

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Produção de Ferros Nodulares Austemperados Vazados em Coquilha por Austempera Directa

António Manuel Rincón de Aguiar Vieira

Licenciado em Engenharia Metalúrgica
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos
requisitos do grau de mestre
em
Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
Área Materiais e Processos de Fabrico

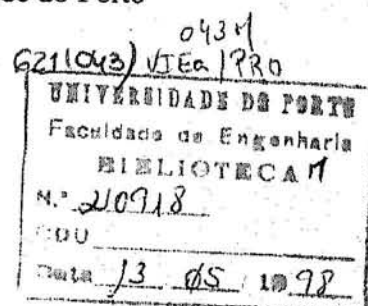
Dissertação realizada sob a supervisão de

Professor Catedrático António Pinto Barbedo de Magalhães

Do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Dezembro de 1997



À Judite

Índice

1ª Parte	Introdução	3
1.1.	Agradecimentos	4
1.2	Objectivos	5
1.3.	Resumo.	6
1.4.	Lista de Simbolos	8
2ª Parte	Parte Teórica – Revisão Bibliográfica	
2.1	Introdução	10
2.2	Inoculação no Ferro nodular	11
2.2.1	Introdução	11
2.2.2.	Teoria geral da inoculação	13
2.2.3.	Factores que influenciam a inoculação	21
2.2.3.1.	Temperatura de inoculação	21
2.2.3.2.	Influencia do tempo	24
2.2.3.3.	Influencia da quantidade de inoculante	25
2.2.4.	Metodos de inoculação	25
2.2.5.	Tipos de inoculantes	28
2.3 .	Tecnologia das coquilhas	30
2.3.1.	Generalidades	30
2.3.1.1.	Definição de Coquilha	30
2.3.1.2.	História Sucinta	31
2.3.1.3.	Vantagens e limitações do vazamento em Coquilha	31
2.3.1.3.1.	Vantagens económicas	31
2.3.1.3.2.	Vantagens técnicas	33
2.3.1.3.3.	Limitações do Processo	34
2.3.1.4.	Ligas Apropriadas ao Processo	35
2.3.2.	Aspectos Tecnicos	37
2.3.2.1.	Natureza das trocas termicas em jogo	37
2.3.2.2.	Condições a Cumprir para Obtenção de Peças Sãs	41
2.3.2.3.	Possibilidades de Regulação da Troca Termica	
	Metal-Coquilha	42
2.3.2.3.1.	Influencia do tracado da coquilha	42
2.3.2.3.1.1.	Influencia da espessura	42
2.3.2.3.1.2.	Aceleração do Arrefecimento	44
2.3.2.3.1.3.	Travagem do Arrefecimento	45
2.3.2.3.1.4.	Condução ao(s) Suporte(s)	46
2.3.2.3.2.	Influencia de uma construção composta	47
2.3.2.3.3.	Utilização de Pinturas	50
2.3.2.3.4.	Arrefecimento ou Reaquecimento Local Artificial	51
2.3.2.3.4.1.	Arrefecimento	51
2.3.2.3.4.2.	Reaquecimento	53
2.3.2.4.	Influencia do modo de vazamennto	53
2.3.2.5.	Influencia do traçado da peça	53

2.3.2.6.	Temperaturas Optimas de Funcionamento das Coquilhas	54
2.3.2.6.1.	Ligas de alumínio	55
2.3.2.6.2.	Latões e bronzes	55
2.3.2.6.3.	Cupro-alumínios	55
2.3.2.6.4.	Ferros fundidos	55
2.3.2.7.	Controlo das temperaturas das coquilhas	56
2.3.2.8	Controlo dos tempos	56
2.3.2.9.	Comando automático do ciclo por tomada de temperatura	56
2.3.2.10 .	Influencia das inserções	57
2.4.	Gitagem de Moldações Metálicas	59
2.4.1.	Definição	59
2.4.2	Funções do Sistema de gitagem	59
2.4.3.	Elementos constituintes do sistema de gitagem	59
2.4.3.1.	Bacia de vazamento	59
2.4.3.2.	Canal de descida	60
2.4.3.3.	Canal de distribuição	60
2.4.3.4 .	Ataques	60
2.4.4.	Cálculo do sistema de gitagem	61
2.4.5.	Sistemas pressurizados e não pressurizados	68
2.4.6.	Tempo de enchimento de uma peça	69
2.4.7.	Canais de distribuição verticais	72
2.5.	Alimentação de peças moldadas em coquilha	74
2.5.1.	Introdução	74
2.5.2.	Condições a Cumprir para uma boa alimentação	74
2.5.3.	Condições a cumprir para a não necessidade de alimentação	75
2.6.	Simulação de Comportamento Termico de Coquilhas	79
2.6.1.	Caracter ciclico da Temperatura de uma Coquilha	79
2.6.2.	Complexidade do problema	80
2.6.3.	Exemplo Simples de Aplicação de Elementos Finitos	84

3ª Parte - Parte Experimental

3.1.	Introdução	87
3.1.1.	Plano inicial	87
3.1.2.	Plano efectivamente realizado	87
3.2.	Determinação das causas das baixas características mecânicas	88
3.2.1.	Identificação do problema	88
3.2.1.1.	Condições operatórias	88
3.2.1.1.1.	Instalação de fusão	88
3.2.1.1.2.	Carga do forno	88
3.2.1.1.3.	Nodularização	88
3.2.1.1.4.	Inoculação e Vazamento	89
3.2.1.1.5.	Pintura da coquilha	92
3.2.1.2.	Primeiros vazamentos	92
3.2.1.3.	Análise dos resultados obtidos	94

3.2.1.4.	Conclusões	98
3.2.2.	Experiências realizadas para a resolução do problema das inclusões	98
3.2.2.1.	Introdução	98
3.2.2.2.	Utilização de filtros	98
3.2.2.3.	Aumentar a temperatura de vazamento	100
3.2.2.4.	Utilização de vários tipos de pinturas para coquilha	101
3.2.2.5.	Utilização de filtros duplos com pastilha inoculante sinterizada no meio, sem utilização da inoculação no jacto.	102
3.2.2.6.	Utilização de uma bacia de vazamento com Stopper	102
3.2.2.7.	Modificação do sistema de gitagem	103
3.2.2.8.	Utilização de um inoculante diferente. Secagem dos inoculantes	104
3.2.2.9.	Modificação do angulo de ataque do jacto inoculante	105
3.2.2.10.	Modificação de geometria dos provetes	107
3.2.2.11.	Utilização de tarugos inoculantes electrofundidos	108
3.2.2.12.	Quantidade óptima de inoculante	119
3.2.3.	Conclusões	121
3.3.	Produção de coquilhas	122
3.3.1.	Nota prévia	122
3.3.2.	Execução de coquilhas	122
3.3.3.	Conclusões	130
3.4	Austempera directa	132
3.4.1	Introdução	132
3.4.2.	Comparação dos dois métodos	132
3.4.3.	Realização da operação de austempera directa	133
3.4.3.1.	1ª Experiencia de austempera directa	135
3.4.3.1.1.	Descrição da experiencia:	135
3.4.3.1.2.	Registos gráficos das temperaturas da coquilha e dos provetes	135
3.4.3.1.3.	Estruturas metalográficas obtidas.	138
3.4.3.1.4.	Conclusões	142
3.4.3.2.	2ª Experiencia de austempera directa	143
3.4.3.2.1.	Descrição da experiencia:	143
3.4.3.3.2.	Registos Gráficos	144
3.4.3.2.3.	Comparação dos gráficos obtidos	146
3.4.3.2.4.	Estruturas metalográficas obtidas	149
3.4.3.2.5.	Conclusões:	151
3.4.3.3.	3ª Experiencia de austempera directa	152
3.4.3.3.1.	Descrição da experiencia:	152
3.4.3.3.2.	Registos gráficos da evolução de temperatura	152
3.4.3.3.3.	Comparação das curvas obtidas com as curvas da austempera directa, simples (não mista)	154
3.4.3.3.4.	Estruturas metalográficas obtidas	155
3.4.3.3.5.	Comparação da austempera directa simples com a austempera directa mista agua sais	156
3.4.3.3.6.	Considerações sobre a austempera mista	160
3.4.3.3.7.	Vantagens e limitações da austempera mista	162
3.4.3.3.8.	Conclusões sobre a austempera mista.	162

3.4.4.	Resultados mecânicos do A.D.I. produzido por austempera directa.	162
3.4.5.	Interpretação dos resultados	164
3.5.	Produção de luvas de rectroescavadora	165
3.5.1.	Introdução	165
3.5.2.	Estudo da operacionalidade da coquilha-	165
3.5.2.1.	Composição química	165
3.5.2.2.	Funcionalidade da coquilha	165
3.5.2.3.	Análise das peças obtidas	165
3.5.2.4.	Conclusões	165
3.5.3	Austempera directa.	165
3.5.3.1	1º vazamento – introdução	167
3.5.3.1.1.	Composição química	167
3.5.3.1.2.	Estrutura as cast	167
3.5.3.1.3.	Estruturas obtidas por austempera	168
3.5.3.1.4.	Análise das peças obtidas	173
3.5.3.1.5.	Conclusões	173
3.5.3.3.	2ª vazamento com austempera directa	174
3.5.3.3.1.	Composição química	174
3.5.3.3.2.	Estrutura as cast	174
3.5.3.3.3.	Estrutura após austempera	174
3.5.3.3.4.	Conclusão	175
3.5.3.4.	3ª vazamento com austempera directa.	175
3.5.3.4.1.	Composições químicas usadas e resultados obtidos	175
3.5.3.4.2.	Análise dos resultados obtidos	175
3.5.4.	Ferrite nas partes finas	175
3.5.4.1.	Origem do problema	176
3.5.4.2.	Soluções possíveis	176
3.5.4.3.	Utilização da desmoldação rápida	176
3.5.4.4.	Conclusões	180
3.6.	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	181
3.6.1.	Conclusões	181
3.6.2.	Sugestões para trabalhos futuros.	182
3.6.2.1.	Temperatura de austempera	182
3.6.2.2.	Meio de austempera	182
3.6.2.3.	Material das coquilhas	182

1ª Parte

Introdução

1.1 Agradecimentos

Às pessoas que, directa ou indirectamente, tornaram possível com a sua colaboração a realização deste trabalho, nomeadamente.

Ao Sr Fernando e ao Sr Jose Manuel pela sua ajuda na execução das fusões

À Armanda pelas Analises Quimicas .

Ao Eng. Mário Pinto pela sua ajuda nas operações de Austempera Directa

Ao Eng. Ricardo Paiva pela sua colaboração na aquisição de dados

À Eng. Carmen Lobo pelas nossas discussões.

Ao Professor Barbedo Magalhães por toda a ajuda que nos deu com ideias e sugestões.

À minha mulher e aos meus filhos pelas suas palavras de animo quando as coisas não corriam como queriamos.

1.2 Objectivos

O presente trabalho tem como objectivo desenvolver experimentalmente a tecnologia de produção do A.D.I., por vazamento em coquilha, seguido de austempera directa por forma a obter um material barato de elevadas características mecânicas.

Com esse objectivo a austempera deve ser directa (sem aquecimento de austenização) e para isso o vazamento deve ser feito em coquilha. Além disso o ferro fundido vazado deve ser não ligado , ou muito pouco ligado , o que exige condições severas de tempera.

O desenvolvimento de uma tal tecnologia passa pelo estudo de:

- 1– Inoculação
- 2– Revestimento das coquilhas
- 3– Sistemas de gitagem
- 4– Temperaturas do metal vazado, das coquilhas e das peças
- 5– Condições e meios de arrefecimento na austempera
- 6– Tempos e temperaturas de austempera.

Procura-se estudar o efeito destes parâmetros na estrutura e sanidade de peças em A.D.I. e determinar as condições ideais para a produção de um ou dois tipos de peças típicas (por exemplo luvas de retro-escavadoras) em ferro fundido nodular austemperado vazado em moldações permanentes

1.3 Resumo

A Austempera Directa de Ferro Fundido Nodular vazado em coquilha, apesar da simplicidade do processo e da economia inerente à supressão da operação de austenitização apresenta alguns problemas nomeadamente ao nível da inoculação, os quais podem ser impeditivos da obtenção das características mecânicas exigidas.

Esta tem que ser muito eficaz para promover a grafitação em condições de rápido arrefecimento devido à elevada condutividade das coquilhas metálicas, pelo que é absolutamente necessário realizar uma inoculação tardia.

Tendo encontrado grandes dificuldades na inoculação, nomeadamente a formação de inclusões de inoculante e de outros produtos não dissolvidos que impediam a obtenção de características mecânicas exigidas pelas normas, o autor procurou identificar as suas causas e encontrar soluções para as mesmas.

Uma vez resolvido este problema, estudou um método de austempera misto em água e banho de sais tendo em vista a economia de elementos de liga. Os resultados desta técnica são apresentados e comparados com os de austempera directa ou indirecta em banho de sais.

Resumé

Le traitement thermique de *Austempering* direct de la Fonte à graphite sphéroïdal coulée en coquille, malgré la simplicité du procede et de l'économie due à la suppression de l'opération d'austenitization, pose certains problèmes au niveau de l'inoculation qui empêchent l'obtention des caractéristiques mécaniques exigées.

L'inoculation doit être très efficace pour obtenir une graphitization en conditions de refroidissement très rapides parce que les moules métalliques ont une très grande conductivité thermique. Une inoculation tardive est alors nécessaire.

Du aux grandes difficultés de l'inoculation – formation d'inclusions de l'inoculant et d'autres produits non dissous qui ne permettent pas d'obtenir les caractéristiques mécaniques imposées par les normes, l'auteur tenta de déterminer les causes et de rechercher des solutions.

Après avoir résolu ce problème une méthode mixte de *Austempering* eau-sels fut étudiée avec la finalité d'économiser des éléments d'alliage. Les résultats de cette technique sont présentés et comparés avec les résultats de *Austempering* directe ou indirecte en bain de sels.

Abstract

The direct Austempering of Ductile Iron poured on permanent moulds, regardless of being a simple and economic process presents some inoculation problems which are impeditive of reaching the required mechanical characteristics.

The inoculation must be very effective to promote graphite precipitation in very quick cooling conditions because of the high thermal conductivity of dies. A late inoculation is then necessary.

Having found big difficulties in inoculation because of the formation of inoculant and other product inclusions, which lower the mechanical characteristics of the iron the author looked for the causes and tried to find solutions.

Once solved the problem a hybrid method of austempering (water plus salt) is studied with the finality of alloy elements saving. The results of this process are presented and compared with the direct austempering and the conventional austempering method.

1.4 Lista de Símbolos

q	quantidade de calor
M	massa de liga vazada
C	calor específico , caudal
T _v	temperatura de vazamento
T _a -	temperatura de abate
C _{lf}	calor latente de fusão
Q	quantidade de calor a extrair para n peças
n	numero de peças por unidade de tempo
t, T	tempo
Θ	temperatura
λ	condutividade térmica
ρ	massa volúmica
b	difusividade
B	factor de perda de carga
E _p	energia potencial
g	aceleração da gravidade
h	altura , diferença de nível
m	massa
v	velocidade
V	volume
Sc	secção característica
S	secção
H _i	altura inicial
H _f	altura final
H _e	altura equivalente

Parte teórica-Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

O presente trabalho visa fundamentalmente estudar as condições operatórias para a produção de Ferro Fundido Nodular Austemperado produzido por *Austempera Directa*.

Para a realização da Austempera Directa é necessário poder introduzir no meio de tempera a peça poucos segundos após o vazamento pelo que este tem que ser realizado em moldações permanentes.

Mas a produção de peças em ferro fundido nodular em coquilhas obriga a uma inoculação tardia (e com inoculantes de muito boa qualidade) e eficiente para evitar a formação de ledeburite .

Esta inoculação levanta problemas, devido à possibilidade de introdução de inclusões que baixam as características mecânicas do ferro nodular. Estas inclusões, como veremos, estão sempre presentes a não ser que se usem cuidados especiais. Deste modo decidimos introduzir este *Estudo Teórico-Revisão Bibliográfica* para melhor podermos compreender as razões pelas quais fizemos todas as nossas experiências no sentido de produzir ferro fundido nodular isento de inclusões como base para a realização das subsequentes experiências de austempera directa.

2.2 Inoculação do ferro nodular

2.2.1 Introdução

A inoculação é uma operação que consiste em adicionar ao metal líquido, pouco antes ou durante o vazamento (tardamente), substâncias com efeitos nucleadores durante um período de tempo limitado, de modo a que durante a subsequente solidificação aumente o número de pontos a partir dos quais essa mesma solidificação se dá. A consequência principal é, na maioria dos casos, um refinamento do tamanho de grão.

Assim definida a inoculação não é exclusiva dos Ferros Fundidos, nem os inoculantes são necessariamente metais ou ligas metálicas. Certas ligas de alumínio são "afinadas" com sódio metálico (indiscutivelmente um metal) como por exemplo as ligas de Al-Si, ao passo que outras são afinadas com boro de titânio, como por exemplo as ligas de Al-Cu.

O efeito da inoculação nos ferros fundidos para além do refinamento do tamanho de grão (aumento do número de células eutecticas) é o da diminuição da tendência à "tempera ledeburítica". Isto é válido para ferros fundidos cinzentos e ferros fundidos nodulares. Nos ferros fundidos cinzentos a inoculação promove a matriz perlítica, uma vez que às grafites do tipo B e D normalmente anda associada ferrite (Jean Van Eeghem 1979), a qual raramente é desejada uma vez que a sua presença faz baixar a tensão de rotura sem contrapartidas mecânicas, excepção feita para a maquinabilidade. A inoculação promovendo a grafite do tipo A diminui a tendência para a ferrite. Nos ferros fundidos nodulares a inoculação promove a matriz ferrítica, uma vez que aumenta o número de nódulos por mm^2 e cada nódulo tem normalmente uma área de influência circundante ferrítica. Estes factos são bem conhecidos dos fundidores.

Nos Ferros Fundidos a prática de inoculação iniciou-se sem dúvida alguma nos Ferros Fundidos Cinzentos, muito antes de se descobrir e desenvolver a tecnologia de produção dos ferros nodulares, e as substâncias inoculantes utilizadas foram muitas, desde restos de velas e outros materiais com carbono nas primeiras décadas do século XX. A partir da década de vinte (1922 a 1928) estudos sistemáticos levaram à opção por ferrossilícios de composições várias e de diversas granulometrias.

Sendo o ferro e o silício metais presentes nos ferros fundidos poderia pôr-se a questão de a inoculação actuar por efeito de alteração da composição química. Tal não acontece, uma vez que se obtém resultados diferentes com metais de composição final igual e diferentemente inoculados.

Actualmente sabe-se que nem o ferro nem o silício tem qualquer efeito inoculador, e que são substâncias como o cálcio, estrôncio etc. que sempre estão presentes nos ferrossilícios comerciais que actuam como inoculantes. Mas isto não foi sempre aceite e durante muito tempo foi assunto de controvérsia, chegando a falar-se em efeito de hereditariedade, pois pensava-se que a presença de lingote de primeira fusão na carga do forno era benéfica do ponto de vista da resposta do metal à inoculação.

Com o aparecimento do ferro nodular a inoculação passou a ter uma importância fundamental. Com efeito a inoculação é etapa indispensável na produção do ferro nodular. Mesmo o metal de base mais bem elaborado e com mais tendência à solidificação segundo o diagrama estável, como é o caso dos ferros fundidos produzidos em cubilote, e que no caso do ferro fundido cinzento podem ser vazados sem inoculação, no caso do ferro fundido nodular têm que ser inoculados, pois, caso contrário, o número de nódulos por milímetro quadrado é muito baixo e a presença de carbonetos primários praticamente inevitável devido ao efeito antigrafitizante do Magnésio.

A inoculação é sempre a última operação metalúrgica a efectuar-se sobre o metal líquido. A ordem normal é a seguinte: fusão, esferoidização e inoculação. Segue-se o vazamento. A inoculação pode também ser efectuada durante o vazamento, e pode ainda ser simultânea com o tratamento de esferoidização.

O caso mais vulgar é aquele em que se usa uma colher para fazer a nodularização e o metal é depois transferido para uma colher de vazamento. A inoculação é feita quando da trasfega do metal de uma colher para outra, adicionando o inoculante no jacto de metal durante a trasfega.

Quando se usa a mesma colher para esferoidização e vazamento, o inoculante é normalmente colocado no fundo da colher, efectuando-se a esferoidização e a inoculação em simultâneo, ou então o inoculante é adicionado na superfície do metal já esferoidizado sendo necessário promover a dissolução do inoculante por qualquer meio mecânico.

O inoculante pode ser adicionado ao jacto de metal durante o vazamento ou mesmo colocado no interior do sistema de gitagem. (nunca na cavidade da peça.) mas o gito deverá estar preparado para captar qualquer partícula sólida que não se dissolva. Este método é fundamental para o vazamento do ferro nodular em coquilha e será objecto de estudo mais aprofundado.

O principal efeito pretendido com a inoculação é a solidificação segundo o diagrama estável e a correspondente eliminação de carbonetos de solidificação duros e frágeis. O aumento do número de nódulos por milímetro quadrado, e o aumento da quantidade de ferrite são consequências naturais do aumento do poder germinador do banho para a grafite. Em boa verdade é o aumento do número de nódulos por milímetro quadrado que promove a solidificação segundo o diagrama estável e o aumento da quantidade de ferrite. Ao aumentar o número de nódulos por mm quadrado diminui a distância entre os nódulos, e admitindo que cada nódulo tem à sua volta uma região de influencia (ferrítica) então um maior número de nódulos por mm quadrado significará uma maior percentagem de ferrite.

De tal modo assim é que geralmente se mede o estado de inoculação de um ferro nodular pelo número de nódulos por milímetro quadrado.

2.2.2. Teoria geral da inoculação

Sabemos que os ferros fundidos ao solidificarem o podem fazer segundo o diagrama estável, ou segundo o diagrama metaestável. Sendo a grande maioria dos ferros fundidos cinzentos eutéticos ou hipoeutéticos, importa voltar a nossa atenção para o que acontece durante a reacção eutética, a qual pode seguir o diagrama estável, produzindo grafite e austenite, ou, caso contrário, seguir o diagrama metaestável produzindo ledeburite, que é constituída por austenite e cementite. Não é comum um ferro fundido hipereutético iniciar a solidificação através da precipitação de cementite próeutética a não ser em espessuras muito finas. Normalmente para podermos obter ferros fundidos brancos hipereutéticos temos que usar elementos de liga, pois estes ferros fundidos tem grande tendência à grafitização

Nos ferros fundidos cinzentos hipoeutéticos a solidificação inicia-se pela precipitação de cristais dendríticos de austenite os quais, tendo teor em carbono inferior ao teor em carbono da liga, fazem com que o líquido residual veja o seu teor em carbono aumentar. Atingida a temperatura eutética dá-se a solidificação do líquido remanescente produzindo ou ledeburite ou então grafite mais austenite. Os ferros fundidos eutéticos iniciam a solidificação pela reacção eutética.

Os diagramas estável e metaestável tem diferentes temperaturas para a reacção eutectica sendo esta mais baixa para o diagrama metaestável .

Os dois principais factores que influenciam aquilo que se obtém na reacção eutética são a composição química e a velocidade de arrefecimento. Esta depende fundamentalmente da espessura da peça .

No que respeita à composição química o elemento mais influente é o carbono , seguido do silício, actuando ambos no mesmo sentido. Quanto maior for o teor nestes elementos maior é a tendência para a solidificação segundo o diagrama estável, produzindo portanto grafite e austenite.

A espessura actua no mesmo sentido. Quanto mais espessa é a peça maior é a sua tendência para a solidificação estável. Isto porque quanto mais espessa é a peça mais devagar solidifica, e mais tempo há para precipitar a grafite antes de se atingir a temperatura do eutectico metaestável.

Até este momento não falamos sobre inoculação. Este conceito decorre de um outro facto observável na prática, que consiste em que ferros fundidos de idêntica composição química e idênticas espessuras de parede terem diferentes tendências no que respeita à solidificação seguir o diagrama estável ou metaestável.

Sem nos perdermos em considerações históricas, vamos limitar-nos a apresentar o fenómeno.

Suponhamos um forno eléctrico contendo ferro fundido com a seguinte composição :

C = 3,5 % Si = 2,0 %

Vamos vaziar com este metal duas cunhas de tempera da seguinte maneira:

Para a primeira cunha adicionamos ferrosilício granulado durante o enchimento da colher de modo a obter teor final de silício de 2,4 % .

Para a segunda cunha adicionamos ferrosilício granulado (igual ao anterior) no forno de modo a fazer subir o teor em silício precisamente para os mesmos 2,4 % .

A experiência mostra que (invariavelmente) o metal da primeira cunha tem sempre uma maior tendência para a grafitação , produzindo cunhas de tempera com menor zona branca que o metal da segunda cunha.

O facto de adições tardias de ferrosilício terem o efeito de diminuir a tendência para a tempera ledeburítica foi aproveitado para produzir peças em ferro fundido cinzento com baixos teores de carbono e silício , os quais , uma vez que a tensão de rotura dos ferros fundidos depende muito da quantidade de grafite livre, tem melhores propriedades mecânicas .

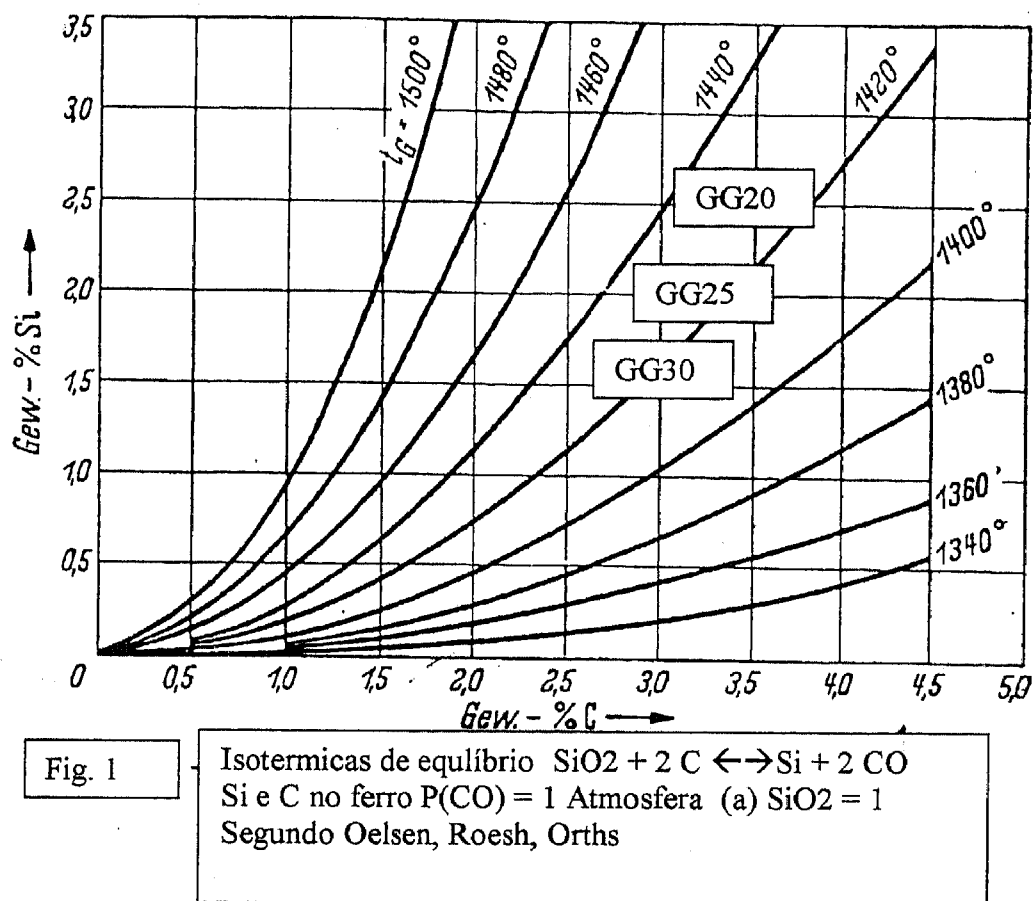
Isto introduz uma nova condicionante para além da espessura da peça (ou seja, da velocidade de solidificação) e da composição química. Esta nova condicionante é o estado de germinação , o qual pode ser aumentado pela inoculação , que consiste em fazer adições tardias de produtos ditos inoculantes.

Para completar as condicionantes de todo este processo falta-nos introduzir mais uma variável: a temperatura.

A prática de fundição mostra que vaziar a temperaturas baixas dá maior tendência para a tempera ledeburítica que vaziar a temperaturas médias. Por outro lado vaziar a temperaturas muito altas tem igualmente como efeito uma maior tendência para a tempera ledeburítica. Vamos ser mais precisos: suponhamos um forno eléctrico contendo ferro fundido a 1380 °C . Vamos retirar metal do forno com uma colher fria e vaziar uma peça. Seguidamente com a mesma colher voltamos a retirar metal do forno para vaziar uma segunda peça igual à anterior . Dado que a colher aqueceu quando do vazamento da primeira peça a segunda peça vai ter uma temperatura de vazamento superior à primeira . Esta peça terá uma menor tendência tempera ledeburítica. Mas isso deve-se a que um metal mais quente aquece mais as paredes da moldação o que tem como consequência uma menor velocidade de solidificação. Colheres frias dão ferro duro, dizem os fundidores. Eu próprio o comprovei industrialmente. Mas isto isto não tem nada que ver com estado de germinação. Por outro lado aquecer o metal em questão a 1600 °C , mante-lo a essa temperatura durante meia hora e vaziar a peça terá como resultado uma grande tendência para a tempera ledeburítica (Stephen Istvan Karsay , 1975) e (Jean Van Eeghem, 1979) , e isto já tem que ver com o estado de germinação.

É geralmente aceite que , na ausencia de inoculação, são partículas de sílica que servem de germens de início de precipitação da grafite . Ora estas particulas só podem existir se não forem reduzidas pelo carbono. Como o potencial de oxigénio da

silica sobe com a temperatura, e o do carbono desce, há uma temperatura a partir da qual o carbono reduz a sílica. Essa temperatura depende dos teores de carbono e silício e pode ser achada através do diagrama seguinte, no qual introduzimos 3 rectângulos correspondentes a 3 classes de ferro fundido segundo a norma DIN. Essa temperatura varia normalmente entre 1400°C e 1440 °C.



Deste modo a temperaturas abaixo de 1400 °C o metal estará num alto estado de germinação ao passo que acima de 1440 °C o carbono destruirá esses germens.

O estado de germinação é um conceito cuja definição é de natureza quantitativa. Dizemos que um ferro fundido está num elevado estado de germinação se ao solidificar der origem a um elevado numero de células eutéticas por unidade de volume (ou por unidade de superfície, uma vez que a contagem se faz sobre uma superfície. O numero de celulas eutéticas por unidade de volume obtem-se elevando o numero de celulas eutéticas por unidade de superfície a 3/2). A explicação do conceito dá ideia que a avaliação do numero de células eutéticas por unidade de área poderia fornecer uma “escala de germinação”, mas as variáveis que influenciam o número de células eutéticas por unidade de área são muitas desde a composição química, a espessura da peça, a temperatura de vazamento, a qualidade do molde, etc. de modo que a avaliação do estado de germinação é apenas comparativa para varios ferros fundidos de composições muito idênticas e para peças de idêntica espessura.

Por outro lado, apenas por sobreaquecimento prolongado, podemos fazer variar o número de células eutéticas de peças vazadas nas mesmas moldações e com o mesmo metal.

A inoculação tem como efeito o aumento do número de células eutéticas. Considera-se que dá origem à criação no banho de partículas a partir das quais é nucleada a precipitação de grafite. Estas partículas não são observáveis em análise metalográfica.

O estado de germinação tem também relação com dois outros fenómenos: A sobrefusão e o tipo de grafite formada. (ver Fig.2)

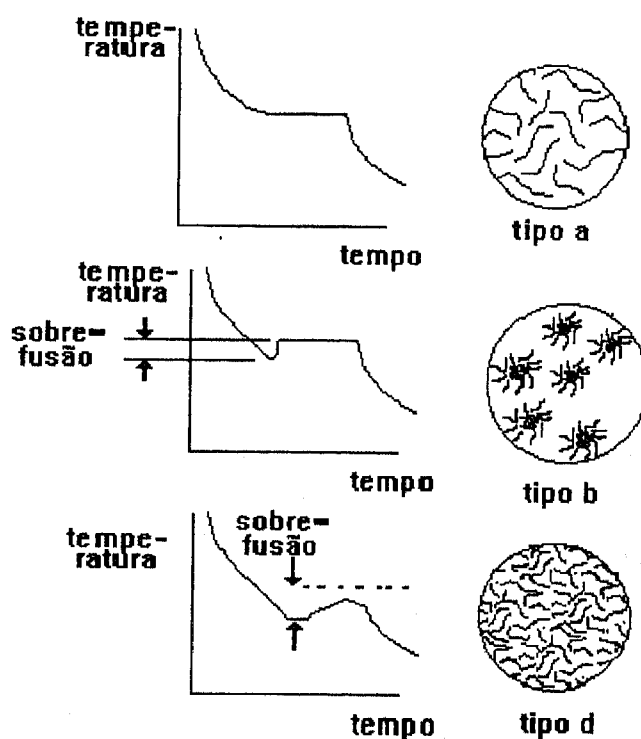


Fig 2. Relação esquemática entre a sobrefusão e o tipo de grafite formada.
((Jean Van Eeghem, 1979)

Na solidificação, se o estado de germinação é alto, atingida a temperatura do eutetico estavel, da-se a precipitação de grafite e austenite a essa temperatura. Não há sobrefusão, e a grafite formada é do tipo A, a qual é constituída por lamelas mais ou menos do mesmo tamanho.

Um estado de germinação algo menor dá origem a que a temperatura do eutetico estável possa ser ultrapassada sem que se dê a precipitação de grafite . A partir de uma certa altura dá-se a precipitação de grafite muito fina. Essa precipitação de grafite faz subir a temperatura até à temperatura do eutetico estável , dando-se , a partir daí, a precipitação de grafite em lamelas idênticas às do tipo A , radialmente, a partir dos núcleos de grafite fina. O conjunto parece uma rosa com o centro constituído por grafite muito fina e as pétalas por grafite mais grossa. É a grafite do tipo B, também chamada grafite em rosetas . Normalmente, à parte central da roseta de grafite anda associada ferrite, sendo o resto da matriz perlítica.

Um estado de inoculação ainda menor permite uma ainda maior sobrefusão de modo que quando se dá a precipitação de grafite fina , a temperatura sobe , mas não consegue atingir a temperatura do eutetico estável , de modo que toda a grafite precipitada é muito fina. Esta grafite é do tipo D , também chamada de sobrefusão. As matrizes associadas a este tipo de grafite tem, normalmente ferrite.

Para terminar esta introdução à teoria da inoculação referiremos que o efeito da inoculação sobre o estado de germinação do banho é temporário perdendo-se muito rapidamente a princípio e mais lentamente para o fim . O efeito da inoculação perde-se na totalidade ao fim de 20 minutos aproximadamente.

A Teoria dos Gradientes de Silício., actualmente muito contestada , pretende que as adições de ferrosilício tendem a criar no banho pontos de grande concentração de silício tornando nessas zonas o metal fortemente hipereutetico. Isso fará com que a precipitação de grafite se dê nesses locais . Esta teoria tem dois pontos a seu favor: Todos os ferrosilícios comerciais tem poder inoculante e, por outro lado, o facto de o efeito inoculante se perder com o tempo, é perfeitamente explicado, pois com o tempo dar-se-a um efeito de homogenização

Muitos autores (Dawson, McGrady, Kriekaard, Lux, Ziegler, Henke, McClure,) mostraram muito claramente que o poder inoculante dos ferrosilícios industriais provem das impurezas do ferrosilício e não do silício. Com efeito adições de silício puro mostraram não ter qualquer efeito inoculante . Por outro lado Ferros fundidos isentos de silício (ao alumínio) respondem muito bem à inoculação com cálcio, portanto sem que o silício esteja minimamente presente. No entanto consideramos que esta teoria não é totalmente excluir. Voltaremos a ela mais adiante.

A germinação homogênea por adição de inoculantes poderá então ser excluída salvo se o inoculante for a própria grafite. A grafite tem um grande poder inoculante que influi sobretudo na profundidade de tempera , e não afecta muito as propriedades mecânicas, ou se o faz é muito ligeiramente , e no sentido negativo. Por outro lado a grafite não é eficaz se for adicionada a temperaturas muito elevadas devido à redissolução das partículas germens.

Com excepção da grafite , um inoculante terá como consequência o aparecimento no metal de germens heterogêneos, ou seja, a precipitação das lamelas de grafite será iniciada por partículas estranhas. Mas o que são estas partículas?

Van Eeghem no seu artigo “Inoculation des Fontes” de Março de 1979 mostrou claramente que:

--A manutenção de um ferro fundido à temperatura de 1350 °C , portanto nitidamente abaixo da temperatura de equilíbrio da reacção

$2\text{CO} + \text{Si} \leftarrow \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{C}$ não afecta o seu estado de germinação.

--A manutenção a 1550 °C portanto acima da temperatura de equilíbrio da reacção anterior, faz baixar o estado de germinação da ferro fundido. O evolugrama de desprendimento gasoso de oxigénio mostra que a essa temperatura se dá o desaparecimento da sílica.

--Um rápido retorno à temperatura de 1350°C não restitui as condições iniciais senão ao fim de aproximadamente meia hora. Paralelamente o evolugrama de desprendimento de oxigénio também só mostra de novo o pico da sílica ao fim do mesmo tempo

--A grafite só tem grande poder inoculante a baixas temperaturas

-- Os ferrosilícios comerciais tem melhor resposta à inoculação a temperaturas acima da temperatura de equilíbrio.

--O silício puro não tem qualquer poder inoculante.

Deste modo Van Eeghem concluiu que na ausência de inoculação o estado de germinação era condicionado à existência de partículas de sílica , as quais eram reduzidas pelo carbono se se aumentasse a temperatura acima da temperatura de equilíbrio. Um posterior abaixamento de temperatura não repõe imediatamente as partículas de sílica pois estas produzem-se por oxidação do banho em contacto com o ar.

O facto de o silício puro não inocular explica-se pelo facto de os germens que iniciam a precipitação de grafite serem sílica e não silício.

Quanto ao efeito inoculante dos ferrosilícios industriais Van Eeghem comprovou que o que realmente provocava a formação de germens eram elementos como o cálcio , estrôncio e o bário.

Mas faltava saber exactamente que partículas estes elementos formavam que serviriam de germens. Duas hipóteses se ponham: ou estes elementos formavam óxidos ou carbonetos. Então mais uma vez a temperatura seria factor de decisão pois se fossem os óxidos as partículas germens então um estado de oxidação do ferro fundido com presença de partículas de sílica seria benéfico pois os elementos atrás citados (o cálcio , estrôncio e bário) reduzem a sílica oxidando-se eles próprios . Ora vimos atrás que a sílica existe fundamentalmente abaixo da temperatura de equilíbrio da reacção



Mas se as partículas germens não são óxidos então estes inoculantes serão mais eficazes a altas temperaturas (acima da temperatura de equilíbrio) pois nessas condições não há sílica que oxide estes elementos.

As experiências levadas a cabo por Van Eeghem mostraram que estes inoculantes funcionam melhor a altas temperaturas indiciando portanto que as partículas germens de ferros fundidos inoculados serão provavelmente carbonetos.

Para comprovar esta teoria foi realizada uma experiência que consistiu em fazer solidificar um ferro potencialmente branco contra uma parede de carboneto de cálcio rebarbado. O ferro fundido solidificou branco em toda a sua extensão excepto junto à parede de carboneto de cálcio onde solidificou cinzento.

E quanto ao ferro nodular? Como explicamos que neste a inoculação funcione melhor quanto menor for a temperatura? Precisamente este facto vem comprovar a teoria de que as partículas germens são carbonetos. A presença de magnésio significa a quase total ausência de sílica e o cálcio não consegue reduzir o MgO. Deste modo mesmo a baixas temperaturas o cálcio e os outros elementos inoculantes não são eliminados pela presença de sílica, e quanto mais baixa for a temperatura menos tempo demorará o metal a solidificar, minimizando o desvanecimento do inoculante.

Esta teoria também explica a grande tendência que tem os ferros nodulares não inoculados para a tempera ledeburítica. Ao juntar magnésio eliminamos as partículas germinadoras endógenas (SiO_2) e não adicionamos outras que fizessem a vez delas.

