização, incluem-se os seguintes tipos de desgaste [1]:

- Erosão provocada por caudais de gases ou de partículas a alta velocidade;
- Corrosão por contacto;
- Deslizamento (fricção);
- Combinação de fricção e impacto;
- Cavitação;
- Esfolamento ou escoriação.

Os revestimentos obtidos por projecção térmica são geralmente mais resistentes ao desgaste do que o mesmo material no estado fundido ou forjado. Isto é devido à velocidade de arrefecimento das partículas, à estrutura resultante, à porosidade e no caso de revestimentos metálicos aos óxidos contidos. A porosidade nos revestimentos permite manter um filme lubrificante e albergar os detritos gerados pelo desgaste, permitindo assim, que o substrato exposto permaneça limpo.

4.2.10 - Fadiga

Existem muito poucos dados específicos no que concerne à resistência à fadiga dos revestimentos obtidos por projecção térmica. Os revestimentos não devem ser utilizados em aplicações que os sujeitem a esforços de tracção e/ou de flexão. A estrutura laminar do revestimento têm inerente propensão na propagação de fissuras quando solicitada a esses esforços.

A preparação do substrato para a projecção térmica afecta as propriedades do revestimento à fadiga. A grenalhagem ou outros métodos de criar rugosidade no substrato, diminuem a resistência à fadiga dos revestimentos de alumínio, ferro, cobalto e de níquel e suas ligas. Esta diminuição da resistência à fadiga depende do valor de rugosidade. No entanto o efeito da rugosidade pode ser muito atenuado, se antes da grenalhagem, se efectuar um endurecimento superficial do substrato (por exemplo: por martelagem).

Também a utilização de materiais auto-ligantes para camada de ligação, reduz significativamente a vida à fadiga de componentes de ligas de alta resistência.

Ocorrem reduções semelhantes na resistência à fadiga no caso de revestimentos de carbonetos obtidos por detonação ou por plasma de elevada energia. A perda das propriedades de fadiga é devida à fusão e difusão das partículas no substrato. Cada ponto de ataque serve de início para a propagação de fendas.

A posterior maquinagem dos revestimentos não aumenta significativamente a sua vida à fadiga.

4.2.11 - Ductilidade

Os revestimentos metálicos obtidos por projecção térmica apresentam uma ductilidade ligeiramente maior do que a do ferro fundido, no entanto é menor do que a da maioria dos restantes materiais fundidos. Isto deve-se ao facto, da ligação do revestimento ser mecânica, consequência da adesão coesiva entre as partículas. Quando a ligação coesiva é rompida, o revestimento parte e desintegrase.

A ductilidade dos revestimentos raramente excede os 2% [1].

5 - Controlo da qualidade dos revestimentos

5.1 - Métodos de teste destrutivos

A adesão é a propriedade mais importante dos revestimentos obtidos por projecção térmica. Consequentemente esta secção vai-se concentrar muito nesse atributo. Também apresenta outro tipo de métodos para a determinação de outras propriedades de interesse dos revestimentos.

5.1.1 - Método padrão para a determinação da força de adesão

O método padrão para a determinação da força de adesão ou coesão dos revestimentos projectados à chama em substratos metálicos, é descrito pela norma ASTM C633-79. O teste consiste, em revestir uma face do substrato (provete) e cola-lhe um contra-provete com um adesivo apropriado à base de cianocrilatos e em seguida tracioná-los (Fig. 5.1). O teste é realizado à temperatura ambiente devido às limitações dos adesivos a altas temperaturas.

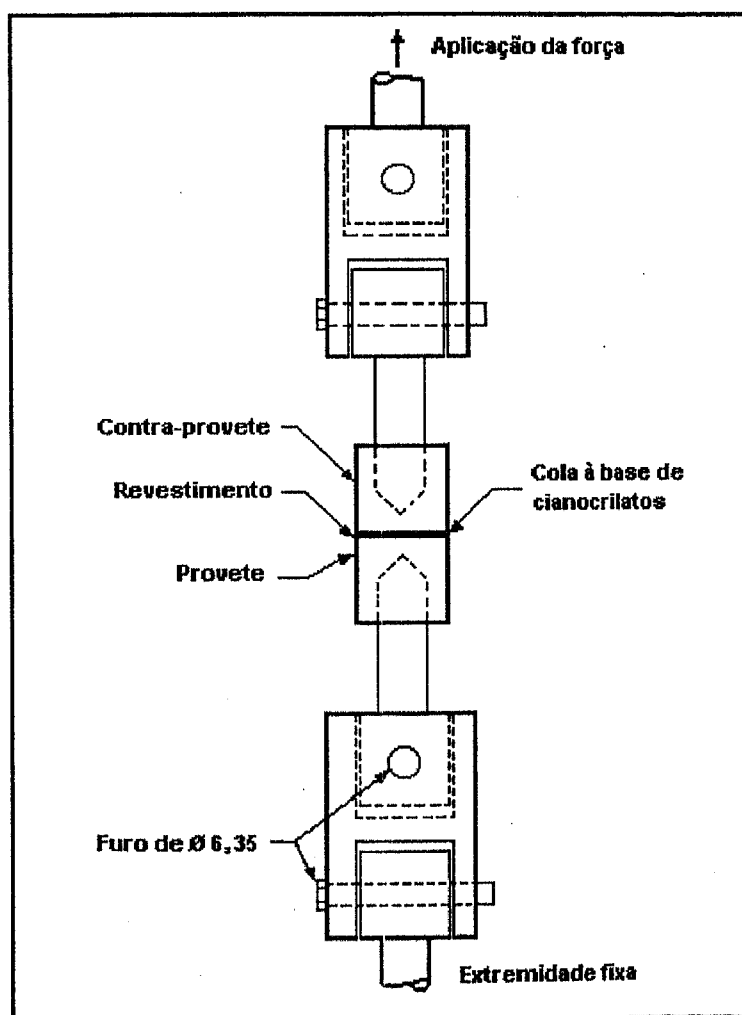


Fig 5.1 - Ensaio de adesão para revestimentos obtidos por projecção à chama segundo a norma ASTM C633-79 [7].

O teste de adesão é fácil de executar e é muito útil no controle de qualidade e permite a feitura duma classificação dos vários tipos de revestimentos com os respectivos modos de projecção [1].

Mostra-se na figura seguinte (Fig. 5.2) o modo de fractura do revestimento, que pode ser adesivo ou coesivo. Uma fractura adesiva ocorre quando todo o revestimento se separa do substrato. A fractura adesiva pura raramente acontece, devido à natureza rugosa da superfície do substrato. No caso duma fractura coesiva, a rotura ocorre inteiramente dentro do revestimento.

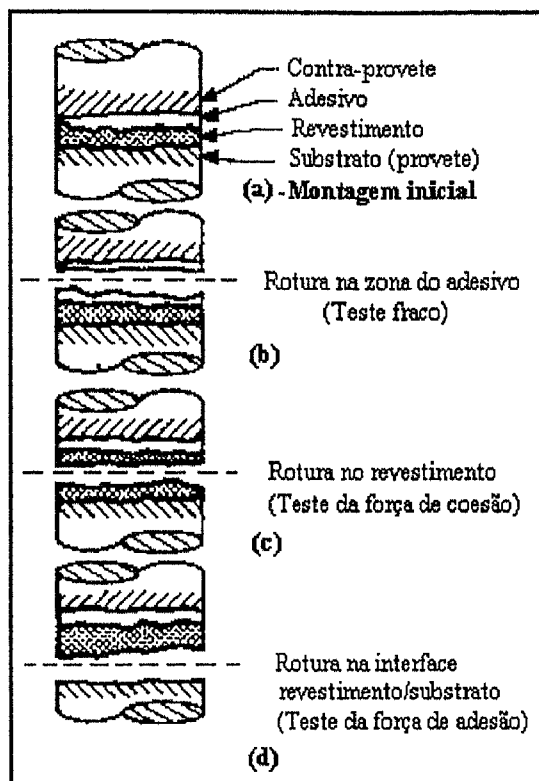


Fig. 5.2 - Modos de fractura do revestimento [1].

A tensão da adesão ou coesão é determinada pela relação:

$$\sigma = F/A \quad (5.1)$$

onde:

- σ - Tensão de adesão ou coesão - Força por unidade de área;
- F - Força máxima de rotura;
- A - Secção transversal do contra-provete.

Muitas outras técnicas baseadas neste método, têm vindo a ser experimentadas, no entanto, todas elas sofrem da possibilidade de erros no teste e as desvantagens são as seguintes [1]:

- ❶ - A área onde está o revestimento é usada no cálculo da tensão de rotura mesmo que a fractura ocorra apenas dentro do adesivo. Este método não é correcto porque os resultados do teste revelam uma ligação defeituosa ou por exemplo, um carregamento efectuado de esguelha;

- ② - O modo de carregamento do revestimento não reproduz o tipo típico de tensões que se lhe deparam na sua vida útil;
- ③ - O valor determinado é influenciado pela simetria da montagem e pela penetração do adesivo estrutural nos poros do revestimento;
- ④ - O adesivo tem de ter uma maior resistência à tracção do que o revestimento;
- ⑤ - A elevada temperatura de cura do adesivo pode afectar a adesão do revestimento, devido à alteração da distribuição das forças residuais;
- ⑥ - A superfície de fractura do contra-provete pode exhibir ambas as fracturas adesiva e coesiva. Neste caso, o teste de adesão dá-nos apenas o valor de quando estão presentes os dois tipos de fractura;
- ⑦ - O modo como a estrutura do revestimento contribui para a adesão, não é realmente percebido sem a avaliação quantitativa dos vários modos de adesão. Os testes de adesão por tracção não permitem este tipo de estudos;
- ⑧ - Nos revestimentos os defeitos na forma de microfissuras, poros e inclusões de segundas fases afectam a adesão.

As características principais dos adesivos utilizados nestes ensaios (à base de cianocrilatos), após cura de 2 minutos, são [4]:

- Ponto de fusão: 165°C;
- Índice de refacção: 1,4;
- Temperatura de serviço: -80° a +80°C;
- Resistência à tracção aço sobre aço: ≈ 29 MPa (Tensão de adesão máxima encontrada para revestimentos por projecção à chama: 21 MPa);
- Resistência à tracção\corte: ≈ 18 MPa;
- Resistência aos solventes: a imersão durante 24 horas em álcool, benzeno ou acetona não têm praticamente qualquer efeito.

5.1.2 - Forças de corte

Mostra-se na figura seguinte (Fig. 5.3) uma montagem experimental que permite testar revestimentos a forças de corte. O revestimento é carregado ao corte no estado em que foi projectado. Neste ensaio utiliza-se o mesmo tipo de adesivos dos testes de adesão (à base de cianocrilatos).

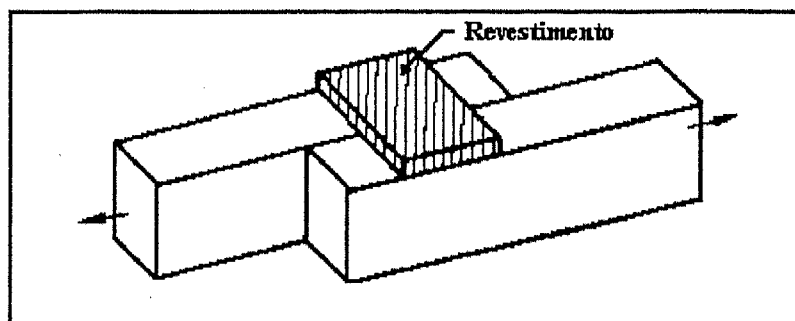


Fig. 5.3 - Montagem para o teste ao corte de revestimentos [1].

5.1.3 - Forças de coesão

A força coesiva caracteriza o valor de ligação entre as partículas. É determinada pela utilização dum revestimento separado do substrato. Este depósito projectado, é maquinado de forma a obter-se um provete normalizado, sendo depois testado da maneira convencional em ensaios de tracção.

5.1.4 - Testes de macrodureza

O teste de dureza Rockwell é o mais utilizado na determinação da macrodureza. A marca do penetrador estende-se na maior área possível. As escalas Rockwell 15Y e 15W são recomendadas para materiais macios [1].

Na determinação dos valores de macrodureza a espessura do revestimento é o factor mais importante. A tabela 5.1 serve-nos de guia, sendo de notar que as espessuras apresentadas são após maquinagem (rectificação) do depósito. O revestimento é normalmente rectificado pelas seguintes razões: para aplanar a sua superfície e assim permitir uma medida mais correcta da dureza e para a peça revestida obdecer às tolerâncias impostas (dimensional e geométrica).

Escala de Rockwell	Espessuras [mm]
15N	0,40
30N	0,64
45N	0,90
A	1,0
B	1,6
C	1,8
D	1,3
15Y	1,8
15W	1,8

Tab. 5.1 - Espessuras mínimas requeridas para o teste de dureza Rockwell [1].

5.1.5 - Testes de microdureza

Os testes utilizados na obtenção da microdureza são os de Knoop e de Vickers.

A dureza Knoop (KHN) é medida por um penetrador de diamante com a forma romboidal e com cargas de 10 a 1000 g. A carga de 50 g é utilizada para a determinação da dureza duma só partícula, conseguindo-se assim que a marca do penetrador se confina à partícula a medir.

O teste de microdureza de Vickers (DPH) utiliza um penetrador de diamante na forma piramidal e é usado na determinação da dureza de depósitos muito duros como, os de carbonetos. A carga usada é de 300 g. A impressão estende-se sobre uma série de partículas e a dureza é a razão da carga com a área de impressão, calculada pelo comprimento das diagonais do quadrado da impressão.

5.1.6 - Ensaios de desgaste

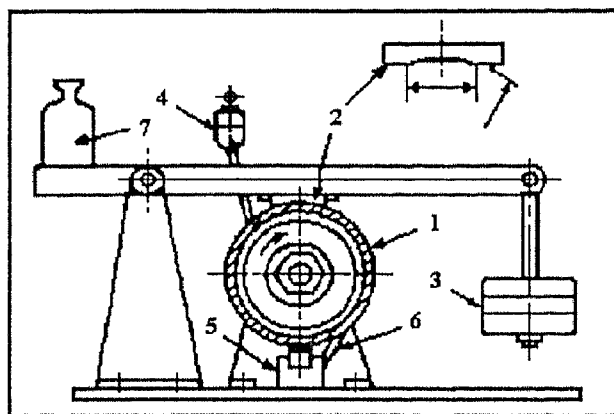
Os testes de desgaste normalmente utilizados na indústria de revestimentos obtidos por projecção térmica, são [1]:

- Desgaste por fricção lubrificada, metal-metal (abrasão a dois corpos);
- Desgaste por fricção, metal-areia-metal (abrasão a três corpos);
- Erosão por partículas sólidas.

5.1.6.1 - Teste de abrasão a dois corpos

É útil na determinação de taxas de desgaste em muitas combinações de materiais e condições de utilização.

Representa-se na figura 5.4 uma máquina típica de desgaste por fricção a dois corpos. O provete utilizado de dimensões $20 \times 60 \text{ mm}^2$ é obtido pela maquinagem numa peça revestida com 6 mm de espessura. A avaliação do desgaste é feita através da comparação com materiais homogêneos tais como, os de alumínio e aço no estado fundido ou forjado.



- | | |
|----------------------|---------------------------------------|
| 1 - Roda de ensaio | 4 - Bujão de lubrificação gota a gota |
| 2 - Provete de teste | 5,6 - Raspadores de óleo |
| 3 - Pesos | 7 - Contra-peso |

Fig. 5.4 - Máquina do ensaio de abrasão lubrificada a dois corpos [1].

5.1.6.2 - Teste de abrasão a três corpos

Este tipo de ensaio permite conhecer a propensão dos materiais a resistir à abrasão com partículas duras.

Está representado na figura 5.5 uma montagem que permite o teste de abrasão a três corpos. Um abrasivo com um tamanho específico é interposto entre o provete e o disco rotativo abrasivo de dureza determinada.

Os provetes são pesados antes e depois do teste e o peso perdido é convertido em volume.

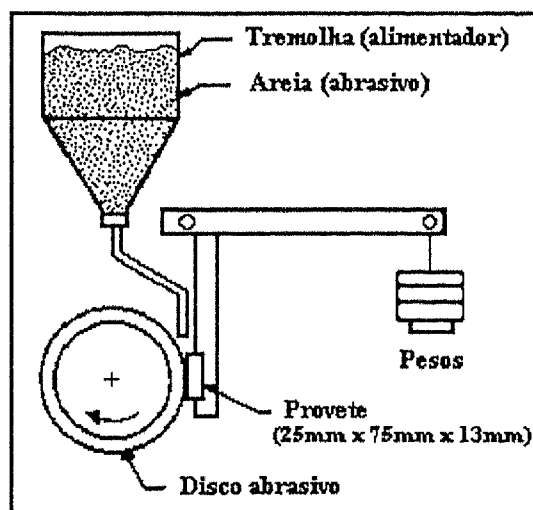


Fig. 5.5 - Esquema de montagem do ensaio de abrasão a três corpos [1].

5.1.6.3 - Teste de erosão

Uma pré-determinada quantidade de alumina ($\phi=1,25\mu\text{m}$) em pó é projectada através dum orifício de diâmetro conhecido contra o provete, usando um caudal de ar de 12 l/min. O tempo de grenalhagem é cerca de 100 s.

A erosidade é mensurada por:

$$E = t / D \quad (5.2)$$

sendo:

- E - Erosidade;
- t - Tempo de projecção;
- D - Altura da ranhura da erosão.

5.1.7 - Ensaios de fadiga

Os testes de fadiga por flexão e torção são usados na determinação dos seguintes efeitos [1]:

- Novos métodos de preparação das superfícies;
- Novos materiais utilizados;
- Modificações nos processos de aplicação dos revestimentos.

Submetem-se a testes de fadiga de poucos (LCF) ou muitos ciclos (HCF), provetes metálicos normalizados devidamente revestidos.

A avaliação é baseada na curva de fadiga obtida através dos resultados.

5.1.8 - Testes de resistência à corrosão e oxidação

A resistência à corrosão e oxidação é usada para estimar a vida útil de um dado revestimento numa dada condições ambientais.

São testes acelerados como os ASTM B117, que usam soluções salinas. O ambiente do ensaio contém à partida contaminantes, tais como: hidrocarbonetos, sais, sulfuretos, etc.

5.1.9 - Testes de resistência ao choque térmico

Na determinação da resistência dos revestimentos ao choque térmico são utilizados os seguintes dois tipos de testes [1]:

- ❶ - Um provete revestido é aquecido e rapidamente arrefecido em água;
- ❷ - Um lado do provete revestido é aquecido enquanto o outro lado é arrefecido.

O primeiro, refere-se a um teste empírico que permite avaliar as diferenças dos coeficientes de expansão térmica entre o material do revestimento e do substrato.

O segundo é excelente para verificar as características dos revestimentos à desintegração ou esboroamento, principalmente para os que são utilizados em barreiras térmicas.

5.2 - Métodos de teste não destrutivos

Os testes não destrutivos aplicados aos revestimentos obtidos por projecção térmica, são especialmente dedicados à determinação da sua espessura, rugosidade e aspecto visual.

No estabelecimento dos procedimentos usam-se: calibradores, micrómetros, detectores de espessuras e pesos, perfilómetros e técnicas semelhantes, amplificadores, microscópio estereóptico e líquidos penetrantes.

As técnicas mais utilizadas dividem-se em vários grupos, baseados em efeitos térmicos, luminosos, de som, magnéticos e eléctricos.

5.2.1 - Medidores de espessuras de revestimentos

O medidor de espessuras magnético é muito utilizado na indústria dos revestimentos. Este aparelho dá-nos uma leitura directa no mostrador, da espessura de todos os revestimentos não magnéticos em substrato de aço ou ferro. O medidor mede a distância de interrupção do seu circuito magnético.

A espessura de revestimentos metálicos em substratos não condutores, pode ser determinada por um equipamento que utiliza uma resistência de precisão. O instrumento lê directamente em miliohms que depois são convertidos em espessura de revestimento. A curva de calibração dos transdutores é obtida a partir de medidas de espessuras conhecidas.

Na tabela 5.2 são dados valores típicos de resistência de revestimentos de zinco em substratos de plástico.

Espessura do revestimento [mm]	Resistência [miliohms]
0,025	6,08
0,127	4,98
0,25	2,51
0,20	1,98
0,76	0,094
2,5	0,054
5,1	0,041
7,6	0,033

Tab. 5.2 - Resistência do revestimento de zinco em plástico em função da espessura [1].

5.2.2 - Métodos luminosos para detectar falhas na ligação

Encontra-se na fase experimental a aplicação da interferometria e halografia nos revestimentos projectados em substratos metálicos. Estas técnicas são capazes de detectar modificações muito pequenas da superfície, tais como as devidas a uma falta de ligação pontual do revestimento.

5.2.3 - Métodos de medida sonoros

Os métodos acústicos geralmente dão informações sobre propriedades mecânicas. A transmissão do som através dum sólido está relacionada com o seu estado físico.

Estão a ser desenvolvidas técnicas por eco ultra-sónico pulsado, que podem ser utilizadas com sucesso na detecção de zonas de ligação fraca.

Os instrumentos de ressonância acústica emitem numa larga banda de frequências e picos de ressonância e revelam-nos áreas pouco aderentes e outros tipos de falhas. São insensíveis a esta técnica, os revestimentos finos projectados em espessos e densos substratos metálicos.

A libertação da energia das tensões num sólido é acompanhada de emissões acústicas, que podem ser detectadas por um transdutor colocado na superfície. Para ter aplicação nos revestimentos, é exigida a comparação dos ruídos emitidos com os padrões estabelecidos.

5.2.4 - Outros métodos não destrutivos

O teste por correntes de Eddy é um método electromagnético, no qual correntes pequenas são induzidas no material. As correntes de Eddy em superfícies polidas, podem revelar fissuras no revestimento.

Outro teste é fazer a análise do fluxo magnético dos materiais revestidos. Esta análise é feita recorrendo a campos eléctricos alternados e a uma bobina de ensaio que realiza um estudo complexo do campo disperso do fluxo. Este método é unicamente utilizado em substratos ferromagnéticos, a sua utilização não necessita de contacto directo mas não é fiável em superfícies lisas.

2ª PARTE

TRABALHO EXPERIMENTAL

6 - Ensaios preliminares de projecção à chama robotizada para determinar eficiências de deposição

6.1 - Objectivos: - Determinação de eficiências de deposição e de espessuras de revestimentos em função do ângulo de projecção

Estes ensaios preliminares são trabalho complementar e têm como objectivo, a determinação e a comparação da eficiência de deposição da camada de ligação (Ni-Al-Mo; METCO 447NS) e dos revestimentos propriamente ditos (zircónia-ZrO₂; METCO 201NS) e (alumina-Al₂O₃; METCO 105NS), em função do ângulo de projecção (90° e 65°).

A eficiência da deposição é obtida através do cálculo da razão entre o peso do revestimento e o do material projectado.

Outro objectivo é a determinação da espessura da mesma camada de ligação e dos mesmos revestimentos, utilizando um medidor de espessuras por correntes de Eddy (método não destrutivo), e a comprovação dos resultados através duma observação microscópica do perfil dos revestimentos.

6.2 - Substratos utilizados

Foram utilizadas nestes ensaios seis placas de latão (60%Cu/40%Zn), quatro de dimensões 130 x 90 x 20 mm³ e duas de dimensões 130 x 90 x 10 mm³.

6.3 - Trajectória de deposição ou projecção

Na figura seguinte (Fig. 6.1) está representada a trajectória de deposição utilizada.

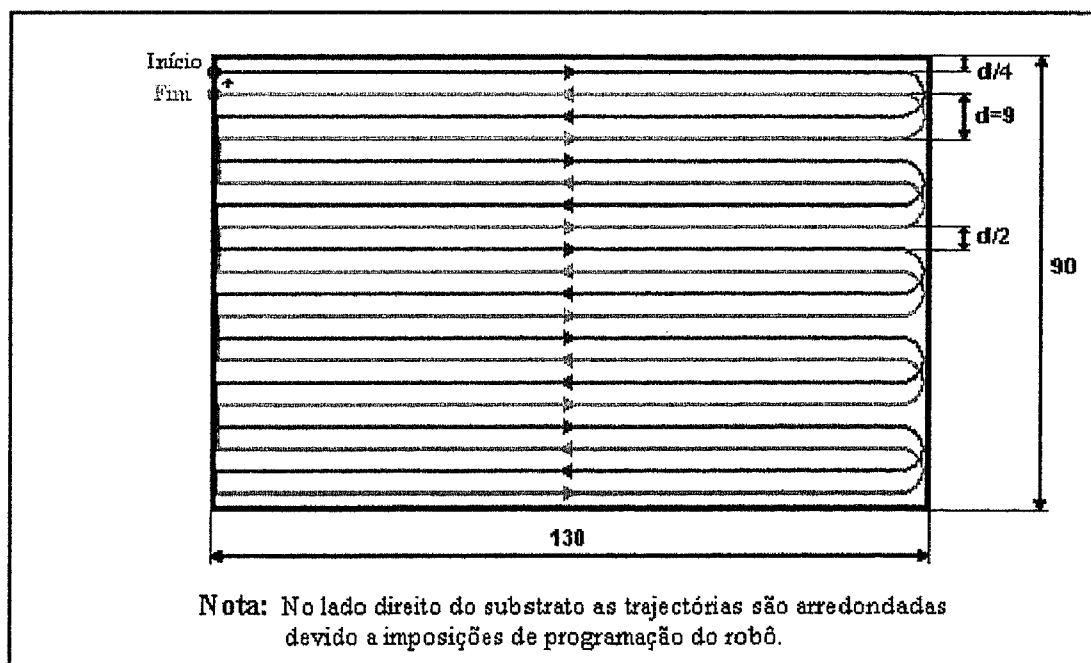


Fig. 6.1 - Trajectória do deslocamento da pistola de projecção.

Um passe equivale à distância de 2770 mm percorrida pela pistola, isto é, entre o início e o fim, representado na figura anterior (Fig. 6.1).

A programação da trajectória foi feita na consola do robô, e permite variar a distância entre linhas da trajectória (d), o número de passes ou passagens, a velocidade de deslocamento da pistola e a distância de projecção.

A distância entre linhas da trajectória (d) foi arbitrada, deve ser a menor que não provoque um aquecimento exagerado na peça. Já que quanto mais pequena for, melhor será o acabamento final do revestimento.

6.4 - Cálculo do número de passes ou passagens de projecção

O número de passes que se utiliza na projecção depende da espessura pretendida para o revestimento e dos parâmetros de projecção dos materiais.

Na tabela seguinte (Tab. 6.1) indicam-se características físicas dos materiais projectados (na forma de pó), bem como os seus parâmetros de projecção, segundo os respectivos catálogos técnicos da METCO.

Características dos pós utilizados e parâmetros de projecção	Material de projecção		
	METCO 447NS (Ni-Al-Mo)	METCO 201NS (zircónia)	METCO 105NS (alumina)
Tipo de orifício da pistola de projecção	K	K	K
Caudal de acetileno [l/min]	26,5	22	22
Caudal de oxigénio [l/min]	42	30	37
Caudal de azoto [l/min]	6,9	6,9	6,9
Pressão de acetileno [bar]	1,5	1,5	1,5
Pressão de oxigénio [bar]	4,5	4,5	4,5
Pressão de azoto [bar]	5,5	5,5	5,5
Pressão do jacto de ar comprimido [bar]	----	----	5
Velocidade de rotação do doseador [rpm]	9,8	11,6	9,3
Taxa de saída do pó [g/min]	34	30	15
Distância de projecção [mm]	100 - 175	75	75
Temperatura de fusão [°C]	660	2535	2000
Massa específica [kg/m ³]	7200	5200	3200
Porosidade [%]	< 2	10	2
Peso de pó necessário por área para revestir com 0,1mm de espessura [Kg/m ²]	0,8	1,04	1,07
Peso por área de revestimento de 0,1 mm de espessura [Kg/m ²]	0,72	0,52	0,32
Eficiência de deposição [%]	90	50	30
Temperatura de pré-aquecimento [°C]	90 - 120	95 - 150	----
Velocidade de deslocamento da pistola de projecção [m/s]	0,25 - 0,41 (sem jacto de ar comprimido)	0,2 - 0,4 (sem jacto de ar comprimido)	0,02 (com jacto de ar comprimido)

Tab. 6.1 - Características físicas e parâmetros de projecção dos materiais utilizados de acordo com os catálogos do fabricante (METCO) [8].

6.4.1 - Camada de ligação (Ni-Al-Mo)

Composição química típica: Ni - 89,5% ; Al - 5,5% ; Mo - 5% (METCO 447NS) [8].

Espessura pretendida = 0,1 mm

Área de projecção ou deposição = 130 mm x 90 mm = 11700 mm² = 0,0117 m²

Os valores que se seguem foram retirados da tabela 6.1, para o material (447 NS):

1 - Massa específica = 7200 Kg/m³ (Porosidade < 2%)

2 - Taxa de saída de pó = 34 g/min

3 - Eficiência de deposição = 90%

4 - Velocidade de deslocamento da pistola (0,25 - 0,41 m/s) = (15 - 25 m/min)

Peso do revestimento para revestir uma área

(130x90 mm²) com 0,1 mm de espessura = $7200 \times 130 \times 90 \times 0,1 \times 10^{-9} = 0,0084$ Kg

Peso de pó necessário para revestir uma área

(130x90 mm²) com 0,1 mm de espessura = $0,0084 / 0,9 = 0,0094$ Kg = 9,4 g

Tempo de deposição = $9,4 / 34 = 0,2765$ min = 16,6 s

Espaço percorrido por passe = 2770 mm = 2,77 m

1 passe $\Rightarrow$ velocidade = espaço percorrido/tempo de deposição = $2,77/16,6 = 0,167$ m/s

2 passes $\Rightarrow$ velocidade = $2,77 \times 2/16,6 = 0,334$ m/s ($0,25 \leq \text{velocidade} \leq 0,41$ m/s)

Conclusão: Para obtermos matematicamente uma espessura de 0,1 mm, iremos fazer dois passes (passagens), com uma velocidade de deslocamento da pistola de 0,334 m/s (20 m/min), com um tempo de deposição de 16,6 s.

6.4.2 - Camada de revestimento de zircónia

Composição química típica: óxido de zircónio - 93% ; óxido de cálcio - 5%

óxido de alumínio - 0,5% ; dióxido de silício - 0,4%

outros óxidos - 1,1% (METCO 201 NS) [8].

Uma das principais aplicações da zircónia é em barreiras térmicas.

Espessura pretendida = 0,2 mm

Área de projecção ou deposição = 130 mm x 90 mm = 11700 mm² = 0,0117 m²

Os valores que se seguem foram retirados da tabela 6.1, para o material (201 NS):

1 - Massa específica = 5200 Kg/m³ (Porosidade = 10%)

2 - Taxa de saída de pó = 30 g/min

3 - Eficiência de deposição = 50%

4 - Velocidade de deslocamento da pistola (0,2 - 0,4 m/s) = (12 - 24 m/min)

Vai ser utilizada uma velocidade de deslocação da pistola de 20 m/min, que está dentro dos limites recomendados e que já foi a seleccionada para a projecção da camada de ligação.

Peso do revestimento para revestir uma área
(130x90 mm²) com 0,2 mm de espessura = $5200 \times 130 \times 90 \times 0,2 \times 10^{-9} = 0,0122 \text{ Kg}$

Peso de pó necessário para revestir uma área
(130x90 mm²) com 0,2 mm de espessura = $0,0122 / 0,5 = 0,0244 \text{ Kg} = 24,4 \text{ g}$

Tempo de deposição = $24,4 / 30 = 0,8133 \text{ min} = 48,8 \text{ s}$

Espaço percorrido por passe = 2770 mm = 2,77 m

Número de passes = (velocidade x tempo de deposição) / espaço percorrido por passe
= $20 \times 0,8133 / 2,77 = 5,87 \Rightarrow 6 \text{ passes}$

Conclusão: Iremos fazer seis passes (passagens), com uma velocidade de deslocamento da pistola de 20 m/min, obtendo matematicamente uma espessura de 0,205 mm ($0,2 \times 6 / 5,87$), no tempo de deposição de 50 s ($2,77 \times 6 \times 60 / 20$).

6.4.3 - Camada de revestimento de alumina

Composição química típica : óxido de alumínio - 98,5%
dióxido de silício - 1%
outros óxidos - 0,5% (METCO 105 NS) [8].

Uma das principais aplicações da alumina é em barreiras térmicas.

Espessura pretendida = 0,2 mm

Área de projecção ou deposição = $130 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} = 11700 \text{ mm}^2 = 0,0117 \text{ m}^2$

Os valores que se seguem foram retirados da tabela 6.1, para o material (105 NS):

- 1 - Massa específica = 3200 Kg/m^3 (Porosidade = 2%)
- 2 - Taxa de saída de pó = 15 g/min
- 3 - Eficiência de deposição = 30%
- 4 - Velocidade de deslocamento da pistola = 0,02 m/s (1,22 m/min)

Nota: Não vai ser possível projectar com a velocidade de trabalho recomendada (1,22 m/min), devido a que o nosso robô não a permite (a velocidade toma valores discretos entre 0 e 90 m/min com incrementos mínimos de 0,27 m/min). A velocidade mais próxima que é possível obter é de 1,35 m/min ($1,08 \text{ m/min} < 1,22 \text{ m/min} < 1,35 \text{ m/min}$), por isso vai ser a utilizada.

Peso do revestimento para revestir uma área
(130x90 mm²) com 0,2 mm de espessura = $3200 \times 130 \times 90 \times 0,2 \times 10^{-9} = 0,0075 \text{ Kg}$

Peso de pó necessário para revestir uma área
(130x90 mm²) com 0,2 mm de espessura = $0,0075 / 0,3 = 0,0250 \text{ Kg} = 25,0 \text{ g}$

Tempo de deposição = $25,0 / 15 = 1,6667 \text{ min} = 100 \text{ s}$

Espaço percorrido por passe = 2770 mm = 2,77 m

Número de passes = (velocidade x tempo de deposição) / espaço percorrido por passe
= $1,35 \times 1,6667 / 2,77 = 0,812 \Rightarrow 1$ passe

Conclusão: Iremos fazer um passe (passagem), com uma velocidade de deslocamento da pistola de 1,35 m/min, obtendo matematicamente uma espessura de 0,246 mm ($0,2 \times 1 / 0,812$), no tempo de deposição de 123 s ($2,77 \times 1 \times 60 / 1,35$).

6.5 - Descrição dos ensaios preliminares de projecção

Foram realizados seis ensaios preliminares, sendo os três primeiros executados com um ângulo de projecção de 90° e os restantes com 65°. Na tabela seguinte (Tab. 6.2) é dada uma descrição genérica dos ensaios.

Número do ensaio preliminar	Dimensões da placa [mm ³]	Material projectado	Ângulo de projecção
1º	1ª - 130 x 90 x 20	Camada de ligação (Ni-Al-Mo)	90°
2º	2ª - 130 x 90 x 20	Ni-Al-Mo + zircónia (ZrO ₂)	90°
3º	3ª - 130 x 90 x 20	Ni-Al-Mo + alumina (Al ₂ O ₃)	90°
4º	4ª - 130 x 90 x 20	Camada de ligação (Ni-Al-Mo)	65°
5º	5ª - 130 x 90 x 10	Ni-Al-Mo + zircónia (ZrO ₂)	65°
6º	6ª - 130 x 90 x 10	Ni-Al-Mo + alumina (Al ₂ O ₃)	65°

Tab. 6.2 - Planificação dos ensaios preliminares.

6.5.1 - Camada de ligação (1º e 4º ensaios)

Nestes ensaios vai ser projectada a camada de ligação (Ni-Al-Mo; METCO 447NS). A única diferença entre os dois ensaios é o ângulo de projecção (no 1º ensaio - 90° e no 4º ensaio - 65°).

Antes da projecção propriamente dita, vai-se proceder ao pré-aquecimento do substrato (placa de latão nº1 ou nº4, conforme seja o 1º ou 4º ensaio), este é feito através da pistola comandada pelo robô, segundo a trajectória definida na figura 6.1.

Os procedimentos do ensaio foram por esta ordem os seguintes:

1 - Grenalhagem do substrato (placa nº1 ou nº4), nas seguintes condições:

- ângulo de incidência ($\phi = 90^\circ$);
- tempo de grenalhagem = 60 s;
- pressão do ar comprimido = 3 bar;
- grenalha de corindon (alumina quase pura).

2 - Pesagem da mesma placa numa balança de precisão.

(Peso inicial da placa nº1 = 1950,54 g)

(Peso inicial da placa nº4 = 1960,75 g)

- 3 - Colocação precisa da placa de latão no suporte de projecção. Pôr o nariz tipo K na pistola de projecção e introduzir pó METCO 447 NS no doseador.
- 4 - Introduzir na consola de controle de gases e pós, os seguintes parâmetros (Tab. 6.3) para a projecção da camada de ligação e para o pré-aquecimento:

Parâmetros de projecção	PROGRAMA DA CONSOLA	
	Pré-aquecimento	Camada de ligação (METCO 447 NS)
Caudal de acetileno [l/min]	25	26,5
Caudal de oxigénio [l/min]	37	42
Caudal de azoto [l/min]	6,9	6,9
Velocidade de rotação do doseador [rpm]	0	9,8

Tab. 6.3 - Parâmetros de projecção introduzidos na consola de controle de gases e pós.

- 5 - Programação da trajectória de deposição segundo a figura 6.1, na consola de programação do robô. O programa permite programar independentemente as características das 3 fases da projecção, que são: o pré-aquecimento, a camada de ligação e o revestimento final.

Introdução das seguintes variáveis no programa da consola do robô de projecção:

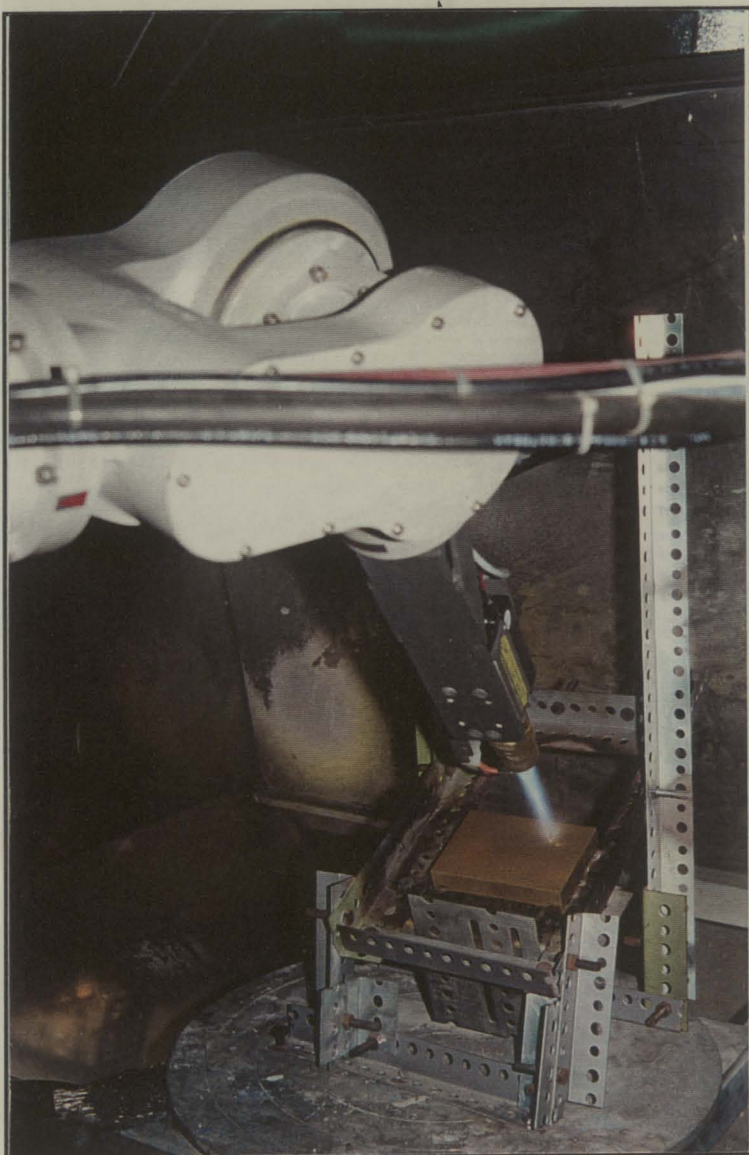
Para o pré-aquecimento:

- número de passes ou passagens = 2;
- velocidade de trabalho = 20 m/min;
- programa do pré-aquecimento (Tab. 6.3);
- distância entre linhas da trajectória (d) = 9 mm;
- distância de projecção = 140 mm.

Para a projecção da camada de ligação (Ni-Al-Mo):

- número de passes = 2;
- velocidade de trabalho = 20 m/min (0,33 m/s) [Tab. 6.1];
- programa da camada de ligação (Tab. 6.3);
- distância entre linhas da trajectória (d) = 9 mm.
- distância de projecção = 140 mm (Tab. 6.1).

- 6 - Executa-se o programa do robô, para fazer em duas passagens seguidas o pré-aquecimento da placa de latão, que deverá estar no intervalo de 90 a 120 °C (Tab. 6.1). Na fotografia seguinte (Fot. 6.1) mostra-se como foi feito o pré-aquecimento.

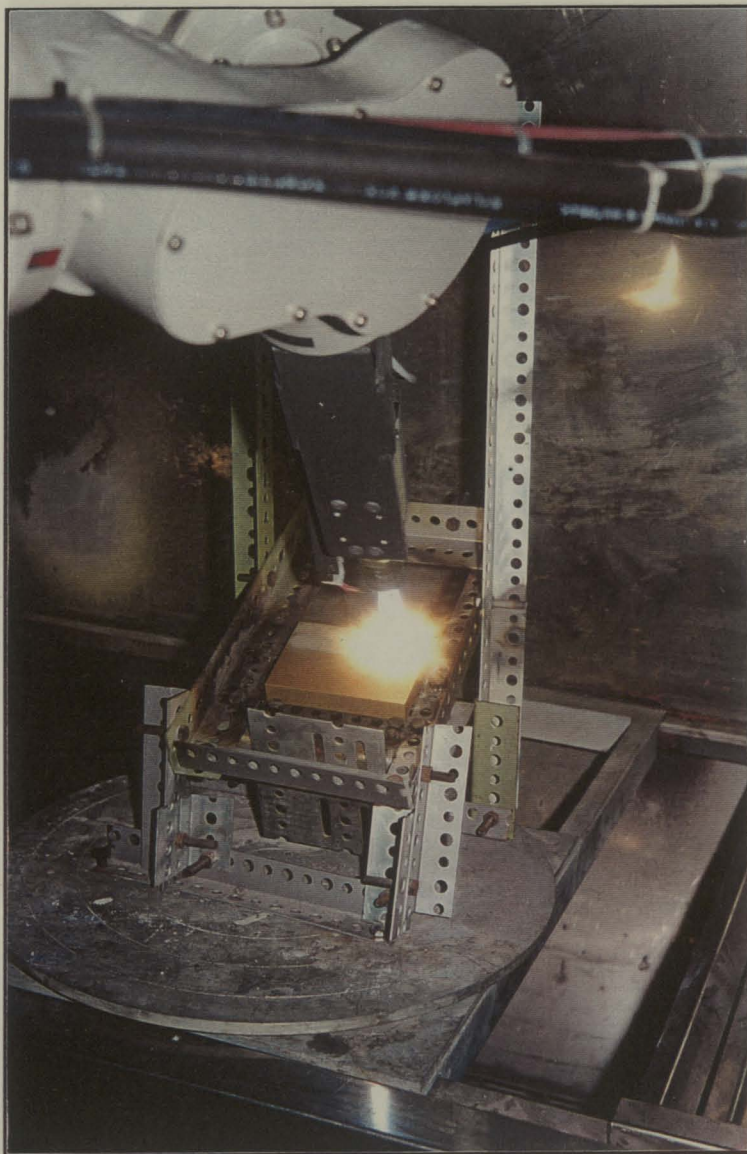


Fot. 6.1 - Fase do pré-aquecimento da placa de latão (4º ensaio - projecção a 65°).

- 7 - Paragem do programa do robô, para se proceder à medição da temperatura do pré-aquecimento, utilizando um pirômetro de contacto. Foram medidas temperaturas em vários locais aleatórios da placa, não se verificando no entanto, diferenças significativas entre elas e o tempo de contacto do pirômetro com a placa, foi sempre o necessário para que o valor lido de temperatura, estabilizasse no seu mostrador digital de cristais líquidos (aproximadamente 10 segundos).

[Temperatura $\approx 100^{\circ}\text{C}$, nas placas nº1 e nº4]

- 8 - Continuação da execução do programa do robô, para se efectuar a projecção da camada de ligação (METCO 447 NS) em duas passagens seguidas. A fotografia seguinte (Fot. 6.2) mostra a projecção da camada de ligação (Ni-Al-Mo).

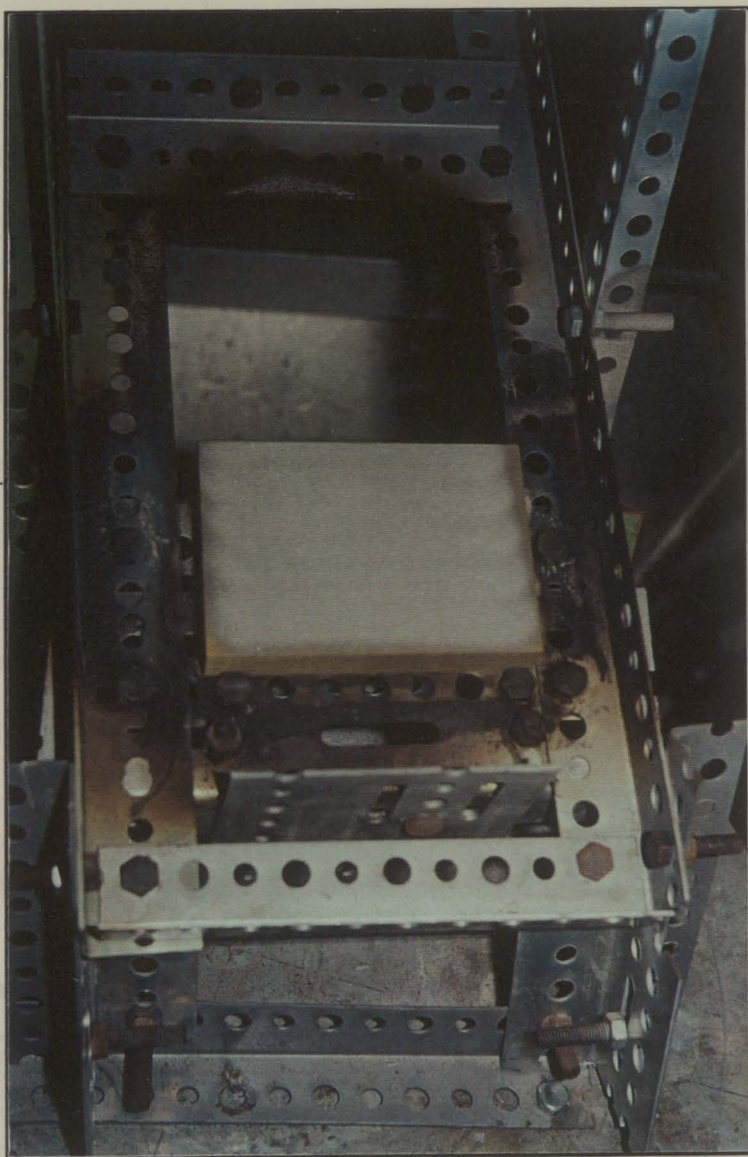


Fot. 6.2 - Projecção da camada de ligação (4º ensaio - projecção a 65°).

- 9 - Medição da temperatura final da camada de ligação da placa (após projecção), utilizando um pirómetro de contacto. Foram medidas temperaturas em vários locais aleatórios da camada de ligação da placa, não se verificando no entanto, diferenças significativas entre elas e o tempo de contacto do pirómetro, foi sempre o necessário para que o valor lido de temperatura, estabilizasse no seu mostrador digital de cristais líquidos (aproximadamente 15 segundos).

[Temperatura $\approx 150^{\circ}\text{C}$, nas placas nº1 e nº4]

A fotografia seguinte (Fot. 6.3) mostra o aspecto final da camada de ligação (Ni-Al-Mo).



Fot. 6.3 - Placa de latão com a camada de ligação (4ºensaio - projecção a 65°).

- 10 -** Nova pesagem da placa de latão na balança de precisão (após a projecção da camada de ligação(Ni-Al-Mo) - METCO 447 NS).

Placa nº1(Peso final =1961,40 g) $\Rightarrow$ Peso METCO447NS = (1961,40 - 1950,54) = **10,86 g (90°)** Taxa de deposição = 27,2 g/min ; Eficiência de deposição = 73%

Placa nº4(Peso final =1970,62 g) $\Rightarrow$ Peso METCO447NS = (1970,62 - 1960,75) = **9,87 g (65°)** Taxa de deposição = 24,7 g/min ; Eficiência de deposição = 67%

- 11 -** Ensaio específico para medir a taxa de saída do pó METCO 447 NS (Ni-Al-Mo). Colocou-se um goblé de vidro na ponta da pistola (sem chama) e pesou-se a quantidade de pó que saiu em 30 segundos.
(Em 30 segundos saíram 18,5 g de pó $\Rightarrow$ Taxa de saída de pó = 37 g/min)

6.5.2 - Camada de ligação + zircónia (2º e 5º ensaios)

Nestes ensaios vai ser projectada a camada de ligação e a zircónia. A única diferença entre os dois ensaios é o ângulo de projecção (no 2ºensaio - 90° e no 5º - 65°).

Começa-se por fazer o pré-aquecimento da placa de latão nº2 ou nº5, conforme o ensaio, depois projecta-se a camada de ligação (METCO 447 NS) nas placas nº2 e nº5 respectivamente nas mesmas condições dos 1º e 4º ensaios. E logo a seguir projecta-se a camada de revestimento de zircónia (METCO 201 NS).

Como a camada de ligação se vai projectar nas mesmas condições dos 1º e 4º ensaios, respectivamente nas placas nº2 e nº5, vamos considerar que, nestes ensaios se vai depositar na placa de latão o mesmo peso de METCO 447 NS (Ni-Al-Mo), para assim ser possível calcular o peso depositado de zircónia.

Os procedimentos dos ensaios foram por esta ordem os seguintes:

- 1 - Grenalhagem da placa nº2 ou nº5, nas mesmas condições dos 1º e 4º ensaios.
- 2 - Pesagem da mesma placa numa balança de precisão.
(Peso inicial da placa nº2 = 1954,20 g)
(Peso inicial da placa nº5 = 978,17 g)
- 3 - Colocação precisa da placa de latão no suporte de projecção. Pôr o nariz tipo K na pistola de projecção e introduzir os pós METCO 447 NS e METCO 201 NS, cada um no seu doseador.
- 4 - Introduzir na consola de controle de gases e pós, os seguintes parâmetros (Tab. 6.4) do pré-aquecimento, da projecção da camada de ligação e do revestimento de zircónia:

Parâmetros de projecção	PROGRAMA DA CONSOLA		
	Pré-aquecimento	Camada de ligação (METCO 447 NS)	Zircónia (METCO 201 NS)
Caudal de acetileno [l/min]	25	26,5	22
Caudal de oxigénio [l/min]	37	42	30
Caudal de azoto [l/min]	6,9	6,9	6,9
Velocidade de rotação do doseador [rpm]	0	9,8	11,6

Tab. 6.4 - Parâmetros de projecção introduzidos na consola de controle de gases e pós.

- 5 - Introdução das seguintes variáveis no programa da consola de programação do robô de projecção:

Para o pré-aquecimento: as mesmas dos 1º e 4º ensaios.

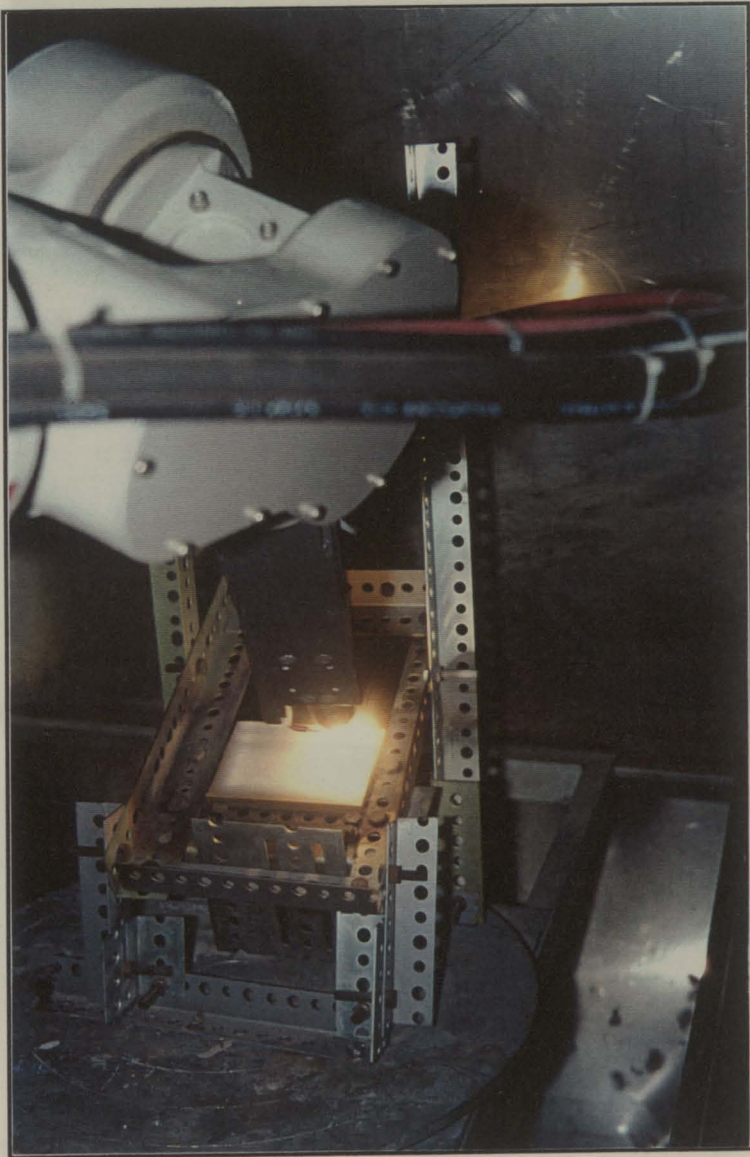
Para a projecção da camada de ligação: as mesmas dos 1º e 4º ensaios.

Para a projecção da camada de revestimento de zircónia:

- número de passes = 6;
- velocidade de trabalho = 20 m/min (0,33 m/s) [Tab. 6.1];
- programa da projecção da zircónia (Tab. 6.4);
- distância entre linhas da trajectória (d) = 9 mm;
- distância de projecção = 75 mm (Tab. 6.1).

- 6, 7, 8, 9 - Os mesmos procedimentos e valores dos 1º e 4º ensaios.

- 10** -Continuação da execução do programa do robô, para se efectuar a projecção da camada de revestimento de zircónia (METCO 201 NS) em seis passagens seguidas. A fotografia seguinte (Fot. 6.4) mostra a projecção da zircónia.

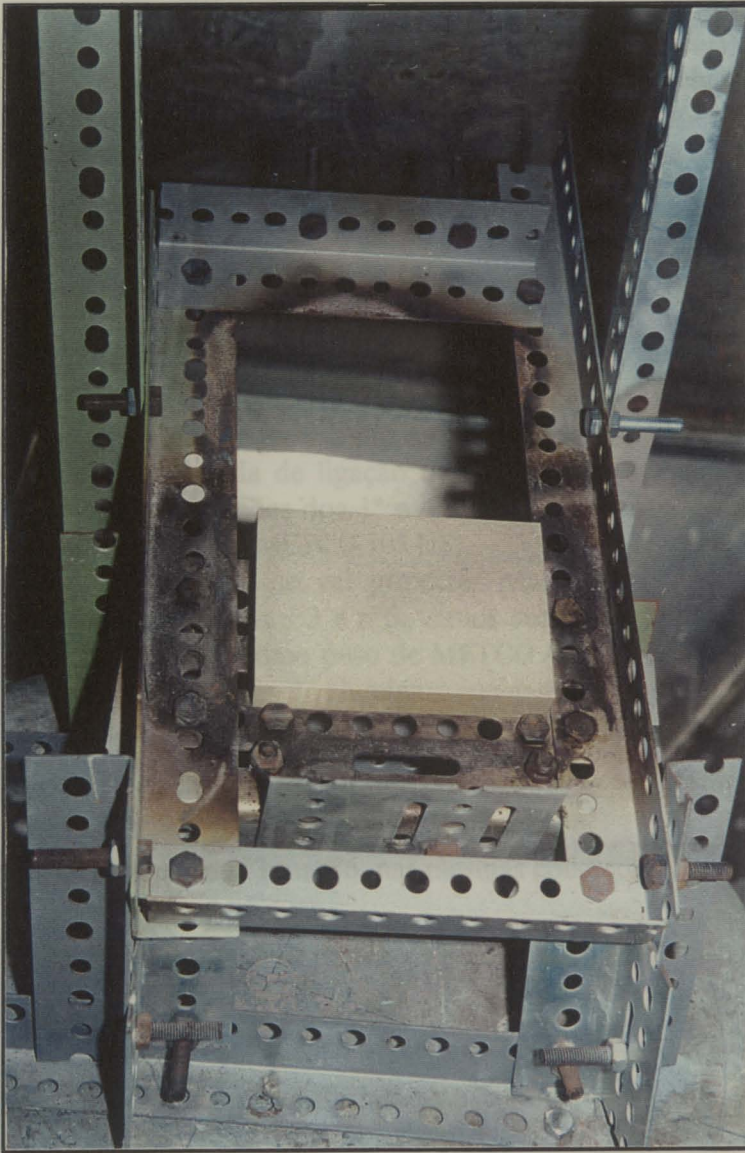


Fot. 6.4 - Projecção do revestimento de zircónia (5º ensaio - projecção a 65°).

