

Estudo Conducente à Melhoria de Alguns Parâmetros Controladores do Processo Produtivo da Ferespe-Fundição de Ferro e Aço, Lda



UFERESPE



Realizado por:
Rui Rezende

Orientadores:
Eng. Joaquim Santos – Ferespe
Eng. Luís Filipe Malheiros - FEUP

Porto e FEUP, 19 de Julho de 2000

669(047.3)
LEMM 1999/RESr



Estudo Conducente à Melhoria de Alguns Parâmetros Controladores do Processo Produtivo da Ferespe-Fundição de Ferro e Aço, Lda



FERESPE



Realizado por:
Rui Rezende

Orientadores:
Eng. Joaquim Santos – Ferespe
Eng. Luís Filipe Malheiros - FEUP

Porto e FEUP, 19 de Julho de 2000



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Social Europeu



Mais Educação

669(047.3)/LEHM 1999/RESA

Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
Biblioteca A
Nº <u>87333</u>
CDU <u> </u>
Data <u>23 / 04 / 2007</u>

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, que me acompanharam neste Estágio, Eng. Joaquim Santos, por parte da Ferespe, e ao Eng. Luís Filipe Malheiros, por parte da FEUP.

Quero agradecer ao Sr. Eng. Jorge Casais, na qualidade de administrador da Ferespe, por ter facultado a realização deste Estágio.

A todas as pessoas da Ferespe que se empenharam na realização deste Estágio.

Ao Eng. Silva Ribeiro e ao Eng. Costa e Silva pela disponibilidade demonstrada no esclarecimento de dúvidas.

Ao Demétrio, o meu agradecimento pela ajuda prestada.



Resumo

O Estágio realizado na Ferespe-Fundição de Ferro e Aço, Lda. teve duas vertentes distintas:

- Continuação do estudo dilatométrico, de aços produzidos na sua fundição, estudo este iniciado na disciplina de Seminário.
- Estudo e simulação de novo sistema de alimentação e gitagem numa família de peças que apresentavam rechupe interno.

✚ Estudo dilatométrico

No Estágio continuou a dar-se continuidade ao estudo dilatométrico de aços de baixa, média e alta liga.

Os resultados obtidos no Seminário e no Estágio permitiram uma actualização das temperaturas de estágio dos tratamentos térmicos efectuados na Ferespe. Para a sua realização foram dados os seguintes passos:

- Continuação do estudo dilatométrico iniciado no Seminário.
- Estabelecimento de duas temperaturas de estágio de tratamentos térmicos que pudessem englobar toda a família de aços produzida na Ferespe.
- Tratamentos térmicos efectuados nas temperaturas seleccionadas e posterior execução de ensaios mecânicos sobre provetes, confrontando os valores obtidos com os requeridos pelas normas ou especificações dos clientes, verificando a sua conformidade.

Para uma melhor utilização do dilatómetro elaborou-se um procedimento dos passos a efectuar num estudo dilatométrico. Com este procedimento, os estudos dilatométricos efectuados por vários operadores serão semelhantes, isto é, o resultado obtido para um dado ensaio será o mesmo independentemente de quem o efectuou.



Com o intuito de verificar se as propriedades mecânicas de peças tratadas termicamente no forno industrial iriam ser afectadas por possíveis variações de temperatura no seu interior, procedeu-se à determinação da influência dos gradientes térmicos em provetes. Para tal, foram colocados estrategicamente vários provetes no seu interior para tratamento térmico. Posteriormente foram sujeitos a ensaios mecânicos confrontando-se os resultados obtidos, permitindo, assim, adquirir conhecimento sobre a homogeneidade da temperatura no interior do forno.

✦ Estudo e simulação de um novo sistema de alimentação e gitagem

No planeamento deste Estágio verificou-se que o estudo dilatométrico não exigia uma carga horária que ocupasse o tempo disponível para a sua realização. Por esta razão, e com o intuito de preencher o tempo de forma útil, e de acordo com as necessidades da Ferespe, introduziu-se uma nova vertente no Estágio que foi o estudo de um novo sistema de alimentação e gitagem de uma família de peças que apresentavam rechupe interno.

O estudo do sistema de alimentação e gitagem obedeceu a um procedimento adoptado:

- Estudo da nova disposição do sistema de alimentação e gitagem e redimensionamento dos alimentadores.
- Modelação da peça, alimentadores e sistema de gitagem, recorrendo a um modelador de sólidos, Solid Works.
- Simulação da solidificação no software AFS.
- Confirmação dos dados obtidos no software AFS procedendo ao vazamento de peças protótipo com um novo sistema de alimentação e gitagem.
- Verificação da sanidade das peças recorrendo à inspecção radiográfica e/ou inspecção visual da peça após cortes efectuados essencialmente nas zonas correspondentes a pontos quentes.



Índice

1. Objectivo	4
2. Introdução	4
3. Fluxograma representativo das acções tomadas no Estágio	7
4. Estudo dilatométrico	8
4.1. Elaboração de um procedimento para os ensaios dilatométricos	8
4.2. Selecção de duas temperaturas de estágio de tratamento térmico	9
5. Determinação da influência dos gradientes térmicos existentes no forno industrial sobre as propriedades mecânicas	11
6. Estudo de um novo sistema de alimentação e gitagem de uma família de peças	12
6.1. Apresentação e discussão dos resultados	15
6.1.1. Peça 1	15
6.1.2. Peça 2	20
6.1.3. Peça 3	22
6.1.4. Vantagens e desvantagens do uso de alimentadores com camisa exotérmica	23
7. Conclusão	25
8. Bibliografia	26
9. Anexos	27



1. Objectivo

O Estágio, realizado na Ferespe-Fundição de Ferro e Aço Lda., teve por objectivo dois trabalhos distintos:

- Conclusão do estudo dilatométrico iniciado no Seminário, visando a optimização dos tratamentos térmicos realizados na sua fundição.
- Estudo de um novo sistema de alimentação e gitagem para uma família de peças produzidas na sua linha de fabrico, recorrendo ao software de simulação AFS.

A sua realização deveu-se ao facto de que o tempo dispendido por ambos permitia a sua execução dentro do tempo útil de Estágio. A realização de outro trabalho além do estudo dilatométrico permitiu um enriquecimento dos conhecimentos adquiridos.

2. Introdução

A dilatometria, como já foi referido na disciplina de Seminário, é uma técnica utilizada para determinar os pontos críticos de um material. Com o conhecimento dos pontos críticos pode-se estabelecer as temperaturas mais adequadas para os tratamentos térmicos desses materiais. O recurso a esta técnica permitiu optimizar as gamas de temperaturas de estágio dos tratamentos térmicos utilizados na Ferespe.

O dilatómetro, sendo um aparelho laboratorial a ser operado por mais do que um técnico, impôs-se a elaboração de um procedimento que permitisse obter resultados idênticos independentemente de quem o vai operar. Esse procedimento engloba todos os passos que o operador terá de seguir para realizar de um ensaio, como efectuar uma calibração e como elaborar um novo ciclo térmico.

Após determinação da temperatura do ponto crítico Ac_3 para os vários aços, estabeleceu-se um patamar de segurança de 30°C acima dessa temperatura para a realização dos tratamentos térmicos. Para uma maior flexibilidade do forno industrial utilizado fixaram-se duas



temperaturas de tratamento térmico de forma a englobar a generalidade dos aços produzidos na sua fundição.

Com o intuito de verificar se as temperaturas fixadas eram as mais indicadas, sujeitaram-se alguns provetes a tratamento térmico nas temperaturas escolhidas. Efectuaram-se ensaios mecânicos a esses provetes (tracção, resiliência e dureza) confrontaram-se os resultados obtidos com as gamas de valores indicadas pelas normas.