Também fica explicada a afirmação de Karsay [5] (Stephen Istvan Karsay, 1975) quando afirma que juntar o inoculante com o nodularizante tem o mesmo efeito que junta-lo posteriormente desde que a temperatura de inoculação no segundo caso seja a mesma que a de tratamento no primeiro caso e que os tempos desde o tratamento até ao vazamento sejam os mesmos.

A teoria dos gradientes de silício não explica o facto de, nos ferros fundidos cinzentos lamelares, a inoculação ser mais eficaz a altas temperaturas, pois a temperatura eliminará as heterogeneidades químicas. No entanto para os ferros nodulares a teoria poderá em parte ser considerada. As partículas germens a baixas temperaturas poderão ter a sua actuação reforçada pelo facto de localmente haver grandes concentrações de silício. Se num dado local, ainda que microscópico, houver teores de silício muito elevados por exemplo da ordem de 6% nesse local o diagrama de equilíbrio a considerar não será o diagrama relativo ao teor em silício da liga (2,7 % de Si, por ex.) mas o diagrama relativo a uma liga com 6 % de Si.

A Fig 3 mostra os diagramas Fe-C-Si para 2,0 % Si, e 6 % de Si.

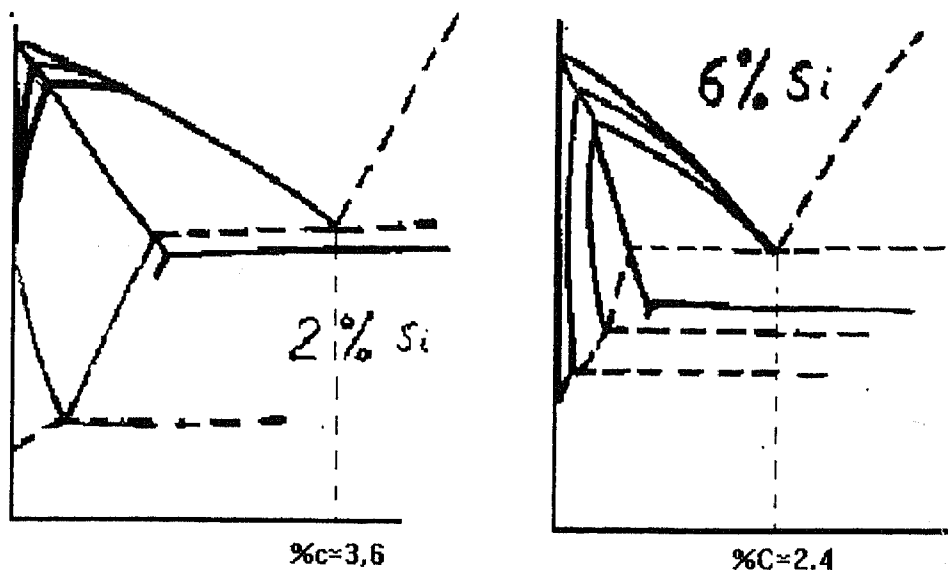


Fig 3 Diagramas Fe - C para 2% C e 6% C Notar o forte deslocamento para a esquerda do ponto eutético e da linha de liquidus correspondente à maior actividade do carbono no banho mais enriquecido em Si

Admitindo que não há gradientes de carbono então nos locais de grande concentração de Si o ferro será fortemente hipereutectico, como se pode ver pela Fig 4

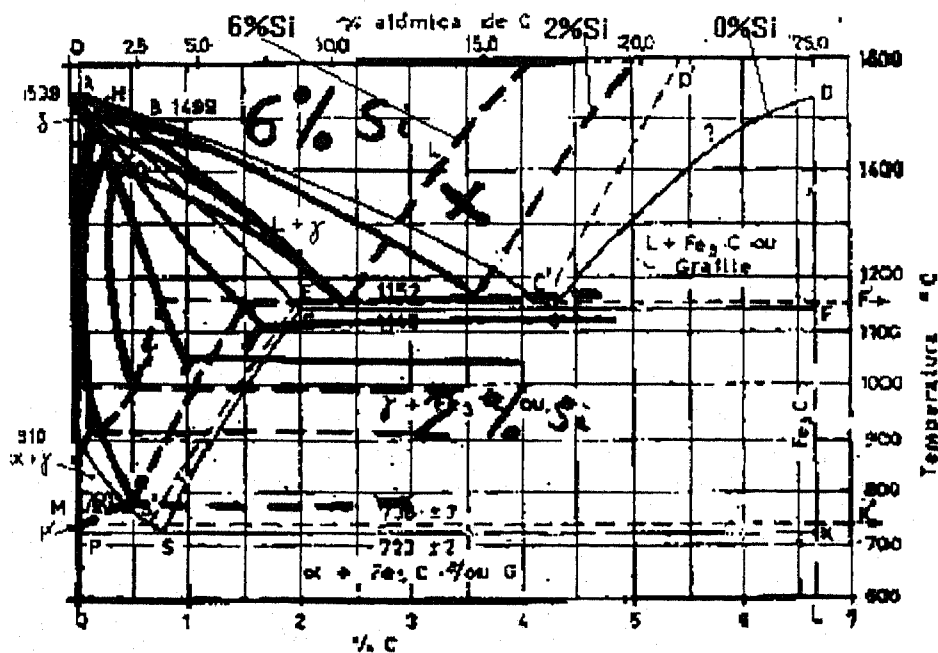


Fig 4

Diagramas sobrepostos – 0% Si ; 2% Si ; 6 % Si

Claro que com a precipitação da primeira parte do nódulo de grafite essa condição hiperuetectica se perde , mas o germen já cumpriu a sua missão . Deste modo a presença de partículas germens (carbonetos de calcio , estroncio, etc,) em locais de grande concentração de silício farão destes locais de eleição para início de precipitação dos nódulos de grafite.

2.2.3.Factores que influenciam a inoculação

2.2.3.1 Temperatura de inoculação

Quanto mais alta é a temperatura de inoculação menor é a resposta à inoculação e consequentemente menor o numero de nódulos por milímetro quadrado.

Acerca deste factor convém fazer algumas considerações. Antes do aparecimento dos ferros nodulares, e quando a grande maioria dos ferros fundidos era produzida em cubilote o efeito da inoculação era muitas vezes posto em causa. Com efeito o cubilote produz um ferro de base já de si com grande tendência a solidificação segundo o diagrama estável devido ao tempo de permanência do metal no cadinho do cubilote , o qual esta parcialmente cheio de coque, que muito lentamente se vai dissolvendo no metal. Ora o carbono, para além de actuar como elemento químico no sentido da solidificação segundo o diagrama estável, tem comprovadamente efeito inoculante sendo até usado em certos inoculantes próprios para ferros fundidos cinzentos.

Por outro lado o cubilote não nos reserva grandes surpresas do ponto de vista de temperatura. É considerado um forno "elástico" que, por assim dizer, perdoa os pequenos erros. Para conseguir temperaturas de sangria da ordem de 1540 °C o forno terá que ser de diâmetro acima de 700 mm , terá que ter coque suficiente na carga e soprado forte. Estes três factores tem que estar presentes simultaneamente . Ora se bem que a soproagem intensa é largamente praticada pois sabe-se que aumenta a produção, o aumento de coque na carga para além do seu custo diminui a produção. Além disso não é um acidental aumento da carga de coque (duas cargas de coque juntas por exemplo) que faz subir a temperatura de sangria. O erro teria que ser prolongado.

Os fornos de chama (nafta, propano, etc.) também não punham em evidencia a necessidade da inoculação. Quando bem conduzidos (chama ligeiramente redutora) dão um ferro de base quase tão bom como o do cubilote. Quando mal conduzidos (chama oxidante) dão um ferro de muito baixo silício absolutamente impróprio para produção de peças a não ser que se faça uma adição de ferrosilício para acerto de composição química. Este ferrosilício também actua como inoculante , mas o seu maior efeito é como corrector da composição química .

Foram os fornos eléctricos que permitiram por em evidencia o efeito da temperatura sobre a inoculação .Extremamente versáteis do ponto de vista de obtenção da temperatura desejada , os fornos eléctricos rapidamente puseram em evidencia o

efeito da temperatura . Os fundidores aprenderam da pior maneira que um sobreaquecimento dava origem a uma muito maior tendência à tempera ledeburítica.

Os fornos eléctricos permitiram também estudar o efeito da temperatura. Esta começa por condicionar as reacções químicas que ocorrem no seio do metal. Sendo basicamente uma liga de ferro, carbono e silício , um ferro fundido liquido está normalmente em contacto com a atmosfera . Esta oxida fundamentalmente o ferro por ser o mais abundante , mas o oxido formado vai ser reduzido pelo silício ou pelo carbono, pois estes dois elementos tem potencial de oxigénio mais baixo que o do ferro, devolvendo o ferro ao banho. O carbono, ao reduzir o oxido de ferro, produzirá CO (pois a esta temperatura, da ordem de 1440 °C, é o oxido de carbono mais estável de acordo com o diagrama de Boudouard). O silício produzirá SiO₂.

É aqui que a temperatura tem influencia fundamental. O potencial de oxigénio do silício sobe com a temperatura ao passo que o do carbono desce. O ponto de equilíbrio anda, como vimos, por volta dos 1440 °C variando ligeiramente com os teores de silício e de carbono. Deste modo acima de 1440 °C o oxido que se forma é o de carbono que sendo um gás se liberta . Isto é claramente observável olhando para a superfície do metal, pois o CO é combustível e o metal parece desprender chamas. Abaixo de 1440 °C o oxido que se forma é o SiO₂ , dando origem à formação de placas de oxido à superfície em forma de pétalas. O fenómeno recolheu do francês o nome de "fleurage".

A manutenção prolongada do ferro fundido a uma temperatura superior a 1440°C tem como consequência uma tendência à tempera ledeburítica , a qual não pode ser explicada pelo ligeiro abaixamento do teor em carbono, uma vez que baixando novamente a temperatura do metal abaixo de 1440 °C a tendência à tempera ledeburítica diminui (Jean Van Eeghem 1979) apesar de agora ser o silício que vê o seu teor a baixar. É sabido que tanto o carbono como o silício, actuando como elementos de liga, tem ambos o efeito de baixar a tendência à tempera ledeburítica do ferro fundido.

Aparentemente, num Ferro Fundido não inoculado, as partículas de SiO₂ terão um efeito germinador para a grafite. Admite-se que sejam mesmo os germens naturais mais abundantes num Ferro Fundido não inoculado. Sendo essas partículas reduzidas pelo carbono para temperaturas superiores às de equilíbrio (1440 °C aprox.) o poder germinador do banho diminui após estágio prolongado a altas temperaturas.

Este facto só pode ser explicado pela diferente tendência de germinação durante a solidificação .

Mas estado de germinação e resposta à inoculação são duas coisas distintas. Um ferro fundido pode estar num alto estado de germinação e praticamente não responder à inoculação e vice versa. De uma maneira geral acima da temperatura de equilíbrio (1440°C aprox.) o ferro fundido tem um baixo número de germens mas responde muito bem à inoculação. (entendemos por resposta à inoculação ao aumento do numero de células eutecticas por mm²). Reciprocamente abaixo da temperatura de equilíbrio o

metal tem maior número de germens naturais mas a sua resposta à inoculação é pior[6] (Jean Van Eeghem 1979).

De uma maneira geral o numero final de células eutecticas é maior nos casos em que se inocula um ferro cuja temperatura esta abaixo da temperatura de equilíbrio pois a menor resposta à inoculação é compensada pelo bom estado de germinação. Mas para certos inoculantes de qualidade excepcional (poucos) A situação é inversa , isto é, o máximo numero de células eutecticas obtém-se inoculando o ferro fundido acima de 1440 °C . (Jean Van Eeghem 1979)

Passando agora para o ferro nodular temos que assinalar algumas diferenças de comportamento. A mais importante é a absoluta necessidade de inocular o ferro nodular seja qual for o seu estado de germinação. Alem disso um bom inoculante para ferro fundido cinzento não é necessariamente um bom inoculante para nodular. Por exemplo os inoculantes contendo grafite tem muito pouca eficácia na inoculação dos ferros nodulares.

Por outro lado dissemos que a inoculação nos ferros nodulares se pratica após esferoidização. Esta consiste na introdução de uma pequena quantidade de Mg ou outro elemento esferoidizante no banho. No caso do magnésio o teor final a conseguir varia ente 0,03 % a 0,05 %. A quantidade a introduzir depende de muitos factores. Um dos mais importantes é o teor em enxofre antes da esferoidização. Em relação a este diremos que teores de 0,09 % são absolutamente comuns nos ferros cinzentos e proibitivos nos ferros destinados à nodularização. Mas o importante neste caso é o facto de o ferro nodular no momento da inoculação ter dissolvida uma pequena quantidade de Mg cujo potencial de oxigénio é muito mais baixo que o do silício e o do carbono (por outras palavras, o MgO é muito mais estável que o SiO₂ e o CO). Deste modo seja qual for a temperatura de inoculação o banho metálico não tem dissolvidas particulas de sílica como se pensa acontecer nos ferros fundidos cinzentos mantidos durante algum tempo abaixo da temperatura de equilíbrio. As partículas possíveis são de MgO que a experiência mostra não terem qualquer efeito inoculante ao contrário do que se pensa acontecer para as partículas de SiO₂. Sendo assim o ferro nodular após nodularização estará nas mesmas condições que um ferro fundido cinzento mantido acima da temperatura de equilíbrio. A ser valida esta hipótese explicará o facto de um ferro nodular não inoculado produzir uma pequena quantidade de nódulos e muitos carbonetos. A pequena quantidade de nódulos seria devida ao baixo estado de germinação , e a presença de carbonetos seria devida não só à mesma razão mas também ao facto de o Mg ser um poderoso formador de carbonetos. O ferro nodular após nodularização responde muito bem à inoculação , pelo menos em comparação com os ferros fundidos cinzentos. Se aceitarmos como critério de comparação o número de células eutecticas por milímetro quadrado versus numero de nódulos por milímetro quadrado teremos que aceitar que o ferro nodular responde pelo menos tão bem à inoculação como o ferro fundido cinzento. O gráfico da Fig. 5 (Stephen Istvan Karsay 1975) mostra a relação entre a temperatura de inoculação e o numero de nódulos por milímetro quadrado. Este gráfico bem como o da figura seguinte deverão ser entendidos apenas qualitativamente. Os valores obtidos foram obtidos em circunstancias bem definidas e variam de caso para caso. Contudo a tendência mantém-se.

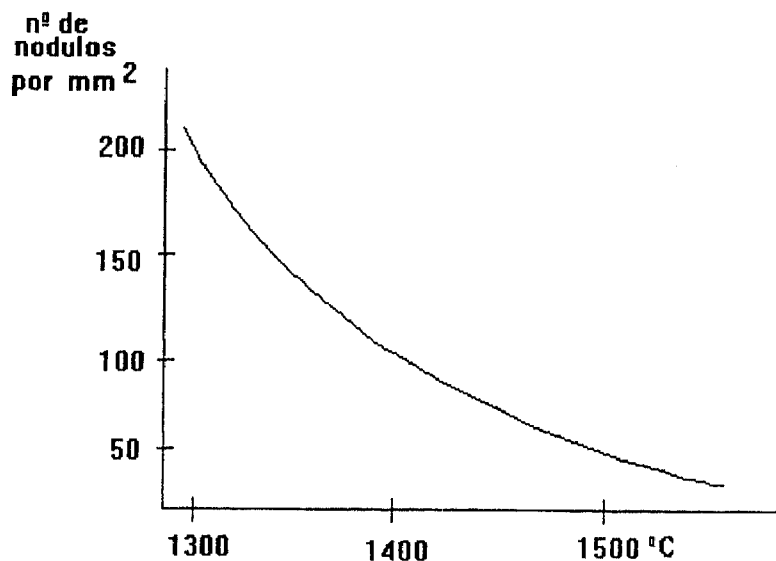


Fig 5 Relação entre a temperatura de inoculação e o numero de nódulos por mm quadrado. (Segundo Stephen Istvan Karsay 1975)

2.2.3.2. Influencia do tempo.

Também o tempo decorrente entre o momento de inoculação e o vazamento tem uma forte influencia no numero de nódulos por milímetro quadrado. Quanto maior é este tempo menor é o numero de nódulos por milímetro quadrado. Imediatamente após a inoculação o ferro nodular está numa situação de "super inoculação". Esta situação evolui muito rapidamente de inicio e mais lentamente depois mas sempre no sentido da diminuição do efeito de inoculação. Ver figura 6

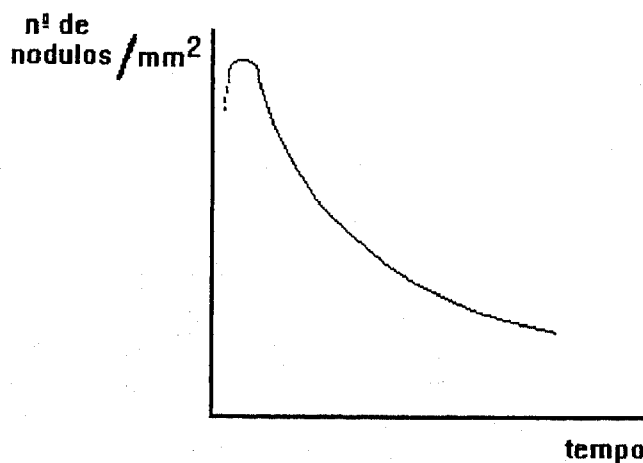


Fig. 6 - Relação entre o tempo decorrente entre a inoculação e o vazamento. O máximo da curva é atingido cerca de 5 segundos após a inoculação. (Segundo Stephen Istvan Karsay 1975)

O numero de nódulos por milímetro quadrado obtido depende, para igualdade de todos os outros factores, do tempo que decorre entre a inoculação e a solidificação. Deste modo, para a mesma peça, quanto menor o tempo decorrido entre a inoculação e o vazamento maior o numero de nódulos por milímetro quadrado. Mas mesmo na mesma peça diferenças de espessura (logo tempos de solidificação diferentes) implicam diferenças no numero de nódulos por milímetro quadrado.

Tratando-se de moldações permanentes, o tempo decorrente entre a inoculação e a solidificação é muito curto quando comparado com a solidificação em moldes de areia. Mesmo assim, e até bem pouco tempo, o ferro nodular vazado em coquilha era considerado impraticável, pois a alta velocidade de solidificação conduzia à obtenção de carbonetos primários. Com a melhoria da qualidade dos inoculantes foi possível obter ferro nodular ferrítico em bruto de vazamento utilizando moldes permanentes..

2.2.3.3. Influencia da quantidade de inoculante

A quantidade óptima de inoculante varia entre 0,2 % e 0,7 % .Em casos raros vai-se até 1%. O valor mais comum é 0,3 % . A quantidade óptima depende de muitos factores e deverá ser estudada em cada caso. A única regra que podemos ter como segura é que ha uma quantidade óptima para cada caso. (Karsay, 1975)

2.2.4. Métodos de inoculação:

Ha dois grandes grupos de métodos de inoculação .A clássica e a tardia. Para moldações em areia, na grande maioria dos casos, usa-se a inoculação clássica e só em casos muito especiais, a inoculação tardia. Para vazamento em coquilha a inoculação tardia é praticamente obrigatória . (exceptuam-se peças de grande espessura)

A divisão feita desta maneira baseia-se no tempo. Na prática a inoculação tardia é, geralmente , feita ou no jacto de metal entre a colher de vazamento e a bacia de vazamento, ou no interior do sistema de gitagem. A inoculação clássica é efectuada antes da operação de vazamento.

Já atrás fizemos referencia os métodos de inoculação clássica. Sem duvida o mais usado é o que consiste em adicionar o inoculante ao jacto de metal durante a trasfega de metal da colher de esferoidização para a colher de vazamento.

A fig. 7 mostra o processo em esquema

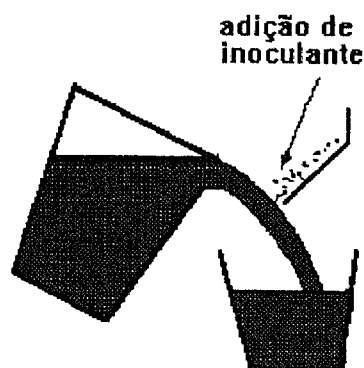


Fig 7 - Esquema do processo clássico de inoculação.
Durante a trasfega entre a colher de nodularização e a colher de vazamento o inoculante é adicionado na corrente de metal.

Segundo Stephen Istvan Karsay (1975) quando apenas se usa uma colher para realizar as operações de tratamento e vazamento temos três possibilidades :

- 1ª) - Esferoidizar dois terços do metal e acabar de encher a colher com o resto do ferro adicionando o inoculante durante a adição do terço final.

Este método é o que produz melhores resultados

- 2ª) - Colocar o inoculante no fundo da colher de esferoidização por cima da liga de magnésio. Este método é largamente utilizado, produzindo resultados aceitáveis. É o mais simples dos três.

- 3ª) - Adicionar o inoculante na superfície do metal após o tratamento de esferoidização. Produz piores resultados que os outros dois e obriga a uma agitação mecânica da colher para promover a dissolução do inoculante. Curiosamente é mais usado que o primeiro método apesar de produzir piores resultados e ser mais trabalhoso.

A inoculação tardia é usada na moldação em areia para casos em que a inoculação clássica não é suficiente para impedir a tempera ledeburítica ou para conseguir uma matriz com mais ferrite. O método mais comum é a colocação do inoculante no gito, normalmente no canal de distribuição. É normal o gito ser desenhado tendo já em atenção o facto de ir ser usada a inoculação no molde. Na moldação em areia não é comum o método de inoculação no jacto de vazamento. No entanto algumas técnicas especiais de inoculação fazem a inoculação no jacto de vazamento através de barras inoculantes ou de fios metálicos ocultos contendo no interior partículas inoculantes que são introduzidos continuamente no jacto de metal junto ao bico da colher de vazamento.

A figura 8 mostra em esquema o método da barra inoculante. A descida da barra é feita por gravidade.

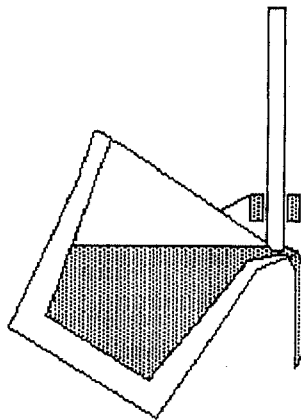


Fig. 8 - Inoculação feita por barra inoculante sinterizada ou electrofundida, no bico de vazamento da colher. A corrente de metal inocula-se e desgasta a barra que desce por gravidade.

A barra inoculante pode ser sinterizada ou electrofundida.

Em moldação permanente de ferro nodular a inoculação tardia é absolutamente necessária. Além disso o inoculante terá que ser da melhor qualidade. Os métodos possíveis são os mesmos que para a moldação em areia no entanto o presente trabalho mostrou que há limitações e cuidados particulares a ter em conta como veremos na Segunda parte desta tese.

As condições são muito diferentes em coquilha, relativamente à areia. A grande diferença é o tempo que decorre entre o vazamento e a solidificação, que em coquilha é muito mais curto. Este facto funciona em dois sentidos completamente opostos.

Por um lado sendo o tempo que decorre entre o vazamento e a solidificação muito curto a eficiência da inoculação é sem dúvida muito maior. Este facto é indiscutível se atendermos que em areia 300 nódulos por milímetro quadrado significa uma inoculação excepcional, ao passo que o mesmo número em coquilha significa uma péssima inoculação. Os valores mais elevados de número de nódulos por milímetro quadrado em coquilha ultrapassam os 3000.

Mas por outro lado um tempo mais curto entre o vazamento e a solidificação significa também uma maior velocidade de arrefecimento. Isso significa uma maior tendência para a tempera ledeburítica. Em resultado o inoculante terá que ser de óptima qualidade para evitar a formação de carbonetos.

Para além disso, o presente trabalho veio mostrar que uma inadequada inoculação embora produzindo um elevado número de nódulos por milímetro quadrado e evitando por completo a formação de carbonetos pode ser (e é, se não forem tomadas precauções especiais) causa de defeitos que baixam drasticamente as características mecânicas do ferro nodular, de tal modo que fica abaixo de qualquer norma. O completo diagnóstico destes defeitos e o estabelecimento dos métodos a seguir para os evitar demoraram vários meses a ser estabelecidos e são sem dúvida o ponto mais importante deste trabalho.

2.2.5. Tipos de inoculantes

As duas características mais importantes dos inoculantes são a sua composição química e a sua constituição física. Ambas têm uma enorme influência no seu comportamento e no seu efeito inoculante.

A grande maioria dos inoculantes são ferrosilícios. Mas nem o ferro nem o silício têm qualquer poder inoculante. Após se ter demonstrado que são substâncias como o cálcio, bário, estrôncio, zircónio, etc. (que estão presentes nos ferrosilícios comerciais) que são as responsáveis pelo efeito inoculante, foram desenvolvidos inoculantes nos quais estes elementos foram propositadamente introduzidos.

Está definitivamente estabelecido que os inoculantes contendo grafite apenas são eficazes nos ferros fundidos cinzentos e para temperaturas de inoculação abaixo da temperatura de equilíbrio. Por outro lado, sabe-se que o efeito inoculante se desvanece com o tempo. Deste modo, para a inoculação clássica tem mais importância a resistência do inoculante ao desvanecimento ao passo que para a inoculação tardia é mais importante o poder inoculador inicial.

Quanto à constituição física os inoculantes podem ser granulados ou apresentarem-se com a forma de blocos. Estes podem ser obtidos por sinterização ou por electrofusão.

Os finos (abaixo de 0,2 mm) deverão ser excluídos dos inoculantes pois tendem a aderir à superfície do metal líquido e, por isso, a sua incorporação no metal é difícil. Para moldação em areia cada inoculante é fornecido em diversas granulometrias. Para selecção da granulometria mais conveniente tem que ser considerados varios factores para além do poder de dissolução do inoculante. O tamanho da colher de vazamento, a espessura das peças a vazar o numero de peças a vazar por colher, o tempo médio de espera do metal na colher tem de ser tidos em consideração na escolha da granulometria do inoculante.

Como mostrarão os resultados experimentais deste trabalho os inoculantes proprios para inoculação de ferro nodular em coquilha são aqueles que se baseiam em blocos inoculantes electrofundidos. Os inoculantes granulados e os blocos sinterizados, deram piores resultados por originarem defeitos e, por isso, deverão ser excluídos se se tratar de ferro nodular vazado em coquilha.

2.3. Tecnologia das coquilhas

2.3.1. Generalidades

2.3.1.1 Definição

Uma coquilha é uma moldação permanente metálica que pode no entanto utilizar um ou mais machos destrutíveis e no qual a liga líquida é vazada por gravidade.

Esta definição é um tanto ambígua pois parece não haver um separador claro entre uma moldação de areia que utiliza um arrefecedor metálico, e um molde metálico que utiliza um macho de areia. Também não é pela adopção de uma percentagem arbitrária de material de moldação destrutível que poderemos complementar a nossa definição. Diremos antes que uma coquilha é utilizada de uma maneira repetitiva, a uma cadência variável de coquilha para coquilha, mas perfeitamente regular dentro de cada caso, o que se traduz no estabelecimento de um ciclo térmico de que a figura 9x é esquema elucidativo, e no qual a ordenada mínima é sempre superior à temperatura ambiente.

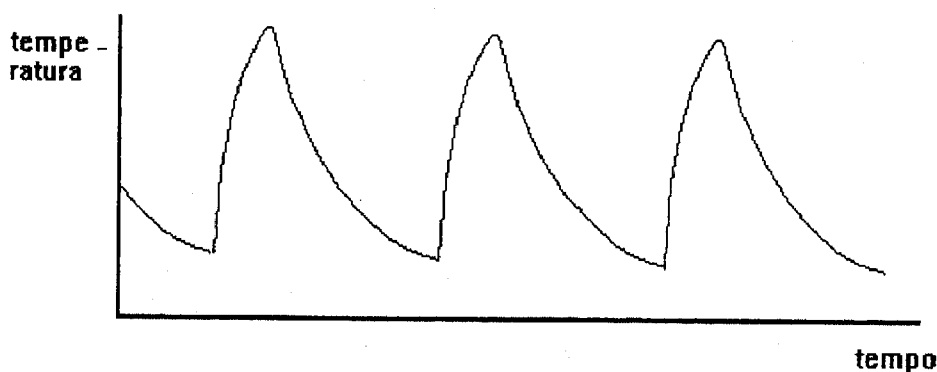


Fig. 9 Gráfico tipo da evolução da temperatura de um ponto da coquilha ao longo dos vários vazamentos.[3]
(Le remplissage des empreintes de moules en sable-
Centre Technique des Industries de Fonderie (sem data))

2.3.1.2 História sucinta

Ao que parece no início da idade do bronze a invenção da moldação permanente precedeu a da moldação em areia. Esta afirmação baseia-se no facto de que intelectualmente parece mais lógico criar uma cavidade com a forma da peça que se pretende do que criar um positivo (o molde , ou modelo) para depois executar o negativo (ou seja a moldação). Mas quer seja assim quer não , a realidade é que se encontraram numerosas coquilhas nos locais metalúrgicos pré-históricos. Os mais antigos são de pedra , e os mais recentes são de bronze, tendo, alguns, complexos sistemas de machos.

No entanto cabe aqui dizer que a tecnologia de fundição de bronze em coquilha é uma das mais difíceis de levar à pratica e isso levou os fundidores da antiguidade a adoptar outras técnicas. Excepção feita para algumas tentativas de produção de balas de ferro fundido no século XV , para a produção de balas de chumbo e para a produção de recipientes de estanho, a coquilha sofreu uma longa noite que só acabou com o aparecimento do alumínio no fim do século passado.

A partir desta altura a coquilha tem um enorme desenvolvimento , iniciado a partir das ligas leves, as quais são particularmente adequadas ao vazamento em moldes metálicos, seguindo-se-lhes os cupro-alumínios, os ferros fundidos, os latões e os bronzes.

Actualmente , a fundição em coquilha tem o seu lugar entre os diferentes processos de fundição e para muitos casos constitui sem duvida a melhor solução. Actualmente 40 % das ligas leves e 90 % dos latões vulgares são vazados em coquilha. Para os restantes casos a percentagem é algo mais baixa , mas deveremos ter em atenção que o processo de vazamento em coquilha é particularmente adaptado à produção de peças pequenas e médias, sendo as mais pesadas domínio da moldação em areia.

2.2.1.3 Vantagens e limitações do vazamento em coquilha.

2.3.1.3.1 Vantagens económicas.

--- Permanência

A vantagem mais evidente de uma moldação permanente é de natureza económica , e decorre do facto de que precisamente o molde é permanente, permitindo produzir um grande número de peças . Ao contrário um molde de areia é destruído após cada vazamento. No entanto isto precisa de ser clarificado pois apesar de o número de peças produzido por uma coquilha poder ser muito elevado , ele não é infinito, especialmente para as ligas de temperatura de vazamento elevadas. Este facto pode constituir uma parcela importante do preço de revenda. Uma análise mais aprofundada mostra que mesmo dentro do domínio económico existem outras vantagens tão convincentes como a permanência.

--- Atravancamento.

O posto de trabalho de um coquilhador (ou o espaço ocupado por um sistema automático de vazamento em coquilha) é sem qualquer espécie de duvida o menos

exigente em termos de espaço necessário. A área a comparar é a necessária para assegurar a mesma produção em areia. Silos de areia nova e usada, telas transportadoras de areia nova e de areia de retorno, máquinas de moldar, parque de moldações (vazadas e por vazar), áreas de armazenamento de matérias primas, grelha de abate, tapetes de retornos de caixas ... etc... etc...

Esta vantagem é difícil de traduzir em número, mas na grande maioria das fundições há uma enorme falta de espaço e poucos são os gerentes que a médio prazo não pensam em aumentar a área coberta da sua fundição. A Fundição em coquilha é um dos métodos que asseguram maior produção por metro quadrado.

--- Manutenções

Numa fundição por moldação em moldes metálicos as manutenções reduzem-se às decorrentes da preparação dos moldes metálicos no início da série, ao seu regresso e acondicionamento em armazém quando do fim da série, à produção de metal líquido e à eventual produção de machos. Pensemos só no trajecto que percorre a areia desde o seu início na galga até o seu retorno aos silos de areia usada na moldação clássica.

--- Produtividade.

Já vimos que se fizermos as contas por metro quadrado a produtividade das fundições em coquilha poderá ser a mais elevada. No entanto se calcularmos esta produtividade em toneladas (ou em facturação) por operário e por unidade de tempo as comparações são mais delicadas, e é raro que se disponha de dados correspondentes à mesma produção. No entanto admite-se que a produtividade em coquilha se situa entre a da areia e da moldação sob pressão.

--- Instalações

Em muitos casos os diversos elementos das coquilhas são deslocáveis à mão. A instalação do posto de trabalho reduz-se a um forno e a um suporte mais ou menos universal (por vezes uma simples mesa).

No entanto a coquilha presta-se muito bem à mecanização. Os meios utilizados podem ir desde o simples macaco pneumático (ou hidráulico) que abre e fecha uma coquilha composta por duas partes, às máquinas inteiramente automáticas. Os investimentos podem assim variar muito dependendo do nível de mecanização pretendido. No entanto para níveis idênticos os investimentos são quase sempre substancialmente inferiores aos necessários aos outros processos.

Por outro lado devido à sua reduzida utilização espaço é possível fazer modificações de layout a baixo custo. Estas modificações são por vezes desejáveis por exemplo nos casos de uma mudança de fabrico.

--- Ambiente

O vazamento em coquilha põe poucos problemas no domínio do ambiente. A emissão de poeiras e de fumos, bem como o nível de ruídos podem ser mantidos a um nível muito baixo. As medidas a tomar neste domínio são portanto pouco custosas.

empoeiramento pelo talco, muito usado em ligas leves, pelo negro de fumo no caso de ferros fundidos e a presença de vapor de água no caso das tintas para latões são problemas fáceis de eliminar a baixo custo.

Ao contrario a radiação térmica emitida pelos fornos de manutenção, pelas coquilhas e pelas peças vazadas e ainda não evacuadas põe por vezes problemas aos postos de trabalho. A solução é o isolamento térmico dos fornos, alias desejável do ponto de vista de economia de energia, e pela adopção do sistema de evacuar as peças vazadas tão rapidamente quanto possível. A parte mais difícil é proteger o operador da radiação emitida pela sua ferramenta de trabalho, a qual nunca é muito severa.

Em resumo se exceptuarmos os aparelhos de fusão (comuns a todos os sistemas de vazamento) os problemas causados pelo vazamento em coquilha estão confinados ao interior da fabrica . Eles limitam-se a problemas de conforto , a maioria dos quais é eliminavel por meios simples.

---Rendimento.

Tendo em conta o processo de solidificação (que veremos mais adiante) a taxa de alimentação é quase sempre mais baixa que em areia. Por outro lado os sistemas de gitagem são normalmente menos volumosos. É no entanto necessário reconhecer que esta vantagem tende a desaparecer no caso de pequenas peças que em areia podem ser vazadas em cachos de vários andares.

---Rebarbagem

A rebarbagem das peças vazadas em coquilha é normalmente muito simples. Ela limita-se, na maior parte dos casos, à separação do sistema de gitagem e dos alimentadores por serragem, corte puro, ou até por fractura à mão, ou por pancada seguida de esmerilagem.

2.3.1.3.2. Vantagens técnicas

--- Precisão

A precisão das peças é evidentemente função da precisão do molde no qual elas são vazadas. No caso de um molde metálico esta precisão é a de um dado conjunto metálico, diminuída das folgas necessárias para o funcionamento a quente . No entanto a influencia de outros parâmetros tais como temperatura , tempo de espera ate à desmoldação é muito mais importante que em moldação em areia.

Resulta daí que para se conseguir uma tolerância dimensional muito apertada teremos que ter um muito bom controle das condições operatórias assim como dispor de coquilhas de muito boa precisão dimensional. Deste modo teremos uma precisão dimensional muito boa , apenas superada pela fundição sob pressão. Mas se estas precauções não forem tidas em conta , então teremos uma precisão pouco melhor que a obtida por uma cuidadosa moldação em areia.

--- Pele

Na maior parte dos casos o vazamento em coquilha permite obter peças com uma pele excepcional . Deste modo exceção feita para as peças que devem ter um acabamento especular (torneiras cromadas, quinquilharia de construção civil, etc.) as peças vazadas em coquilha são utilizadas tal qual exceção, feita para a maquinagem .

Esta bela pele apresenta ainda uma outra vantagem muito apreciada pelos maquinadores: Não ha o risco de encontrar inclusões de areia.

--- Estrutura

Devido ao seu mais rápido arrefecimento a estrutura das peças vazadas em coquilha é nitidamente diferente da estrutura das peças vazadas em areia. Por um lado apresenta um grão mais fino , e por outro lado (dependendo da liga) a proporção das fases presentes pode-se afastar mais ou menos da proporção correspondente ao diagrama de equilíbrio. Este ultimo fenómeno negligenciavel no caso das ligas leves tem bastante importância no caso das ligas de cobre , e é de capital importância no caso dos ferros fundidos. Assim é possível obter a mesma estrutura metalográfica nos bronzes com um teor em estanho nitidamente inferior ao necessário de acordo com o diagrama Cu-Sn, ou então obter ferro branco para maleável com um teor em silício proibitivo em areia para uma dada espessura.

Quanto ao interesse de um grão fino este normalmente é vantajoso no que respeita à resistência mecânica e à estanquicidade.

--- Maquinabilidade

Já falámos na ausência de inclusões de areia na pele , o que constitui só por si uma vantagem muito apreciada pelos maquinadores. Poderemos acrescentar , no caso das ligas de temperatura de vazamento elevada , a ausência de uma fina camada silicatada , que se forma nas peças vazadas em areia e que produz um acentuado desgaste das ferramentas de corte.

Por outro lado um grão fino é muito vantajoso do ponto de vista da maquinabilidade. Este facto é particularmente importante nos ferros fundidos , nos quais um grão fino arrasta à formação de uma grafite também muito fina traduzindo-se pela possibilidade de utilizar velocidades de corte substancialmente mais elevadas do que no caso das peças vazadas em areia.

2.3.1.3.3. Limitações do processo

--- Séries

Um molde metálico é uma peça relativamente cara , e a execução de uma coquilha não poderá ser encarada a não ser para uma série que permita amortizar o elevado custo inicial. Claro que para este calculo entram não só os parâmetros que acabamos de referir mas também os beneficios colhidos das outras características que apresentam as peças vazadas coquilha . O calculo deverá ser feito com seriedade e na balança deverão pesar não só os custos devidos ao processo de moldação e vazamento, mas também as poupanças devidas as características próprias das peças vazadas em coquilha. Conhecem-se da industria numerosos casos de pequenas series nos quais o

processo se mostrou rentável ao contrário do deixavam prever estudos preliminares superficiais.

--- Dimensões das peças

Teoricamente não ha limites para o tamanho das peças vazáveis em coquilha. De facto estes limites são fixados pela necessidade de manipular as partes que constituem as coquilhas. Se os meios que actualmente dispomos nos permitem deslocar facilmente nos ângulos requeridos elementos de coquilha de varias centenas de Kg , os problemas tornam-se mais difíceis para partes pesando varias toneladas.

No entanto o avanço em relação aos meios disponíveis permitem vaziar actualmente peças de mais de 10 toneladas. Mas são casos excepcionais e , na pratica corrente , uma peça de 50 Kg é já considerada uma peça pesada. Na imensa maioria dos casos o peso das peças vazadas em coquilha varia entre algumas dezenas de gramas e uma dezena de Kg.

2.3.1.4 . Ligas apropriadas ao processo

Por ordem de temperatura de fusão crescente os principais tipos de ligas industrialmente vazadas em coquilha são :

--- Ligas de chumbo e estanho

O vazamento em coquilha destas ligas não apresenta nenhum problema particular. No entanto o seu elevado preço e as suas fracas características mecânicas limitam consideravelmente a sua utilização.

--- Ligas de zinco

As ligas de zinco usadas em fundição são fundamentalmente os "zamac" (fundamentalmente ligas de zinco alumínio e magnésio e por vezes cobre com mais de 90 % de zinco) mas a grande maioria da tonelagem vai para a fundição sob pressão. O vazamento em coquilha não apresenta problemas mas as ligas são muito sensíveis ao sobreaquecimento.

--- Ligas de Alumínio

O facto de cerca de 40 % das ligas de alumínio serem vazados em coquilha dispensa qualquer tipo de comentários.