- 11** - Medição da temperatura final da camada de revestimento de zircónia da placa (após projecção), utilizando o pirómetro de contacto. Foram medidas temperaturas em vários locais aleatórios da camada de revestimento de zircónia da placa, não se verificando no entanto, diferenças significativas entre elas e o tempo de contacto do pirómetro, foi sempre o necessário para que o valor lido de temperatura, estabilizasse no seu mostrador digital de cristais líquidos (aproximadamente 20 segundos).

[Temperatura $\approx 235^{\circ}\text{C}$, nas placas nº2 e nº5]

A fotografia seguinte (Fot. 6.5) mostra o aspecto final do revestimento de camada de ligação e zircónia.



Fot. 6.5 - Placa de latão após a projecção da zircónia (5º ensaio - projecção a 65°).

12 - Determinação do peso final da placa de latão na balança de precisão.

Placa nº2 (Peso final = 1972,60 g) $\Rightarrow$ Peso depositado = (1972,60 - 1954,20) = **18,40 g**

Peso depositado = Peso de pó METCO 447NS* + Peso de pó METCO 201NS

Peso de pó METCO 201 NS (zircónia) = 18,40 - 10,86* = **7,54 g**

* é igual à da placa nº1 (camada de ligação)

(90°) METCO 447NS: Taxa de deposição = 27,2 g/min ; Eficiência de deposição = 73%

(90°) METCO 201NS: Taxa de deposição = 6,1 g/min ; Eficiência de deposição = 22%

Placa nº5 (Peso final = 994,20 g) $\Rightarrow$ Peso depositado = (994,20 - 978,17) = **16,03 g**

Peso depositado = Peso de pó METCO 447NS" + Peso de pó METCO 201NS

Peso de pó METCO 201 NS (zircónia) = 16,03 - 9,87" = **6,16 g**

" é igual à da placa nº4 (camada de ligação)

(65°) METCO 447NS: Taxa de deposição = 24,7 g/min ; Eficiência de deposição = 67%

(65°) METCO 201NS: Taxa de deposição = 5,0 g/min ; Eficiência de deposição = 18%

13 - Determinação da taxa de saída do pó METCO 201 NS (zircónia).

Colocou-se um goblé de vidro na ponta da pistola (sem chama) e pesou-se a quantidade de pó que saiu em 30 segundos.

(Em 30 segundos saíram 14,0 g de pó $\Rightarrow$ Taxa de saída de pó = 28 g/min)

6.5.3 - Camada de ligação + alumina (3º e 6º ensaios)

Nestes ensaios vai ser projectada a camada de ligação e a alumina. A única diferença entre os dois ensaios é o ângulo de projecção (no 3º ensaio - 90° e no 6º - 65°).

Começa-se por fazer o pré-aquecimento da placa de latão nº3 ou nº6, conforme o ensaio, depois projecta-se a camada de ligação (METCO 447 NS) nas placas nº3 e nº6 respectivamente nas mesmas condições dos 1º e 4º ensaios. E logo a seguir projecta-se a camada de revestimento de alumina (METCO 105 NS).

Como a camada de ligação se vai projectar nas mesmas condições dos 1º e 4º ensaios, respectivamente nas placas nº3 e nº6, vamos considerar que, nestes ensaios se vai depositar na placa de latão o mesmo peso de METCO 447 NS (Ni-Al-Mo), para assim ser possível calcular o peso depositado de alumina.

Os procedimentos dos ensaios foram por esta ordem os seguintes:

- 1 - Grenalhagem da placa nº3 ou nº6, nas mesmas condições dos 1º e 4º ensaios.
- 2 - Determinação do peso inicial da placa numa balança de precisão.
(Peso inicial da placa nº3 = 1934,60 g)
(Peso inicial da placa nº6 = 989,31 g)
- 3 - Colocação precisa da placa de latão no suporte de projecção. Pôr o nariz tipo K na pistola de projecção e introduzir os pós METCO 447 NS e METCO 105 NS, cada um no seu doseador.
- 4 - Introduzir na consola de controle de gases e pós, os seguintes parâmetros (Tab. 6.5) para o pré-aquecimento e para a projecção da camada de ligação e do revestimento de alumina:

Parâmetros de projecção	PROGRAMA DA CONSOLA		
	Pré-aquecimento	Camada de ligação (METCO 447 NS)	Alumina (METCO 105 NS)
Caudal de acetileno [l/min]	25	26,5	22
Caudal de oxigénio [l/min]	37	42	37
Caudal de azoto [l/min]	6,9	6,9	6,9
Pressão do jacto de ar comprimido [bar]	0	0	5
Velocidade de rotação do doseador [rpm]	0	9,8	9,3

Tab. 6.5 - Parâmetros de projecção introduzidos na consola de controle de gases e pós.

5 - Introdução das seguintes variáveis no programa da consola de programação do robô de projecção:

Para o pré-aquecimento: as mesmas dos 1º e 4º ensaios.

Para a projecção da camada de ligação: as mesmas dos 1º e 4º ensaios.

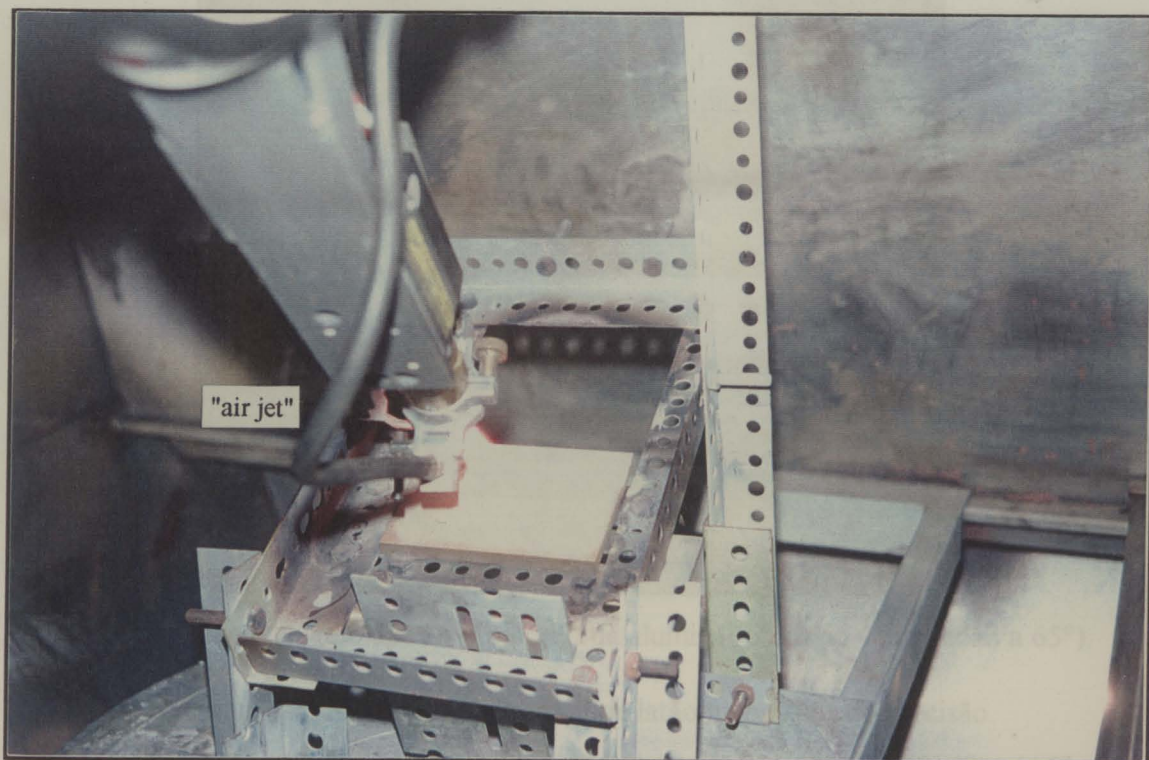
Para a projecção da camada de revestimento de alumina:

- número de passes ou passagens = 1;
- velocidade de trabalho = 1,35 m/min (0,02 m/s) [Tab. 6.1];
- programa de projecção da alumina (Tab. 6.5);
- distância entre linhas da trajectória (d) = 9 mm;
- distância de projecção = 75 mm (Tab. 6.1).

6, 7, 8, 9 - Os mesmos procedimentos e valores dos 1º e 4º ensaios.

10 - Continuação da execução do programa do robô, para se efectuar a projecção da camada de revestimento de alumina (METCO 105 NS).

A fotografia seguinte (Fot. 6.6) mostra a projecção da alumina com "air jet" (jacto de ar comprimido).

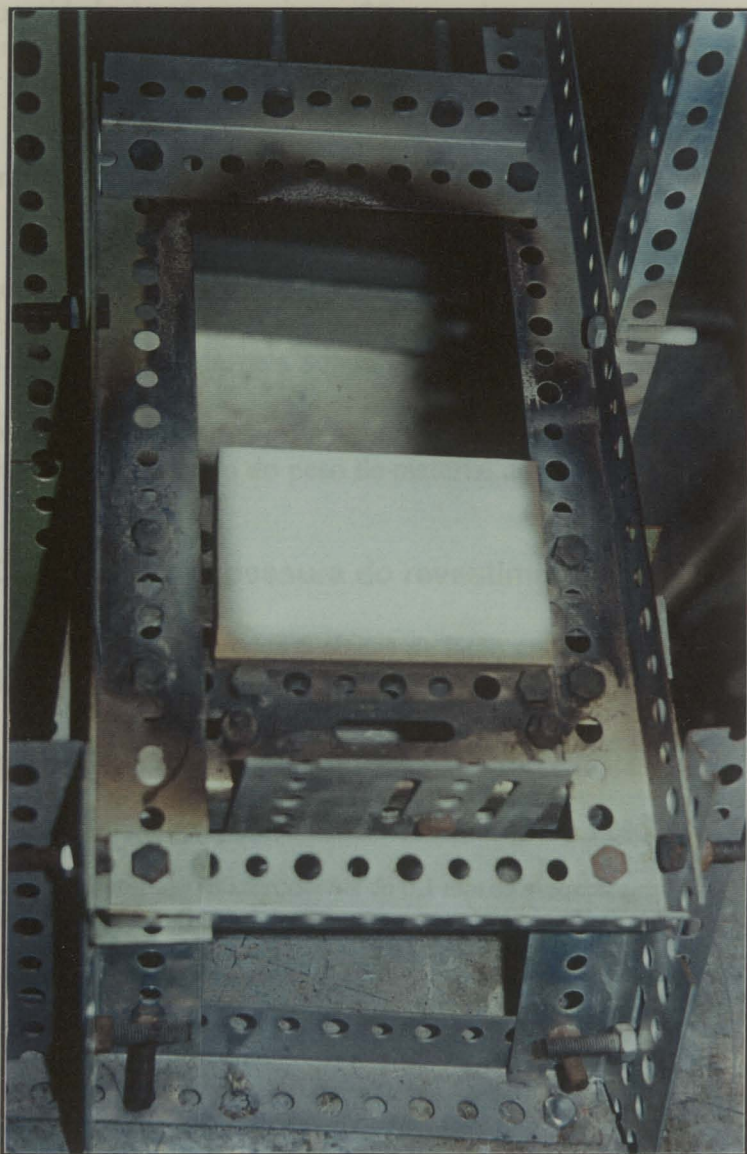


Fot. 6.6 - Projecção do revestimento de alumina com "air jet" (jacto de ar comprimido) [6º ensaio - projecção a 65º].

11 - Medição da temperatura final da camada de revestimento de alumina da placa (após projecção), utilizando o pirómetro de contacto. Foram medidas temperaturas em vários locais aleatórios da camada de revestimento de alumina da placa, não se verificando no entanto, diferenças significativas entre elas e o tempo de contacto do pirómetro, foi sempre o necessário para que o valor lido de temperatura, estabilizasse no seu mostrador digital de cristais líquidos (aproximadamente 15 segundos).

[Temperatura $\approx 170^{\circ}\text{C}$, nas placas nº3 e nº6]

A fotografia seguinte (Fot. 6.7) mostra o aspecto final do revestimento de camada de ligação e alumina.



Fot. 6.7 - Placa de latão após a projecção da alumina (6ºensaio - projecção a 65°).

12 - Determinação do peso final da placa de latão na balança de precisão.

Placa nº3 (Peso final = 1949,23 g) $\Rightarrow$ Peso depositado = $(1949,23 - 1934,60) = 14,63$ g

Peso depositado = Peso de pó METCO 447NS* + Peso de pó METCO 105NS

Peso de pó METCO 105 NS (alumina) = $14,63 - 10,86^* = 3,77$ g

* é igual à da placa nº1 (camada de ligação)

(90°) METCO 447NS: Taxa de deposição=27,2 g/min ; Eficiência de deposição=73%

(90°) METCO 105NS: Taxa de deposição=1,8 g/min ; Eficiência de deposição=15%

Placa nº6 (Peso final = 1001,88 g) $\Rightarrow$ Peso depositado = $(1001,88 - 989,31) = 12,57$ g

Peso depositado = Peso de pó METCO 447NS" + Peso de pó METCO 105NS

Peso de pó METCO 105 NS (alumina) = $12,57 - 9,87^* = 2,70$ g

" é igual à da placa nº4 (camada de ligação)

(65°) METCO 447NS: Taxa de deposição = 24,7 g/min ; Eficiência de deposição = 67%

(65°) METCO 105NS: Taxa de deposição = 1,3 g/min ; Eficiência de deposição = 11%

13 - Determinação da taxa de saída do pó METCO 105 NS (alumina).

Colocou-se um goblé de vidro na ponta da pistola (sem chama) e pesou-se a quantidade de pó que saiu em 30 segundos.

(Em 30 segundos saíram 6,0 g de pó $\Rightarrow$ Taxa de saída de pó = 12 g/min)

6.6 - Determinação da espessura dos revestimentos

A espessura dos revestimentos vai ser medida por dois métodos distintos: um não destrutivo e outro destrutivo. O método não destrutivo utiliza um medidor de espessuras por sonda electromagnética e o destrutivo consiste na observação microscópica de cortes de revestimentos. Não foi medida pela sonda a espessura dos revestimentos das placas nºs 4, 5 e 6.

Antes de procedermos à medição dos revestimentos, vamos estimar as suas espessuras através do conhecimento do peso de material depositado.

6.6.1 - Obtenção da espessura do revestimento através do seu peso

Através do aumento de peso das 6 placas de latão após a projecção, vamos estimar a espessura dos depósitos.

- Placa nº1 (projecção da camada de ligação METCO 447NS a 90°)

Peso inicial = 1950,54 g ; Peso final = 1961,40 g $\Rightarrow$ $\text{Peso}_{\text{METCO447NS}} = 10,86 \text{ g}$

Peso por área de revestimento METCO447NS de 0,1 mm de espessura = 0,72 Kg/m² (Tab. 6.1)

Porosidade da camada de ligação METCO 447 NS (Ni-Al-Mo) < 2% (Tab. 6.1)

Área de projecção = 0,0117 m²

Peso do revestimento METCO447NS = 0,72 x 0,0117 x 1000 = 8,46 g / 0,1 mm de revestimento

Espessura de METCO 447NS = 10,86 x 0,1/8,46 = **0,13 mm** (porosidade < 2%)

- Placa nº2 (projecção de METCO 447NS + zircónia METCO 201NS a 90°)

Peso inicial = 1954,20 g

Peso final = 1972,60 g $\Rightarrow \text{Peso}_{\text{METCO447NS}} + \text{Peso}_{\text{METCO201NS}} = 18,40 \text{ g}$

$\text{Peso}_{\text{METCO201NS}} = 18,40 - 10,86^* = 7,54 \text{ g}$

*é igual à da placa nº1

Peso por área de revestimento METCO201NS de 0,1 mm de espessura = 0,52 Kg/m² (Tab. 6.1)

Porosidade do revestimento de zircónia METCO201NS = 10% (Tab. 6.1)

Área de projecção = 0,0117 m²

Peso do revestimento METCO201NS = 0,52 x 0,0117 x 1000 = 6,08 g / 0,1 mm de revestimento

Espessura de METCO201NS = 7,54 x 0,1/6,08 = **0,13 mm** (porosidade = 10%)

Espessura de METCO447NS + METCO201NS = 0,13* + 0,13 = **0,26 mm**

*é igual à da placa nº1

- Placa nº3 (projectção de METCO 447NS + alumina METCO 105NS a 90°)

Peso inicial = 1934,60 g

Peso final = 1949,23 g $\Rightarrow$ $\text{Peso}_{\text{METCO447NS}} + \text{Peso}_{\text{METCO105NS}} = 14,63 \text{ g}$

$\text{Peso}_{\text{METCO105NS}} = 14,63 - 10,86^* = 3,77 \text{ g}$

*é igual à da placa nº1

Peso por área de revestimento METCO105NS de 0,1 mm de espessura = 0,32 Kg/m² (Tab. 6.1)

Porosidade do revestimento de alumina METCO105NS = 2% (Tab. 6.1)

Área de projectção = 0,0117 m²

Peso do revestimento METCO105NS = 0,32 x 0,0117 x 1000 = 3,74 g /0,1 mm de revestimento

Espessura de METCO105NS = 3,77 x 0,1/3,74 = **0,10 mm** (porosidade = 2%)

Espessura de METCO447NS + METCO105NS = 0,13* + 0,10 = **0,23 mm**

*é igual à da placa nº1

- Placa nº4 (projectção da camada de ligação METCO 447NS a 65°)

Peso inicial = 1960,75 g ; Peso final = 1970,62 g $\Rightarrow$ $\text{Peso}_{\text{METCO447NS}} = 9,87 \text{ g}$

Peso por área de revestimento METCO447NS de 0,1 mm de espessura = 0,72 Kg/m² (Tab. 6.1)

Porosidade da camada de ligação METCO 447 NS (Ni-Al-Mo) < 2% (Tab. 6.1)

Área de projectção = 0,0117 m²

Peso do revestimento METCO447NS = 0,72 x 0,0117 x 1000 = 8,46 g /0,1 mm de revestimento

Espessura de METCO447NS = 9,87 x 0,1/8,46 = **0,12 mm** (porosidade < 2%)

- Placa nº5 (projectção de METCO 447NS + zircónia METCO 201NS a 65°)

Peso inicial = 978,17 g

Peso final = 994,20 g $\Rightarrow$ $\text{Peso}_{\text{METCO447NS}} + \text{Peso}_{\text{METCO201NS}} = 16,03 \text{ g}$

$\text{Peso}_{\text{METCO201NS}} = 16,03 - 9,87^* = 6,16 \text{ g}$

*é igual à da placa nº4

Peso por área de revestimento METCO201NS de 0,1 mm de espessura = 0,52 Kg/m² (Tab. 6.1)

Porosidade do revestimento de zircónia METCO201NS = 10% (Tab. 6.1)

Área de projectção = 0,0117 m²

Peso do revestimento METCO201NS = 0,52 x 0,0117 x 1000 = 6,08 g /0,1 mm de revestimento

Espessura de METCO201NS = 6,16 x 0,1/6,08 = **0,10 mm** (porosidade = 10%)

Espessura de METCO447NS + METCO201NS = 0,12* + 0,10 = **0,22 mm**

*é igual à da placa nº4

- Placa nº6 (projectção de METCO 447NS + alumina METCO 105NS a 65°)

Peso inicial = 989,31 g

Peso final = 1001,88 g $\Rightarrow$ $\text{Peso}_{\text{METCO447NS}} + \text{Peso}_{\text{METCO105NS}} = 12,57 \text{ g}$

$\text{Peso}_{\text{METCO105NS}} = 12,57 - 9,87^* = 2,70 \text{ g}$

*é igual à da placa nº4

Peso por área de revestimento METCO105NS de 0,1 mm de espessura = 0,32 Kg/m² (Tab. 6.1)

Porosidade do revestimento de alumina METCO105NS = 2% (Tab. 6.1)

Área de projectção = 0,0117 m²

Peso do revestimento METCO105NS = 0,32 x 0,0117 x 1000 = 3,74 g /0,1 mm de revestimento

Espessura de METCO105NS = 2,70 x 0,1/3,74 = **0,07 mm** (porosidade = 2%)

Espessura de METCO447NS + METCO105NS = 0,12* + 0,07 = **0,19 mm**

*é igual à da placa nº4

6.6.2 - Medidor de espessuras por sonda electromagnética

Para realizar este tipo de ensaio, foi utilizado o medidor de espessuras por sonda electromagnética Minitext 4000, juntamente com a impressora de dados Miniprint 4000, ambos da marca ELEKTRO-PHYSIK. Este aparelho é compacto e portátil e permite medir rapidamente e com precisão (10 μm) espessuras de revestimentos de forma não destrutiva [9].

O campo de utilização deste medidor depende do tipo de sonda utilizada. Pode funcionar com dois tipos principais de sondas, as do tipo F e N [9]:

- As sondas do tipo F, utilizam o princípio da indução magnética (o medidor mede a distância de interrupção do seu circuito magnético) e estão habilitadas a medir revestimentos não magnéticos, tais como de: alumínio, cobre, zinco, verniz, tinta de esmalte, etc..., em substratos de aço e ferro;
- As sondas do tipo N, utilizam no seu funcionamento correntes de Eddy (correntes parasitas induzidas por um campo magnético) e permitem medir revestimentos isolantes em todos os substratos não ferrosos e de aço austenítico.

Estão listadas na tabela seguinte (Tab. 6.6) as sondas utilizáveis pelo aparelho, bem como o seu intervalo de medida da espessura de revestimentos.

Referência da sonda	Intervalo de medida
F400 ; N400	(0, 400 μm)
F1 ; F1/90 ; N1 ; N1/90	(0, 1250 μm)
F5	(0, 5 mm)
F10 ; N10	(0, 10 mm)

Tab. 6.6 - Tipos de sondas utilizadas pelo medidor de espessuras [9].

Como o nosso substrato é de latão (material não ferroso), só podemos utilizar sondas do tipo N. A única sonda deste tipo, disponível no laboratório de metrologia do CETECOFF-INEGI, é a N10. Os revestimentos têm de ser isolantes para serem correctamente medidos por esta sonda. O que vai levantar alguns problemas nas medições efectuadas, devido a que o material de ligação (METCO 447NS) projectado nas placas não é isolante, pois trata-se duma liga metálica de Ni-Al-Mo. Já os materiais de revestimento propriamente ditos são isolantes, pois tratam-se de materiais cerâmicos (zircónia e alumina).

Procedimentos dos ensaios de medida:

- ① - Calibração do medidor de espessuras, utilizando uma placa de latão sem revestimento, para assim obtermos o zero.
- ② - Colocando a sonda em locais aleatórios do revestimento das placas, fizeram-se 29 leituras em cada uma delas, cujos resultados se mostram na tabela seguinte (Tab. 6.7).

Ângulo de projecção=90°

Número da leitura	PLACA 1	PLACA 2	PLACA 3
	Camada de ligação METCO 447NS [mm]	Camada de ligação + Zircónia METCO 447NS + METCO 201NS [mm]	Camada de ligação + Alumina METCO 447NS + METCO 105NS [mm]
1	0,46	0,58	0,56
2	0,43	0,58	0,56
3	0,44	0,55	0,56
4	0,43	0,50	0,57
5	0,45	0,58	0,57
6	0,44	0,49	0,58
7	0,42	0,60	0,52
8	0,45	0,59	0,56
9	0,44	0,53	0,53
10	0,43	0,63	0,52
11	0,43	0,62	0,49
12	0,45	0,51	0,53
13	0,42	0,59	0,48
14	0,44	0,52	0,50
15	0,43	0,56	0,49
16	0,38	0,62	0,54
17	0,44	0,60	0,51
18	0,43	0,64	0,55
19	0,41	0,58	0,56
20	0,43	0,59	0,52
21	0,42	0,61	0,58
22	0,44	0,59	0,53
23	0,44	0,61	0,53
24	0,41	0,60	0,52
25	0,40	0,51	0,54
26	0,42	0,59	0,57
27	0,43	0,60	0,53
28	0,42	0,59	0,53
29	0,40	0,60	0,55
Média	0,43	0,58	0,54
Desvio padrão	0,02	0,04	0,03
	valor esperado* = 0,13	Zircónia = $0,58 - 0,43 = 0,15$ valor esperado* = 0,13	Alumina = $0,54 - 0,43 = 0,11$ valor esperado* = 0,10

* o valor esperado de espessura é o que foi obtido através do peso do revestimento (ver ponto 6.6.1)

Tab. 6.7 - Espessuras dos revestimentos das três placas medidas pela sonda electromagnética por correntes de Eddy (N10).

Pela observação da tabela anterior (Tab. 6.7), detecta-se facilmente que os valores médios medidos de espessura dos revestimentos são muito mais elevados do que os esperados. Isto deve-se ao facto já referido, do material da camada de ligação (liga metálica Ni-Al-Mo) ser não isolante ou condutor e por isso a sua espessura é mal medida pela sonda electromagnética por correntes de Eddy. Este tipo de sonda só permite medir de modo correcto espessuras de revestimentos isolantes como os de zircónia e alumina.

Mas ao subtrairmos o valor obtido para a camada de ligação (0,43 mm -placa nº1), nas espessuras medidas para os revestimentos das placas 2 (camada de ligação + zircónia) e 3 (camada de ligação + alumina), constatamos que os valores obtidos para as espessuras de zircónia e alumina estão muito próximos do valor esperado que foi obtido através do peso do revestimento (ver ponto 6.6.1), o que confirma o facto já exposto, da sonda electromagnética por correntes de Eddy (N10) permitir medir correctamente a espessura de revestimentos isolantes (neste caso: zircónia e alumina).

6.6.3 - Por observação microscópica de cortes de revestimentos

Para tirar todas as dúvidas quanto às espessuras dos revestimentos efectivamente obtidas após as projecções, recorreu-se à observação dos depósitos pelo microscópio, para isso foram retiradas 4 amostras em cada uma das seis placas em zonas bem definidas, como está ilustrado na figura seguinte (Fig. 6.2).

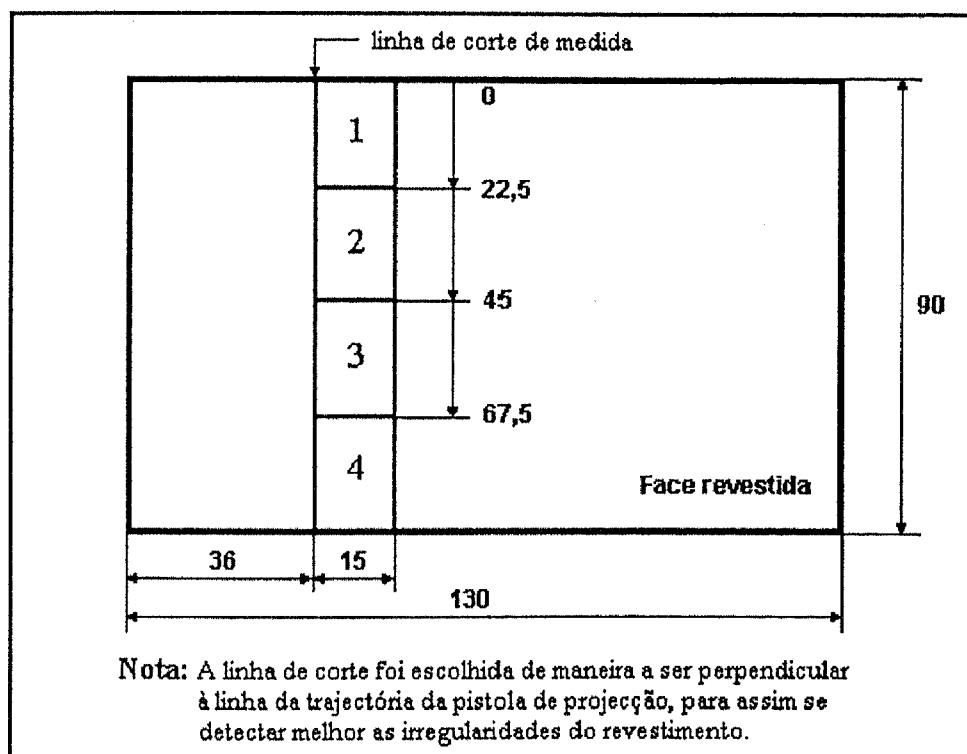


Fig. 6.2 - Indicação do local da placa donde foram retiradas as amostras para o microscópio.

Os procedimentos do ensaio foram:

- ❶ - Corte de 4 amostras numa serra circular refrigerada a água com óleo (marca Struers), em cada uma das 6 placas (como mostra a figura 6.2).
- ❷ - Montagem das amostras em resina a frio (no vácuo).
- ❸ - Polimento automático das amostras numa máquina de polir da marca Struers, com os parâmetros descritos na tabela seguinte (Tab. 6.8).

	DESBASTE				POLIMENTO	
	1	2	3	4	1	2
Base	SiC	SiC	SiC	SiC	PAN W	DP PLAN
Grão (mesh)	220	500	1200	4000	DP SPRAY 3 µm	DP SPRAY 1 µm
Lubrificante	Água	Água	Água	Água	Azul	Azul
Velocidade (rpm)	300	300	300	300	150	150
Pressão (N)	150	150	150	150	150	100
Tempo (s)	300	120	120	120	120	120

Tab. 6.8 - Sequência do polimento automático utilizado para preparar as amostras.

- ④ - Medição da espessura dos revestimentos por observação microscópica das amostras (cortes de revestimentos). Os valores medidos nas seis placas são dados nas tabelas seguintes (Tab^{as} 6.9, 6.10, 6.11, 6.12, 6.13 e 6.14).

Ângulo de projecção=90°

Número da leitura	AMOSTRA Nº1	AMOSTRA Nº2	AMOSTRA Nº3	AMOSTRA Nº4
	Camada de ligação (Ni-Al-Mo) [mm]	Camada de ligação (Ni-Al-Mo) [mm]	Camada de ligação (Ni-Al-Mo) [mm]	Camada de ligação (Ni-Al-Mo) [mm]
1	0,119	0,086	0,108	0,160
2	0,088	0,103	0,172	0,087
3	0,092	0,072	0,118	0,154
4	0,113	0,129	0,092	0,112
5	0,060	0,147	0,077	0,103
6	0,097	0,117	0,073	0,113
7	0,153	0,123	0,089	0,085
8	0,129	0,136	0,129	0,110
9	0,135	0,086	0,151	0,134
10	0,090	0,126	0,180	0,092
11	0,083	0,127	0,125	0,074
12	0,105	0,091	0,095	0,157
13	0,095	0,122	0,090	0,124
14	0,123	0,129	0,149	0,138
15	0,128	0,115	0,095	0,113
16	0,080	0,148	0,177	0,089
17	0,098	0,145	0,121	0,119
18	0,074	0,143	0,109	0,102
19	0,112	0,070	0,091	0,077
20	0,104	0,150	0,127	0,157
Média	0,104	0,118	0,118	0,115
Desvio padrão	0,023	0,025	0,033	0,028

Média das 4 amostras	Ni-Al-Mo = 0,12 mm	Desvio padrão das 4 amostras	Ni-Al-Mo = 0,03 mm
----------------------	--------------------	------------------------------	--------------------

Tab. 6.9 - Valores de espessuras de revestimentos medidas no microscópio (placa nº1).

Ângulo de projeção=90°

Número da leitura	AMOSTRA Nº1			AMOSTRA Nº2			AMOSTRA Nº3			AMOSTRA Nº4		
	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Zircónia [mm]	Ni-Al-Mo + Zircónia [mm]	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Zircónia [mm]	Ni-Al-Mo + Zircónia [mm]	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Zircónia [mm]	Ni-Al-Mo + Zircónia [mm]	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Zircónia [mm]	Ni-Al-Mo + Zircónia [mm]
1	0,140	0,123	0,263	0,071	0,107	0,178	0,120	0,119	0,239	0,153	0,139	0,292
2	0,173	0,148	0,321	0,067	0,137	0,204	0,125	0,132	0,257	0,110	0,114	0,224
3	0,094	0,155	0,249	0,115	0,149	0,264	0,109	0,124	0,233	0,113	0,151	0,264
4	0,097	0,140	0,237	0,160	0,115	0,275	0,124	0,130	0,254	0,100	0,160	0,260
5	0,154	0,147	0,301	0,123	0,104	0,227	0,084	0,121	0,205	0,142	0,135	0,277
6	0,103	0,130	0,233	0,143	0,105	0,248	0,068	0,154	0,222	0,143	0,130	0,273
7	0,105	0,148	0,253	0,168	0,110	0,278	0,145	0,094	0,239	0,144	0,141	0,285
8	0,148	0,135	0,283	0,114	0,139	0,253	0,113	0,132	0,245	0,138	0,126	0,264
9	0,121	0,119	0,240	0,120	0,133	0,253	0,127	0,139	0,266	0,126	0,118	0,244
10	0,153	0,107	0,260	0,140	0,123	0,263	0,124	0,120	0,244	0,108	0,116	0,224
11	0,172	0,125	0,297	0,175	0,144	0,319	0,118	0,100	0,218	0,138	0,113	0,251
12	0,159	0,113	0,272	0,091	0,098	0,189	0,109	0,090	0,199	0,129	0,114	0,243
13	0,110	0,151	0,261	0,063	0,140	0,203	0,087	0,066	0,153	0,113	0,139	0,252
14	0,115	0,105	0,220	0,075	0,117	0,192	0,060	0,065	0,125	0,109	0,101	0,210
15	0,139	0,138	0,277	0,115	0,144	0,259	0,098	0,120	0,218	0,073	0,144	0,217
16	0,103	0,117	0,220	0,106	0,147	0,253	0,110	0,140	0,250	0,144	0,094	0,238
17	0,087	0,163	0,250	0,101	0,156	0,257	0,133	0,137	0,270	0,125	0,090	0,215
18	0,148	0,099	0,247	0,136	0,114	0,250	0,102	0,143	0,245	0,086	0,139	0,225
19	0,105	0,139	0,244	0,106	0,093	0,199	0,096	0,117	0,213	0,081	0,175	0,256
20	0,110	0,154	0,264	0,117	0,124	0,241	0,105	0,126	0,231	0,103	0,140	0,243
Média	0,127	0,133	0,260	0,115	0,125	0,240	0,108	0,118	0,226	0,119	0,129	0,248
Desvio padrão	0,027	0,019	0,026	0,032	0,019	0,036	0,021	0,024	0,036	0,023	0,022	0,024

Média das 4 amostras	Ni-Al-Mo = 0,12 mm
	Zircónia = 0,13 mm
	Ni-Al-Mo + Zircónia = 0,25 mm

Desvio padrão das 4 amostras	Ni-Al-Mo = 0,03 mm
	Zircónia = 0,02mm
	Ni-Al-Mo + Zircónia = 0,03 mm

Tab. 6.10 - Valores de espessuras de revestimentos medidas no microscópio (placa nº2).

Ângulo de projeção=90°

Número da leitura	AMOSTRA Nº1			AMOSTRA Nº2			AMOSTRA Nº3			AMOSTRA Nº4		
	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Alumina [mm]	Ni-Al-Mo + Alumina [mm]	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Alumina [mm]	Ni-Al-Mo + Alumina [mm]	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Alumina [mm]	Ni-Al-Mo + Alumina [mm]	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Alumina [mm]	Ni-Al-Mo + Alumina [mm]
1	0,090	0,119	0,209	0,071	0,116	0,187	0,115	0,150	0,265	0,125	0,140	0,265
2	0,114	0,108	0,222	0,139	0,121	0,260	0,145	0,119	0,264	0,120	0,157	0,277
3	0,116	0,143	0,259	0,119	0,095	0,214	0,132	0,108	0,240	0,109	0,127	0,236
4	0,181	0,088	0,269	0,137	0,101	0,238	0,094	0,094	0,188	0,137	0,170	0,307
5	0,109	0,150	0,259	0,139	0,106	0,245	0,100	0,094	0,194	0,122	0,114	0,236
6	0,104	0,128	0,232	0,118	0,095	0,213	0,119	0,083	0,202	0,095	0,126	0,221
7	0,122	0,101	0,223	0,137	0,080	0,217	0,126	0,113	0,239	0,102	0,109	0,211
8	0,124	0,115	0,239	0,120	0,120	0,240	0,135	0,117	0,252	0,129	0,100	0,229
9	0,131	0,100	0,231	0,130	0,104	0,234	0,116	0,134	0,250	0,117	0,058	0,175
10	0,103	0,072	0,175	0,135	0,118	0,253	0,115	0,125	0,240	0,123	0,064	0,187
11	0,117	0,093	0,210	0,105	0,092	0,197	0,137	0,103	0,240	0,120	0,067	0,187
12	0,109	0,125	0,234	0,079	0,098	0,177	0,120	0,129	0,249	0,115	0,093	0,208
13	0,124	0,068	0,192	0,132	0,093	0,225	0,095	0,136	0,231	0,120	0,109	0,229
14	0,091	0,113	0,204	0,115	0,103	0,218	0,112	0,104	0,216	0,097	0,120	0,217
15	0,125	0,126	0,251	0,135	0,120	0,255	0,094	0,098	0,192	0,128	0,128	0,256
16	0,090	0,124	0,214	0,132	0,153	0,285	0,110	0,100	0,210	0,115	0,142	0,257
17	0,146	0,086	0,232	0,098	0,127	0,225	0,116	0,069	0,185	0,113	0,096	0,209
18	0,120	0,095	0,215	0,122	0,121	0,243	0,140	0,125	0,265	0,136	0,068	0,204
19	0,135	0,081	0,216	0,096	0,112	0,208	0,123	0,111	0,234	0,092	0,077	0,169
20	0,140	0,132	0,272	0,097	0,113	0,210	0,129	0,077	0,206	0,112	0,125	0,237
Média	0,120	0,108	0,228	0,118	0,109	0,227	0,119	0,109	0,228	0,116	0,110	0,226
Desvio padrão	0,021	0,023	0,025	0,020	0,016	0,026	0,012	0,021	0,027	0,013	0,032	0,034

Média das 4 Amostras	Desvio padrão das 4 amostras		
	Ni-Al-Mo = 0,12 mm		
	Alumina = 0,11 mm		
Média das 4 Amostras	Desvio padrão das 4 amostras		
	Ni-Al-Mo = 0,02 mm		
	Alumina = 0,01 mm		
Média das 4 Amostras	Desvio padrão das 4 amostras		
	Ni-Al-Mo + Alumina = 0,04 mm		

Fig. 6.11 - Valores de espessuras de revestimentos medidas no microscópio (placa nº3).

Ângulo de projecção=65°

Número da leitura	AMOSTRA Nº1	AMOSTRA Nº2	AMOSTRA Nº3	AMOSTRA Nº4
	Camada de ligação (Ni-Al-Mo) [mm]	Camada de ligação (Ni-Al-Mo) [mm]	Camada de ligação (Ni-Al-Mo) [mm]	Camada de ligação (Ni-Al-Mo) [mm]
1	0,090	0,100	0,118	0,135
2	0,078	0,080	0,112	0,080
3	0,122	0,069	0,090	0,124
4	0,107	0,126	0,130	0,102
5	0,080	0,114	0,078	0,123
6	0,099	0,107	0,085	0,120
7	0,135	0,120	0,120	0,075
8	0,139	0,132	0,102	0,132
9	0,075	0,135	0,135	0,136
10	0,130	0,080	0,075	0,082
11	0,125	0,123	0,127	0,076
12	0,087	0,087	0,085	0,137
13	0,105	0,102	0,080	0,095
14	0,135	0,135	0,139	0,117
15	0,120	0,125	0,090	0,123
16	0,085	0,148	0,137	0,086
17	0,078	0,075	0,117	0,129
18	0,125	0,133	0,109	0,112
19	0,135	0,070	0,094	0,075
20	0,079	0,130	0,123	0,127
Média	0,106	0,110	0,108	0,109
Desvio padrão	0,023	0,025	0,021	0,023

Média das 4 amostras	Ni-Al-Mo = 0,11 mm
----------------------	--------------------

Desvio padrão das 4 amostras	Ni-Al-Mo = 0,02 mm
------------------------------	--------------------

Tab. 6.12 - Valores de espessuras de revestimentos medidas no microscópio (placa nº4).

Ângulo de projecção=65°

Número da leitura	AMOSTRA Nº1			AMOSTRA Nº2			AMOSTRA Nº3			AMOSTRA Nº4		
	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Zircónia [mm]	Ni-Al-Mo + Zircónia [mm]	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Zircónia [mm]	Ni-Al-Mo + Zircónia [mm]	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Zircónia [mm]	Ni-Al-Mo + Zircónia [mm]	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Zircónia [mm]	Ni-Al-Mo + Zircónia [mm]
1	0,133	0,103	0,236	0,091	0,105	0,196	0,110	0,082	0,192	0,133	0,100	0,233
2	0,130	0,125	0,255	0,100	0,112	0,212	0,105	0,122	0,227	0,105	0,094	0,199
3	0,144	0,110	0,254	0,070	0,107	0,177	0,119	0,104	0,223	0,103	0,125	0,228
4	0,087	0,080	0,167	0,065	0,105	0,170	0,104	0,110	0,214	0,085	0,130	0,215
5	0,115	0,117	0,232	0,105	0,085	0,190	0,074	0,111	0,185	0,122	0,095	0,217
6	0,093	0,102	0,195	0,123	0,100	0,223	0,088	0,124	0,212	0,083	0,120	0,203
7	0,137	0,095	0,232	0,068	0,090	0,158	0,125	0,100	0,225	0,124	0,108	0,232
8	0,094	0,127	0,221	0,104	0,119	0,223	0,115	0,112	0,227	0,105	0,106	0,211
9	0,162	0,087	0,249	0,121	0,105	0,226	0,117	0,079	0,196	0,136	0,097	0,233
10	0,144	0,077	0,221	0,131	0,103	0,234	0,125	0,121	0,246	0,095	0,112	0,207
11	0,110	0,115	0,225	0,145	0,115	0,260	0,108	0,101	0,209	0,115	0,100	0,215
12	0,105	0,075	0,180	0,122	0,088	0,210	0,127	0,085	0,212	0,120	0,104	0,224
13	0,100	0,121	0,221	0,062	0,120	0,182	0,095	0,066	0,161	0,119	0,119	0,238
14	0,145	0,080	0,225	0,100	0,097	0,197	0,120	0,065	0,185	0,109	0,085	0,194
15	0,128	0,111	0,239	0,126	0,124	0,250	0,088	0,112	0,200	0,083	0,114	0,197
16	0,093	0,087	0,180	0,136	0,077	0,213	0,090	0,075	0,165	0,127	0,074	0,201
17	0,138	0,097	0,235	0,101	0,126	0,227	0,113	0,107	0,220	0,125	0,090	0,215
18	0,095	0,079	0,174	0,136	0,083	0,219	0,112	0,103	0,215	0,086	0,089	0,175
19	0,100	0,109	0,209	0,126	0,093	0,219	0,096	0,097	0,193	0,089	0,095	0,184
20	0,077	0,124	0,201	0,117	0,104	0,221	0,125	0,086	0,211	0,103	0,120	0,223
Média	0,117	0,101	0,218	0,107	0,103	0,210	0,108	0,098	0,206	0,108	0,104	0,212
Desvio padrão	0,027	0,018	0,029	0,025	0,014	0,026	0,015	0,018	0,021	0,017	0,015	0,017

Média das 4 amostras	Ni-Al-Mo = 0,11 mm	Desvio padrão das 4 amostras	Ni-Al-Mo = 0,02 mm
	Zircónia = 0,10 mm		Zircónia = 0,02 mm
	Ni-Al-Mo + Zircónia = 0,21 mm		Ni-Al-Mo + Zircónia = 0,02 mm

Tab. 6.13 - Valores de espessuras de revestimentos medidas no microscópio (placa nº5).

Ângulo de projecção=65°

Número da leitura	AMOSTRA Nº1			AMOSTRA Nº2			AMOSTRA Nº3			AMOSTRA Nº4		
	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Alumina [mm]	Ni-Al-Mo + Alumina [mm]	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Alumina [mm]	Ni-Al-Mo + Alumina [mm]	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Alumina [mm]	Ni-Al-Mo + Alumina [mm]	Camada ligação Ni-Al-Mo [mm]	Alumina [mm]	Ni-Al-Mo + Alumina [mm]
1	0,085	0,101	0,186	0,091	0,070	0,161	0,081	0,080	0,161	0,105	0,075	0,180
2	0,104	0,058	0,162	0,105	0,100	0,205	0,115	0,065	0,180	0,112	0,090	0,202
3	0,126	0,061	0,187	0,126	0,051	0,177	0,106	0,065	0,171	0,116	0,061	0,177
4	0,141	0,078	0,219	0,117	0,058	0,175	0,127	0,052	0,179	0,120	0,055	0,175
5	0,129	0,055	0,184	0,125	0,050	0,175	0,135	0,055	0,190	0,145	0,052	0,197
6	0,104	0,100	0,204	0,119	0,090	0,209	0,121	0,080	0,201	0,109	0,085	0,194
7	0,122	0,065	0,187	0,122	0,055	0,177	0,130	0,065	0,195	0,112	0,045	0,157
8	0,114	0,051	0,165	0,100	0,061	0,161	0,095	0,071	0,166	0,085	0,051	0,136
9	0,125	0,083	0,208	0,121	0,063	0,184	0,101	0,073	0,174	0,131	0,061	0,192
10	0,115	0,075	0,190	0,087	0,085	0,172	0,115	0,075	0,190	0,095	0,085	0,180
11	0,117	0,073	0,190	0,105	0,073	0,178	0,110	0,078	0,188	0,105	0,077	0,182
12	0,098	0,087	0,185	0,110	0,077	0,187	0,120	0,087	0,207	0,110	0,082	0,192
13	0,081	0,068	0,149	0,142	0,080	0,222	0,132	0,085	0,217	0,132	0,070	0,202
14	0,090	0,103	0,193	0,100	0,075	0,175	0,090	0,085	0,175	0,115	0,065	0,180
15	0,145	0,047	0,192	0,087	0,081	0,168	0,097	0,081	0,178	0,125	0,085	0,210
16	0,124	0,085	0,209	0,099	0,065	0,164	0,110	0,078	0,188	0,092	0,075	0,167
17	0,106	0,056	0,162	0,110	0,046	0,156	0,100	0,075	0,175	0,115	0,054	0,169
18	0,144	0,050	0,194	0,100	0,050	0,150	0,105	0,045	0,150	0,120	0,050	0,170
19	0,125	0,061	0,186	0,120	0,071	0,191	0,115	0,081	0,196	0,110	0,087	0,197
20	0,099	0,082	0,181	0,101	0,091	0,192	0,108	0,100	0,208	0,135	0,071	0,206
Média	0,115	0,072	0,187	0,109	0,070	0,179	0,111	0,074	0,184	0,114	0,069	0,183
Desvio padrão	0,019	0,017	0,017	0,014	0,015	0,018	0,014	0,014	0,017	0,015	0,014	0,018

Média das 4 Amostras	Ni-Al-Mo = 0,11 mm	Desvio padrão das 4 amostras	Ni-Al-Mo = 0,03 mm
	Alumina = 0,07 mm		Alumina = 0,02 mm
	Ni-Al-Mo + Alumina = 0,18 mm		Ni-Al-Mo + Alumina = 0,03 mm

Tab. 6.14 - Valores de espessuras de revestimentos medidas no microscópio (placa nº6).

Pela leitura das tabelas anteriores (Tab^{as} 6.9, 6.10, 6.11, 6.12, 6.13 e 6.14), constata-se que os valores obtidos para as espessuras da camada de ligação, zircónia e alumina estão muito próximos dos valores esperados, que foram determinados através do peso dos revestimentos (ponto 6.6.1).

A comparação e a discussão dos valores de espessuras de revestimentos obtidos pelos vários métodos (peso do revestimento, medidor de espessuras por sonda electromagnética e por observação microscópica de cortes de revestimentos), será apresentada no Capítulo 8 (compilação dos resultados obtidos e sua discussão) dentro do ponto 8.1, relativo aos ensaios preliminares de projecção.

7 - Ensaios de projecção à chama robotizada

7.1 - Objectivos e introdução

Estes ensaios têm como objectivo principal a determinação da tensão de adesão de revestimentos (camada de ligação: Ni-Al-Mo e zircónia: ZrO_2), e o seu relacionamento com as seguintes variáveis:

- material do substrato;
- temperatura de pré-aquecimento;
- temperatura máxima atingida pelo substrato no decorrer da projecção;
- ângulo de projecção;
- morfologia do revestimento.

Para isso foram realizados cinco ensaios de projecção robotizada para revestir com camada de ligação e zircónia provetes preparados para testes de adesão de revestimentos.

Os provetes utilizados são de 5 materiais diferentes: duralumínio, ferro fundido nodular perlítico estabilizado com cobre, latão, cuprocromo e ferro fundido cinzento ferrítico.

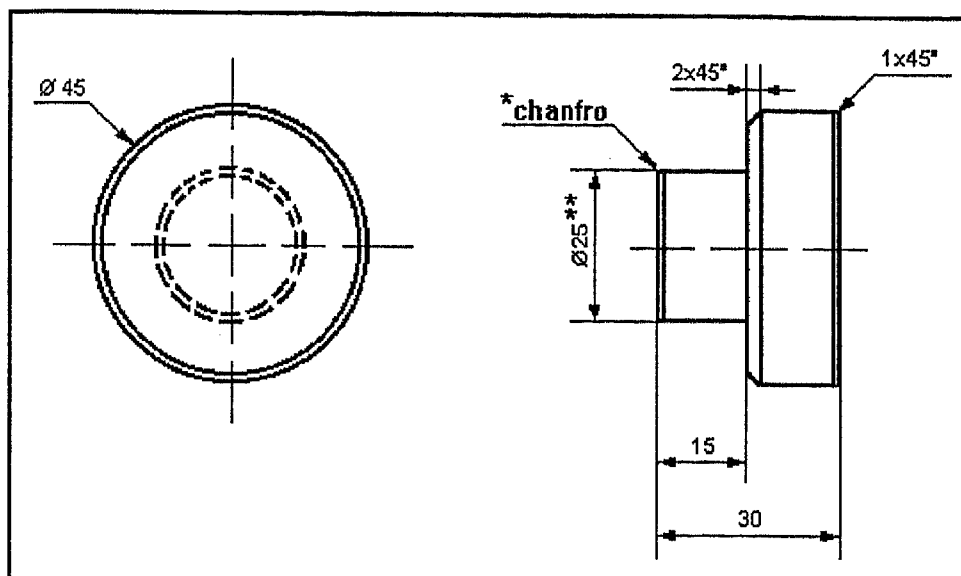
Em cada ensaio de projecção um provete de cada material foi instrumentado de forma a termos em tempo real as suas temperaturas a diferentes profundidades. Estes ensaios foram feitos com ângulos de projecção de 90, 65 e 30° e com várias temperaturas (65 a 110°C) de pré-aquecimento.

Foram feitos ensaios de projecção (1° e 2°) em que não houve limitação ou controle da temperatura máxima atingida pelo substrato ou provete, isto é, as passagens de projecção foram feitas seguidas e durante a projecção não houve arrefecimento por ar comprimido dos provetes. Nos ensaios seguintes de projecção (3°, 4° e 5°) houve limitação da temperatura máxima (300°C) atingida pelos provetes, que foi conseguida através da interrupção da projecção entre passagens e pela utilização durante a projecção de um jacto de ar comprimido (pressão de 6 bar), aplicado na parte de trás dos provetes (lado oposto à face de projecção - área com diâmetro de 45 mm (Fig. 7.1)).

Os provetes revestidos foram colados, /com uma cola de cianocrilato (Loctite 415)/, a contra-provetes de aço, sendo depois as montagens submetidas a ensaios de tracção, conseguindo-se assim, determinar a tensão de adesão dos revestimentos.

7.2 - Substratos utilizados

Foram usados para substrato provetes preparados para testes de adesão de revestimento, cujo desenho se mostra na figura seguinte (Fig. 7.1). A zona do provete que é revestida corresponde à área de diâmetro de 25 mm.



Nota: * chanfro - Todos os provetes utilizados apresentam nesta zona um chanfro de tamanho variável que origina que o diâmetro da área revestida do provete esteja no intervalo $(21 \text{ mm} < **\varnothing < 24,5 \text{ mm})$.

Fig. 7.1 - Desenho do provete utilizado nos ensaios de tracção para a determinação da tensão de adesão de revestimentos.

Os provetes são de 5 materiais diferentes: duralumínio, ferro fundido nodular perlítico estabilizado com cobre, latão, cuprocromo e ferro fundido cinzento ferrítico.

1. Duralumínio (AlCu)

Composição química : Cu - 4,4% ; Si - 0,8% ; Mn - 0,8% ; Mg - 0,5% ; Restante Al
Tipo de liga: 2014 [10]

É uma liga do grupo 2xxx - que são ligas de alumínio em que o principal elemento de liga é o cobre mas que outros componentes podem ser especificados.

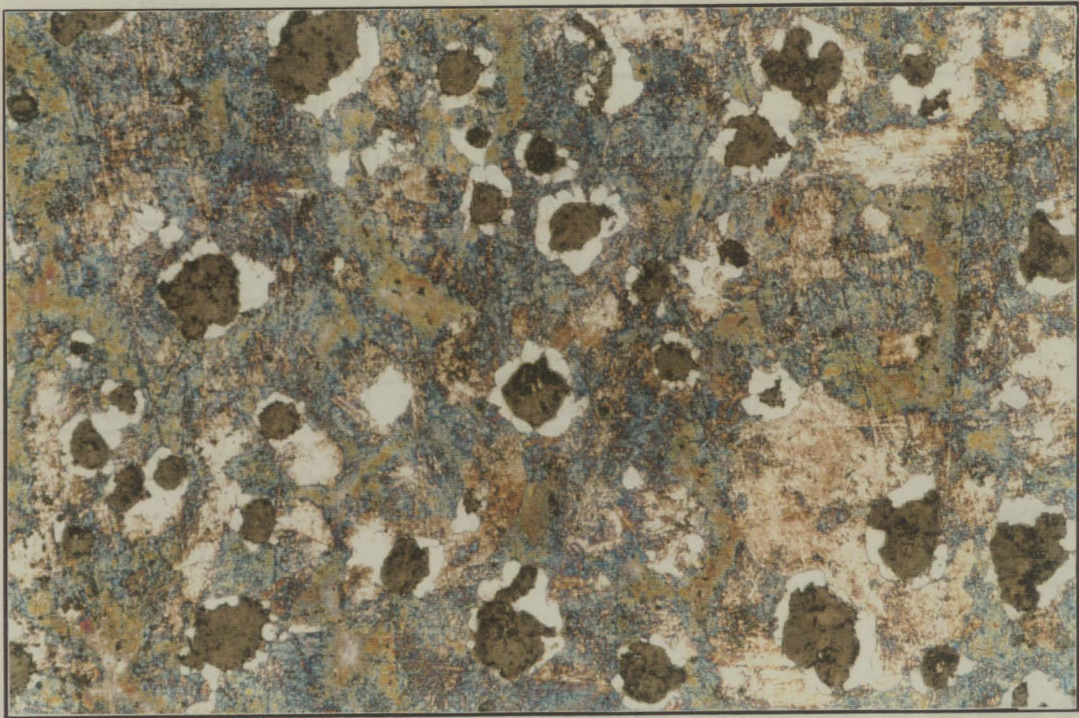
Tipo de liga	DIN	ISO	BS
2014	AlCuSiMn	AlCu4SiMg	BSH15

Tab. 7.1 - Correspondência da liga de alumínio (2014) com 3 normas internacionais [10].

2. Ferro fundido nodular perlítico estabilizado com cobre (FFNP)

Composição química: desconhecida.

A fotomicrografia seguinte (Fot. 7.1) mostra a estrutura metalúrgica do ferro fundido nodular perlítico. Vê-se claramente a grafite em nódulos e a matriz predominantemente perlítica, notando-se apenas ferrite (branco) à volta dos nódulos de grafite.