O Estágio englobou ainda um outro trabalho com uma vertente distinta do primeiro. Como o tempo dispendido com o estudo dilatométrico o permitia e por necessidade da Ferespe, procedeu-se ao estudo e posterior simulação de um novo sistema de alimentação e gitagem de um grupo de peças pertencentes à mesma família. Estas peças apresentavam rechupes, devido a uma alimentação defeituosa.

O estudo englobou os seguintes passos até à sua conclusão:

- Desenho 3D das peças, alimentação e gitagem num modelador de sólidos Solid Works.
- Importação dos ficheiros em formato STL do Solid Works para o simulador de solidificação AFS.
- Simulação da solidificação e posterior interpretação dos resultados.
- Vazamento de peças protótipos após implementação dos novos sistemas de alimentação e gitagem simulados pelo AFS.
- Para confirmação da eficácia dos novos sistemas de alimentação e gitagem realizaram-se testes de sanidade às peças protótipo, a destacar os raios-X e corte das peças nas zonas correspondentes a pontos quentes para observação directa.

O software de simulação AFS revela-se uma ferramenta extremamente útil na fundição pois permite, num curto espaço de tempo e com um menor custo, antever a sanidade da peça após vazamento. Sem este software o processo de estudo passaria por vazar peças-teste e sua análise, até obter resultados satisfatórios, procedimento este demorado e dispendioso.



Os resultados obtidos pelo software têm de ser cuidadosamente interpretados pois a composição da liga utilizada, temperatura de vazamento, taxa de contracção do metal, etc, revelam-se parâmetros de capital importância quando se efectua uma simulação. Impõem-se assim que se conheça bem as características do material a ser estudado.

O software não dispensa uma confirmação posterior dos resultados, tornando-se necessário efectuar o vazamento de alguns protótipos para confirmação da sanidade das peças, pois poderá existir algum parâmetro do AFS que não esteja de acordo com a liga em questão, levando a que os resultados obtidos não correspondam à realidade.

A sanidade da peça é verificada por recurso a processos destrutivos e/ou não destrutivos. Dos ensaios não destrutivos destacam-se a observação visual, radiografia e os ultra-sons; dos ensaios destrutivos destaca-se a observação minuciosa das superfícies obtidas por corte das peças pelas zonas correspondentes a pontos quentes.



3. Fluxograma representativo das acções tomadas no Estágio

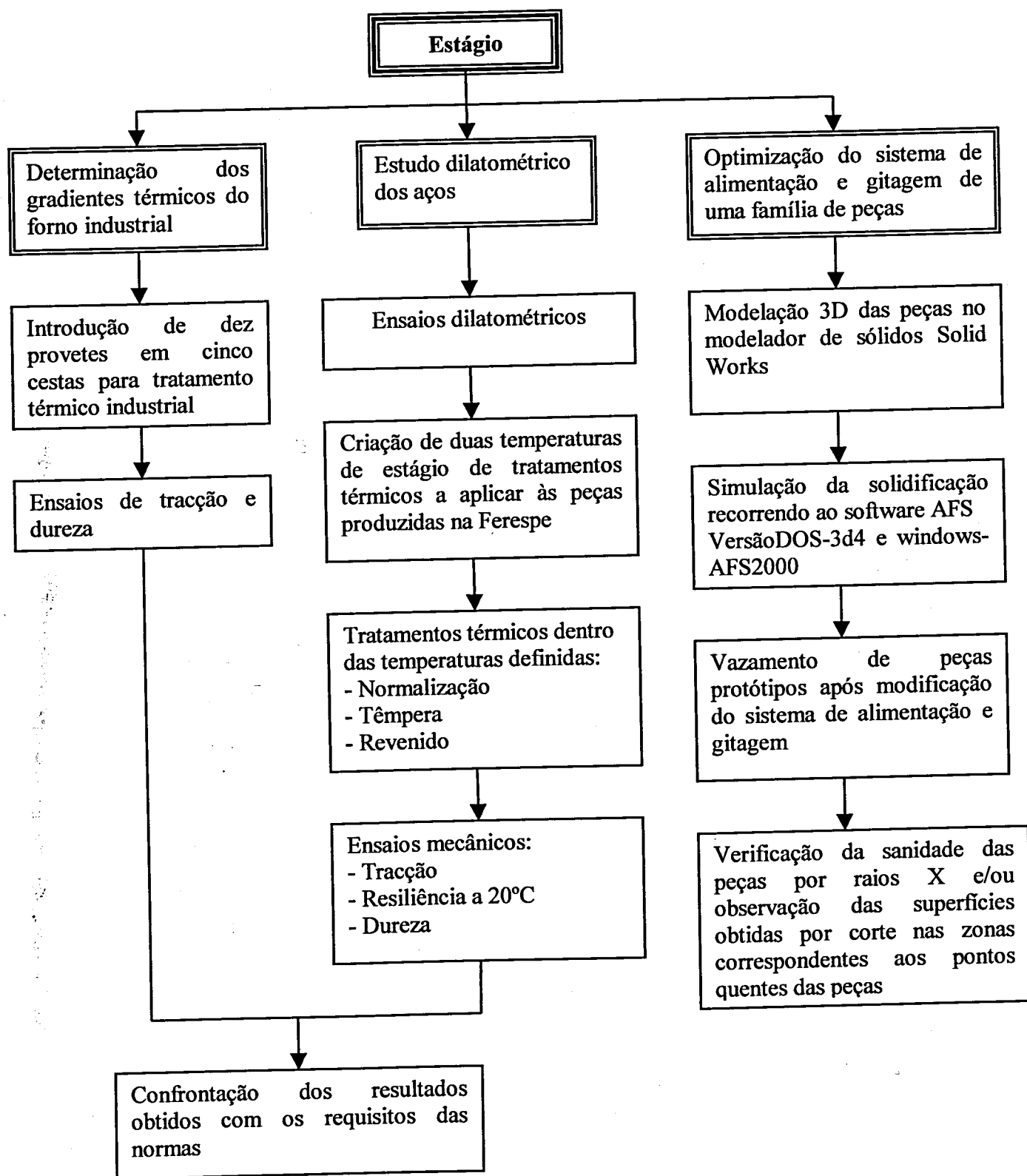


Fig. 1– Esquema representativo do procedimento experimental adoptado neste Estágio.



4. Estudo dilatométrico

4.1. Elaboração de um procedimento para os ensaios dilatométricos.

O dilatómetro é um instrumento laboratorial que irá ser utilizado por vários operadores. Tendo métodos de trabalho diferentes, será de admitir a obtenção de resultados díspares. Assim, impunha-se a elaboração de um modo operativo que permitisse a minoração das discrepâncias resultantes da realização dos ensaios por diferentes operadores.

O modo operativo elaborado engloba três passos distintos:

- Realização de um ensaio

Este item permite ao operador realizar um ensaio dilatométrico desde a introdução do provete no dilatómetro até à determinação das temperaturas críticas do material.

- Criação de um novo ciclo térmico

Os ensaios dilatométricos efectuados no Estágio sofreram o mesmo ciclo térmico dos ensaios realizados no Seminário: aquecimento de $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até aos 1000°C , seguido de 5min de estágio e arrefecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Porém, pode-se optar por modificar as condições do ensaio pelo que se torna necessário ao operador criar um novo ciclo térmico, estando essa operação explicada nesta item.