---Latões

Os latões tal como as ligas de alumínio são perfeitamente aptos ao vazamento em coquilha.

---Bronzes

As propriedades de fundição do bronze ao estanho são sensivelmente menos boas do que geralmente se pensa , e o seu vazamento em coquilha foi considerado durante muito tempo impossível. Actualmente o problema esta parcialmente resolvido mas é ainda considerado impossível executar pecas estanques no interior de um macho. É por isso que as torneiras de sede são consideradas irrealizáveis em coquilha. No entanto certas peças mecânicas e também válvulas de passagem directa não apresentam problemas de maior.

--- Cupro-Alumínios

As diversas nuances de Cupro-Alumínios são perfeitamente aptas ao vazamento em coquilha, e o processo é largamente utilizado para a produção de pequenas peças.

---Ferros fundidos

Ainda que relativamente pouco utilizada , esta tecnologia parece ser perfeitamente viável de tal modo que nos países de leste é largamente utilizada e é responsável por 8 % da produção total de peças em ferro fundido o que é bastante significativo se tivermos em conta que se trata de peças pequenas e médias.

--- Aços

O vazamento dos aços em coquilha é ainda pouco significativo e os problemas que técnicos estão ainda longe de estar resolvidos. No entanto tem-se feito progressos bastante animadores no campo dos aços inoxidáveis e dos aços ao manganês (12%)

Esta rápida enumeração cobre a maior parte das ligas usuais mas não é de modo nenhum restritiva. Nada impede à priori de vazar em coquilha uma qualquer liga de fundição. No entanto convém lembrar que a cada liga corresponde uma tecnologia bem definida , nomeadamente no que respeita aos sistemas de gitagem , pinturas , temperatura da coquilha , para além do facto de que uma coquilha , perfeitamente apta para produzir peças de uma determinada liga , pode ser absolutamente incapaz de produzir uma única peça boa noutra liga , mesmo que esta seja perfeitamente apta para o vazamento em coquilha.

2.3.2. Aspectos térmicos:

2.3.2.1 Natureza das trocas térmicas em jogo:

Seja qual for o processo utilizado há um conceito essencial em fundição: Um molde é um permutador de calor.

Antes de estudar a concepção prática de uma coquilha, a qual terá sempre como ideia de base subjacente o conceito anterior, é indispensável examinar em primeiro lugar as condições necessárias para que esta troca térmica se realize de maneira satisfatória.

Um molde, após vazamento, deverá absorver em condições bem determinadas uma quantidade de calor

$$q = M (C(T_v - T_a) + Cl_f)$$

sendo:

M = massa de liga vazada

C = calor específico da liga (*)

T_v = temperatura de vazamento

T_a = temperatura de abate

Cl_f = calor latente de fusão

Esta quantidade de calor é a que o metal põe em jogo para passar do estado líquido à temperatura de vazamento ao estado sólido à temperatura de abate.

(*) Trata-se de uma expressão simplificada. Rigorosamente seria necessário tomar em consideração que o calor específico varia com a temperatura e com o estado (sólido ou líquido)

No caso de vazamento em moldes permanentes , onde as operações de vazamento se repetem a uma dada cadencia , e devem ser efectuadas em condições idênticas de peça para peça o problema complica-se um pouco. Com efeito é necessário considerar , não um vazamento isolado , mas uma sucessão de vazamentos e por consequencia a quantidade de calor posta em jogo por unidade de tempo será:

$$Q = n q \quad \text{ou} \quad dQ/dt = dn/dt \cdot q$$

em que

n = numero de peças vazadas por unidade de tempo

Esta quantidade de calor terá que, imperativamente, ser cedida à vizinhança da coquilha , á qual se poderão juntar meios artificiais . A constância da qualidade impõe que cada peça solidifique e arrefeça nas mesmas condições da precedente , condições estas determinadas experimentalmente como sendo as melhores.

Isto conduz à noção de balanço térmico , o qual deve necessariamente estar em equilíbrio , ou seja: A quantidade de calor cedida pela coquilha deverá ser igual á recebida para que seja mantida uma temperatura de regime correspondente as condições óptimas de fabrico, isto é, as que permitem produzir peças boas à cadencia mais elevada possível.

Veremos mais adiante que dispomos de um certo tipo de artificios para intensificar ou reduzir o fluxo térmico emitido pela coquilha com a finalidade de reequilibrar o balanço em caso de eventual déficit ou excedente. Com efeito , é na coluna debito (capacidade de extracção de calor da coquilha) que na pratica podemos actuar. Isto porque na coluna crédito, os únicos parâmetros que teoricamente podem ser modificados são T_v , T_a e n . Ora por razões económicas evidentes T_a e n devem ser o mais elevados possíveis, e por outro lado por razões técnicas T_v não deverá ser modificada.

Estes artificios devem no entanto der considerados como soluções de recurso, sendo desejável a manutenção de um equilíbrio natural da coquilha.

Vamos agora ver o que condiciona as trocas térmicas peça / coquilha , e coquilha / ambiente.

Ao nível da interface peça / coquilha as trocas são extremamente complexas e, na pratica, só podem ser determinadas globalmente. Os factores em jogo são muitos, e a sua importância relativa varia no tempo numa proporção dificilmente mensurável e inacessível ao calculo salvo nos casos excepcionais de formas geométricas elementares. Voltaremos a este tema quando falarmos de simulação.

Por ordem de importância decrescente (provavelmente) os principais factores são os seguintes:

- Temperatura de vazamento
- Temperatura superficial da coquilha
- Características térmicas dos materiais em presença
- Resistência de contacto na interface
- Contração no estado sólido
- Forma da peça
- No caso das ligas não eutéticas, o intervalo de solidificação

A complexidade do problema provem em grande parte das interações exercidas pelos diversos factores uns sobre os outros. Por exemplo a temperatura de vazamento exerce uma influência directa sobre a temperatura das camadas superficiais da coquilha, que por sua vez determina os tempos de ocorrência do intervalo de solidificação. Quanto à contração no estado sólido e a forma da peça, eles determinam em conjunto o descolamento de certas partes da peça com a consequente formação de uma camada de ar isolante entre a peça e a coquilha, etc.

Vamos nesta altura apenas examinar os dois factores sobre os quais podemos mais facilmente actuar, e que são a temperatura da coquilha e a resistência térmica de contacto. A primeira pode ser largamente influenciada por parâmetros de construção, e a segunda pela correcta utilização de pinturas.

O problema da cedência de calor pela coquilha ao meio ambiente é no entanto mais simples. Neste caso apenas há três factores em jogo:

- A radiação
- A convecção
- A condução ao(s) suporte(s)

aos quais deveremos juntar eventualmente em arrefecimento artificial.

Esta troca apresenta por outro lado a vantagem de poder ser tratada como um fenómeno contínuo. Com efeito se a curva da Fig. 9 representa o que se passa na vizinhança da peça, é preciso também considerar que apesar do fluxo de calor da peça para a coquilha ser descontínuo, a passagem do fluxo térmico através das paredes da coquilha é contínuo mas não instantâneo. Ele sofre o efeito da resistência térmica da coquilha, de tal forma que à medida que nos afastamos da superfície do molde as

variações cíclicas de temperatura estão deslocadas e amortecidas. A Fig. 10 extraída de [7]](M.M. Parisien et Camuset (sem data)) ilustra o que acabamos de dizer.

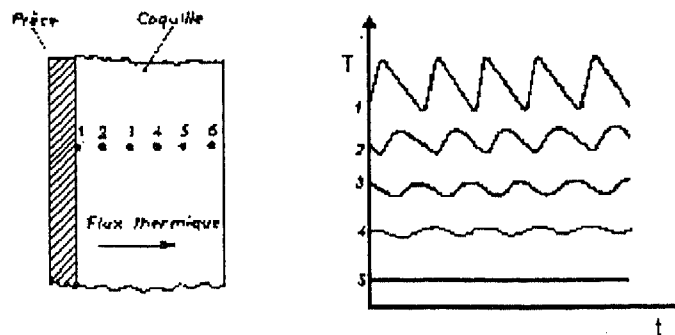


Fig 10 - Evolução da temperatura de varios pontos da coquilha situados a diferentes distancias da superficie moldante

Deste modo se a espessura da coquilha corresponder ao ponto 3 a temperatura da coquilha variará ciclicamente. Por outro lado se a espessura for a correspondente ao ponto 5 ou superior a temperatura exterior da coquilha será constante. Haverá pois um valor limite de espessura a partir do qual a temperatura exterior da coquilha não varia. Esta espessura limite foi determinada , e na pratica verifica-se que corresponde a 4 vezes a espessura da peça. [7]](M.M. Parisien et Camuset (sem data))

Mas na realidade as coisas não se passam exactamente assim. Os factores que regem a quantidade de calor emitido por uma coquilha são , se tudo o resto se mantiver , a sua temperatura e a sua superficie exterior. Ora se nos limitarmos à mesma forma simples é impossível aumentar o volume sem aumentar também a superficie exterior, de modo que aumentar a espessura da coquilha para alem do ponto 5 (4 vezes a espessura da peça) tem também influencia na quantidade de calor emitido pela coquilha pelo facto de aumentar a sua superficie.

Para terminar diremos que o coeficiente global radiação + convecção varia significativamente com a temperatura ao passo que a quantidade de calor fornecida à coquilha pela sucessiva chegada de metal é praticamente constante. Isto tem como consequência prática que a temperatura das coquilhas tende a estabilizar devido a um fenómeno de autoregulação.

2.3.2.2 Condições térmicas a cumprir para a obtenção de peças sãs.

Numa coquilha como em qualquer moldação de fundição a contracção no estado líquido e a contracção durante o fenómeno de solidificação obrigam a garantir que se consegue uma solidificação dirigida de modo a que o déficit de metal que resulta desta contracção possa ser compensado por uma chegada de metal ainda líquido.

Para que isto aconteça dispomos de 3 meios, os quais actuam por vezes simultaneamente:

- Provocar a solidificação mais rápida das partes da peça que, se tal não acontecesse, formariam rechupe.

- Atacar a peça de tal modo que no fim do enchimento o metal quente chegue aos locais que queremos que solidifiquem em último lugar:

- Colocar nos locais desejados reservatórios de líquido de módulo e volume apropriados: os alimentadores.

Estes três meios tem em comum um efeito que consiste na formação na peça de um gradiente térmico de tal modo que a solidificação da peça progrida da maneira desejada, e não simultaneamente em todos os pontos da peça. A sanidade é assim garantida pelo deslocamento do metal líquido proveniente das partes mais quentes em direcção as partes onde há déficit de metal.

Uma das condições a satisfazer para obter uma peça sã é pois a formação de um gradiente térmico que assegura uma solidificação dirigida, seja qual for a forma da peça em questão. No caso das coquilhas é fácil alterar a magnitude de troca térmica entre a peça e o molde pela modificação de dois factores: a temperatura da coquilha e a resistência de contacto. Se aumentarmos globalmente a temperatura da coquilha, ou se pintarmos uniformemente a coquilha, o arrefecimento da peça será mais lento, mas no respeitante à solidificação dirigida o efeito será nulo. Mas nada impede de fazer variar localmente os dois factores citados atrás. Veremos que é relativamente fácil criar artificialmente pontos quentes ou pontos frios nas coquilhas, e fazer variar a espessura da camada de tinta de modo a fazer variar a resistência de contacto entre a coquilha e o metal vazado.

Esta possibilidade de poder obter uma solidificação dirigida não elimina sempre a necessidade de utilização de alimentadores, mas se em certos casos eles são indispensáveis serão sempre mais pequenos do que seriam se não tivéssemos a possibilidade de obter a solidificação dirigida. De qualquer modo a utilização de alimentadores só deverá ser encarada quando todos os outros métodos se revelarem insuficientes, uma vez que estes diminuem o rendimento metal/peça.

2.3.2.3 Possibilidades de regulação da troca térmica metal / coquilha.

Vamos estudar neste momento os meios de que dispomos para modificar localmente a velocidade de arrefecimento das peças pelo lado da temperatura da coquilha.

2.3.2.3.1 Influencia do traçado da coquilha

2.3.2.3.1.1. Influencia da espessura

Se não utilizarmos meios artificiais de arrefecimento e de reaquecimento uma coquilha cede o calor que recebeu das peças:

- à atmosfera circundante, por radiação e condução
- ao seu ou aos seus suportes, por condução.

O seu arrefecimento natural é pois largamente condicionado pelas suas características geométricas.

Quando pensamos nos diferentes meios disponíveis para fazer variar a temperatura de uma determinada zona de uma coquilha, um dos primeiros que consideramos é a espessura. A figura 10 já nos dá uma ideia de que a temperatura de

uma coquilha decresce á medida que nos afastamos da zona da peça. A emissão de calor e por consequencia o arrefecimento aumenta com a temperatura do modo que se mostra na figura 11 .

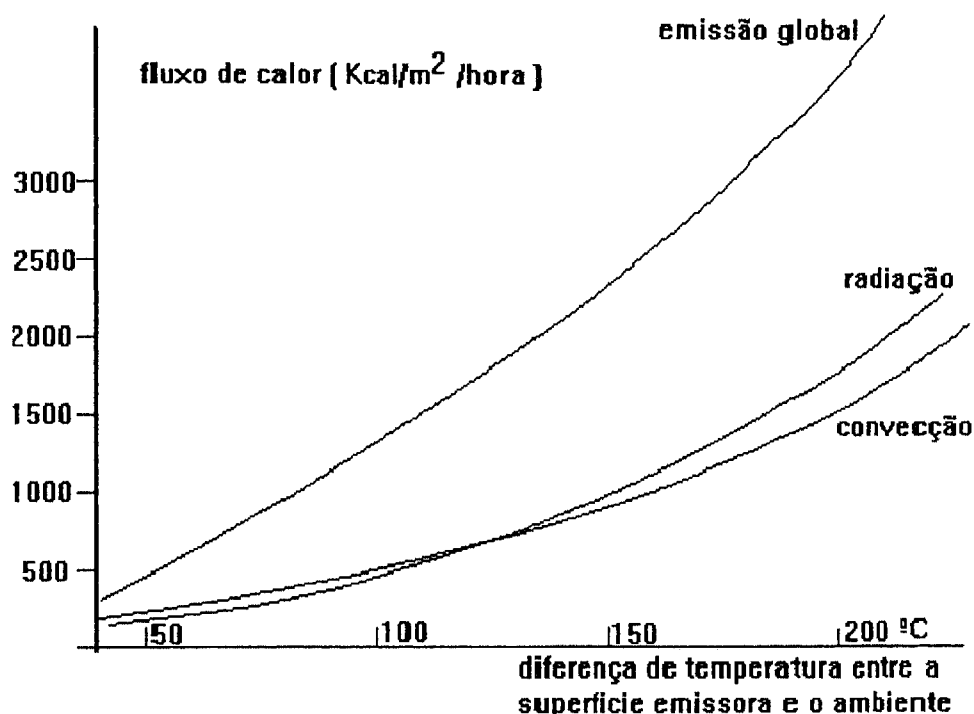


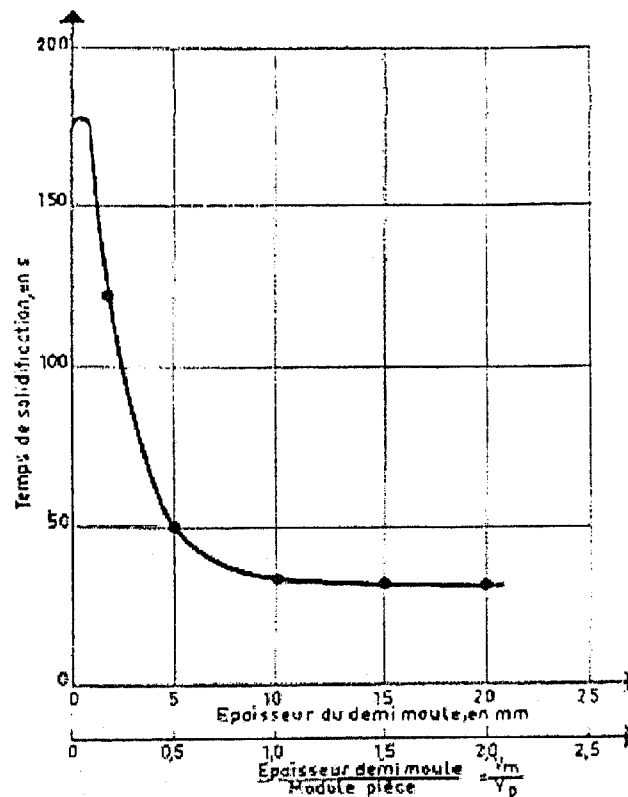
Fig 11 - Emissão directa por radiação e convecção natural de uma superfície baixa em aço [7] (M.M. Parisien et Camuset (sem data))

No entanto às temperaturas usuais das coquilhas e com os materiais em causa acontece que esta emissão de calor é quase sempre inferior a que acontece por condução através de uma parede contínua. Logo, uma parede fina , embora perca mais calor por radiação, serve para obter uma zona quente , uma vez que as perdas por radiação são largamente compensadas por uma menor perda por condução , que é o factor de perda determinante .

No entanto ha dois factores que limitam substancialmente esta possibilidade:

Por um lado , quando a espessura aumenta a sua influencia diminui rapidamente. Por exemplo numa placa de 20 mm de ferro fundido vazado numa coquilha fria verificamos que quando a parede da coquilha tem mais de 15 mm deixa de ter efeito aumentar a espessura da coquilha (Fig 12). Ora por razões evidentes de resistência mecânica não podemos diminuir indefinidamente as paredes das coquilhas.

Por outro lado o fluxo térmico não é indireccional. Ele não está sempre orientado no sentido da peça para o exterior, perpendicularmente à coquilha, mas sim, e sempre, da região mais quente para a região mais fria. Isso implica que criar uma região quente numa coquilha, irá sempre modificar não só a quantidade de calor que localmente se escoar, mas também a direcção de escoamento do calor.



Variation du temps de solidification de plaques en fonte en fonction de l'épaisseur du moule métallique.

Fig 12 - Variação do tempo de solidificação de placas de ferro fundido em função da espessura do molde metálico. (M.M. Parisien et Camuset - La Coulee En Coquille - Ecole Superieure De Fonderie)

Vamos ver outras possibilidades de variar localmente a velocidade de arrefecimento.

2.3.2.3.1.2. Aceleração do arrefecimento

Vimos atrás que o factor preponderante no arrefecimento natural de uma coquilha é a sua superfície exterior. Vimos também que esta superfície não pode ser diminuída indefinidamente. Mas o contrário é fácil de obter. Podemos aumentar largamente a superfície exterior da uma coquilha sem aumentar significativamente a

espessura através da criação de alhetas. Na figura 11 vemos que a partir de uma determinada temperatura a emissão de calor por radiação é superior à perda de calor por convecção. A temperatura a partir da qual isto se verifica ronda os 200 °C. Devemos ter isto em conta quando da construção de alhetas em coquilhas não as construindo paralelas pois isso levaria a que as alhetas radiariam calor de umas para as outras.

Podemos utilizar pitões metálicos em vez de alhetas. O efeito é semelhante.

Até aqui consideramos sempre que cada meia coquilha era um monobloco. Mas nada obriga a que assim seja. Por vezes por motivos construtivos é necessário maquinar a coquilha em varias partes que serão unidas depois. Ora por melhor ajustada que seja esta união haverá sempre uma resistência de contacto. Isto deverá ser tomado sempre em conta pois uma zona de união constitui sempre uma zona muito particular numa coquilha do ponto de vista térmico

2.3.2.3.1.3. Travagem do arrefecimento.

Por vezes temos necessidade de diminuir a velocidade de arrefecimento de certas zonas das peças e por consequencia de diminuir a velocidade de extracção de calor nas zonas correspondentes das coquilhas. Ora o facto de uma união entre duas placas metálicas ser sempre uma zona de dificuldade de extracção de calor poderá ser usado para criar uma zona quente numa coquilha. A figura 13 mostra muito bem como isso pode ser conseguido.

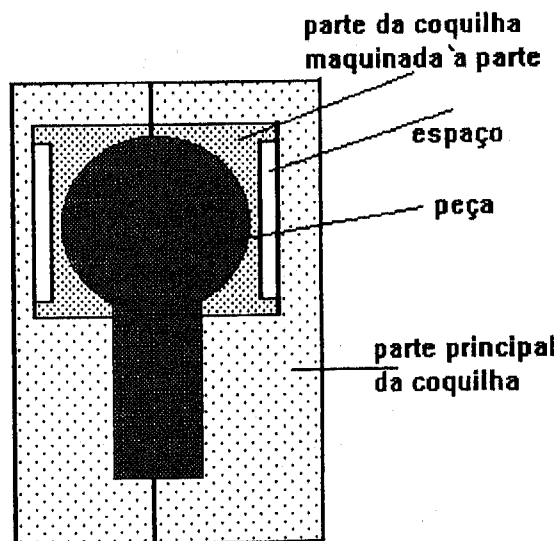


Fig 13 - Criação de uma zona quente. O Espaço assinalado na figura, estando cheio de ar, e sendo o ar calmo muito menos condutor que as ligas metálicas geralmente utilizadas na construção de coquilhas, dificulta muito a transmissão de calor por condução.

A criação de zonas quentes utiliza-se para conseguir a solidificação dirigida em casos em que a geometria de peça é adversa a esta condição.

Neste caso é possível regular com grande precisão a temperatura de regime da parte em questão. Para isso basta reduzir, por aproximações sucessivas, o espaço indicado na figura 13. Esta solução é útil para evitar uma zona fria entre (por exemplo) um alimentador e uma zona quente permitindo uma solidificação contínua.

É igualmente possível travar localmente o fluxo de calor numa coquilha monobloco criando uma solução de descontinuidade parcial entre a face moldante e a face exterior. Uma fiada de furos, de preferência paralelos a estas superfícies constitui uma "barreira térmica" simples, barata e altamente eficaz. (Figura 14).

Como corolário importante do que acaba de ser dito é, numa coquilha produzida por fundição um defeito interno tipo rechupe produz o mesmo efeito que acabamos de estudar, ou seja, actua como barreira térmica.

2.3.2.3.1.4. Condução ao(s) suporte(s)

Uma coquilha está necessariamente pousada ou fixa em qualquer coisa. E tanto pode ser uma simples mesa metálica como uma coquilhadora completamente automatizada. O suporte da coquilha seja ele qual for, estará frio, ao passo que, por definição, a coquilha está quente.

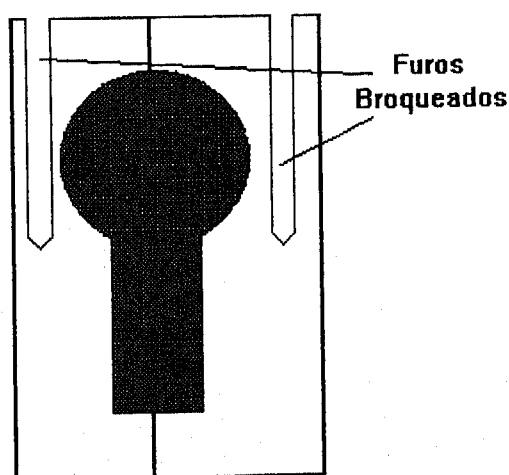


Fig. 14 - Os furos broqueados fazem o mesmo efeito que a camara da figura 13

Deste modo estabelece-se sempre um fluxo térmico em direcção aos suportes, que contribui para o arrefecimento da coquilha. Este fluxo cuja intensidade pode ser não negligenciável poderá criar ou acentuar o desequilíbrio de temperatura desejado, ou contrariamente poderá perturbar o regime térmico desejado (de solidificação dirigida).

Na pratica , na grande maioria dos casos são feitos esforços no sentido de conseguir uma solidificação dirigida de baixo para cima. Salvo em casos de traçado particular é pois o cimo da coquilha onde se dará o fim da solidificação, que se tentará manter a maior temperatura. O simples facto de pousar a coquilha numa mesa constitui por si só um factor favorável.

Mas as possibilidades de que se dispõem são bastante limitadas, e são em muitos casos : fonte de contratempos. Actualmente são feitos esforços no sentido da mecanização da operação de coquilhagem, tanto para eliminar a fadiga física do operador, (ou até para reduzir a acção deste a uma mera missão de controlo) como para obter altas cadencias de produção. Isso implica a utilização de ligações metálicas entre a coquilhadora e as partes que compõem a coquilha , e na maior parte das vezes estas uniões são realizadas à custa de flanges aparafusadas cuja superfície de contacto com a coquilha é extensa . Ora colocar estas uniões tendo como único critério o manuseamento da coquilha, esquecendo o fenómeno de escoamento de calor é , em mais casos do que se pensa, responsável por contratempos industriais de coquilhas que na fase experimental (operadas manualmente) pareciam absolutamente aptas a produzir peças sãs e que uma vez montadas na coquilhadora produzem peças com defeitos , obrigando a repensar o método de ligação da coquilha à coquilhadora.

As soluções para estes casos são no entanto simples e em muitos casos resumem-se a interpor isoladores entre a coquilha e os suportes da coquilhadora ,ou ao contrário, em modificar os suportes de modo a assegurar um maior escoamento de calor em direcção aos suportes, que por vezes são eles próprios arrefecidos artificialmente.

2.3.2.3.2. Influência de uma construção composta

Nos vimos (2.3.2.3.1.2.) que uma parte assemblada numa coquilha cria sempre na junta uma zona térmica particular , a maior parte das vezes uma zona quente. Isto só é ,no entanto, verdadeiro no caso de uma construção com o mesmo tipo de material. Ora é perfeitamente possível construir uma coquilha com materiais diferentes.

Certas possibilidades de criação artificial de pontos quentes foi escrita em 2.3.2.3.1.3. Pode-se evidentemente acentuar ainda mais o desequilíbrio das temperaturas maquinando os bocados acrescentados num material muito isolante mas, exceptuando o caso particular dos alimentadores que trataremos separadamente, uma tal construção nunca é na pratica necessária . Ela é quase sempre cara. Assim vamos examinar aqui a criação de pontos frios, que é de longe , a necessidade mais frequente.

O caso mais vulgar é o de uma parte massiva, como por exemplo uma bossa isolada no meio de uma chapa. Se a troca térmica com a coquilha for uniforme, a

contração no estado líquido e na solidificação provocarão inevitavelmente a formação de um rechupe nesta zona que solidifica em último lugar.

Na prática as partes principais da coquilha são geralmente construídas em ferro fundido ou aço. É fácil perceber que se a parte que molda a bossa em questão for feita num material que evacua muito mais rapidamente o calor, o problema pode ser facilmente resolvido. Recordaremos neste momento que, pelo menos na interface peça/coquilha o regime térmico não é permanente mas descontínuo. Cada vazamento traduz-se por um choque térmico recíproco entre metal e molde. A característica a tomar em consideração para a escolha do material arrefecedor não é pois a sua condutividade, expressão de um fluxo contínuo, mas uma grandeza mais complexa: A difusividade do calor (*) que traduz a aptidão de um material a difundir um brusco fluxo de calor.

Se nos limitarmos aos materiais razoavelmente aceitáveis do ponto de vista do preço o metal mais apropriado é o cobre puro. A sua baixa dureza faz no entanto limitar a sua utilização a casos muito particulares, e se bem que a adição de elementos de liga baixam a sua condutividade mesmo a partir de teores muito baixos, empregam-se geralmente ligas cujas características térmicas são ainda muito interessantes.

Por ordem de difusividade decrescente citaremos o Cu-Cr com 1% de Cr que tem a vantagem de ser de fácil aprovisionamento porque é utilizado no fabrico de eléctrodos de soldadura; O latão com 35 % de Zn; o Cobre-Berílio e o Cupro-Alumínio com 10 % de Al. O Bronze com 7% de Sn tem comportamento idêntico ao do Ferro Fundido, e neste caso não tem praticamente interesse. Os valores podem ver-se no quadro seguinte (origem: Barrau et Larose – Mécanique des Structures – Tome 1)

Quadro 1 características térmicas de diferentes materiais de coquilhas [30]

Material	Condutividade λ (W/m °C)	Calor específico C (J/Kg °C)	Massa volumica ρ (Kg/m ³)	Difusividade b (J m ⁻² °C ⁻¹ s ^{-1/2})
Cu-Cr (1% Cr)	393	3.430.000	8.930	3.469.517,358
Latão 35 % Zn	121	3.160.000	8.400	1.792.156,243
Cu-Be	87	3.450.000	8.250	1.573.606,526
Cu-Al	72	3.520.000	8.190	1.440.719,820
Ferro fundido	58	3.830.000	7.100	1.255.863,846

(*) Difusividade de calor $b = \sqrt{\lambda C \rho}$
sendo:

λ = Condutividade Térmica

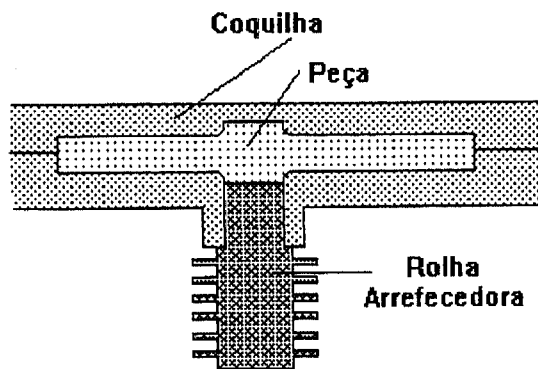
C = Calor Específico

ρ = Massa Volumica

$$J m^{-2} °C^{-1} s^{-\frac{1}{2}}$$

As partes destinadas à função de arrefecedores não podem desempenhar o seu papel se não se verificar uma condição essencial: elas deverão imperativamente estar ligadas a uma fonte fria, ou seja: elas deverão poder ceder o calor que recebem, caso contrario ficarão saturadas e passarão a actuar no sentido inverso daquele que se deseja. Na maior parte dos casos a fonte fria é a atmosfera, o que implica que elas devem aflorar à superfície da coquilha.

A forma mais corrente dada às partes que devem desempenhar esta função é a de "rolhas arrefecedoras". A figura 15 mostra o traçado geralmente adoptado que tem a vantagem de ser de fácil execução.



Fif. 2.7 - Esquema de aplicação de rolha arrefecedora [7]
(M.M. Parisien et Camuset (sem data))

Em relação as rolhas arrefecedoras diremos que estas não realizarão eficazmente a sua missão de não forem de material diferente do resto da coquilha, e se não estiverem a temperatura diferente desta. Assim é necessário fazer um certo isolamento destas partes do resto da coquilha de modo a que esta não ceda ela própria calor às rolhas. O método esquematizado na figura 13 servirá perfeitamente na maior parte dos casos.

Na prática é necessário ter em conta uma dificuldade bastante frequente. Os materiais utilizados tem quase sempre coeficientes de dilatação diferente do aço ou do ferro fundido que constituem as partes principais da coquilha. Isto conduz na prática à formação de folgas que podem ser prejudiciais nomeadamente por formação de rebarbas nas peças. Um ajustamento inicial preciso torna-se rapidamente insuficiente para manter o arrefecedor no lugar.

2.3.2.3.3. Utilização de pinturas.

A superfície de uma coquilha nunca é utilizada nua. Ela estará sempre protegida por uma pintura mais ou menos espessa com múltipla finalidade. A pintura deverá:

- Proteger a coquilha contra a dissolução pela liga líquida
- Servir de lubrificante quando da desmoldação
- Favorecer a formação de uma bela pele
- Permitir fazer variar numa certa medida o coeficiente de troca térmica entre a peça e a coquilha.

No presente capítulo apenas estudaremos o último item

Se bem que não exista uma separação nítida separam-se normalmente os produtos utilizados em dois tipos:

--- Pinturas brancas isolantes

--- Pinturas pretas condutoras

As primeiras são, geralmente, constituídas por uma carga refractária e um ligante que, na maior parte das vezes, é Silicato de Sódio.

As segundas são suspensões aquosas de grafite com (eventualmente) uma pequena percentagem de Silicato de Sódio.

O negro de fumo inclui-se nas pinturas condutoras. É obtido por combustão de acetileno puro.

As pinturas brancas diminuem significativamente a transmissão de calor à moldação e podem assim ajudar, se forem judiciosamente aplicadas, a estabelecer o gradiente térmico desejado na peça. São utilizadas nas partes finas das peças ou, se as peças são de espessura homogênea, nas partes que se quer que solidifiquem em último lugar. Estas pinturas são utilizadas em camadas espessas nos sistemas de enchimento e nos alimentadores.

As pinturas pretas tem um efeito térmico pouco marcante e são utilizadas nos locais onde se deseja uma troca térmica intensa.

O poder isolante das pinturas brancas é função da sua composição, mas também da sua espessura. Esta exerce por outro lado uma influência evidente sobre a tolerância dimensional. Nos casos delicados é mesmo necessário medir a camada de tinta.

De tudo isto resta concluir que a execução da pintura de uma coquilha não é um trabalho vulgar , devendo antes ser confiado a um especialista experimentado e cuidadoso.

2.3.2.3.4 Arrefecimento ou reaquecimento local artificial

2.3.2.3.4.1. Arrefecimento.

Quando os métodos citados anteriormente não são suficientes para assegurar um arrefecimento local suficiente é necessário recorrer a um arrefecimento artificial. Os métodos utilizados, por ordem de eficácia crescente são:

- Convecção forçada
- Sopragem de ar húmido
- Pulverização
- Circulação indirecta de agua
- Circulação directa de agua
- Imersão

vamos analisar cada um destes métodos

Convecção forçada

Vimos que quando são utilizadas alhetas em coquilhas para arrefecimento local é a radiação o fenómeno preponderante na evacuação de calor (ver fig. 11). Mas a influencia da convecção natural pode ser muito aumentada se acelerar artificialmente a circulação de ar. Um simples ventilador, eventualmente carenado, poderá dar um contributo não negligenciavel.

Sopragem de ar húmido

O ar húmido tem um poder de arrefecimento muito superior ao do ar seco. Embora o método não tenha o mesmo poder de arrefecimento da circulação de agua tem sobre este método a vantagem de poder ser interrompido a qualquer momento, e ser regulado de modo a amenizar o fenómeno cíclico de variação de temperatura.

Pulverização

Embora aparentemente brutal, este método é muito frequentemente usado e é bastante reprodutível se tiver um controlo suficientemente preciso da quantidade de agua utilizada . É claro que é difícil obter um arrefecimento muito localizado mas permite obter uma solidificação verticalmente dirigida.

Circulação indirecta de agua

Vimos atrás que o arrefecimento de uma coquilha se podia dar através de condução de calor aos suportes da coquilha. Ora este fenómeno pode ser aumentado por arrefecimento de suportes de grandes dimensões percorridos por um circuito de água. A grande vantagem deste método sobre a circulação directa de água é de natureza económica. Com efeito sai muito mais barato criar um único circuito de água nos pratos da coquilhadora do que criar um circuito de água em todas as coquilhas.

Circulação directa de água.

Um dos métodos mais eficazes de arrefecimento de coquilhas é a circulação de água no interior de canais praticados no corpo das coquilhas. No entanto este método tem como principal inconveniente uma falta de versatilidade.

Com efeito em moldação em coquilha por gravidade as cadencias não são muito elevadas. É então necessário fazer uma muito cuidadosa regulação do caudal de água de modo a evitar intempestivas quedas de temperatura. Também não se pode encarar a possibilidade de interrupção da circulação de água, pois isso conduziria à formação de rolhas de vapor (as coquilhas normalmente estão a mais de 400 °C) para além do perigo que tal operação acarretaria para a segurança de pessoas e instalações.

Alem disso, ao contrário do que seria à primeira vista de esperar, as possibilidades de regulação através da regulação do fluxo de água são muito limitadas. De facto quando se aumenta o caudal de água para além de um determinado valor o aquecimento da água é-lhe inversamente proporcional, de modo que o fluxo de calor evacuado não varia praticamente. Na melhor das hipóteses entre o caudal mínimo correspondente ao início de ebulição e o caudal máximo as possibilidades de regulação vão do simples ao dobro.[7]](M.M. Parisien et Camuset (sem data))

Nos casos em que a circulação directa de água é a única solução possível, convém actuar com muita prudência situando os canais o mais longe possível da superfície moldante começando por furos de pequeno diametro para depois os aumentar se necessário. Notar que construir muitos canais independentes para depois só utilizar os que necessitarmos conduz a resultados desastrosos. Bastará lembrar que um furo produz uma barreira térmica. portanto um canal não utilizado não é um elemento neutro do ponto de vista de escoamento de calor. Ele é uma barreira ao arrefecimento natural.

Ainda sobre o arrefecimento por circulação directa de água convém lembrar que nas regiões de água dura ha uma grande tendência à deposição de calcário nos canais o que vai ao longo do tempo isolando as superfícies dos canais e ao mesmo tempo diminuindo o seu diametro e por consequencia fazendo baixar a capacidade de refrigeração.

Imersão.

É de longe o método mais eficaz de todos mas tem muitas limitações. Em coquilhagem manual o processo só pode ser encarado para pequenas partes moveis das coquilhas como machos metálicos, ou pequenas partes de coquilha. Claro que ha coquilhadoras automáticas que foram construídas já com a finalidade de mergulhar o corpo principal da coquilha.

No entanto o processo não é isento de perigos o mais grave dos quais é permitir que a temperatura da coquilha desça abaixo dos 100 °C o que traria como consequência uma perigosa explosão ao vazar metal sobre uma superfície metálica fechada húmida.

Por último é de referir que o reservatório de imersão não contém apenas água, que destruiria a pintura da coquilha, mas sim uma suspensão diluída (0,4 %) de um produto grafitado que deixa a cada mergulho uma fina camada pouco isolante.

2.3.2.3.4.2. Reaquecimento

A solução de reaquecer as partes da coquilha onde se deseja que ocorra a parte final de solidificação é pelo menos tentadora pelo menos pela sua aparente simplicidade. Na prática não é assim e só se deverá recorrer a este método na última das hipóteses.

Tal é o caso de peças muito pequenas em que equilíbrio térmico se obtém rapidamente e para uma temperatura demasiado baixa. Mesmo assim deveremos tentar aumentar a cadência de vazamento e a espessura da camada de pintura isolante. Se mesmo assim for insuficiente resulta mais económico colocar na coquilha cavidades extras de modo a aumentar o peso de metal vazado mesmo tendo em conta que esta solução faz baixar o rendimento do metal vazado.

2.3.2.4. Influência do modo de vazamento

Se se pode admitir que, para peças acima de um determinado volume, vazadas em areia se tem, no fim do vazamento, uma temperatura homogénea em toda a peça, tal raciocínio será absolutamente falso para o vazamento em coquilha. Com efeito se exceptuarmos os semiprodutos massivos como os lingotes siderúrgicos, a possibilidade de troca térmica entre o metal e o molde é largamente superior à possibilidade de difusão de calor entre as diferentes partes da peça. Mas também vimos que não é uma solidificação simultânea que conduz à obtenção de peças sãs, mas sim a solidificação dirigida..

O enchimento de uma peça não é simultânea e portanto as partes cheias em primeiro lugar cedem calor ao molde ao passo que o metal líquido ainda não atingiu as outras. Por rápido que seja o enchimento das peças, o arrefecimento das peças é por vezes tal que as peças solidificam na totalidade antes de a peça estar cheia.

Isto deverá estar sempre presente quando da decisão do modo de enchimento das peças vazadas em coquilha. Em princípio deveremos encher em último lugar as partes da peça que desejamos solidifique também em último lugar.

2.3.2.5. Influência do traçado da peça

Em igualdade de todas as outras condições, a troca térmica peça coquilha é em boa medida função da superfície de contacto. Mas sendo o traçado da peça, em

princípio, um dado intangível do problema, não se pode praticamente fazer nada para diminuir a troca térmica. Mas é pelo contrário possível acelerar a troca térmica criando alhetas na peça que serão posteriormente removidas por rebarbagem.

Este processo é relativamente caro e só é utilizado muito raramente. Mas deveremos lembrar que isto acontece involuntariamente nas juntas de coquilhas mal fechadas ou deformadas.