Fot. 7.1 - Fotomicrografia do ferro fundido nodular perlítico estabilizado com cobre.
Ampliação 200x e ataque com nital 2% durante 5s.

3. Latão

Composição química : Cu - 57% ; Zn - 40% ; Pb - 3%
Tipo de liga: C38500 [10]

É uma liga que pertence ao grupo dos latões com chumbo (Cu-Zn-Pb)

4. Cuprocromio (CuCr)

Composição química : Cu - 98,5% ; Cr - 1,1% ; outros - 0,5% Máx.
Tipo de liga: AMPCO 97 [11]

É uma liga que em relação ao cobre tem maior resistência ao desgaste e mantém as suas propriedades físicas a mais alta temperatura.

5. Ferro fundido cinzento ferrítico (FFCF)

Composição química : $C \leq 2,3\%$; $5,5\% \leq Si \leq 7\%$; $0,5\% \leq Mg \leq 0,8\%$

Estão listadas na tabela seguinte (Tab. 7.2) algumas propriedades dos materiais utilizados como substrato (provetes) nestes ensaios de projecção.

Características mecânicas e físicas	AlCu	FFNP	Latão	CuCr	FFCF
Tensão de rotura [MPa]	427	600 - 800	414	494	300 - 400
Tensão de cedência [MPa]	290	-----	138	446	-----
Alongamento [%]	20	7 - 2	30	18	18 - 6
Dureza [HB10]	105	170 - 350	110	136	140 - 160
Condutividade térmica [W/mK]	134	50	123	322	46
Coefficiente de expansão térmica [$\mu\text{m/mK}$]	65,1	13,6 (20-500°C)	20,9 (20-300°C)	17	13 (0-500°C)
Massa específica [Kg/m³]	2700	7100	8200	8870	7300
Temperatura de fusão [°C]	638	1120-1160	890	1230	1200

Tab. 7.2 - Características mecânicas e físicas dos 5 materiais utilizados para substrato [10], [11] e [12].

7.3 - Trajectória de deposição

A trajectória de deposição ou projecção utilizada para revestir os provetes é semelhante à descrita na figura 6.1(pág. 40) para os ensaios preliminares.

7.4 - Descrição dos ensaios de projecção

Foram realizados cinco ensaios de projecção, sendo em todos utilizados os mesmos pós de projecção (camada de ligação(Ni-Al-Mo) -METCO 447NS e a zircónia -METCO 201NS) sendo os dois primeiros executados com um ângulo de projecção de 90°, os dois seguintes com 65° e o último com 30°. Na tabela seguinte (Tab. 7.3) é dada uma descrição genérica dos ensaios.

Número do ensaio ou da projecção	Temperatura de pré-aquecimento pretendida [°C]	Controlo da temperatura máxima dos provetes (Arrefecimento)	Substratos (4 provetes de cada material)	Ângulo de projecção
1º	120	NÃO	Duralumínio, ferro fundido nodular, latão, cuprocromio e ferro fundido cinzento	90°
2º	90	NÃO	Duralumínio, ferro fundido nodular, latão, cuprocromio e ferro fundido cinzento	90°
3º	90	SIM (300°C)	Duralumínio, ferro fundido nodular, latão, cuprocromio e ferro fundido cinzento	90°
4º	90	SIM (300°C)	Duralumínio, ferro fundido nodular, latão, cuprocromio e ferro fundido cinzento	65°
5º	90	SIM (300°C)	Ferro fundido nodular	30°

Tab. 7.3 - Condições de execução dos ensaios de projecção.

7.4.1 - Projecção a 90° com pré-aquecimentos de 90 e 120°C (1º e 2º ensaios)

Nestes ensaios vai ser projectada a camada de ligação e a zircónia com um ângulo de projecção de 90° e sem limitação da temperatura máxima atingida pelos provetes (substrato) no decorrer da projecção. A única diferença entre os dois ensaios é a temperatura de pré-aquecimento pretendida (no 1º ensaio - 120°C e no 2º ensaio - 90°C).

Em cada ensaio serão revestidos 20 provetes (quatro de cada material), sendo instrumentados 5 deles (um de cada material).

Nos dois ensaios as passagens ou passes de projecção serão feitas seguidas (2 passagens de camada de ligação (Ni-Al-Mo)-METCO 447NS mais 12 passagens de zircónia -METCO 201NS), isto é, sem paragens entre passagens, o que implicará um grande aumento da temperatura dos provetes.

Os procedimentos dos ensaios foram por esta ordem os seguintes:

- 1 - Como se mostra na figura seguinte (Fig. 7.2) um provete de cada material foi instrumentado com 4 termopares a várias profundidades. Como os provetes são de 5 materiais diferentes implicou a aplicação de 20 termopares.

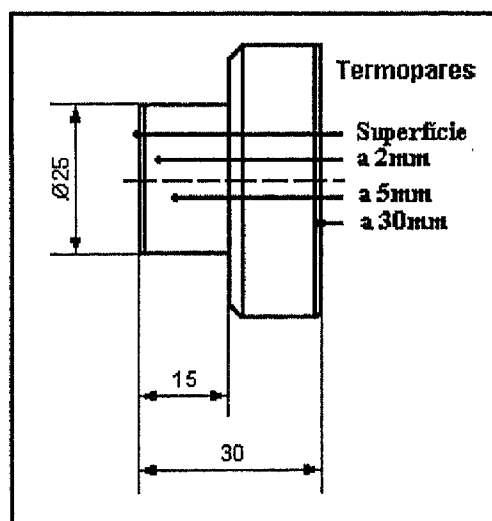


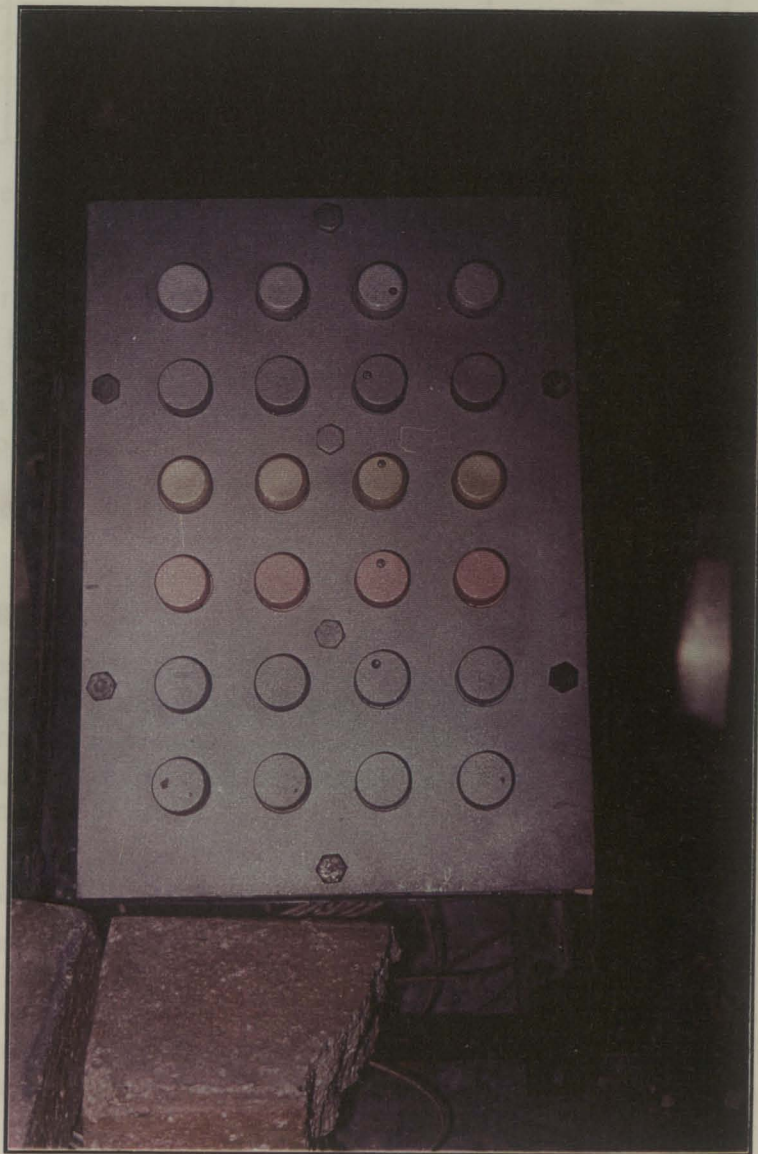
Fig. 7.2 - Posicionamento dos quatro termopares no provete.

- 2 - Grenalhagem dos provetes, nas seguintes condições:
 - ângulo de incidência ($\phi = 90^\circ$);
 - tempo de grenalhagem para cada um ≈ 5 s;
 - pressão do ar comprimido = 3 bar;
 - grenalha de corindon (alumina quase pura).

Na fotografia seguinte (Fot. 7.2) pode-se ver o aspecto dos provetes após a grenalhagem.

- 3 - A fixação e montagem dos provetes no suporte de projecção foi executada do modo que se mostra na fotografia seguinte (Fot. 7.2). Os provetes foram colocados entre duas chapas de aço aparafusadas entre si. Os provetes de cada material foram postos na mesma linha, sendo os instrumentados colocados na mesma coluna (terceira a contar da esquerda). A última linha de provetes não interessa, foram colocados apenas para permitir um melhor aperto dos restantes.

- 1ª linha - Duralumínio (AlCu)
2ª linha - Ferro fundido nodular perlítico (FFNP)
3ª linha - Latão
4ª linha - Cuprocromio (CuCr)
5ª linha - Ferro fundido cinzento ferrítico (FFCF)



Fot. 7.2 - Montagem dos provetes grenalhados no suporte de projecção.

- 4 - Ligação das fichas dos termopares à placa de aquisição de dados dum computador.
- 5 - Colocar o nariz tipo K na pistola de projecção e introduzir os pós METCO 447NS (Ni-Al-Mo) e METCO 201NS (zircónia), cada um no seu doseador.

- 6 - Introdução na consola de controle de gases e pós, dos seguintes parâmetros (Tab. 7.4) do pré-aquecimento, da projecção da camada de ligação e do revestimento de zircónia:

Parâmetros de projecção	PROGRAMA DA CONSOLA		
	Pré-aquecimento	Camada de ligação (METCO 447 NS)	Zircónia (METCO 201 NS)
Caudal de acetileno [l/min]	25	26,5	22
Caudal de oxigénio [l/min]	37	42	30
Caudal de azoto [l/min]	6,9	6,9	6,9
Velocidade de rotação do doseador [rpm]	0	9,8	11,6

Tab. 7.4 - Parâmetros de projecção introduzidos na consola de controle de gases e pós.

- 7 - A movimentação do robô nestes ensaios é controlada pelo programa que foi utilizado nos ensaios preliminares, visto ser executada a mesma trajectória de deposição (ver figura 6.1). O programa permite programar independentemente as características das 3 fases da projecção, que são: o pré-aquecimento, a camada de ligação e o revestimento de zircónia.

Introdução das seguintes variáveis no programa da consola do robô de projecção:

Para o pré-aquecimento:

- número de passes ou passagens = 1;
- velocidade de trabalho = 20 m/min;
- programa do pré-aquecimento (Tab. 7.4);
- distância entre linhas da trajectória (d) = 9 mm;
- distância de projecção = 140 mm.

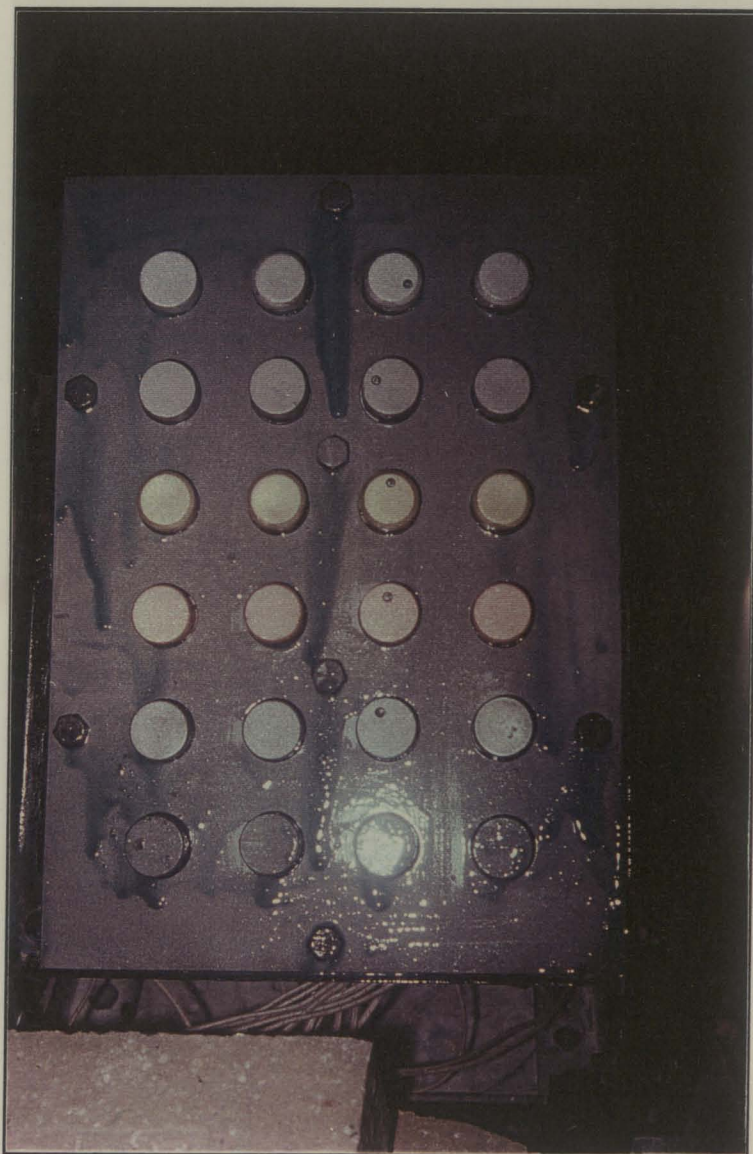
Para a projecção da camada de ligação(Ni-Al-Mo):

- número de passes = 2;
- velocidade de trabalho = 20 m/min (0,33 m/s) [Tab. 6.1];
- programa da camada de ligação (Tab. 7.4);
- distância entre linhas da trajectória (d) = 9 mm.
- distância de projecção = 140 mm (Tab. 6.1).

Para a projecção da camada de revestimento de zircónia:

- número de passes = 12;
- velocidade de trabalho = 20 m/min (0,33 m/s) [Tab. 6.1];
- programa da projecção da zircónia (Tab. 7.4);
- distância entre linhas da trajectória (d) = 9 mm;
- distância de projecção = 75 mm (Tab. 6.1).

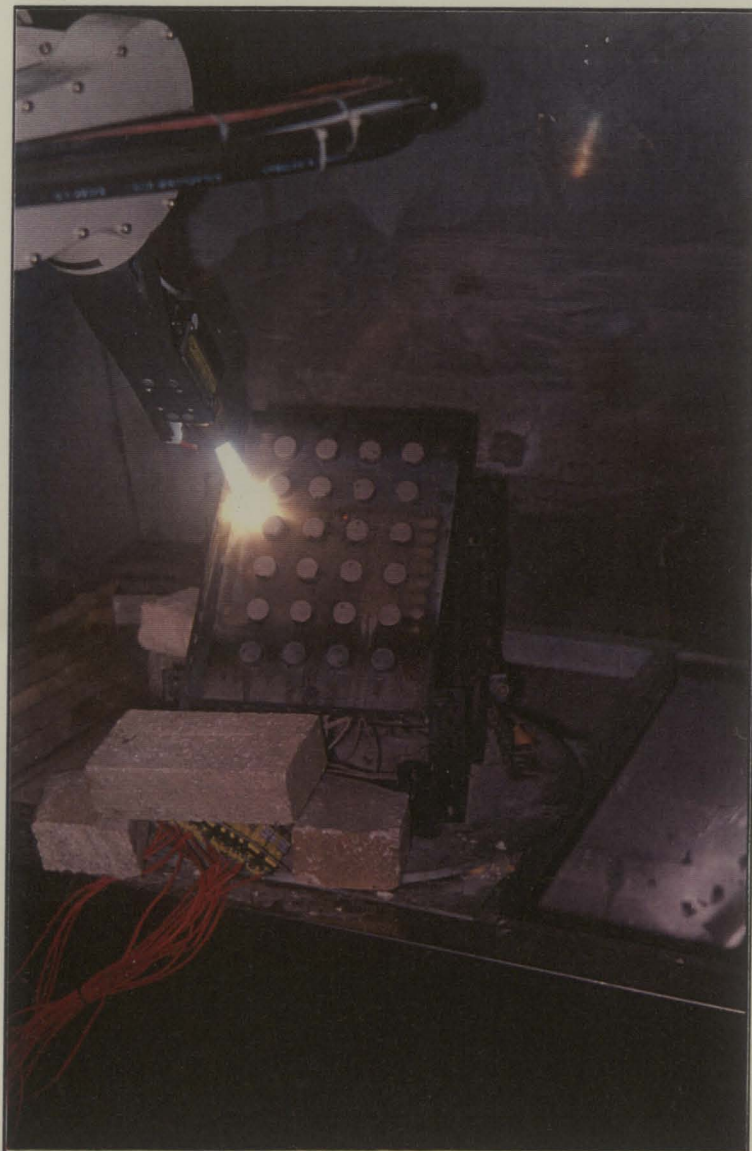
- 8 - Aplicação duma máscara da METCO na placa de suporte dos provetes (Fot. 7.3) com a finalidade de a proteger da projecção (impede a adesão do revestimento). A aplicação da máscara foi feita de modo a não cobrir os provetes.



Fot. 7.3 - Aspecto da placa de suporte dos provetes após a aplicação da máscara.

- 9 - Executa-se o programa do robô, para fazer numa passagem o pré-aquecimento dos provetes.

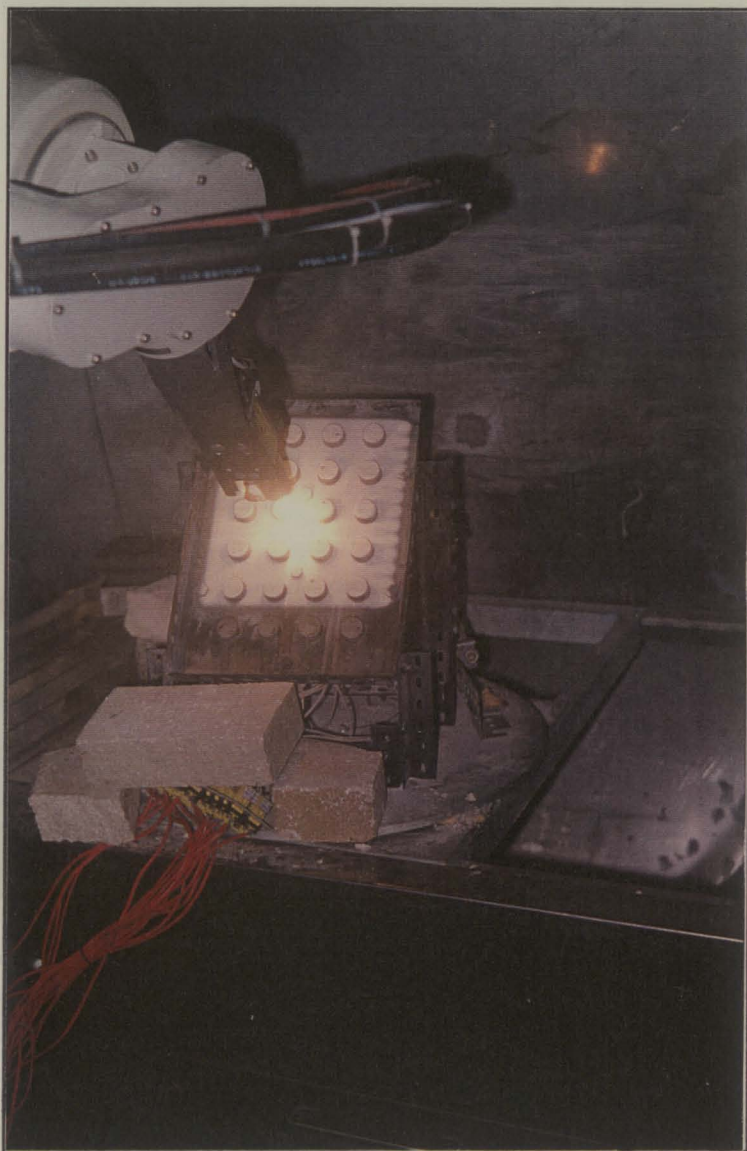
- 10 - Continuação da execução do programa do robô, para se efectuar a projecção a 90° da camada de ligação em 2 passagens seguidas (Fot. 7.4).



Fot. 7.4 - Projecção robotizada da camada de ligação (ângulo de projecção = 90°).

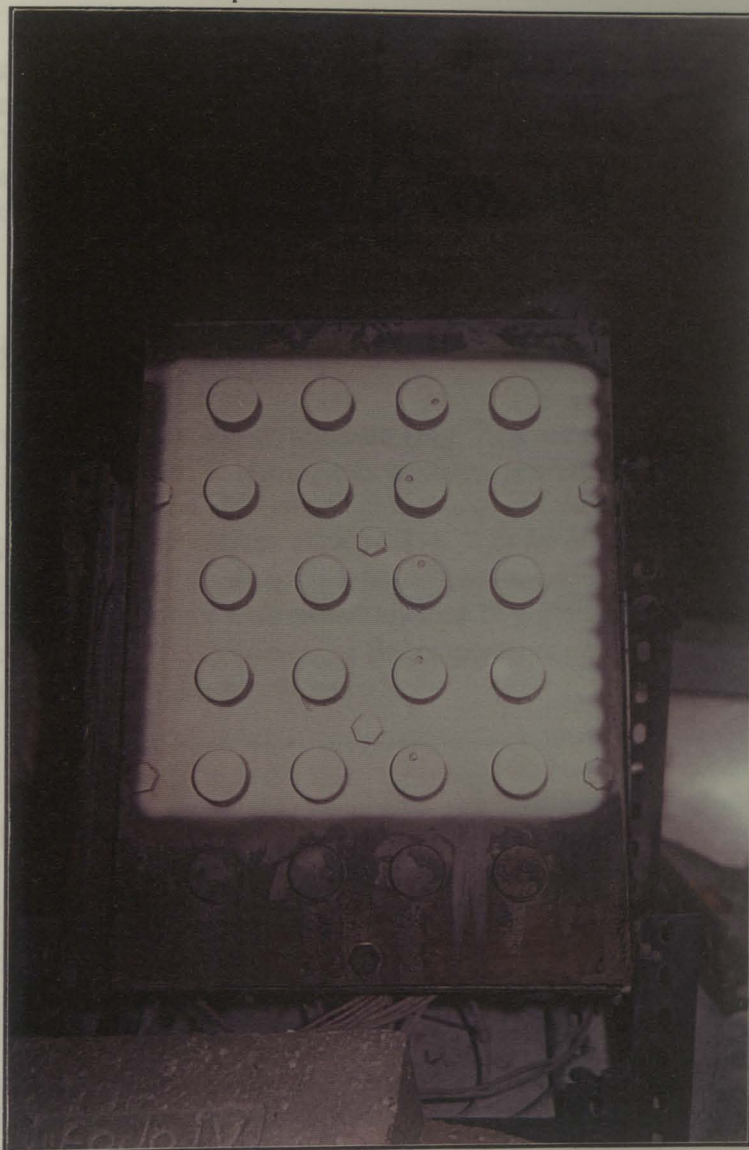
A fotografia seguinte (Fot. 7.6) mostra o aspecto final do revestimento da camada de ligação e zircônia obtido nestas condições de projecção.

11 - Continuação da execução do programa do robô, para se efectuar a projecção a 90° do revestimento de zircónia em 12 passagens seguidas (Fot. 7.5).



Fot. 7.5 - Projecção robotizada da zircónia (ângulo de projecção = 90°).

A fotografia seguinte (Fot. 7.6) mostra o aspecto final do revestimento de camada de ligação e zircónia obtido nestes ensaios de projecção.



Fot. 7.6 - Aspecto final do revestimento (camada de ligação e zircónia) dos provetes (ângulo de projecção = 90°).

7.4.2 - Projecções a 90° e 65° com um pré-aquecimento de 90°C (3º e 4º ensaios)

Nestes ensaios vai ser projectada a camada de ligação e a zircónia com uma temperatura de pré-aquecimento de 90°C e com limitação a 300°C da temperatura máxima atingida pelos provetes (substrato) no decorrer da projecção. A única diferença entre os dois ensaios é o ângulo de projecção utilizado (no 3º ensaio - 90° e no 4º ensaio - 65°).

Em cada ensaio serão revestidos 20 provetes (quatro de cada material), sendo instrumentados 5 deles (um de cada material).

Nos dois ensaios as passagens ou passes de projecção não serão feitas seguidas (2 passagens de camada de ligação(Ni-Al-Mo)-METCO 447NS mais 12 passagens de zircónia-METCO 201NS), isto é, fazem-se com paragens entre passagens, para impedir um aumento acentuado da temperatura dos provetes. Também durante a projecção é aplicado um jacto de ar comprimido (pressão de 6 bar) no lado oposto da face de projecção dos provetes.

Os procedimentos dos ensaios foram por esta ordem os seguintes:

- 1 - Como se mostra na figura seguinte (Fig. 7.3) um provete de cada material foi instrumentado com 3 termopares a várias profundidades. Como os provetes são de 5 materiais diferentes implicou a aplicação de 15 termopares. Em relação aos dois primeiros ensaios (Fig. 7.2) foi eliminado o termopar situado a 5 mm da superfície de projecção do provete devido a que se constatou por análise dos gráficos de temperaturas dos 1º e 2º ensaios (Anexo I - Gráficos 1 a 5 e 10 a 14), que as diferenças de temperatura eram pequenas em relação ao termopar situado a 2 mm da superfície.

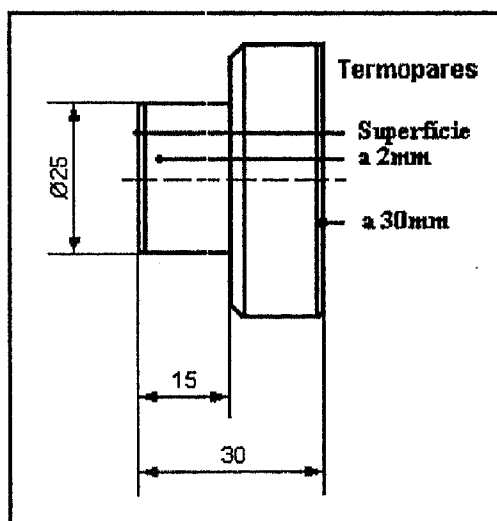


Fig. 7.3 - Posicionamento dos três termopares no provete.

- 2 - Grenalhagem dos provetes, nas mesmas condições dos 1º e 2º ensaios.
- 3, 4, 5, 6, 7, 8 - Os mesmos procedimentos dos 1º e 2º ensaios.
- 9 - Executa-se o programa do robô, para fazer numa passagem o pré-aquecimento dos provetes.
- 10 - Continuação da execução do programa do robô, para se efectuar a projecção da camada de ligação em 2 passagens com paragem entre elas.
- 11 - Continuação da execução do programa do robô, para se efectuar a projecção do revestimento de zircónia em 12 passagens (com paragem entre elas ou de duas em duas).

7.4.3 - Projecção a 30° com um pré-aquecimento de 90°C (5ºensaio)

Neste ensaio vai ser depositada a camada de ligação e a zircónia com um ângulo de projecção de 30° e com uma temperatura de pré-aquecimento de 90°C e com limitação a 300°C da temperatura máxima atingida pelos provetes (substrato) no decorrer da projecção.

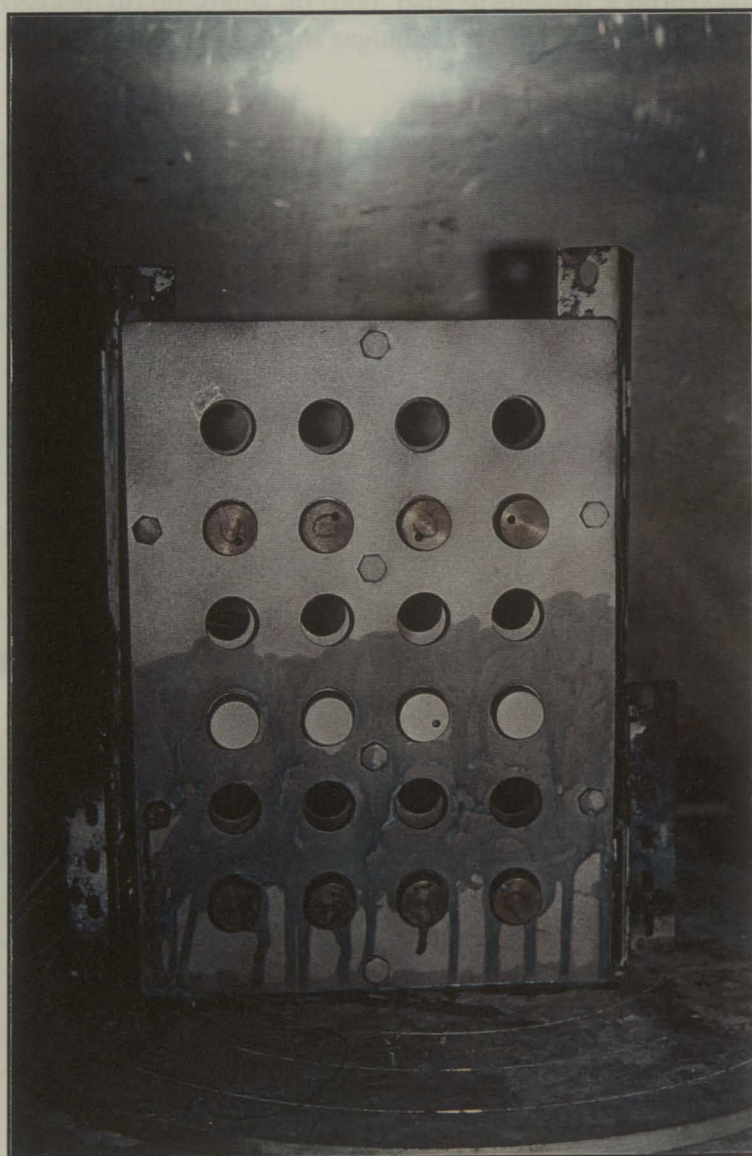
A projecção só será feita em 4 provetes de ferro fundido nodular perlítico. Sendo um deles instrumentado com três termopares (à superfície da face de projecção, a 2 mm e a 30 mm).

No ensaio as passagens ou passes de projecção não serão feitas seguidas (2 passagens de camada de ligação(Ni-Al-Mo)-METCO 447NS mais 12 passagens de zircónia-METCO 201NS), isto é, fazem-se com paragens entre passagens, para impedir um aumento acentuado da temperatura dos provetes. Também durante a projecção é aplicado um jacto de ar comprimido (pressão de 6 bar) no lado oposto da face de projecção dos provetes.

Os procedimentos dos ensaios foram por esta ordem os seguintes:

- 1 - Instrumentação dum provete de ferro fundido nodular perlítico com três termopares, da mesma maneira efectuada nos 3º e 4º ensaios de projecção (ver fig. 7.3).
- 2 - Grenalhagem dos provetes, nas mesmas condições dos 1º e 2º ensaios.
Na fotografia seguinte (Fot. 7.7) pode-se ver o aspecto dos provetes após a grenalhagem.
- 3 - A fixação e montagem dos 4 provetes no suporte de projecção foi executada do modo que se mostra na fotografia seguinte (Fot. 7.7). Os provetes colocados nas linhas 2 e 6 serviram apenas para permitir um aperto uniforme da placa de suporte, para assim obter-se um melhor posicionamento dos provetes que vão ser revestidos (linha 4).
- 4, 5, 6, 7 - Os mesmos procedimentos dos 1º e 2º ensaios.
- 8 - Aplicação duma máscara da METCO na placa de suporte dos provetes (Fot. 7.7) com a finalidade de a proteger da projecção (impede a adesão do revestimento). A aplicação da máscara foi feita de modo a não cobrir os provetes.

4ª linha - Ferro fundido nodular
perlítico (FFNP)

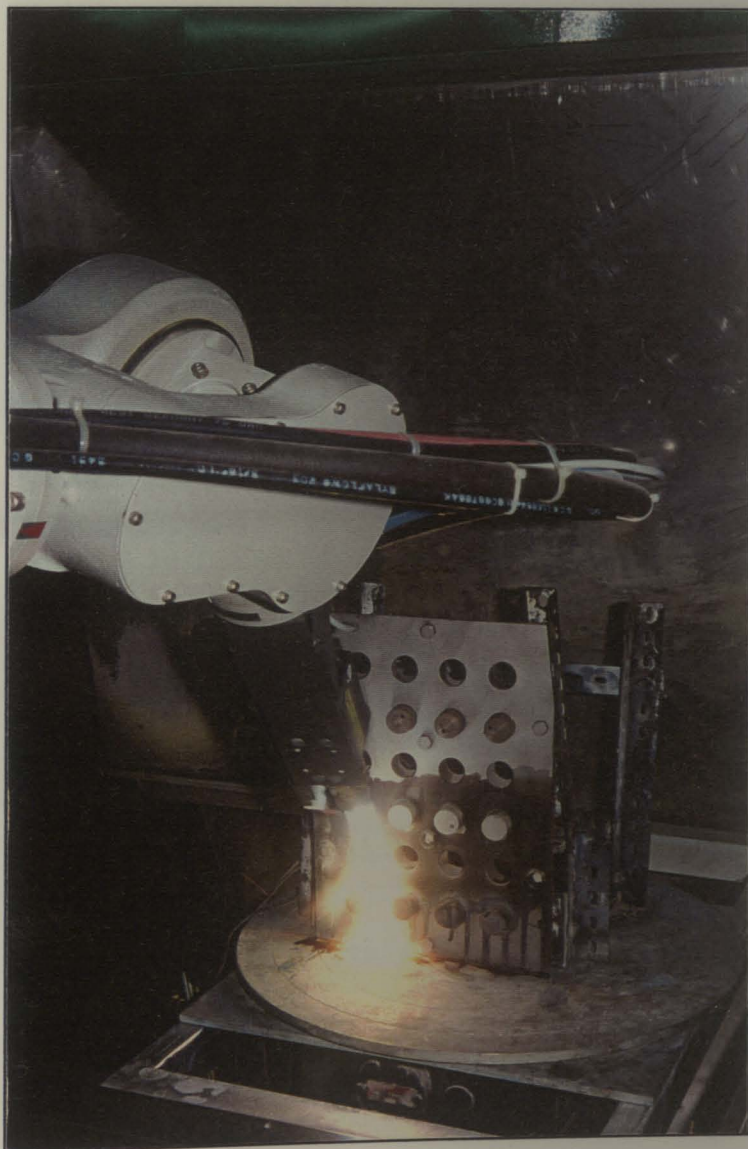


Fot. 7.7 - Aspecto da montagem dos provetes grenalhados no suporte de projecção (muito inclinado para permitir a projecção com um ângulo de 30°) após a aplicação da máscara.

Fot. 7.8 - Projecção robotizada da camada de ligação (ângulo de projecção = 30°).

- 9 - Executa-se o programa do robô, para fazer numa passagem o pré-aquecimento dos provetes.

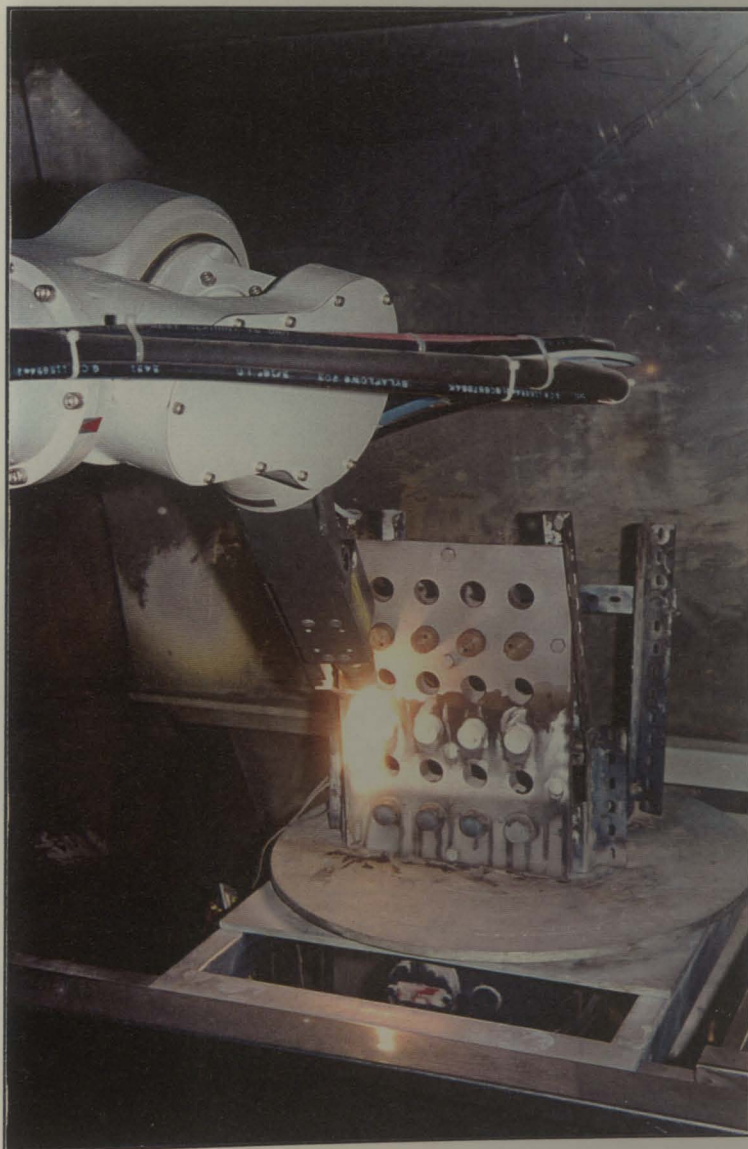
- 11 - Continuação da execução do programa do robô, para se efectuar a projecção a 30° da camada de ligação em 2 passagens seguidas (Fot. 7.8).



Fot. 7.8 - Projecção robotizada da camada de ligação (ângulo de projecção = 30°).

A fotografia seguinte (Fot. 7.10) mostra a aspecto final do revestimento (camada de ligação e aircônis) dos prumos, após a 2ª passagem de projecção.

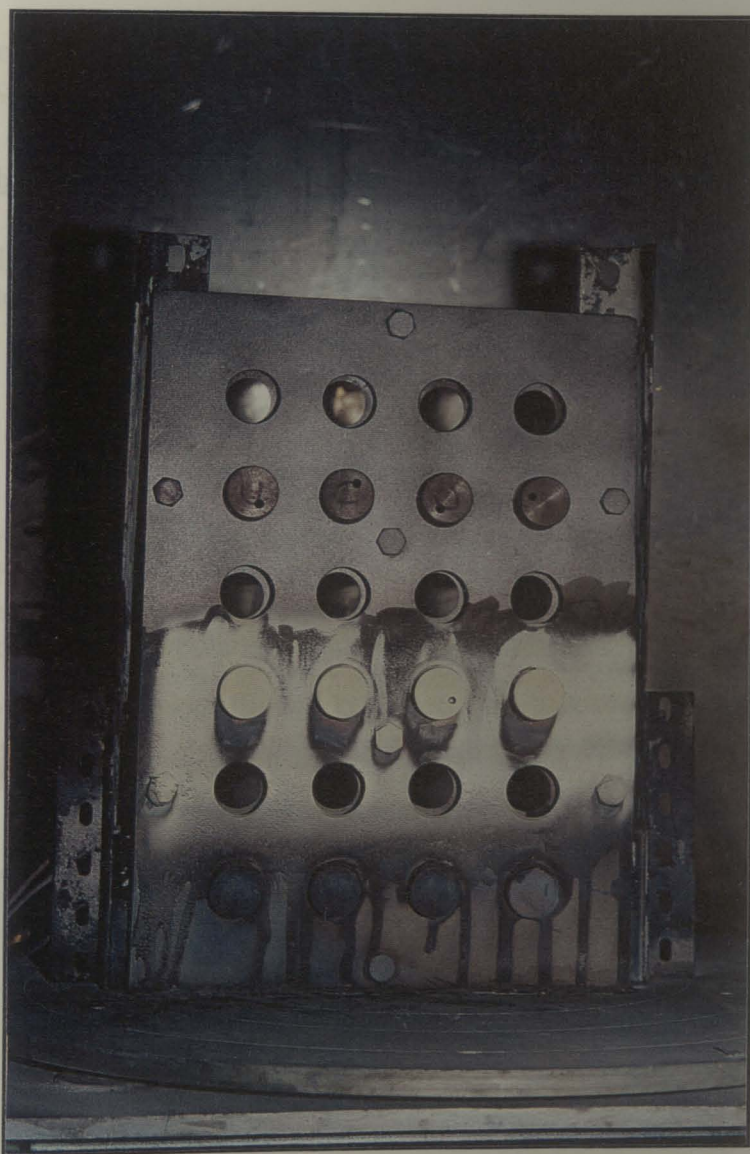
- 11 - Continuação da execução do programa do robô, para se efectuar a projecção a 30° do revestimento de zircónia em 12 passagens (com paragem de duas em duas ou de três em três). A fotografia seguinte (Fot. 7.9) mostra uma fase da projecção da zircónia.



Fot. 7.9 - Projecção robotizada da zircónia (ângulo de projecção = 30°).

A fotografia seguinte (Fot. 7.10) mostra o aspecto final do revestimento (camada de ligação e zircónia) dos provetes, obtido neste 5º ensaio de projecção.

7.5 - Ensaios de adesão



Fot. 7.10 - Aspecto final do revestimento (camada de ligação e zircónia) em provetes de ferro fundido nodular perlítico (ângulo de projecção = 30°).

Fot. 7.11 - Montagens cotadas de provetes revestidos com contra-provetes (previstos em cima).

7.5 - Ensaios de adesão

Os provetes que foram revestidos nos cinco ensaios de projecção serão sujeitos a ensaios de tracção com o objectivo de determinar a tensão de adesão dos revestimentos.

Os procedimentos dos ensaios de adesão foram por esta ordem os seguintes:

- ① - Grenalhagem de contra-provetes de aço CK45, nas mesmas condições dos provetes, isto é:
 - ângulo de incidência ($\phi = 90^\circ$);
 - tempo de grenalhagem para cada um ≈ 5 s;
 - pressão do ar comprimido = 3 bar;
 - grenalha de corindon (alumina quase pura).
- ② - Os provetes revestidos foram colados a contra-provetes de aço CK45 grenalhados, com uma cola à base de cianoacrilatos (LOCTITE 415). Aplicou-se um peso de 10 Kg durante 3 minutos para a força de compressão promover o início da reacção de polimerização dos cianoacrilatos.

A fotografia seguinte (Fot. 7.11) mostra o aspecto de montagens coladas de provetes revestidos com contra-provetes, que vão ser submetidas a ensaios de tracção.



Fot. 7.11 - Montagens coladas de provetes revestidos com contra-provetes (provetes em cima).

- ⑨ - Após 24 horas, para assim a junta colada ter tempo de adquirir a resistência máxima, realizaram-se os ensaios de tracção à velocidade de 1 mm/min, de maneira semelhante à representada na figura 5.1(pág. 32).

Para a identificação dos provetes utilizou-se a nomenclatura descrita na tabela seguinte (Tab. 7.5).

Nome do material	Designação utilizada neste trabalho
Duralumínio	ALCu
Ferro fundido nodular perlítico estabilizado com cobre	FFNP
Cuprocrómio	CuCr
Ferro fundido cinzento ferrítico	FFCF
Zircónia (ZrO_2)	Z
Camada de ligação (Ni-Al-Mo)	CL

Tab 7.5 - Nomenclatura utilizada na identificação dos provetes.

Exemplo duma designação: ALCu 1 [CL+Z]120

- Provette de duralumínio;
- Provette nº1;
- Revestido com camada de ligação e zircónia;
- Temperatura de pré-aquecimento = 120°C.

Nas tabelas seguintes (Tab.^{as} 7.6, 7.7, 7.8, 7.9 e 7.10) apresentam-se os resultados dos ensaios de adesão respectivamente para as 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª projecções.

Tab. 7.6 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADESÃO [1ª projecção]

Pré-aquecimento pretendido = 120°C			Ângulo de projecção = 90°				Sem arrefecimento	
DESIGNAÇÃO DO PROVETE	ÁREA DE SOLICITAÇÃO [mm2]*	ÁREA ARRANCADA [mm2]	FORÇA MÁXIMA DE ADESÃO		TENSÃO MÁXIMA DE ADESÃO		TENSÃO MÉDIA DE ADESÃO	
			[Kgf]	[N]	[Kgf/mm2*]	[MPa]	[Kgf/mm2*]	[MPa]
ALCu 1 [CL+Z]120	346	300	[176,5]	1730	[0,51]	5,0	[0,41]	4,1
ALCu 2 [CL+Z]120	471	452	[148]	1450	[0,31]	3,1		
ALCu 3 [CL+Z]120	471	100	[48,5]	475	Eliminado			
ALCu 4 [CL+Z]120	s/revestimento							
FFNP 5 [CL+Z]120	452	368	[227,5]	2230	[0,50]	4,9	[0,63]	6,2
FFNP 6 [CL+Z]120	452	410	[308]	3018	[0,68]	6,7		
FFNP 7 [CL+Z]120	452	452	[326,5]	3200	[0,72]	7,1		
FFNP 8 [CL+Z]120	descolou							
Latão 9 [CL+Z]120	346	290	[134]	1313	[0,39]	3,8	[0,45]	4,4
Latão 10 [CL+Z]120	descolou							
Latão 11 [CL+Z]120	346	346	[177,5]	1740	[0,51]	5,0		
Latão 12 [CL+Z]120	346	220	[94]	921	Eliminado			
CuCr 13 [CL+Z]120	452	270	[86]	843	Eliminado		[0,45]	4,4
CuCr 14 [CL+Z]120	415	360	[147]	1441	[0,35]	3,5		
CuCr 15 [CL+Z]120	452	430	[256]	2509	[0,57]	5,6		
CuCr 16 [CL+Z]120	452	452	[192]	1882	[0,42]	4,2		
FFCF 17 [CL+Z]90	452	445	[171,5]	1681	[0,38]	3,7	[0,41]	4,0
FFCF 18 [CL+Z]90	452	414	[201]	1970	[0,44]	4,3		
FFCF 19 [CL+Z]90	452	225	[85]	833	Eliminado			
FFCF 20 [CL+Z]90	452	298	[100]	980	Eliminado			

Nota: São eliminados no cálculo da força de adesão os ensaios em que a área arrancada de revestimento é menor que 80% da área de solicitação (área revestida), devido a que a rotura nestes casos se deu em grande extensão na cola. A área arrancada corresponde à parte do revestimento do provete que fica colada ao contra-provete após o ensaio de tracção.

Sem arrefecimento: as passagens de projecção foram feitas seguidas e sem arrefecimento dos provetes (por ar comprimido) durante a projecção.

Exemplo duma designação: FFCF 19 [CL+Z]90

Provete de ferro fundido cinzento ferrítico;
Provete nº19;
Revestido com camada de ligação e zircónia;
Temperatura de pré-aquecimento = 90°C.

Tab. 7.7 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADESÃO [2ª projecção]

Pré-aquecimento pretendido = 90°C			Angulo de projecção = 90°				Sem arrefecimento	
DESIGNAÇÃO DO PROVETE	ÁREA DE SOLICITAÇÃO [mm2]*	ÁREA ARRANCADA [mm2]	FORÇA MÁXIMA DE ADESÃO		TENSÃO MÁXIMA DE ADESÃO		TENSÃO MÉDIA DE ADESÃO	
			[Kgf]	[N]	[Kgf/mm2*]	[MPa]	[Kgf/mm2*]	[MPa]
ALCu 21 [CL+Z]100	346	305	[138]	1352	[0,40]	3,9	[0,44]	4,3
ALCu 22 [CL+Z]100	363	345	[171]	1676	[0,47]	4,6		
ALCu 23 [CL+Z]100	346	285	[135]	1323	[0,39]	3,8		
ALCu 24 [CL+Z]100	471	435	[226]	2215	[0,48]	4,7		
FFNP 25 [CL+Z]90	452	395	[170,5]	1671	[0,38]	3,7	[0,35]	3,4
FFNP 26 [CL+Z]90	452	385	[127,5]	1250	[0,28]	2,7		
FFNP 27 [CL+Z]90	452	385	[174]	1705	[0,38]	3,7		
FFNP 28 [CL+Z]90	452	90	[63]	617	Eliminado			
Latão 29 [CL+Z]100	346	315	[138,5]	1357	[0,40]	3,9	[0,44]	4,3
Latão 30 [CL+Z]100	346	123	[31]	304	Eliminado			
Latão 31 [CL+Z]100	descolou							
Latão 32 [CL+Z]100	346	330	[166]	1627	[0,48]	4,7		
CuCr 33 [CL+Z]90	452	385	[181,5]	1779	[0,40]	3,9	[0,37]	3,6
CuCr 34 [CL+Z]90	452	434	[183,5]	1798	[0,41]	4,0		
CuCr 35 [CL+Z]90	452	434	[127]	1245	[0,28]	2,7		
CuCr 36 [CL+Z]90	452	434	[180]	1764	[0,40]	3,9		
FFCF 37 [CL+Z]70	452	385	[155,5]	1524	[0,34]	3,3	[0,34]	3,3
FFCF 38 [CL+Z]70	452	374	[137,5]	1348	[0,30]	2,9		
FFCF 39 [CL+Z]70	452	374	[124]	1215	[0,27]	2,6		
FFCF 40 [CL+Z]70	452	424	[200,5]	1965	[0,44]	4,3		

Nota: São eliminados no cálculo da força de adesão os ensaios em que a área arrancada de revestimento é menor que 80% da área de solicitação (área revestida), devido a que a rotura nestes casos se deu em grande extensão na cola. A área arrancada corresponde à parte do revestimento do provete que fica colada ao contra-provete após o ensaio de tracção.

Sem arrefecimento: as passagens de projecção foram feitas seguidas e sem arrefecimento dos provetes (por ar comprimido) durante a projecção.

Exemplo duma designação: CuCr 35 [CL+Z]90

Provete de cuprocromo
Provete nº35;
Revestido com camada de ligação e zircónia;
Temperatura de pré-aquecimento = 90°C.

Tab. 7.8 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADESÃO [3ª projecção]

Pré-aquecimento pretendido = 90°C			Ângulo de projecção = 90°				Com arrefecimento	
DESIGNAÇÃO DO PROVETE	ÁREA DE SOLICITAÇÃO [mm2]*	ÁREA ARRANCADA [mm2]	FORÇA MÁXIMA DE ADESÃO		TENSÃO MÁXIMA DE ADESÃO		TENSÃO MÉDIA DE ADESÃO	
			[Kgfl	[N]	[Kgflmm2*]	[MPa]	[Kgflmm2*]	[MPa]
ALCu 41 [CL+Z]90	346	339	[112,5]	1103	[0,33]	3,2	[0,46]	4,5
ALCu 42 [CL+Z]90	471	471	[161]	1578	[0,34]	3,3		
ALCu 43 [CL+Z]90	346	346	[246]	2411	[0,71]	7,0		
ALCu 44 [CL+Z]90	descolou							
FFNP 45 [CL+Z]90	471	434	[183,5]	1798	[0,39]	3,8	[0,38]	3,7
FFNP 46 [CL+Z]90	471	471	[182,5]	1789	[0,39]	3,8		
FFNP 47 [CL+Z]90	452	452	[172,5]	1691	[0,38]	3,7		
FFNP 48 [CL+Z]90	452	452	[157,5]	1544	[0,35]	3,4		
Latão 49 [CL+Z]90	380	373	[170]	1666	[0,45]	4,4	[0,46]	4,5
Latão 50 [CL+Z]90	380	373	[116,5]	1142	[0,31]	3,0		
Latão 51 [CL+Z]90	380	380	[220,5]	2161	[0,58]	5,7		
Latão 52 [CL+Z]90	380	380	[183]	1793	[0,48]	4,7		
CuCr 53 [CL+Z]85	471	471	[207,5]	2034	[0,44]	4,3	[0,39]	3,8
CuCr 54 [CL+Z]85	471	471	[203,5]	1994	[0,43]	4,2		
CuCr 55 [CL+Z]85	471	471	[171,5]	1681	[0,36]	3,5		
CuCr 56 [CL+Z]85	471	407	[146,5]	1436	[0,31]	3,0		
FFCF 57 [CL+Z]70	471	464	[162]	1588	[0,34]	3,3	[0,35]	3,4
FFCF 58 [CL+Z]70	452	276	[97]	951	Eliminado			
FFCF 59 [CL+Z]70	452	374	[202,5]	1985	[0,45]	4,4		
FFCF 60 [CL+Z]70	452	389	[114,5]	1122	[0,25]	2,5		

Nota: São eliminados no cálculo da força de adesão os ensaios em que a área arrancada de revestimento é menor que 80% da área de solicitação (área revestida), devido a que a rotura nestes casos se deu em grande extensão na cola. A área arrancada corresponde à parte do revestimento do provete que fica colada ao contra-provete após o ensaio de tracção.

Com arrefecimento: interrupção da projecção entre passagens e arrefecimento dos provetes durante a projecção (jacto de ar comprimido aplicado na parte de trás dos provetes, oposta à face de projecção).

Exemplo duma designação: FFNP 45 [CL+Z]90

Provete de ferro fundido nodular perlítico
Provete nº45;
Revestido com camada de ligação e zircónia;
Temperatura de pré-aquecimento = 90°C.

Tab. 7.9 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADESÃO [4ª projecção]

Pré-aquecimento pretendido = 90°C			Ângulo de projecção = 65°				Com arrefecimento	
DESIGNAÇÃO DO PROVETE	ÁREA DE SOLICITAÇÃO [mm2]*	ÁREA ARRANCADA [mm2]	FORÇA MÁXIMA DE ADESÃO		TENSÃO MÁXIMA DE ADESÃO		TENSÃO MÉDIA DE ADESÃO	
			[Kgf]	[N]	[Kgf/mm2*]	[MPa]	[Kgf/mm2*]	[MPa]
ALCu 61 [CL+Z]90	346	297	[304,5]	2984	[0,88]	8,6	[0,57]	5,6
ALCu 62 [CL+Z]90	415	356	[199,5]	1955	[0,48]	4,7		
ALCu 63 [CL+Z]90	434	369	[232]	2274	[0,53]	5,2		
ALCu 64 [CL+Z]90	380	329	[149,5]	1465	[0,39]	3,8		
FFNP 65 [CL+Z]90	452	397	[312]	3058	[0,69]	6,8	[0,85]	8,3
FFNP 66 [CL+Z]90	452	225	[156]	1529	Eliminado			
FFNP 67 [CL+Z]90	452	432	[451,5]	4425	[1,00]	9,8		
FFNP 68 [CL+Z]90	434	233	[85,5]	838	Eliminado			
Latão 69 [CL+Z]70	380	373	[367,5]	3602	[0,97]	9,5	[0,81]	7,9
Latão 70 [CL+Z]70	380	317	[282]	2764	[0,74]	7,3		
Latão 71 [CL+Z]70	415	415	[451]	4420	[1,09]	10,7		
Latão 72 [CL+Z]70	415	403	[186]	1823	[0,45]	4,4		
CuCr 73 [CL+Z]70	452	374	[273,5]	2680	[0,61]	6,0	[0,72]	7,1
CuCr 74 [CL+Z]70	452	252	[110]	1078	Eliminado			
CuCr 75 [CL+Z]70	452	452	[373,5]	3660	[0,83]	8,1		
CuCr 76 [CL+Z]70	452	225	[119]	1166	Eliminado			
FFCF 77 [CL+Z]65	452	113	[30]	294	Eliminado		[0,60]	5,9
FFCF 78 [CL+Z]65	452	430	[244]	2391	[0,54]	5,3		
FFCF 79 [CL+Z]65	452	452	[295]	2891	[0,65]	6,4		
FFCF 80 [CL+Z]65	452	226	[75]	735	Eliminado			

Nota: São eliminados no cálculo da força de adesão os ensaios em que a área arrancada de revestimento é menor que 80% da área de solicitação (área revestida), devido a que a rotura nestes casos se deu em grande extensão na cola. A área arrancada corresponde à parte do revestimento do provete que fica colada ao contra-provete após o ensaio de tracção.

Com arrefecimento: interrupção da projecção entre passagens e arrefecimento dos provetes durante a projecção (jacto de ar comprimido aplicado na parte de trás dos provetes, oposta à face de projecção).