- Efectuar uma nova calibração do aparelho

Neste ponto exemplifica-se como realizar uma nova calibração. Quando se realiza um novo ciclo térmico torna-se necessário efectuar uma calibração do dilatómetro para eliminar erros que possam ocorrer nos resultados finais devido às dilatações/contractões do próprio aparelho durante um ensaio. Por outro lado, convém efectuar uma nova calibração do aparelho periodicamente garantindo assim a fiabilidade dos resultados.

Com o intuito de verificar a exactidão deste procedimento, foram efectuados ensaios dilatométricos por três operadores a fim de confrontar os resultados obtidos. Das leituras efectuadas entre operadores, obteve-se um erro máximo de 8°C entre as diferentes leituras dos pontos críticos. Como se estipulou uma margem de segurança de tratamento térmico, 30°C acima do ponto crítico Ac_3 , e o erro verificado é bastante inferior a esse valor, pode garantir-



-se que uma peça sofre austenitização quando sujeita a um estágio de tratamento térmico às temperaturas determinadas pelos vários operadores.

4.2. Selecção de duas temperaturas de estágio de tratamento térmico

Com os resultados obtidos no Seminário e no decorrer do Estágio seleccionaram-se duas temperaturas de estágio de tratamento térmico que contemplassem a generalidade dos aços estudados.

Como a Ferespe produz uma grande variedade de aços na sua fundição, e lotes de peças de pequenas séries, é compreensível que ao carregar o forno para tratamento térmico se introduzam peças e aços de famílias diferentes. Devido a este facto, seria impensável nesta primeira fase criar várias temperaturas de estágio de tratamento térmico pois é incompatível com o processo produtivo da Ferespe.

Após terem sido estipuladas as duas temperaturas, procedeu-se ao tratamento térmico de provetes no laboratório. Após tratamento térmico e realização de ensaios mecânicos agruparam-se os aços por famílias que permitam a realização de tratamentos térmicos às duas temperaturas fixadas.

Na tabela 1 apresentam-se a composição química, as propriedades mecânicas obtidas e as exigências normativas para os aços em questão quando submetidos a tratamento térmico dentro das duas temperaturas seleccionadas.

Tabela 1 – Composição química e propriedades mecânicas dos aços ensaiados e respectivas temperaturas de tratamento térmico.

Tabela 1 – Composição química e propriedades mecânicas dos aços ensaiados e respectivas temperaturas de tratamento térmico.																		
Aço WF		%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	R _{0,2}	R _m	A	Z	A _v	Dureza	Ac3	T° de TT
A	Obtido	0,17	0,46	0,79	0,016	0,020	0,12	0,072	0,004		314	481	32	55	70 / 64 / 70	137/139	930°C	N- 920°C
	Norma a)	0,25	0,60	0,90	0,060	0,060	0,25	0,40	0,15	0,30	230	430	22	25				
B	Obtido	0,29	0,51	0,89	0,016	0,023	0,18	0,095	0,032	0,16	404	624	21	43	40 / 35 / 36	176/180	876°C	N- 890°C
	Norma a)	0,45	0,60	1,00	0,060	0,060					295	540	14		18			
C	Obtido	0,32	0,34	1,36	0,017	0,023	0,18	0,50	0,32	0,093	645	778	23	48	57 / 52 / 52	226/231	860°C	N- 890°C R- 620°C
	Norma b)				0,050	0,060					415	620	20	40				
D	Obtido	0,21	0,31	1,07	0,017	0,023	0,086	0,055	0,031	0,12	420	570	34	63	95 / 91 / 102		899°C	T- 920°C R- 600°C
	Norma a)	0,17 0,23	0,60	1,80	0,025	0,030					360	500	24		60			
E	Obtido	0,26	0,35	0,65	0,015	0,020	1,00	0,046	0,25	0,074	438	625	24	51	55 / 48 / 45		890°C	N- 890°C R- 650°C
	Norma c)	0,22 0,28	0,60	1,00	0,030	0,020	0,80 1,20	0,40	0,15 0,35		380	580	18		22			
F	Obtido	0,16	0,45	0,65	0,014	0,013	2,13	0,051	0,95	0,035	597	735	17	60	46 / 42	210/228	932°C	N- 920°C R- 680°C
	Norma c)	0,10 0,18	0,60	1,10	0,030	0,030	2,00 2,50		0,90 1,10		325	550	17					
G	Obtido	0,30	0,41	0,71	0,016	0,027	1,06	1,70	0,33	0,15	856	1254	9	13	17 / 11 / 19	363/372	847°C	N- 890°C
	Norma e)	0,28 0,32	0,40 0,60	0,70 0,85	0,030	0,030	1,00 1,15	1,65 2,00	0,32 0,37							320 370		
H	Obtido	0,13	0,47	1,14	0,015	0,012	0,11	0,88	0,015		421	570	29	66	85 / 86 / 85	180	905°C	T- 920°C R- 575°C
	Norma c)	0,25	0,50	1,20	0,035	0,040		1,00			230	450 600	16	23				
I	Obtido	0,14	0,40	0,24	0,010	0,010	13,13	0,28	0,047	0,070	636	784	21	54			882°C	N- 920°C R- 680°C
	Norma a)	0,15	1,00	1,00	0,040	0,030	12,50 13,50	1,00		0,30	370	540	15					
a) Aços de acordo com a norma BS b) Aços de acordo com a norma ASTM c) Aços de acordo com a norma AFNOR d) Aços de acordo com a norma DIN e) Aço de acordo com a norma do cliente																		
N - Normalização T - Têmpera R - Revenido																		



Pela análise da tabela 1, a selecção das duas temperaturas de estágio de tratamento térmico, 890 e 920°C, é perfeitamente adequada a uma percentagem significativa dos aços produzidos na Ferespe.

O recurso aos ensaios dilatométricos permitiu reduzir as temperaturas de estágio dos tratamentos térmicos dos aços, mantendo as suas propriedades mecânicas de acordo com as gamas indicadas pelas normas. Pode referir-se como vantagens desta redução da temperatura de estágio de tratamento térmico, uma diminuição do tempo dispendido pelo forno a aquecer desde as temperaturas seleccionadas até temperaturas mais elevadas, reduzindo, assim, o tempo gasto no tratamento térmico; uma outra vantagem é a economia de gás para aquecimento do forno até uma temperatura superior.

5. Determinação da influência dos gradientes térmicos existentes no forno industrial sobre as propriedades mecânicas

Com o intuito de determinar a influência dos gradientes térmicos do forno industrial nas propriedades mecânicas, introduziram-se dez provetes em cinco cestas para tratamento térmico em diferentes partes do forno industrial. Dentro de cada cesta de peças foram introduzidos dois provetes, um situado no topo das peças e o outro introduzido no meio da cesta, figura 2

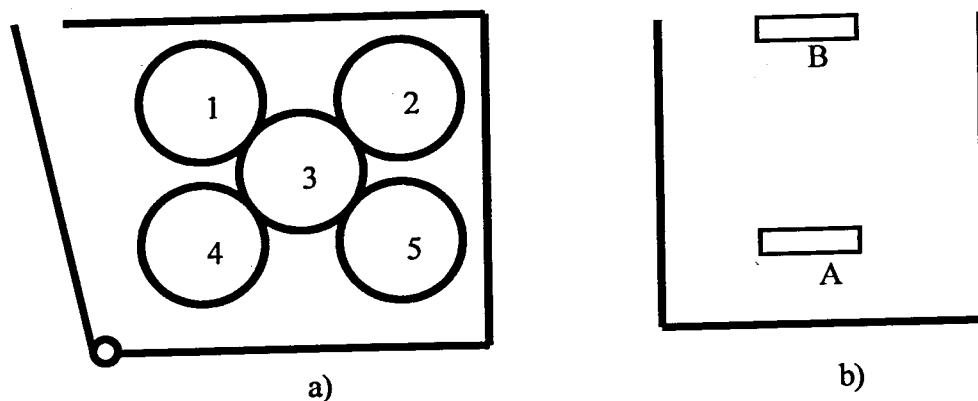


Figura 2— a) Visualização da disposição dos cestos dentro do forno, vista superior.

b) Disposição dos provetes dentro do cesto.