Este facto leva-nos a formular a seguinte questão: uma vez que uma alheta fina perpendicular a uma placa serve para a arrefecer, e que identicamente uma alheta grossa serve para criar um ponto quente então ha uma espessura critica para a qual na zona de intercepção o efeito térmico é nulo. Qual será a razão r das espessuras para que tal aconteça? No caso das coquilhas a relação r alheta / placa é a seguinte: (Figura 16)

Para união em L ----0,40
Para união em T ----0,30
Para união em cruz ---0,25

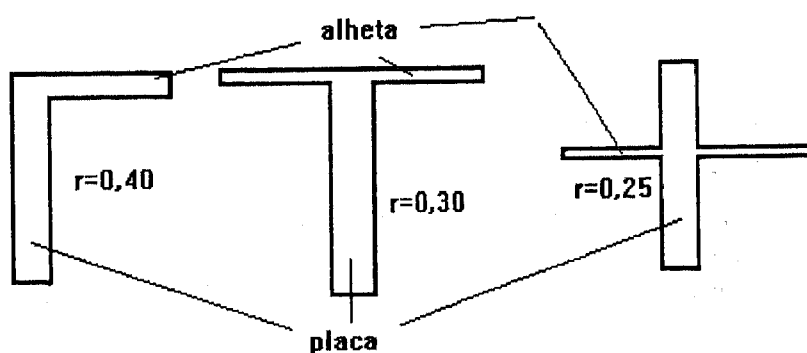


Fig. 16 Valores de r (razão entre as espessuras da alheta e da placa) para que a alheta nem crie um ponto quente, nem actue como arrefecedor.

Convém notar que estas relações são diferentes para moldação em areia.

2.3.2.6. Temperaturas óptimas de funcionamento de coquilhas

Dissemos atrás que a cada tipo de liga corresponde uma tecnologia própria. Entre os elementos dessa tecnologia, a temperatura tem um lugar de destaque.

Na maior parte dos casos não teremos uma temperatura ideal, mas uma gama de temperaturas no interior da qual é possível vaziar peças boas do ponto de vista de qualidade. Tendo em conta as variações inevitáveis quer da temperatura de vazamento quer da cadencia de vazamento a fixação de uma temperatura de coquilha exacta seria uma ilusão. Dentro desta gama de valores, a temperatura de regimem resultará de um

compromisso entre diferentes factores mais ou menos antagónicos entre os quais citaremos a cadencia de produção e a duração da coquilha. Com efeito é evidente que a duração de solidificação será tanto mais curta quanto mais fria a coquilha estiver. Em contrapartida o choque térmico será tanto mais brutal quanto maior for a diferença de temperatura entre o metal a vaziar e a temperatura da coquilha.

Vamos em seguida citar as temperaturas mais usuais de funcionamento das coquilhas em função da liga. De notar que esta temperatura de funcionamento é a temperatura da parede interior da coquilha imediatamente antes do vazamento. Mas no entanto a temperatura que rege a estrutura obtida é a que temos no momento de solidificação. Deveremos então ter isto em conta quando se tratar de peças massivas fazendo o vazamento com a coquilha a uma temperatura algo mais baixa.

2.3.2.6.1. Ligas de alumínio

As ligas leves são vazadas em coquilhas relativamente quentes, da ordem de 300°C a 450 °C. Dentro desta gama escolhe-se em geral uma temperatura tanto mais elevada quanto maior for o intervalo de solidificação da liga.

2.3.2.6.2. Latões e bronzes.

Os latões e os bronzes vazam-se em coquilhas ditas frias, da ordem de 150 °C. Esta temperatura relativamente baixa tem por efeito uma solidificação extremamente rápida com formação de uma estrutura muito fina. A qual é muito importante do ponto de vista metalúrgico. Mas é claro que é impossível manter uma temperatura de regime tão baixa com arrefecimento natural a não ser à custa de uma cadencia ridiculamente baixa. É por esta razão que as coquilhas são mergulhadas numa solução muito diluída de água com grafite.

2.3.2.6.3. Cupro- Alumínios

Ao contrário dos latões, os cupro alumínio são vazados em coquilha ditas quentes, da ordem de 500 °C. Tendo em conta a excelente vazabilidade destas ligas, elas são geralmente vazadas com um pequeno sobreaquecimento, o que permite obter cadencias rápidas, e sem grandes choques térmicos, o que prolonga a vida das coquilhas.

2.3.2.6.4. Ferros Fundidos.

Uma das principais dificuldades encontradas no vazamento do ferro fundido cinzento e do ferro nodular deve-se à sensibilidade destas ligas à tempera. Publicações anteriores a este trabalho indicavam que para evitar a tempera ledeburítica era

necessário que a velocidade de propagação da solidificação não deveria ultrapassar 3 mm/s . Ora isto só seria possível com a utilização de pinturas muito isolantes e utilizando temperaturas elevadas nas coquilhas. Quanto às temperaturas elevadas elas tem uma outra desvantagem : dão origem a porosidades subcutâneas as quais só após maquinagem são detectadas. Estas porosidades são causadas por uma reacção metal molde. Nós próprios confirmámos o que acaba de ser dito. Estas porosidades aparecem em coquilhas muito quentes e com pequena espessura da camada de pintura. Numa coquilha bem pintada estes defeitos não se verificam para temperaturas até 400 °C.

2.3.2.7. Controlo de temperatura das coquilhas.

Por tudo o que acaba de ser dito torna-se evidente que deveremos conhecer a temperatura das coquilhas. O método mais aconselhado é a introdução de termopares no interior das coquilhas. As coquilhas deverão ser furadas do exterior em direcção à superfície moldante , e o furo deverá terminar a 3 a 4 mm da superfície moldante . Como sabemos a temperatura assim medida tem uma variação de acordo com a Fig. 9 . A temperatura a ter em consideração é como se disse a imediatamente anterior ao momento de vaziar. Este controlo conjuntamente com o controlo do tempo de ciclo deverão estar presentes em toda a produção industrial de peças vazadas em coquilha.

2.3.2.8 Controlo dos tempos.

Este controlo é complementar do precedente. Mais do que isso, ele permite em larga escala regular a temperatura da coquilha. Cadencias rápidas fazem aumentar a temperatura da coquilha a ponto de esta desmoldar com partes da peça ainda liquida. Por outro lado cadencias mais lentas baixam a temperatura da coquilha o que para além de poder dar origem a um problema metalúrgico , dá sempre origem a um desnecessário abaixamento de produção.

Por tudo isto é conveniente ter um controlo dos tempos , e se possível que este controlo seja automático . O ideal é ter em simultâneo um controlo de temperatura da coquilha e um controlo dos tempos. Se possível a movimentação da coquilha para efectuar a desmoldação deverá ser automática com possibilidade de regular os tempos da normal operação de coquilhagem.

Convém aqui referir que a operação de abertura da coquilha que em certos casos se resume a separar duas partes pode ser uma operação complicada no caso de a coquilha ter muitas partes metálicas a movimentar (machos móveis, cutelos metálicos etc.) . A ordem pela qual são efectuadas estas operações deverá ser bem determinada bem como os tempos referentes a cada operação. O ideal é a automatização com regulação de tempos de operação

2.3.2.9 Comando automático do ciclo por tomada de temperatura.

A regulação do ciclo de uma coquilha não poderá dar resultados satisfatórios a não ser que esta tenha atingido um regime térmico estável. Ora para certas coquilhas

este regime só aparece após um período transitório bastante longo, no decorrer do qual a curva de temperatura tomada num ponto qualquer próximo da superfície moldante tem a forma da representada na figura 17.

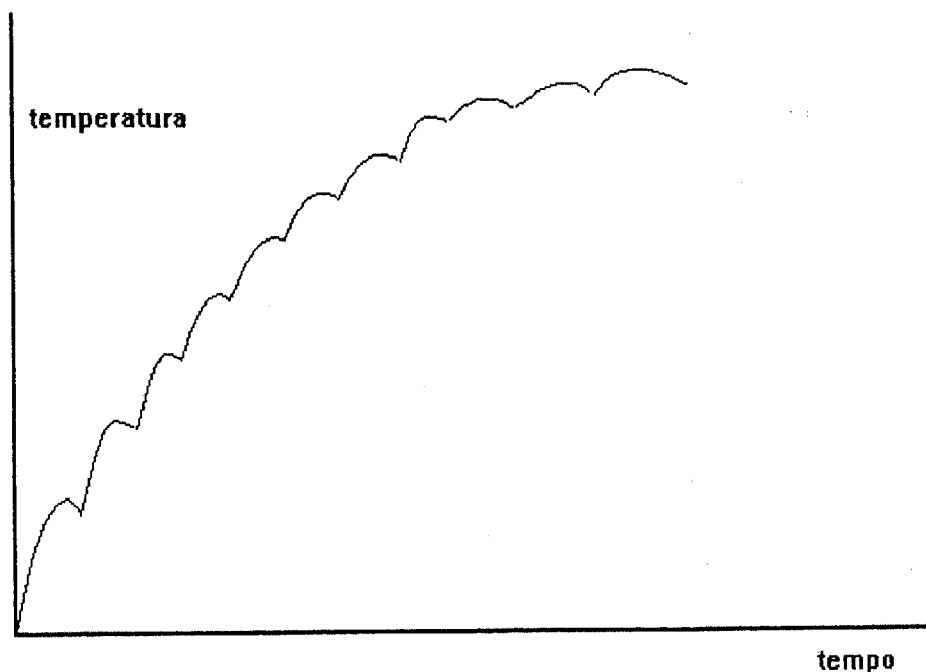


Fig. 17 Evolução da temperatura de um ponto da coquilha próximo da superfície partindo de uma situação de coquilha fria (esquema) [7] M.M. Parisien et Camuset

Neste caso a temperatura correspondente a cada ciclo pode diferir bastante do óptimo. Com efeito, estando a coquilha mais fria, a solidificação será mais rápida, e será desejável nesta fase acelerar a cadência. Isso levará a desencadear a abertura da coquilha não após um tempo constante, mas para uma temperatura determinada da peça. O resultado será a obtenção mais rápida da temperatura de regime da coquilha.

Inversamente, quando a temperatura da coquilha se eleva anormalmente, a abertura a temperatura constante da peça conduz a um alongamento do ciclo tendo por resultado também um efeito de regulação.

2.3.2.10. Influencia de inserções.

Por vezes desejamos, que certos pontos de uma peça fundida, possam beneficiar de características físicas, químicas, ou geométricas incompatíveis com o processo, ou com o material a vaziar. Nestes casos, uma solução largamente utilizada consiste em colocar no molde elementos estranhos que apresentam as características desejadas. Estes objectos ficam assim incrustados na peça fazendo então parte integrante dela, e tanto podem ser muito pequenos em relação à peça vazada como o contrário. No caso limite a inserção pode ser muito maior que a parte vazada. Apenas a título de

exemplo citaremos os cabos de travão de bicicleta , sobre os quais é fundida uma pequena bola de alumínio ou zinco com o efeito de serra cabos do lado do punho do travão.

Naturalmente estes objectos " estranhos " tem uma grande influencia sobre o processo de solidificação.

Desde que a massa destas inserções não seja desprezável e relação à massa de peça a vazar uma inserção constitui quase sempre um ponto singular do ponto de vista térmico, perturbando a solidificação. É evidente que a influencia destas inserções depende largamente da temperatura que estas inserções tem no momento de iniciar o vazamento. Se estiver muito quente esta inserção retardará a solidificação da peça nesta zona causando uma zona quente podendo dar origem a rechupe, ao passo que se estiver fria (quase sempre acima de 120°C) poderá causar zonas não cheias , metal mal ligado ou até estaladelas. Se desejarmos que uma inserção seja neutra (aproximadamente neutra) então deverá ter no final a temperatura da coquilha.

Acontece frequentemente que, por razões de resistência mecânica, as partes da peça que rodeiam a inserção são relativamente massivas, tendendo por isso a produzir rechupes. Assim as inserções poderão (e deverão) ser utilizadas como arrefecedores internos , pelo que, a sua temperatura deverá ser convenientemente regulada para conseguir este efeito.

Como já se disse atrás a propósito das coquilhas a temperatura que é determinante é a que as inserções tem no momento da solidificação. Deste modo uma inserção colocada junto a um ataque , e que por isso será " lavada " pelo metal quando do enchimento deverá ser colocado na coquilha mais frio que outro idêntico, mas colocado numa zona da coquilha que seja cheia em ultimo lugar.

Deveremos ter em conta que se a inserção é colocada na coquilha a uma temperatura diferente desta então é inevitável a troca de calor entre a inserção e a coquilha que devesse ser tomada em conta.

Até ao momento não ha nada estabelecido sobre pré aquecimento das inserções. De certo sabe-se que cada caso tem uma temperatura ou gama de temperaturas permitidas. No entanto é vulgar ver aquecer nas nossas fundições as inserções colocando-as no bordo do forno de manutenção... . Claro que também o refugo sofre variações inexplicáveis !!!

O controlo de temperatura das inserções é tanto mais importante quanto mais volumosas forem estas em relação à peça. Para inserções muito pequenas bastará garantir que estas estejam secas. Quando as inserções são relativamente grandes em relação à peça teremos que aumentar o nosso controlo . A gama de dispersão admissível poderá nestes casos ser muito estreita.

2.4 - Gitagem de moldações metálicas

2.4.1 Definição

Define-se gito de uma peça ao conjunto de canais que, não fazendo parte da peça, tem como missão conduzir o metal desde o bico da colher de vazamento até à cavidade que ao ser cheia de metal produzirá a peça. Certos autores consideram que a colher de vazamento deverá ser considerada como parte do sistema de gitagem. Pela nossa parte consideramos que um gito é uma cavidade praticada na moldação, e deste modo a colher de vazamento não faz parte do sistema de gitagem. No entanto não deixaremos de referir que a colher de vazamento deverá poder assegurar um caudal de metal suficiente para manter cheio o sistema de gitagem.

2.4.2. Funções do sistema de gitagem

Um sistema de gatinhem tem sempre duas funções, e por vezes tem uma terceira que em boa verdade não lhe seria devida. As duas funções que sempre deverá assegurar são:

--- Assugurar o completo enchimento da cavidade de moldação.

--- Captar e reter qualquer material não metálico que eventualmente acompanhe o metal.

A terceira missão que por vezes desempenha é a de servir parcial ou totalmente de alimentador. Esta missão é normalmente reservada aos alimentadores, ou seja, ao sistema de alimentação. Mas por vezes resulta mais económico alargar os canais do sistema de gitagem de modo a estes servirem de alimentadores. Voltaremos a falar dos alimentadores quando tratarmos do capítulo Alimentação.

2.4.3. Elementos constituintes do sistema de gitagem.

2.4.3.1 Bacia de vazamento.

A bacia de vazamento é uma cavidade geralmente em forma de funil que recebe o metal proveniente da colher. Normalmente cada sistema de gitagem só tem uma bacia de vazamento, mas nos casos em que a peça tem que ser vazada por mais que uma colher é normal haver tantas bacias de vazamento quantas as colheres que simultaneamente vazam a peça.

A forma da bacia de vazamento é normalmente a de um funil (tronco de cone invertido) mas por vezes, e sobretudo quando se trata de coquilhas é mais comum o tronco de pirâmide que tem como principal vantagem a de evitar a formação do vortex, e ainda proporcionar melhor saída após vazamento da coquilha.

Ha ainda bacias de vazamento que tem como missão captar escórias. Tem a forma da figura 18.

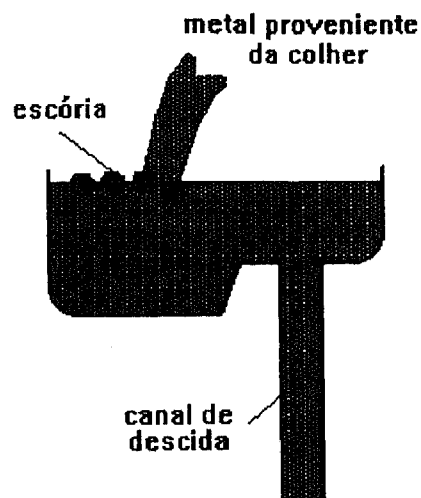


Fig. 18 Bacia de vazamento com camara de retenção de escórias [3]

2.4.3.2. Canal de descida

Cada bacia de vazamento tem sempre pelo menos um canal de descida. O canal de descida normalmente comunica com um canal dito canal de distribuição.

2.4.3.3. Canal de distribuição

O canal ou os canais de distribuição tem a função que o nome indica , ou seja distribuírem o metal pelas varias peças que a moldação ou a coquilha tem.

2.4.3.4. Ataques

Os ataques são ligações entre o canal de distribuição e a(s) cavidade(s) da(s) peça(s)

Esta sistematização das varias partes que constituem um sistema de gitagem ajusta-se perfeitamente às peças com " apartação horizontal ". Na apartação vertical embora estas partes possam estar presentes casos ha que não estão bem claros os limites destas partes que acabamos de definir.

Embora se pense que a moldação em coquilha precedeu a moldação em areia , as primeiras coquilhas era vazadas a céu aberto e deste modo não se poderá falar de sistema de gitagem.

A moldação em areia utilizando caixas de moldar em madeira foi sem dúvida o tipo de moldação onde os sistemas de gitagem se desenvolveram a ponto de deixarem de ser meros canais de ligação para passarem a ser objecto de estudo uma vez que se reconheceu que a qualidade das peças também dependia deles.

Ora a apartação horizontal surge naturalmente com a moldação em areia. É intuitivo que para calcar uma caixa de areia esta deve ter a superfície a calcar horizontal. Como deve estar pousada em cima do molde ou em cima de um estrado então este também deve estar na horizontal. Como as duas partes da moldação devem estar fechadas e apertadas uma contra a outra para que o efeito da pressão metalostática não as separe nada mais simples que pousar uma na outra e colocar pesos na de cima.

Então resulta intuitivo que é necessário fazer um furo na moldação superior (canal de descida). um funil no cimo facilitará a recepção do metal (bacia de vazamento). Havendo mais que uma peça no molde nada melhor que um canal horizontal correndo no meio das varias peças (canal de distribuição), e finalmente fazer varias ligações entre o canal e as varias peças (ataques).

Desde a idade do bronze até aos nossos dias este tipo de gito é standard para apartação horizontal. Apenas foi aperfeiçoado e objecto de calculo.

Cabe aqui dizer que este tipo de gito não serve para coquilhas. A razão é muito simples. O molde sendo permanente tem que ter saídas para poder extrair a peça e o seu gito. Ora o canal de descida com a sua bacia de vazamento não pode atravessar uma parte inteira ou não poderá ser dessoldado. É necessário fazer uma apartação extra para o canal de descida, apartação esta que terá que ser vertical. Assim sendo quando a coquilha é constituída apenas por duas partes a apartação tem que ser vertical. Quando tem mais que uma apartação, pelo menos a que contem o canal de descida tem que ser vertical.

No entanto faremos os cálculos para o sistema de gitagem considerando que a apartação é horizontal. faremos a seguir os cálculos e as correcções necessárias para o adaptar à apartação vertical.

2.4.4. Calculo do Sistema de Gitagem

A Fig. 19 mostra um sistema de gitagem simples e a respectiva peça a vazar. Antes de estabelecermos as formulas que nos vão permitir fazer o dimensionamento do sistema de gitagem diremos que apenas nos vamos preocupar com as duas finalidades principais de um sistema de gitagem, ou seja, o completo enchimento da peça antes da solidificação desta, e a captação de qualquer impureza que eventualmente acompanhe o metal quando do vazamento.

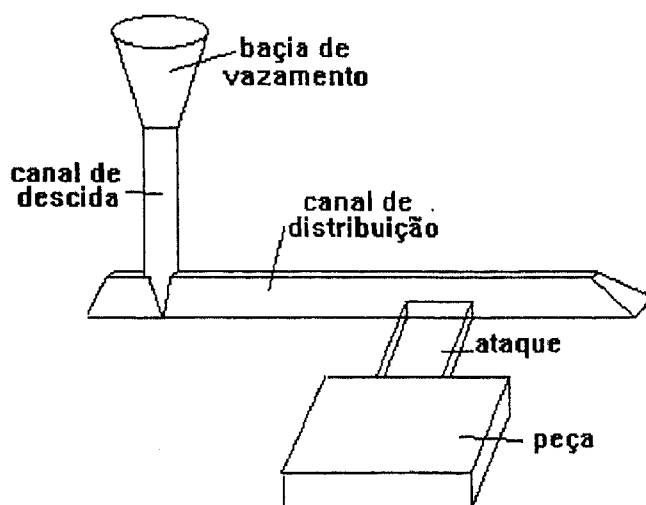


Fig. 19 - Sistema de giteagem completo e peça a vaziar. Aparteção horizontal.

Para que um sistema de giteagem cumpra a sua missão de encher completamente a peça antes de que a solidificação de partes desta ou do próprio sistema de giteagem impeçam a obtenção de uma peça completa temos que assegurar que a peça é cheia antes de um certo tempo critico. Veremos adiante como podemos estabelecer qual é o tempo critico que não poderemos ultrapassar de modo a não correr riscos de obter peças incompletas. Mas daqui decorre imediatamente que temos que saber relacionar os sistemas de giteagem com os tempos de enchimento.

Concretamente temos que poder saber calcular:

- O tempo (de enchimento) com que um dado gito enche uma peça.
- Quais são as dimensões que um gito deve ter para encher determinada peça num determinado tempo.

Estes dois itens são duas facetas de um mesmo problema . Relacionar dimensões de gitos com tempos de enchimento. É este problema que nos propomos estudar seguidamente.

Um gito leva metal da bacia de vazamento para a cavidade da peça. Numa primeira análise **transforma energia potencial em energia cinética**. Esta afirmação é valida pelo menos numa parte do gito, e pode até acontecer mais que uma vez. Vamos começar por estudar um gito simples em que se passa o que acabamos de dizer.

O gito da figura 20 esta exageradamente dimensionado propositadamente para assegurar que o ataque funcione como secção do gito que regula o fluxo de metal. A secção que num gito tem esta particularidade chama-se secção característica (Sc). Na figura 20 Sc é claramente a secção do ataque .

Relativamente ao plano de referencia do ataque a energia de uma dada massa de metal será

$$E_p = m \cdot g \cdot h.$$

sendo:

m = massa de metal

g = aceleração de gravidade

h = diferença de nível entre a bacia de vazamento e o ataque

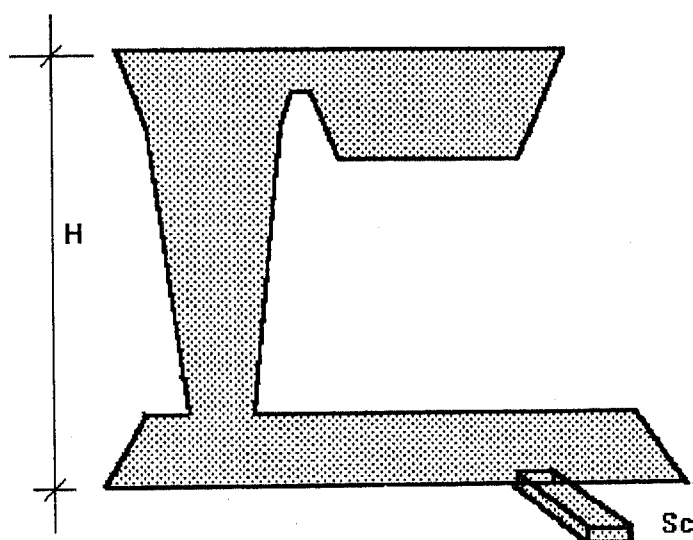


Fig.20

Essa energia sendo igual à energia cinética do metal no ataque permite-nos escrever:

$$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

De onde

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

E para o caudal C teremos :

$$C = S_c \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Sendo V o volume da peça a encher teremos

$$V = Sc \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \cdot T$$

de onde

$$T = \frac{V}{Sc \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}$$

A equação anterior permite calcular o tempo de enchimento T de uma peça de volume V . Notar que a equação não entra com a densidade da liga. Uma peça em alumínio ou em ferro enchem teoricamente no mesmo tempo desde que tenham o mesmo volume. Dizemos teoricamente porque até aqui não entramos em consideração com a viscosidade da liga. Esta faz, juntamente com a sinuosidade do gito, aumentar o tempo de enchimento. É então necessário introduzir na equação anterior um factor que contemple as perdas devidas à viscosidade do liquido e à sinuosidade do gito. a equação ficará então:

$$T = \frac{V \cdot B}{Sc \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}$$

O factor B tem um valor compreendido entre 1 e 3 [3] Centre Technique des Industries de Fonderie (sem data) Para a grande maioria das peças B esta compreendido entre 1,8 e 2,2. Em cálculos industriais para peças médias (entre 5 e 50 Kg) e gitos considerados de sinuosidade normal o valor atribuído a B é 2. As diferenças para a realidade são inferiores a 15 %.

Mas em fundição o problema que se nos põe não é, normalmente, calcular o tempo de enchimento de um determinado gito, mas sim dimensionar um gito para que encha uma peça num determinado tempo. O problema é então calcular Sc . Da equação anterior tira-se que:

$$Sc = \frac{V \cdot B}{T \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}$$

Esta é a equação fundamental dos sistemas de gtagem. Veremos agora como a aplicar a sistemas concretos diferentes do que estamos a estudar.

O sistema representado na fig. 20 pressupõe que o ataque é em relação ao resto do gito de secção muito inferior. Por outro lado não referimos que houvesse nada à saída do ataque que perturbasse a entrada de metal na cavidade de moldação. É o caso típico de um sistema dito pressurizado com secção característica localizada no(s) ataque(s), e com a cavidade de moldação localizada inferiormente em relação ao plano de apartação.

Vamos agora estabelecer um método de determinar qual é a secção característica de um gito. Veremos que não é necessariamente a secção de menor área do gito.

Consideremos o gito representado na Fig. 21.

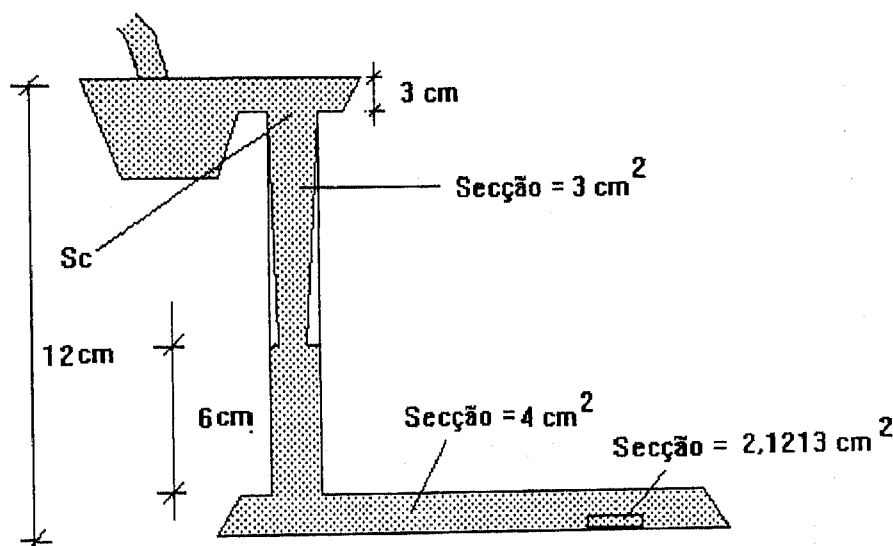


Fig. 21 Gito hipotético para justificação de que a secção característica não é necessariamente a secção de menor area.

Considerando que a peça a vaziar está na meia caixa inferior e que portanto não cria contra-pressão no ataque, este gito funciona como se pode ver na figura 21 com, descolamento de metal no canal de descida. O regime é estacionário. Com efeito se fizermos os cálculos veremos que o caudal no ataque é de 115,02 centímetros cúbicos por segundo, e que é precisamente esse caudal que produz uma bacia de vazamento com as dimensões da figura 21. Onde está a secção característica?

Por definição a secção característica é a que limita o caudal do gito. Aumentar o ataque terá como consequencia fazer baixar o nível do metal no canal de descida diminuindo a dimensão 6 cm. Mas a peça encherá no mesmo tempo. Logo o ataque não constitui Sc . A secção característica é o canal de descida, uma vez que se lhe aumentarmos a secção faremos subir o nível de metal no canal de descida aumentando a pressão no ataque. Como vemos a menor secção pode não ser a secção característica.

Para determinação da secção característica teremos que fazer entrar nos cálculos não só a secção mas também a altura metaloestática.

Para determinarmos Sc num gito teremos que decompor o gito em tantas partes quantas aquelas que poderão conter Sc . Para cada uma dessas partes calcularemos o caudal considerando que as restantes são suficientemente largas para não conterem a secção característica. Aquela cujos cálculos conduzirem a um menor caudal será a secção característica.

Na pratica bastará para cada parte calcular o produto da secção pela raiz quadrada da altura metaloestática. A secção que der resultado menor será a secção característica. No exemplo anterior tínhamos:

--- para a bacia de vazamento :

$$3. \sqrt{3} = 5,2$$

--- Para o canal de distribuição.

$$4 . \sqrt{12} = 13,85$$

---para o ataque

$$2,1213 . \sqrt{12} = 7,34$$

A bacia de vazamento é a assim a secção característica.

Vamos agora ver o que se passa quando a peça esta localizada para cima do plano de apartação.

Vamos considerar a peça da fig. 22 localizada para cima do plano de apartação.

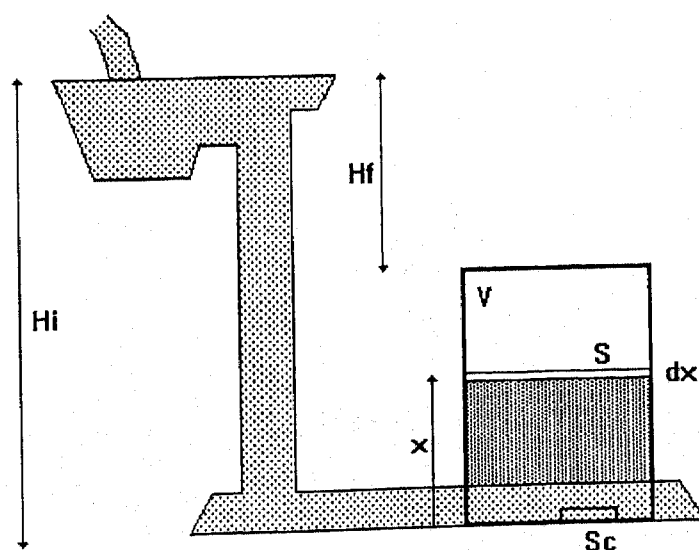


Fig. 22

A peça tem volume V , e é de secção constata (cilíndrica, por ex.). Conforme representada está a meio da operação de enchimento. Ao começar o seu enchimento a pressão metaloestática era correspondente a H_i . no fim do enchimento a pressão será correspondente a H_f .

Propomo-nos calcular uma altura equivalente (H_e) que encherá a peça em questão no mesmo tempo se estiver localizada para baixo do plano de apartação.

Consideremos o volume elementar $dV = S \, dx$. Este volume encherá num tempo dt . De acordo com o estabelecido anteriormente será:

$$dT = \frac{S \cdot dx \cdot B}{Sc \sqrt{2 \cdot g} \sqrt{h_i - x}}$$

Integrando ambos os membros fica:

$$\int_0^T dt = \frac{S \cdot B}{Sc \sqrt{2 \cdot g}} \int_0^{h_i - h_f} \frac{dx}{\sqrt{h_i - x}}$$

O integral da esquerda é o tempo de enchimento. Esse tempo é, por definição, o tempo que levaria a encher a mesma peça se estivesse para baixo do plano de apartação e sujeita a uma altura metaloestática H_e . Então teremos que

$$T = \frac{V \cdot B}{Sc \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \sqrt{H_e}}$$

igualando as duas expressões fica:

$$T = \frac{V \cdot B}{Sc \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \sqrt{h_e}} = \frac{S \cdot B}{Sc \sqrt{2 \cdot g}} \int_0^{h_L - h_f} \frac{dx}{\sqrt{h_L - x}}$$

Agora atendendo a que $V=S(H_i-H_f)$ e simplificando fica:

$$\frac{h_L - h_f}{\sqrt{h_e}} = \int_0^{h_L - h_f} \frac{dx}{\sqrt{h_L - x}}$$

Resolvendo o integral e simplificando fica:

$$\sqrt{h_e} = \frac{\sqrt{h_L} + \sqrt{h_f}}{2}$$

Esta expressão juntamente com a expressão

$$Sc = \frac{V \cdot B}{T \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}$$

Permite-nos calcular as dimensões da secção característica. Se a peça estiver para baixo do plano de apartação esta ultima expressão aplica-se directamente. Se a peça estiver para cima do plano de apartação e for de secção regular calculamos a altura equivalente H_e e fazemos $h = H_e$ na expressão anterior. Se a peça estiver para ambos os lados do plano de apartação teremos que fazer os cálculos separadamente para ambas as partes.

2.4.5. Sistemas pressurizados e não pressurizados.

Se a secção característica de um gito for o ataque ou os ataques então o sistema diz-se pressurizado, pois todo o gito está, durante o enchimento, sujeito à pressão do metal correspondente à sua cota em relação à altura do gito. Caso tal não aconteça, isto

Para conseguir que as inclusões em questão cheguem a atingir a cavidade da peça temos duas possibilidades que poderão ser usadas separadamente ou em conjunto:

---Utilização de filtros ou redes

--- Construir o sistema de gitagem do modo a este reter as inclusões.

Os filtros e as redes são muito eficazes para grandes inclusões (da ordem de 2 a 3 mm) . A opção de utilizar filtros ou redes é quase sempre de ordem económica. Normalmente obriga a alargar o gito mas apenas na zona onde vai ser colocado(a). A maior desvantagem económica é o custo do próprio filtro, seguida do custo de colocação . O custo de metal extra que fica na zona alargada do gito é normalmente muito inferior ao custo quer do filtro quer da sua colocação. Quando para a utilização de filtros houver necessidade de aumentar a temperatura de metal então é sempre mais vantajosa (quando possível) a opção de construir um gito que consiga captar as inclusões sem ter que subir a temperatura do metal . Os filtros são também solução quando temos limitação de espaço na moldação .

A captação de inclusões através do sistema de gitagem é normalmente conseguida no canal de distribuição de um gito pressurizado. Tal sistema de gitagem sendo pressurizado funciona cheio e portanto, qualquer inclusão que consiga descer pelo canal de descida tenderá a flutuar durante o percurso no canal de distribuição sendo retida na parte superior . A Fig. 23 ilustra este método.

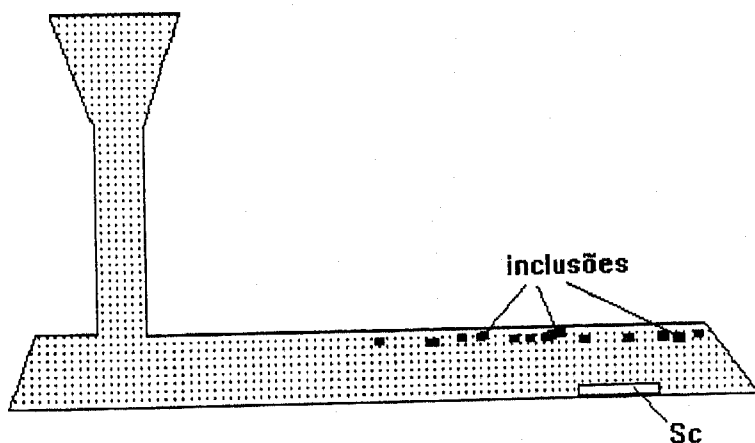


Fig.23

Os sistemas não pressurizados podem ser também usados para reter escórias e inclusões mas não são tão eficazes e conduzem a gitos maiores. São praticamente ineficientes em coquilha pelo que não os referiremos aqui.

Até este momento fizemos todos os nossos raciocínios pressupondo que tínhamos pelo menos uma apartação horizontal . Mas no caso das coquilhas as temos que nos adaptar ao facto de que na grande maioria dos casos temos apenas uma apartação , e esta é vertical. Pelo menos a bacia de vazamento e o canal de descida estão sempre construídos numa apartação vertical. E mesmo quando ha uma apartação

horizontal esta raramente é utilizada para construir o sistema de gitagem . Claro que em coquilha o sistema de gitagem está sempre construído numa apartação pelo facto de o gito ter que ser desmoldado , mas prefere-se quase sempre utilizar a apartação vertical para a construção do gito.

Uma apartação vertical é muito mais apropriada à construção de um gito com boas propriedades dinâmicas de escoamento de fluidos. Para o compreender bastará referir que um canal de descida deverá teoricamente (para não descolar das paredes nem criar depressão,já que esta pode ser acompanhada de absorção de gases na corrente de metal liquido e provocar defeitos) ter a forma da Fig. 24 de modo a cada secção obedecer à formula

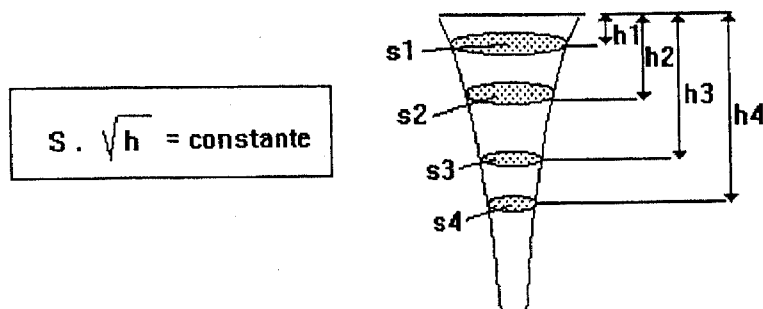


Fig.24

a qual é possível de construir numa apartação vertical, mas que encontra dificuldades técnicas de execução em moldação de apartação horizontal.

Já a captação de inclusões é mais difícil de realizar numa apartação vertical. Com efeito em apartação horizontal dispúnhamos de um canal de distribuição horizontal de onde saíam os ataques perpendicularmente e a partir do fundo. Tudo isto é possível em apartação vertical com a diferença que os ataques normalmente partirão do cima como mostra a figura 25 .

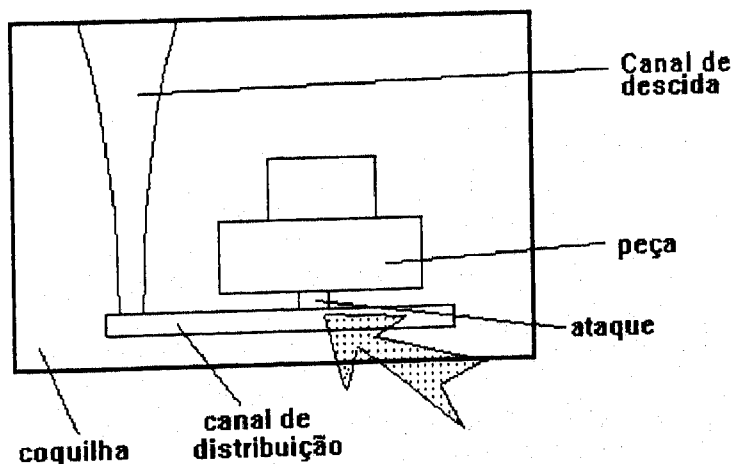


Fig. 25

O sistema é no entanto bastante eficaz. O primeiro metal é o que tem mais probabilidade de conter inclusões e será arrastado para a parte final do canal de distribuição. Melhor do ponto de vista de retenção de escórias e inclusões, mas pior do ponto de vista de rendimento metal peça é o tipo de gito que seguidamente se esquematiza na Fig. 26. Este sistema só deve ser empregue nos casos onde é imperativa a captação de toda ou qualquer inclusão proveniente da colher.

Devemos ter em atenção que este tipo de gitos não é nada favorável à solidificação dirigida. Como sabemos em coquilha a solidificação deve processar-se de baixo para cima. Ora este tipo de gitos produz, no fim do vazamento, uma distribuição térmica caracterizada pelo metal mais quente estar no fundo da peça.

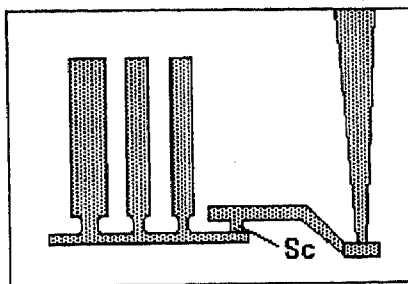


Fig.26 Sistema de gitagem com camara de captação de escórias [3]

No caso particular dos ferros fundidos esta distribuição não é tão nefasta devido ao facto de os ferros fundidos sofrerem uma expansão durante parte da solidificação.

2.4.7. Canais de distribuição verticais.

Não é muito vulgar uma coquilha ter mais do que duas peças. Devemos ter em conta que quanto maior for uma coquilha mais cara é. E o seu custo tem que ser amortizado pela série de peças a fabricar.