Exemplo duma designação: ALCu 64 [CL+Z]90

Provete de duralumínio
Provete nº64;
Revestido com camada de ligação e zircónia;
Temperatura de pré-aquecimento = 90°C.

Tab. 7.10 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADESÃO [5ª projecção]

Pré-aquecimento = 90°C			Angulo de projecção = 30°				Com arrefecimento	
DESIGNAÇÃO DO PROVETE	ÁREA DE SOLICITAÇÃO [mm²]*	ÁREA ARRANCADA [mm²]	FORÇA MÁXIMA DE ADESÃO		TENSÃO MÁXIMA DE ADESÃO		TENSÃO MÉDIA DE ADESÃO	
			[Kgf]	[N]	[Kgf/mm²*]	[MPa]	[Kgf/mm²*]	[MPa]
FFNP 81 [CL+Z]90	Não foi ensaiado						[0,84]	8,3
FFNP 82 [CL+Z]90	452	452	[541]	5302	[1,20]	11,8		
FFNP 83 [CL+Z]90	452	380	[285]	2793	[0,63]	6,2		
FFNP 84 [CL+Z]90	452	420	[314,5]	3082	[0,70]	6,9		

Nota: São eliminados no cálculo da força de adesão os ensaios em que a área arrancada de revestimento é menor que 80% da área de solicitação (área revestida), devido a que a rotura nestes casos se deu em grande extensão na cola. A área arrancada corresponde à parte do revestimento do provete que fica colada ao contra-provete após o ensaio de tracção.

O provete FFNP 81 não foi ensaiado porque foi utilizado para retirar amostras, para observarmos no microscópio a morfologia do revestimento projectado a 30° bem como a do ferro fundido nodular perlítico.

Com arrefecimento: interrupção da projecção entre passagens e arrefecimento dos provetes durante a projecção (jacto de ar comprimido aplicado na parte de trás dos provetes, oposta à face de projecção).

Exemplo duma designação: FFNP 82 [CL+Z]90

Provete de ferro fundido nodular perlítico
Provete nº82;
Revestido com camada de ligação e zircónia;
Temperatura de pré-aquecimento = 90°C.

8 - Compilação dos resultados obtidos e sua discussão

A discussão dos resultados será dividida em duas partes:

- Ensaios preliminares de projecção (referente ao capítulo 6);
- Ensaios de projecção (referente ao capítulo 7).

8.1 - Ensaios preliminares de projecção

Estes ensaios tinham como objectivo principal determinar a influência do ângulo de projecção na eficiência de deposição e na espessura da camada de ligação (Ni-Al-Mo; METCO 447NS), da zircónia (ZrO_2 ; METCO 201NS) e da alumina (Al_2O_3 ; METCO 105NS).

As tabelas seguintes (Tab.^{as} 8.1 e 8.2) apresentam, respectivamente para a projecção a 90° e a 65°, uma comparação entre os valores de espessura, obtidos pelos vários métodos utilizados: peso de revestimento, medidor de espessuras por sonda electromagnética de correntes de Eddy (não foi utilizado nas placas que foram projectadas com um ângulo de 65°) e pela observação do revestimento no microscópio.

Substrato	Revestimento	Método de obtenção da espessura [mm]		
		Peso	Sonda	Microscópico
Placa nº1	Camada de ligação (Ni-Al-Mo)	0,13	0,43	0,12
Placa nº2	Camada de ligação (Ni-Al-Mo)	0,13*	0,43*	0,12
	Zircónia (ZrO_2)	0,13	0,15	0,13
	Camada de ligação + Zircónia	0,26	0,58	0,25
Placa nº3	Camada de ligação (Ni-Al-Mo)	0,13*	0,43*	0,12
	Alumina (Al_2O_3)	0,10	0,11	0,11
	Camada de ligação + Alumina	0,23	0,54	0,22

* A suposição de que a camada de ligação tinha aproximadamente a mesma espessura nas três placas, devido às condições de projecção serem semelhantes, ficou demonstrada pela observação das amostras no microscópio.

Tab. 8.1 - Comparação dos valores da espessura dos revestimentos que foram obtidos pelos vários métodos em placas que foram revestidas com um ângulo de projecção de 90°.

Substrato	Revestimento	Método de obtenção da espessura [mm]	
		Peso	Microscópico
Placa nº4	Camada de ligação (Ni-Al-Mo)	0,12	0,11
Placa nº5	Camada de ligação (Ni-Al-Mo)	0,12**	0,11
	Zircónia (ZrO ₂)	0,10	0,10
	Camada de ligação + Zircónia	0,22	0,21
Placa nº6	Camada de ligação (Ni-Al-Mo)	0,12**	0,11
	Alumina (Al ₂ O ₃)	0,07	0,07
	Camada de ligação + Alumina	0,19	0,18

** A suposição de que a camada de ligação tinha aproximadamente a mesma espessura nas três placas, devido às condições de projecção serem semelhantes, ficou demonstrada pela observação das amostras no microscópio.

Tab. 8.2 - Comparação dos valores da espessura dos revestimentos que foram obtidos pelos vários métodos em placas que foram revestidas com um ângulo de projecção de 65°.

Pela análise das tabelas anteriores (Tab. 8.1 e 8.2) constata-se que os valores de espessura determinados através do peso do revestimento e pela observação microscópica do revestimento são muito semelhantes.

Este facto permite-nos tirar as seguintes conclusões:

- ① - O valor de porosidade considerado na massa específica (Tab. 6.1) que foi utilizada na determinação da espessura dos revestimentos através do seu peso, revelou-se correcto.

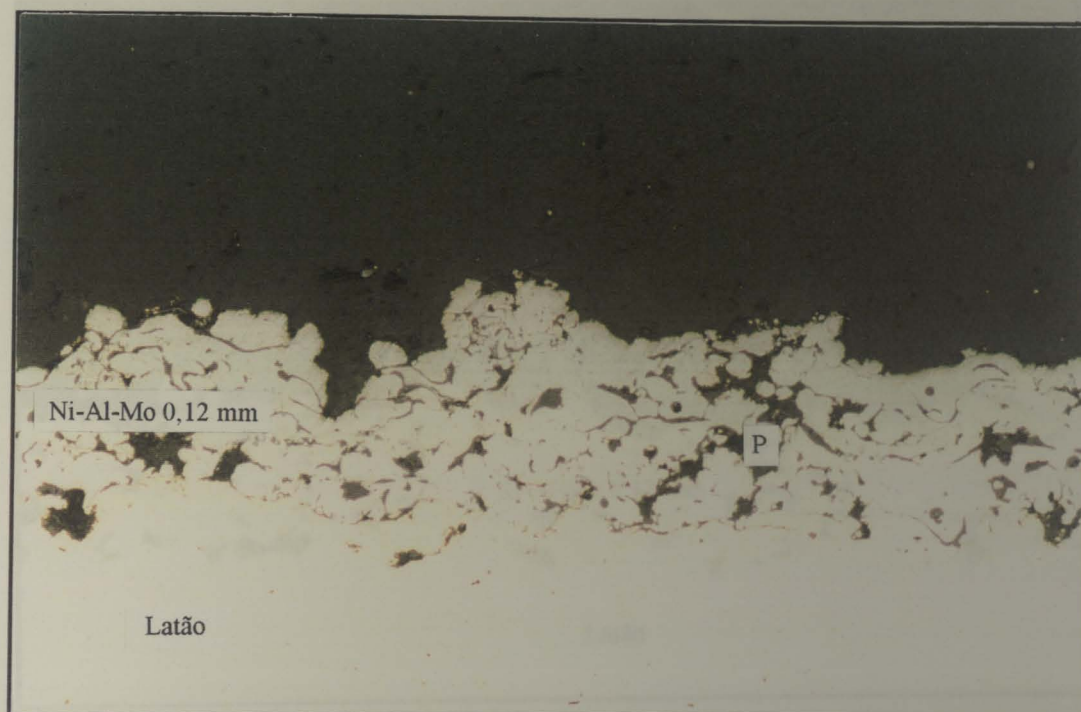
Camada de ligação(Ni-Al-Mo) - Massa específica = 7200 Kg/m³
(Porosidade < 2%)

Zircónia (ZrO₂) - Massa específica = 5200 Kg/m³ (Porosidade = 10%)

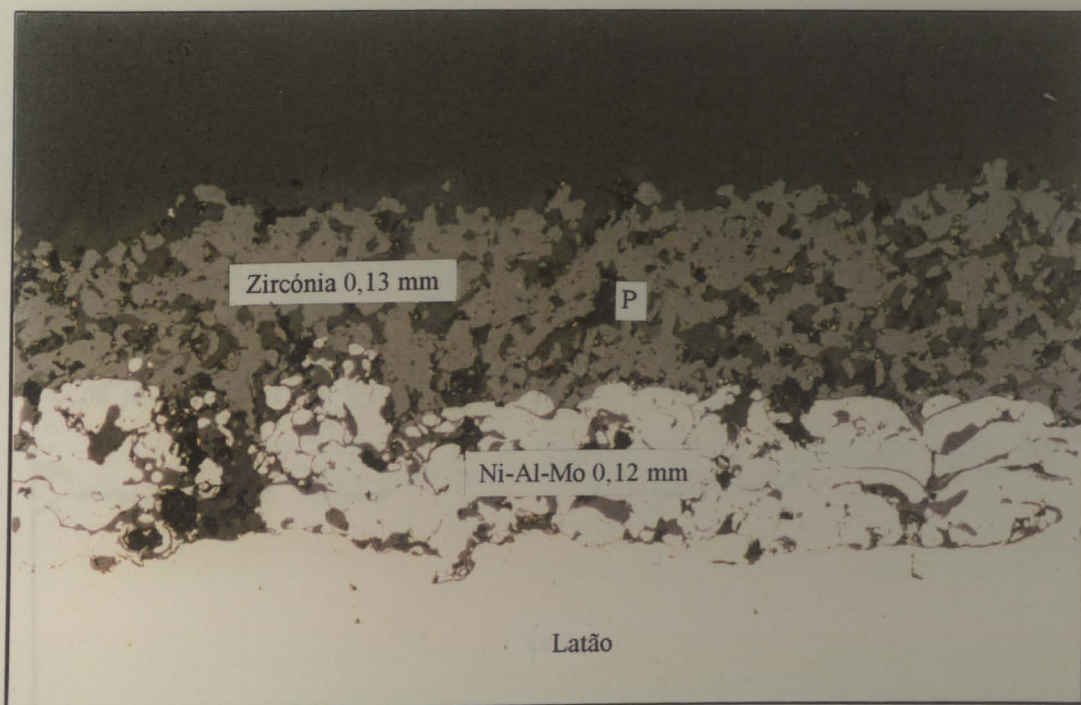
Alumina (Al₂O₃) - Massa específica = 3200 Kg/m³ (Porosidade = 2%)

- ② - A porosidade dos revestimentos projectados a 65 e 90° é semelhante e tem os valores indicados em cima para os três materiais projectados.

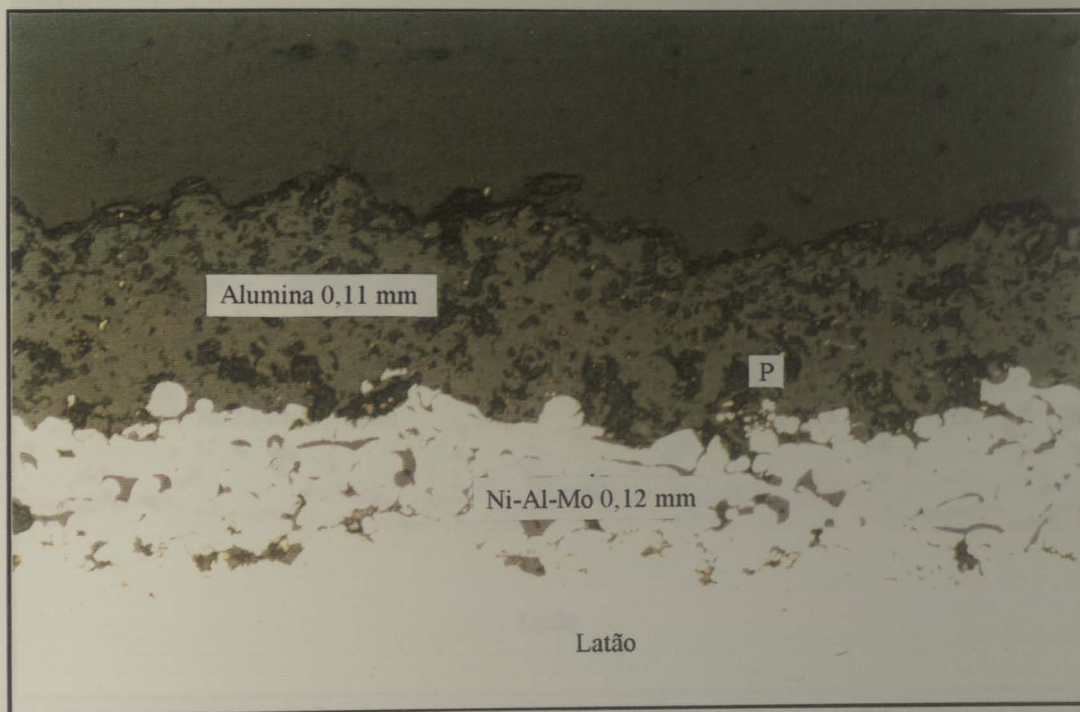
Nas seguintes fotomicrografias (Fot. 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5 e 8.6) mostra-se o revestimento, respectivamente, das placas nºs 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Foram utilizadas amostras retiradas das placas de latão conforme descrito no ponto 6.6.3.



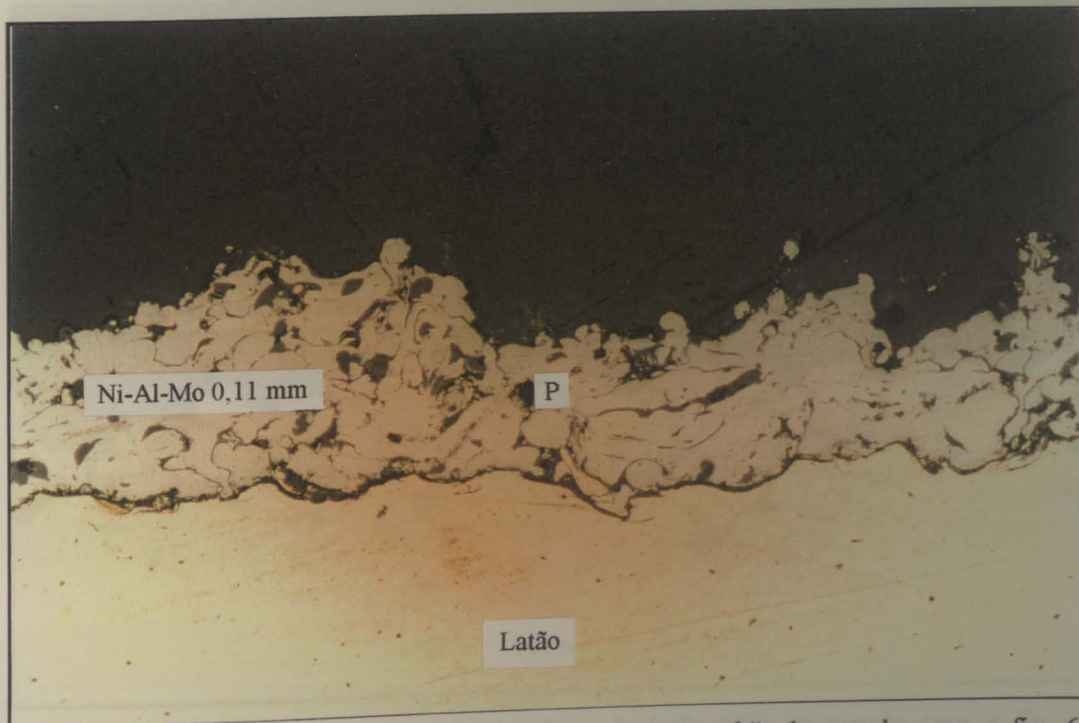
Fot. 8.1 - Ampliação 200x. Amostra 3 (da placa de latão nº1) de acordo com a fig. 6.2 Revestimento de Ni-Al-Mo projectado a 90°. A camada de ligação apresenta pouca porosidade < 2% (pontos mais escuros-letra P), natural neste tipo de revestimentos obtidos por projecção. Espessura da camada de ligação (Ni-Al-Mo) de 0,12 mm.



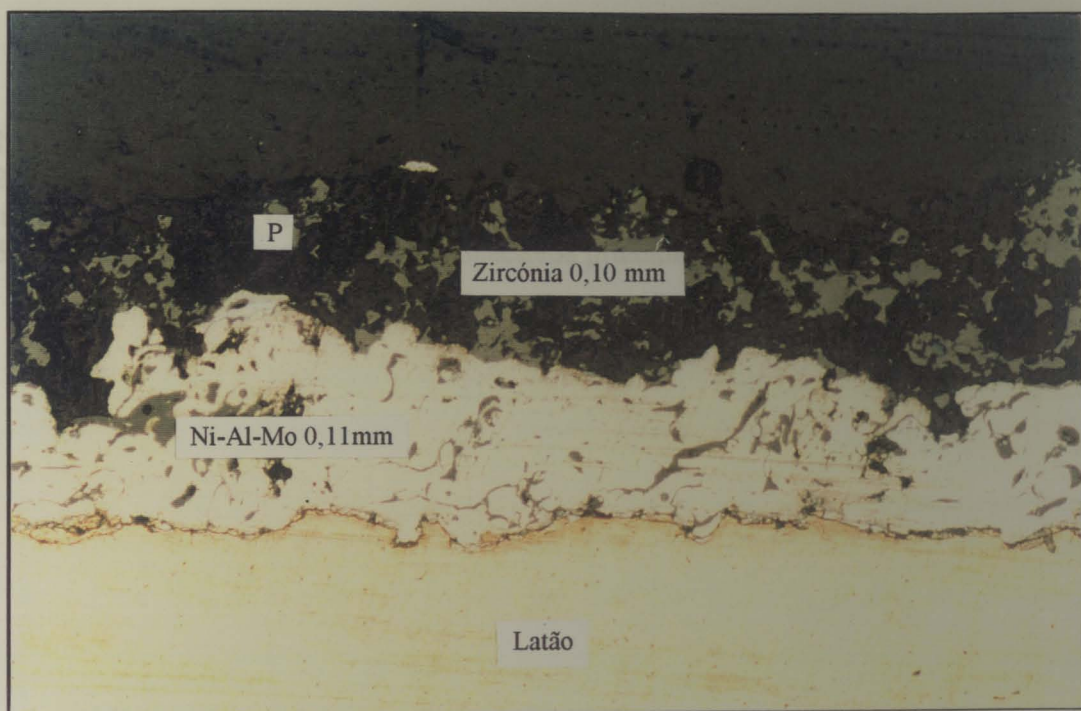
Fot. 8.2 - Ampliação 200x. Amostra 2 (da placa de latão nº2) de acordo com a fig. 6.2. Revestimento de Ni-Al-Mo e zircónia projectado a 90°. Tanto a camada de ligação como a zircónia apresentam pouca porosidade (pontos mais escuros-letra P), no entanto a camada de zircónia apresenta mais porosidade do que a camada de ligação o que é natural já que são esperadas respectivamente porosidades de 10 e < 2%. A espessura da camada de ligação é de 0,12 mm e da zircónia de 0,13 mm.



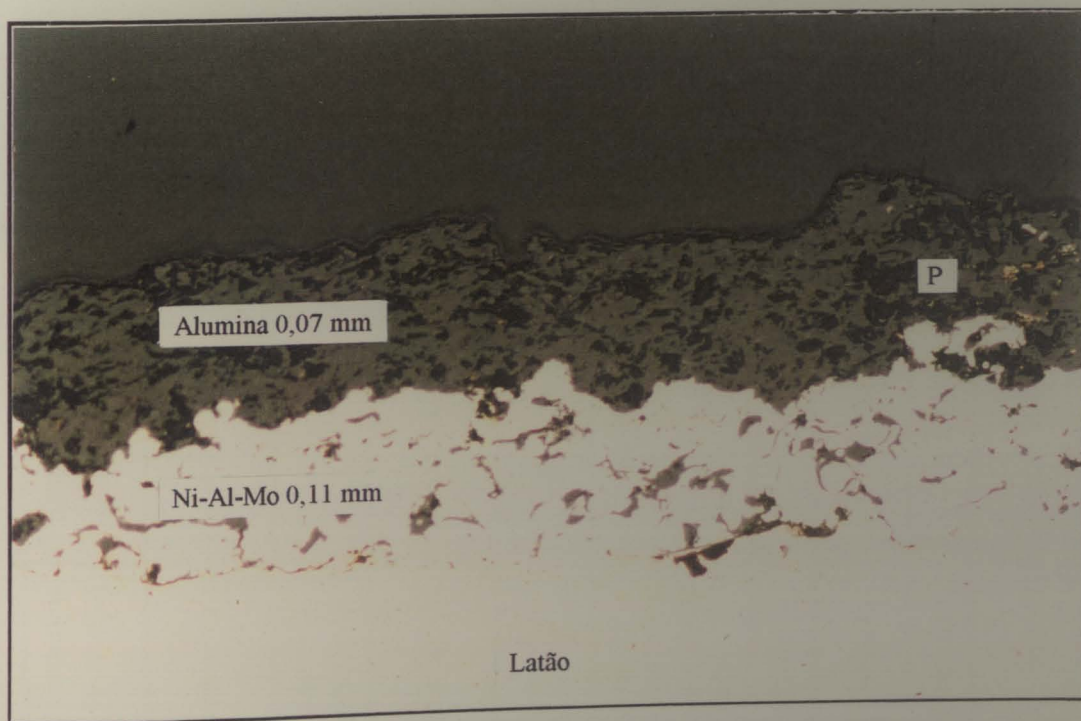
Fot. 8.3 - Ampliação 200x. Amostra 2 (da placa de latão nº3) de acordo com a fig. 6.2. Revestimento de Ni-Al-Mo e alumina projectado a 90°. Tanto a camada de ligação como a alumina apresentam pouca porosidade (pontos mais escuros-letra P). A camada de ligação e a alumina apresentam respectivamente porosidades de <2 e 2%. A espessura da camada de ligação é de 0,12 mm e da alumina de 0,11 mm.



Fot. 8.4 - Ampliação 200x. Amostra 1 (da placa de latão nº4) de acordo com a fig. 6.2. Revestimento de Ni-Al-Mo projectado a 65°. A camada de ligação apresenta pouca porosidade < 2% (pontos mais escuros-letra P), natural neste tipo de revestimentos obtidos por projecção. Espessura da camada de ligação (Ni-Al-Mo) de 0,11 mm.



Fot. 8.5 - Ampliação 200x. Amostra 3 (da placa de latão nº5) de acordo com a fig. 6.2. Revestimento de Ni-Al-Mo e zircónia projectado a 65°. O revestimento de zircónia apresenta muitos pontos mais escuros-letra P mas não são todos devido à porosidade (muitos foram originados pelo polimento da amostra). A camada de ligação apresenta muito pouca porosidade < 2%. A espessura da camada de ligação é de 0,11 mm e da zircónia de 0,10mm (muito menor em relação à placa nº2 - projecção a 90°).



Fot. 8.6 - Ampliação 200x. Amostra 4 (da placa de latão nº6) de acordo com a fig. 6.2. Revestimento de Ni-Al-Mo e alumina projectado a 65°. O revestimento de alumina apresenta muitos pontos mais escuros-letra P mas não são todos devido à porosidade (muitos foram originados pelo polimento da amostra). A camada de ligação apresenta muito pouca porosidade < 2%. A espessura da camada de ligação é de 0,11 mm e da alumina de 0,07 mm (muito menor em relação à placa nº3 - projecção a 90°).

Nas tabelas seguintes (Tab.^{as} 8.3, 8.4 e 8.5), respectivamente para as placas nºs 1 e 4, nºs 2 e 5 e nºs 3 e 6, faz-se uma comparação entre vários parâmetros da projecção admitidos à priori e os obtidos após o ensaio. Nomeadamente, para o parâmetro da eficiência de deposição, que era um dos objectivos principais destes ensaios preliminares.

1º e 4º pré-ensaios de projecção [Camada de ligação Ni-Al-Mo]	Valores admitidos à priori	Valores obtidos após ensaio		NOTAS
		1º pré-ensaio (projecção a 90°)	4º pré-ensaio (projecção a 65°)	
Velocidade média	v = 20 m/min	v = 14 m/min (-30%)	v = 14 m/min (-30%)	Esta diminuição de 30% é devida ao facto da trajectória de deposição não ser linear, o que implicou acelerações positivas e negativas.
Temperatura de pré-aquecimento	90 °C ≤ T ≤ 120 °C	T ≈ 100 °C	T ≈ 100 °C	A temperatura obtida após o ensaio está dentro do intervalo pretendido.
Tempo de deposição	t = 16,6 s	t = 24 s (+45%)	t = 24 s (+45%)	Este aumento de 45% é devido ao facto da trajectória de deposição não ser linear, o que implicou acelerações positivas e negativas.
Peso de pó depositado na peça	❶ 8,46 g	10,86 g (+28,4%)	9,87 (+16,7%)	❶ 34 x 0,9 x 16,6/60 = 8,46 g
Taxa de saída de pó	34 g/min	❷ 37 g/min (+9%)	❷ 37 g/min (+9%)	❷ Ensaio específico (ponto 6.5.1-pág.48)
Peso do pó que saiu da pistola e atingiu a peça	❸ 9,4 g	❹ 14,8 g (+57%)	❹ 14,8 g (+57%)	❸ 34 x 16,6/60 = 9,4 g ❹ 37 x 24/60 = 14,8 g
Temperatura final	-----	T ≈ 150 °C	T ≈ 150 °C	
Eficiência de deposição	90%	❺ 73%	❻ 67%	❺ 10,86/14,8 = 73% ❻ 9,87/14,8 = 67%
Espessura do revestimento	0,1 mm	❼ 0,12 mm	❼ 0,11 mm	❼ Medida no microscópio

Tabela 6.17 - Resultados dos 1º e 4º pré-ensaios (projecção à chama robotizada da camada de ligação nas placas nos 1 e 4).

2º e 5º pré-ensaios de projecção [camada de ligação Ni-Al-Mo]	Valores admitidos à priori	Valores obtidos após ensaio		NOTAS
		2º pré-ensaio (projecção a 90°)	5º pré-ensaio (projecção a 65°)	
Velocidade média	v = 20 m/min	v = 14 m/min (-30%)	v = 14 m/min (-30%)	Igual à Tabela 6.17
Temperatura de pré-aquecimento	90 °C ≤ T ≤ 120 °C	T ≈ 100 °C	T ≈ 100 °C	
Tempo de deposição	t = 16,6 s	t = 24 s (+45%)	t = 24 s (+45%)	
Peso de pó depositado na peça	8,46 g	10,86 g (+28,4%)	9,87 g (+16,7%)	
Taxa de saída de pó	34 g/min	37 g/min (+9%)	37 g/min (+9%)	
Peso do pó que saiu da pistola e atingiu a peça	9,4 g	14,8 g (+57%)	14,8 g (+57%)	
Temperatura final	-----	T ≈ 150 °C	T ≈ 150 °C	
Eficiência de deposição	90%	73%	67%	
Espessura do revestimento	0,1 mm	0,12 mm	0,11 mm	

2º e 5º pré-ensaios de projecção [Revestimento de zircónia]	Valores admitidos à priori	Valores obtidos após ensaio		NOTAS
		2º pré-ensaio (projecção a 90°)	5º pré-ensaio (projecção a 65°)	
Velocidade média	v = 20 m/min	v = 13,5 m/min (-32,5%)	v = 13,5 m/min (-32,5%)	A trajetória do ensaio não é linear.
Temperatura de pré-aquecimento	95 °C ≤ T ≤ 150 °C	T ≈ 150 °C	T ≈ 150 °C	A temperatura está dentro do intervalo.
Tempo de deposição	t = 50 s	t = 74 s (+48%)	t = 74 s (+48%)	A trajetória do ensaio não é linear.
Peso de pó depositado na peça	12,5 g	7,54 g (-40%)	6,16 g (-51%)	1 30 x 0,5 x 50/60 = 12,5 g
Taxa de saída de pó	30 g/min	28 g/min (-7%)	28 g/min (-7%)	2 Ensaio específico (ponto 6.5.2-pág.52)
Peso do pó que saiu da pistola e atingiu a peça	25 g	34,5 g (+27,5%)	34,5 g (+27,5%)	3 30x 50/60 = 25 g 4 28x 74/60 = 34,5 g
Temperatura final	-----	T ≈ 235 °C	T ≈ 235 °C	
Eficiência de deposição	50%	22%	18%	5 7,54/34,5=22% 6 6,16/34,5=18%
Espessura do revestimento	0,205 mm	0,13 mm	0,10 mm	7 Medida no microscópio

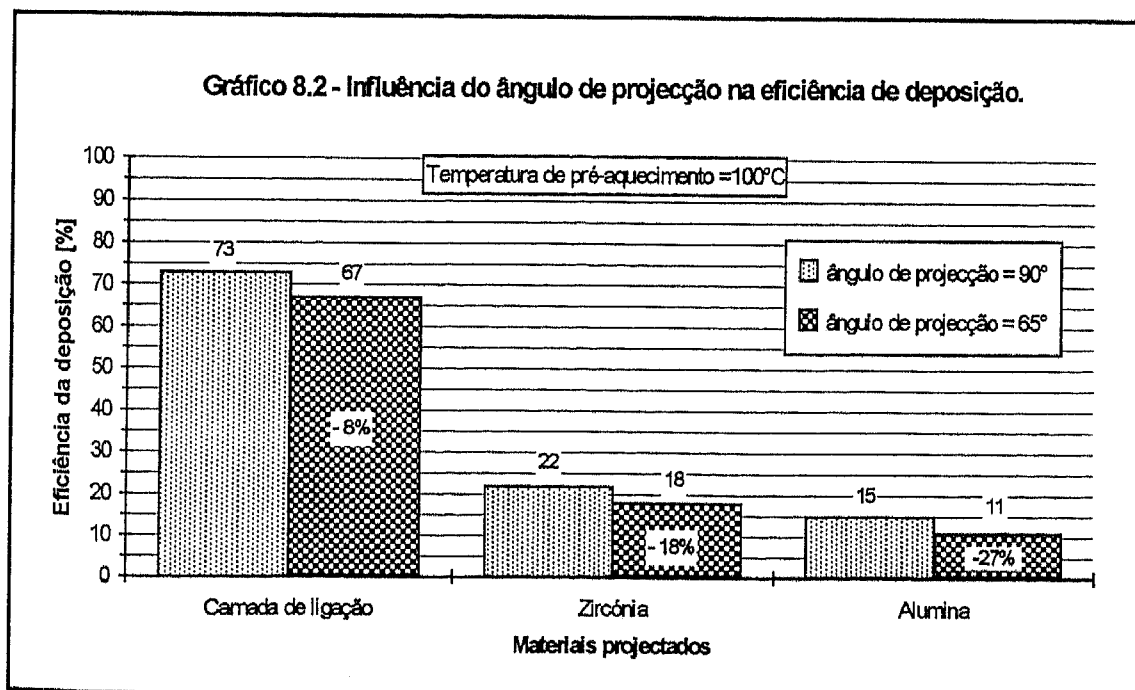
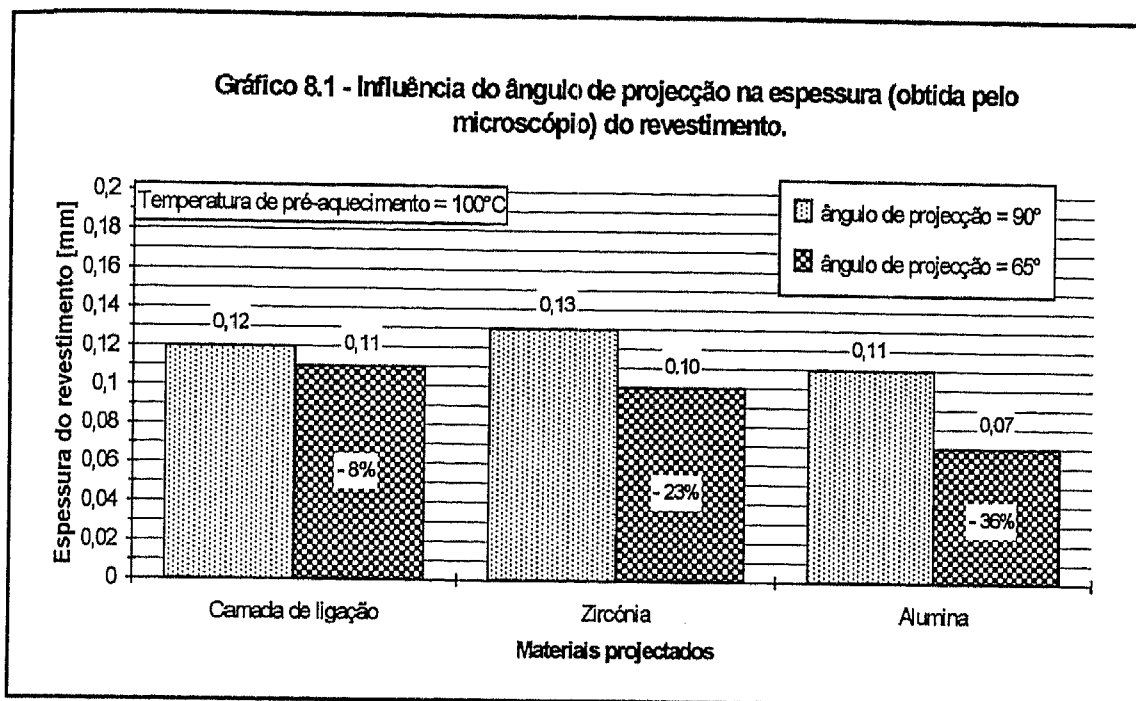
Tabela 6.18 - Resultados dos 2º e 5º pré-ensaios (projecção à chama robotizada da camada de ligação e de zircónia nas placas nos 2 e 5).

3º e 6º pré-ensaios de projecção [camada de ligação Ni-Al-Mo]	Valores admitidos à priori	Valores obtidos após ensaio		NOTAS
		3º pré-ensaio (projecção a 90°)	6º pré-ensaio (projecção a 65°)	
Velocidade média	v = 20 m/min	v = 14 m/min (-30%)	v = 14 m/min (-30%)	Igual à Tabela 6.17
Temperatura de pré-aquecimento	90 °C ≤ T ≤ 120 °C	T ≈ 100 °C	T ≈ 100 °C	
Tempo de deposição	t = 16,6 s	t = 24 s (+45%)	t = 24 s (+45%)	
Peso de pó depositado na peça	8,46 g	10,86 g (+28,4%)	9,87 g (+16,7%)	
Taxa de saída de pó	34 g/min	37 g/min (+9%)	37 g/min (+9%)	
Peso do pó que saiu da pistola e atingiu a peça	9,4 g	14,8 g (+57%)	14,8 g (+57%)	
Temperatura final	-----	T ≈ 150 °C	T ≈ 150 °C	
Eficiência de deposição	90%	73%	67%	
Espessura do revestimento	0,1 mm	0,12 mm	0,11 mm	

3º e 6º pré-ensaios de projecção [Revestimento de alumina]	Valores admitidos à priori	Valores obtidos após ensaio		NOTAS
		3º pré-ensaio (projecção a 90°)	6º pré-ensaio (projecção a 65°)	
Velocidade média	v = 1,35 m/min	v = 1,33 m/min (-1,5%)	v = 1,33 m/min (-1,5%)	A trajetória do ensaio não é linear.
Temperatura de pré-aquecimento	-----	T ≈ 150 °C	T ≈ 150 °C	
Tempo de deposição	t = 123 s	t = 125 s (+1,6%)	t = 125 s (+1,6%)	A trajetória do ensaio não é linear.
Peso de pó depositado na peça	① 9,23 g	3,77 g (-59%)	2,70 g (-71%)	
Taxa de saída de pó	15 g/min	② 12 g/min (-20%)	② 12 g/min (-20%)	① 15 x 0,3 x 123/60 = 9,23 g
Peso do pó que saiu da pistola e atingiu a peça	③ 30,75 g	④ 25 g (-19%)	④ 25 g (-19%)	② Ensaio específico (ponto 6.5.3-pág.55)
Temperatura final	-----	T ≈ 170 °C	T ≈ 170 °C	③ 15 x 123/60 = 30,75 g
Eficiência de deposição	30%	⑤ 15%	⑤ 11%	④ 12 x 125/60 = 25 g
Espessura do revestimento	0,246 mm	⑦ 0,11 mm	⑦ 0,07 mm	⑤ 3,77/25=15% ⑥ 2,70/25=11%
				⑦ Medida no microscópio

Tabela 6.19 - Resultados dos 3º e 6º pré-ensaios (projecção à chama robotizada da camada de ligação e de alumina nas placas nos 3 e 6).

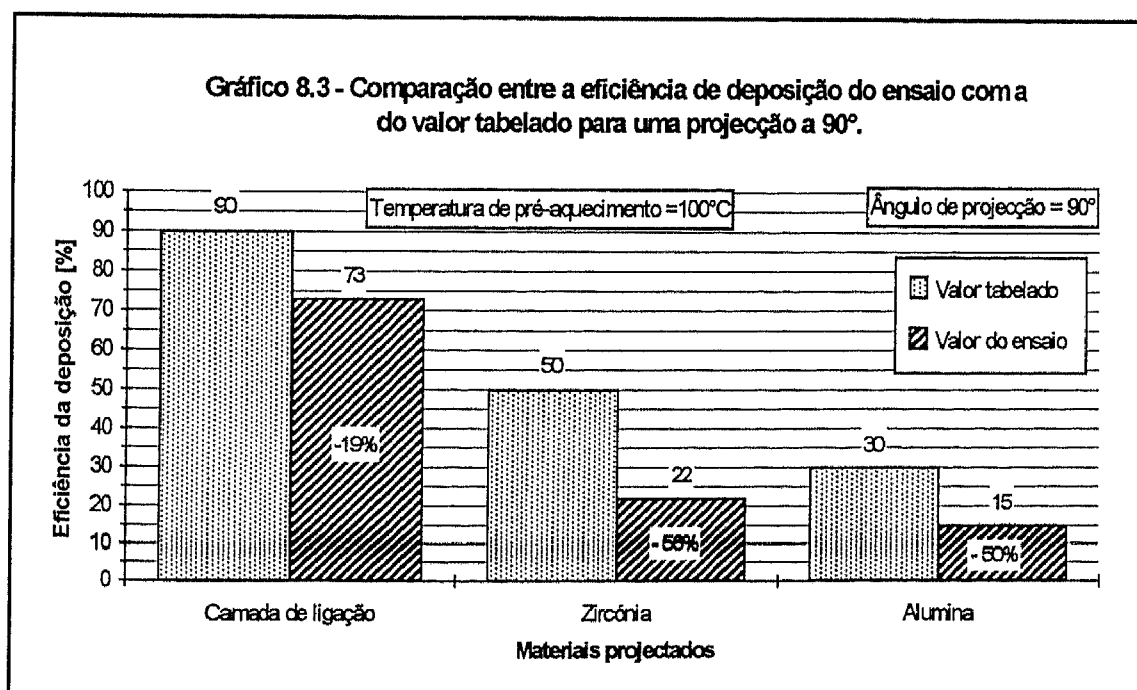
Nos gráficos seguintes (Gráf.^{os} 8.1 e 8.2) está representada a influência do ângulo de projecção respectivamente na espessura do revestimento e na eficiência de deposição, para os três materiais projectados.



Constata-se pela análise dos gráficos anteriores (Gráf.ºs 8.1 e 8.2) que a projecção a 65° relativamente à projecção a 90°, conduziu à obtenção de uma menor espessura e a uma menor eficiência de deposição, para todos os materiais projectados. Este facto é facilmente explicável, já que é com um ângulo de projecção de 90° que se obtém a eficiência de deposição máxima devido a que uma projecção na vertical não tem componente horizontal (paralela ao substrato) que provoca grandes perdas de material por "derrapagem". No caso da projecção a 65° surge a tal componente horizontal do jacto de projecção o que implica muito maiores perdas de material, que origina menor eficiência de deposição e consequentemente menor espessura do revestimento.

A projecção a 65° fez diminuir mais a eficiência de deposição nos revestimentos propriamente ditos (zircónia e alumina) do que na camada de ligação. Isto pode ser devido às diferentes distâncias de projecção utilizadas. No caso da projecção da camada de ligação a distância de projecção foi de 140 mm e para a zircónia e a alumina foi apenas de 75 mm. Quanto maior for a distância de projecção menor será a velocidade das partículas quando atingem o substrato, logo como no caso da projecção da zircónia e alumina a distância é menor as partículas chegam com mais velocidade do que no caso da projecção da camada de ligação e ocorrem mais perdas por "derrapagem" devido à componente horizontal do jacto de projecção. No caso da projecção da alumina ainda é mais sentido este efeito devido à utilização na projecção de "air jet" (jacto de ar comprimido) que ainda acelera mais as partículas, o que conduziu a ser a projecção que conduziu aos piores resultados.

Apresenta-se no gráfico seguinte (Gráf. 8.3), para cada material projectado, uma comparação entre o valor de eficiência de deposição obtido na projecção a 90° com o valor de eficiência tabelado em catálogos técnicos do fabricante e indicados na tabela 6.1(pág. 41).



Verifica-se pela observação do gráfico anterior (Gráf. 8.3) que os valores de eficiência de deposição da nossa projecção a 90° são muito menores que os tabelados, especialmente para os revestimentos de zircónia e alumina.

Uma justificação para isso, prende-se com o facto das condições de projecção não terem sido idênticas, como por exemplo: a trajetória de deposição, a temperatura de pré-aquecimento, o material do substrato...,etc.

8.2 - Ensaio de projecção

Estes ensaios têm como objectivo principal a determinação da tensão de adesão de revestimentos de camada de ligação (Ni-Al-Mo) e de zircónia (ZrO_2) e o seu relacionamento com as seguintes variáveis:

- material do substrato: duralumínio (AlCu), ferro fundido nodular perlítico estabilizado com cobre (FFNP), latão, cuprocromo (CuCr) e ferro fundido cinzento ferrítico (FFCF);
- temperatura de pré-aquecimento: 65 a 120°C;
- temperatura máxima atingida pelo substrato (provetes): 170 a 615°C;
- ângulo de projecção: 30°, 65° e 90°;
- morfologia do revestimento.

8.2.1 - Análise dos gráficos de temperaturas

Em cada um dos cinco ensaios de projecção um provete de cada material foi instrumentado com termopares de forma a termos em tempo real as suas temperaturas a diferentes profundidades.

A colocação dos termopares no provete está representada na figura 8.1.

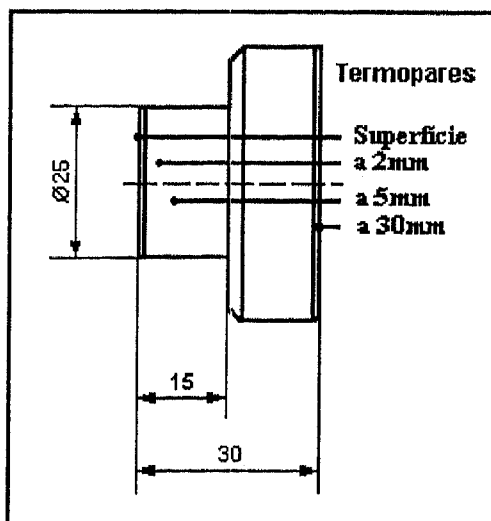


Fig. 8.1 - Descrição do posicionamento dos 4 termopares no provete.

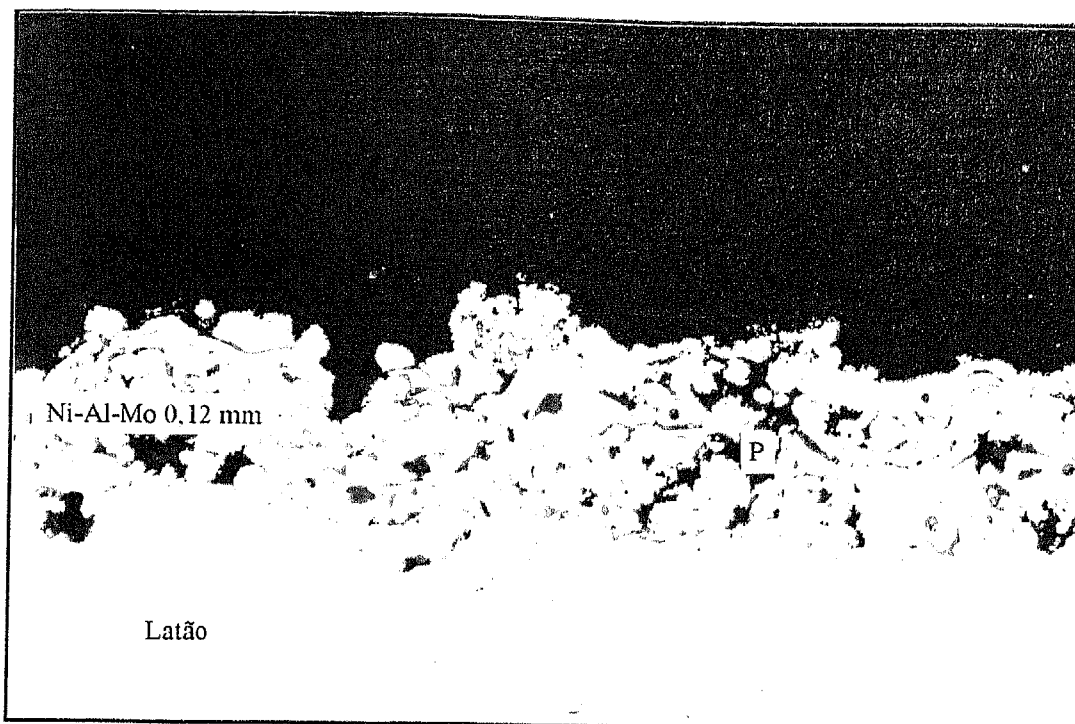
Nas duas primeiras projecções (1ª e 2ª) foram colocados 4 termopares em cada provete (à superfície, a 2 mm, a 5 mm e a 30 mm).

Nas três projecções seguintes (3ª, 4ª e 5ª) não se utilizou o termopar situado a 5 mm da superfície porque, por análise dos gráficos de temperaturas da 1ª e 2ª projecção (Gráficos nºs 1, 2, 3, 4, 5, 10, 11, 12, 13 e 14 dados no Anexo I) se constatou que a diferença de temperatura para o termopar a 2 mm da superfície era insignificante.

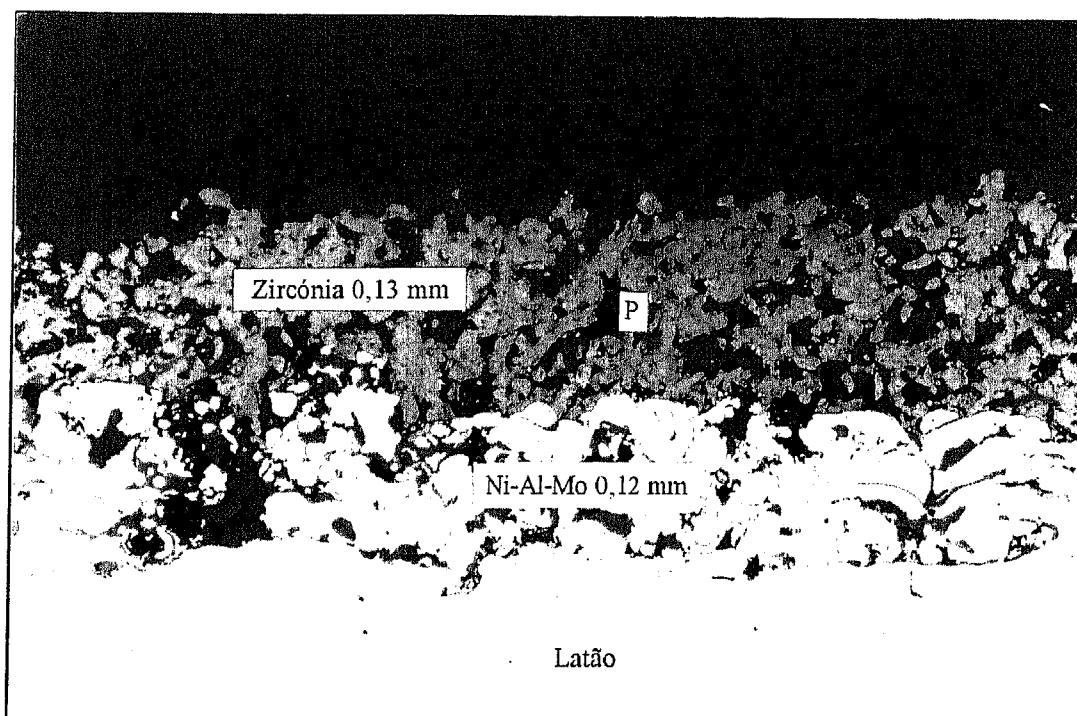
Nas duas primeiras projecções (1ª e 2ª - **sem arrefecimento**) não houve limitação ou controle da temperatura máxima atingida pelos substratos ou provetes, isto é, as passagens de projecção foram feitas seguidas e durante a projecção não houve arrefecimento por ar comprimido dos provetes.

Nas três projecções seguintes (3ª, 4ª e 5ª - **com arrefecimento**) houve limitação da temperatura máxima (300°C) atingida pelos provetes, que foi conseguida através da interrupção da projecção entre passagens e pela utilização durante a projecção de um jacto de ar comprimido, aplicado na parte de trás dos provetes (lado oposto à face de projecção).

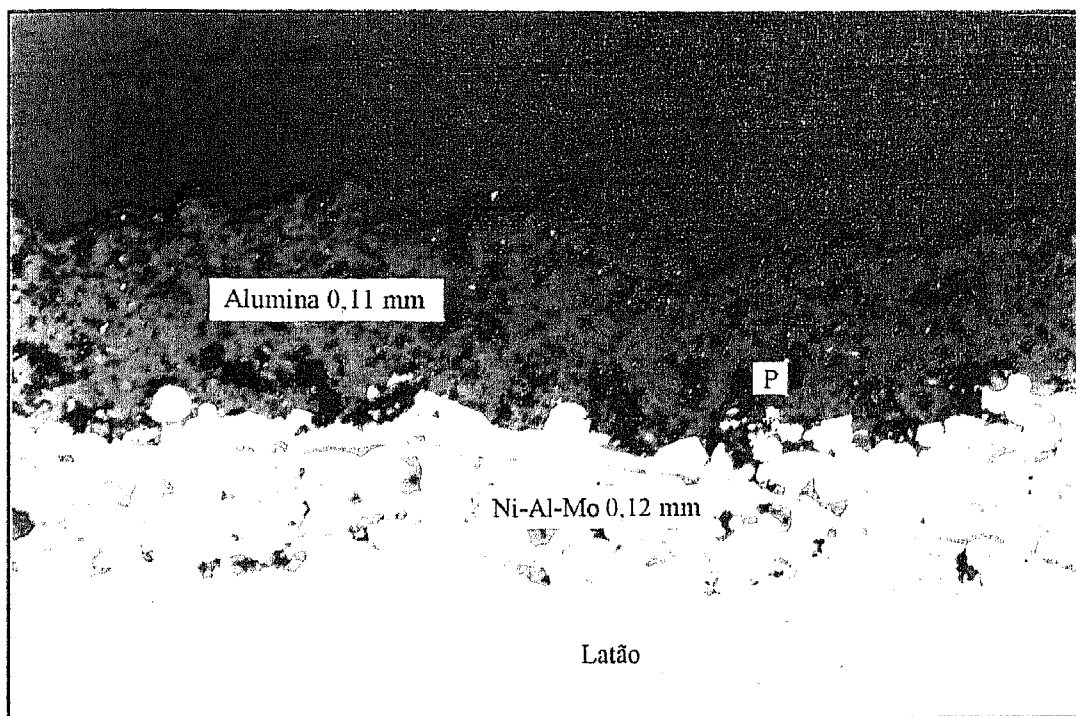
Na tabela seguinte (Tab. 8.6) estão listadas as temperaturas mais significativas dos cinco ensaios de projecção. Foram retiradas dos gráficos de temperaturas adquiridas durante as projecções (Gráf.ºs 1 a 35 dados no Anexo I).



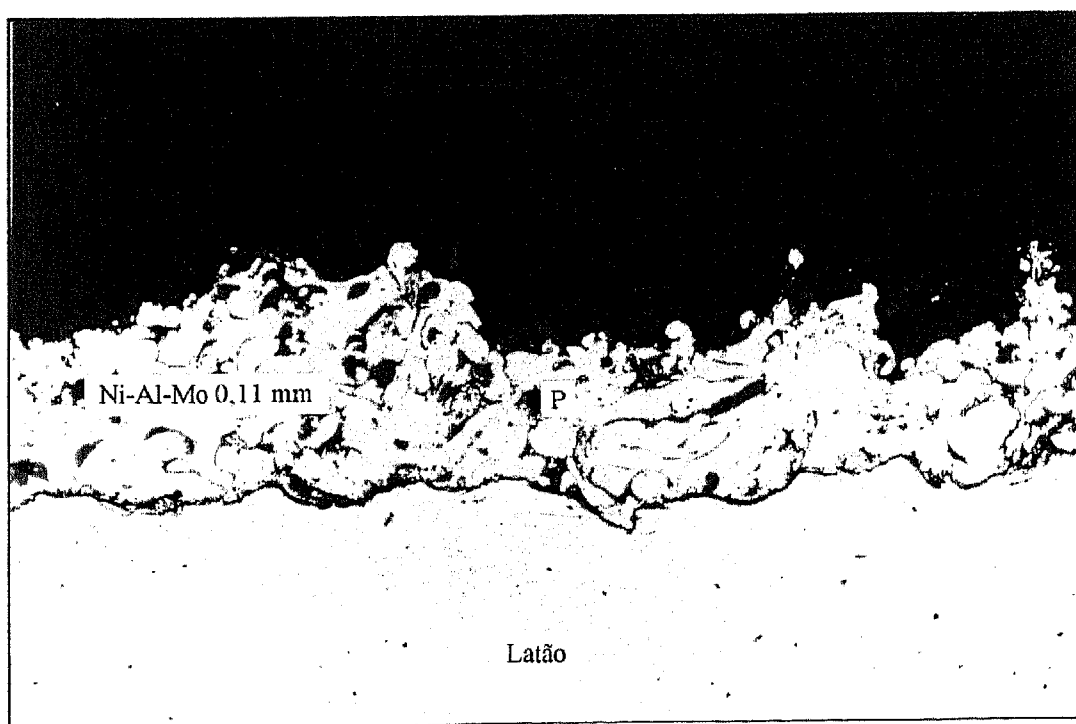
Fot. 8.1 - Ampliação 200x. Amostra 3 (da placa de latão nº1) de acordo com a fig. 6.2. Revestimento de Ni-Al-Mo projectado a 90°. A camada de ligação apresenta pouca porosidade < 2% (pontos mais escuros-letra P), natural neste tipo de revestimentos obtidos por projecção. Espessura da camada de ligação (Ni-Al-Mo) de 0,12 mm.



Fot. 8.2 - Ampliação 200x. Amostra 2 (da placa de latão nº2) de acordo com a fig. 6.2. Revestimento de Ni-Al-Mo e zircónia projectado a 90°. Tanto a camada de ligação como a zircónia apresentam pouca porosidade (pontos mais escuros-letra P), no entanto a camada de zircónia apresenta mais porosidade do que a camada de ligação o que é natural já que são esperadas respectivamente porosidades de 10 e < 2%. A espessura da camada de ligação é de 0,12 mm e da zircónia de 0,13 mm.



Fot. 8.3 - Ampliação 200x. Amostra 2 (da placa de latão nº3) de acordo com a fig. 6.2. Revestimento de Ni-Al-Mo e alumina projectado a 90°. Tanto a camada de ligação como a alumina apresentam pouca porosidade (pontos mais escuros-letra P). A camada de ligação e a alumina apresentam respectivamente porosidades de < 2 e 2%. A espessura da camada de ligação é de 0,12 mm e da alumina de 0,11 mm.



Fot. 8.4 - Ampliação 200x. Amostra 1 (da placa de latão nº4) de acordo com a fig. 6.2. Revestimento de Ni-Al-Mo projectado a 65°. A camada de ligação apresenta pouca porosidade < 2% (pontos mais escuros-letra P), natural neste tipo de revestimentos obtidos por projecção. Espessura da camada de ligação (Ni-Al-Mo) de 0,11 mm.