Após tratamento térmico, sujeitaram-se os provetes a ensaios de tracção e de dureza confrontando os diferentes valores entre si, tabela 2.



Tabela 2– Resultados obtidos nos ensaios de tracção efectuados sobre os provetes tratados termicamente no forno industrial e sobre o provete tratado no laboratório.

Cesta Provete Prop. Mec.	1 A	1 B	2 A	2 B	3 A	3 B	4 A	4 B	5 A	5 B	Lab.	Norma (c)
R_m (N/mm ²)	601	587	598	599	595	590	595	598	598	b)	625	560
$R_{0,2}$ (N/mm ²)	347	330	342	346	337	331	(a)	346	(a)	b)	383	320
A (%)	29	23	27	26	27	26	27	26	26	b)	24	15
HB	165 172	169 172	169 172	169 172	165 169	169 172	165 169	169 172	165 169	169 172	176 180	165 215

(a) – Erro de software; não permitiu a obtenção de valor.
 (b) – Provete com inclusão; não foi possível efectuar o ensaio de tracção.
 (c) – Norma AFNOR A 32-054 GE 320

Pela análise dos resultados da tabela 2 pode-se constatar que o forno apresenta uma boa homogeneidade térmica pois as propriedades obtidas nos diferentes provetes são bastante próximas, de realçar que as diferenças estão dentro da margem de erro do próprio ensaio. No entanto, de referir que os provetes situados à superfície dos cestos apresentam uma dureza superior relativamente aos situados no seu interior, como seria de esperar, pois os provetes à superfície têm um arrefecimento mais rápido.

De realçar ainda que o provete tratado termicamente no laboratório apresenta valores de tensão de ruptura, tensão limite de elasticidade a 0,2% e dureza superiores aos tratados no forno industrial. O arrefecimento do provete tratado no laboratório tem um arrefecimento muito mais rápido, pois, quando sai da mufla é exposto ao ar isolado, ao passo que os provetes tratados no forno industrial arrefecem nas cestas, e como é obvio, devido à grande massa arrefecem muito mais lentamente

6. Estudo de um novo sistema de alimentação e gitagem de uma família de peças

O software de simulação de solidificação veio permitir ao fundidor antever a sanidade da peça final antes de se proceder ao seu vazamento. Este procedimento de rápida execução permite visualizar a sanidade final da peça e, assim, corrigir eventuais defeitos, não tendo despesas desnecessárias à produção de peças defeituosas.



Este software permite visualizar a simulação de todo o processo de solidificação, assim como verificar se o sistema de alimentação e gitagem foi bem dimensionado, quais as zonas dos pontos quentes da peça e, por fim, se ocorre rechupe, ou não

Este processo veio substituir o método de tentativa-erro, em que, com base na experiência e conhecimento teórico, eram vazadas peças-teste sobre as quais eram realizados ensaios destrutivos e não destrutivos para avaliar a sanidade da peça. Caso a peça apresentasse defeitos tinha-se de corrigir os moldes, o que obrigava a um novo vazamento e novos testes, podendo em casos críticos ter de se efectuar esta tarefa várias vezes. Todos estes passos levam a um grande dispêndio de tempo, com grandes encargos.

O programa baseia-se no método das diferenças finitas para calcular o ganho ou perda de calor das várias partes do fundido. Esta técnica permite a visualização do efeito dos arrefecedores, isoladores e outros materiais que podem ter efeito no tempo de solidificação. O software decompõe o fundido em pequenos cubos ligados entre si de modo a produzir o mais fielmente possível a forma da peça desejada. O cálculo da transferência de calor pode ser aplicado a cada um desses pequenos cubos. A partir de cálculos simples, a simulação pode estender-se a todo o fundido, aplicando-os numa série de ondas através do empilhamento dos cubos.

Para efectuar uma simulação é necessário percorrer uma série de passos, que em conjunto permitem um resultado adequado:

- Modelação 3D da peça, alimentadores e gitagem.
- Especificação do tipo de liga utilizada, local de alimentação, tipo de alimentadores e/ou arrefecedores, isoladores, etc
- Malhamento de todo o modelo em pequenos cubos; quanto menor o volume dos cubos mais fino vai ser o malhamento da peça logo, maior definição da peça. Porém, quanto mais fino for o malhamento mais demorada será a simulação; logo, será necessário atribuir um valor ao malhamento que permita uma simulação rápida com um resultado o mais fiável possível.



A simulação permite a obtenção de vários dados diferentes que conduzem a conclusões sobre a sanidade final da peça pretendida. A principal informação que se pretende obter da simulação são as zonas que eventualmente não são alimentadas pelos alimentadores e que são susceptíveis de conduzi-rem à formação rechupes. O software permite diferentes interpretações dos resultados [4]:

- Tempo de solidificação – traça o fim da solidificação em todos os pontos do fundido. Existe a possibilidade de observar a peça em corte para ver como as diferentes partes do fundido se sobrepõem umas às outras. Pontos quentes que se encontrem escondidos no seio da peça podem ser vistos por este traçado.
- Fracção crítica do tempo de solidificação – representa o ponto a partir do qual o programa considera que haverá interrupção de passagem de metal líquido devido ao bloqueamento dos caminhos de alimentação pelos braços das dendrites [2]. Por exemplo, um valor da fracção crítica de sólido de 0,5, representa que o fundido deixa de ser alimentado quando se apresentar 50% solidificado, ou seja, quando percorreu só metade do tempo necessário para solidificação total.
- Temperatura – traçado da temperatura em cada instante, quer no fundido quer no molde. Permite visualizar, em qualquer instante, a temperatura a que se encontra determinada parte da peça; pode ser obtido pela inscrição de termopares em diferentes partes da peça ou molde.
- Gradiente de temperatura na solidificação, velocidade de arrefecimento na solidificação e critério de Niyama – estes traçados são usados para prever a contracção do material nas diferentes partes da peça. Estas funções são traçadas em 3D, evidenciando a contracção mais provável de ocorrer no fundido.
- Pontos quentes – o software indica os locais onde possa existir interrupção de alimentação (estrangulamento) e zonas em que o tempo de solidificação seja superior ao do resto da peça (pontos quentes).
- Rerun – com esta opção obtém-se um traçado do metal líquido ainda presente nos vários estágios de solidificação, ou seja, a visualização das partes da peça que, em determinada



altura, ainda se encontram no estado líquido . O seu traçado permite ver o corte do caminho de alimentação e a sua separação.

6.1. Apresentação e discussão dos resultados

Os fundidos em estudo pertencem à mesma família de peças diferindo pouco entre si em forma e tamanho. As peças apresentam-se em forma de hélices e o centro com uma configuração igual à fig. 3b), por onde vai ser introduzido um veio. Ao introduzir várias peças sobrepostas nesse veio forma-se um sem-fim destinado ao transporte de materiais granulados. Devido às condições de trabalho bastante adversas, as peças são fabricadas em ferro fundido de alta liga resistente à abrasão.

O material em que vão ser vazadas as peças tem as seguintes características:

- Norma aplicada – ASTM A532 IIIA
- Composição química

%C	%Mn	%Si	%Ni	%Cr	%Mo	%C	%S	%P
2,0 – 3,3	2,0 máx.	1,5 máx.	2,5 máx.	23,0-30,0	3,0 máx.	1,2 máx.	0,06 máx.	0,10 máx.