Mas por vezes dispondo de uma coquilhadora grande e sendo a série a produzir considerável poderá ser viável construir uma coquilha com varias peças. Varias disposições são possíveis. Por exemplo para quatro peças teremos as seguintes possibilidades: (Fig. 27)

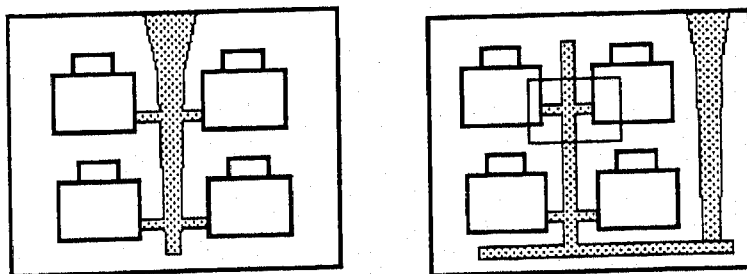


Fig.27 Duas hipóteses possíveis de distribuição de quatro Peças em apartação vertical [3]

O sistema mais usual é o da esquerda pois é mais simples de maquinar, permite vaziar a menor temperatura e dá melhor rendimento. No entanto o da direita permite obter peças mais isentas de inclusões e isso pode por vezes ser determinante. A figura 28 mostra a parte assinalada na coquilha da direita ampliada. Durante o enchimento podem-se dar duas situações:

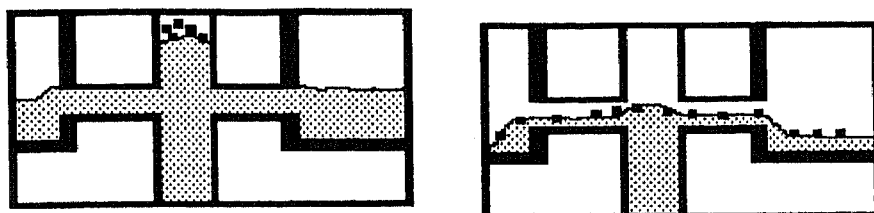


Fig.28 Duas situações possíveis durante a fase de enchimento de umq moldação com apartação vertical

A situação da direita permite entrada de inclusões e escória pelo que as dimensões do gito devem ser de modo a evita-la.

A Condição que deve ser verificada para evitar a entrada de inclusões é , de acordo com a fig. 29 a seguinte:

$$\frac{2 s_1}{S_c} = \frac{\sqrt{h_1}}{\sqrt{h_2} + \sqrt{h_1}}$$

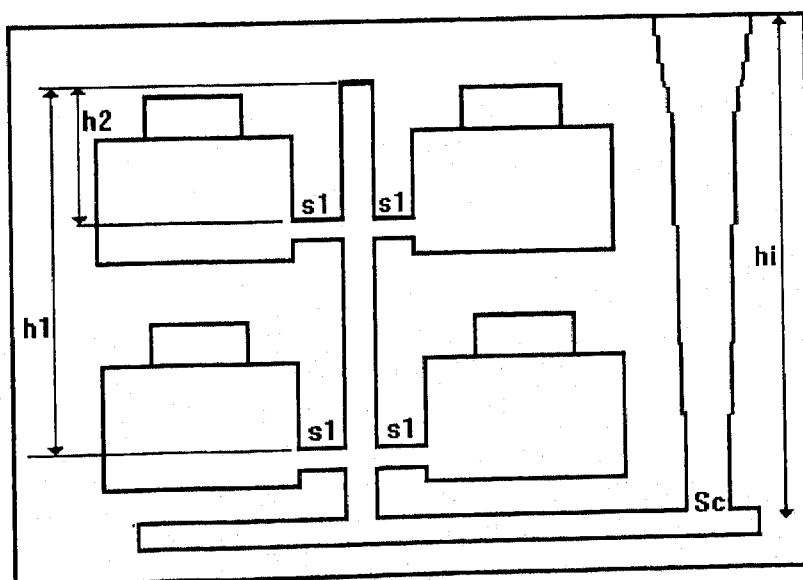


Fig. 29 Significado dos símbolos da expressão anterior.

2.5- Alimentação de peças moldadas em coquilha .

2.5.1. Introdução

Os ferros fundidos cinzentos ou nodulares constituem ligas metálica de excepção do ponto de vista de alimentação. Com efeito os ferros fundidos cinzentos e nodulares são as únicas ligas que durante a fase de solidificação tem uma fase de expansão correspondente a solidificação da grafite. Este facto permite que muitas peças nestas duas ligas seja fundidas sem alimentadores.

Mas para as restantes ligas foi sempre necessário compensar a contracção devida ao arrefecimento no estado liquido e à solidificação. Para tal são colocadas cavidades ligadas as zonas da peça que se pretende evitar que tenham rechupe. Essas cavidades arrefecendo mais lentamente que a zona da peça em questão fornecerão metal liquido à peça durante a solidificação. Como "alimentam" a peça durante a solidificação dá-se-lhes o nome de alimentadores.

2.5.2. Condições a satisfazer para garantir uma boa alimentação

Para que um alimentador cumpra a sua missão tem que se verificar duas condições:

--- A solidificação tem que se dar por esta ordem

- a) Zona da peça a alimentar
- b) Ligação da zona da peça ao alimentador (pescoço do alimentador)
- c) Alimentador

--- Durante a solidificação o nível do metal liquido no alimentador tem que ser superior ao nível do metal liquido na zona a alimentar.

Esta ultima condição , embora manifestamente evidente é por vezes esquecida até por fundidores experientes , tendo como consequência peças defeituosas. Claro que não basta que o alimentador tenha metal liquido para fornecer. É necessário que haja uma força que o faça deslocar-se para a peça. Essa força é a força da gravidade. Dai que a segunda condição tenha que ser verificada.

Uma determinada peça metálica perde calor ao solidificar através da superfície. Por outro lado a quantidade de calor que tem que perder é proporcional ao seu volume. Resulta lógico que o cociente entre o volume de uma peça e a sua superfície seja proporcional ao seu tempo de solidificação .

Esse cociente chama-se módulo, e tem as dimensões de um comprimento. As unidades mais usadas são o centímetro e a polegada.

De acordo com o que dissemos tem que se verificar que o modulo do alimentador seja maior que o módulo do pescoço do alimentador , e este maior que o modulo da peça a alimentar, o alimentador tem que estar com o seu centro térmico a um

nível superior ao da peça e o alimentador tem que ter metal ainda liquido quando da solidificação da peça. Se estas condições forem cumpridas a peça estará isenta de rechupe.

Estas condições foram estabelecidas pressupondo que cada unidade de superfície tem as mesmas capacidades de condução de calor.

Mas vimos quando da introdução ao estudo das coquilhas que esta condição , não só não se verifica, como, propositadamente , a condutividade térmica das varias partes da coquilha é modificada de acordo com a nossa conveniência. Não vamos repetir aqui tudo o que na altura se disse. A solidificação dirigida , que sempre se deverá verificar nas coquilhas pode ser conseguida de muitas maneiras, mas seja qual for essa maneira haverá necessidade de compensar a solidificação da ultima parte da peça a solidificar, e se não puder ser feita com o próprio gito então teremos que utilizar alimentadores.

Mas ao contrario da moldação em areia não é necessário que o modulo do alimentador seja maior que o módulo do pescoço do alimentador , e este maior que o modulo da peça a alimentar. A utilização de pinturas isolantes poderá evitar que o alimentador tenha que cumprir essa condição. Mas terá que cumprir as outras duas, ou seja tem que ter o seu centro térmico a um nível superior ao da peça , e tem que ter metal ainda liquido quando da solidificação da peça.

Dissemos atrás que os ferros fundidos cinzentos e nodulares tinham um comportamento diferente de todas as outras ligas metálicas. Essa diferença consiste no facto de durante a solidificação haver uma fase e expansão devida à solidificação da grafite. Dissemos também ser possível aproveitar esse facto para produzir peças sãs sem a utilização de alimentadores.

2.5.3. Condições a cumprir para não ser necessária alimentação

Durante muito tempo tentou-se saber que condições tinha que satisfazer uma determinada peça para se poder produzir sem alimentadores. Para ferro fundido cinzento sabia-se que a grande maioria das peças podia ser produzida sem alimentadores. As duas condições a assegurar eram:

--- Carbono equivalente elevado (da ordem de 4,3- 4,5%)

--- Temperatura de vazamento não superior a 1320 °C

A primeira condição resulta da necessidade de haver uma fase grafitica importante, pois é esta que compensa a contração metálica.

A segunda condição é necessária pelo seguinte: a precipitação da grafite permite compensar contração de solidificação mas não chega para compensar a contração no estado liquido. Esta é minimizada por temperaturas de vazamento baixas. Na realidade o

que se necessita é encher a peça a uma temperatura o mais baixa possível. Para a grande maioria das peças isto é conseguido com uma temperatura máxima na colher de 1320 °C.

As excepções eram peças com grandes diferenças de espessuras sendo as partes mais espessas da ordem de 7 a 10 cm. e as mais finas da ordem de 1,5 - 3 cm.

Quando do aparecimento do ferro nodular a situação alterou-se por completo. A regra inicial foi que as peças em ferro nodular necessitavam de alimentadores. No entanto os fundidores sabiam que uma das razões era o frequente não cumprimento das condições atrás referidas. E o facto de algumas peças em certas condições poderem ser produzidas sem alimentadores levou os investigadores a tentar estabelecer as condições necessárias à não alimentação.

Karsey [5] e outros investigadores, após anos de investigações estabeleceram quatro condições que tinham que ser cumpridas para se poder produzir peças sem alimentadores.

- 1ª A temperatura de vazamento terá que ser inferior a 1340 °C , e de preferencia inferior a 1315 °C
- 2ª Tempo de vazamento curto , e através de ataques finos (consequentemente numerosos pois tempos de enchimento curtos necessitam de uma secção característica grande.)
- 3ª Espessura mínima significativa da peça = 2,5 cm. (Esta condição deriva de ter que se vaziar abaixo de 1340°C)
- 4ª Rigidez da moldação elevada.

A primeira condição é intuitiva. Se a temperatura de vazamento for elevada então com o arrefecimento durante o estado liquido haverá contracção , é tal como com todos os outros metais terá que haver chegada de metal suplementar para compensar essa contracção. Tal não acontece se no fim do enchimento da peça se iniciar de imediato a solidificação. A terceira condição decorre como se disse da primeira. As outras duas necessitam ser explicadas.

A segunda condição é imposta para se conseguir encher completamente a peça sem que se inicie a solidificação. Se tal não acontecer a peça terá rechupe secundário.

Este tipo de rechupe só tem significado nos ferros fundidos nodulares. A quarta condição em conjunto com a segunda evitam o rechupe secundário.

Rechupe primário e Rechupe secundário

Esta terminologia deve-se a Stephen Istvan Karsay [5]. Durante a solidificação o ferro nodular sofre mudanças de volume de uma maneira bastante diferente das outras ligas metálicas com excepção do ferro fundido cinzento. A maior diferença de comportamento reside no facto que o ferro nodular expande durante parte da solidificação. Esta expansão é seguida por uma contracção "secundária" no fim da solidificação de acordo com o gráfico da Fig. 30 (extraído de [5] (Stephen Istvan Karsay 1975), e adaptado para medidas do sistema metrico), que deverá ser considerado apenas como medida indicativa, pois os valores variam em função das condições particulares da cada experiência. No entanto a tendência geral mantém-se.

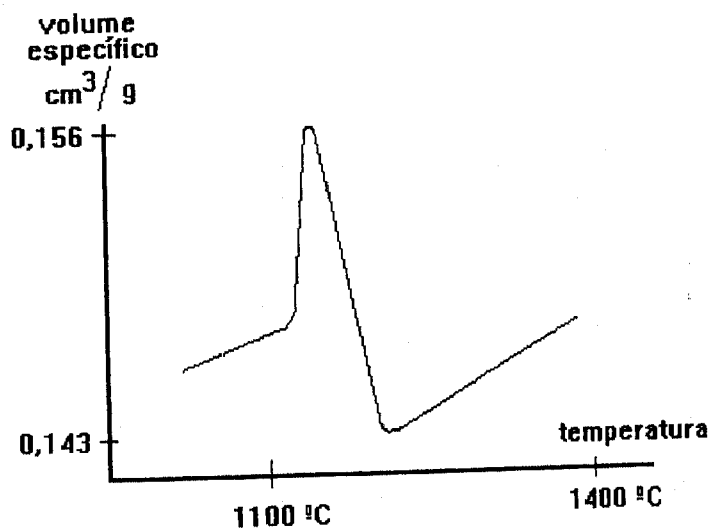


Fig 30 Variação do volume específico do ferro nodular durante a solidificação [5]

Para além deste facto, o ferro nodular é compressível [5],[28] (Stephen Istvan Karsay 1975, 1981) durante a fase de solidificação. As razões não são bem conhecidas mas pensa-se que durante a fase de solidificação ha a formação de bolhas gasosas microscópicas (de CO [5]) que posteriormente são cheias de grafite. Esta teoria também explica a esferoidicidade da grafite, pois seria nas cavidades gasosas esféricas que precipitaria a grafite. No entanto muitas perguntas ficam sem resposta, e a teoria da esferoidização sai fora do âmbito deste trabalho. Mas sendo o ferro e a grafite incompressíveis, só a presença de uma fase gasosa explica a compressibilidade do metal durante a solidificação. Deste modo durante a fase elástica de expansão devida à solidificação se as paredes da moldação forem rígidas parte dessa expansão é convertida em pressão. Quando da contracção na fase final da solidificação dar-se-ha um alívio de pressão. No caso de as paredes da moldação não serem rígidas o aumento de pressão traduzir-se-ha numa deformação da moldação e quando da fase final de solidificação a contracção dará lugar ao rechupe secundário. Esta teoria tem a seu favor a confirmação

prática de que (com exceção de peças dotadas de alimentadores sobredimensionados como se fossem para aço) é impossível produzir peças em ferro nodular isentas de rechupe secundário se o molde não tiver rigidez suficiente. O limite de rigidez situa-se na moldação em areia verde, com caixa. É absolutamente impossível obter peças isentas de rechupe secundário sem alimentadores se houver deformação das paredes da moldação devidas a pressão.

Tratando-se de moldações permanentes as condições acima descritas tem que ser reformuladas.

--- A temperatura de vazamento tem de estar relacionada com a espessura da peça pois uma temperatura de 1320 °C é definitivamente baixa para vazamento em coquilha de nodular. Essa temperatura varia entre 1380 e 1430 °C conforme a peça, e depende mais de outros condicionalismos do que da necessidade de alimentação. De todos modos situa-se neste intervalo. Esta temperatura dá origem a que, em casos normais, o metal na peça após o enchimento esteja a uma temperatura compreendida entre 1250 e 1300 °C

--- O tempo de vazamento tem que ser identicamente curto, até por outras razões que não se prendem com a alimentação, (tempos de vazamento longos em coquilha significam normalmente peças incompletas) mas os ataques serão proporcionalmente mais grossos, pois sendo um molde metálico um extractor de calor mais enérgico que a areia, para idêntico tempo de início de solidificação do metal nos ataques estes terão que ser mais espessos.

--- A terceira condição (Espessura mínima significativa da peça = 2,5 cm) não faz sentido. Uma peça com espessura significativa inferior a 2,5 cm terá que ser vazada com gomos de tal maneira grossos que eles próprios servirão de alimentadores.

--- A quarta condição (rigidez da moldação elevada) está a partida excepcionalmente bem satisfeita.

Deste modo tratando-se de vazamento de nodular em moldes metálicos a regra deverá ser a ausência de alimentadores e a presença destes a exceção.

2.6 - Simulação de Comportamento Térmico de Coquilhas.

2.6.1. Caracter cíclico da temperatura de uma coquilha

Vimos atrás (Pg. 30) que uma coquilha ao produzir uma peça sofre ela própria um ciclo térmico

O gráfico da Fig. 9 representa a variação no tempo da temperatura de:

- Um único ponto da coquilha
- Uma coquilha que já atingiu o regime estável de produção.

Desta forma teremos para cada ponto da coquilha um ciclo térmico do tipo do da Fig. 9 . De comum a penas tem o tempo de duração do ciclo (o comprimento de onda é igual para todos os pontos e igual à duração do ciclo). A curva é diferente de ponto para ponto. Vimos também (Fig. 10 Pg. 40) que estes ciclos estão desfasados no tempo, isto é, os vários pontos não passam pelo máximo simultaneamente. Há um efeito de onda maioritariamente da superfície moldante para o exterior da coquilha.

A Fig 31 Mostra uma curva real obtida durante as nossas experiencias . Trata-se de uma coquilha de ferro nodular na qual são vazados 3 provetes também de ferro nodular de diâmetros 30, 30 e 25 mm de diâmetro . Temperatura de vazamento aprox. 1400°C. Tomada de temperatura a 3 mm da superfície moldante. Esp. da coquilha aprox 30 mm na zona de tomada de temperatura.

Temperatura de um ponto da coquilha ao longo de 8 vazamentos

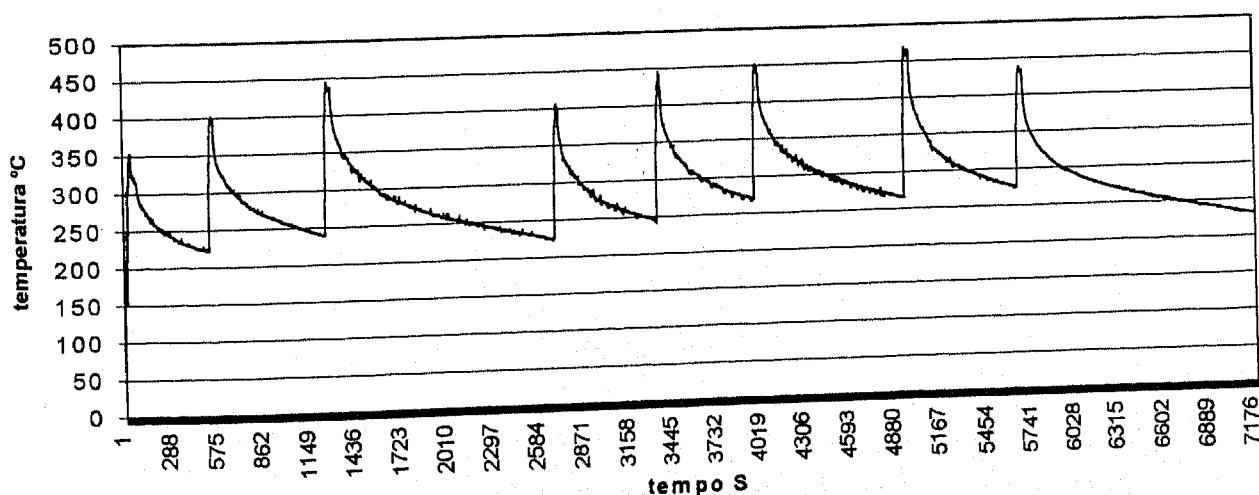


Fig. 31. Temperatura de um ponto da coquilha ao longo de 8 vazamentos

Para pontos suficientemente afastados da superfície moldante a temperatura em cada ponto não varia com o tempo (varia sim de ponto para ponto) Ver Fig. 10

2.6.2. Complexidade do Problema

Para a aplicação de programas informáticos de elementos finitos , a existência de uma fronteira de temperatura constante parece , à primeira , vista altamente favorável. No entanto no caso das coquilhas , essa fronteira não é um dado do problema , mas sim uma das alíneas do problema a resolver.

Claro que sabemos da prática que as coquilhas tem uma característica que é a auto regulação (ver pg. 57) mas não podemos afirmar que, estabelecido um tempo de ciclo este conduza sempre à regulação da coquilha. Imposto um tempo de ciclo , este pode conduzir à situação de abertura da coquilha com partes da peça ainda por solidificar. Podemos até obter de início peças boas antes da entrada em regime e chegar a situação que acabamos de descrever.

Ou seja, determinar qual é a forma geométrica no interior da coquilha que após entrada em regime tem uma determinada temperatura será , não um dado do problema , mas uma das partes do problema em si.

Por outro lado admitir que ha uma determinada fronteira com uma determinada temperatura , e caminhar no sentido da cavidade moldante tentando determinar a temperatura nesta , e determinar qual a quantidade de energia que cada elemento de superfície da cavidade moldante tem que receber por unidade de tempo poderá ser uma das maneiras de encarar o problema . Se o sistema for convergente para uma determinada situação limite seremos tentados , do ponto de vista matemático a admitir que temos uma possível solução do problema.

No entanto sabemos que se tal acontecer estaremos errados de certeza, pois se ha alguma coisa que não é constante no tempo é a temperatura da superfície da cavidade moldante, que como acabamos de ver tem uma curva cíclica típica.

Se tentarmos limitar o estudo a formas muito simples veremos que mesmo assim as dificuldades são muitas. Para melhor compreender estas dificuldades vamos considerar uma peça que para além de extremamente simples tem uma forma que parece adequada a simplificar em muito os cálculos de simulação de solidificação. Não vamos esquecer que o problema não poderá ter apenas solução teórica, e que a concordância com a realidade tem que se verificar se queremos que a simulação seja uma ferramenta ao dispor do projectista de coquilhas.

A figura 32 dá uma ideia não só da forma da peça que nos propomos estudar, como da coquilha que a irá produzir.

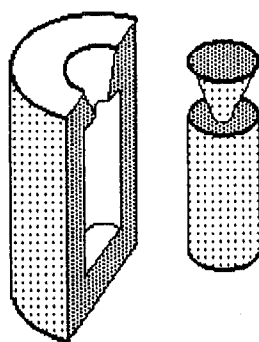


Fig. 32 Peça e meia coquilha a estudar

Na figura está representada a peça e metade da coquilha que a vai produzir. Vamos admitir que começamos a produzir a primeira peça com uma coquilha tendo todos os pontos a igual temperatura, que já por si é difícil de conseguir na prática pois implicaria um pré aquecimento numa mufla e um rápido primeiro vazamento. Para a primeira peça não parece difícil que um programa de elementos finitos faça os cálculos térmicos.

Os problemas aleatórios surgem logo na segunda peça. Para tirar a primeira peça fora da coquilha temos que abrir esta e a coquilha que até aqui aquecia regular e radialmente (pelo menos na parte central da coquilha em altura) vai agora arrefecer durante o tempo que esta aberta de uma maneira não radial, pois se fechada é cilíndrica, aberta é constituída por duas partes que sofrem arrefecimentos muito diferentes do centro para as extremidades (plano de separação) Ver fig 33

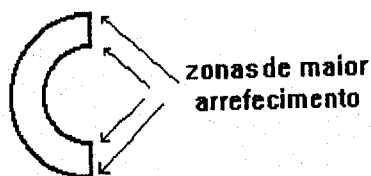


Fig. 33 Meia coquilha da figura anterior após o 1º vazamento

A segunda peça e seguintes vão arrefecer de uma maneira não radial , e é necessário saber qual a temperatura de todos os pontos da coquilha para poder saber, não só aquilo que vai acontecer na solidificação , mas também como ficará a coquilha do ponto de vista térmico para podermos fazer cálculos para a terceira peça e assim sucessivamente.

A maneira de sabermos que o sistema tendeu para uma situação controlada é verificar que todos os pontos da peça seguem um ciclo térmico constante de ponto para ponto . Mas isto não quer dizer que a situação informática encontrada seja concordante com a realidade. Com efeito, e apenas para uma peça (para um ciclo), teremos definida uma malha e uma unidade de tempo dt . A malha terá que ser "percorrida" T/dt vezes sendo T o tempo de ciclo . Ora os afastamentos em relação à realidade vão-se acumulando, e se apenas para um ciclo podem ser minimizados , para os vários ciclos podem conduzir a situações muito diferentes da realidade mesmo que matematicamente o processo seja convergente.

Mas , e ainda para uma peça simples como a peça em questão temos outros parâmetros a considerar. Após o enchimento, o metal da peça não está todo à mesma temperatura , e a distribuição de temperatura e estado (sólido ou liquido, pois algumas partes da peça podem estar já solidas no fim do enchimento) tem que ser perfeitamente conhecida. Isso implica que o programa tenha que fazer cálculos sobre o enchimento da peça . Esse calculo terá que incidir não só sobre o tempo de enchimento , mas sobre a deslocação global da massa metálica dentro da moldação durante e após toda a fase de solidificação pois enquanto o metal esta liquido diferenças de densidade criam correntes de convecção dentro da peça . Embora a parte mais importante deste calculo seja a referente à parte do enchimento temos que considerar as variações de temperatura ocorridas durante esta fase , pois para além de serem importantíssimas para o estudo térmico da solidificação tem também uma enorme influencia sobre a viscosidade do liquido. Além disso no fim do enchimento a situação térmica da superfície moldante da coquilha é muito diferente da situação imediatamente antes do vazamento.

Claro que algumas simplificações tem que ser efectuadas, mas quantas mais fizermos mais longe estaremos da realidade.

Ainda para a peça em questão temos sempre que considerar que para além da peça e da coquilha temos sempre a pintura da coquilha. Esta comporta-se como um terceiro elemento a juntar aos outros dois (à coquilha e ao metal) . Ora as pinturas ditas isolantes tem principalmente a função de diminuir a passagem de calor da peça para a coquilha . E se podemos considerar que a pintura esta sempre em contacto com a coquilha , a peça nem sempre esta em contacto com a pintura . Quando a peça arrefece contrai, e a coquilha em contrapartida nessa altura dilata por aquecimento. logo a peça vai descolar da coquilha . A maneira como a peça descola da coquilha é muitas vezes imprevisível e aleatória . Ora para a maior parte das situações (pelo menos acima dos 200 °C é assim – ver Fig. 11 , pg. 43) por ordem decrescente de importância dos modos de extracção de calor temos: condução, radiação e convecção . Isto quer dizer que quando da solidificação algumas partes da coquilha extraem calor por condução e outras

não. Mas nem sempre ha regularidade no modo como uma peça descola da coquilha. Tomemos como exemplo a peça em questão . Ao contrair a peça descola da seguinte maneira : toda a peça contrai actuando o gito como cunha ficando a peça como que pendurada . A parte pontuada da peça (Fig. 34)pretende indicar a única zona de contacto entre a peça e a coquilha. Como o descolamento lateral não é simultâneo a peça contrai mais do lado que descola em ultimo lugar , inclinando-se (torcendo)para ele , e deste modo prolongando o tempo de contacto para este lado. A principal consequência é um afastamento da simetria térmica radial que se verificava. Claro que a próxima peça vai agora flectir para o outro lado pois este está agora mais quente por ter arrefecido a peça anterior.

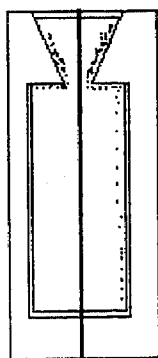


Fig.34

Para complicar mais as coisas poderemos agora supor que a peça em questão não é simétrica . Vamos admitir que por imposição de desenho a peça tem duas saliências na superfície de revolução estando as duas saliências a 90 graus . As regras de construção de coquilhas mandam neste caso que uma delas fique no plano de apartação para a outra ficar orientada no sentido de abertura da coquilha permitindo assim a sua extracção. A meia coquilha do lado da saliência que não está no plano de apartação vai ter que extrair mais calor que a outra . Assim sendo esta meia coquilha estará mais quente cedendo por isso calor a outra meia coquilha que esta mais fria. A superfície de contacto entre estas duas partes da coquilha que inicialmente se supõem foram maquinadas estão agora deformadas por efeito térmico de modo que não se sabe em que pontos tocam uma na outra . Assim sendo não é possível calcular este fluxo de calor é tanto mais importante quanto maior for a assimetria da peça.

Convém aqui lembrar que o plano de apartação de uma coquilha nunca é pintado porque se pretende que a superfície de apartação liberte calor por radiação quando a coquilha está aberta.

Podemos agora complicar mais o problema . Para isso basta que nos aproximemos da realidade da maioria das coquilhas. Peças de forma complicada são construídas em varias partes que são posteriormente assembladas , na maior parte dos casos , por aparafusamento . Algumas destas partes (como os machos metálicos) são construídos para poderem ser retirados da coquilha antes da abertura da parte principal. Estes machos aquecem de tal maneira que são muitas vezes usados alternadamente , tendo por exemplo uma coquilha dois conjuntos de machos que são usados à vez. Estes machos atravessam o corpo da coquilha e deverão ter uma certa folga para quando dilatarem (pois dilatam muito mais que a coquilha) não fiquem agarrados à coquilha.

Por tudo isto podemos concluir que o modo como as coquilhas escoam o calor é relativamente mais impreciso que para a moldação em areia , e que se para este caso os métodos de simulação de solidificação funcionam relativamente bem no caso da coquilha estamos ainda a dar os primeiros passos .

No entanto é útil fazer sempre que possível estudos por elementos finitos . Se é praticamente impossível fazer um estudo que conduza à situação real de funcionamento, pode-se conseguir um mapa térmico da coquilha que dê uma ideia da distribuição das temperaturas. Outra hipótese é a chamada simulação inversa , que consiste em utilizar programas que utilizam varios parâmetros térmicos que são obtidos experimentalmente, sendo posteriormente utilizados para o estudo de coquilhas “idênticas”.

2.6.3. Exemplo de aplicação de um programa de elementos finitos

Embora saia fora do âmbito deste trabalho juntamos um mapa térmico da distribuição das temperaturas da coquilha de três provetes usada para estudo das condições de inoculação elaborado a partir de um programa de elementos finitos. A zona apresentada é uma secção horizontal da meia coquilha que contem o sistema de gitagem.

O estudo pressupõe que se conhece a duração do ciclo térmico e a partir deste dado é possível saber a potência térmica fornecida à superfície moldante da coquilha . Também se pressupõe que a temperatura exterior da coquilha é conhecida.

As condições a fornecer ao programa são as seguintes:

Condutividade térmica do material da coquilha

Potência térmica fornecida à superfície moldante da coquilha

Temperatura de algumas partes da coquilha.

No nosso caso consideramos que o ciclo da coquilha é de 6 minutos o que implica uma potência fornecida de :

156000 w/m² para o gito de descida e para os tarugos de 30 mm

236000 w/m² para o tarugo de 45 mm

temperatura exterior da coquilha = 250 °C

Condutividade termica da coquilha = 58 w/m^{°C} (este valor e recolhido da base de dados do próprio programa.)

A potência fornecida por unidade de superficie proporcional ao modulo. Para a obter basta multiplicar o modulo em cm por 208000 . O resultado vem em W /m². Estas unidades embora não coerentes são praticas pois o cm é uma unidade muito cómoda para trabalhar em fundição, ao passo que o programa trabalha com unidades do sistema internacional.

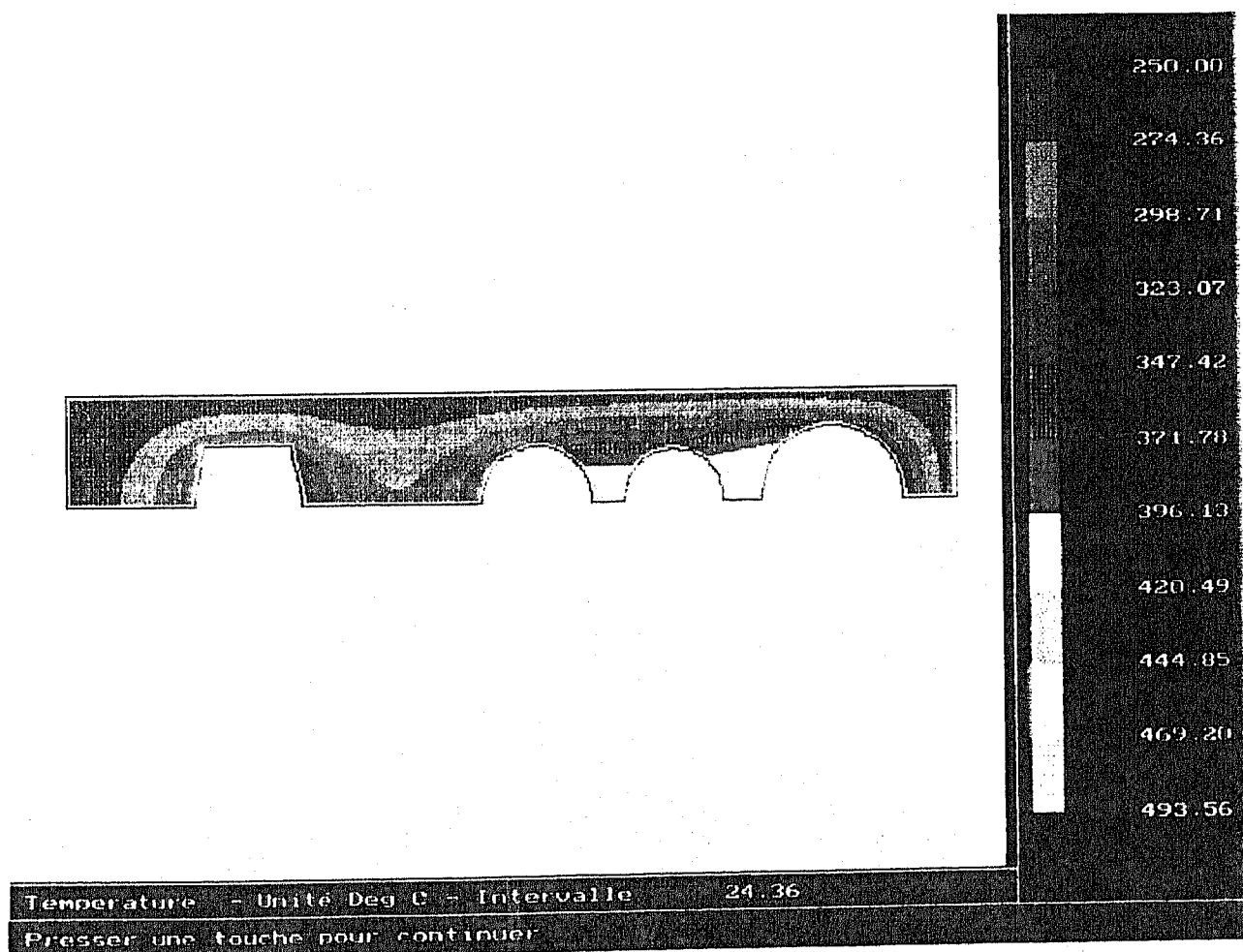


Fig. 35 Distribuição das temperaturas na coquilha de 3 provetes de acordo com um programa de simulação.

3ª Parte

PARTE EXPERIMENTAL

3.1 – Introdução

3.1.1. Plano inicial

O nosso plano inicial de trabalhos incidia principalmente nas composições químicas e nas condições de austempera. Pretendíamos obter um material barato e de elevadas características mecânicas. A ideia da austempera directa estava presente, e pretendíamos utilizar meios de austempera alternativos aos saís, quer para aumentar a sua severidade, quer para evitar problemas ambientais.

O nosso ponto de partida seria ferro nodular de matriz ferrítica, perlito-ferrítica, ou perlítica de elevada qualidade vazado em coquilha. Isso implicava que esse ferro teria que satisfazer as especificações relativas aos ferros nodulares de matrizes ferrítica, perlito-ferrítica, ou perlítica. Os provetes seriam produzidos através de vazamento em coquilha, seguidos de austempera directa. Os factores a estudar seriam:

- Composição química.
- Temperatura de vazamento.
- Temperatura de austempera.
- Tempo entre o vazamento e a austempera.
- Tempo de austempera.
- Métodos de austempera.

3.1.2. Plano efectivamente realizado

O ponto de partida atrás referido (ferro nodular, vazado em coquilha, de matriz ferrítica, perlito-ferrítica, ou perlítica de elevada qualidade), mostrou não ser um ponto de partida perfeitamente dominado dado que os provetes não tinham regularidade relativamente as características mecânicas, satisfazendo uns as normas e outros não. Tendo verificado, após estudo informático de dados obtidos por investigadores anteriores, que este problema já existia no passado, concluímos que o primeiro passo a dar seria a resolução deste problema.

Tendo-se determinado que a causa deste problema eram inclusões não metálicas introduzidas durante a inoculação o nosso trabalho recaiu fundamentalmente sobre este ponto. Assim o plano de trabalhos efectivamente realizado foi o seguinte:

- Determinação das causas do abaixamento das características mecânicas
- Estudo das condições de inoculação
- Gitagem e produção de moldações metálicas
- Austempera Directa
- Produção de peças

3.2. Determinação das causas das baixas características mecânicas

3.2.1. Identificação do problema

3.2.1.1. Condições operatórias

3.2.1.1.1 Instalação de fusão

A instalação de fusão é constituída por um forno eléctrico de indução de frequência até 3000 Hz . O cadinho utilizado foi de 150 Kg e a potência utilizada não ultrapassou (por razões de economia) os 100 KW.

3.2.1.1.2. Carga do forno.

A carga do forno foi inicialmente constituída por lingote para nodular , aço de baixo manganês, retornos de nodular de composição conhecida , ferrosilício e grafite .

A composição final pretendida é a seguinte:

C- 3,5 - 3,7

Si- 2,8 - 3,0

Mn - 0,2 - 0,3

S - < 0,01

P - < 0,03

3.2.1.1.3. Nodularização

A nodularização é conseguida à custa de uma liga de Fe-Si-Mg (1,5 % em relação ao metal) com 6% de Mg , de granulometria compreendida entre 3 e 8 mm colocada no fundo da colher de vazamento, coberta com 2% (em relação ao metal) de aparas de aço. A temperatura do forno antes do tratamento esta compreendida entre 1550 e 1560 °C. A capacidade da colher (que serve para tratamento e vazamento) é de 20 Kg. (Fig. 36 e Foto 37)

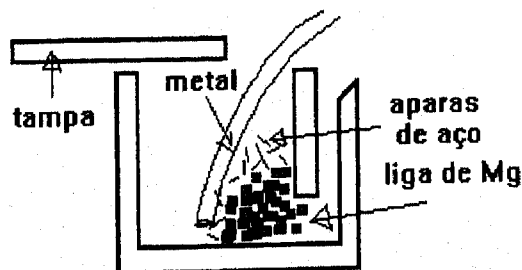


Fig. 36 Esquema da colher de tratamento de nodularização e vazamento.

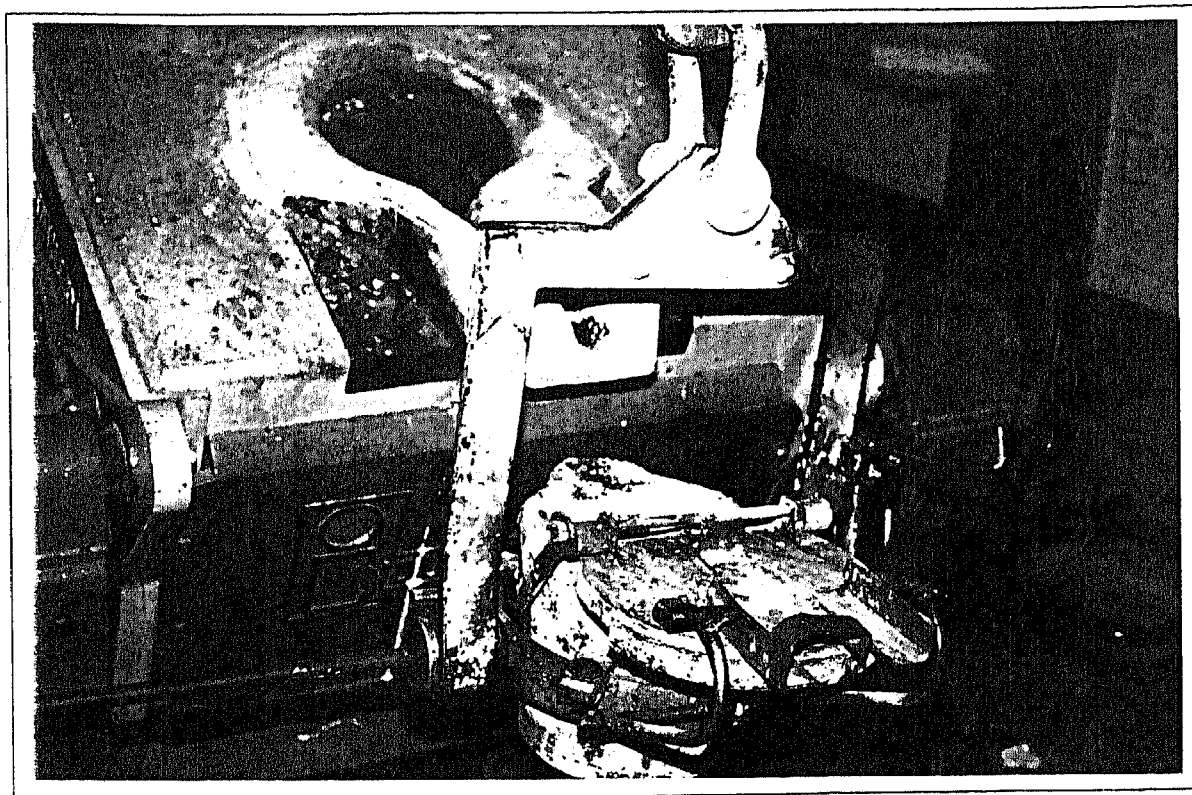


Fig.37 . Colher de tratamento em posição de receber metal do forno para nodularização. Durante todo o nosso trabalho a nodularização foi feita deste modo.