Material do provete	PRÉ-AQUECIMENTO [°C]						CAMADA DE LIGAÇÃO [METCO 447NS]						ZIRCONIA [METCO 201NS]									
	Tínicial [Tamb.]	Superf. Tmáx.	2mm Tmáx.	5mm Tmáx.	30mm Tmáx.		Superfície [°C]		a 2 mm [°C]		a 5 mm [°C]		a 30 mm [°C]		Superfície [°C]		a 2 mm [°C]		a 5 mm [°C]		a 30 mm [°C]	
							Tínicial	Tmáx.	Tínicial	Tmáx.	Tínicial	Tmáx.	Tínicial	Tmáx.	Tínicial	Tmáx.	Tínicial	Tmáx.	Tínicial	Tmáx.	Tínicial	Tmáx.
1ª P R O J.	20	300	120	110	105		125	415	120	285	110	285	105	255	265	610	270	525	270	525	250	485
	20	265	115	110	85		125	400	120	250	115	250	85	235	240	610	250	565	250	565	225	500
	20	260	115	110	100		115	430	120	290	110	290	100	250	275	660	280	615	280	615	230	525
	20	250	115	115	105		120	415	120	290	115	290	105	260	260	615	275	590	275	590	230	530
	20	260	90	90	75		100	390	90	215	90	215	75	170	205	540	210	505	210	500	135	380
2ª P R O J.	20	260	100	95	85		95	420	100	250	95	250	85	230	250	570	250	500	250	500	230	475
	20	300	110	110	75		80	470	90	250	85	245	75	190	220	590	225	525	225	525	190	460
	20	215	105	105	100		100	390	100	280	105	280	100	260	280	605	280	575	280	575	260	550
	20	180	95	90	80		90	365	90	245	90	245	80	215	240	570	245	550	245	550	215	480
	20	185	90	80	60		70	380	70	215	70	205	60	150	190	515	190	490	190	585	160	360
3ª P R O J.	20	210	90	85	85		90	335	90	170	85	170	85	165	125	330	100	215	100	215	100	205
	20	225	90	80	80		85	345	90	195	85	165	85	165	125	350	125	250	125	250	115	165
	20	195	90	85	85		90	295	90	190	85	185	85	185	105	330	120	250	120	250	115	230
	20	230	85	85	85		85	300	85	165	85	165	85	165	105	320	105	230	105	230	100	215
	20	225	75	70	70		100	360	70	165	70	165	70	135	115	380	115	230	115	230	110	190
4ª P R O J.	20	275	90	80	90		90	435	90	220	80	215	90	215	140	390	130	255	130	255	130	250
	20	310	115	80	80		90	490	90	240	80	180	80	180	135	430	135	275	135	275	130	220
	20	120	70	70	70		70	230	70	185	70	175	70	175	105	270	105	220	105	220	100	210
	20	235	65	65	65		65	340	65	100	65	140	70	140	75	320	70	170	70	170	65	135
	20	115	65	65	65		60	200	65	100	65	95	65	95	70	345	70	170	70	170	65	135
5ª P R O J.	20	260	145	135	135		90	330	90	185	90	135	90	135	100	315	100	220	100	220	100	170

Nota: As projeções (3ª, 4ª e 5ª) foram feitas com arrefecimento dos provetes por ar comprimido.

* Temperatura de pré-aquecimento.

** Temperatura máxima atingida pelos provetes no decorrer da projecção.

*** Não foi montado o termopar a 5 mm da superfície.

**** O termopar a 2mm da superfície do provete de CuCr avançou.

Tab. 7.7 - Compilação das temperaturas mais significativas dos gráficos de temperaturas adquiridas durante os ensaios de projecção à chama robotizada.

Nos gráficos seguintes (Gráf.ºs 8.4, 8.5, 8.6, 8.7 e 8.8) estão descritas, a temperatura de pré-aquecimento e a temperatura máxima atingida pelos provetes, respectivamente, para as 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª projecções.

A temperatura de pré-aquecimento é dada pelo termopar situado a 2 mm da superfície, no início da projecção da camada de ligação.

A temperatura máxima atingida pelo provete durante a projecção também é obtida através do termopar a 2 mm da superfície. As temperaturas medidas pelo termopar da superfície não correspondem à temperatura máxima atingida pelo provete, pois descrevem picos de temperatura originados pela passagem da pistola de projecção (ver no Anexo I, Gráf.ºs 6, 15, 24 e 32) e não indicam por isso, a temperatura efectiva do provete.

Gráfico 8.4 - Temperaturas mais significativas da 1ª projecção.

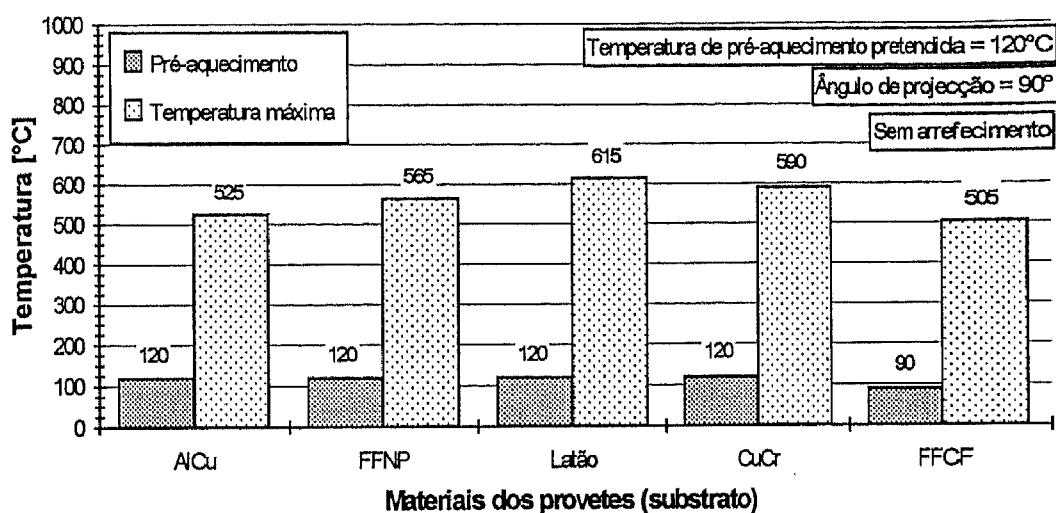


Gráfico 8.5 - Temperaturas mais significativas da 2ª projecção.

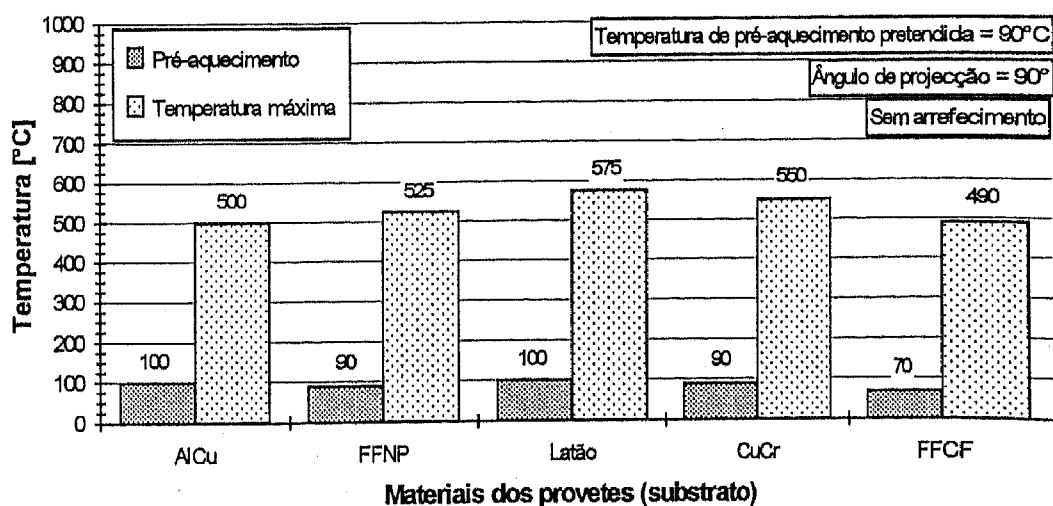


Gráfico 8.6 - Temperaturas mais significativas da 3ª projecção.

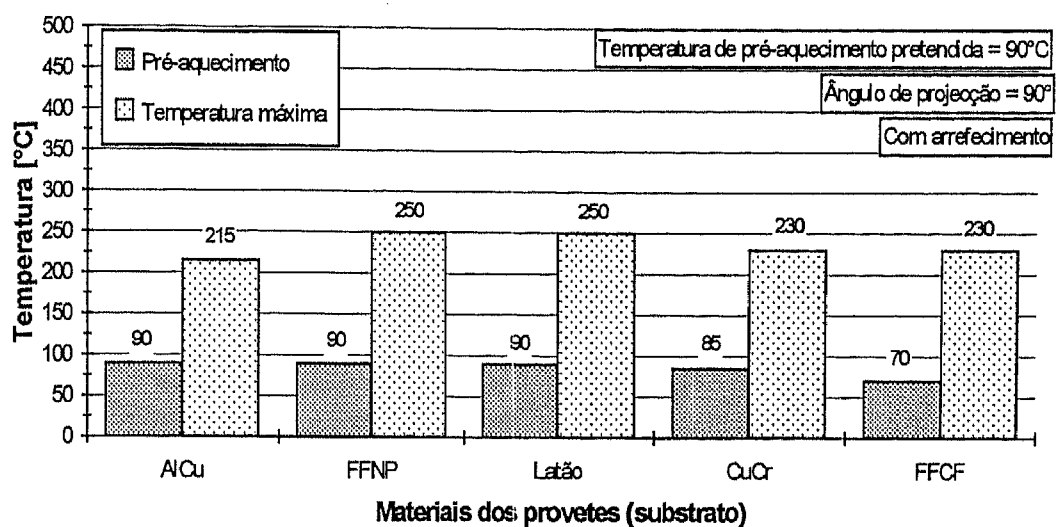
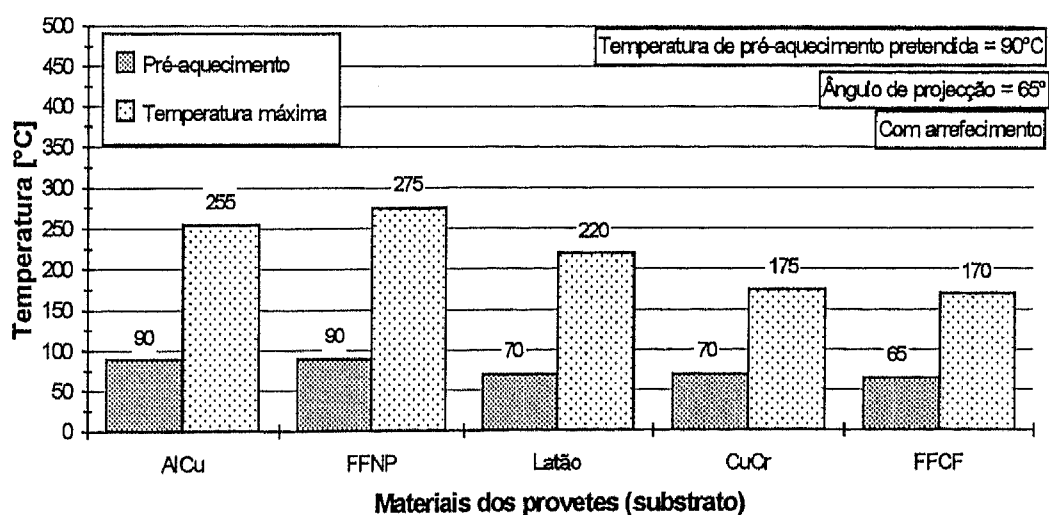
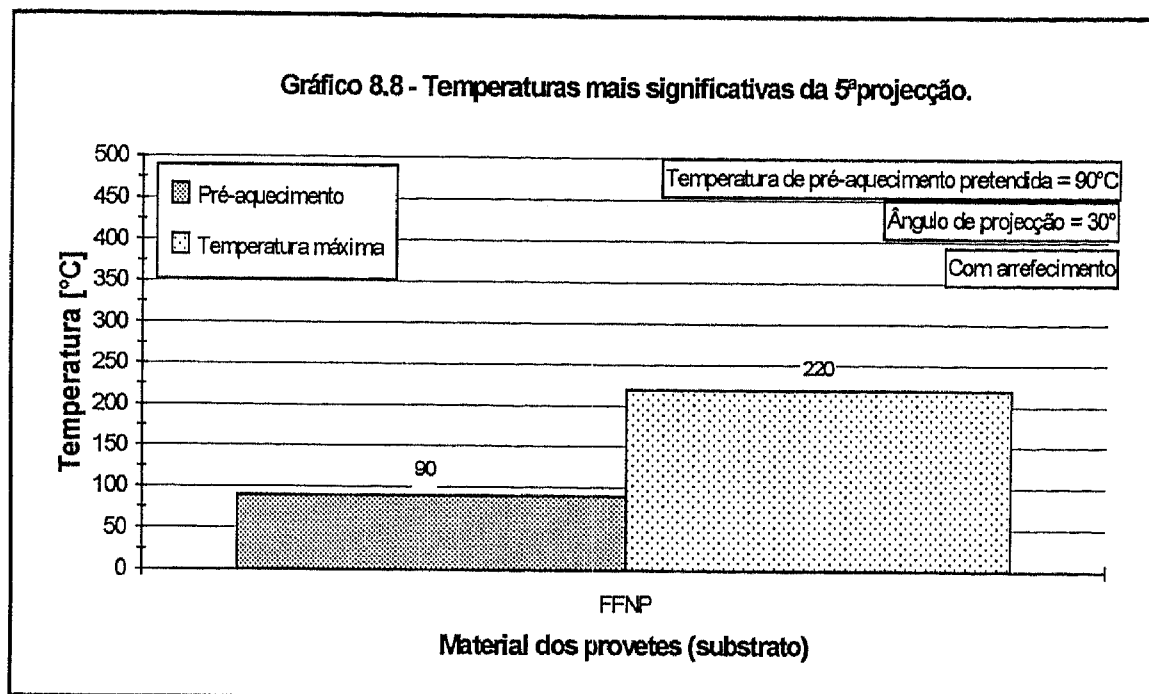


Gráfico 8.7 - Temperaturas mais significativas da 4ª projecção.





Pela análise dos gráficos anteriores (Gráf.^{os} 8.4, 8.5, 8.6, 8.7 e 8.8), chega-se à conclusão que geralmente os provetes de FFNP, Latão e CuCr atingem temperaturas máximas mais elevadas que os de AlCu e FFCF e que os provetes de FFCF são os que globalmente apresentam as temperaturas mais baixas.

Para ajudar a explicar estas constatações apresenta-se em seguida uma fotografia (Fot. 8.7) do aspecto da montagem dos provetes na placa de projecção, que nos revela o posicionamento relativo entre os vários materiais dos provetes.

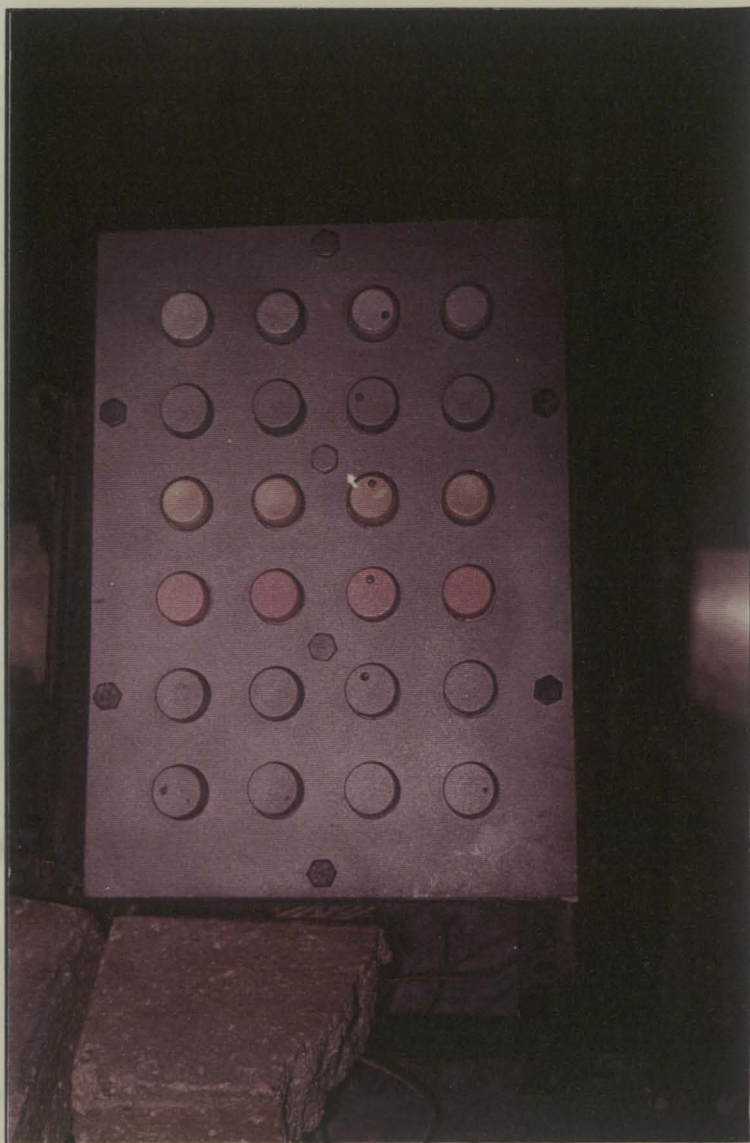
1ª linha - Duralumínio (AlCu)

2ª linha - Ferro fundido nodular
perlítico (FFNP)

3ª linha - Latão

4ª linha - Cuprocromo (CuCr)

5ª linha - Ferro fundido cinzento
ferrítico (FFCF)



Nota: A última linha de provetes só serviu para permitir um melhor aperto dos restantes na placa de projecção. A pistola de projecção não passa sobre esses provetes.

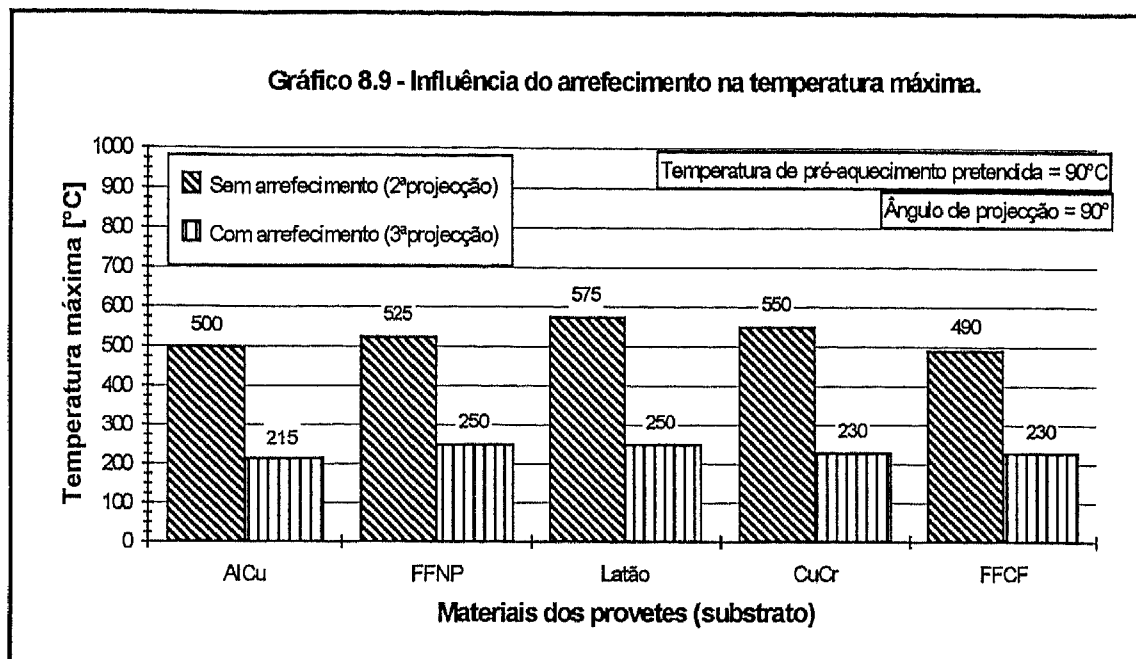
Fot. 8.7 - Posicionamento dos provetes dos vários materiais na placa de projecção.

Os provetes colocados nas 2ª, 3ª e 4ª linhas (FFNP, Latão e CuCr), têm só as laterais da placa de projecção como zona de escoamento de calor, enquanto os das 1ª e 5ª linhas (AlCu e FFCF) têm as partes laterais e um lado para escoar calor. Logo os provetes do meio da placa têm tendência a aquecer mais que os outros.

A explicação para a temperatura dos provetes de FFCF (5ª linha) ser inferior à dos da 1ª linha (AlCu - também exterior), deve-se ao facto dos provetes de FFCF estarem posicionados na parte inferior da placa (cota de altura mais baixa) e assim serviram de fonte de calor aos restantes, já que o ar quente tem tendência a subir.

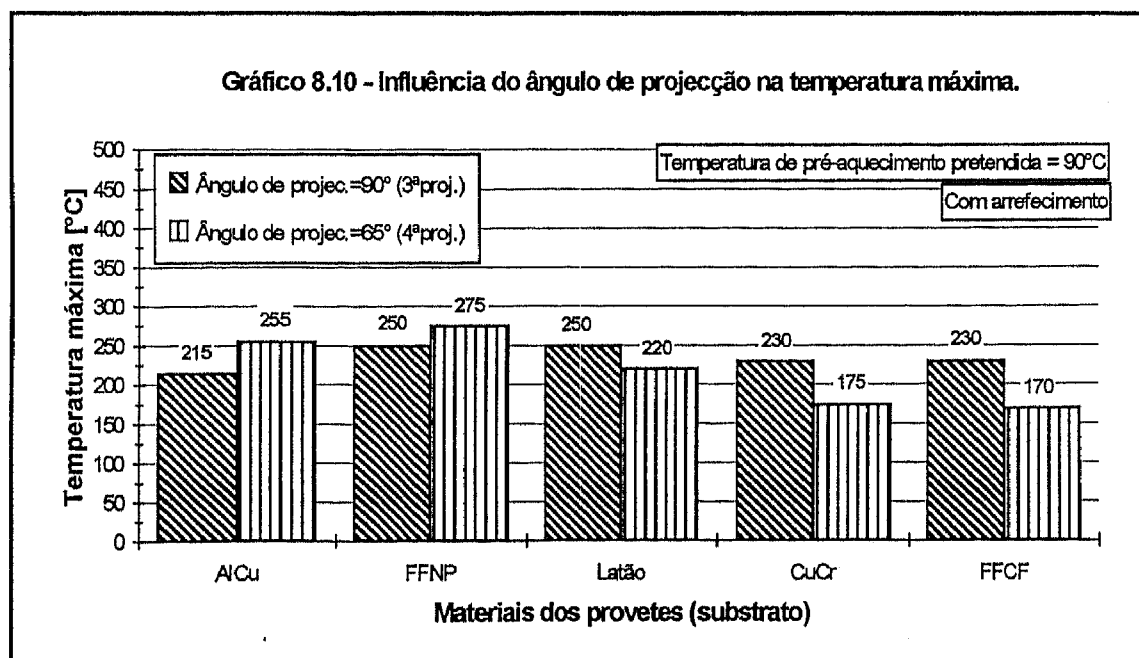
Devido a estes factores que têm a ver com o posicionamento dos provetes na placa de projecção, foi impossível conseguir em cada ensaio de projecção que todos os materiais atingissem a mesma temperatura de pré-aquecimento pretendida à partida.

No gráfico seguinte (Gráf. 8.9) é evidenciada a influência do arrefecimento durante a projecção na temperatura máxima atingida pelos provetes. O arrefecimento dos provetes foi conseguido através da utilização de ar comprimido (jacto de ar comprimido aplicado na parte de trás dos provetes, oposta à face de projecção) e da interrupção da projecção entre passagens.



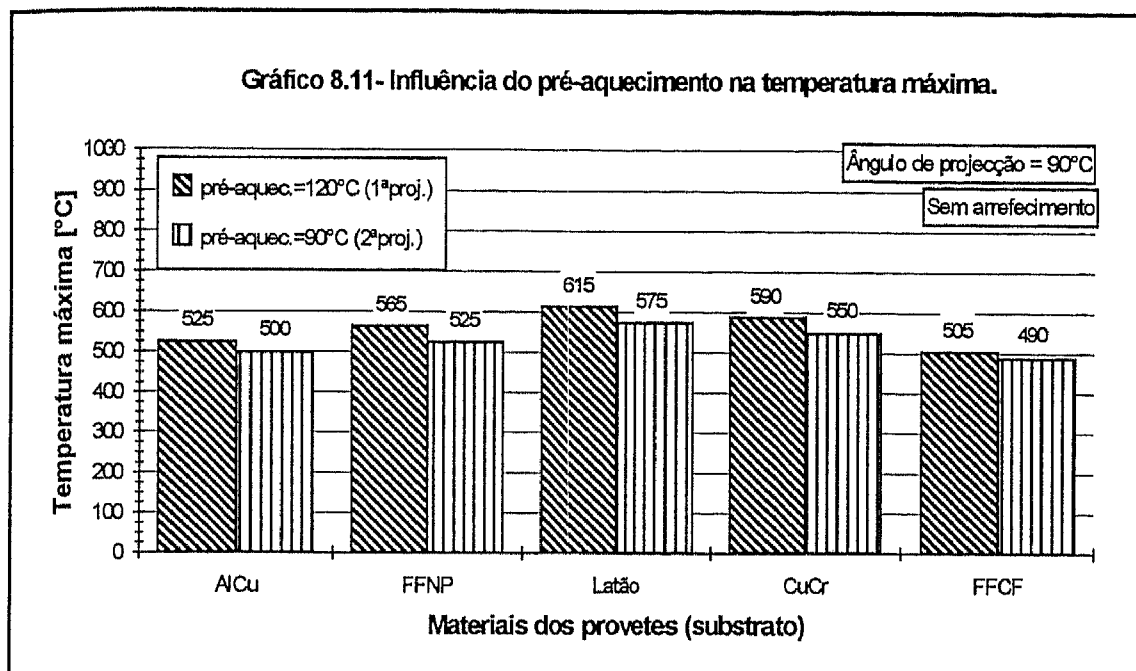
O arrefecimento permitiu baixar a temperatura máxima de todos os provetes na projecção (em média 300°C).

Apresenta-se no gráfico seguinte (Gráf. 8.10) a influência que tem o ângulo de projecção na temperatura máxima atingida pelos provetes durante a projecção.



Analisando o gráfico anterior (Gráf. 8.10) não se pode afirmar que um dado ângulo de projecção conduz a uma menor ou maior temperatura máxima dos provetes, há provetes que aqueceram mais com a projecção a 90° (os de latão, CuCr e FFCF) e os outros de AlCu e FFNP com a de 65°. No entanto, as temperaturas máximas atingidas pelos provetes durante as projecções com ambos os ângulos, não apresentam diferenças muito significativas.

Mostra-se no gráfico 8.11, a implicação que a temperatura de pré-aquecimento teve sobre a temperatura máxima atingida pelos provetes.



Pela análise do gráfico anterior (Gráf. 8.11) constata-se que em média as diferenças das temperaturas máximas entre as duas projecções (1ª e 2ª) foi a diferença entre as suas temperaturas de pré-aquecimento (30°C).

8.2.2 - Tensão de adesão dos revestimentos

Na tabela seguinte (Tab. 8.6) encontram-se compilados os principais resultados dos ensaios de projecção, como: temperaturas máximas e de pré-aquecimento dos provetes (substrato) e a tensão de adesão dos revestimentos.

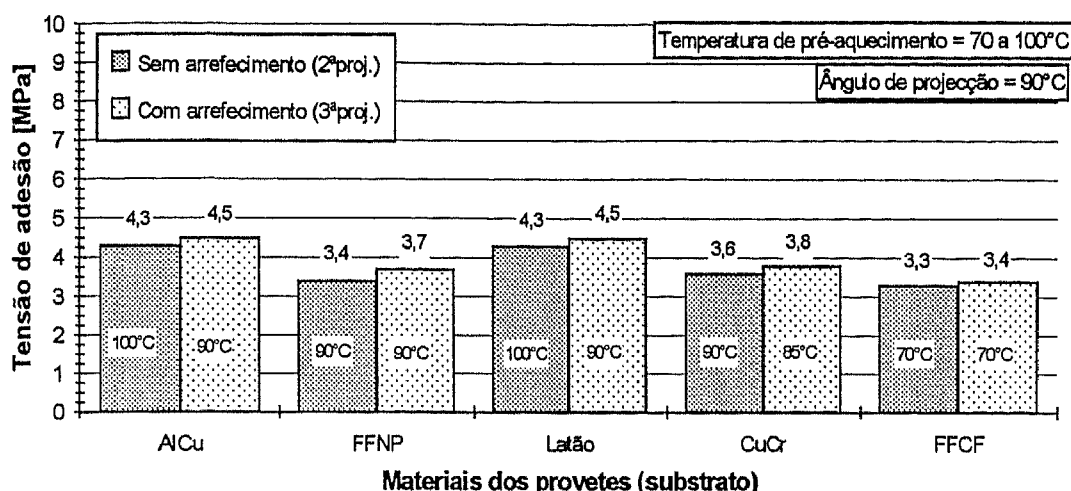
	Material dos provetes	Temperatura de pré-aquecimento [°C]	Temperatura máxima * [°C]	Ângulo de projecção [°]	Tensão de adesão [MPa]
1ª	AlCu	120	525	90	4,1
P	FFNP	120	565	90	6,2
R	Latão	120	615	90	4,4
O	CuCr	120	590	90	4,4
J.	FFCF	90	505	90	4,0
2ª	AlCu	100	500	90	4,3
P	FFNP	90	525	90	3,4
R	Latão	100	575	90	4,3
O	CuCr	90	550	90	3,6
J.	FFCF	70	490	90	3,3
3ª	AlCu	90	215	90	4,5
P	FFNP	90	250	90	3,7
R	Latão	90	250	90	4,5
O	CuCr	85	230	90	3,8
J.	FFCF	70	230	90	3,4
4ª	AlCu	90	255	65	5,6
P	FFNP	90	275	65	8,3
R	Latão	70	220	65	7,9
O	CuCr	70	175	65	7,1
J.	FFCF	65	170	65	5,9
5ª					
P					
R	FFNP	90	220	30	8,3
O					
J.					

Nota:*Nas duas primeiras projecções não houve arrefecimento dos provetes (jacto de ar comprimido aplicado no lado oposto à area de projecção) e as passagens de projecção foram feitas seguidas.

Tab. 8.6 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de projecção, nomeadamente quanto à tensão de adesão dos revestimentos (camada de ligação(Ni-Al-Mo) e zircónia) e às condições térmicas das projecções.

No gráfico seguinte (Gráf. 8.12) são comparados os valores da tensão de adesão de revestimentos de ensaios feitos com e sem arrefecimento.

Gráfico 8.12- Influência do arrefecimento na tensão de adesão.



Como se pode ver no gráfico anterior (Gráf. 8.12) as diferenças de tensão de adesão entre as duas projecções são muito pequenas, o que quer dizer que o factor arrefecimento (isto é, a temperatura máxima dos provetes só atingir cerca de 300°C em vez de aproximadamente 600°C) não tem grande influência na tensão de adesão dos revestimentos. Isto deve acontecer porque a temperatura máxima nunca chegou muito perto da temperatura de fusão dos materiais do substrato. O único problema seria com o substrato de duralumínio em que a temperatura de fusão é de 638°C, mas nestes provetes a temperatura só atingiu os 525°C (ver Gráf. 8.4).

Nos gráficos seguintes (Gráf. 8.13, 8.14 e 8.15) está representada a influência do material do substrato na tensão de adesão, em condições semelhantes de projecção (ângulo de projecção e temperatura de pré-aquecimento).

Gráfico 8.13 - Influência do tipo de substrato na tensão de adesão (projecção a 90°)

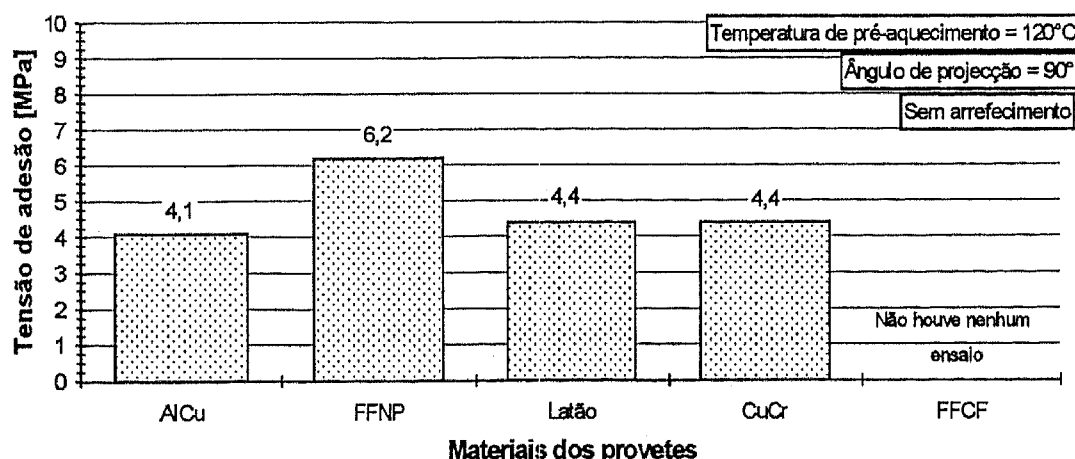


Gráfico 8.14 - Influência do tipo de substrato na tensão de adesão
(projectão a 90°)

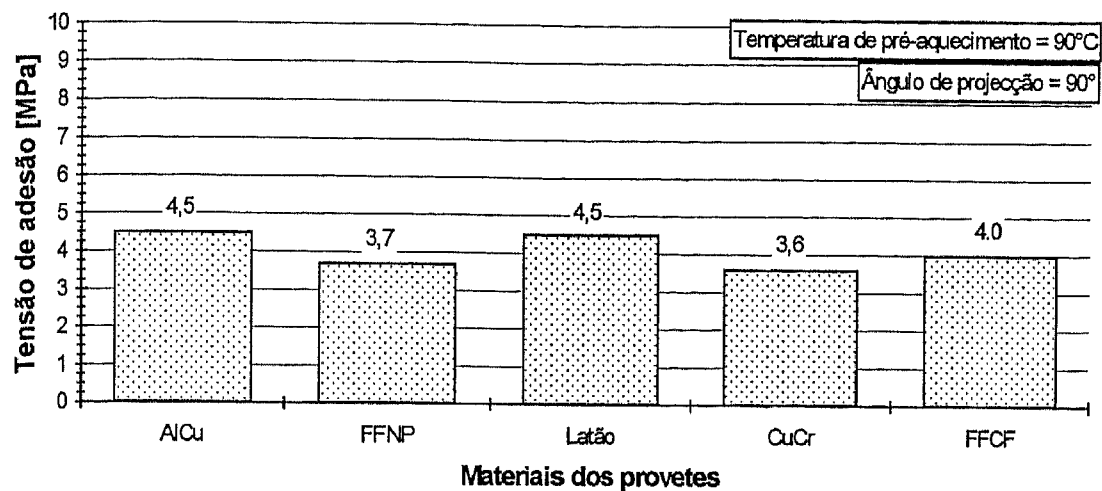
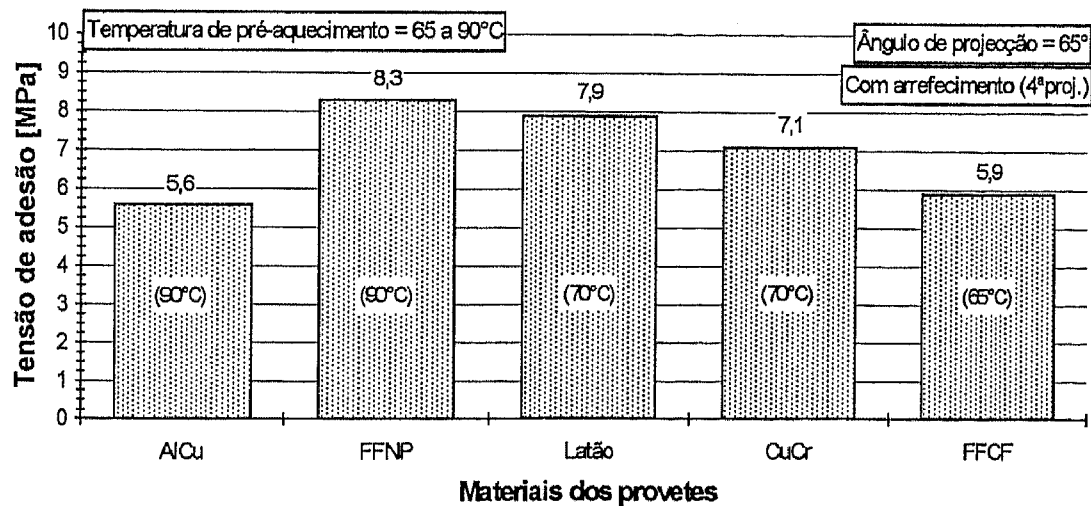


Gráfico 8.15 - Influência do tipo de substrato na tensão de adesão
(projectão a 65°)



Os gráficos 8.13 e 8.14 que correspondem a projecções feitas a 90°, diferem apenas na temperatura de pré-aquecimento, respectivamente, 120 e 90°C. O que se conclui pela análise destes gráficos é que para a projecção a 90°, o pré-aquecimento de 120°C origina tensões de adesão mais elevadas nos provetes de ferro fundido nodular perlítico (FFNP) e cuprocromo (CuCr) e o de 90°C nos de duralumínio (AlCu) e latão. Não se pode tirar nenhuma conclusão deste tipo para os provetes de ferro fundido cinzento ferrítico (FFCF), já que não se efectuaram neles projecções com uma temperatura de pré-aquecimento de 120°C, mas foi a temperatura de pré-aquecimento mais alta utilizada (90°C), que conduziu à maior tensão de adesão.

A tensão de adesão mais elevada para a projecção a 90° (6,2 MPa) foi obtida pelos provetes de FFNP com uma temperatura de pré-aquecimento de 120°C.

Para o pré-aquecimento de 90°C e ângulo de projecção de 90° foram os provetes de duralumínio (AlCu) e latão que obtiveram as tensões de adesão mais elevadas (4,5 MPa).

Especialmente para os provetes de duralumínio a projecção a 90° com a temperatura de pré-aquecimento de 120°C (4,1 MPa), conduziu a uma menor tensão de adesão comparadamente à feita com 90°C (4,5 MPa). Isto deve ser causado pela baixa temperatura de fusão do duralumínio (638°C) e por consequência, a utilização de uma temperatura de pré-aquecimento mais baixa conduz a uma melhor adesão do revestimento.

Por análise do gráfico 8.15, que corresponde a uma projecção feita a 65° e com uma temperatura de pré-aquecimento de 90°C, foi o ferro fundido nodular perlítico (FFNP) que obteve o valor mais elevado para a tensão de adesão (8,3 MPa).

Para tentar explicar as discrepâncias (mostradas pelos gráficos anteriores (Gráf.os 8.13, 8.14 e 8.15)) que a tensão de adesão apresenta para os vários materiais dos provetes, é apresentada a tabela seguinte (Tab. 8.7) com as principais características mecânicas e físicas dos materiais utilizados.

Características mecânicas e físicas	AlCu	FFNP	Latão	CuCr	FFCF
Tensão de rotura [MPa]	427	600 - 800	414	494	300 - 400
Alongamento [%]	20	7 - 2	30	18	18 - 6
Dureza [HB10]	105	170 - 350	110	136	140 - 160
Massa específica [Kg/m3]	2700	7100	8200	8870	7300
Temperatura de fusão [°C]	638	1120-1160	890	1230	1200

Tab. 8.7 - Principais características mecânicas e físicas dos 5 materiais utilizados para substrato [10], [11] e [12].

A adesão do revestimento no substrato é sobretudo mecânica, as partículas fundidas projectadas, achatam e conformam-se à rugosidade da superfície e aderem mecanicamente entre si e às asperezas do substrato, o que implica que o revestimento apresente maior tensão de adesão em substratos com melhores propriedades mecânicas como é o caso da tensão de rotura.

Se compararmos os valores de tensão de adesão dados no gráfico 8.13 (projecção a 90° e temperatura de pré-aquecimento de 120°C), constatamos que o ferro fundido nodular perlítico (FFNP) apresenta o valor mais elevado (6,2 MPa), o que se pode explicar por ser aquele que apresenta a maior tensão de rotura (600-800 MPa).

Analisando os valores de adesão indicados no gráfico 8.14 (projecção a 90° e temperatura de pré-aquecimento de 90°C), não se compreende a razão do ferro fundido nodular perlítico não apresentar a maior tensão de adesão. Ainda podíamos pensar que podia dever-se à temperatura de pré-aquecimento de 90°C, não ser a mais adequada para o material, mas esta hipótese é contrariada pela leitura do gráfico 8.15 (projecção a 65° e temperatura de pré-aquecimento de 90°C) em que para o mesmo pré-aquecimento volta a apresentar a tensão de adesão mais elevada (8,3 MPa), o que leva a concluir que algo de anormal ocorreu nos ensaios de adesão dos provetes de FFNP projectados a 90° com uma temperatura de pré-aquecimento de 90°C.

Foi a projecção a 65° (Gráf. 8.15) que originou as tensões de adesão mais elevadas em todos os materiais utilizados para substrato, tendo o ferro fundido nodular perlítico apresentado o valor mais elevado (8,3 MPa), confirmando ser o melhor material. Continuando a análise deste gráfico verifica-se que os piores materiais para substrato são os ferro fundido cinzento ferrítico (5,9 MPa) e o duralumínio (5,6 MPa) devido a apresentarem baixas tensões de rotura e no caso do duralumínio existe em acréscimo a sua baixa temperatura de fusão (projecção a 90°: pré-aquecimento de 90°C (4,5 MPa) e 120°C (4,1 MPa))

Os gráficos seguintes (Gráf. 8.16, 8.17, 8.18, 8.19, 8.20) evidenciam a importância da temperatura de pré-aquecimento na tensão de adesão dos revestimentos, respectivamente para os provetes de duralumínio, ferro fundido nodular perlítico, latão, cuprocromo e ferro fundido cinzento ferrítico e confirmam as constatações tiradas a partir dos gráficos anteriores (Gráf. 8.13, 8.14 e 8.15). É de referir que o arrefecimento dos provetes por ar comprimido durante a projecção não tem grande influência na tensão de adesão dos revestimentos (ver Gráf. 8.12).

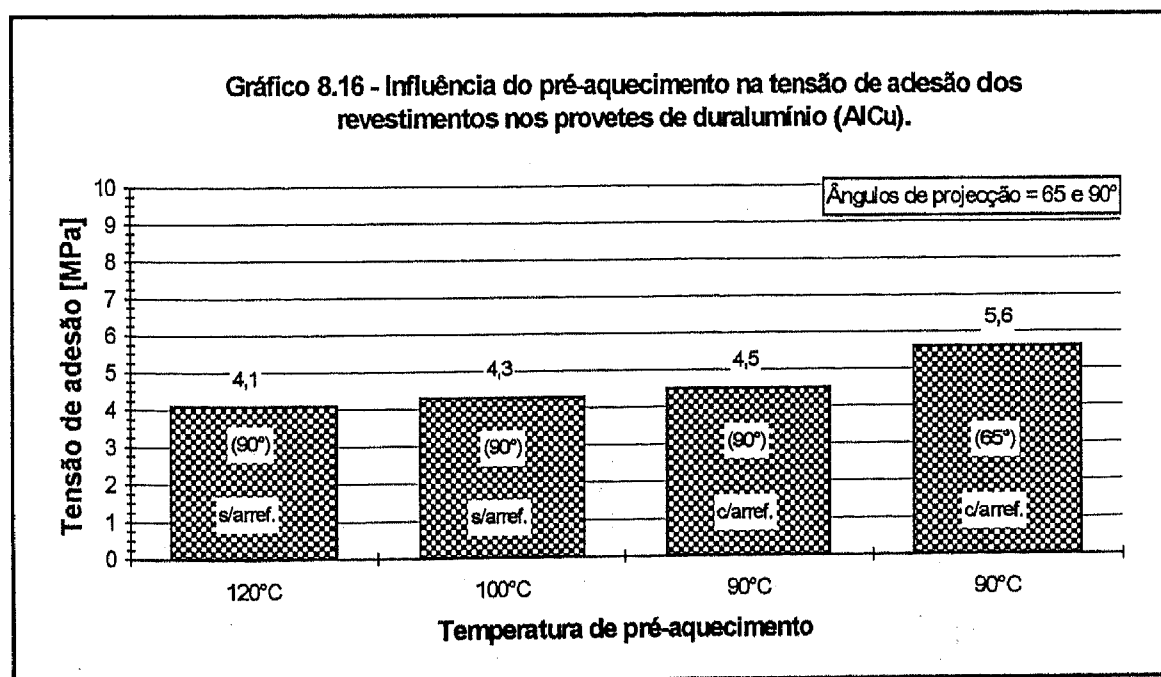


Gráfico 8.17 - Influência do pré-aquecimento na tensão de adesão dos revestimentos nos provetes de f.f.nodular perlitico (FFNP).

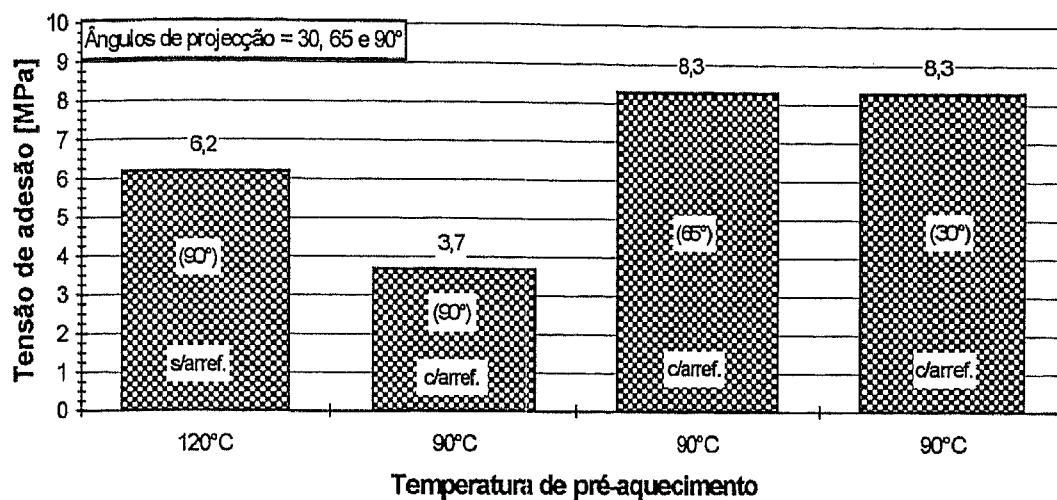


Gráfico 8.18 - Influência do pré-aquecimento na tensão de adesão dos revestimentos nos provetes de latão.

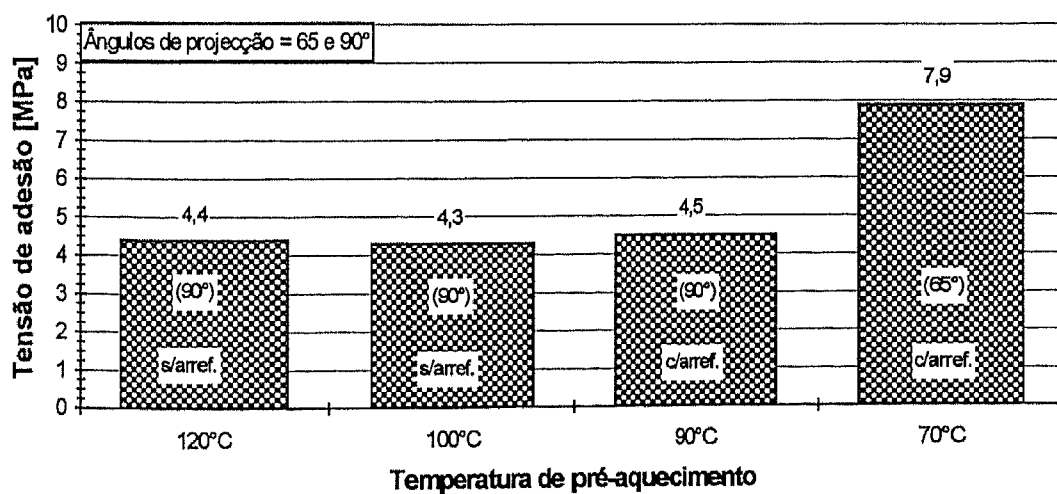


Gráfico 8.19 - Influência do pré-aquecimento na tensão de adesão dos revestimentos nos provetes de cuprocromo (CuCr).

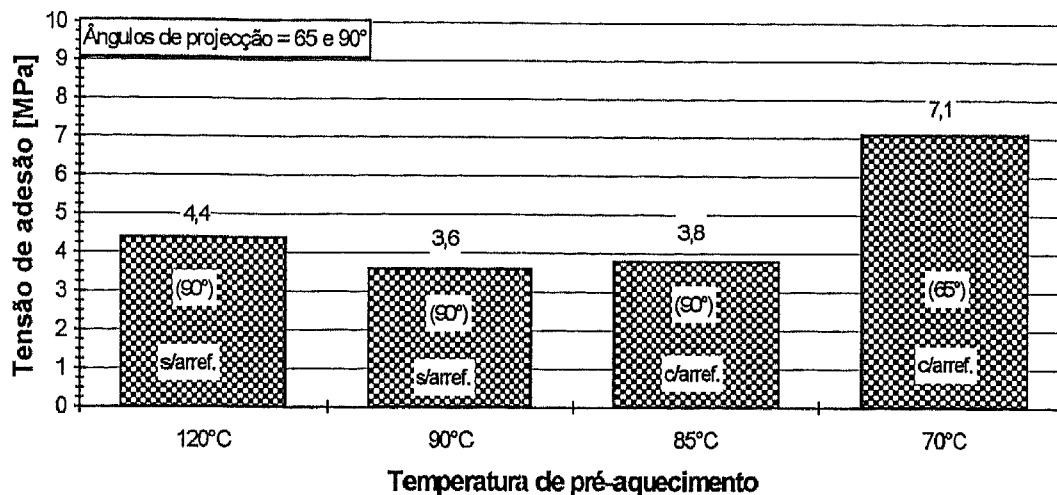
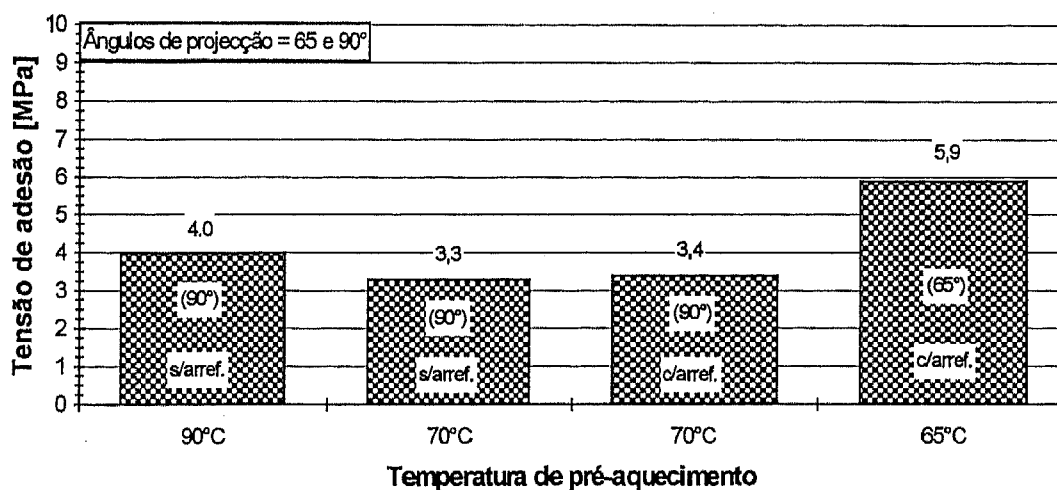
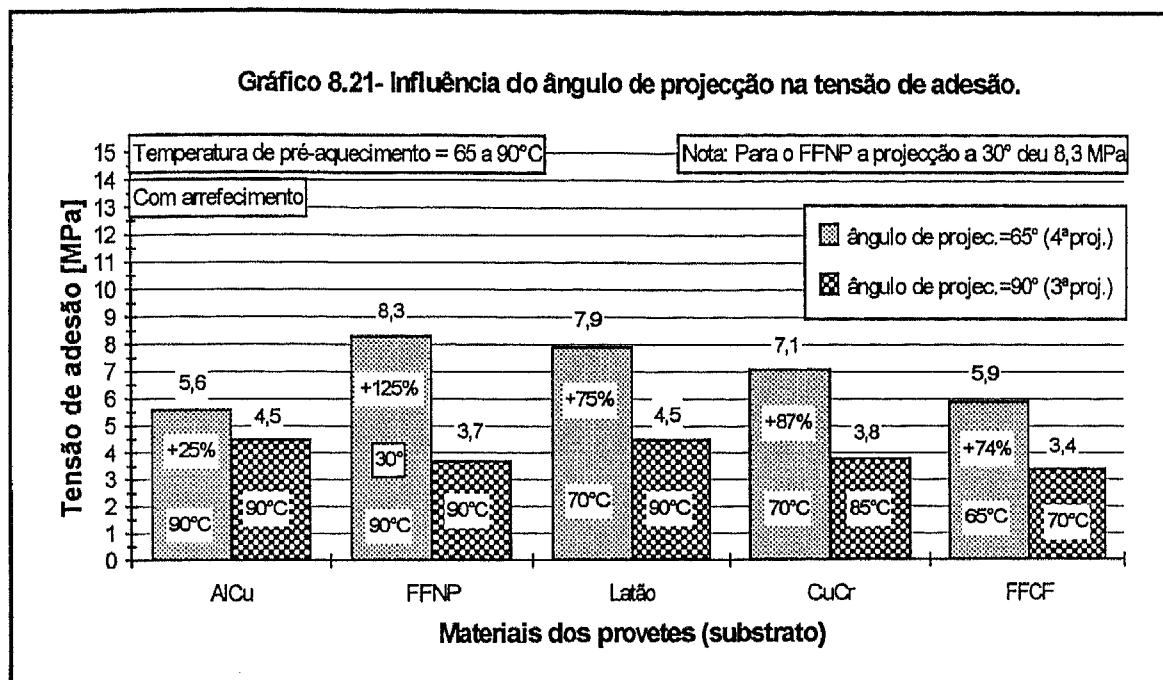


Gráfico 8.20 - Influência do pré-aquecimento na tensão de adesão dos revestimentos nos provetes de f.f.cinzento ferrítico (FFCF).



O gráfico seguinte (Gráf. 8.21) mostra a influência que tem o ângulo de projecção na tensão de adesão.



Visualizando o gráfico anterior verifica-se que para todos os materiais a projecção feita a 65°, conduziu a tensões de adesão mais elevadas do que a projecção a 90°.

No caso da projecção a 30°, que só foi executada em provetes de FFNP, o valor obtido de tensão de adesão foi igual ao da projecção a 65° (8,3 MPa).

Foi no caso dos provetes de FFNP que a projecção a 65° originou a melhoria mais significativa (125%) da tensão de adesão em relação à projecção a 90°. Nos provetes de latão, CuCr e FFCF o incremento foi aproximadamente de 80% e nos de AlCu o aumento ficou-se pelos 25%.

8.2.3 - Observação microscópica dos revestimentos

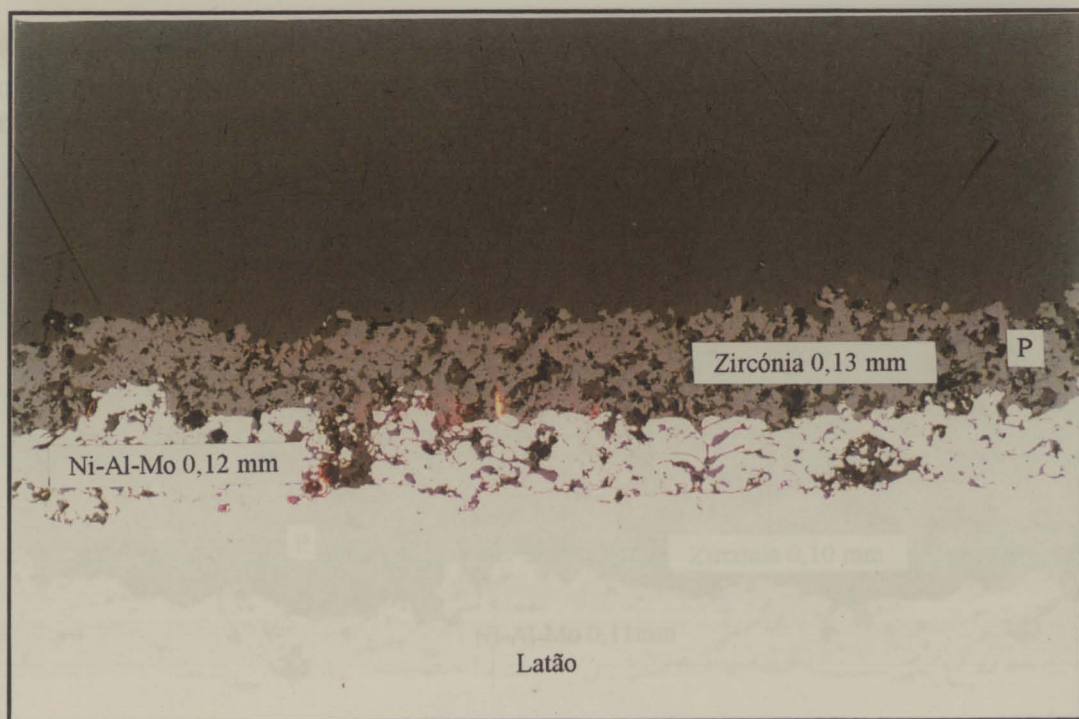
Para tentar explicar a razão das projecções a 65 e 30° conduzirem a tensões de adesão mais elevadas do que a projecção a 90°, foram vistos ao microscópio os revestimentos obtidos com os três ângulos de projecção.