- Densidade¹ – 7599 Kg/m³
- Temperatura de vazamento – 1440°C
- Temperatura de solidificação¹ – 1260°C

6.1.1. Peça 1

A primeira peça em estudo apresentava defeitos internos com o sistema de alimentação normalmente utilizado. A peça foi sujeita a cortes nas zonas afectadas para analisar a extensão desses defeitos. A peça apresentava rechupes de tamanho considerável na interface da hélice com o corpo , fig. 3.

¹ Informação do software de simulação AFS

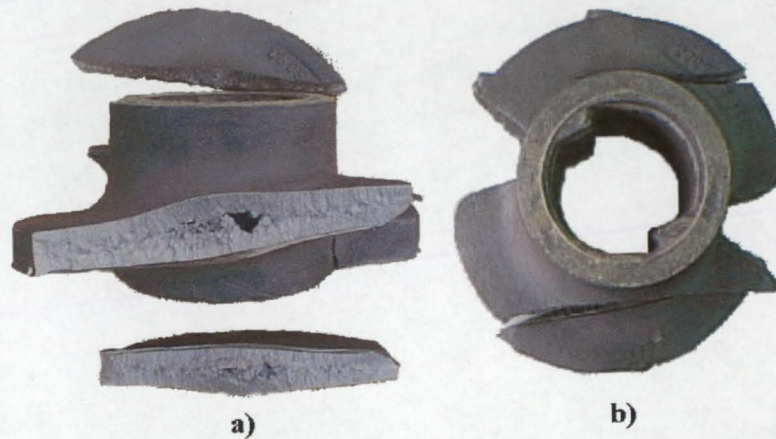


Fig. 3 – Corte da peça 1. a) Visualização de um rechupe na interface da hélice e do corpo da peça. b) Cortes efectuados na peça nas zonas dos pontos quentes.

Para determinar o problema começou-se por decompor a peça em elementos simples, fig.4 b), com o intuito de calcular as espessuras equivalentes para determinar a localização dos pontos quentes.

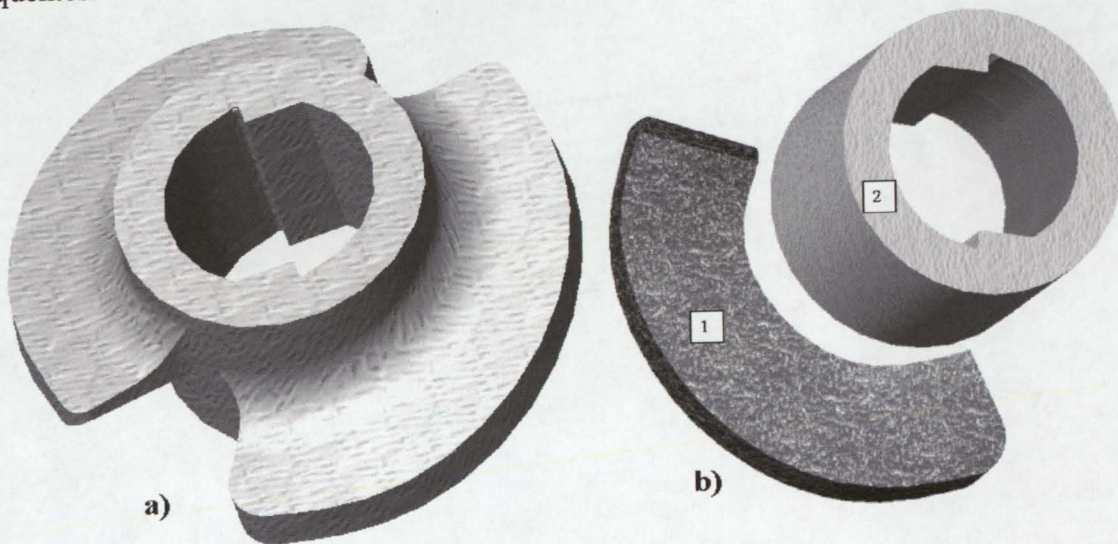


Fig. 4 – a) Primeira peça a ser estudada. b) Peça decomposta em elementos simples.

O cálculo das espessuras equivalentes obedeceu aos seguintes passos:

- Diâmetro de referência, para a secção 1, fig. 4 b)

$$\frac{1}{D_0} = \frac{1}{3a} + \frac{1}{3b} + \frac{1}{6x} \quad (1)$$

Sendo:

a – maior dimensão da face de alimentação
b – menor dimensão da face de alimentação
x – dimensão que o metal vai percorrer



$$a = 287\text{mm}$$

$$b = 22\text{mm}$$

$$x = 62\text{mm} \quad \text{logo pela expressão (1), } D_0 = 52.6$$

- A espessura equivalente

$$e' = \frac{D_0}{3} \quad (2)$$

Pela expressão (2), o valor da espessura equivalente para a secção 1 vem: $e'_1 = 17.5$

- Para a secção 2, vem:

$a = \infty$ (As dimensões a ou x tomam o valor infinito se compreendidas entre duas secções quentes, caso do cilindro)

$$b = 24.5\text{mm}$$

$$x = 113\text{mm} \quad \text{logo pela expressão (1), vem: } D_0 = 66.3$$

$$\text{pela expressão (2): } e'_2 = 22.1$$

- Cálculo da junção

$$e'_{j(1,2)} = \frac{\text{secção de menor valor}}{\text{secção de maior valor}} = \frac{17.5}{22.1} = 0.79 \quad (3)$$

- Cálculo do coeficiente de forma, ω (corrige a espessura equivalente para a junção)

$\omega = f(X)$ Consultando o anexo III, ω toma o valor de 1.15, tomando como referência

$e' = 0.79$ e consistindo numa junção em T.

- A espessura equivalente para a junção

$$e'' = e'(\text{maior secção}) \times \omega \quad (4)$$

$$e'' = 22.1 \times 1.15 = 25.4$$

- Diagrama térmico

Com os valores obtidos anteriormente pode-se construir o diagrama térmico, fig. 5

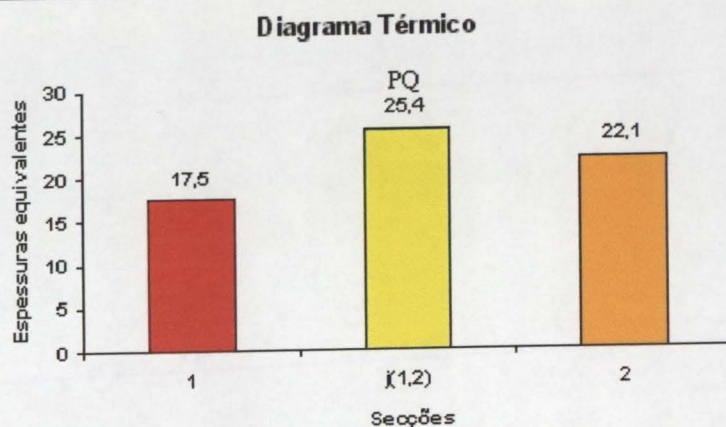


Fig. 5 – Diagrama térmico evidenciando um ponto quente na junção das secções 1 e 2.

Pela análise da fig. 5 observa-se um ponto quente na junção das secções 1 e 2. Esta conclusão veio de encontro à esperada pois esta é a zona da peça de maior volume, e consequentemente, a última a arrefecer.

Com o auxílio do AFS foi possível identificar o problema que originava o defeito, fig. 6. Os alimentadores não estavam a actuar de forma correcta devido a um estrangulamento entre o alimentador e o ponto quente.