3.2.1.1.4. Inoculação e Vazamento

A coquilha (montada numa coquilhadora hidráulica) , com as dimensões de 500 X 350 Permite obter 6 tarugos redondos. Os tarugos tem todos o comprimento de 250 mm . Quatro dos provetes tem diâmetro de 30 mm e os outros dois tem diâmetro de 45 mm . A inoculação é feita no jacto de vazamento, sendo o inoculante projectado por ar comprimido obliquamente . É o metal , que ao ser vazado interrompe o inoculante , arrastando-o para o gito. A quantidade de inoculante é regulável por doseador, bem como a pressão do ar do inoculador.

O inoculante inicialmente usado foi o Spherix . As suas características indicam-se no quadro seguinte

Quadro 2 - Características do inoculante Spherix

Nome Comercial	Si	Al	Bi	Ca	Terras Raras	Apresentação e método de utilização
Spherix	73	1	1.2	2	0.5	Granulado , 0.2 – 0.8 mm.

A Fig. 38 mostra em esquema o conjunto coquilha , sistema de inoculação e colher de vazamento.

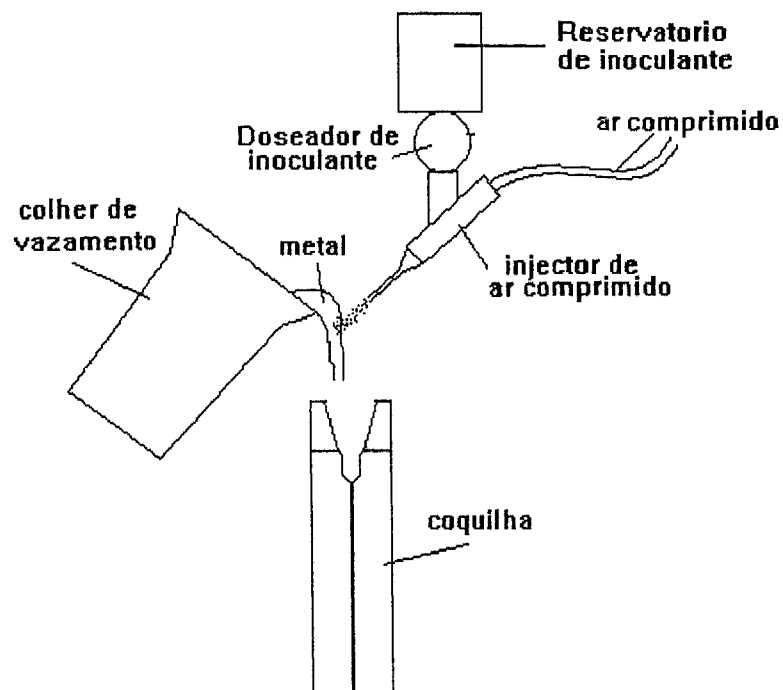


Fig. 38 Conjunto de Coquilha , Sistema inoculador e colher de vazamento .

A forma da coquilha pode ver-se na figura 39

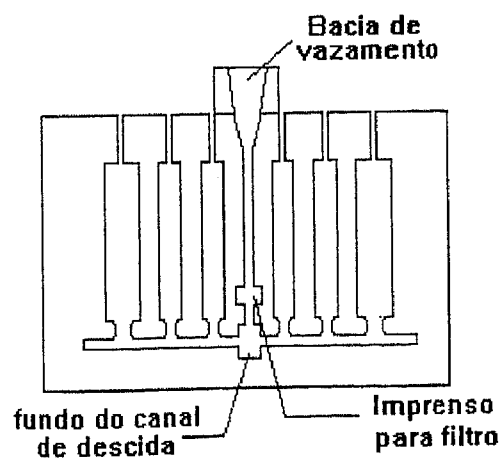
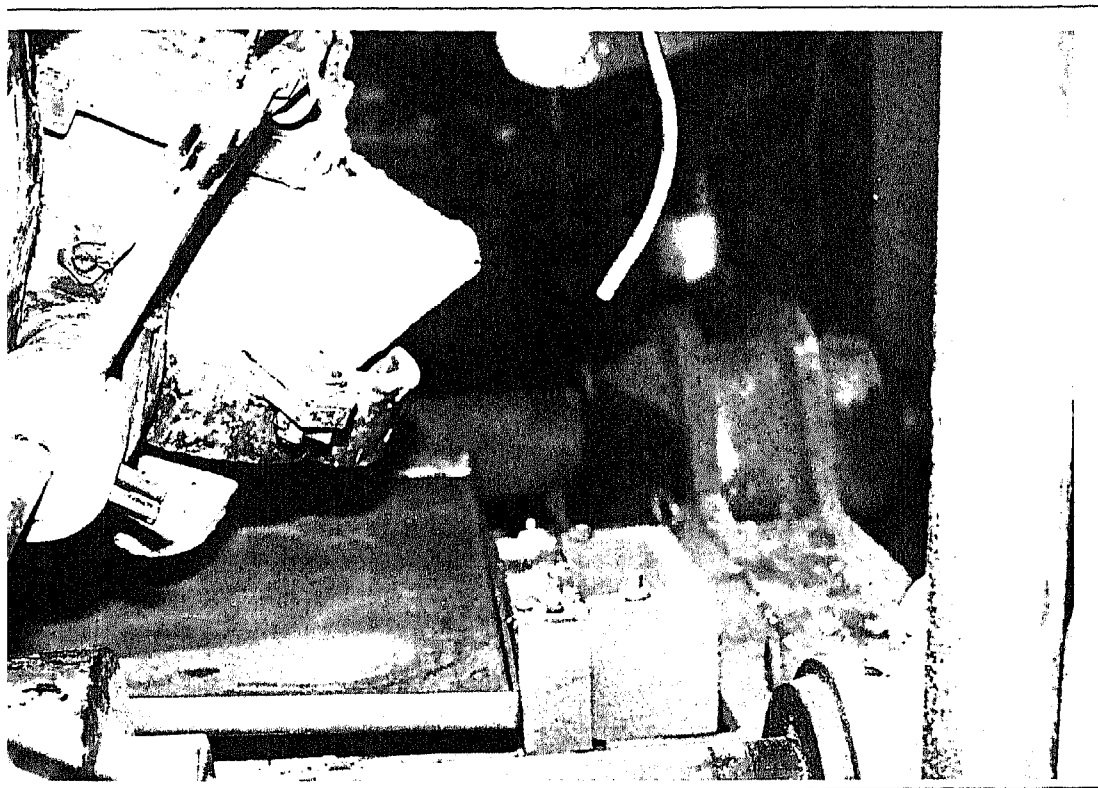


Fig. 39 Esquema da coquilha inicialmente usada.

O conjunto pode ver-se na Foto 40



- 0 Inoculação no jacto. Jacto oblíquo. Neste sistema o inoculante é disparado obliquamente em direcção ao tabuleiro que se vê à esquerda junto à bacia de vazamento. O jacto de metal interrompe o jacto de inoculante arrastando-o para a bacia de vazamento. Este sistema obriga o vazador a acertar com o jacto de metal no jacto de inoculante, o que é um inconveniente. Tem como vantagem garantir que só chega à bacia de vazamento inoculante arrastado pelo metal. O inoculante não arrastado pelo jacto metálico cai no tabuleiro e é recuperado.

5. Pintura da coquilha

A coquilha foi, inicialmente, pintada com tinta de zircónia, sendo-lhe dada uma camada de negro de fumo após o vazamento de cada cacho de provetes.

3.2.1.2. Primeiros vazamentos

Os primeiros vazamentos foram executados com a finalidade de testar o equipamento. Foram vazados provetes na coquilha e alguns provetes em areia.

Logo de início notamos o mau acabamento superficial dos provetes, que tentamos melhorar. Também verificamos que as matrizes obtidas eram constituídas por mais de 80 % de ferrite como se pode ver na foto 41 tendo um elevado numero de nódulos por mm quadrado. Notamos algumas inclusões não metálicas nos provetes a varias profundidades.

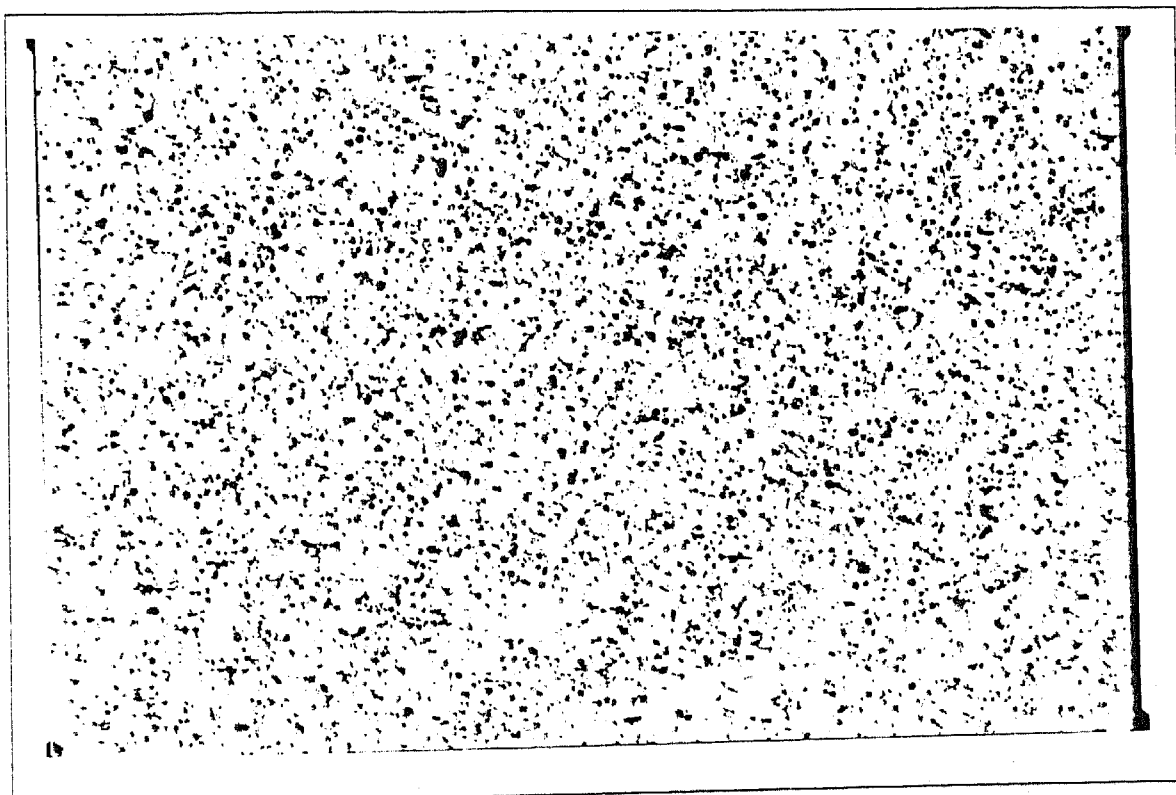


Foto 41 Ferro Nodular de matriz ferritica em bruto de vazamento vazado em coquilha 100 X Nital 4%

Os primeiros resultados mecânicos constam do quadro seguinte:

Quadro 3 - Primeiros resultados mecanicos obtidos em coquilha .Comparação com Vazamento em areia

Vazamento	Data Vaz.	Cacho	T.Rotura	Lim. Elas.	Alongamento	Obs.
E15.	28.10.96	4	56.2	39.8	5	Coquilha
E15	28.10.96	4	59.6	57.6	3.4	Coquilha
E15	28.10.96	1ª colher	76.5	55.0	6	Areia

Estes resultados foram o ponto de partida para o levantamento do problema. O provete de areia está dentro das normas (classe 60-2) mas os provetes provenientes das coquilhas na satisfazem para nenhuma classe.

Nos vazamentos subsequentes foi melhorado o problema do acabamento superficial através da utilização de uma pintura gráfica de nome comercial KOLDUR 100 de que apenas sabemos conter grafite, ferrosilício moído, um agente de suspensão e água. No entanto notavam-se algumas inclusões superficiais e também em profundidade.

Os resultados da segunda série de ensaios em coquilha constam do quadro seguinte

Quadro 4 - Resultados mecânicos da segunda série de ensaios em coquilha

Vazamento	Data	Cacho	Alongamento	Tensão de Rotura	Obs
E 21	19.12.96	2	2	43	Coquilha
E28	28.2.97	3	9	46	Coquilha
E28	28.2.97	3	4	43	Coquilha
E28	28.2.97	3	5	50	Coquilha
E29	3.3.97	3	10	48	Coquilha
E29	3.3.97	3	6	46	Coquilha
E29	3.3.97	3	8	47	Coquilha
E29	3.3.97	4	15,6	48	Coquilha
E29	3.3.97	4	15,8	47	Coquilha
E29	3.3.97	5	8	47	Coquilha
E29	3.3.97	5	9,3	48	Coquilha
E29	3.3.97	6	4,5	46	Coquilha

Com estes resultados foi construído o gráfico da Figura 42 Que relacionam a tensão de rotura com o alongamento.

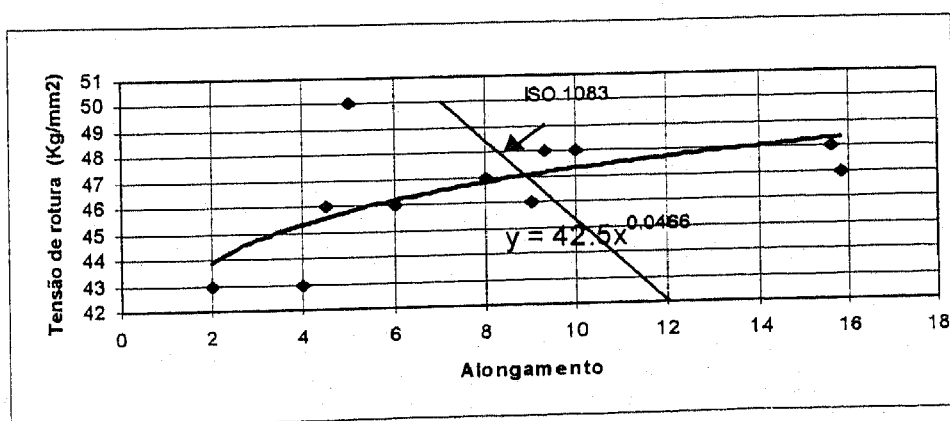


Fig. 42

Relação entre a tensão de rotura e o alongamento dos primeiros provetes de nodular vazados em coquilha. No gráfico pode ver-se a linha que une os pontos relativos à ISO 1083.

3.2.1.3. Análise dos resultados obtidos.

A distribuição dos pontos no gráfico anterior mostra uma relação absolutamente inversa àquela que seria de esperar. No ferro nodular desde que a nodularidade esteja correcta (como acontece no nosso caso) quando a tensão de rotura aumenta o alongamento diminui. Este facto é de tal modo conhecido que todas as normas o tem em consideração exigindo menos alongamento para as classes em que a tensão de rotura exigida é maior. Ora no nosso caso verificamos que a tensão de rotura e o alongamento variam no mesmo sentido.

Tal fenómeno só se pode explicar pela presença de defeitos no interior dos provetes, como verificamos acontecer no nosso caso.

Em face destes resultados tentamos saber se outros investigadores tinham já deparado com este problema. Para isso , construímos um gráfico idêntico com os valores obtidos por Silva Ribeiro quando dos ensaios realizados para a sua tese de doutoramento (Fig. 43), concluindo que o fenómeno não se deve a qualquer particularidade inerente as nossas condições particulares de trabalho , mas que já nessa altura se tinha verificado.

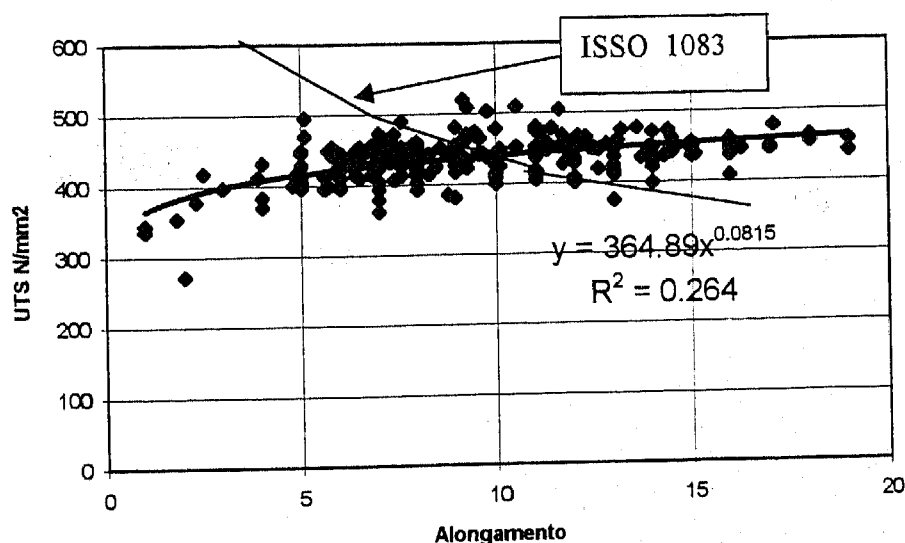


Fig 43 Relação entre a tensão de rotura e o alongamento obtida a partir dos resultados publicados por Silva Ribeiro na sua tese de doutoeramento.

Relativamente aos defeitos causadores destes resultados, embora nas superfícies de fractura seja praticamente impossível detecta-los, eles existem , sendo possível observa-los após polimento muito fino. São visíveis à vista desarmada (após polimento) e ao microscópio mostram ser constituídos por material não metálico (inclusões portanto) .

Estes factos levaram-nos a afirmar que a inoculação de Ferros Fundidos Nodulares vazados em coquilha, tal qual estava a ser praticada introduzia defeitos de modo a impedir que os valores das normas fossem atingidos. Em consequência, o tratamento de austempera (directa ou não) estaria comprometido pois é impossível conseguir por tratamento térmico eliminar defeitos do tipo inclusão.

As Figuras 44 ; 45 ; e 46 mostram o tipo de defeitos causadores do abaixamento de características mecânicas.

Estes defeitos não aparecem nos provetes vazados em areia, e também não aparecem em provetes vazados em coquilha que não foram inoculados.

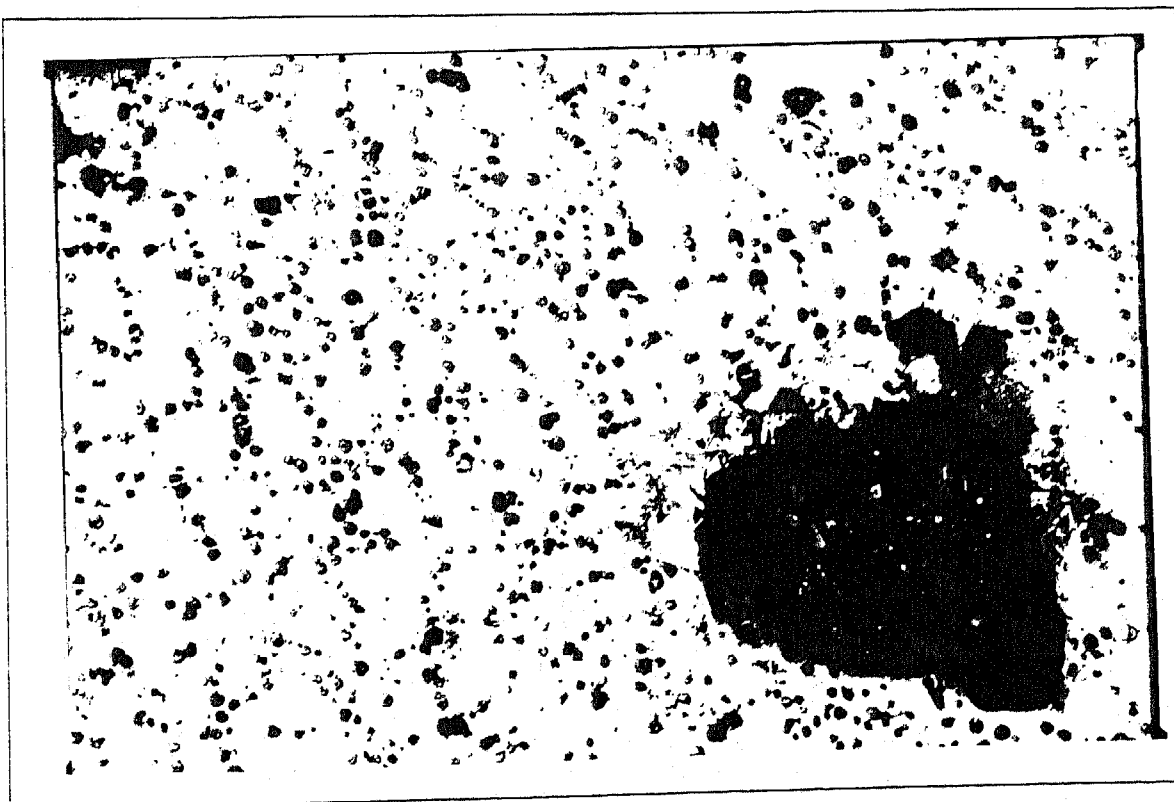


Fig 44

Inclusão não metálica causadora de abaixamento de características mecânicas. Notar que junto à inclusão aparece alguma perlite. Nital 4% . 200 X

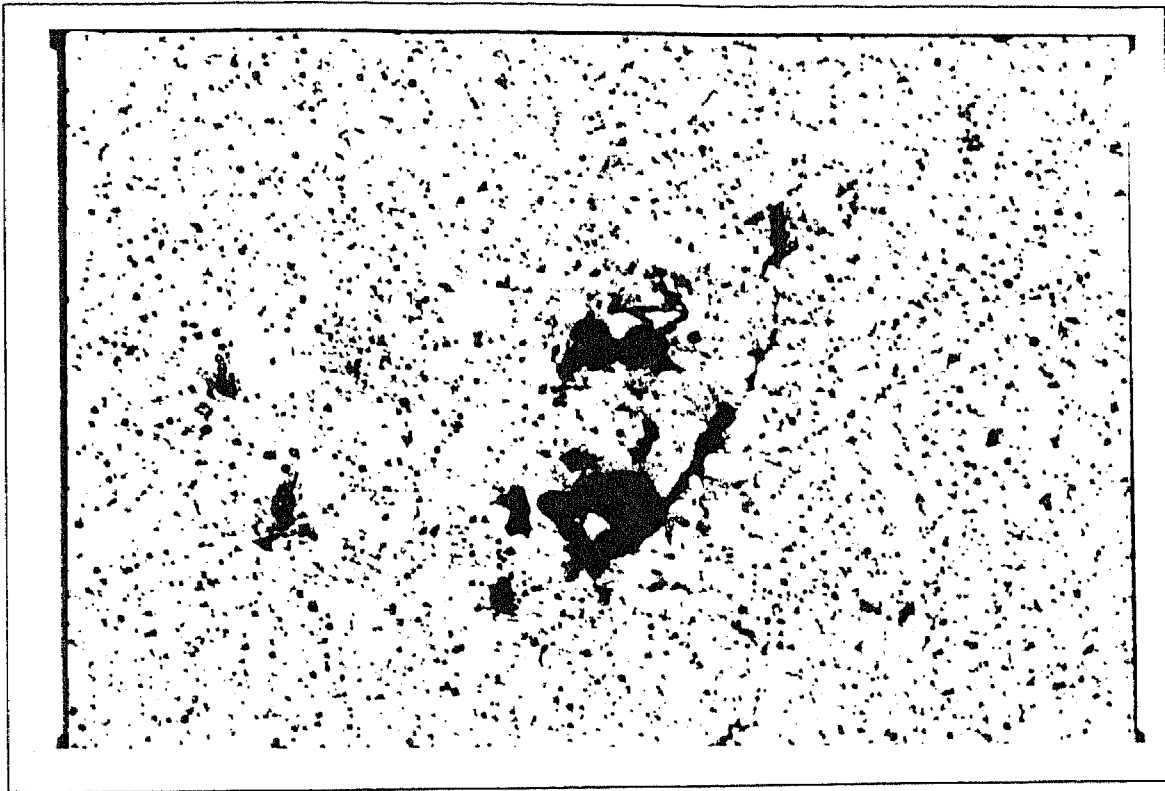


Fig.45

Inclusão não metálica do tipo da da Fig. 44
Notar que à inclusão maior está associada uma
película causando uma descontinuidade na matriz.
100 X. Não atacada.

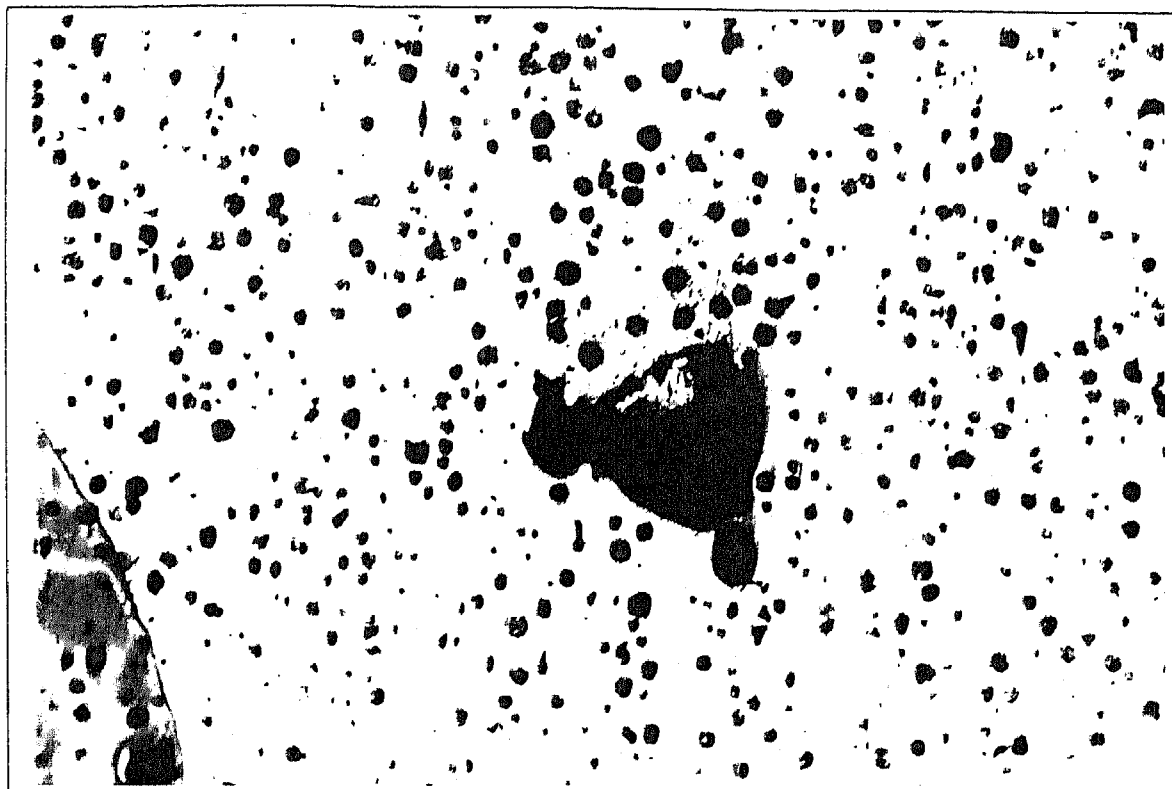


Fig 46 Inclusão do mesmo tipo das anteriores. Notar uma pequena película na parte superior 200 X não atacada.

Uma vez estabelecida a alta possibilidade que as inclusões observadas fossem as causadoras dos maus resultados mecânicos tentamos determinar a sua composição. A análise feita por microscopia electrónica determinou que as partículas eram constituídas por Silício, Magnésio, Cálcio e Bismuto. Este resultado, embora qualitativo reforça a ideia que as inclusões sejam causadas pelo inoculante pois só este contém bismuto.

3.2.1.4. Conclusões

Deste modo conclui-se ser absolutamente necessário encontrar as condições óptimas de inoculação para obter FFN vazado em coquilha livre de inclusões de modo a ser possível obter FFN austemperado por austempera directa.

3.2.2. Experiências realizadas para a resolução do problema das inclusões

3.2.2.1. Introdução

Em todas as experiências que se seguem, excepção feita para o parâmetro a estudar verificaram-se as seguintes condições:

- Temperatura de vazamento = 1430 °C
- Inoculação = Spherix = 0,2 / 0,8 mm
- Pressão de injeção 0,4 bar
- Teor de inoculante = 0,6 %
- Inoculação no jacto – jacto oblíquo

3.2.2.2. Utilização de filtros

Os filtros são posicionados na coquilha num local próprio (ver figura 40).

Os vários tipos de filtros podem ver-se na Fot. 47

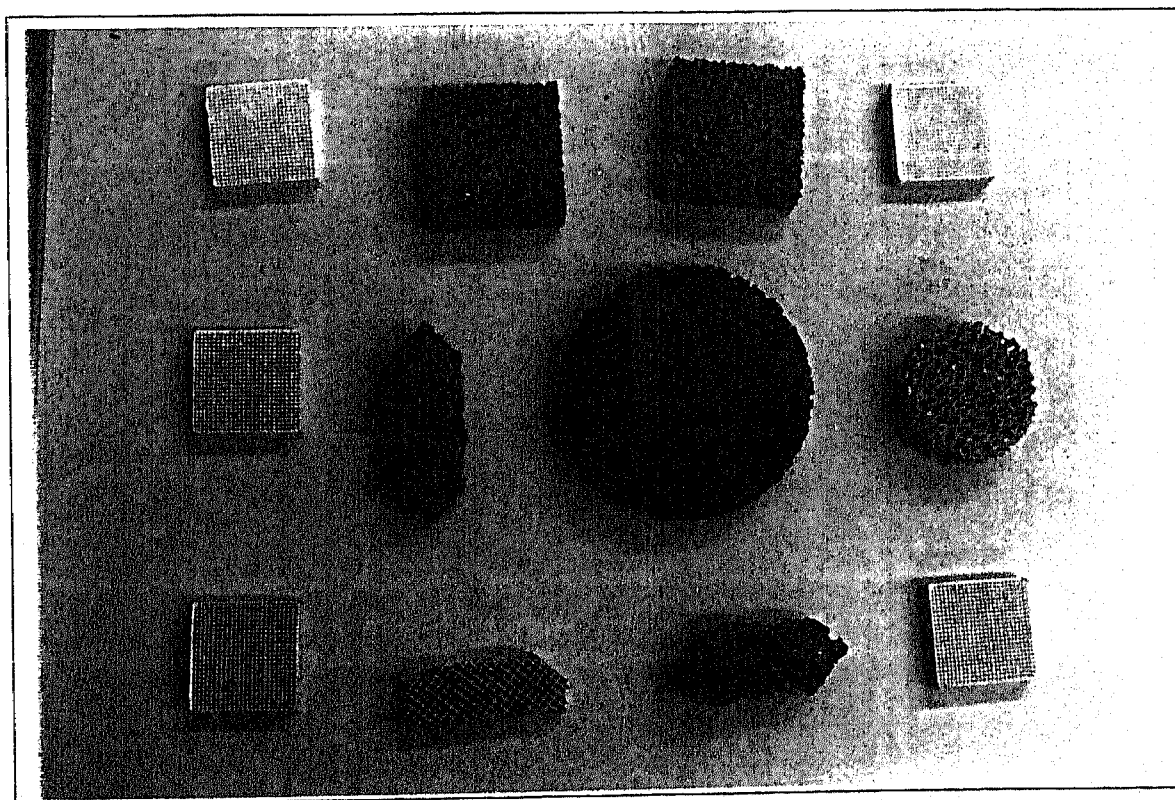


Foto. 47

Tipos de filtros experimentados para tentar eliminar as inclusões. Os filtros quadrados foram usados na coquilha representada na Fig. 40 ou Foto 64. Os filtros de forma alongada foram usados na coquilha representada na Fig. 50 ou Foto 65. Os filtros redondos foram utilizados para produzir os filtros de forma alongada.

Foram utilizados filtros de dois materiais diferentes :

Carboneto de silício
Cerâmicos

Foram também experimentados filtros de diferentes porosidades - 10 ppi e 25 ppi.

Os parâmetros estudados foram os seguintes:

Material dos filtros
Porosidade dos filtros

Os ensaios realizados constam do quadro seguinte o qual foi elaborado a partir de metal a 1430 °C na colher. Temperaturas inferiores dão peças incompletas.

Quadro 5 - Resultados da utilização de filtros

Vazamento	Cacho	Tipo de filtro	Resultados recolhidos por observação visual	Temperatura de vazamento
E 22	1	SiC 10 PPI	Cacho incompleto	1380
E 22	2	SiC 10 PPI	Algumas inclusões mas em menor numero que sem filtro	1425
E 22	3	SiC 25 PPI	Cacho incompleto	1435
E 22	4	SiC 10 PPI	Cacho incompleto	1390
E 22	5	SiC 10 PPI	Algumas inclusões mas em menor numero que sem filtro	1428
E 22	6	SiC 205PPI	Cacho incompleto	1438
E 32	2	Cerâmico 10 PPI	Algumas inclusões mas em menor numero que sem filtro	1431
E 32	3	Cerâmico 25 PPI	Cacho incompleto	1428
E 32	4	Cerâmico 10 PPI	Algumas inclusões mas em menor numero que sem filtro	1437
E 32	7	Cerâmico 20 PPI	Cacho incompleto	1432

Conclusões:

Os únicos filtros que se pode usar são os de 10 PPI e mesmo estes não resolvem o problema.

Quanto ao material dos filtros verificamos que não ha praticamente diferença de comportamento entre os cerâmicos e os de carboneto de silício

Os filtros de 10 ppi permitem obter peças cheias mas obrigam a um metal muito quente (mais de 1400°C na colher) e uma operação de vazamento levada a cabo por um operador com bastante prática , pois o mais ligeiro abrandamento a meio do vazamento tem como consequência enchimentos incompletos.

Os filtros diminuem o numero de inclusões mas não as eliminam totalmente. Alem disso constituem eles próprios um problema adicional, pois para alem da dificuldade de colocação de um filtro numa coquilha quente pode acontecer que no fecho da coquilha o filtro seja parcialmente esmagado produzindo ele próprio inclusões. Como conclusão diremos que os Filtros não são uma solução para o problema.

3.2.2.3. Aumentar a temperatura de vazamento

Esta solução tem grandes inconvenientes pois a temperatura custa dinheiro e aumenta o *fading* do nodular, para além de danificar as coquilhas . Alem disso há limitações técnicas . De qualquer modo vazamos 2 cachos a 1490 °C Os resultados constam do quadro seguinte:

Quadro 6 - Efeito do aumento de temperatura sobre as inclusões

Vazamento	Cacho	Temperatura de vazamento	Resultados recolhidos por observação visual
E 32	5	1490	Algumas inclusões
E 32	6	1492	Algumas inclusões

Conclusão

O aumento da temperatura tem como resultado uma muito pequena (?) diminuição do numero de inclusões. Não é uma solução para o problema.

3.2.2.4. Utilização de vários tipos de pinturas para coquilha

O vazamento E38 foi realizado usando duas tintas diferentes da habitual e provenientes de um ouro fornecedor

O quadro seguinte mostra os resultados

Quadro 7 - Efeito da utilização de varias tintas sobre o aparecimento de inclusões

Vazamento	Cacho	Tinta	Resultados recolhidos por observação visual
E 38	1	Dycote 39 (isolante)	Algumas inclusões
E 38	2	Dicote 39 (isolante)	Algumas inclusões
E 38	3	Dycote 36 (condutora)	Algumas inclusões
E 38	4	Dycote 36 (condutora)	Algumas inclusões

Conclusão

As pinturas não tem qualquer efeito nas inclusões que temos vindo a estudar

3.2.2.1. Variação da granulometria do inoculante

O inoculante que temos vindo a utilizar tem as seguintes características:

Nome Comercial	Si	Al	Bi	Ca	Terras raras	granulometria
Spherix	73	1	1.2	2	0,5	0,2 – 0,8 mm

A granulometria indicada corresponde a 90 % do total . Há sempre algumas partículas mais pequenas. Daí que seja possível por crivagem obter granulometrias entre 0,2 e 0,8 e ainda , embora em menor quantidade partículas abaixo de 0,2 mm.

Por crivagem seleccionamos 3 granulometrias:

- < 0,2 mm
- 0,2 / 0,4 mm
- 0,4 / 0,6 mm

O efeito da granulometria do inoculante sobre o aparecimento de inclusões pode ver-se no quadro seguinte

Quadro 8 - Efeito da granulometria do inoculante sobre o aparecimento de inclusões

Vazamento	Cacho	Granulometria	Resultados recolhidos por observação visual	Observações
E30	2	< 0,2 mm	Menos inclusões	Alguns carbonetos e muita perlite 70 %
E30	3	< 0,2 mm	Menos inclusões	Alguns carbonetos e perlite 50 %
E30	4	0,2 / 0,4 mm	Algumas inclusões	
E30	5	0,2 / 0,4 mm	Algumas inclusões	
E30	6	0,4 / 0,6 mm	Algumas inclusões	
E30	7	0,4 / 0,6 mm	Algumas inclusões	



Conclusão :

A presença de inclusões não depende da granulometria do inoculante. A granulometria $< 0,2$ mm tem menos poder inoculante provavelmente por este não conseguir penetrar a superfície do jacto metálico .

3.2.2.5. Utilização de filtros duplos com pastilha inoculante sinterizada no meio, sem utilização da inoculação no jacto.

A Figura 48 mostra este filtro em esquema. Estes filtros são comercializados prontos a serem usados .



Fig.48 Filtro duplo com pastilha inoculante sinterizada no meio.

O efeito da utilização de filtros duplos com pastilha inoculante sinterizada no meio sobre o aparecimento de inclusões pode ver-se no quadro seguinte:

Quadro 9 - Efeito da utilização de filtros duplos com pastilha inoculante sinterizada no meio sobre o aparecimento de inclusões

Vazamento	Cacho	Resultados recolhidos por observação visual
E 31	2	Algumas inclusões – Presença de carbonetos
E31	3	Algumas inclusões – Presença de carbonetos

Conclusão

A utilização deste tipo de filtros traduz-se por uma diminuição acentuada do numero de nódulos /mm² sem eliminação das inclusões .A qualidade da inoculação não é aceitável pois aparecem carbonetos.

3.2.2.6. Utilização de uma bacia de vazamento com Stopper

A Fig. 51 mostra este processo de inoculação em esquema. O metal é inoculado da mesma maneira , mas só quando a bacia de vazamento está cheia é que se abre o stopper de modo a iniciar o vazamento

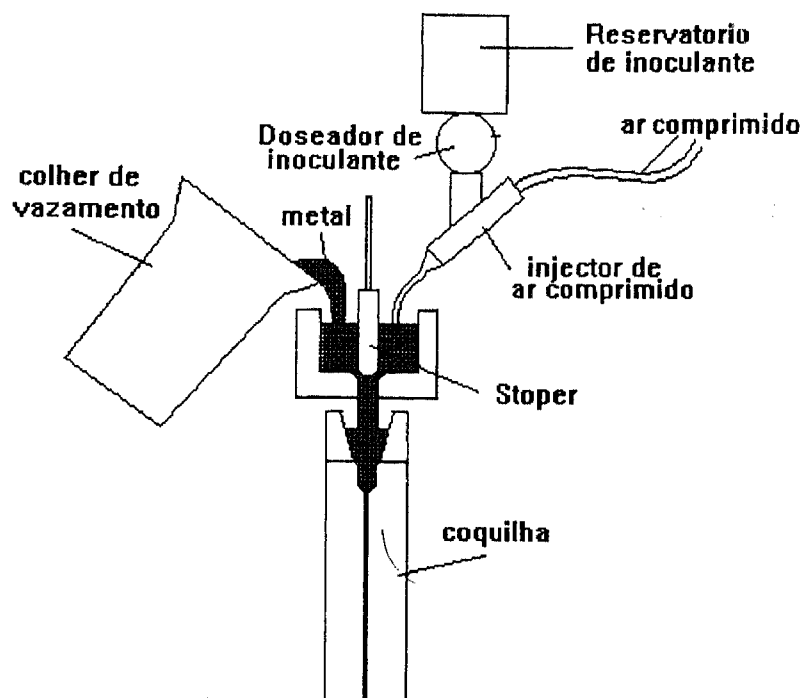


Fig. 49 Utilização de uma bacia de vazamento com Stopper.