Para observar no microscópio os revestimentos obtidos com ângulos de projecção de 65 e 90°, foram utilizadas amostras retiradas das placas de latão projectadas nos ensaios preliminares (ver ponto 6.6.3).

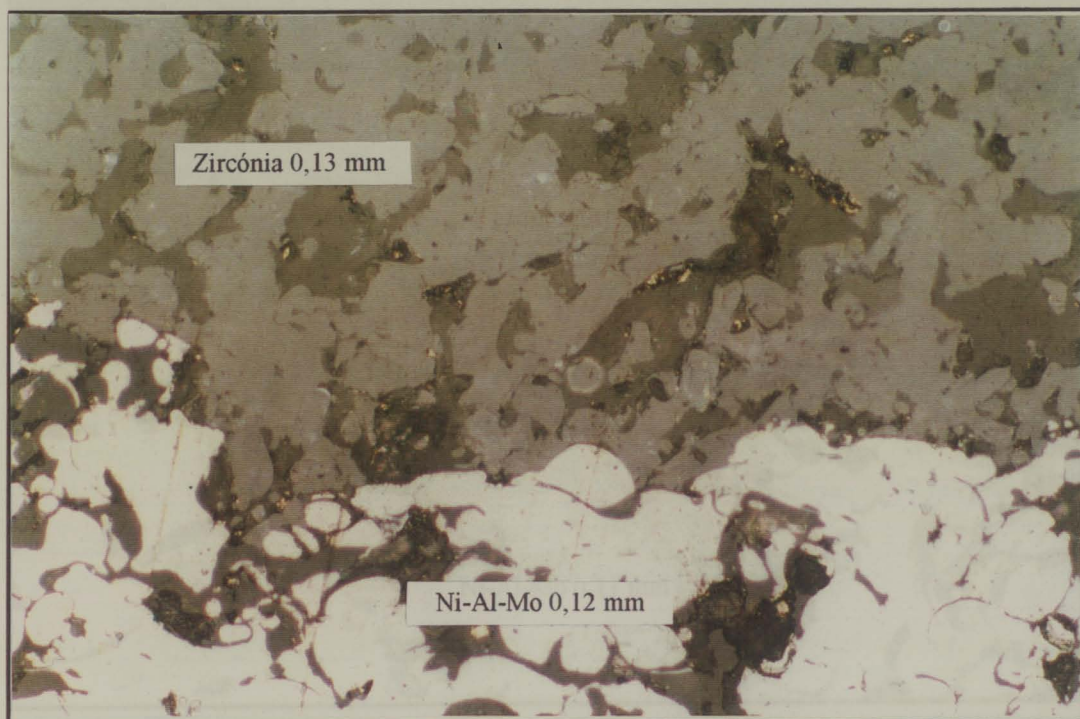
No caso da observação do revestimento projectado a 30°, foi utilizado um provete de FFNP (que foi revestido na 5ª projecção), seguindo os seguintes procedimentos:

- ❶ Para obter uma amostra, o provete foi cortado perpendicularmente à superfície projectada por uma serra circular refrigerada a água com óleo (marca Struers).
- ❷ Montagem da amostra em resina de cura a frio no vazio. Utilizou-se resina epoxy com a relação de 15 ml de resina para 2 ml de endurecedor com tempo de mistura de 3 minutos e tempo de cura 24 horas. A vantagem da utilização deste tipo de resina e em vazio é conseguir uma melhor impregnação da amostra devido à baixa viscosidade desta. No caso de revestimentos por projecção à chama esta vantagem é importante pois é conveniente preencher as porosidades e as irregularidades com resina para que não haja desagregação destas com o polimento, e consequentemente resultados errados.
- ❸ Polimento da amostra segundo as mesmas condições das amostras das placas de latão (ver ponto 6.6.3 - Tab. 6.8).

As fotomicrografias seguintes (Fot.^{as} 8.8 e 8.9) mostram o revestimento de camada de ligação (Ni-Al-Mo) e zircónia (ZrO_2), projectados a 90° numa placa de latão, com duas ampliações diferentes.

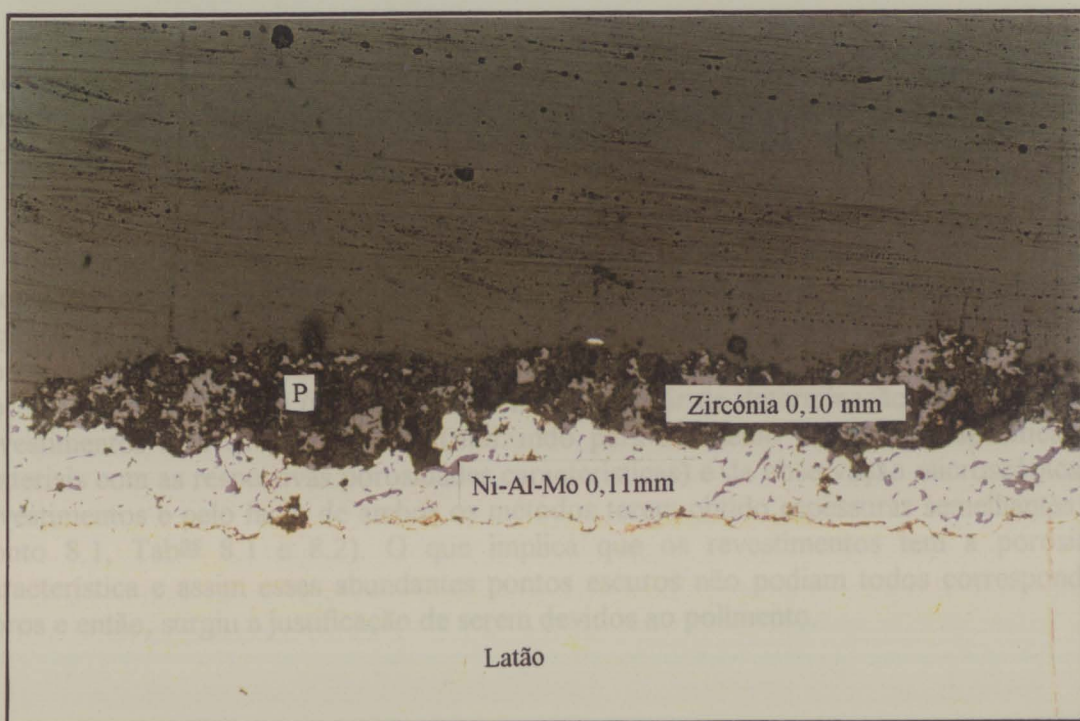


Fot. 8.8 - Ampliação 100x. Amostra 2 (da placa de latão nº2) de acordo com a fig. 6.2. Revestimento de Ni-Al-Mo e zircónia projectado a 90°. A ligação entre as camadas de revestimento parece boa, não se visualizam fissuras. Tanto a camada de ligação como a zircónia apresentam pouca porosidade (pontos mais escuros-letra P), no entanto a camada de zircónia apresenta mais porosidade do que a camada de ligação o que é natural já que são esperadas respectivamente porosidades de 10 e <2%.

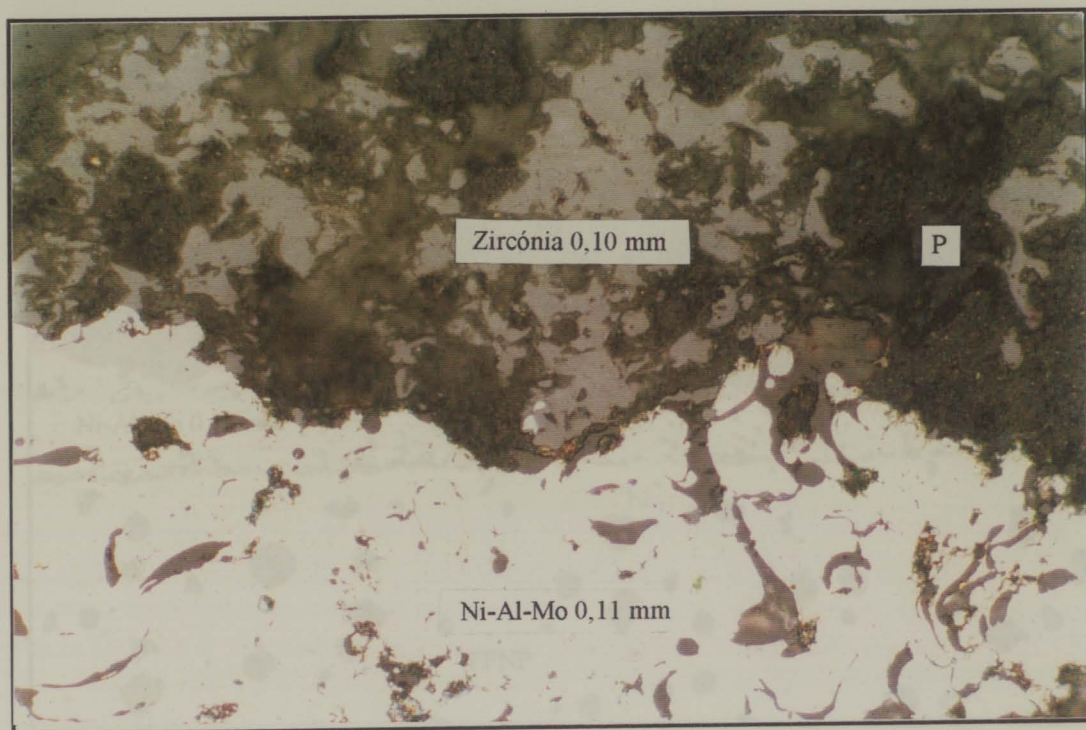


Fot. 8.9 - Ampliação 500x. Amostra 2 (da placa de latão nº2) de acordo com a fig. 6.2. Revestimento de Ni-Al-Mo e zircónia projectado a 90°. Confirma-se a boa ligação entre as camadas de revestimento e a pouca porosidade.

As fotomicrografias seguintes (Fot. 8.10 e 8.11) mostram o revestimento de camada de ligação (Ni-Al-Mo) e zircónia (ZrO_2), projectados a 65° numa placa de latão, com duas ampliações diferentes.



Fot. 8.10 - Ampliação 100x. Amostra 2 (da placa de latão nº5) de acordo com a fig. 6.2. Revestimento de Ni-Al-Mo e zircónia projectado a 65°. A ligação entre as camadas de revestimento parece boa, não se visualizam fissuras. O revestimento de zircónia apresenta muitos pontos mais escuros-letra P mas não são todos devido à porosidade (muitos foram originados no polimento da amostra). A camada de ligação apresenta muito pouca porosidade < 2%.

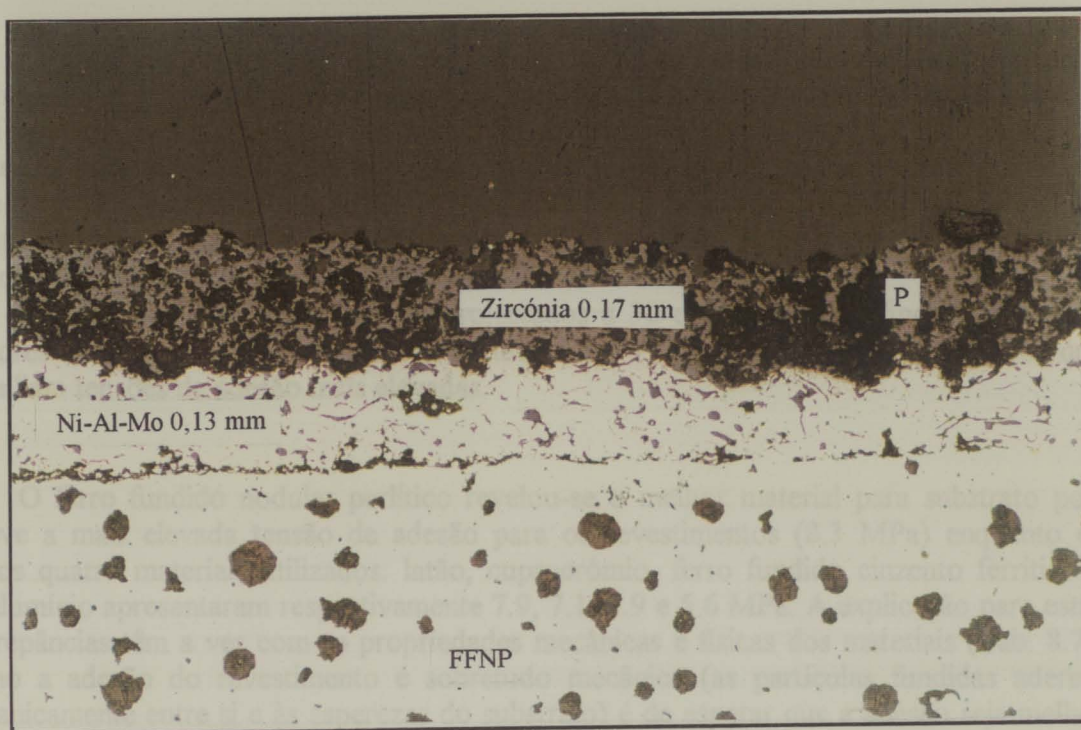


Fot. 8.11 - Ampliação 500x. Amostra 2 (da placa de latão nº5) de acordo com a fig. 6.2. Revestimento de Ni-Al-Mo e zircónia projectado a 65°. Confirma-se a boa ligação entre as camadas de revestimento. Tanto a camada de ligação como a zircónia apresentam pouca porosidade (pontos mais escuros-letra P), no entanto a camada de zircónia apresenta mais porosidade do que a camada de ligação o que é natural já que são esperadas respectivamente porosidades de 10 e < 2%.

A projecção a 65° originou uma menor espessura para os revestimentos, em relação à obtida na projecção a 90°. Este facto foi mais evidente no revestimento de zircónia (diminuição de 0,13 para 0,10 mm) do que na camada de ligação (Ni-Al-Mo), apenas uma diminuição de 0,12 para 0,11 mm.

A porosidade dos revestimentos obtidos pelos dois ângulos de projecção (90 e 65°) é semelhante e corresponde aos valores tabelados pelo fabricante dos materiais de projecção, para a camada de ligação (< 2%) e zircónia (10%). A constatação descrita na legenda da fotomicrografia 8.10 em que muitos pontos escuros não correspondiam a porosidade do revestimento, mas eram devidos à preparação das amostras para a observação microscópica (polimento), foi tirada a partir da determinação da espessura dos revestimentos através do seu peso (utilizando para o cálculo as massas específicas dos materiais com as respectivas porosidades características) e da observação microscópica dos revestimentos e pelo facto de ambos os métodos terem obtido espessuras semelhantes (ver ponto 8.1, Tabas 8.1 e 8.2). O que implica que os revestimentos tem a porosidade característica e assim esses abundantes pontos escuros não podiam todos corresponder a poros e então, surgiu a justificação de serem devidos ao polimento.

A fotomicrografia seguinte (Fot. 8.12) mostra o revestimento de camada de ligação (Ni-Al-Mo) e zircónia (ZrO_2), projectado a 30° num provete de ferro fundido nodular perlítico (FFNP).



Fot. 8.12 - Ampliação 100x. Amostra do provete revestido de ferro fundido nodular perlítico (FFNP). Revestimento de camada de ligação (Ni-Al-Mo) e zircónia projectado a 30°. A ligação entre as camadas de revestimento parece boa, não se visualizam fissuras. O revestimento de zircónia apresenta muitos pontos mais escuros-letra P, mas não são todos devido à porosidade (muitos foram originados no polimento da amostra). A camada de ligação apresenta muito pouca porosidade < 2%.

A espessura de zircónia é maior neste provete de ferro fundido nodular perlítico (FFNP) do que nas placas de latão porque foi revestida com o dobro das passagens de projecção (12 em vez de 6), por isso teria uma espessura equivalente à das placas de latão se apresentasse o dobro, o que não se verifica. A camada de ligação é que teve as mesmas passagens de projecção das placas (duas) e verifica-se que a espessura é semelhante.

A porosidade da camada de ligação e da zircónia projectadas a 30° é semelhante às das projectadas a 90 e 65°.

As projecções a 30 e 65° têm menor eficiência de deposição do que a projecção a 90°, facto que origina a obtenção de revestimentos mais finos para as mesmas passagens de projecção.

No caso da projecção a 30° os valores de tensão de adesão determinados são muito escassos e foram apenas sujeitos a ensaios de adesão três provetes de ferro fundido nodular perlítico que obtiveram o mesmo valor de adesão para os revestimentos projectados a 65° (8,3 MPa).

Pensamos que o facto dos revestimentos projectados a 65° apresentarem maiores tensões de adesão do que os projectados a 90°, em todos os materiais utilizados para substrato (ver Gráf. 8.21), tem a ver com a espessura dos revestimentos.

Como em outros tipos de depósitos, os revestimentos obtidos por projecção à chama contêm tensões residuais, que resultam da contracção ocorrida durante o arrefecimento e solidificação dos materiais projectados. Essas tensões são devidas à contracção individual das partículas, quando solidificam no substrato e a sua magnitude é proporcional à espessura do depósito. Deste modo, a interface revestimento/substrato é sujeita a tensões de corte e para de obter uma óptima adesão dos revestimentos só devem ser toleradas tensões normais à ligação.

Então, como os revestimentos projectados a 30 e 65° são mais finos, apresentam menores tensões residuais que os projectados a 90° e por isso é compreensível que obtenham tensões de adesão mais elevadas.

O ferro fundido nodular perlítico revelou-se o melhor material para substrato pois obteve a mais elevada tensão de adesão para os revestimentos (8.3 MPa) enquanto os outros quatro materiais utilizados: latão, cuprocromo, ferro fundido cinzento ferrítico e duralumínio apresentaram respectivamente 7.9, 7.1, 5.9 e 5.6 MPa. A explicação para estas discrepâncias têm a ver com as propriedades mecânicas e físicas dos materiais (Tab. 8.7). Como a adesão do revestimento é sobretudo mecânica (as partículas fundidas aderem mecanicamente entre si e às asperezas do substrato) é de esperar que a adesão seja melhor nos substratos com melhores propriedades mecânicas, como é o caso do ferro fundido nodular perlítico (tensão de rotura de 600-800 MPa) do que no ferro fundido cinzento ferrítico que apresenta uma tensão de rotura mais baixa (300-400 MPa).

O pré-aquecimento de 120°C é o mais indicado para o ferro fundido nodular perlítico (FFNP) e cuprocromo (CuCr) e o de 90°C para o duralumínio (AlCu) e latão. Não se pode tirar nenhuma conclusão deste tipo para os provetes de ferro fundido cinzento ferrítico (FFCF), já que não se efectuaram neles projecções com uma temperatura de pré-aquecimento de 120°C, mas foi a temperatura de pré-aquecimento mais alta utilizada (90°C), que conduziu à maior tensão de adesão, sendo de prever por analogia com o FFNP que a temperatura de pré-aquecimento de 120°C originasse um melhor resultado (ver Graf. 8.13 e 8.14).

9 - Conclusões finais

- ❶ - A eficiência de deposição atinge o seu máximo na projecção a 90°, para todos os materiais projectados, conduzindo consequentemente às maiores espessuras dos revestimentos. A projecção a 65° comparadamente à projecção a 90° originou perdas de eficiência para a camada de ligação, zircónia e alumina, respectivamente de 8, 18 e 27%.
- ❷ - Os revestimentos cerâmicos projectados a 30, 65 e 90° apresentam porosidades semelhantes.
- ❸ - Os revestimentos projectados a 30 e 65° por terem menor espessura contêm tensões residuais com menor magnitude do que os projectados a 90° e assim apresentam melhores tensões de adesão.
- ❹ - A temperatura de pré-aquecimento que conduz à melhor adesão do revestimento depende do material do substrato. Para os substratos de ferro fundido nodular perlítico e cuprocromo é a temperatura de pré-aquecimento de 120°C que origina as melhores tensões de adesão dos revestimentos, enquanto para os substratos de duralumínio e latão é preferível a temperatura de 90°C. Não se pode tirar nenhuma conclusão deste tipo para os provetes de ferro fundido cinzento ferrítico (FFCF), já que não se efectuaram neles projecções com uma temperatura de pré-aquecimento de 120°C, mas foi a temperatura de pré-aquecimento mais alta utilizada (90°C), que conduziu à maior tensão de adesão.
- ❺ - Os revestimentos em materiais com maiores temperaturas de fusão apresentam maiores tensões de adesão com pré-aquecimentos mais elevados.
- ❻ - A utilização de substratos com boas propriedades mecânicas nomeadamente quanto à tensão de rotura, é um factor que influencia o valor obtido de tensão de adesão dos revestimentos. Foi o substrato em ferro fundido nodular perlítico que obteve a mais elevada tensão de adesão para os seus revestimentos (8,3 MPa), já que dentro dos materiais utilizados, é o que apresenta a mais elevada tensão de rotura.

10 - Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito da continuação do desenvolvimento deste trabalho de investigação e da resolução de alguns problemas entretanto surgidos, sugerem-se os seguintes temas de trabalho:

- ❶ - Estudar a influência de pequenos ângulos de projecção (45, 30 e 15°) na eficiência de deposição.
- ❷ - Estudar a morfologia de revestimentos (camada de ligação(Ni-Al-Mo)+zircónia ou alumina), em função de vários ângulos de projecção (45, 30 e 15°) e temperaturas de pré-aquecimento (60 a 120°C) e seu relacionamento com as tensões de adesão.
- ❸ - Projectar um método expedito de medição das espessuras durante a projecção dos revestimentos, pois se a espessura medida na ocasião se situar abaixo do previsto é fácil alterar os parâmetros, de modo a conseguir as espessuras pretendidas.
- ❹ - Fazer a projecção robotizada com diferentes trajectórias de deposição ou projecção e estudar a sua influência na rugosidade, espessura, adesão e morfologia do revestimento e na eficiência da deposição.
- ❺ - Produzir revestimentos (camada de ligação(Ni-Al-Mo) + zircónia ou alumina) com várias distâncias de projecção e determinar a sua influência na eficiência de deposição, adesão e sobretudo na morfologia do revestimento.

ANEXOS

ANEXO I

**Gráficos de temperaturas adquiridas
durante as projecções nos provetes**

Gráfico 1 - Evolução das temperaturas em várias profundidades dum provete de duralumínio na 1ª projecção.

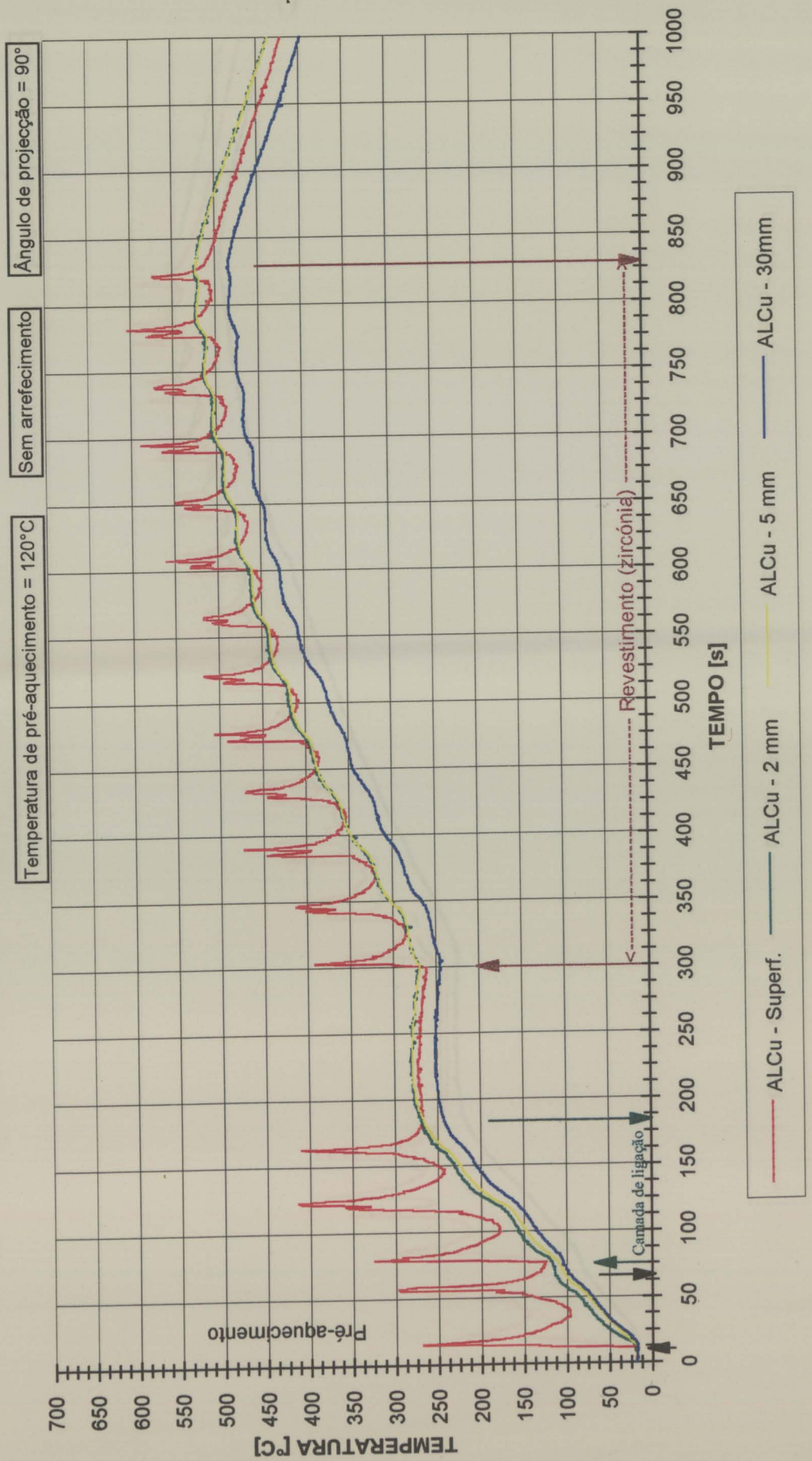


Gráfico 2 - Temperaturas em várias profundidades dum provete de ferro fundido nodular perlítico na 1ª proj.

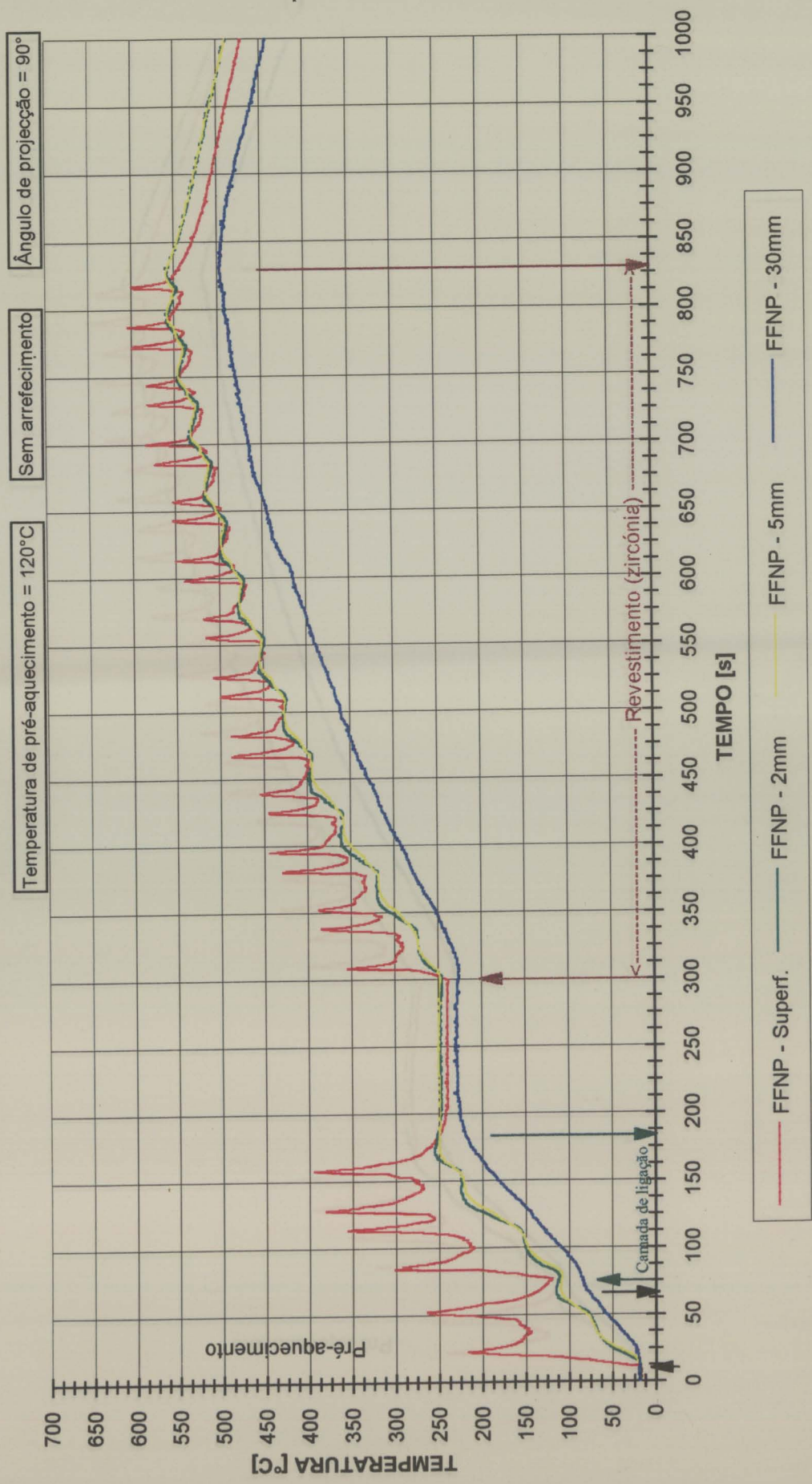


Gráfico 3 - Evolução das temperaturas em várias profundidades dum provete de latão na 1ª projecção.

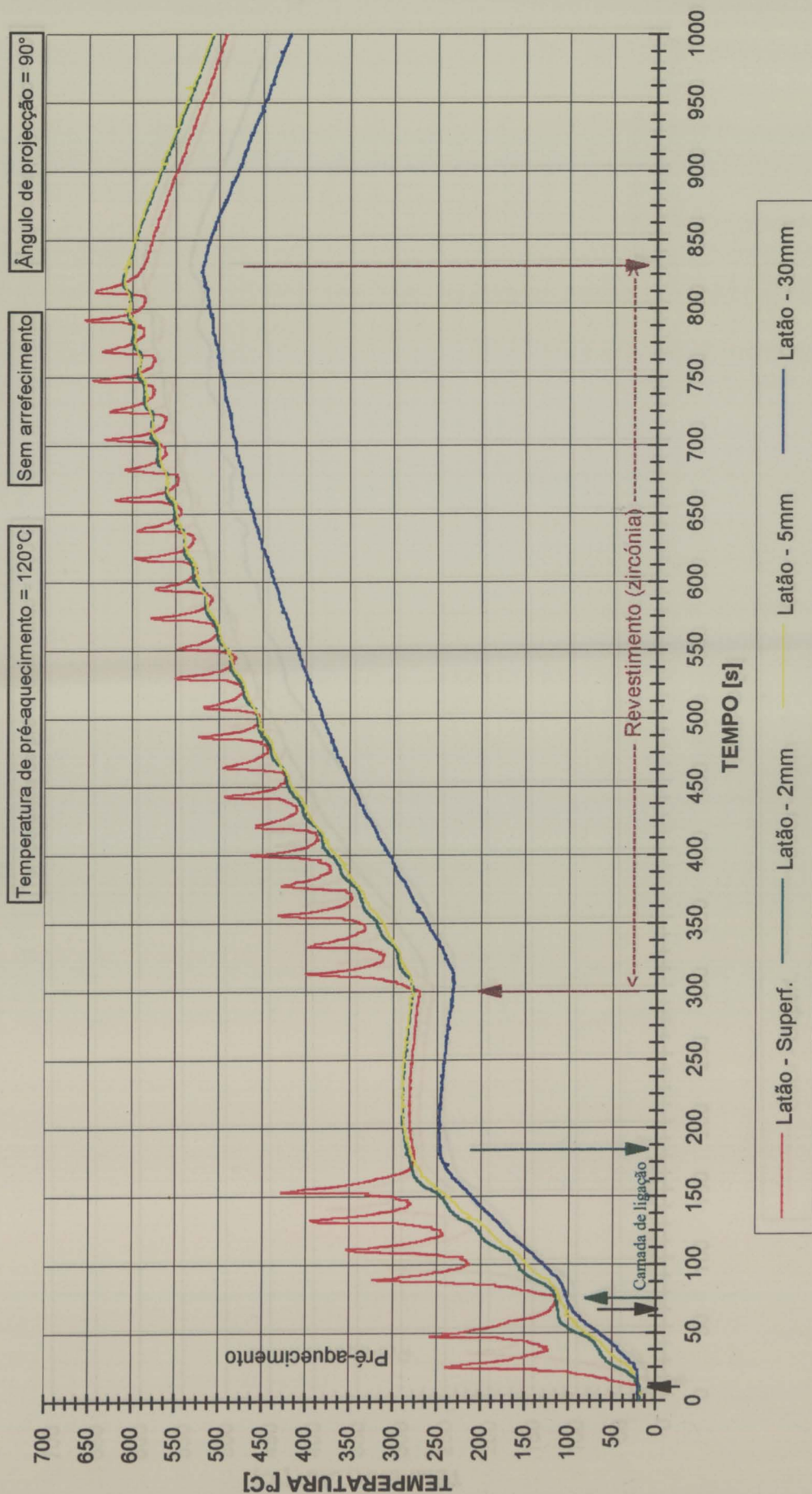


Gráfico 4 - Evolução das temperaturas em várias profundidades dum provete de cuprocromo na 1ª projecção.

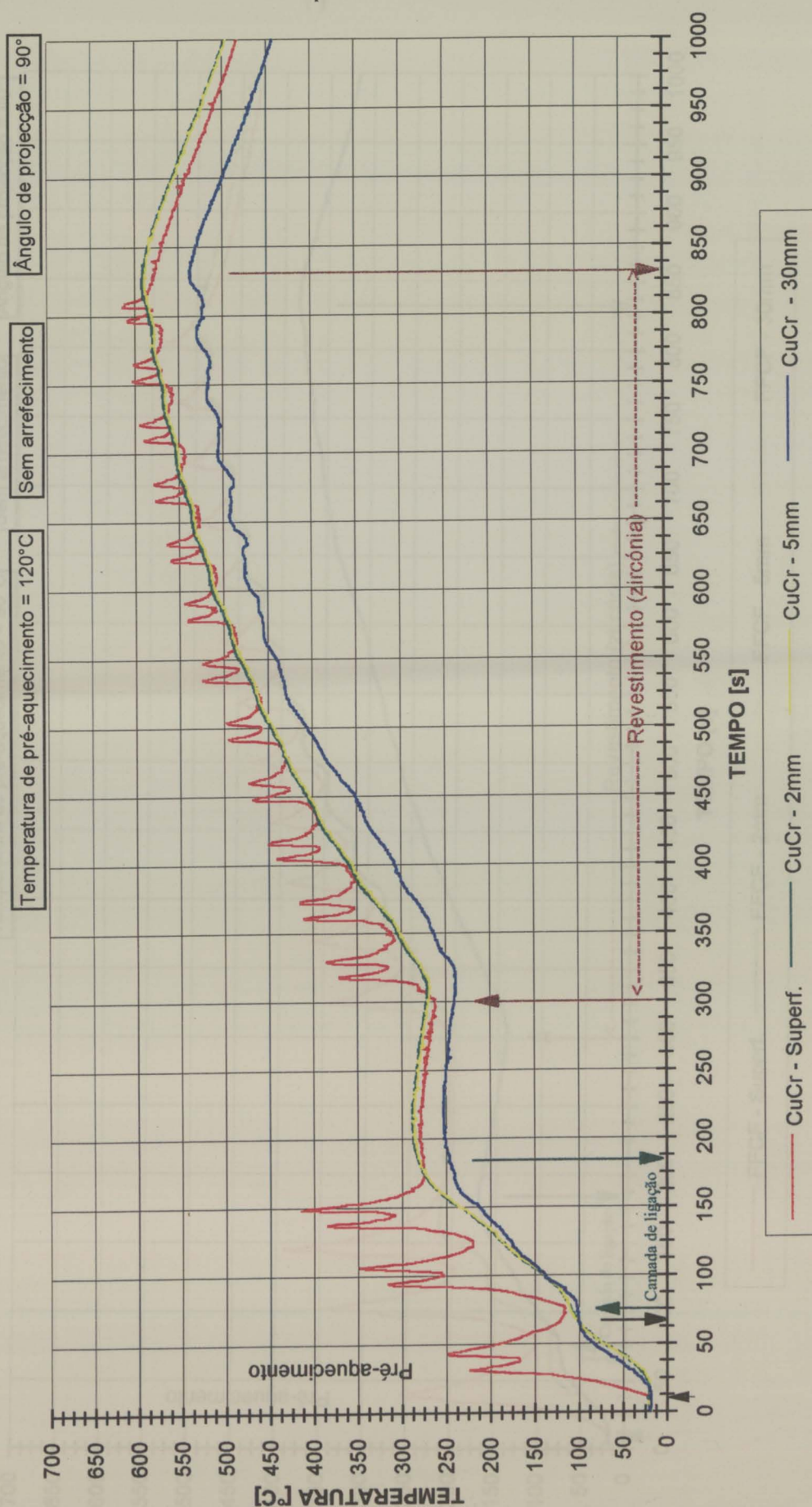


Gráfico 5 - Temperaturas em várias profundidades dum provete de ferro fundido cinzento ferrítico na 1ª proj.

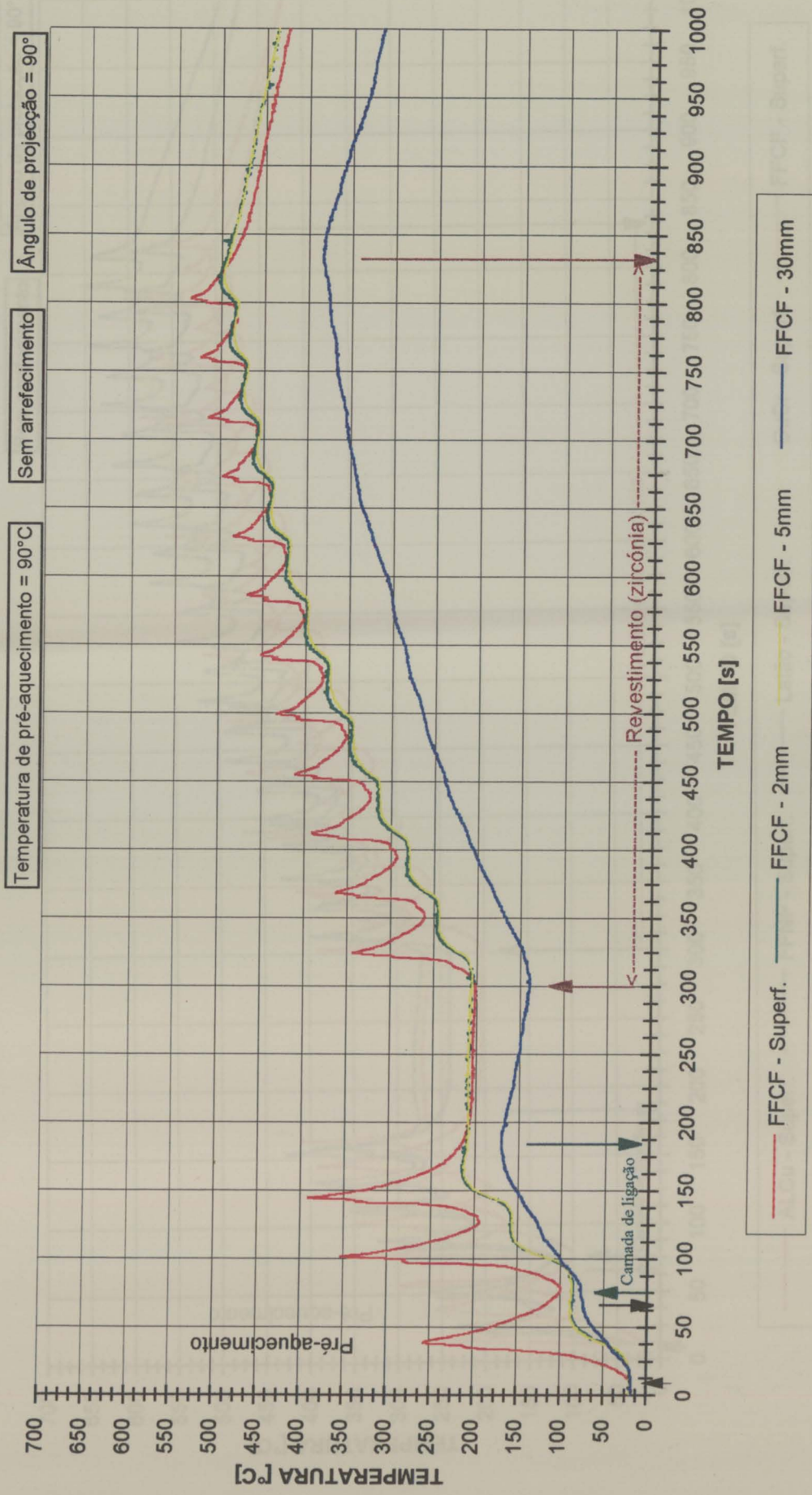


Gráfico 6 - Evolução das temperaturas na superfície dos provetes na 1ª projecção.

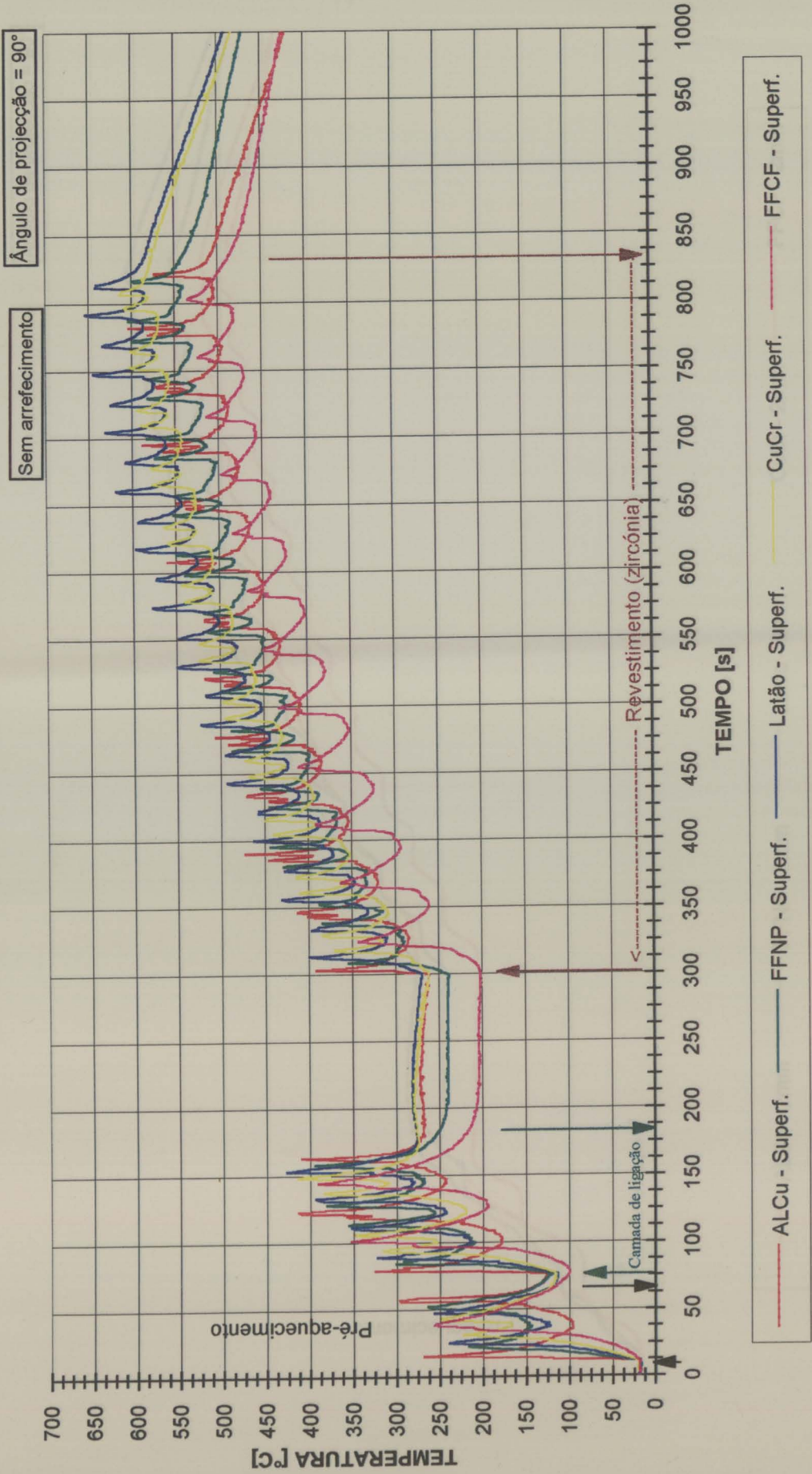


Gráfico 7 - Evolução das temperaturas a 2 mm da superfície dos provetes na 1ª projecção.

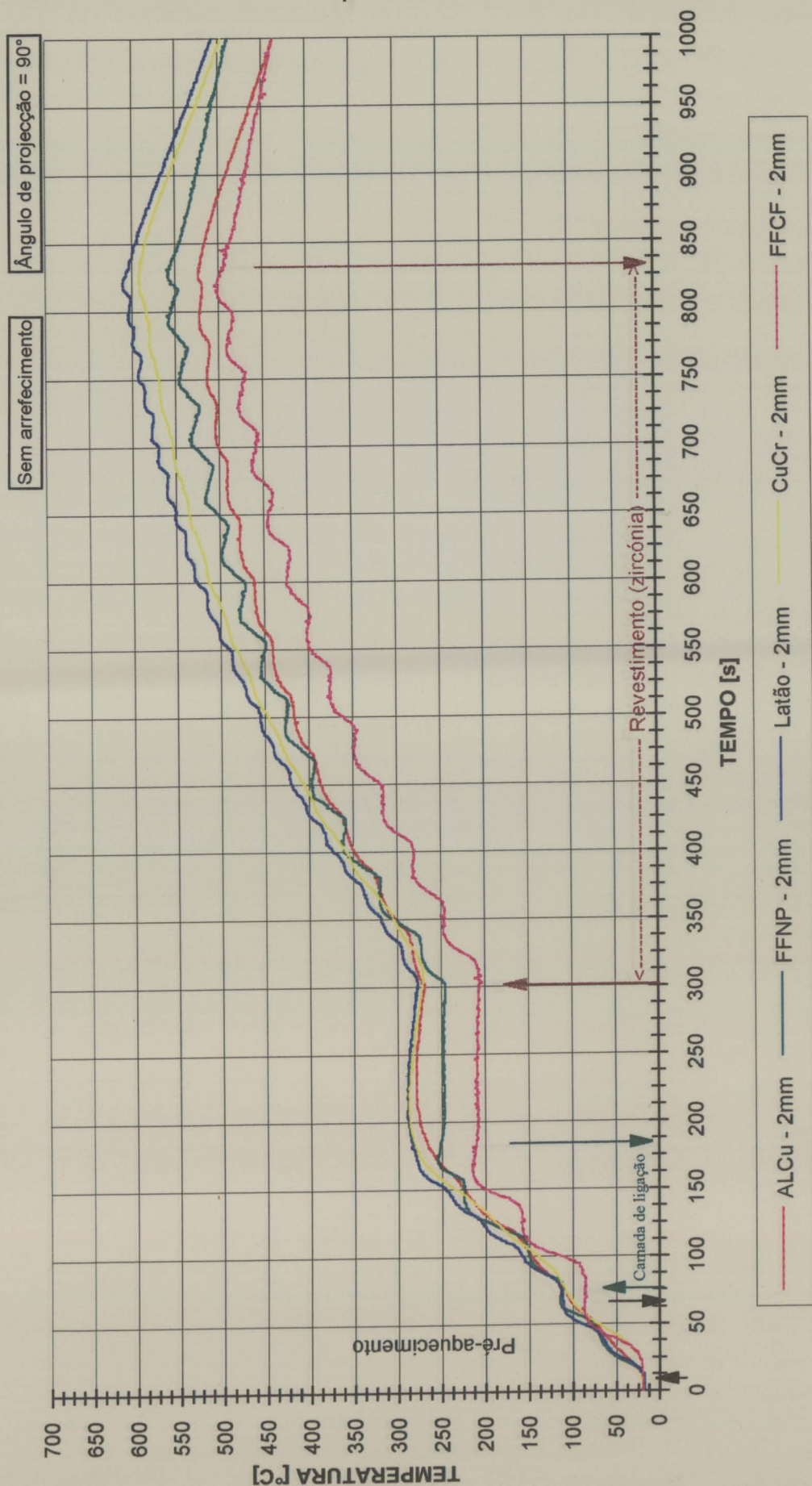


Gráfico 8 - Evolução das temperaturas a 5 mm da superfície dos provetes na 1ª projecção.

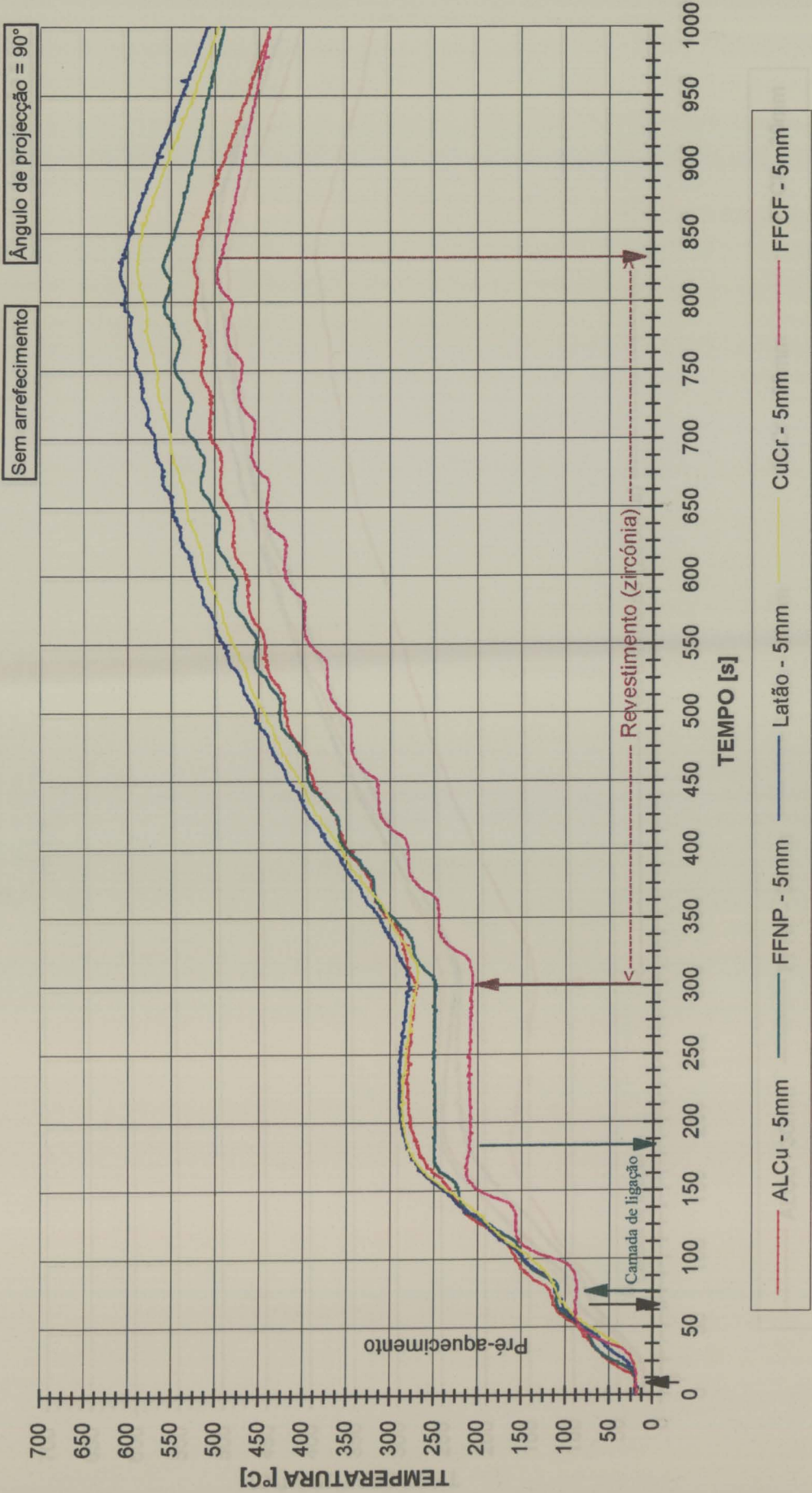


Gráfico 9 - Evolução das temperaturas a 30 mm da superfície dos provetes na 1ª projecção.

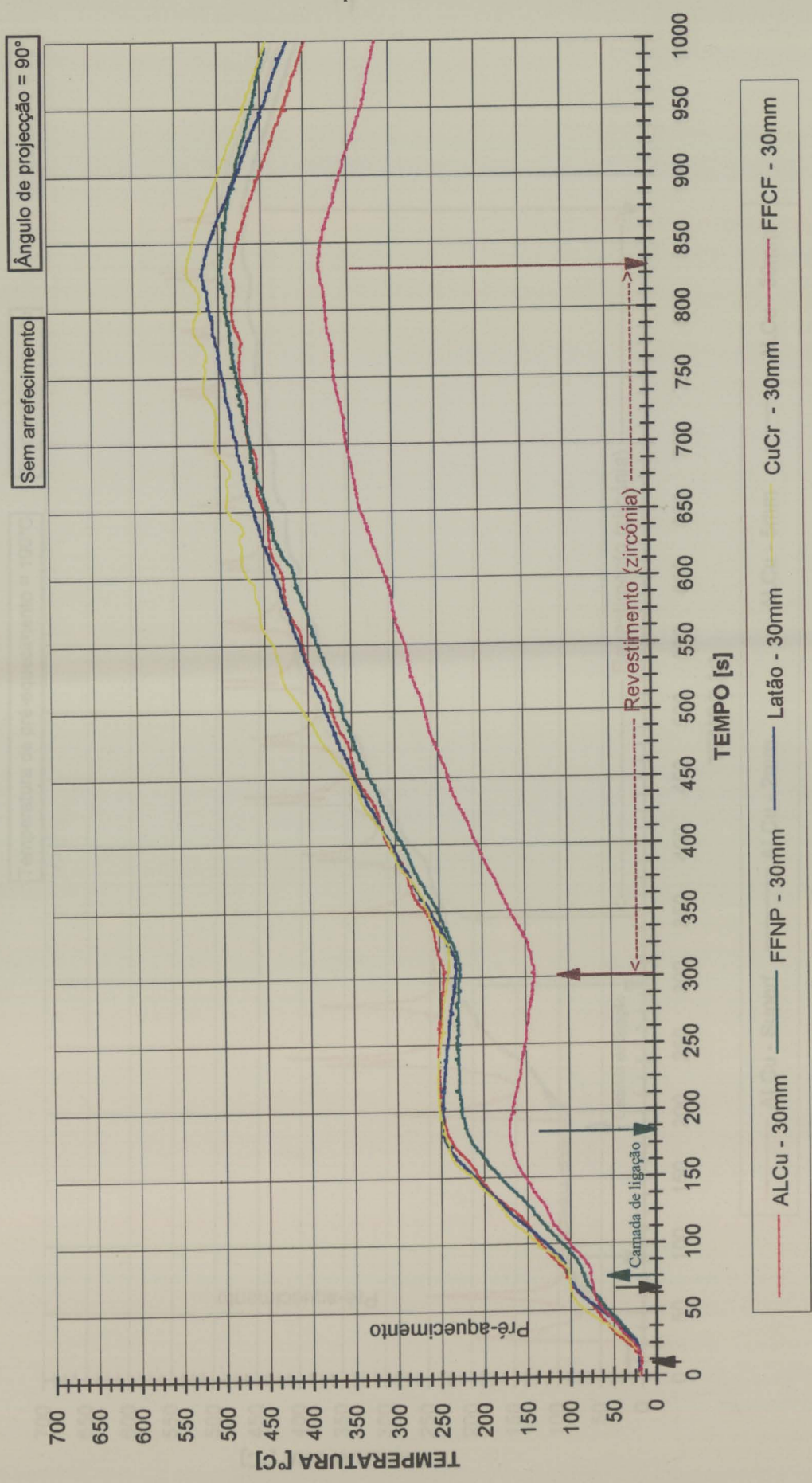


Gráfico 10 - Evolução das temperaturas em várias profundidades dum provete de duralumínio na 2ª projecção.