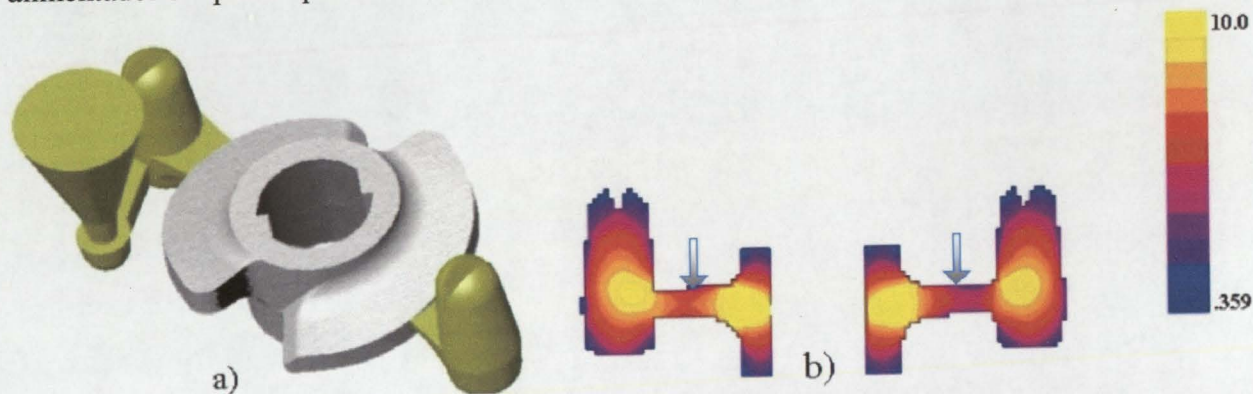


Fig. 6 – a) Disposição dos alimentadores sobre a peça. b) Simulação em AFS indicando os estrangulamentos ao fim de 10min.

O problema foi contornado eliminando-se os alimentadores laterais e procedendo-se à colocação sobre os pontos quentes de dois alimentadores de topo com camisas exotérmicas, fig. 7.

Os alimentadores devem conter um volume em metal fundido suficiente para compensar a contracção total do metal líquido da peça, isto é, devem garantir que o metal líquido não se



“esgota” enquanto não termina a solidificação da peça. Para tal procedeu-se ao cálculo do peso do alimentador necessário, conhecido o peso final da peça por recurso ao modelador de sólidos Solid Works.

Optou-se por calcular os alimentadores por este método devido à facilidade de encontrar os valores necessários recorrendo-se ao modelador de sólidos Solid Works.

Pela fórmula:

$$P_p = \frac{1}{3} \frac{P_a \times 100}{\beta}$$

Em que:

P_p – Peso da peça

P_a – Peso do alimentador

$\frac{1}{3}$ – Este valor indica um rendimento mínimo do alimentador de 33%

β – Contracção volúmica do metal

Dividindo a peça em duas partes iguais, simétricas, de 9,5Kg cada, é calculado o peso do alimentador necessário para cada parte da peça. Logo:

$$P_a = \frac{3 \times 9,5\text{Kg} \times 5\%}{100} = 1,43\text{Kg}$$

Para alimentar cada uma das partes da peça é necessário um alimentador com peso superior a 1,43Kg. Com o auxílio do software de modelação verificou-se que o alimentador com camisa exotérmica de peso imediatamente superior a 1,43Kg (dado pela tabela das camisas da Foseco), teria um volume de 0,41dm³ e pesava 3Kg.

Ao introduzir os dados no software de simulação AFS (versão 3d4) deparou-se com a inexistência de dados sobre camisas exotérmicas, contendo apenas informações sobre camisas isolantes. Procedendo à simulação de solidificação com camisas isolantes, obteve-se uma peça sem rechupe, fig. 7 b). Como o rendimento das camisas exotérmicas é superior ao das camisas isolantes, é de esperar um resultado idêntico em termos de sanidade da peça.

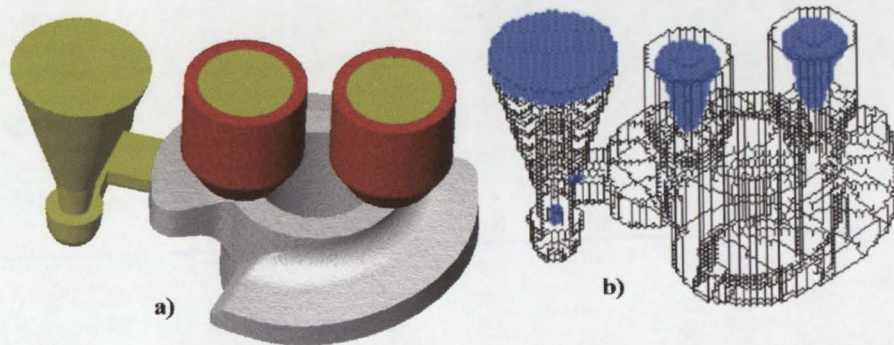


Fig. 7 – Peça com dois alimentadores e duas camisas isolantes na sua parte superior. a) Visualização da peça modelada em Solid Works. b) Simulação em AFS, não se constatando qualquer rechupe na peça.

O vazamento de uma peça protótipo veio a comprovar os resultados da simulação em que a peça não apresentava rechupe. Pode-se verificar pela fig. 8 que os cortes da peça pelos pontos quentes não indiciam qualquer rechupe.



Fig.8 – Corte da peça 1 por um dos pontos quentes, não se visualizando qualquer rechupe.

6.1.2. Peça 2

A peça 2, fig. 9 a), difere da anterior devido à hélice ser contínua com apenas uma abertura ao passo que a anterior se apresenta com duas aberturas situadas em lados opostos.

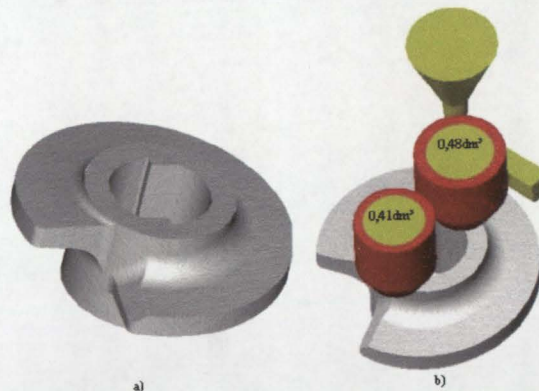


Fig. 9 – Peça 2 modelada em Solid Works. a) Sem sistema de alimentação e gitagem. b) Com sistema de alimentação e gitagem, indicando o volume dos alimentadores.

O tipo de alimentadores foi sugerido pelo técnico da Foseco tendo aconselhado a utilização de duas camisas exotérmicas de volume $0,41\text{dm}^3$. Porém, na simulação em AFS verificou-se a ocorrência de um rechupe. Como a simulação de solidificação se processou considerando o uso de camisas isolantes e não exotérmicas, procedeu-se ao fabrico de uma peça protótipo com camisas exotérmicas, verificando-se o aparecimento de um rechupe de dimensões reduzidas no ponto quente indicado pelo software, fig. 10.

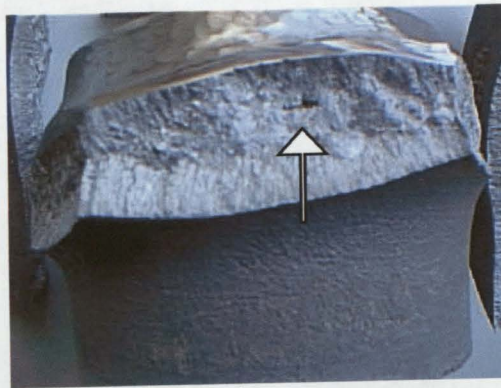


Fig. 10 – Peça 2 apresentando um pequeno rechupe na zona do ponto quente.