O quadro seguinte mostra os resultados da inoculação feita por este processo

Quadro 10 - Efeito da utilização de uma bacia de vazamento com Stopper sobre o aparecimento de inclusões

Vazamento	Cacho	Resultados recolhidos por observação visual
E 31	4	Algumas inclusões
E.31	5	Algumas inclusões

Conclusão

A utilização de uma bacia de vazamento com stopper não elimina as inclusões

3.2.2.7. Modificação do sistema de gitagem

Após todas estas experiências decidiu-se executar outra coquilha incluindo no sistema de gitagem uma câmara de captação de escórias. (Fig. 50 e Foto 65)

Esta coquilha foi usada com filtros e sem filtros. Os resultados da observação visual são idênticos quer se usem filtros ou não, mas o numero de inclusões é nitidamente menor, sendo as inclusões mais pequenas

Por esta razão e pelo facto de esta coquilha desmoldar melhor passamos a utiliza-la

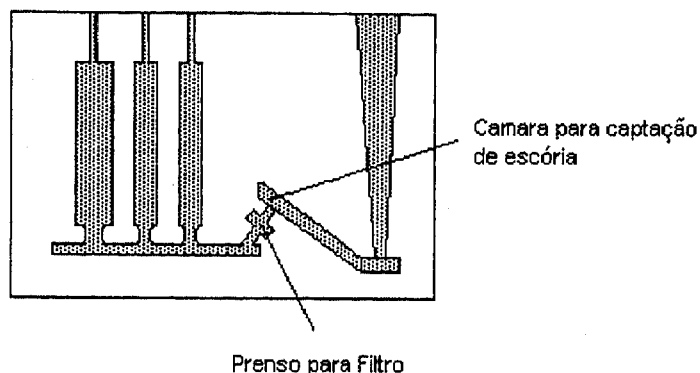


Fig. 50 Esquema da coqueira com sistema de captação de escórias

Conclusões

O sistema provou reduzir o numero de inclusões com maior eficácia que os filtros, mas nem mesmo usando-o em conjunto com estes se atingiu a total eliminação das inclusões. Não é solução para o problema das escórias.

3.2.2.8.Utilização de um inoculante diferente. Secagem dos inoculantes

O inoculante usado tem o nome comercial de "inolate 40 " As suas características são indicadas a seguir

Quadro 11 - Características do Inolate 40

Nome Comercial	Si	Al	Bi	Ca	Terras raras	Granulometria
Inolate 40	74	1	1.2	2	0,6	0,2 / 0,8 mm

Os inoculantes foram secos em estufa a 200 °C

Os resultados das experiências com inolate 40 , inolate 40 seco e Spherix seco constam do quadro seguinte:

Quadro 12 - Resultados da utilização de outro inoculante e da inoculantes secos

Vazamento	Cacho	Inoculante	Resultados recolhidos por observação visual
E 34	2	Inolate 40	Algumas inclusões
E 34	3	Inolate 40	Algumas inclusões
E 34	4	Inolate 40 seco	Algumas inclusões
E 34	5	Inolate 40 seco	Algumas inclusões
E 34	6	Spherix seco	Algumas inclusões
E 34	7	Spherix seco	Algumas inclusões

Conclusões

A secagem do inoculante não tem qualquer influencia sobre as inclusões

O Inolate mostrou ser um inoculante muito idêntico ao Spherix quer na composição , granulometria , e resultados.

3.2.2.9..Modificação do angulo de ataque do jacto inoculante

Foi experimentada uma variante do método atrás descrito que consiste em utilizar um tubo condutor de inoculante disparando este directamente na bacia de vazamento em vez de o lançar obliquamente. Foto 51

Este sistema tem a vantagem de exigir menos do vazador , pois este não tem que se preocupar em acertar com o jacto de metal no fluxo de inoculante

Os resultados constam do quadro seguinte

Quadro 13 - Influencia da posição do tubo inoculador sobre o aparecimento de inclusões

Vazamento	Cacho	Resultados recolhidos por observação visual
E 35	2	Algumas inclusões
E 35	3	Algumas inclusões

Conclusão

O sistema é absolutamente idêntico ao de jacto oblíquo, ou seja, não é solução para o problema

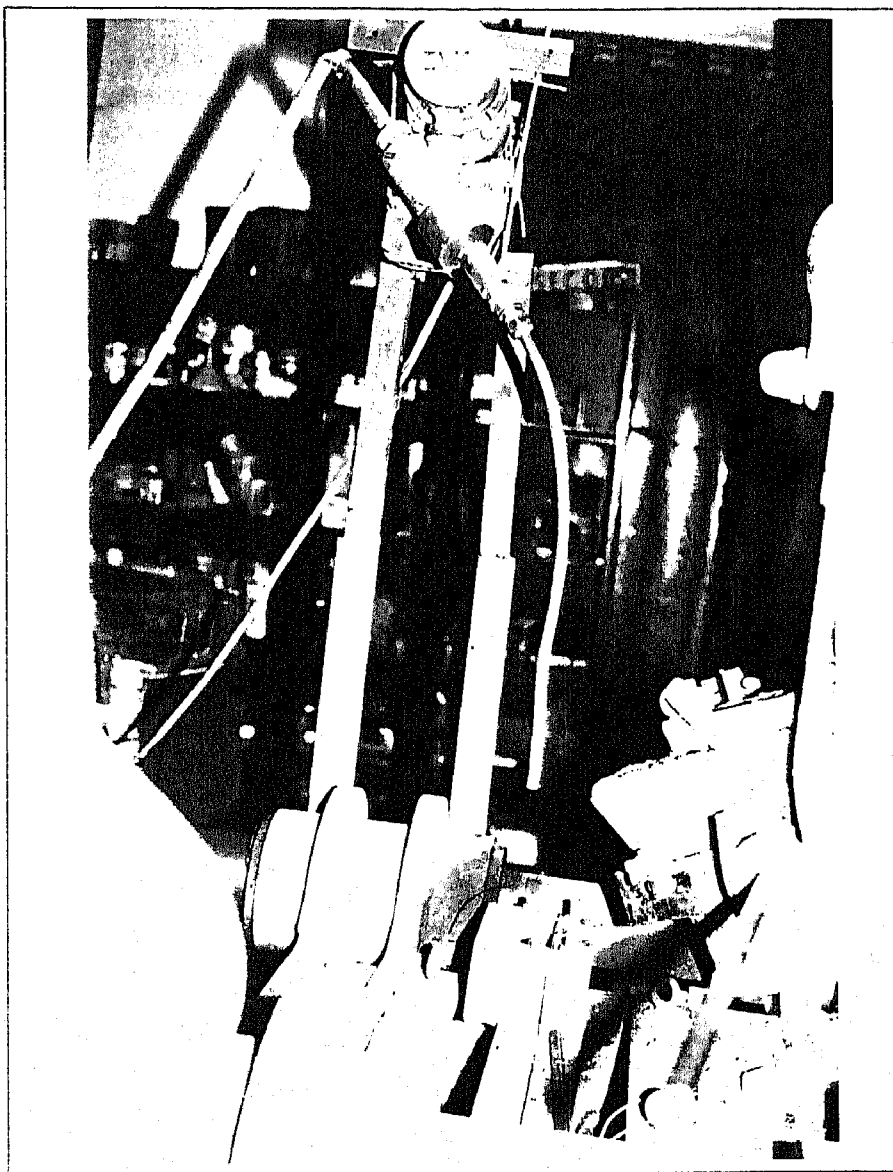


Foto 51 Inoculação por jacto directo

3.2.2.10. Modificação da geometria dos provetes

Como, por um lado, os provetes vazados em areia não apresentam as inclusões de que temos vindo a tratar, e por outro lado, a sua geometria é muito diferente da dos provetes vazados em coquilha, pusemos a hipótese de este tipo de defeito também se produzir nos provetes de areia, com a diferença que aqui, devido à geometria dos provetes haveria tempo para as inclusões sofrerem um movimento ascensional por flutuação, saindo fora da zona dos provetes propriamente ditos. Lembramos que os provetes de areia são retirados de uma cunha em forma de Y tendo a parte superior do Y as funções de alimentador. Os provetes são retirados da parte de baixo do bloco Y. A posição dos provetes na moldação de areia é horizontal. Deste modo a eventual flutuação das inclusões produziria provetes sãos. Pelo contrario, os provetes na coquilha estão em posição vertical, e uma eventual flutuação não afastaria as inclusões do eixo do provete.

Para testar esta hipótese decidimos executar uma coquilha com a forma exacta do provete Y, inoculando da forma habitual para a coquilha.

A coquilha produzida pode ver-se na Foto 52

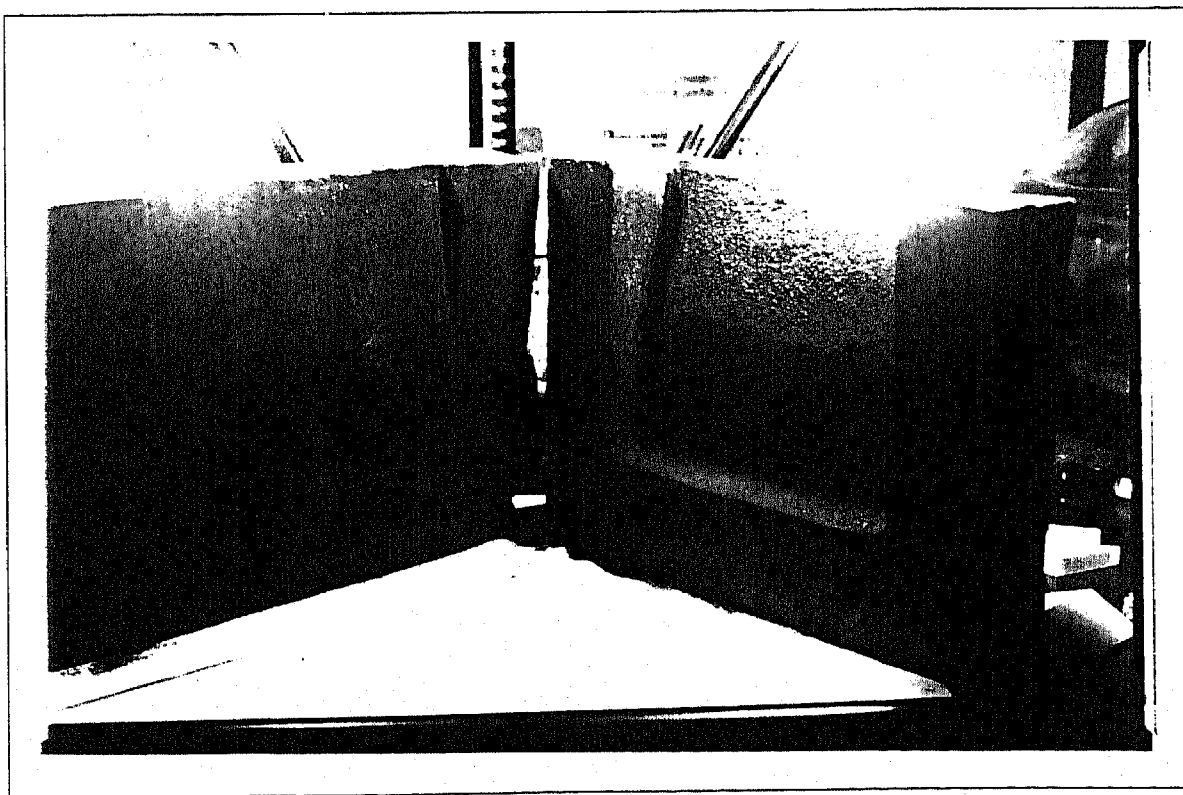


Foto 52 Coquilha para produzir provetes em Y com as mesmas dimensões previstas pelas normas.

Os resultados obtidos constam do quadro seguinte:

Quadro 15 - Influencia da posição dos provetes sobre o aparecimento de inclusões

Vazamento	Cacho	Resultados recolhidos por observação visual
E 35	2 Bis	Algumas inclusões
E 35	3 bis	Algumas inclusões

Conclusões :

A geometria dos provetes não é responsável pelas inclusões

3.2.2.11 . Utilização de tarugos inoculantes Electrofundidos

Todos os inoculantes são obtidos por processos metalúrgicos que envolvem a operação de fusão. Posteriormente são vazados e fragmentados produzindo blocos de tamanho variável. Para obter granulometrias convenientes são moídos e classificados. Para se obterem blocos de tamanhos pré-determinados podem ser sinterizados ou fundidos em forno eléctrico. Esta ultima operação garante uma maior pureza do inoculante por varias razões:

1ª) O processo de fusão elimina qualquer partícula estranha que possa acompanhar o inoculante quando da operação de moagem.

2ª) Um inoculante electrofundido é à partida um produto de qualidade, em comparação com um inoculante sinterizado que pode ter sido produzido apenas com a finalidade de aproveitamento de finos.

Foram utilizados tarugos electrofundidos provenientes de dois fabricantes diferentes e em ambos os casos não se observaram as porosidades que vínhamos tentando eliminar.

O quadro seguinte mostra os resultados da análise visual de superfícies polidas obtidas em provetes inoculados com tarugos inoculantes electrofundidos

Quadro 15 - Resultados visuais de superfícies polidas obtidas em provetes inoculados com tarugos inoculantes electrofundidos

Vazamento	Cacho	Inoculante	Resultados colhidos por observação visual
E 37	2	Germaloy	Sem inclusões
E 37	3	Moldinoc	Sem inclusões
E 37	4	Germaloy	Sem inclusões
E 37	5	Moldinoc	Sem inclusões

Com estes provetes realizamos ensaios mecânicos . Os resultados constam do quadro seguinte

Quadro 16 – Resultados mecânicos obtidos com provetes inoculados com inoculantes electrofundidos

Vazamento	Cacho	Inoculante	Proвете	Tensão de rotura	Alongamento
E 37	2	Germaloy	1	55	9.2
E 37	2	Germaloy	2	56	9.8
E 37	3	Moldinoc	1	48	11
E 37	3	Moldinoc	2	47	15.4
E 37	4	Germaloy	1	50	16.6
E 37	4	Germaloy	2	49	16.8
E 37	5	Moldinoc	1	62	4.4

O gráfico relativo a estes ensaios pode ver-se na Fig. 53 que também mostra a curva formada pelos valores da norma isso 1083

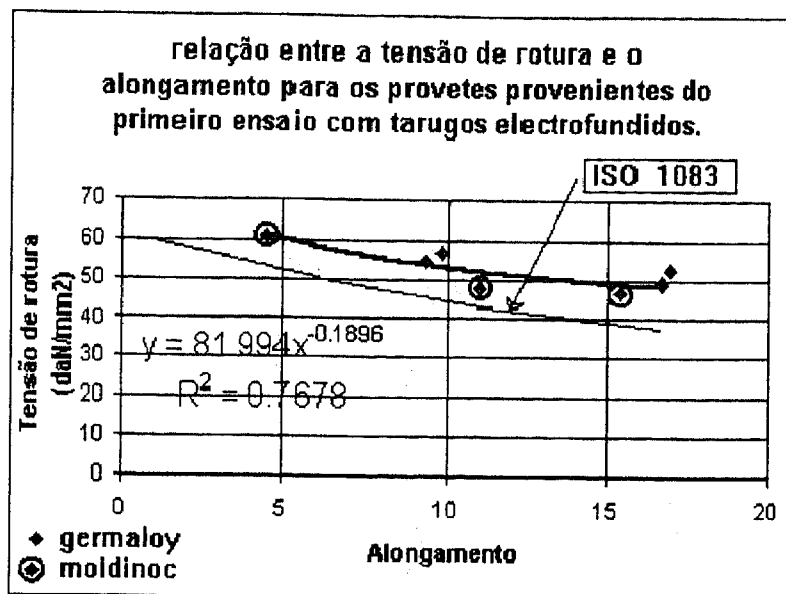


Fig 53

Para a realização deste tipo de inoculação são produzidos por moldação blocos de areia autosecativa nos quais o bloco inoculante fica incrustado no momento da moldação do bloco.

Estes blocos tem duas cavidades separadas por uma parede. Numa das cavidades fica incrustado o bloco tendo a outra um furo por onde cai o metal para a coquilha. O vazamento é feito na cavidade que contem o bloco passando o metal para a outra cavidade e caindo para a bacia de vazamento da coquilha. A Fig. 54 mostra o conjunto no momento do vazamento.

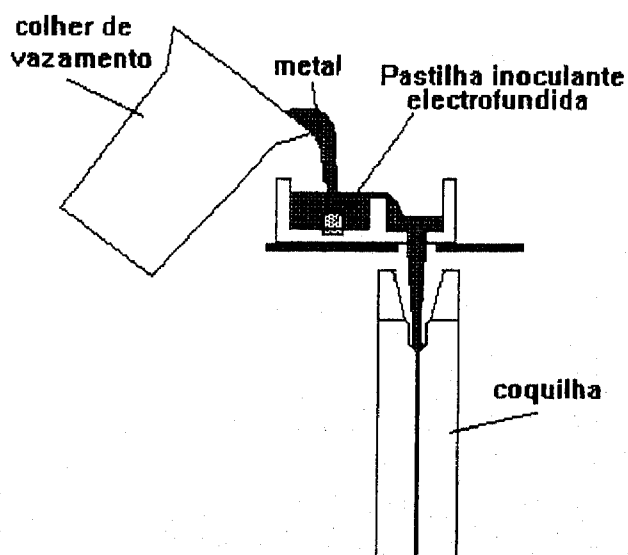


Fig 54. Esquema de conjunto para o vazamento utilizando tarugos Electrofundidos

A Foto 55 mostra um bloco preparado e colocado na posição de vazamento

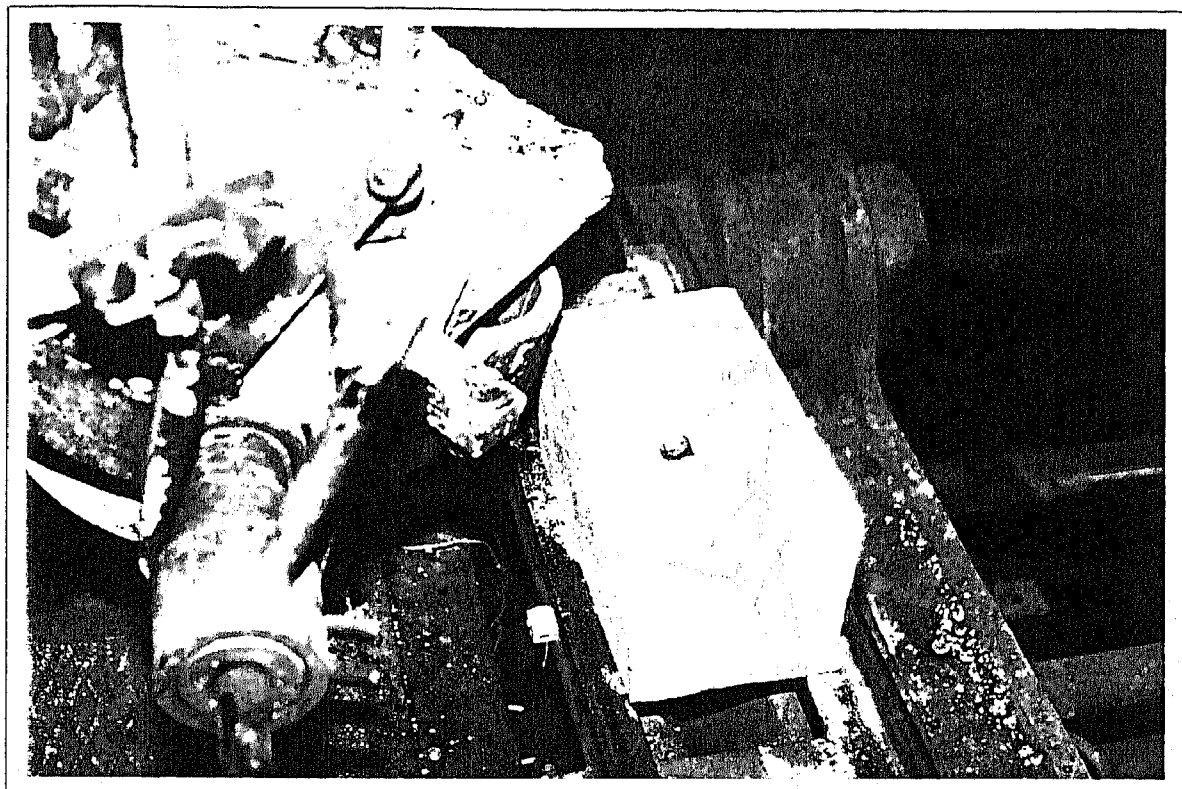


Foto 55

Bloco de areia com tarugo electrofundido na posição de vazamento. Na foto pode ver-se a colher de vazamento, o bloco de areia, e a bacia de vazamento da coquilha

A foto 56 mostra a coquilha aberta e meio bloco de areia que foi propositadamente cortado e colocado na posição na qual seria vazado. Comparando com o esquema da Fig. 54 podemos facilmente ver o que acontece quando do vazamento. O metal inicialmente rodeia o tarugo inoculante e só quando atinge o nível do septo separador é que cai na bacia de vazamento da coquilha. A dissolução é gradual e termina pouco antes da peça estar cheia. No entanto o metal que provem da colher mistura-se com o metal da câmara da esquerda que está inoculado, de modo que não entra metal à coquilha sem inocular.

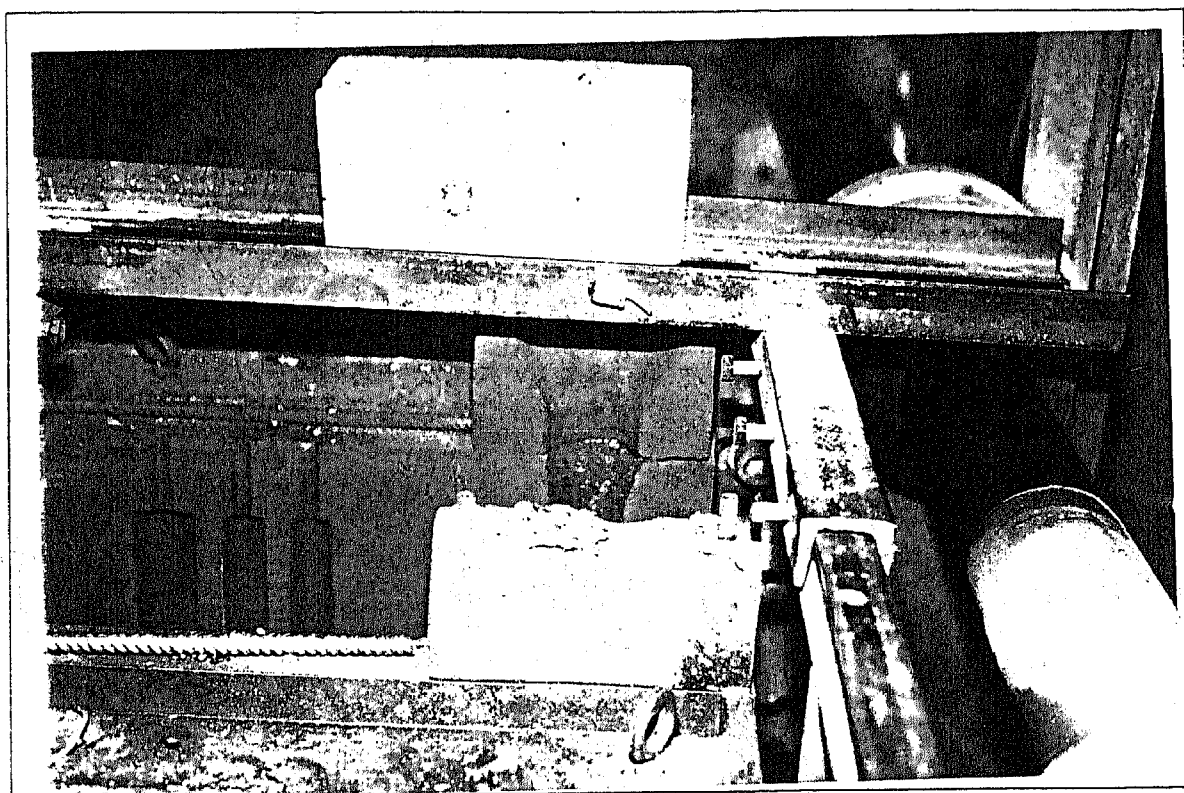


Foto 56 Bloco de areia cortado e colocado por cima da coquilha aberta na "posição" de vazamento.

O mesmo bloco pode ver-se na foto 57 acompanhado de um esquema cotado.

Os blocos por nos utilizados foram realizados em areia aglomerada por resina fenolica.

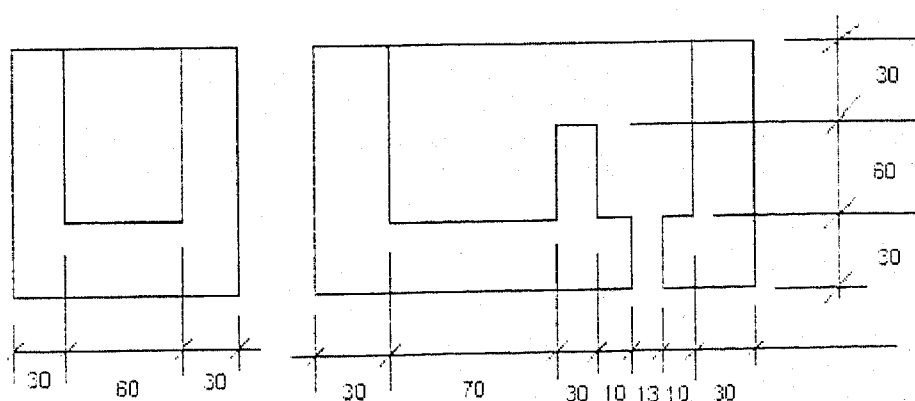
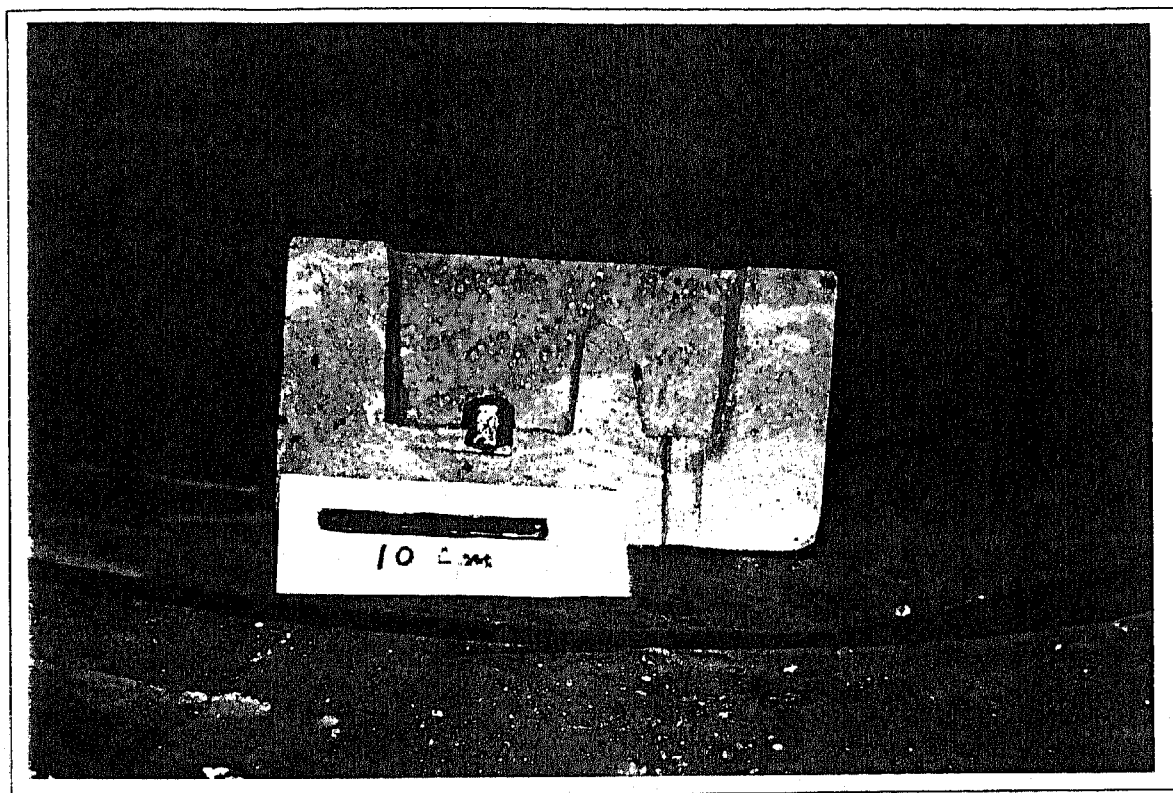


Foto 57 Bloco de areia cortado e esquema dimensional do mesmo

O sistema apesar de dar bons resultados tem dois inconvenientes que do ponto de vista industrial não são aceitáveis:

--- O bloco de areia não é reutilizável pelo que cada vazamento (cada cacho) necessita de um bloco.

--- No fim do vazamento a cavidade que contém o bloco inoculante electrofundido fica cheio de metal, o que diminui o rendimento metal / peça.

A Foto 58 mostra um bloco de areia depois de ser utilizado.

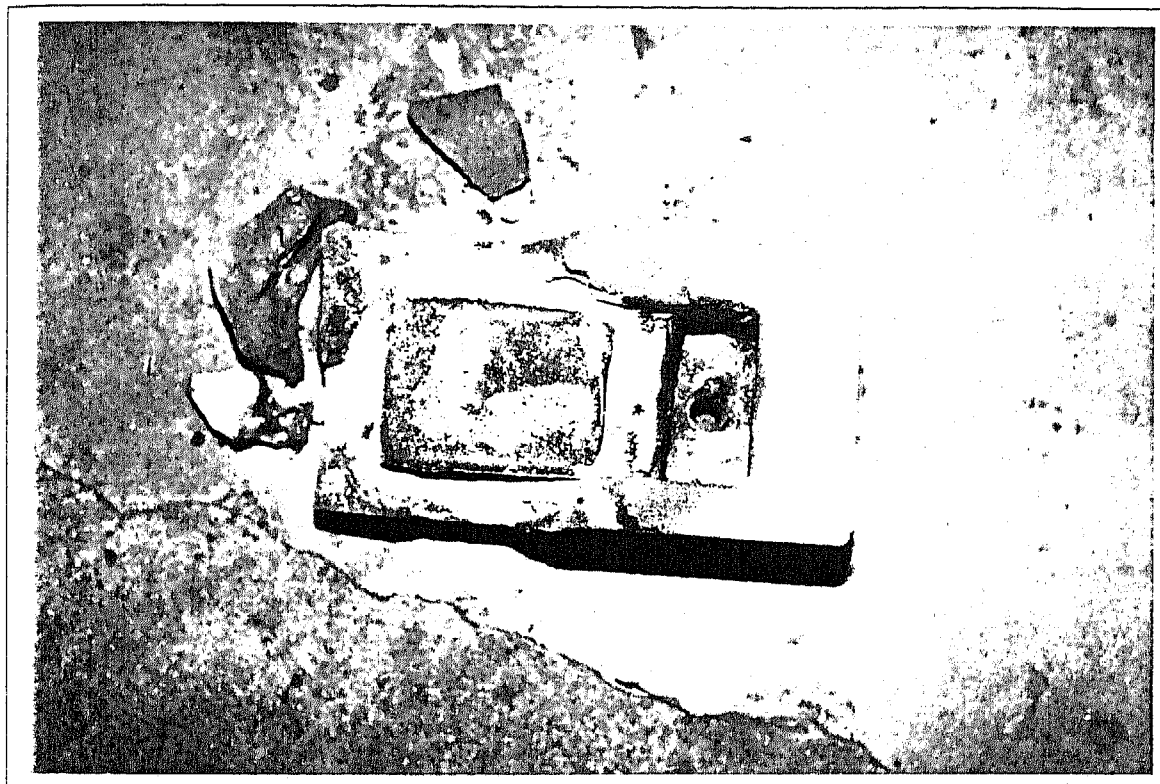


Foto 58

Bloco de areia após ter sido utilizado. Pode ver-se o bocado de ferro que fica na cavidade que continha o tarugo inoculante. A areia tem elevado poder colapsante pelo que em frio é muito frágil tendo-se desmoronado a parte que continha o tarugo inoculante.

A Foto 59 mostra alguns dos muitos restos de tarugos que, após o sucesso da sua utilização, foram produzidos em experiências subsequentes.

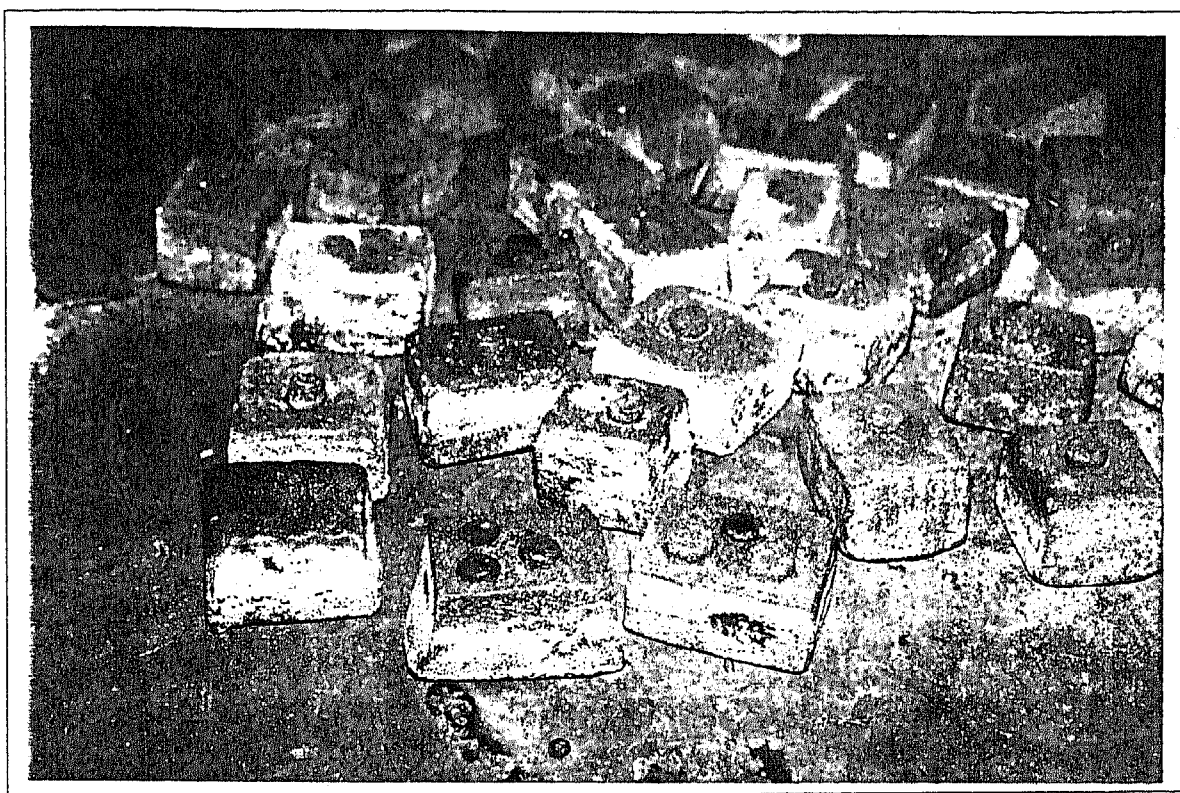


Foto 59

Alguns dos blocos metálicos produzidos pela utilização de blocos de areia contendo tarugos electrofundidos. Em primeiro plano vem-se dois blocos que continham 3 tarugos electrofundidos (continham, pois as saliências que se vem são de metal que substituiu o imprenso do tarugo) usados em experiências de inoculação- estudo da quantidade de inoculante a usar.

Durante bastante tempo este método foi utilizado para dar continuidade as outras experiências até se conseguir uma solução aceitável.

No sentido de resolver este problema foram experimentadas as seguintes soluções:

--- Colocação do tarugo inoculante no interior do sistema de gitagem.

Este método não produz inclusões, mas a qualidade de inoculação é fraca produzindo número de nódulos por milímetro quadrado manifestamente insuficiente para evitar a formação de carbonetos.

--- Utilização de um bloco duplo metálico onde se colocou o bloco electrofundido. Foto 60

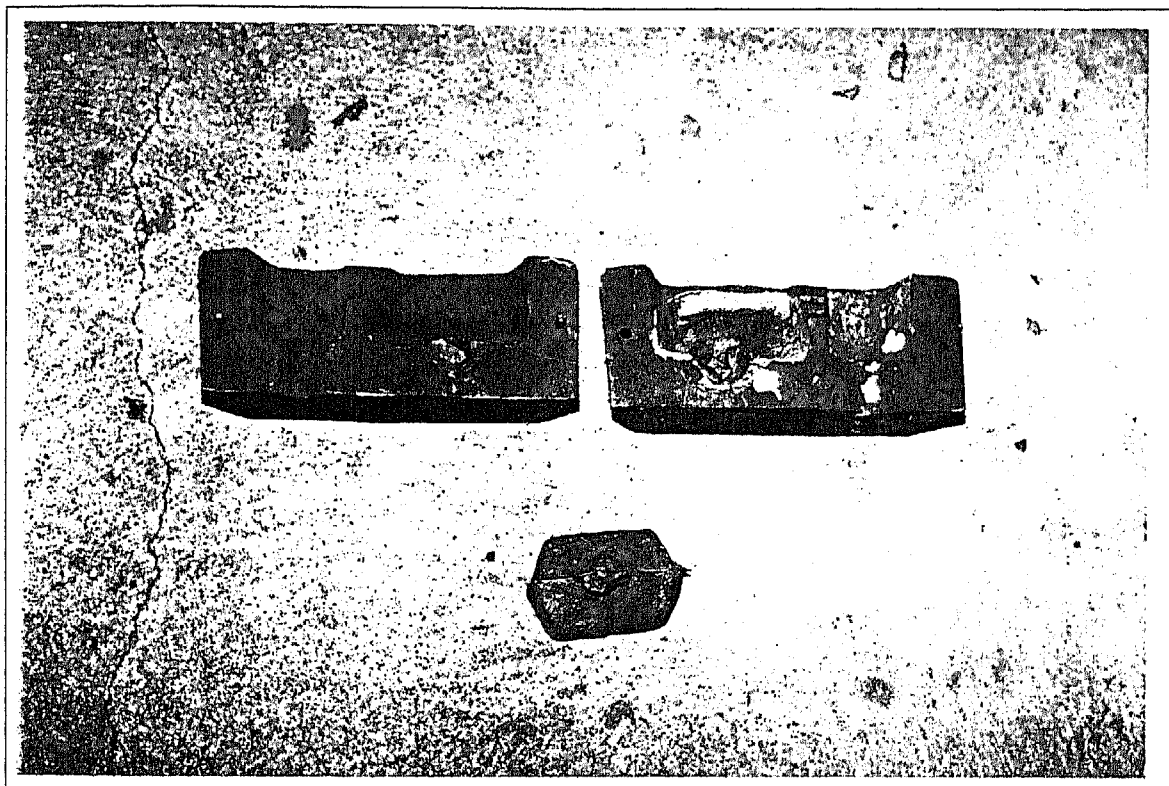


Foto 60

Bloco duplo metálico destinado a promover a inoculação em substituição do bloco de areia. Notar que, (após duas utilizações – 2 cachos) o metal se agarrou ao bloco tendo sido retirado com ajuda de um martelo tendo arrancado metal do bloco. Em primeiro plano pode ver-se o resto de metal produzido quando do vazamento do primeiro cacho.

Utilizando este processo a qualidade de inoculação é aceitável mas o bloco ficou inutilizado após 2 vazamentos chegando a ter fusão localizada pelo que foi abandonado.

Apesar de poder parecer algo deslocada, vamos deixar aqui expressa uma constatação que fizemos ao longo de todas as experiências de vazamento de nodular em coquilha, e que se prende com a erosão da coquilha pelo metal, a qual nos levou a

--- Colocação do tarugo inoculante no interior do sistema de gitagem.