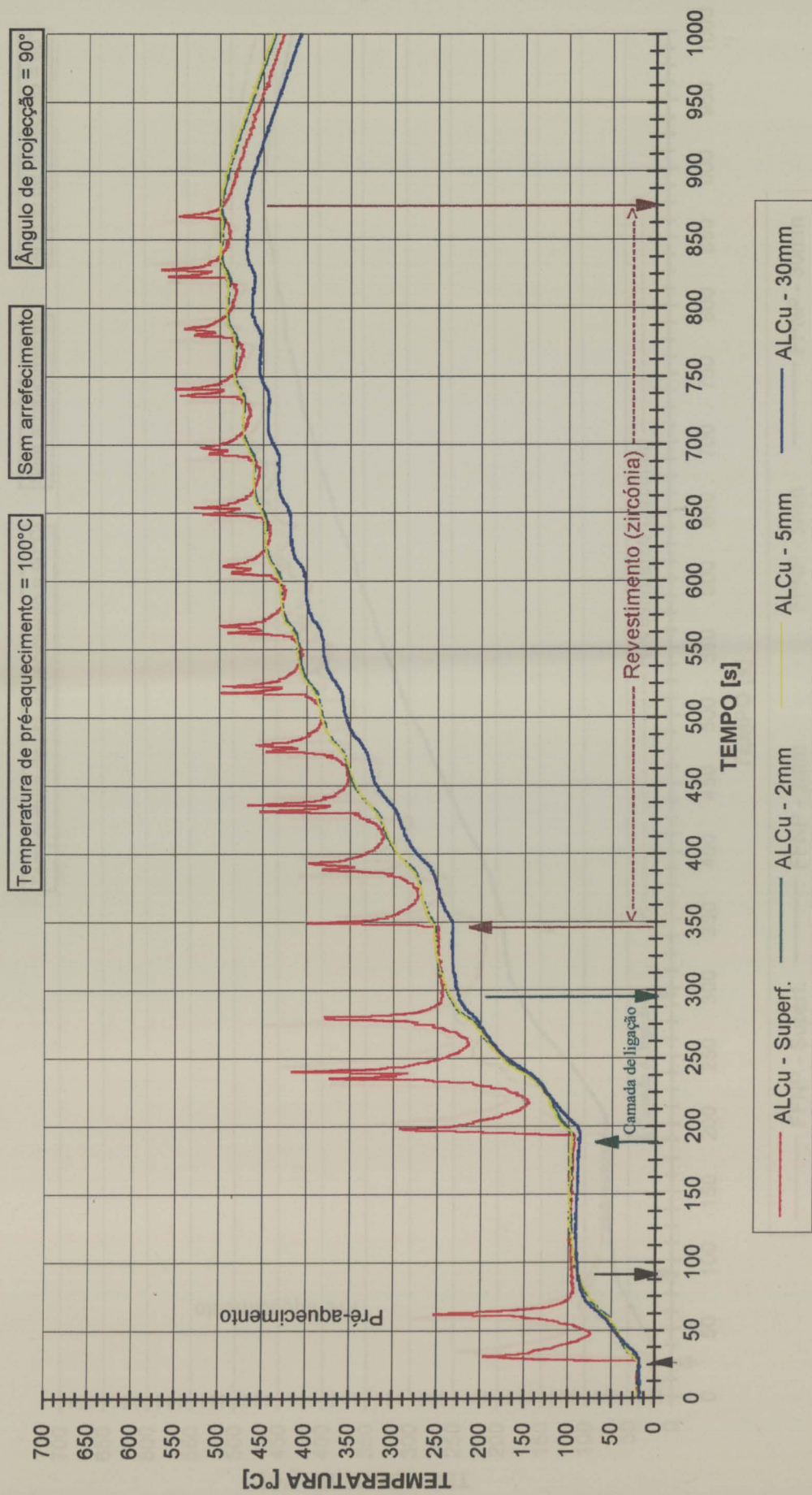


Gráfico 11 - Temperaturas em várias profundidades dum provete de ferro fundido nodular perlítico na 2ªproj.

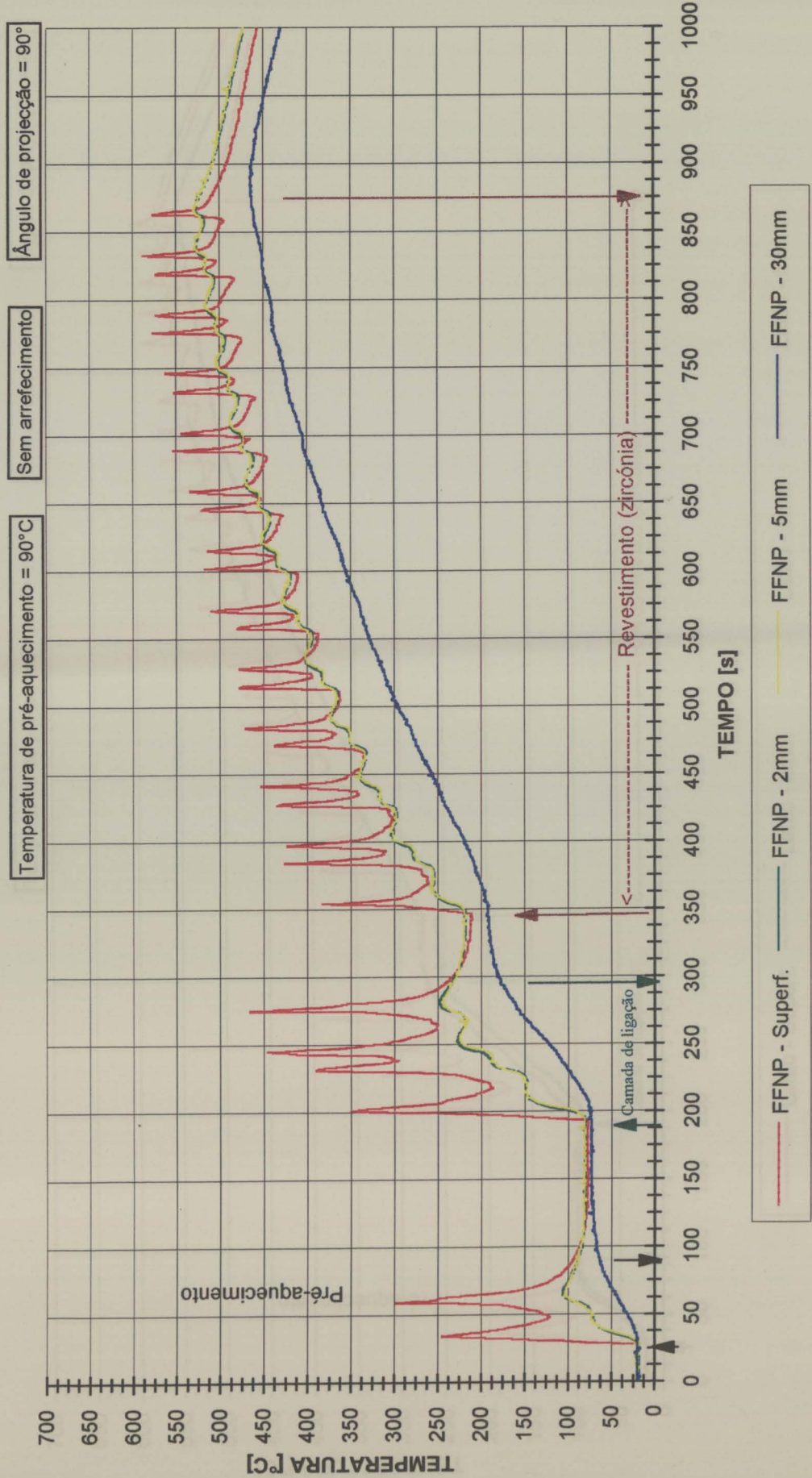


Gráfico 12 - Evolução das temperaturas em várias profundidades dum provete de latão na 2ª projecção.

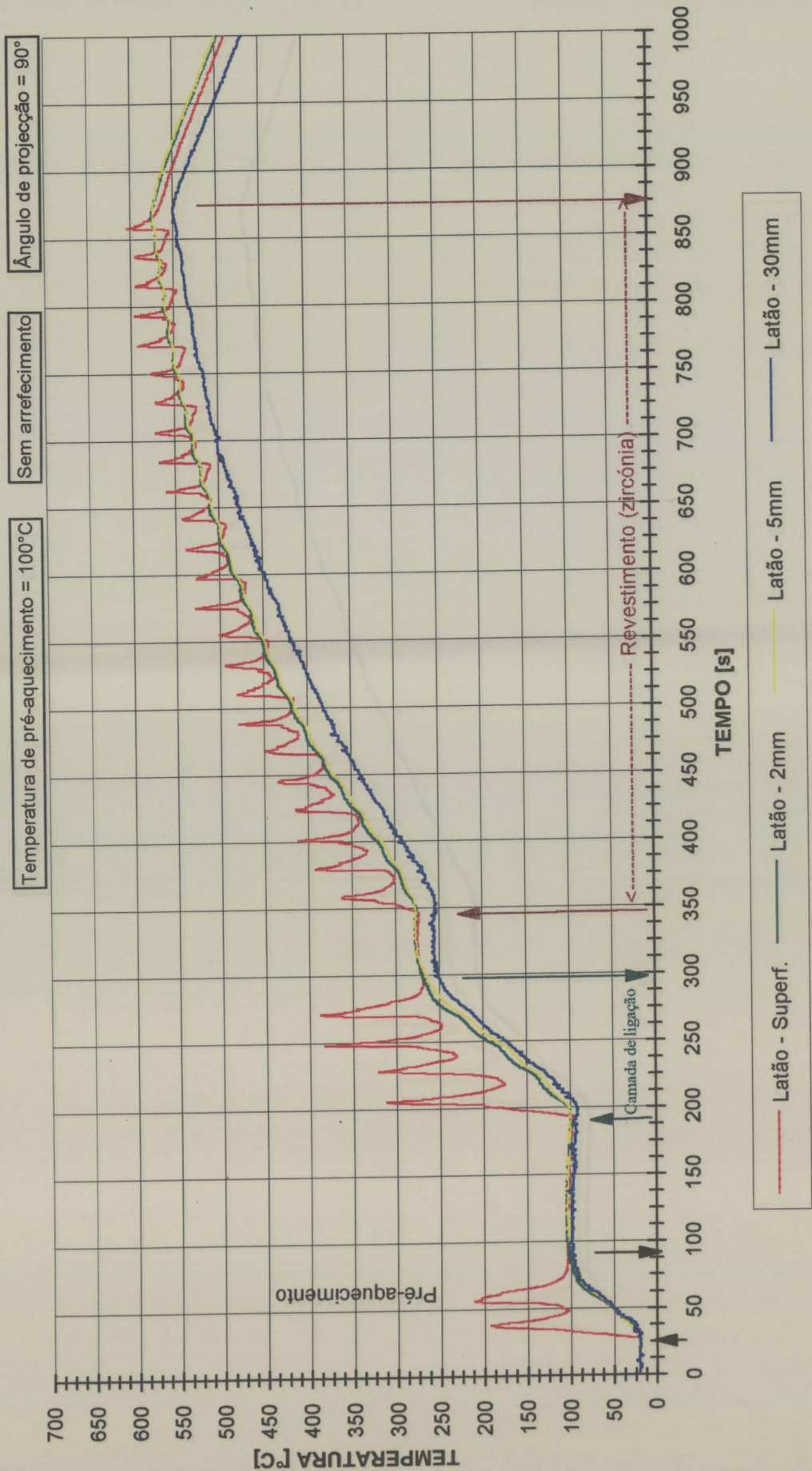


Gráfico 13 - Evolução das temperaturas em várias profundidades dum provete de cuprocromo na 2ª projecção.

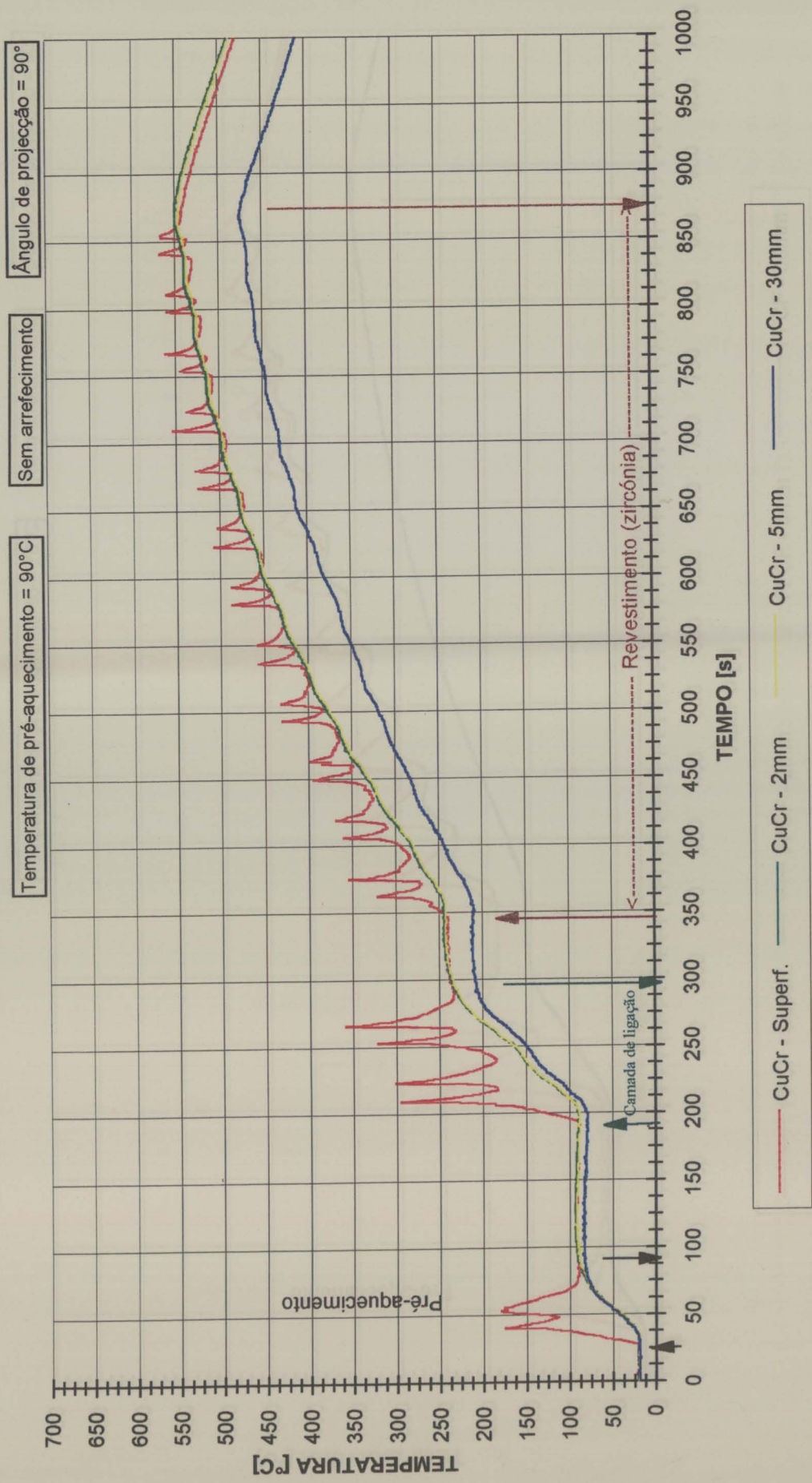


Gráfico 14 - Temperaturas em várias profundidades dum provete de ferro fundido cinzento ferrítico na 2ªproj.

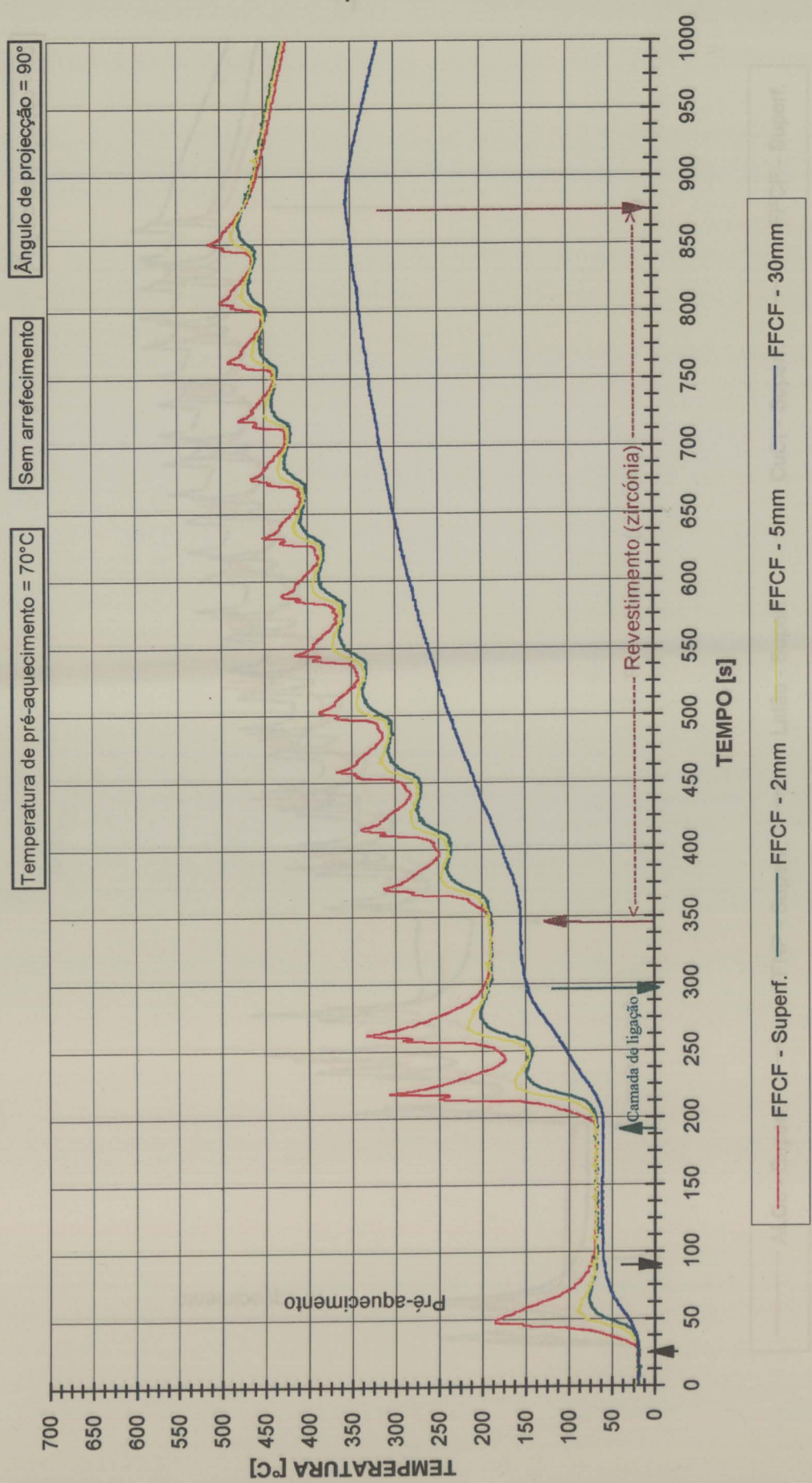


Gráfico 15 - Evolução das temperaturas na superfície dos provetes na 2ª projecção.

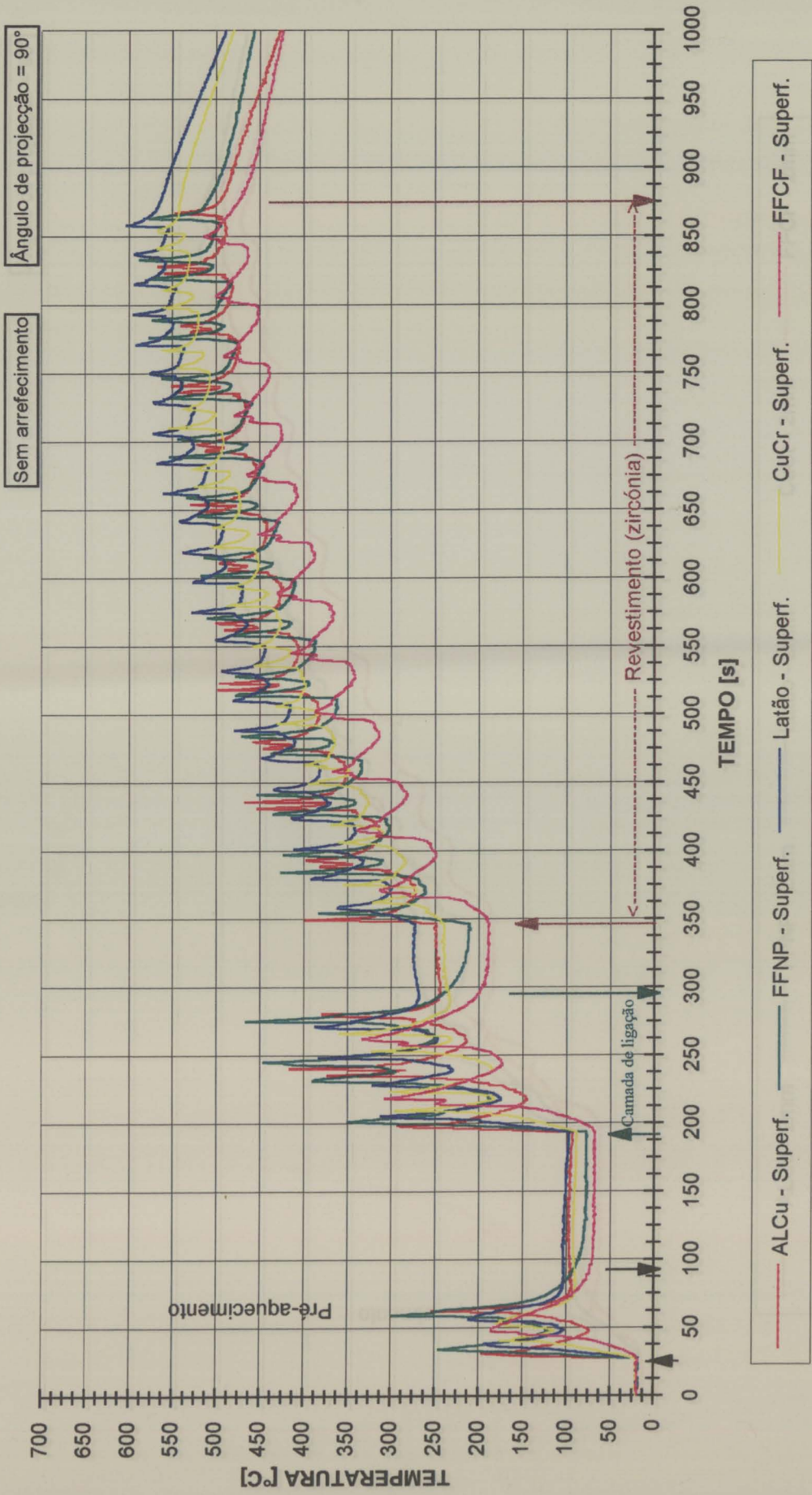


Gráfico 16 - Evolução das temperaturas a 2 mm da superfície dos provetes na 2ª projecção.

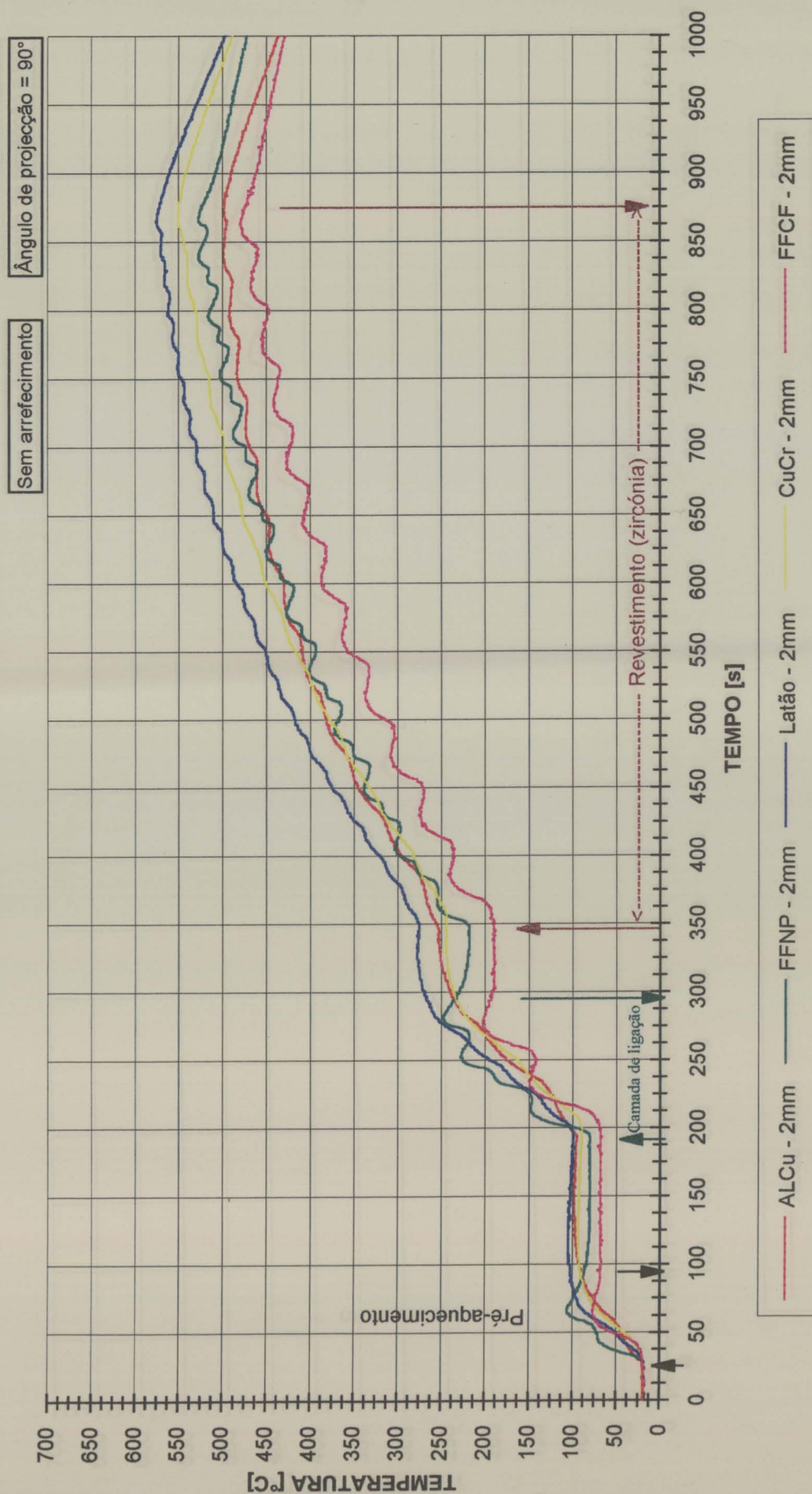


Gráfico 17 - Evolução das temperaturas a 5 mm da superfície dos provetes na 2ª projecção.

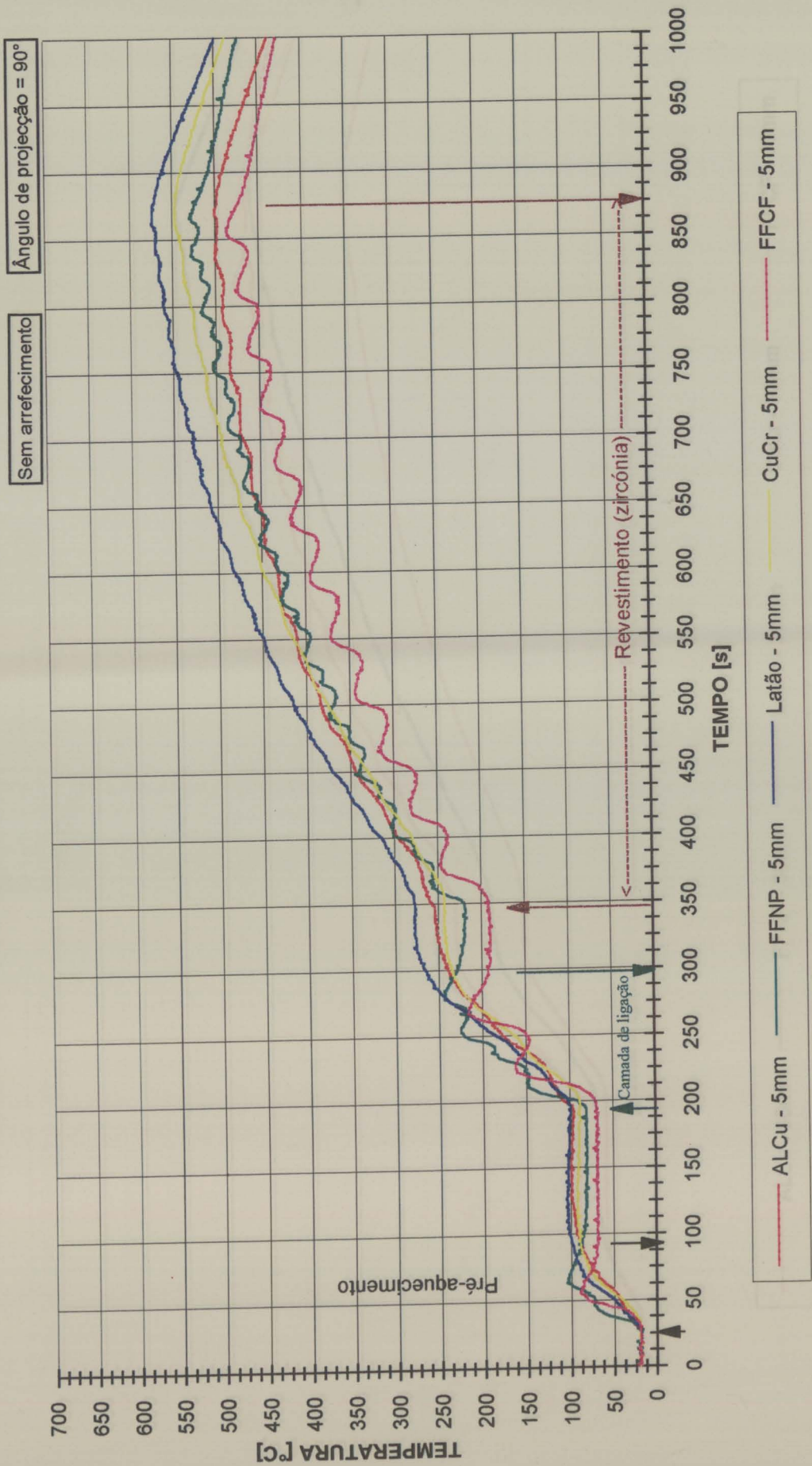


Gráfico 18 - Evolução das temperaturas a 30 mm da superfície dos provetes na 2ª projecção.

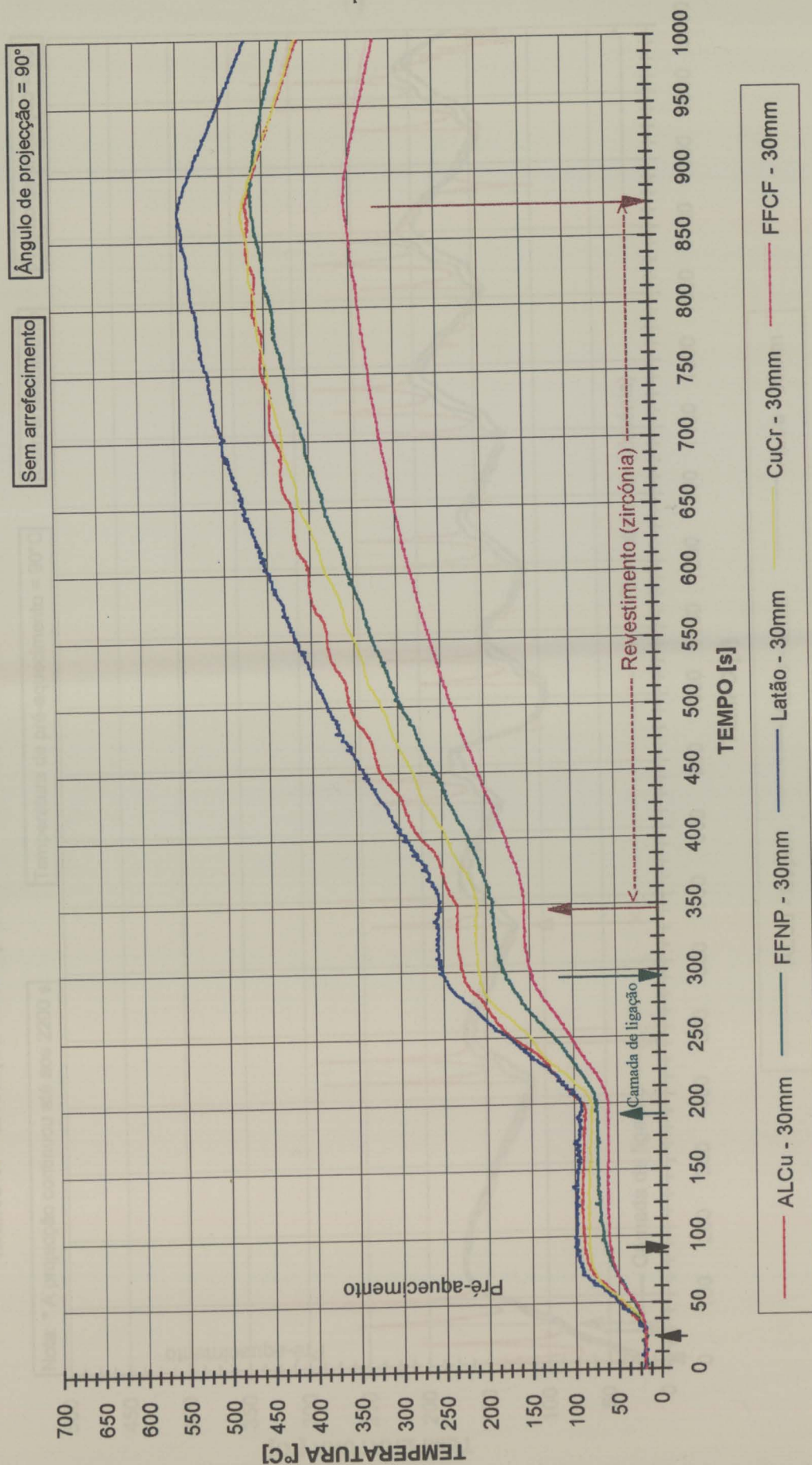


Gráfico 19 - Evolução das temperaturas em várias profundidades dum provete de duralumínio na 3ª projecção.

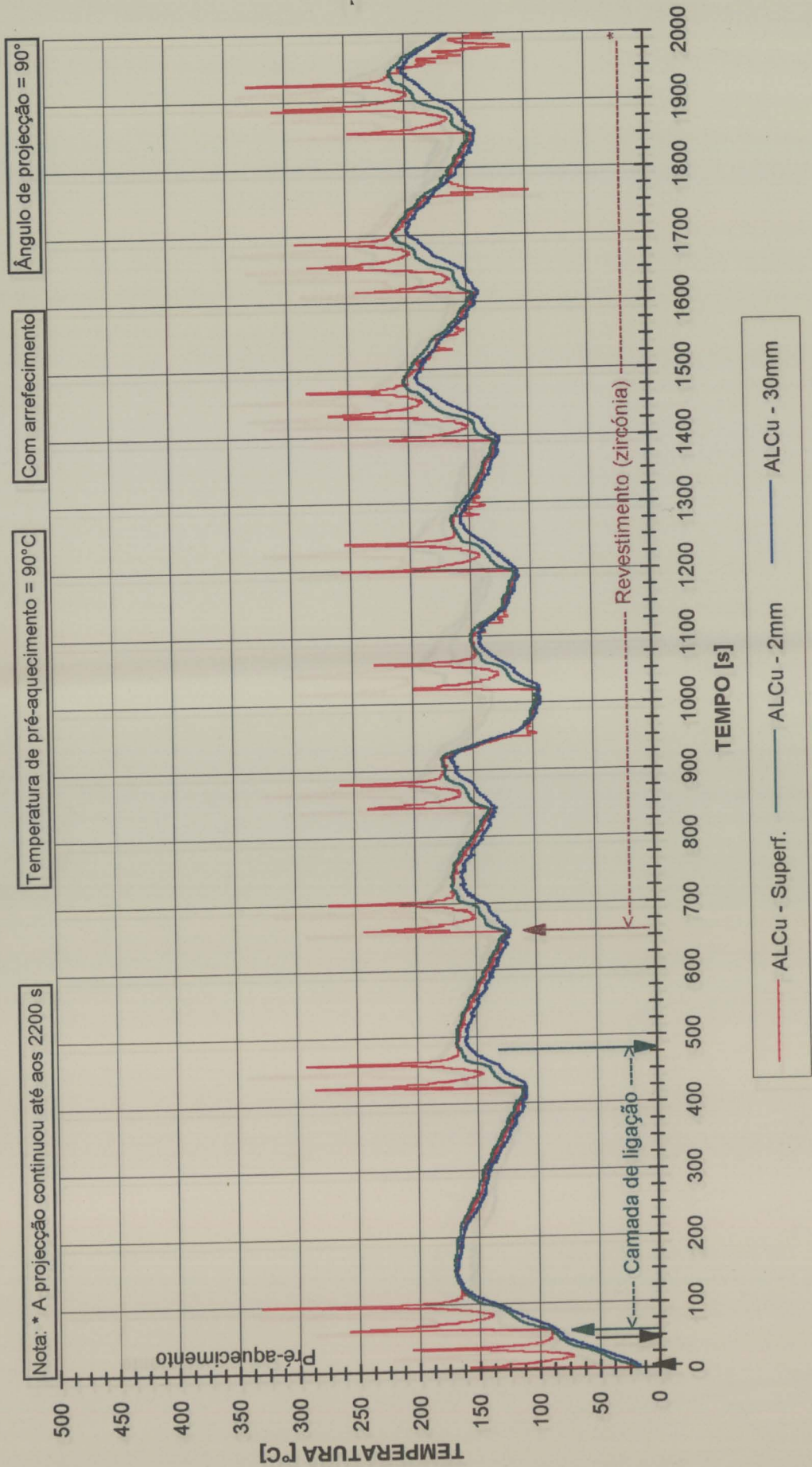


Gráfico 20 - Temperaturas em várias profundidades dum provete de ferro fundido nodular perlítico na 3ªproj.

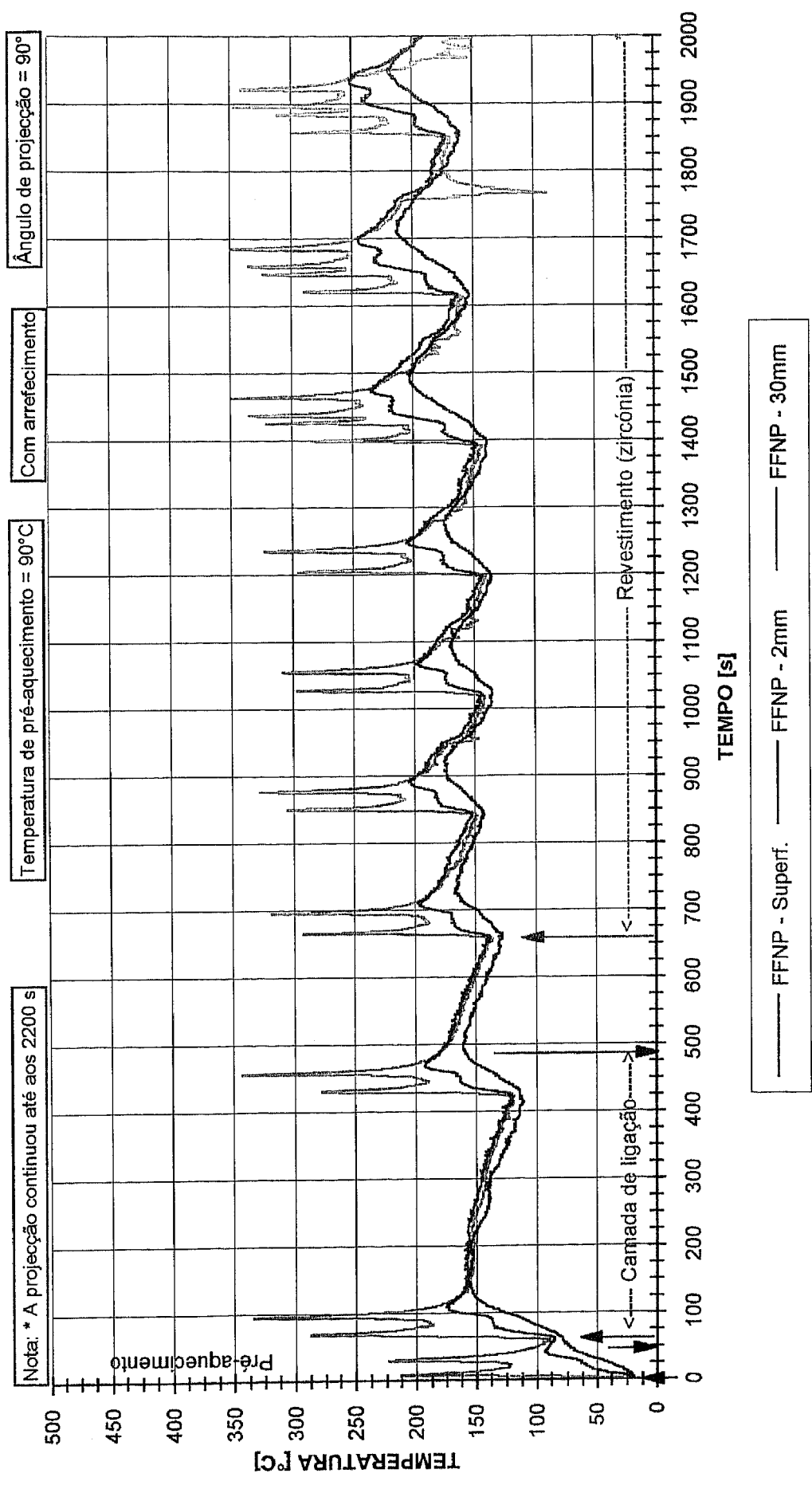


Gráfico 21 - Evolução das temperaturas em várias profundidades dum provete de latão na 3ª projecção.

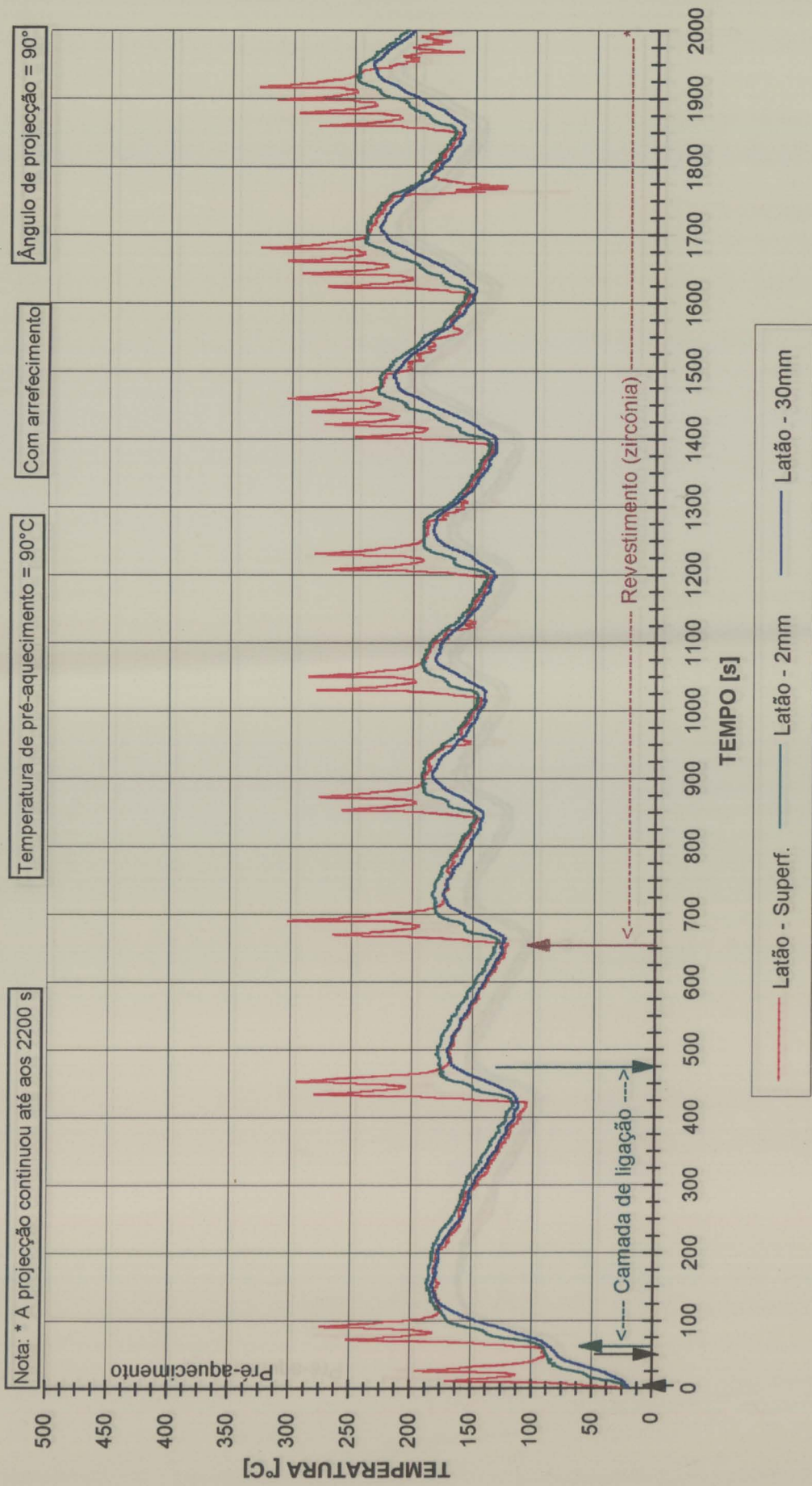


Gráfico 22 - Evolução das temperaturas em várias profundidades num provete de cuprocromo na 3ª projecção.

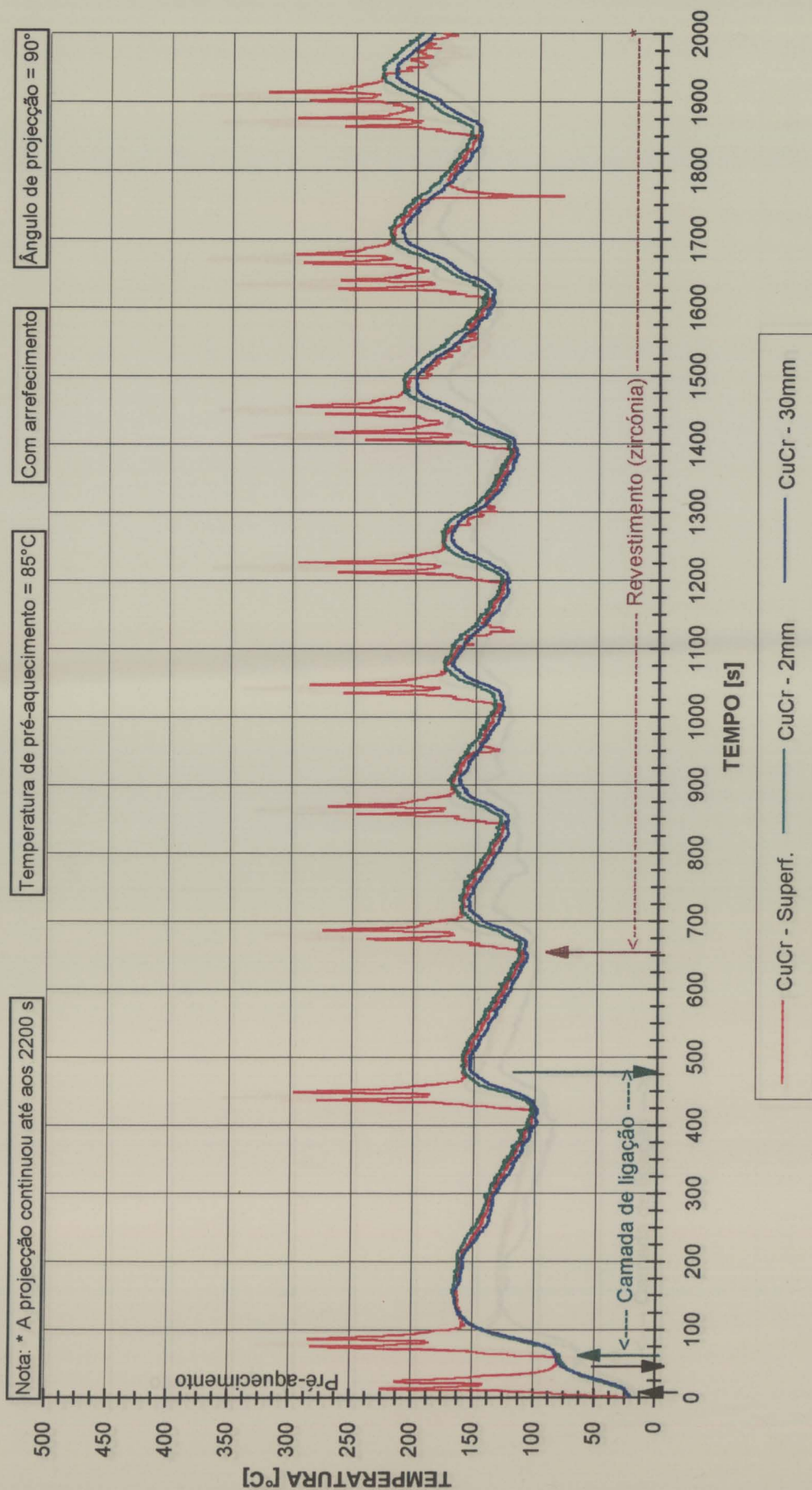


Gráfico 23 - Temperaturas em várias profundidades dum provete de ferro fundido cinzento ferrítico na 3ªproj.

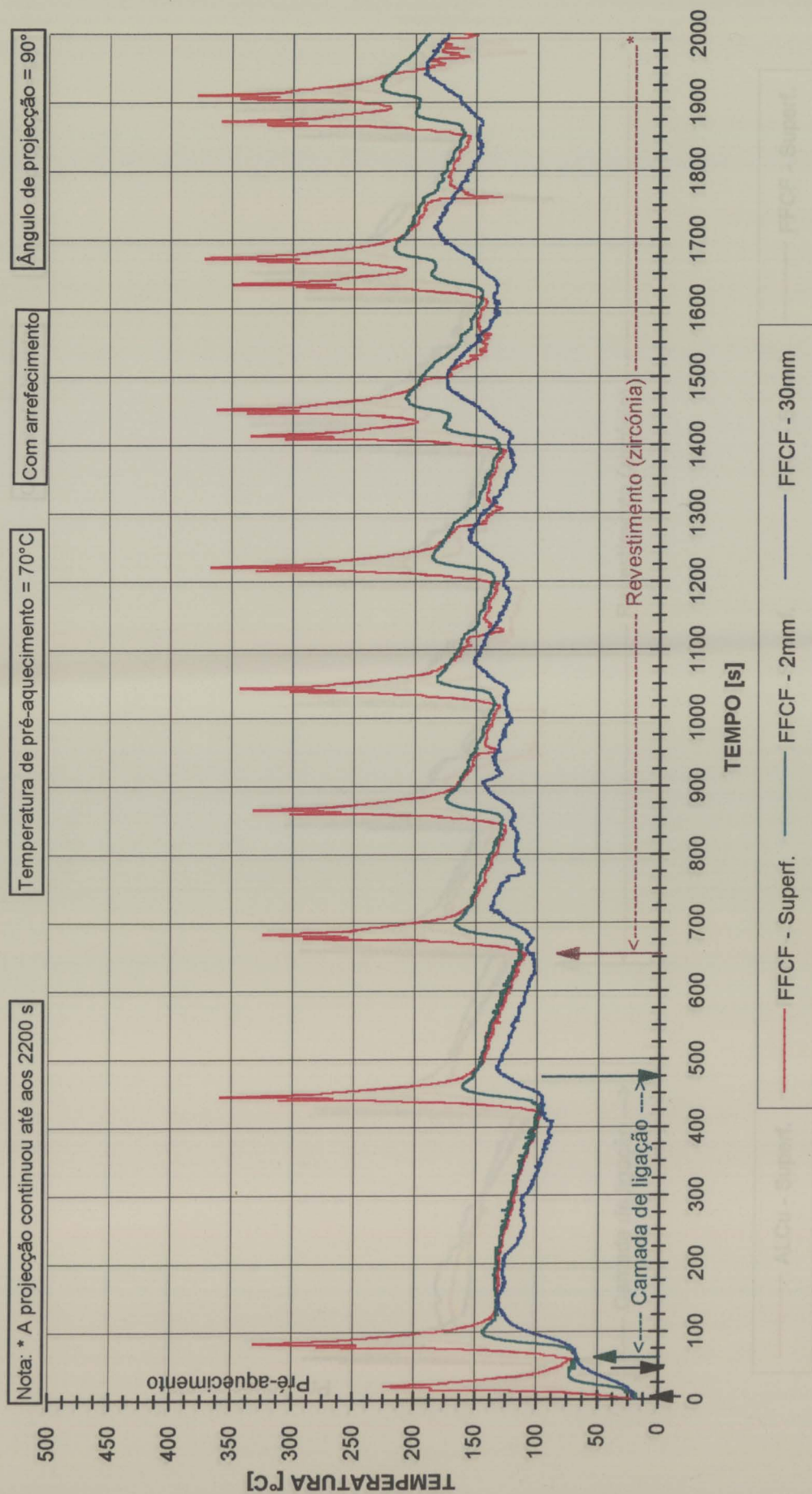


Gráfico 24 - Evolução das temperaturas na superfície dos provetes na 3ª projecção.