Recorreu-se então ao uso de uma camisa de volume $0,41\text{dm}^3$, na parte da peça onde existe uma abertura da hélice, e o uso de uma camisa de volume imediatamente superior, $0,48\text{dm}^3$, na parte mais volumosa da peça, fig. 9b). Com esta solução observou-se que a simulação em AFS não evidenciava o aparecimento de rechupe, fig. 11.

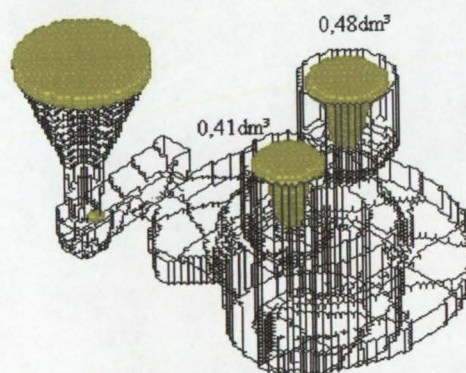


Fig. 11 – Simulação em AFS da peça 2, com uma camisa de volume $0,41\text{dm}^3$ e outra de $0,48\text{dm}^3$.



Após o vazamento de peças protótipo, comprovaram-se os resultados da simulação, recorrendo ao uso de raios-X e ao corte das peças protótipo nas zonas dos pontos quentes, fig. 12.



Fig. 12 – Peça 2. a) Corte pelos pontos quentes. b) Corte no ponto quente não apresentando rechupes.

6.1.3. Peça 3

A terceira e última peça em estudo, apresentava semelhanças com a peça 2, embora de maior volume.

Na simulação da solidificação desta peça recorreu-se à utilização de duas versões diferentes do software AFS, versão 3d4, com a qual se simulou as duas primeiras peças, e versão 2000. Efectuando a simulação de solidificação, recorrendo ao AFS versão 3d4, utilizando duas camisas isolantes, de volume $0,48\text{dm}^3$, verificou-se a ocorrência de rechupe, fig. 13a). Com a utilização da nova versão 2000 já foi possível executar a simulação com camisas exotérmicas, não se verificando qualquer tipo de rechupe, fig. 13b). Confirma-se, assim, que o rendimento de uma camisa exotérmica é superior ao de uma camisa isolante de igual volume, isto é, se se optasse por uma solução com camisas isolantes o volume dos alimentadores teria de ser superior para obter os mesmos resultados.

Com esta nova versão a definição da peça é muito superior, permitindo o seu malhamento em três milhões de cubos, ao passo que, na versão anterior, a definição conseguida foi de apenas um milhão.

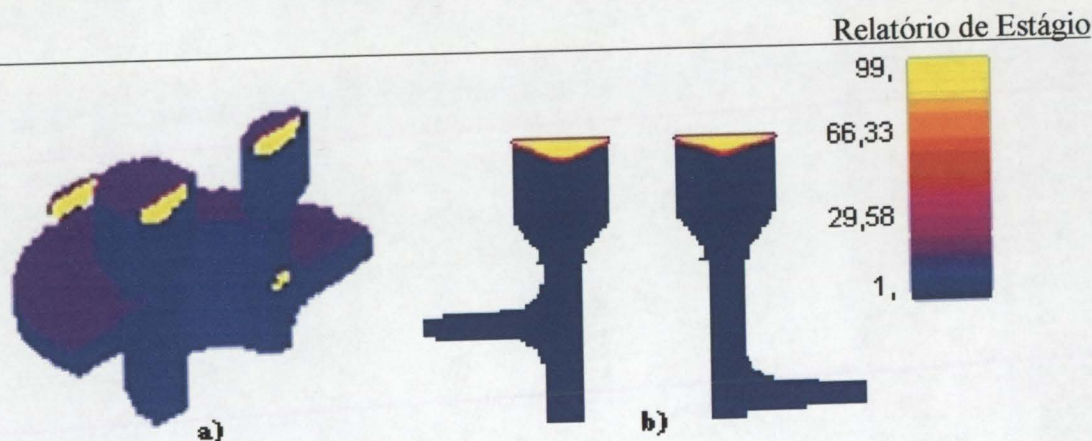


Fig. 13 – Simulação de solidificação em AFS da peça 2. a) Versão 3d4. b) Versão 2000.

Com o intuito de verificar os resultados obtidos nas duas versões, procedeu-se ao vazamento de peças protótipo utilizando como alimentadores camisas exotérmicas de volume $0,48\text{dm}^3$. Após a solidificação das peças, procedeu-se ao corte nas zonas correspondentes aos pontos quentes.



Fig.14 – Peça 3 cortada nas zonas correspondentes aos pontos quentes, não evidenciando qualquer rechupe.

Pela observação da peça cortada, fig14, pôde constatar-se a ausência de rechupes. Este facto indicia que os resultados obtidos pelo software AFS 2000 são mais precisos que os da versão anterior, permitindo o uso de materiais mais recentes como é o caso das camisas exotérmicas.

6.1.4. Vantagens e desvantagens do uso de alimentadores com camisa exotérmica

O recurso a alimentadores com camisa exotérmica permite uma grande redução do volume necessário de metal líquido quando comparado com alimentadores sem isolamento. Em



termos de exemplo², um alimentador de $1,40\text{dm}^3$ pode ser substituído por um outro com camisa exotérmica de $0,41\text{dm}^3$. O seu uso reduz drasticamente a quantidade de metal a fundir necessária ao enchimento dos alimentadores, rentabilizando, assim, o volume de metal líquido necessário para o enchimento da moldação, diminuindo os custos inerentes à produção.

Uma condicionante ao uso dos alimentadores de topo era o facto das suas dimensões interferirem na área de apoio do macho na moldação. Com o recurso a camisas exotérmicas essa área não foi afectada significativamente, tendo apenas de se redesenhar os alimentadores com duas pequenas calotes nas zonas das camisas, fig. 15.

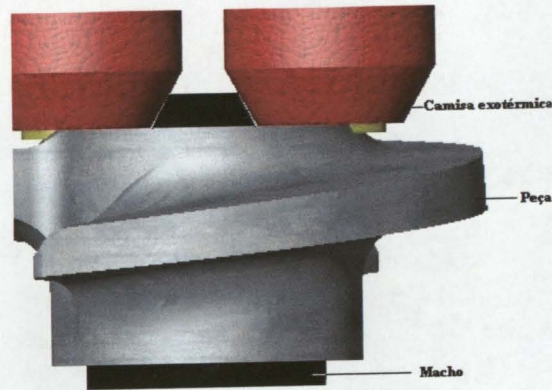


Fig. 15 – Conjunto da peça com camisas exotérmicas e macho.

Um factor negativo do posicionamento dos alimentadores sobre a peça é o aumento da área a rebarbar. Os alimentadores laterais permitiam um corte simples e rápido ao passo que, com os alimentadores de topo, a área a rebarbar é maior e de mais difícil execução. Os encargos dispendidos nesta tarefa vão ser maiores devido a um maior desgaste dos discos de corte e no maior tempo dispendido pelo operador, pois tem uma maior área de metal a rebarbar.

² De acordo com catálogo da Foseco.