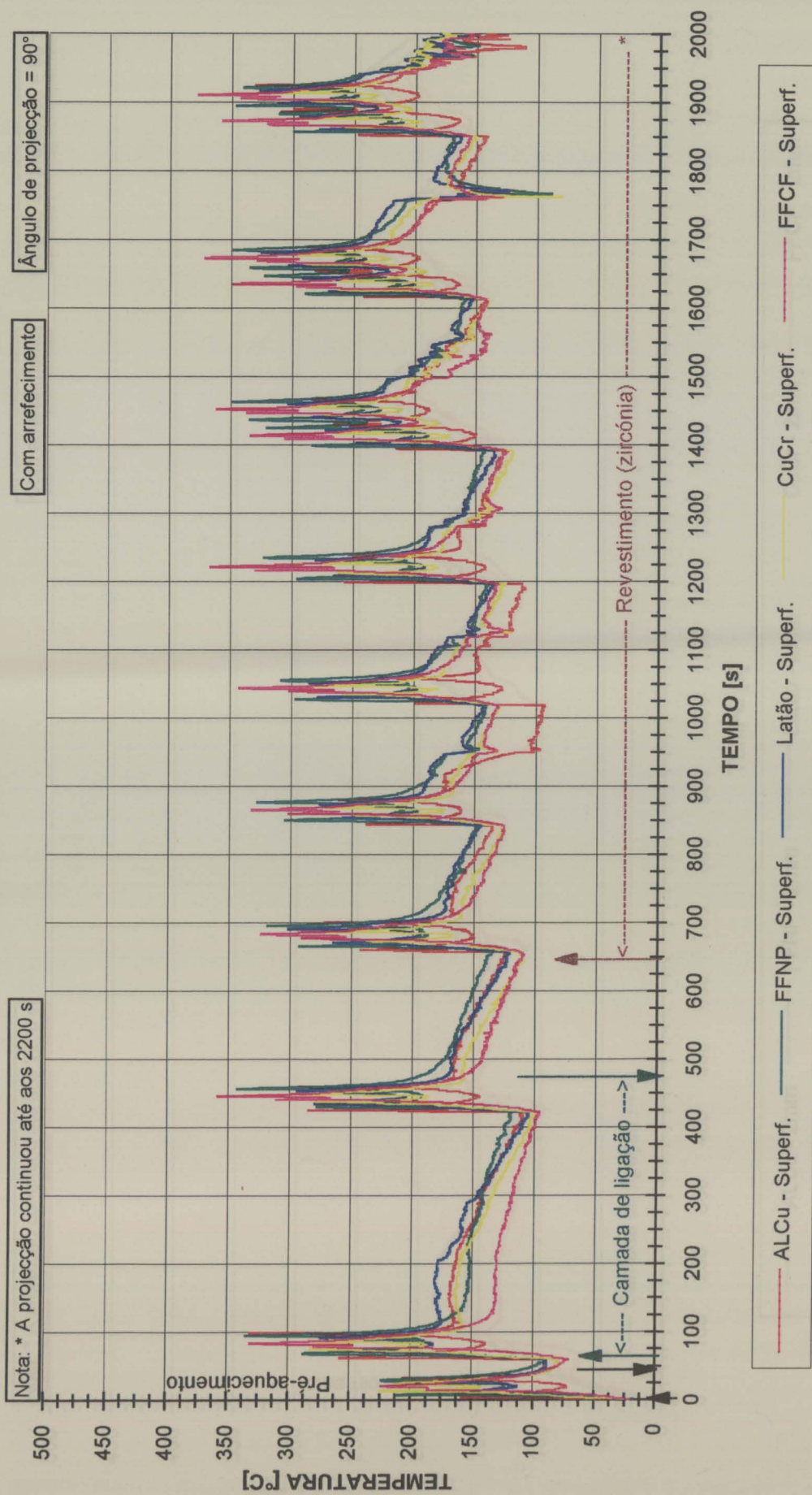


Gráfico 25 - Evolução das temperaturas a 2 mm da superfície dos provetes na 3ª projecção.

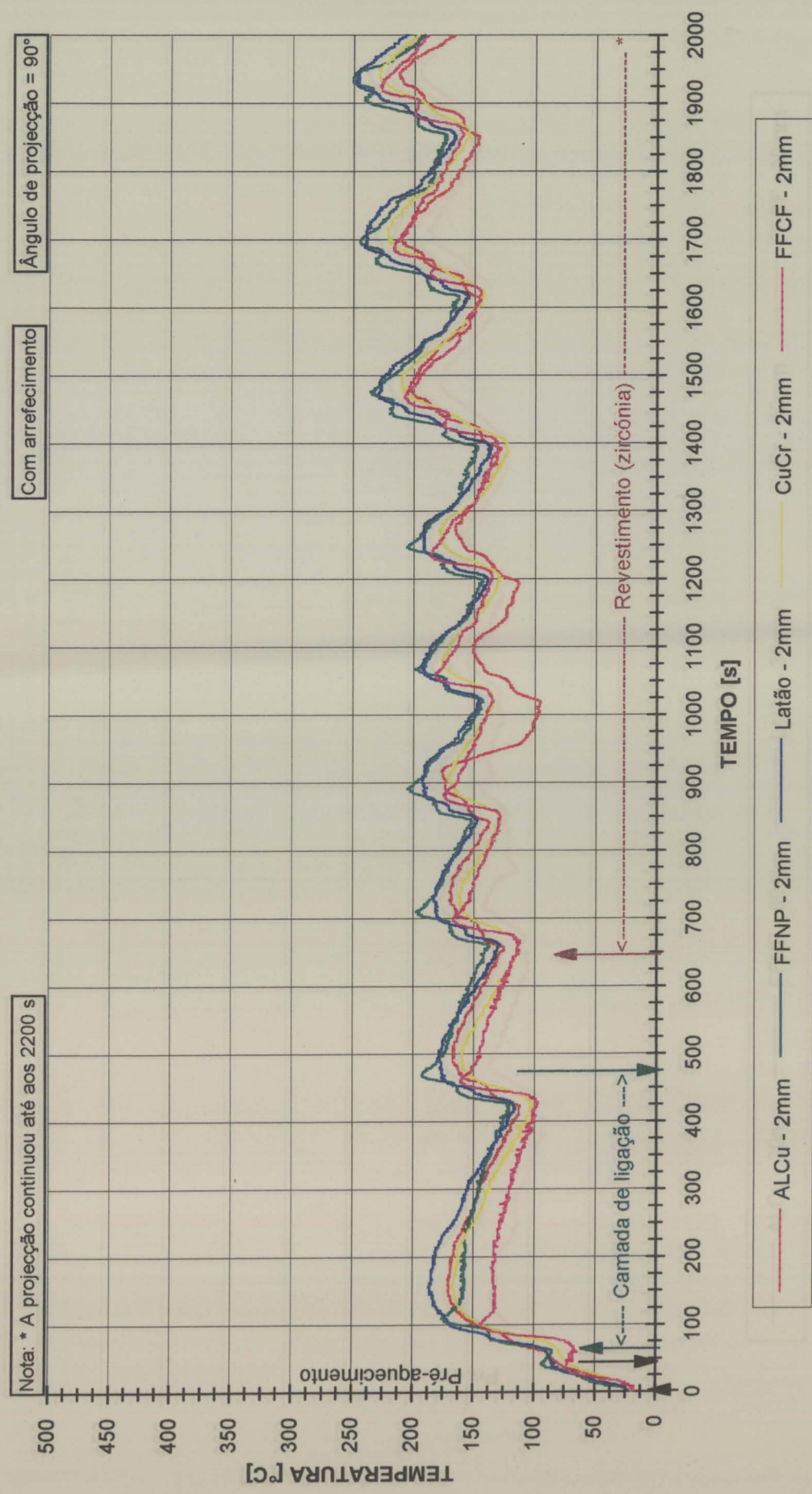


Gráfico 26 - Evolução das temperaturas a 30 mm da superfície dos provetes na 3ª projecção.

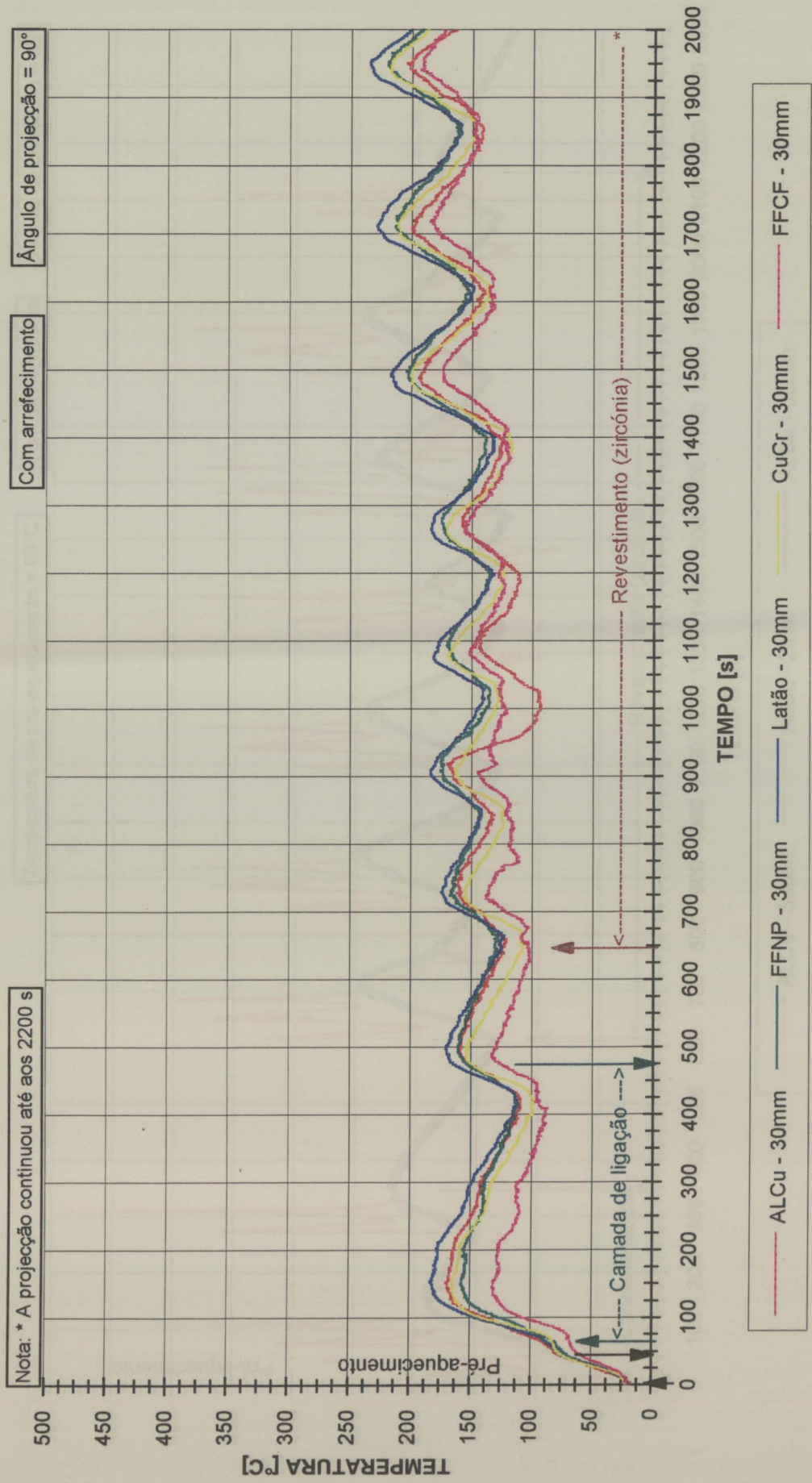


Gráfico 27 - Evolução das temperaturas em várias profundidades dum provete de duralumínio na 4ª projecção.

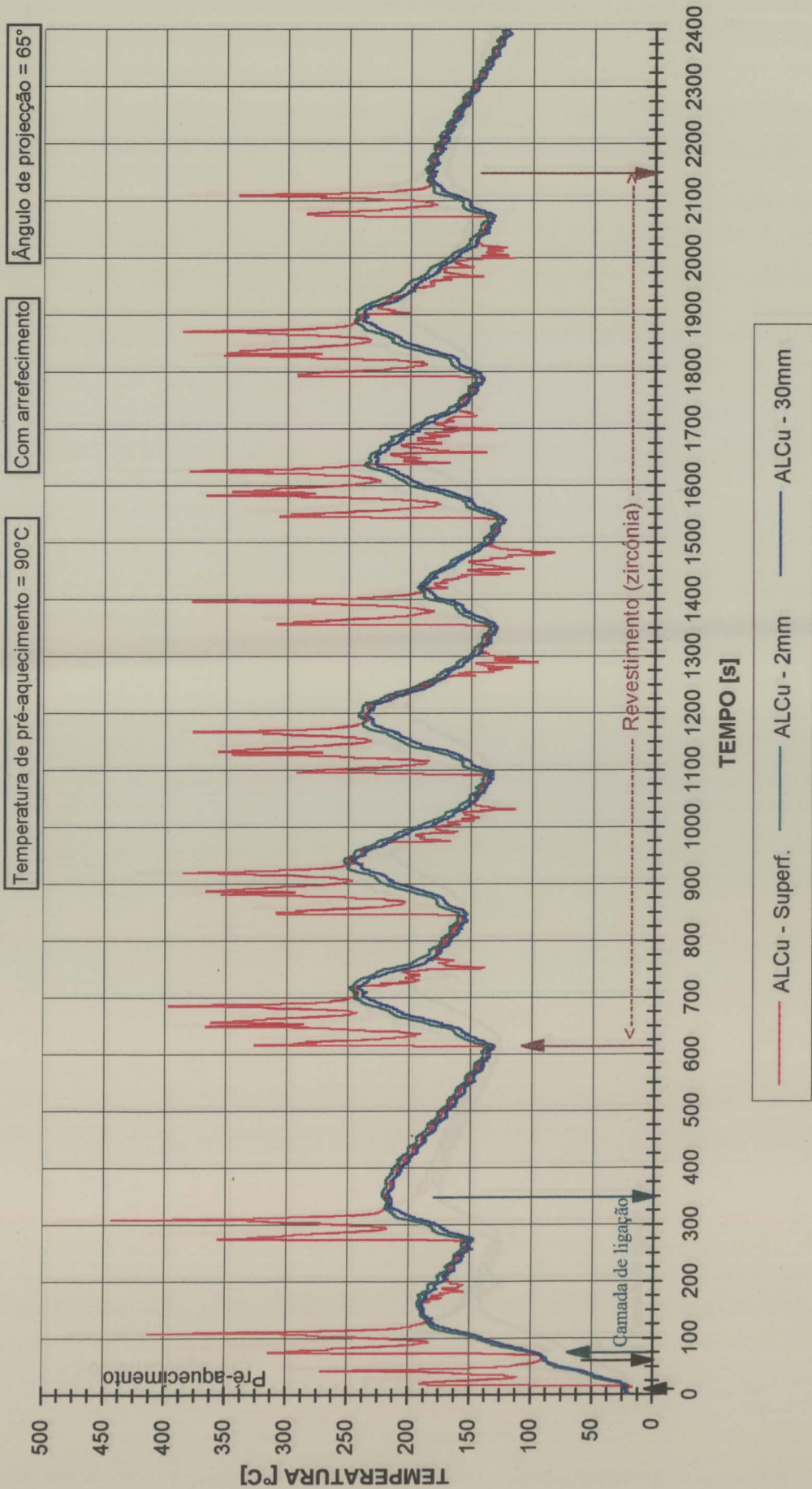


Gráfico 28 - Temperaturas em várias profundidades dum provete de ferro fundido nodular perlítico na 4ªproj.

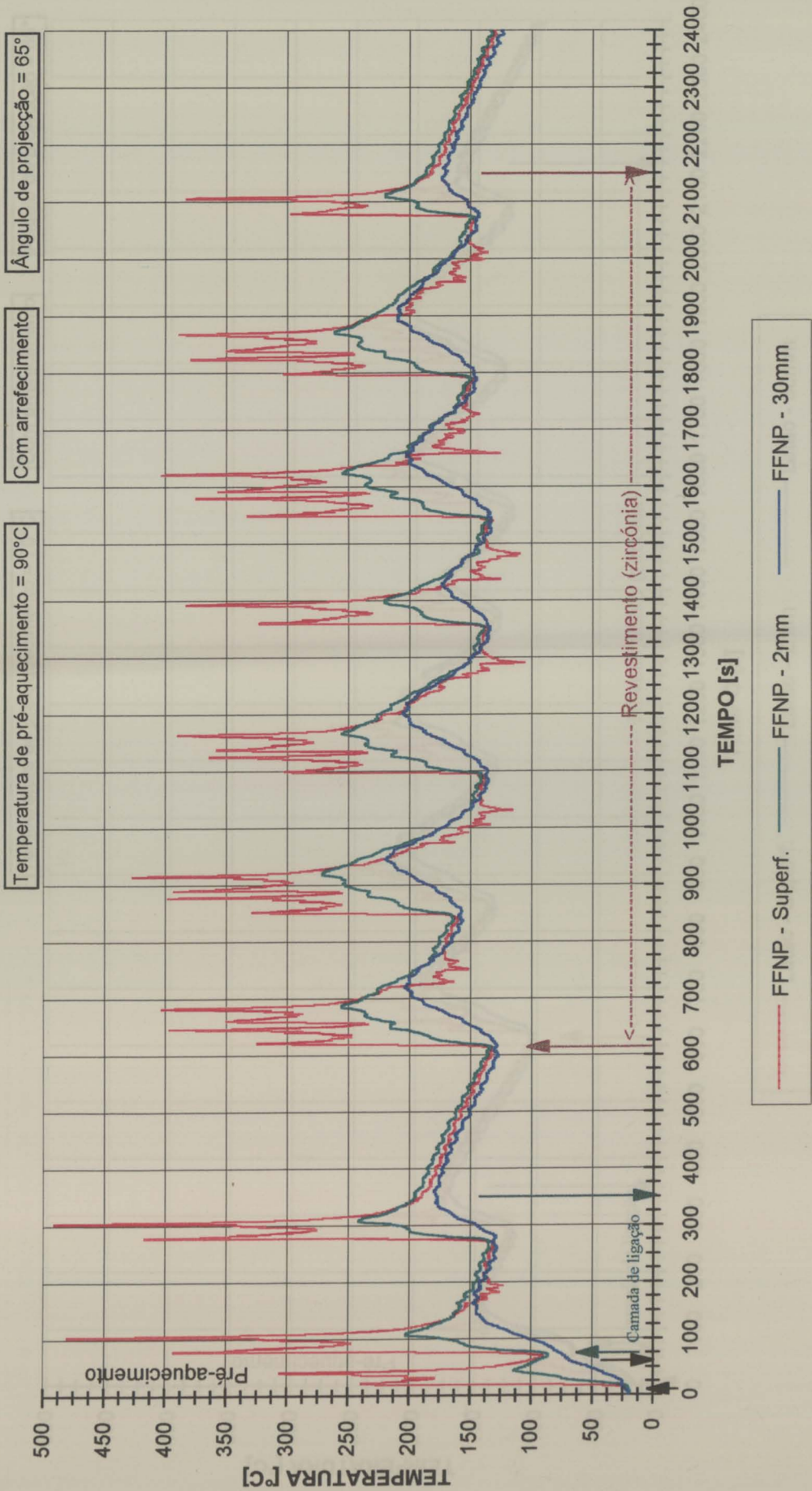


Gráfico 29 - Evolução das temperaturas em várias profundidades dum provete de latão na 4ª projecção.

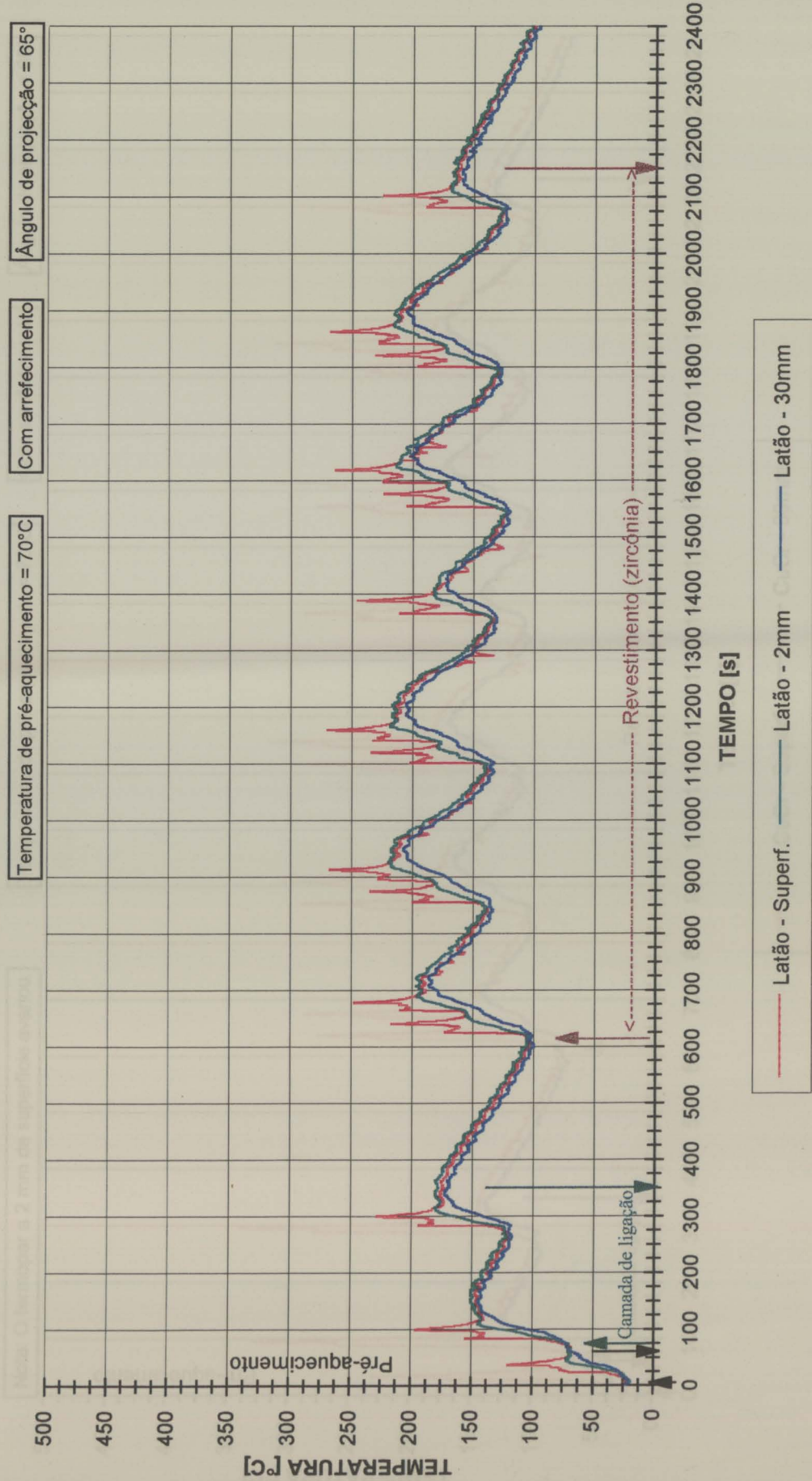


Gráfico 30 - Evolução das temperaturas em várias profundidades dum provete de cuprocromo na 4ª projecção.

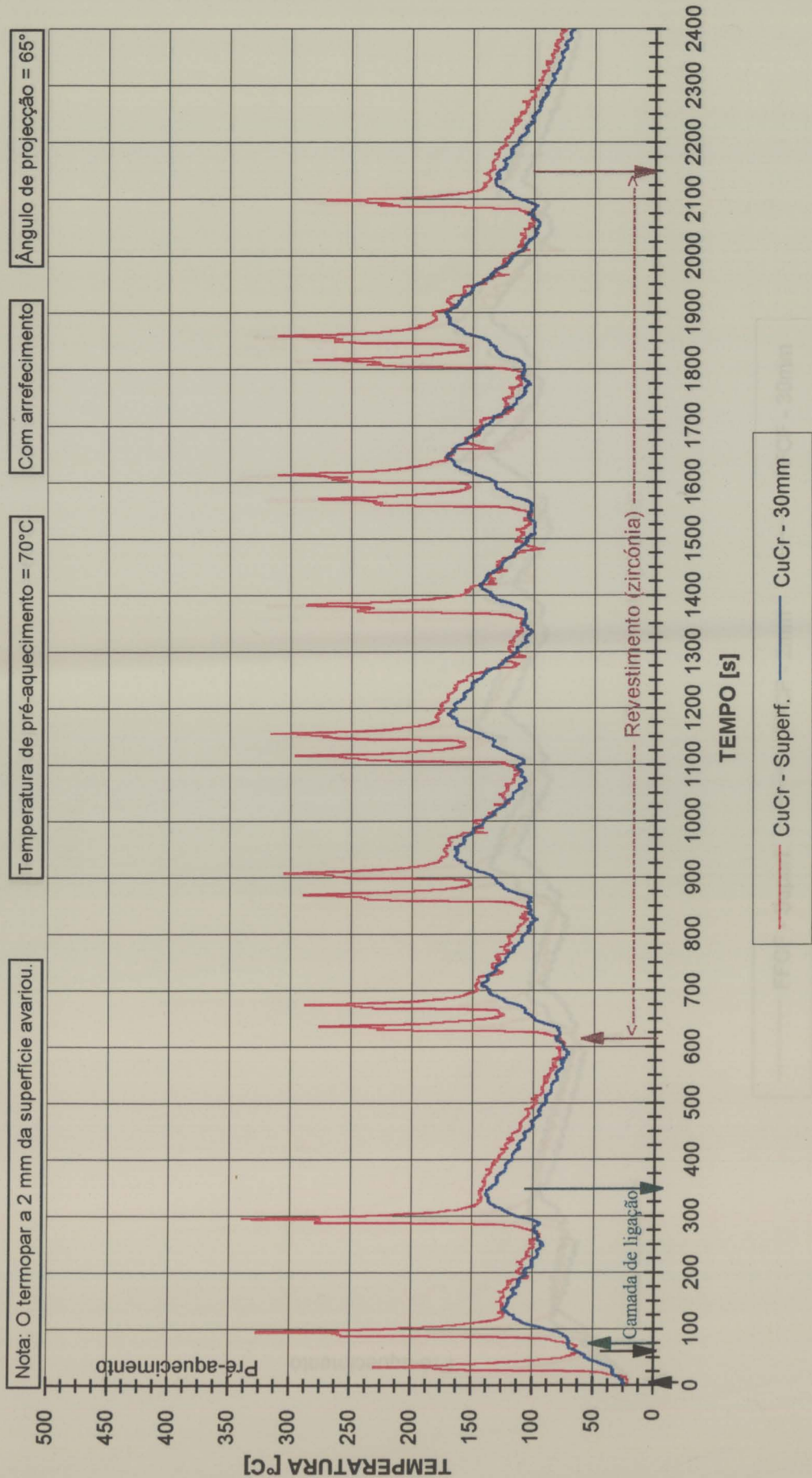


Gráfico 31 - Temperaturas em várias profundidades dum provete de ferro fundido cinzento ferrítico na 4ªproj.

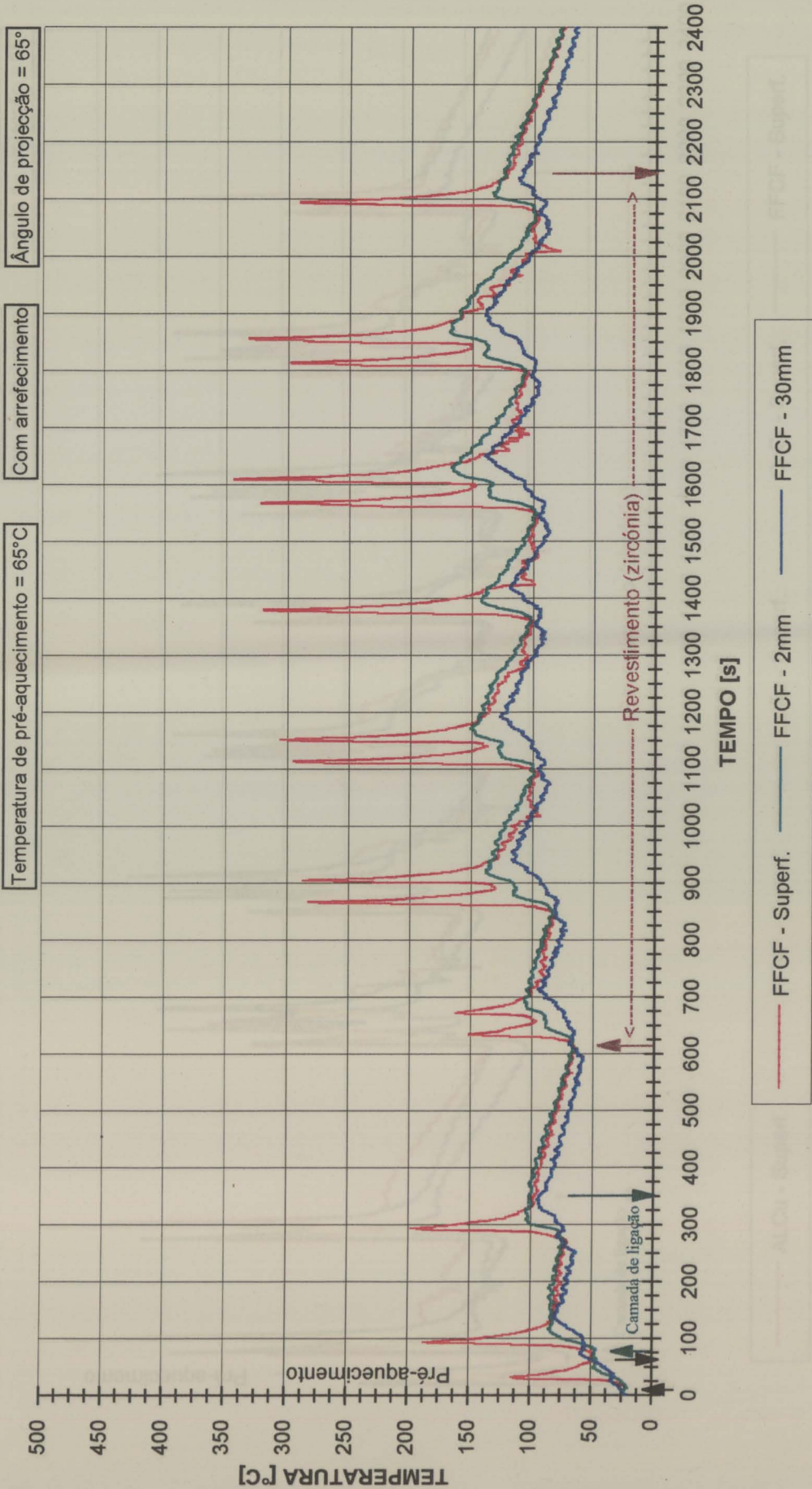


Gráfico 32 - Evolução das temperaturas na superfície dos provetes na 4ª projecção.

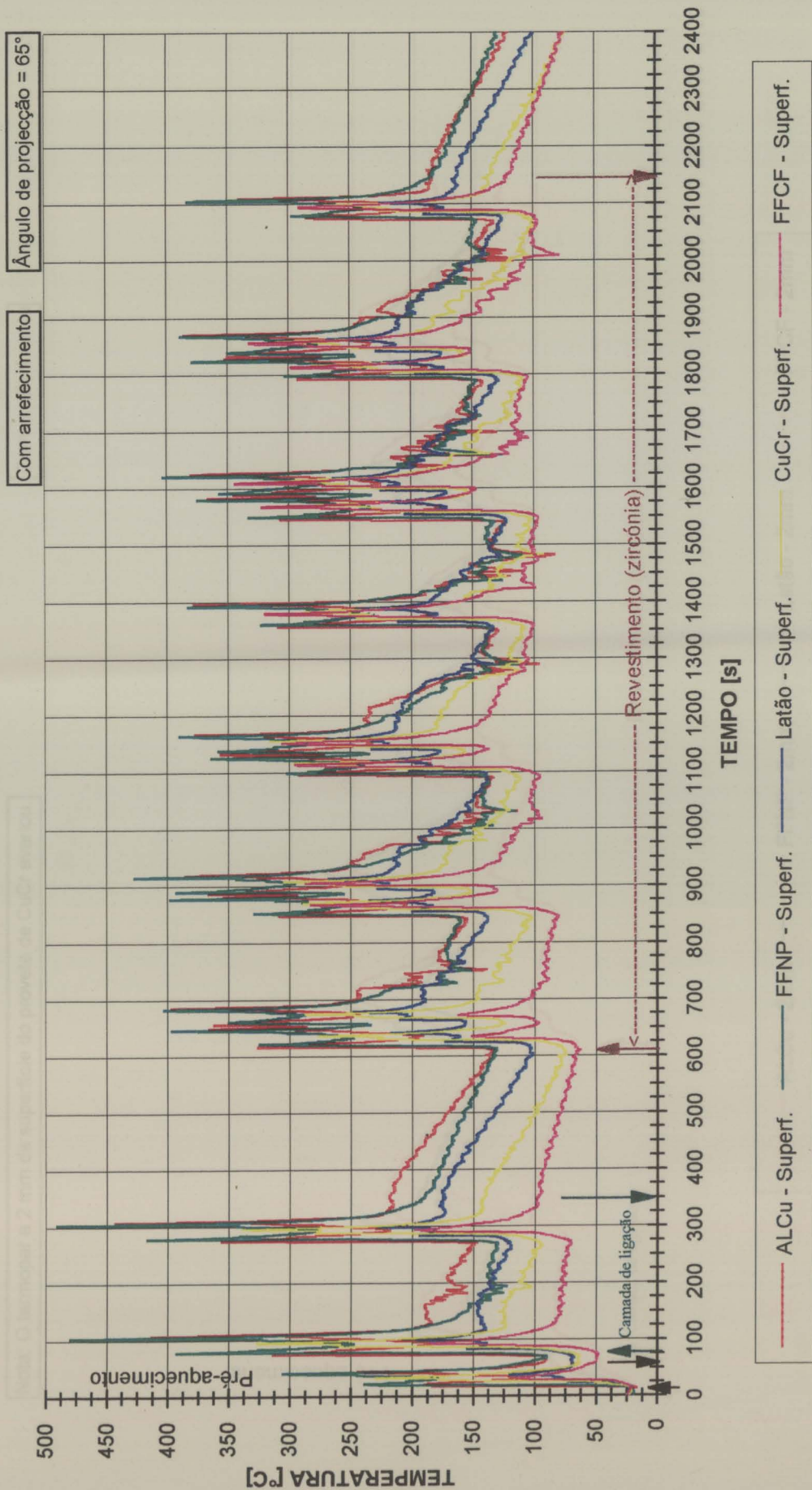


Gráfico 33 - Evolução das temperaturas a 2 mm da superfície dos provetes na 4ª projecção.

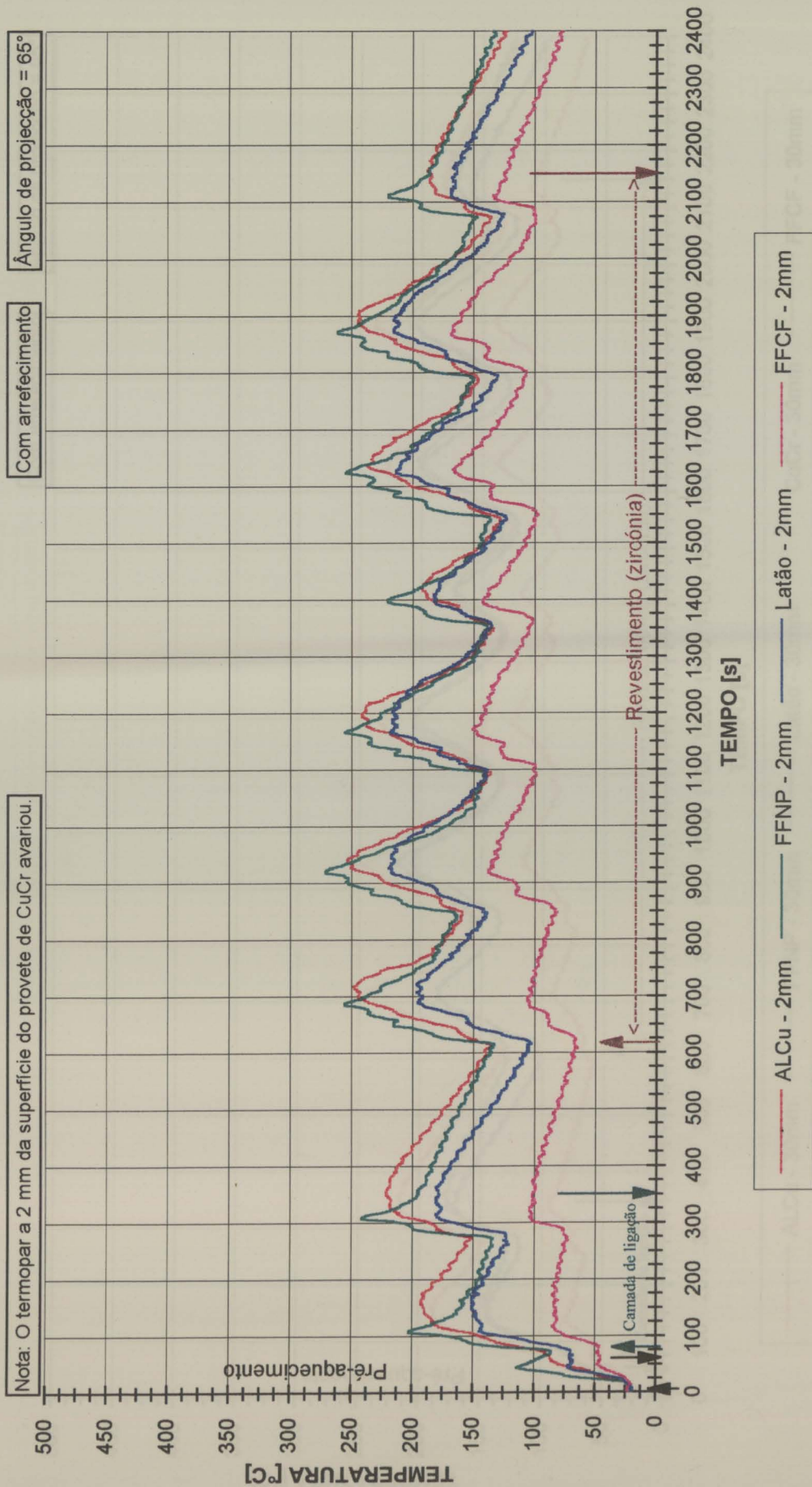


Gráfico 34 - Evolução das temperaturas a 30 mm da superfície dos provetes na 4ª projecção.

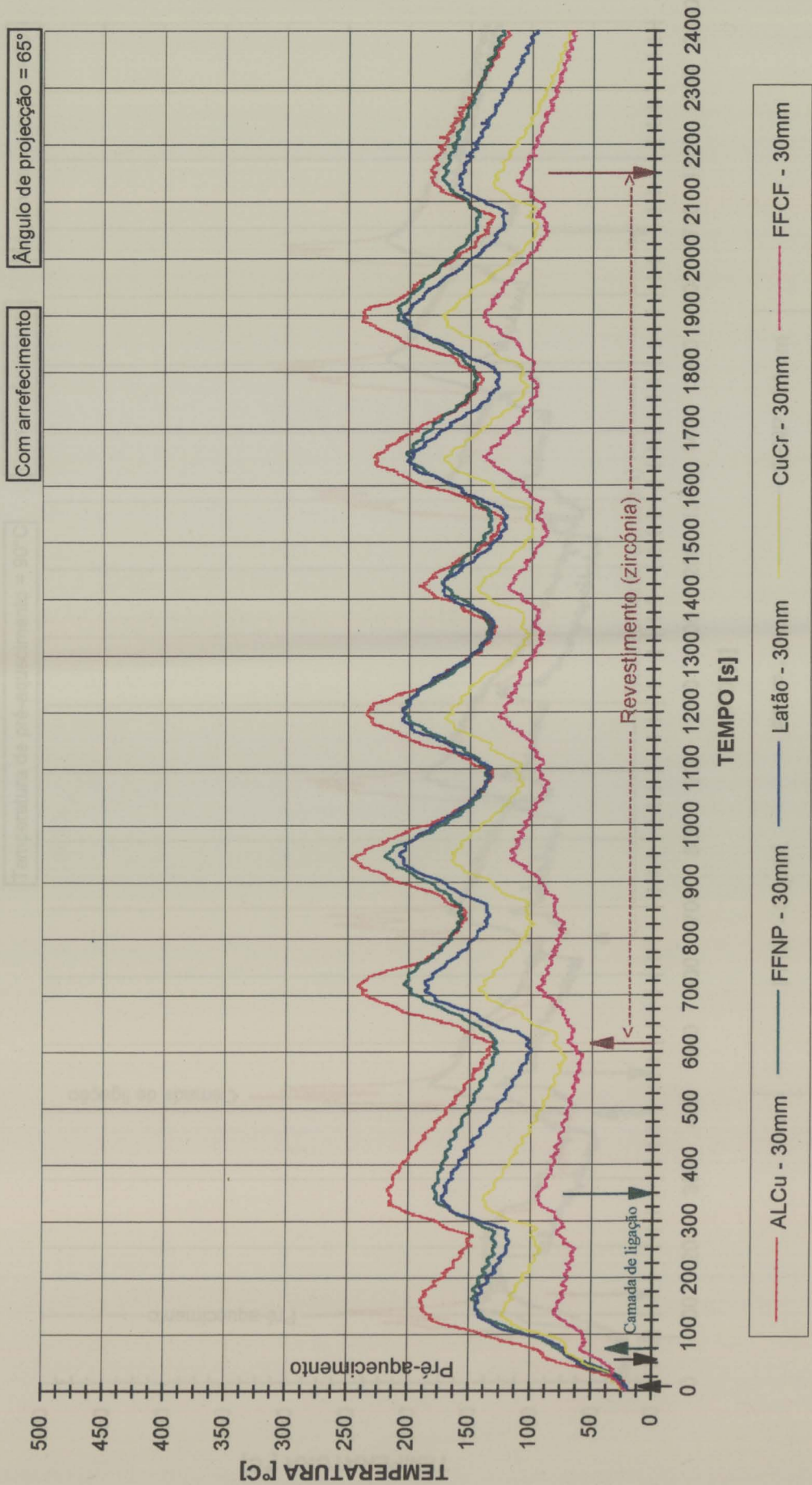
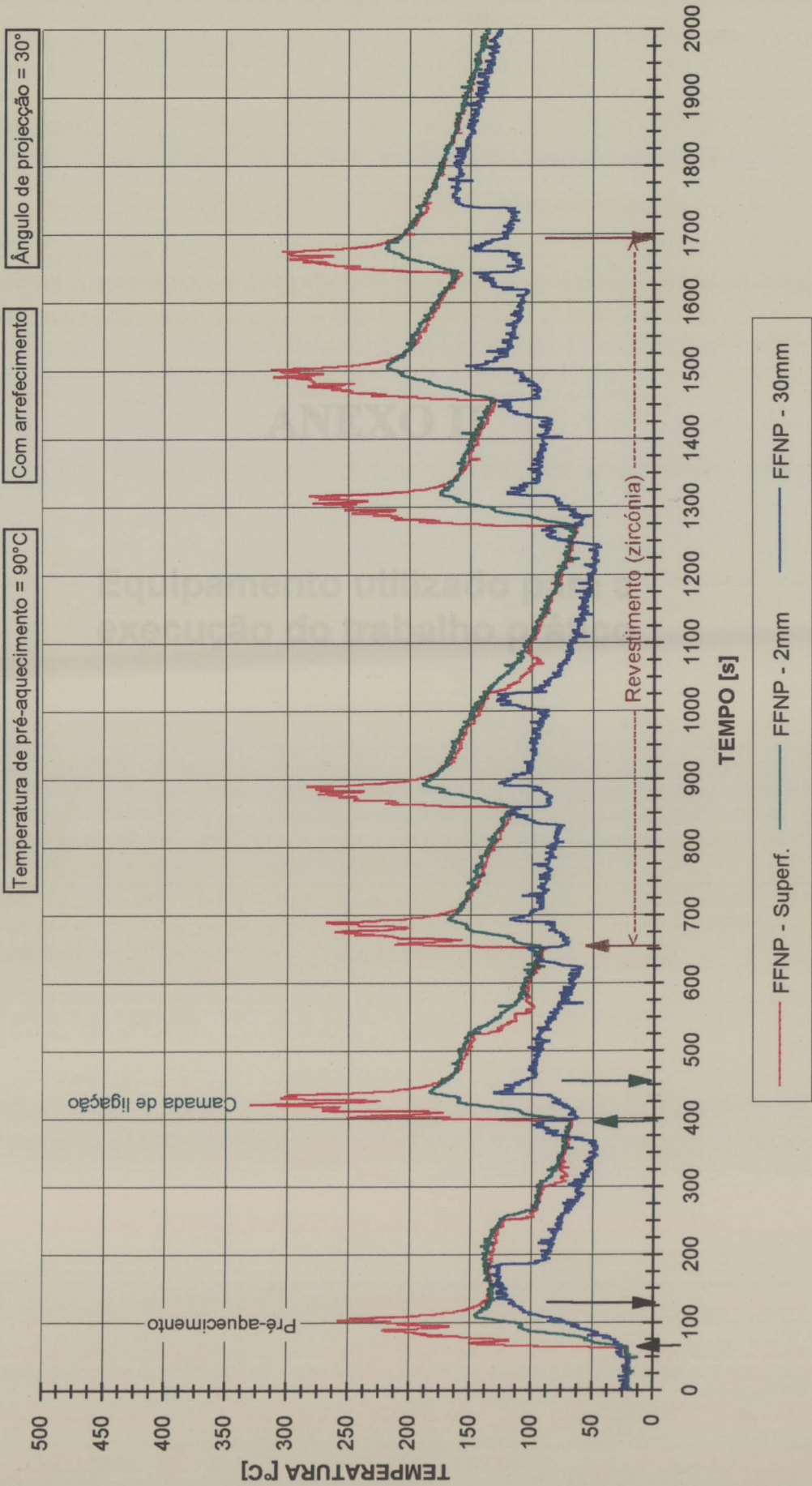


Gráfico 35 - Temperaturas em várias profundidades dum provete de ferro fundido nodular perlítico na 5ªproj.



ANEXO II

**Equipamento utilizado para a
execução do trabalho prático**

- 1 - Robô de projecção térmica METCO Type AR 2000 (marca Mitsubishi) de construção articulada com 6 eixos de rotação, accionados por servo motores de corrente contínua. Com uma capacidade de carga de 25 Kg e uma repetibilidade de $\pm 0,2$ mm.
- 2 - Consola de controle dos gases e pós METCO EGC (programming unit).
- 3 - Cabine de grenalhagem por jacto abrasivo (grenalha de corindon) com possibilidade de regulação da pressão, distância e ângulo de projecção (Cesário Santos).
- 4 - Máquina de tracção TINIUS OLSEN (força máxima de 12000 Kg).
- 5 - Equipamento de polimento automático de amostras da marca Struers, modelo Pedemax 2, com os respectivos acessórios.
- 6 - Microscópio óptico metalográfico (marca Olympus), com um acessório para medição de espessuras.
- 7 - Máquina de montar amostras no vácuo (Struers EPOVAC).
- 8 - Serra circular refrigerada a água com óleo (Struers Exotom).
- 9 - Balança electrónica de precisão da marca AND (máximo=2100 g ; precisão=0,01 g).
- 10 - Computador 486DX com placa de aquisição de dados (temperaturas dos termopares).
- 11 - Secador de amostras (Struers Drybox-2).
- 12 - Medidor de espessuras por um método não destrutivo (marca ELEKTRO-PHYSIC ; Minitest 4000 e Miniprint 4000).
- 13 - Tina de ultra-sons (Sonorex Bandelin RK 106 S).
- 14 - Máquina de medir durezas (EMCO M4U-075-Test automatic).
- 15 - Pirómetro de contacto (Technoterm 9500: máximo de 1100°C e precisão de 0,1°C).

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mahood, E. R.
Marantz, R. D.
Haves, E. "Thermal Spraying - Practice, Theory, and Application", pág. 1 à 91.
- [2] Hammad, I. "Robotic Arc Spray", Thermal Spray Research and Applications, Proceedings of the Third National Thermal Spray Conference, Long Beach, CA, USA, 20 a 25 Maio de 1990, pág. 651 à 653.
- [3] Clare, J. H.
Crawmer, D. E. "Thermal Spray Coatings", Metals Handbook, vol. 5 - Surface cleaning, Finishing and Coating, ASM, 9ª edição, 1987, pág. 361 à 374.
- [4] Duarte, M. T. "Estudo de um processo não convencional para o fabrico de coquilhas", Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, 1992, pág. 1 à 59.
- [5] Ducos, M. "Revêtements par projection thermique", Techniques de l'ingénieur, 1989, pág. M1645-1 à M1645-23.
- [6] Ingham, H. S. "Flame spray handbook - Formerly Metallizing Handbook", vol II - Powder process, METCO Inc., 2ª edição, 1964, pág. 1 à 31.
- [7] C 633-79 "Standard Test Method for Adhesion or Cohesive Strength of Flame Sprayed Coatings", C 633-79, 1989 Annual book of ASTM standards - Section 2, Non ferrous products, volume 2.05, Metallic and inorganic coatings, metal powders, sintered P/M structural parts, pág. 633 à 667.
- [8] "Technical Bulletin - Flame Spray Equipment and Supplies", METCO 447NS, METCO 201NS e METCO 105NS, 1982.
- [9] "Minitest 4000 and Miniprint 4000 - Operating Instructions", Coating Thickness Gauges and Data Printer, ELEKTRO-PHYSIK® - Köln.
- [10] ASM Handbook Committee "Metals Handbook", vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special - Purpose Materials, ASM, 10ª edição, 1990, pág. 175 à 207.

- [11] AMPCO METAL "Boletim técnico do material AMPCO 97", Ampco Metal Portugal Lda, 1994.
- [12] ASM Handbook Committee "Metals Handbook", vol. 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys, ASM, 10ª edição, 1990, pág. 244 à 247.
- [13] Taylor, T. A. "Ceramic Coating", Metals Handbook, vol. 5 - Surface cleaning, Finishing and Coating, ASM, 9ª edição, 1987, pág. 532 à 547.
- [14] Shimizu, Y
Sato, M.
Kobayashi, M.
Ikeda, T. "Applicability of thermally sprayed zircónia coatings to casting mold dressings", Thermal Spray Research and Applications, Proceedings of the Third National Thermal Spray Conference, Long Beach, CA, USA, 20 a 25 Maio de 1990, ASM Internacional, pág. 521 à 653.
- [15] Lucchese, P.
Salin, F. J:
Blot, J.
Castagnos, J. "Optimization of robotic trajectories in the atmosphere and temperature controlled plasma spray process on ceramic substrate using heat flow modelling", Thermal Spray Coating, Proceedings of the 5th National Thermal Spray Conference, Anaheim, CA, USA, 7 a 11 Junho de 1993, ASM Internacional, pág. 231 à 239.
- [16] Capello, E. "Tecnologia de la Fundicion", Editorial Gustavo Gili, S. A., Terceira tirada, Barcelona, 1974, pág. 127 à 199.
- [17] Ingham, H. S.
Shepard, A. P. "Flame spray handbook", vol. 1 - Wire process, METCO Inc., 1964, pág. A-1 à A-90.
- [18] Munjone, W. F.
Irons, G. "The evolution of thermal spray automation", Thermal Spray Coating, Proceedings of the 5th National Thermal Spray Conference, Anaheim, CA, USA, 7 a 11 Junho de 1993, ASM Internacional, pág. 263 à 273.
- [19] "Thermal spray coatings", Advanced Surface Coatings, techtrends, 1989, pág. 3 à 41.
- [20] Nusum, C. "Applications in Thermal Spraying", Thermal Spray Technology New Ideas and Processes, Proceedings of the National Thermal Spray Conference, Cincinnati, Ohio, USA, ASM Internacional, 24 a 27 Outubro de 1988, pág. 449 à 454.

- [21] McHugh, B. "Automatic Blast Finishing - A controlled process for surface preparation", Thermal Spray Research and Applications, Proceedings of the Third National Thermal Spray Conference, Long Beach, CA, USA, 20 a 25 Maio de 1990, pág. 253 à 257.

- [22] Hoel, H. R.
Kvernes, I. "The Microstruture of Thermal Barrier Coatings", Thermal Spray Advanced in Coating Technology, Proceedings of the National Thermal Spray Conference, Orlando, Florida, USA, ASM International, 14 a 17 de Setembro de 1987, pág. 291 à 296.

- [23] Fasching, M. M.
Prinz, B. F.
Weiss, E. L. "Planning Robotic Trajectories for Thermal Spray Shape Deposition", Journal of Thermal Spray, Volume 2(1), ASM International, Março de 1993, pág. 45 à 50.

- [24] Steffens, D. H.
Babiak, Z.
Brandl, W. "Thermal Barrier Coatings: Some Aspects of Properties Design", Thermal Spray Coatings, Properties, Process and Applications, Proceedings of the Fourth National Thermal Spray Conference, Pittsburgh, PA, USA, ASM Internacional, 4 a 10 de Maio de 1991, pág. 289 à 294.

- [25] Oswecki, C. E. "Quality essentials - Control of thermal spray coatings", Thermal Spray Research and Applications, Proceedings of the Third National Thermal Spray Conference, Long Beach, CA, USA, 20 a 25 Maio de 1990, pág. 109 à 112.

- [26] Proner, R. "Décapage mécanique par grenaillage", Techniques de l'ingénieur, 1989, pág. M1494-1 à M1494-19.

- [27] Crawmer, E. D.
Bartoe, L. R.
Winkle Van J. "Utilization of automated, wire flame spray to produce second surface reflectors", Thermal Spray Advanced in Coating Technology, Proceedings of the National Thermal Spray Conference, Orlando, Florida, USA, ASM International, 14 a 17 de Setembro de 1987, pág. 85 à 92.

- [28] Weiss, E. L.
Prinz, B. F.
Adams, A. D.
Siewiorek, P. D. "Thermal Spray Shape Deposition", Journal of Thermal Spray, Volume 1(3), ASM International, Setembro de 1992, pág. 231 à 237.

- [29] Longo, N. F. "Industrial guide - Markets, Materials and Applications for Thermal Sprayed Coatings", Journal of Thermal Spray, Volume 1(2), ASM International, Junho de 1992, pág. 143 à 145.
- [30] Ingham Jr., H. S. "Adhesion of Flame-Sprayed Coatings", Adhesion measurements of thin films and bulk coatings, ASTM SPT 640, 1976, pág. 285 à 292.
- [31] Fasching, M. M.
Weiss, E. L.
Printz, B. F. "Optimization of robotic trajectories for thermal spray shape deposition", Thermal Spray: International Advanced in Coating Technology, Proceedings of the International Thermal Spray Conference, Orlando, Florida, USA, ASM International, 28 de Maio a 5 de Junho de 1992, pág. 221 à 226.
- [32] Berndt, C. C. "The need for standardization of testing techniques in the thermal spray industry", Thermal Spray Research and Applications, Proceedings of the Third National Thermal Spray Conference, Long Beach, CA, USA, 20 a 25 Maio de 1990, pág. 325 à 330.
- [33] Saenz, A. J. "Automated powder mass flow monitoring and control", Thermal Spray Advanced in Coating Technology, Proceedings of the National Thermal Spray Conference, Orlando, Florida, USA, ASM International, 14 a 17 de Setembro de 1987, pág. 291 à 296.
- [34] Suga, Y.
Harjanto
Takahashi, J. "Study on the ultrasonic test for evaluating the adhesion of sprayed coatings to a substrate", Thermal Spray: International Advanced in Coating Technology, Proceedings of the International Thermal Spray Conference, Orlando, Florida, USA, ASM International, 28 de Maio a 5 de Junho de 1992, pág. 247 à 252.
- [35] Weidmann, E. "Metallographic Preparation of Coated Materials", Structure nº 10, Struers, Abril de 1985, pág. 1 a 9.
- [36] ASM Committee on
Ceramic Coating "Ceramic Coating", Metals Handbook, vol. 2 - Heat Treating, Cleaning and Finishing, ASM, 8ªedição, 1969, pág. 587 à 598.

- [37] Marantz, R. D.
Marantz, R. D. "State of the art arc spray technology", Thermal Spray Research and Applications, Proceedings of the Third National Thermal Spray Conference, Long Beach, CA, USA, 20 a 25 Maio de 1990, pág. 113 à 118.

- [38] ASM Handbook Committee "Metals Handbook", vol. 8, Metallography, Structures and Phase Diagrams, ASM, 8ª edição, 1973, pág. 260 à 265.

- [39] Han, W.
Rybicki, F. E.
Shadley, R. J. "Bond strength testing of thermal spray coatings using ASTM C633-79: Effect of specimen size on test results", Thermal Spray: International Advanced in Coating Technology, Proceedings of the International Thermal Spray Conference, Orlando, Florida, USA, ASM International, 28 de Maio a 5 de Junho de 1992, pág. 911 à 914.

- [40] Abram, R. K.
Bustamante, J.
Etzenhouser, D. R. "Automated metal spray applications", Thermal Spray Research and Applications, Proceedings of the Third National Thermal Spray Conference, Long Beach, CA, USA, 20 a 25 Maio de 1990, pág. 655 à 660.

- [41] Chuanxian, D.
Zhaohe, T. "Laboratory Report - Thermal Spraying at the Shanghai Institute of Ceramics", Journal of Thermal Spray, Volume 1(3), ASM International, Setembro de 1992, pág. 205 à 209.

- [42] Ruckert, M.
Wigren, J.
Svantesson, J. "Metallographic preparation of plasma sprayed ZrO_2 coatings, sprayed under varying conditions", Thermal Spray Research and Applications, Proceedings of the Third National Thermal Spray Conference, Long Beach, CA, USA, 20 a 25 Maio de 1990, pág. 291 à 296.

- [43] Fowler, D. B. "Inspecting Thermally Sprayed Coatings", Advanced Materials & Processes, nº 11, 1990, pág. 41 à 52.

- [44] "The preparation of porous materials", Structure nº 12, Struers, Março de 1986, pág. 14 à 17.

- [45] Stevens, R. "Zirconia and zirconia ceramics", Magnesium Elektron Ltd, Julho de 1986, pág. 1 a 51.