7. Conclusão

- A fixação de duas temperaturas de estágio, 890 e 920°C, após análise dilatométrica, permitiu a optimização dos tratamentos térmicos numa grande percentagem de aços produzidos na Ferespe. As temperaturas de estágio foram reduzidas mantendo, contudo, as características mecânicas de acordo com os requisitos das normas, comprovadas pelos ensaios mecânicos.
- Os provetes tratados termicamente no forno industrial, apresentaram diferenças mínimas nas suas características mecânicas, o que indicia que a temperatura no interior do forno é bastante homogénea, conseguindo-se garantir as propriedades mecânicas das peças.
- A simulação de solidificação da situação inicial permitiu concluir que havia um estrangulamento não permitindo que houvesse uma alimentação do ponto quente, sendo assim, os alimentadores ainda que bem dimensionados não actuavam correctamente devido a esse facto.
- O método de cálculo dos alimentadores da Foseco permitiu o correcto dimensionamento dos alimentadores, de uma forma simples e rápida.
- O vazamento de protótipos permitiu confirmar a sanidade das peças e consequentemente confirmar os resultados da simulação de solidificação.
- O software de simulação AFS, versão 2000, tem uma livreria de materiais mais completa e permite uma simulação com um maior número de nódulos e, portanto, permite efectuar uma simulação mais próxima do real.



8. Bibliografia

- 1 C. A. Silva Ribeiro – “Sebenta da disciplina de Fundição”; FEUP
- 2 C. A. Silva Ribeiro – “Guia de Acompanhamento do Curso do Programa de Simulação da Solidificação AFS 3D”; UP, FEUP, 2000
- 3 Foseco - “How to calculate feeders”; Edition 6/1995
- 4 Modern Casting – 11/1993
- 5 Foundry Trade journal – 7/1993
- 6 José M. G. de Carvalho Ferreira – “Tecnologia da Fundição”;
Fundação Calouste Gulbenkian, 1999
- 7 Metals Handbook – “Desk Edition”; ASM, Eighth Printing, 1995





Anexo I – Cesta de peças para tratamento térmico.





Anexo II – Cálculos dos alimentadores.



Leaflet IE 6.79 E

Edition 6/1985

How to calculate feeders

Part 1
Determination of feeders for castings of steel, malleable iron, light alloys and copper-base alloys.**1 Determination of Modulus**

- 1.1 Divide the casting into sections and determine the important volume-to-surface ratios according to table 1. Use centimeters (cm) as unit of dimensions.

$$\text{Modulus} = \frac{\text{Volume}}{\text{Cooling surface}}$$

$$M = \frac{V (\text{cm}^3)}{S (\text{cm}^2)} = (\text{cm})$$

- 1.2 Determine the required feeder modulus (M_F) using the factor 1.2

$$M_F = M_C \cdot 1.2$$

- 1.3 Provisional determination of the feeder from the feeder tables.

2 Determination of the number of feeders

- 2.1 Determination of the feeding distance factor (FD) from tables 2 and 2 a.
- 2.2 Calculation of the number of feeders (n_F). Use millimeters (mm) as unit of dimensions:

$$n_F = \frac{\text{Casting length or mean circumference (L)}}{\text{Provisional feeder dia (d) + Feeding distance factor (FD) \cdot thinnest section through which feeding is to be ensured (T)}}$$

$$n_F = \frac{L (\text{mm})}{d (\text{mm}) + \text{FD} \cdot T (\text{mm})}$$

3 Calculation of the feedable casting weight

The feeders obtained from the calculation of modulus and of number of feeders do not always satisfy the shrinkage requirements. In these cases feeders must be increased. For their calculation the following data are required:

- 3.1 Weight of the casting or casting cluster to be fed
- 3.2 Feeder weight
- 3.3 Shrinkage in percent (see table 3)
- 3.4 Feeding capacity of the feeder. If exothermic/insulating feeder sleeves are used this is at least 33 %. Pour-through sand feeders render up to 16 %, all others 14 %.
- 3.5 Feedable casting weight (W):

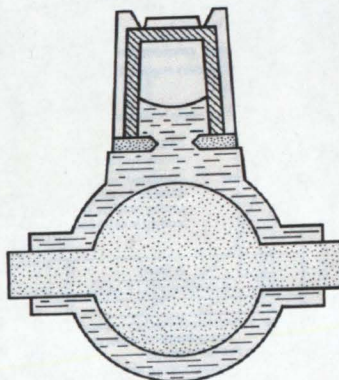
$$W = \frac{1}{3} \cdot \frac{\text{Feeder weight (kg)} \cdot 100}{\text{Shrinkage (\%)}}$$

4 Determination of the feeder neck

- 4.1 Top feeder:
No determination of feeder neck required. If possible, feeder sleeves should be used with breaker core.
- 4.2 Side feeder:
The required feeder neck (N) is obtained from the calculation of modulus using the bar equation or diagram table 5.

$$M_N = \frac{a \cdot b}{2(a + b)}$$

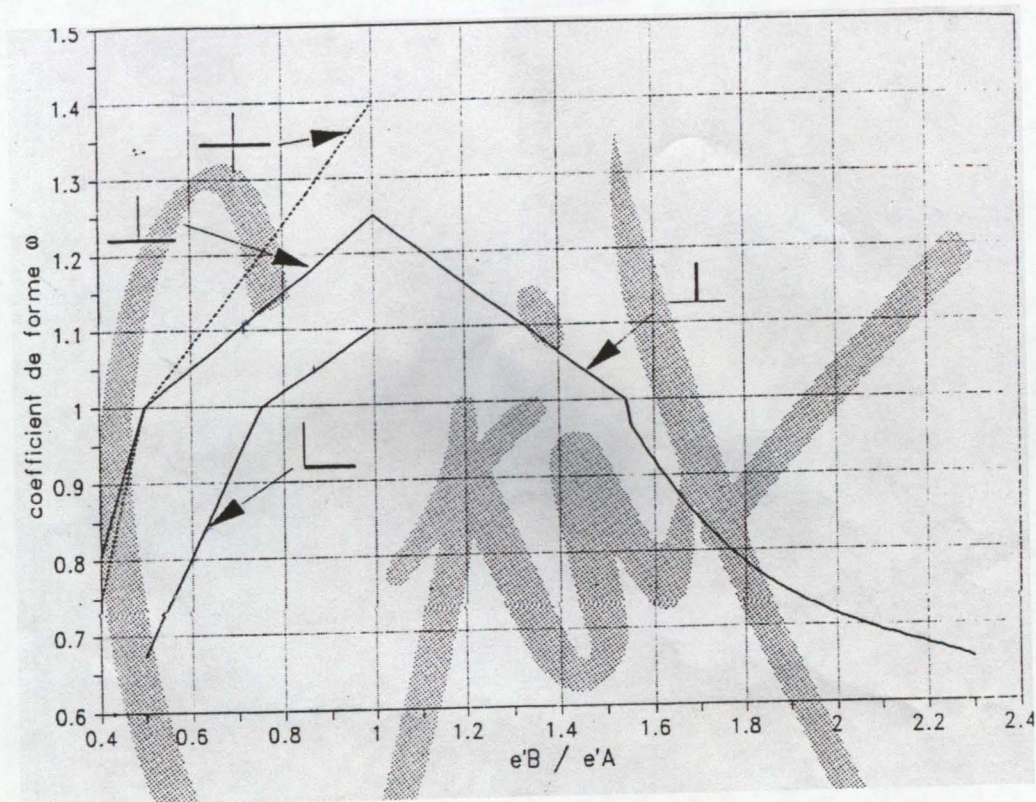
$$M_C : M_N : M_F = 1 : 1 : 1.2$$



FOSECO Gesellschaft für Chemisch-Metallurgische Erzeugnisse mbH
4280 Borken 1, Postfach 1220, Gelsenkirchener Strasse 10, Telefon (0 28 61) 83-0, Telex 8 13 346, Telefax 83-338



Anexo III – Coeficientes de forma ω para junções de elementos planos infinitos de espessura variável.





FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000087333