Este método não produz inclusões, mas a qualidade de inoculação é fraca produzindo número de nódulos por milímetro quadrado manifestamente insuficiente para evitar a formação de carbonetos.

--- Utilização de um bloco duplo metálico onde se colocou o bloco electrofundido. Foto 60

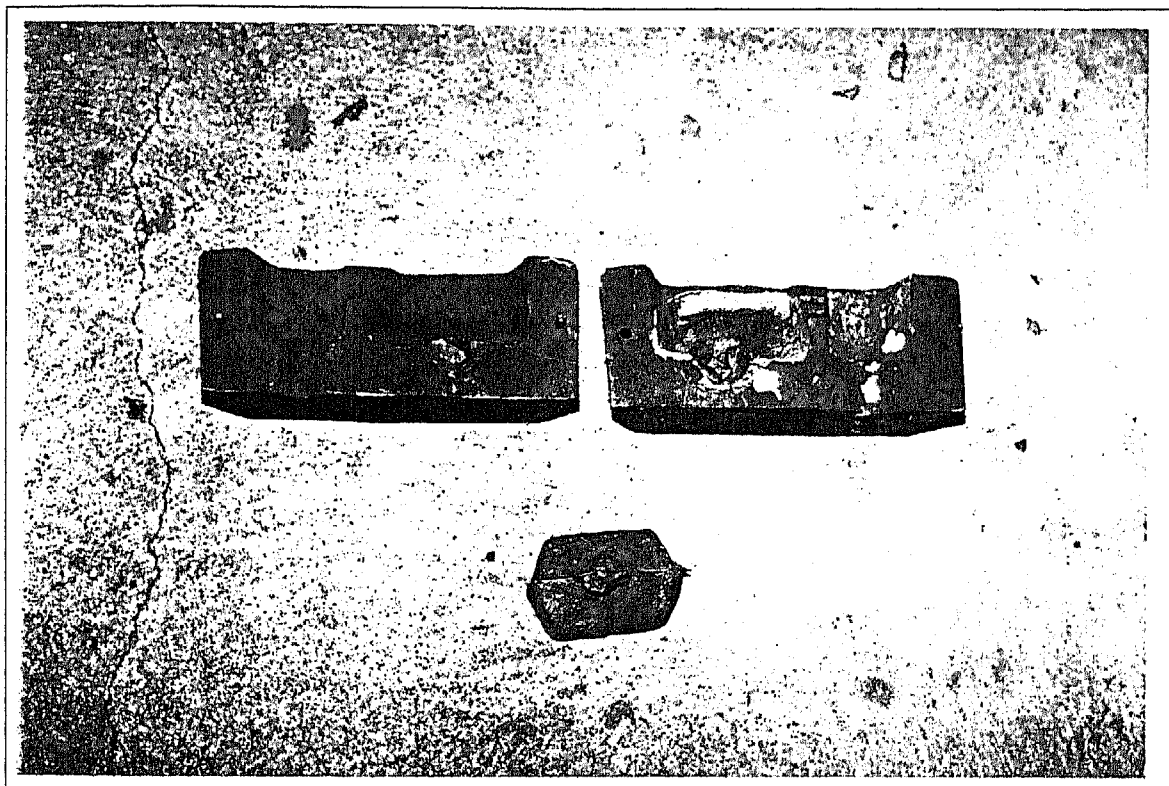


Foto 60

Bloco duplo metálico destinado a promover a inoculação em substituição do bloco de areia. Notar que, (após duas utilizações – 2 cachos) o metal se agarrou ao bloco tendo sido retirado com ajuda de um martelo tendo arrancado metal do bloco. Em primeiro plano pode ver-se o resto de metal produzido quando do vazamento do primeiro cacho.

Utilizando este processo a qualidade de inoculação é aceitável mas o bloco ficou inutilizado após 2 vazamentos chegando a ter fusão localizada pelo que foi abandonado.

Apesar de poder parecer algo deslocada, vamos deixar aqui expressa uma constatação que fizemos ao longo de todas as experiências de vazamento de nodular em coquilha, e que se prende com a erosão da coquilha pelo metal, a qual nos levou a

abandonar a utilização do bloco duplo metálico. Essa constatação é a seguinte: da prática verificamos que numa coquilha há dois pontos particularmente susceptíveis de serem fundidos pelo metal vazado. Esses pontos são a bacia de vazamento e o fundo do canal de descida. Nunca tivemos colagem de metal nas coquilhas em outros pontos.

Para evitar estas colagens actuámos da seguinte maneira

- a) Em relação à bacia de vazamento , quando usamos blocos de areia temos particular cuidado em colocar o furo da câmara por onde desce o metal do bloco para a coquilha sempre na vertical em relação ao canal de descida da coquilha. Quando vazamos directamente da colher dirigimos sempre o jacto de metal para o centro da bacia de vazamento e não para as paredes laterais.
- b) Em relação ao fundo da bacia de vazamento colocamos sempre um “poço” onde o primeiro metal se deposita servindo de almofada ao metal que cai.
- c) Estes dois locais são sempre pintados cuidadosa e intensamente após cada vazamento.

--- Colagem do bloco electrofundido a um filtro e colocar o conjunto no interior do sistema de gitagem.

Este método foi usado em diferentes partes do sistema de gitagem , mas a qualidade de inoculação não foi satisfatória devido ao baixo número de nódulos por milímetro quadrado.

A solução encontrada passou por utilizar uma segunda colher em vez do bloco de areia e prescindindo de fixar tarugo electrofundido. Com efeito , durante as experiências realizadas verificamos que por vezes o bloco electrofundido se soltava do encastramento mas que mesmo assim a qualidade de inoculação era excelente. Assim montamos uma segunda colher de acordo com a figura 61. A colher pode ver-se na foto 62

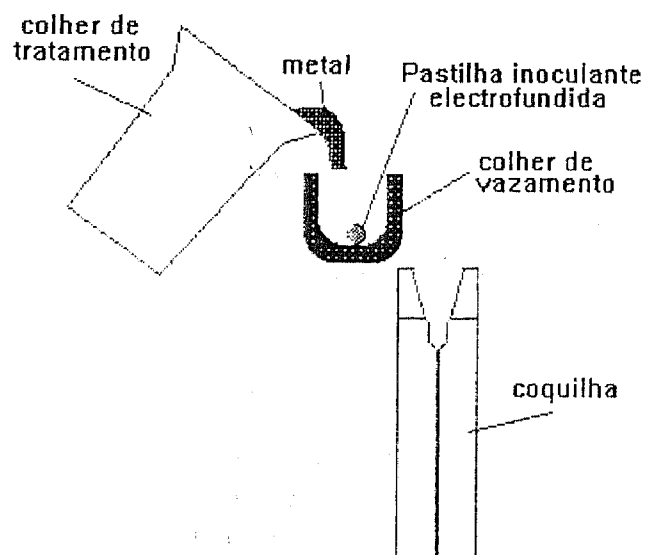


Fig.61 Esquema de utilização de uma colher de vazamento para inoculação



Foto 62 A colher de vazamento usada para a inoculação é a mais pequena do lado direito. A colher maior (lado esquerdo) foi usada para a nodularização

A colher de vazamento deve ser cheia com a quantidade de metal necessária para a peça a vazar e não mais. Este sistema elimina os problemas industriais atrás citados e tem a vantagem de se prestar magnificamente à mecanização. No entanto não pode haver o mínimo tempo de espera após enchimento da colher de vazamento. O número de nódulos por milímetro quadrado desce muito rapidamente se o enchimento da coquilha não se processar imediatamente ao enchimento da colher de vazamento.

3.2.2.12. Quantidade Ótima de inoculante.

Para tentar avaliar qual a quantidade ótima de inoculante foram vazados provetes colocando no fundo da colher um, dois e três blocos electrofundidos e feita contagem do número de nódulos por milímetro quadrado.

Os resultados obtidos constam do quadro seguinte:

Quadro 17 - Número de nodulos por milimetro quadrado em função do número de blocos electrofundidos utilizados

Vazamento	cacho	Numero de blocos electrofundidos	% de inoculante	Numero de nodulos por mm 2
E 39	1	1	0,286	1870
E 39	2	2	0,572	1782
E 39	3	3	0,856	1851
E 39	4	1	0,286	1834
E 39	5	2	0,572	1842
E 39	6	3	0,856	1895

Estes resultados estão resumidos no quadro seguinte

Quadro 18 – Resumo do quadro anterior

Numero de blocos electrofundidos	% de inoculante	Numero de nodulos por mm 2
1	0,286	1852
2	0,572	1812
3	0,856	1873

Os resultados mostram que para a quantidade de metal inoculado um bloco é perfeitamente suficiente pois duplicar ou triplicar a inoculação não traz melhorias quanto ao número de nódulos por mm quadrado

Isto confirma o que se disse na 2ª parte deste trabalho (Pag.25 - 2.2.3.3.) Conforme foi referido, a única regra quanto à quantidade ótima de inoculante é que em

cada caso há uma quantidade ótima. Neste caso a quantidade é igual ou inferior a um tarugo (20 g) por 7Kg (peso do cacho) o que dá uma percentagem de 0,29 %

O quadro seguinte mostra as características dos dois tipos de tarugos inoculantes electrofundidos

Quadro 19 Características dos dois tipos de tarugos inoculantes electrofundidos utilizados

Nome Comercial	Si	Al	Bi	Ca	Apresentação e método de utilização
Moldinoc	75	3	1	0.8	Blocos electrofundidos de 20 a 200 g. No nosso caso inoculação especial
Germaloy	75	4	---	1	Blocos electrofundidos de 20 a 200 g. No nosso caso inoculação especial

Optamos por não partir tarugos para experimentar quantidades inferiores porque os tarugos não partem sempre da mesma maneira e não poderíamos saber se os resultados seriam só função da quantidade de inoculante ou se também da forma do bocado partido. Futuramente continuaremos as nossas experiências construindo coquilhas maiores e colheres maiores. De qualquer maneira teremos sempre que ter em atenção que para obter resultados comparáveis teremos que ter os mesmos tempos de enchimento da colher de vazamento e da peça da coquilha.

O quadro seguinte contem os resultados mecânicos da segunda série de ensaios

Quadro 20 - Resultados mecânicos da segunda série de ensaios

Vazamento	Cacho	Provete	Inoculante	Tensão de rotura	Alongamento
E 39	2		Germaloy	534,1	4,4
E 39	2		Germaloy	611,4	4,5
E 39	3		Germaloy	551,1	6
E 39	3		Germaloy	550,6	9,3
E 40	2		Germaloy	479,2	9,5
E 40	2		Germaloy	568,1	9,8
E 40	3		Germaloy	483,7	12,6
E 40	3		Germaloy	517,1	14,3
E 40	4		Germaloy	502,2	14,4
E 43	3		Germaloy	499,1	16,6
E 43	3		Germaloy	487,7	16,7

Na Fig. 63 podem ver-se todos os resultados mecânicos obtidos com tarugos electrofundidos relativos ao quadro anterior. No gráfico está também representada a curva relativa aos valores da ISO 1083 para tensão de rotura e alongamento. Como se pode ver todos os valores são superiores à norma excepto um que poderemos desprezar

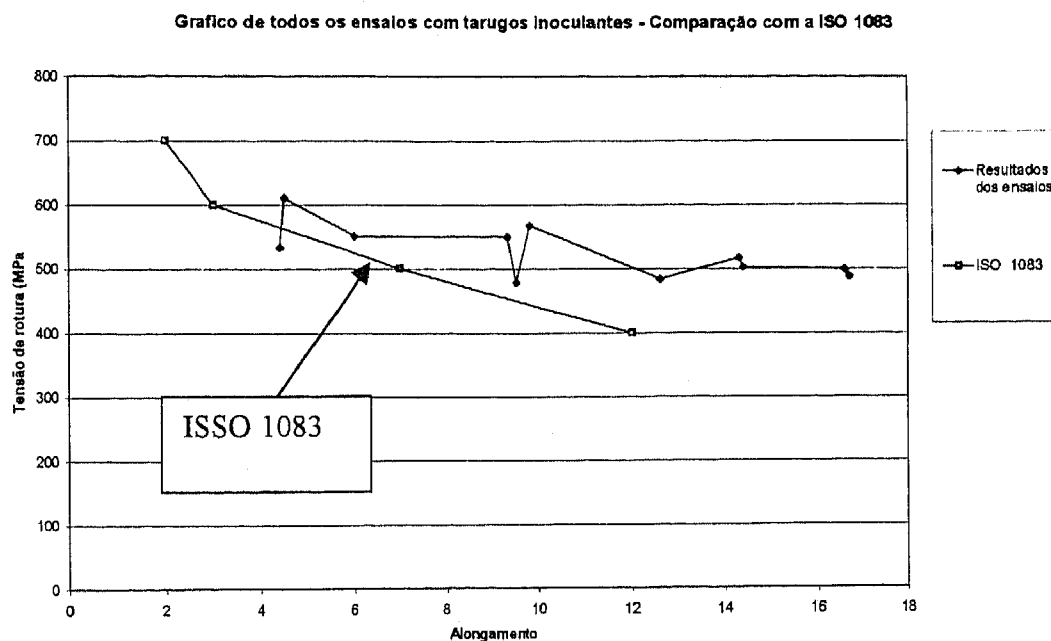


Fig. 63 Resultados mecânicos obtidos com provetes inoculados com tarugos electrofundidos, e comparação com a ISO 1083

3.2.3. Conclusões

- Até ao ponto das nossas experiências os únicos inoculantes adequados ao vazamento em coquilha são os blocos electrofundidos.
- O melhor método de realizar a inoculação consiste em utilizar uma colher de vazamento colocando o bloco electrofundido solto no fundo.
- Não deve haver espera entre o enchimento da colher de vazamento e o enchimento da coquilha
- O sistema de gitagem deverá estar preparado para captar escórias
- A temperatura de vazamento deverá estar compreendida entre 1400 e 1440 °C

3.3- Produção de coquilhas

3.3.1. Nota prévia

Este capítulo poderia estar localizado em qualquer parte deste trabalho. Poderá até parecer que a localização mais correcta seria no fim como apêndice . No entanto decidimos colocá-lo aqui pelas seguintes razões.

No capítulo anterior vimos como foi necessário utilizar um gito com caixa de captação de escórias quando da tentativa de eliminar os defeitos causadores do abaixamento de características mecânicas. Se em moldação em areia apenas teríamos que fazer uma pequena alteração na placa molde , no nosso caso isso significou ter que fazer uma nova coquilha. Deste modo esta é a localização correcta no tempo deste capítulo. Além disso após a resolução dos problemas relacionados com inoculação só executamos mais uma coquilha (a das luvas) . Por outro lado pensamos que a compreensão do modo como as coquilhas foram executadas poderá ajudar a compreender as dificuldades por nós encontradas posteriormente.

3.3.2. Execução de coquilhas

Para a produção de coquilhas metálicas, em princípio , podem ser utilizados todos os processos conhecidos de conformação de metais. Na escolha serão sempre tidos em consideração vários factores como precisão dimensional, acabamento, rapidez de execução e preço.

Mas estes factores não são os únicos a ter em consideração , e pelo menos na fase de concepção da coquilha teremos que ter em conta que para além da cavidade da peça teremos que produzir também o sistema de gitagem , e eventualmente os alimentadores.

Na prática ficam a nossa disposição a maquinagem (por vezes aliada à electroerosão) e a fundição. Estes dois processos podem (e são) muitas vezes usados em conjunto, produzindo a fundição uma forma aproximada que posteriormente é acabada por maquinagem.

Dispondo o CETECOFF de uma apurada tecnologia de fundição de precisão, decidimos utilizar este processo tanto quanto possível.

No entanto dado que o custo das matérias primas utilizadas em fundição de precisão é elevado, que a dimensão das molas coquilhas é considerável e que nesta fase do nosso estudo não é necessária uma elevada precisão dimensional, decidimos utilizar o método de moldação em areia autosecativa, e só maquinar quando fosse absolutamente necessário.

Esta decisão deveu-se em parte ao facto de termos que produzir coquilhas rapidamente e a baixo custo. A outra razão prende-se com a dificuldade de maquinar sistemas de gitagem complicados, e também porque esta maquinagem é de certa maneira irreversível, pois um gito produzido com dimensões maiores que o desejável ,

só dificilmente se consegue reduzir, sendo por vezes o seu custo tal que mais vale fazer uma coquilha nova.

Em fundição de areia , na grande maioria dos casos, os moldes provenientes da carpintaria ou serralharia de moldes estão dimensionalmente correctos, permitindo obter peças boas. O que normalmente sofre varias experimentações é o sistema de gitagem. E muitas vezes o sistema de gitagem , embora sendo perfeitamente apto à produção de peças boas pode ser melhorado no sentido de poupar metal, aumentando deste modo o rendimento.

Mas em coquilha o gito faz parte da coquilha, e se numa placa molde para areia um gito é algo que se coloca na placa molde , em coquilha um gito é algo que se retira da própria coquilha.

Deste modo pensamos ser preferível executar um molde da própria coquilha para depois por ele fundirmos a coquilha. Os vários gitos a experimentar na coquilha serão facilmente produzidos por operações próprias de fundição, mas, salvo se se tratar de pequenas modificações, cada novo gito significará fundir nova coquilha ou nova parte da coquilha. As dimensões finais da coquilha serão se necessário produzidas por maquinagem após afinação do sistema de gitagem, ou fundindo uma nova coquilha em fundição de precisão.

No início do nosso trabalho dispúnhamos de uma coquilha de seis provetes (Foto 64) tendo sido fundida em Ferro fundido cinzento de alto silício, a partir de um molde de resina maquinado por uma fresadora de comando numérico. Este molde na altura que começámos os nossos trabalhos já apresentava algumas fissuras pelo que após uma tentativa infrutífera de o recuperar por soldadura , teve que ser substituído. Para tal decidimos utilizar o mesmo modelo para produzir uma nova coquilha , desta vez em ferro nodular ferrítico. Mas como o molde de resina tinha um gito mais fino decidimos utilizar a própria coquilha fissurada como molde, aceitando que a nova coquilha seria 1 % mais pequena devido à contracção do nodular.

Na coquilha assim produzida apenas foram rectificadas os apoios para o porta coquilhas da coquilhadora, a face de apartação, e o furo roscado de aperto da coquilha ao porta coquilhas.

Os provetes fundidos por esta nova coquilha tinham acabamento idêntico aos da coquilha inicial, sendo apenas 1 % mais pequenos.

Conforme vimos no capítulo 6 tivemos necessidade de produzir uma coquilha com um sistema de gitagem capaz de captar escórias ou outras impurezas que porventura proviessem da colher de vazamento.

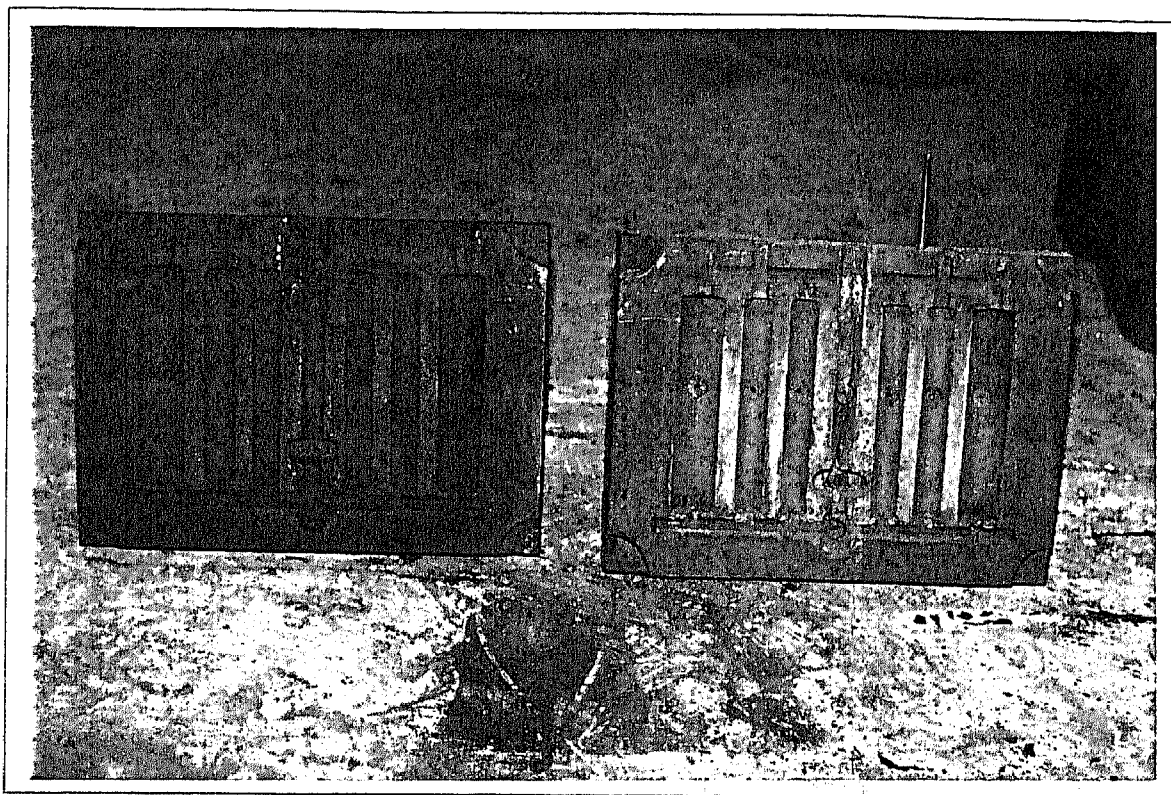


Foto 64 Coquilha de 6 provetes. A coquilha da direita foi utilizada como molde para produzir a coquilha da esquerda. O sistema de gitagem foi alterado por processos de moldação

Para tal utilizamos desta vez o molde de resina tendo tapado as cavidades correspondentes aos provetes que tiveram que dar lugar ao espaço correspondente ao sistema de gitagem. Este foi executado posteriormente em partes e aplicado na moldação que deu origem à coquilha (ver foto Nº 65).

Esta coquilha foi maquinada de modo idêntico à coquilha de 6 provetes estando neste momento perfeitamente operacional tendo produzido todos os provetes necessários ao trabalho de austempera directa e convencional.

Para testar as possibilidades deste método de produção de coquilhas decidimos reproduzir a coquilha das luvas de retroescavadora que também tinha fissurado. Esta coquilha foi fundida com uma areia autosecativa fina. A única operação de maquinagem que sofreu foi a furação e roscagem do furo de aperto ao porta coquilhas.

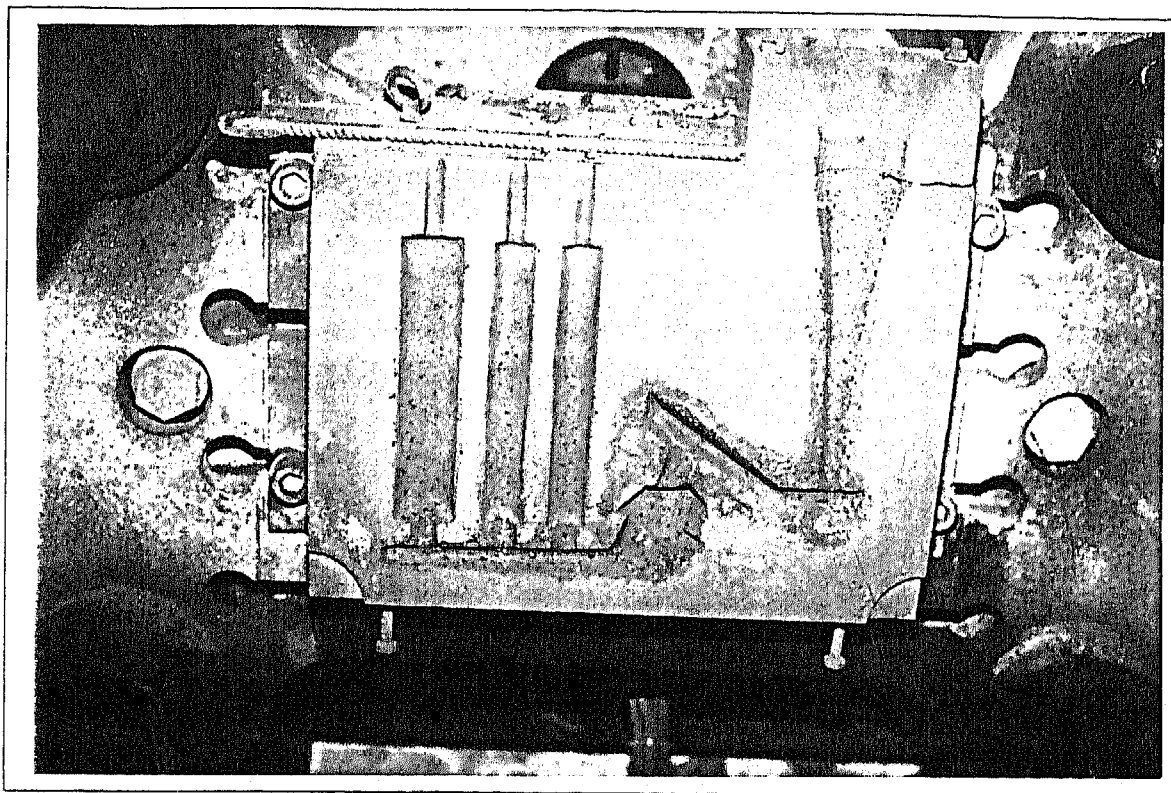


Foto 65 Meia coquilha para produção de 2 provetes de 30 mm de diametro e um provete de 45 mm de diametro . O sistema de gitagem foi produzido por processos de fundição

Para compensar a contracção de fundição foi executada uma nova caixa de machos também por fundição a partir de um macho dimensionado para a coquilha original fissurada.

O conjunto funcionou perfeitamente tendo-se realizado austempera directas de luvas de retroescavadoras em A.D.I..

A foto 66 mostra à direita as duas meias coquilhas produzidas utilizando como molde a meia coquilha fissurada que se vê no canto superior esquerdo. No canto inferior esquerdo pode ver-se um cacho de luvas produzido com a coquilha assim produzida.

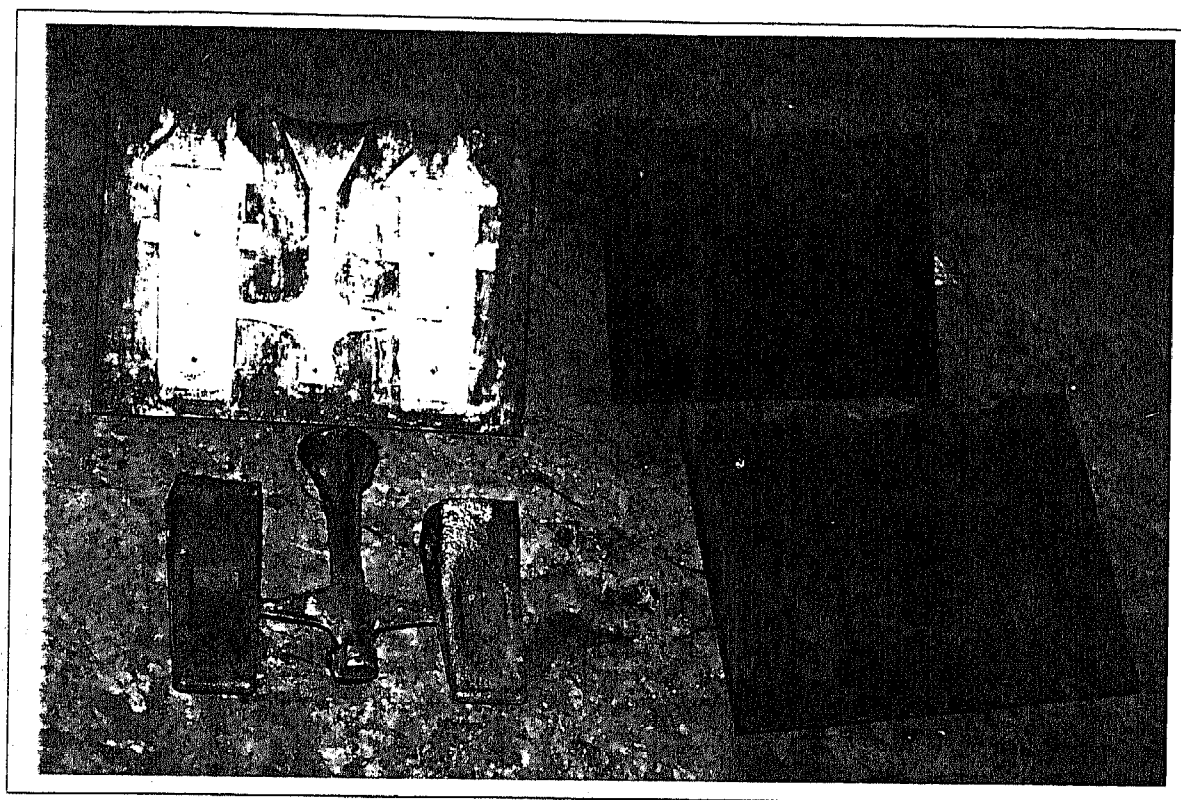


Foto 66 -

Coquilha, molde da coquilha e cacho de peças. As duas coquilhas do lado direito foram produzidas usando como molde a meia coquilha do canto superior esquerdo. No canto inferior esquerdo pode ver-se um cacho completo de luvas de retroescavadora.

A foto 67 mostra a coquilha das luvas com o cacho introduzido na posição em que é obtido quando da fundição. As cavidades por cima das luvas são impressos dos machos necessários para a sua produção.

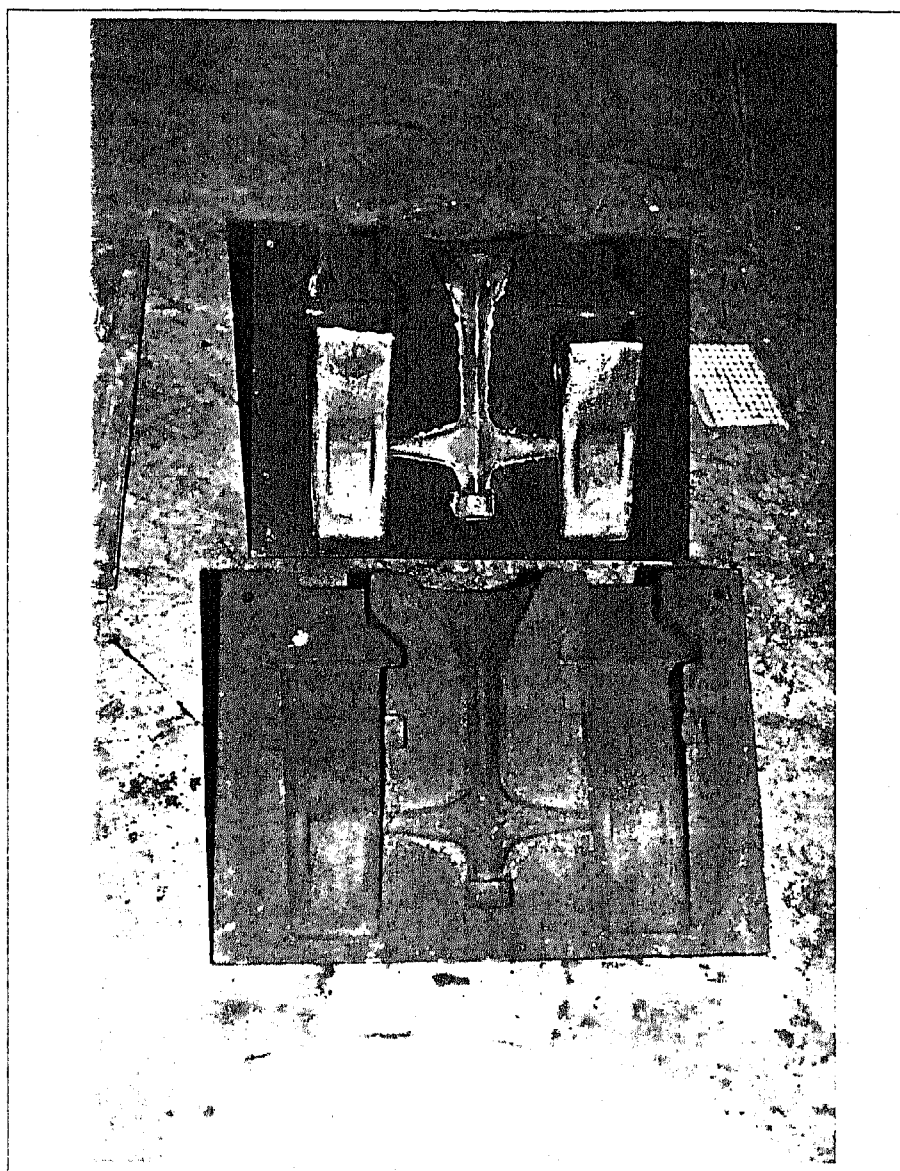


Foto 67 Coquilha completa produzida por fundição. A meia coquilha do segundo plano tem colocado o cacho de luvas que produziu

A posição do macho pode ver-se na foto 68 que mostra uma meia coquilha com um dos dois machos colocado.

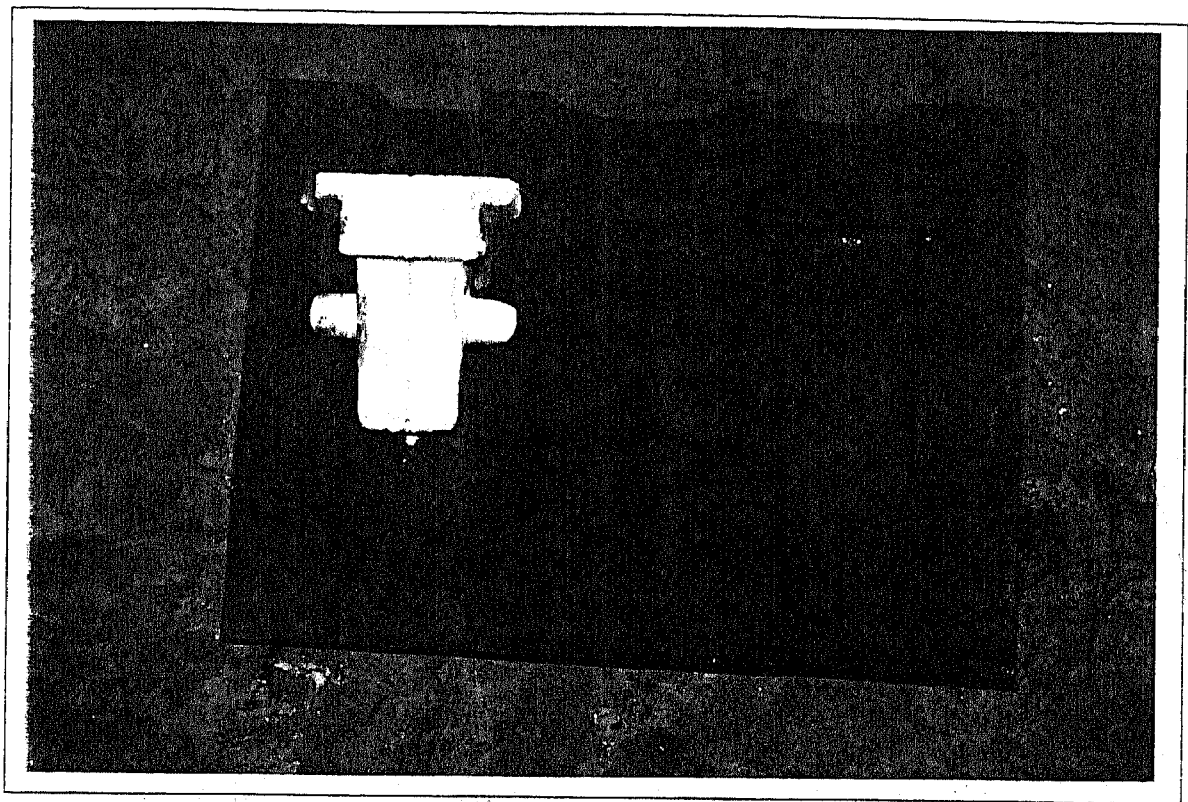


Fig. 68 Coquilha das luvas de retroescavadora tendo um dos machos colocado. Na foto pode ver-se que o macho é produzido em duas partes e posteriormente colado.

A caixa de machos necessária à produção dos machos para as luvas de retroescavadora foi executada fundamentalmente para avaliar as possibilidades de por fundição reproduzir uma caixa de machos. Mas neste caso a caixa de machos inicial não estava a nossa disposição, e os machos utilizados no passado provinham de uma unidade industrial. A nossa disposição tínhamos alguns machos antigos tendo sido utilizado um deles para produzir por fundição a caixa de machos que se pode ver na Fig. 69 no lado direito. À esquerda pode ver-se um meio macho produzido com esta caixa de machos. A caixa de machos poderá ser adaptada a uma máquina disparadora de

machos produzindo então machos em uma só parte. Sendo calcado à mão terá que ser feito em duas partes e posteriormente colado.

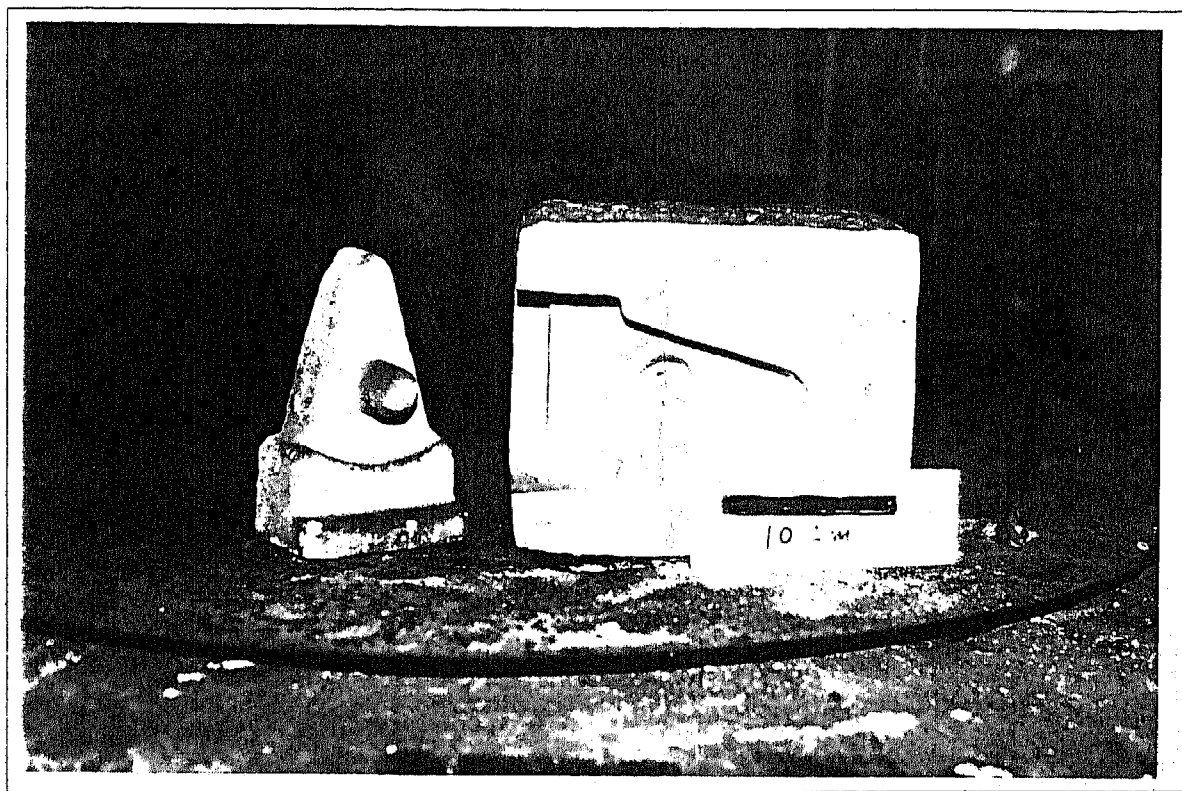


Foto - 69 Meio Macho e respectiva caixa de machos das
luvas de retroescavadora
Um macho completo obtém-se colando dois meios
machos como este

A foto 70 mostra as costas de uma meia coquilha das luvas. Como se pode ver apenas foi maquinado e roscado o furo central por onde a coquilha é apertada na coquilhadora. Conforme se disse as duas meias coquilhas foram fundidas em areia autosecativa. O INEGI-CETECOFF dispõe de meios de moldação permitindo um muito melhor acabamento que o assim conseguido que já de si é satisfatório.

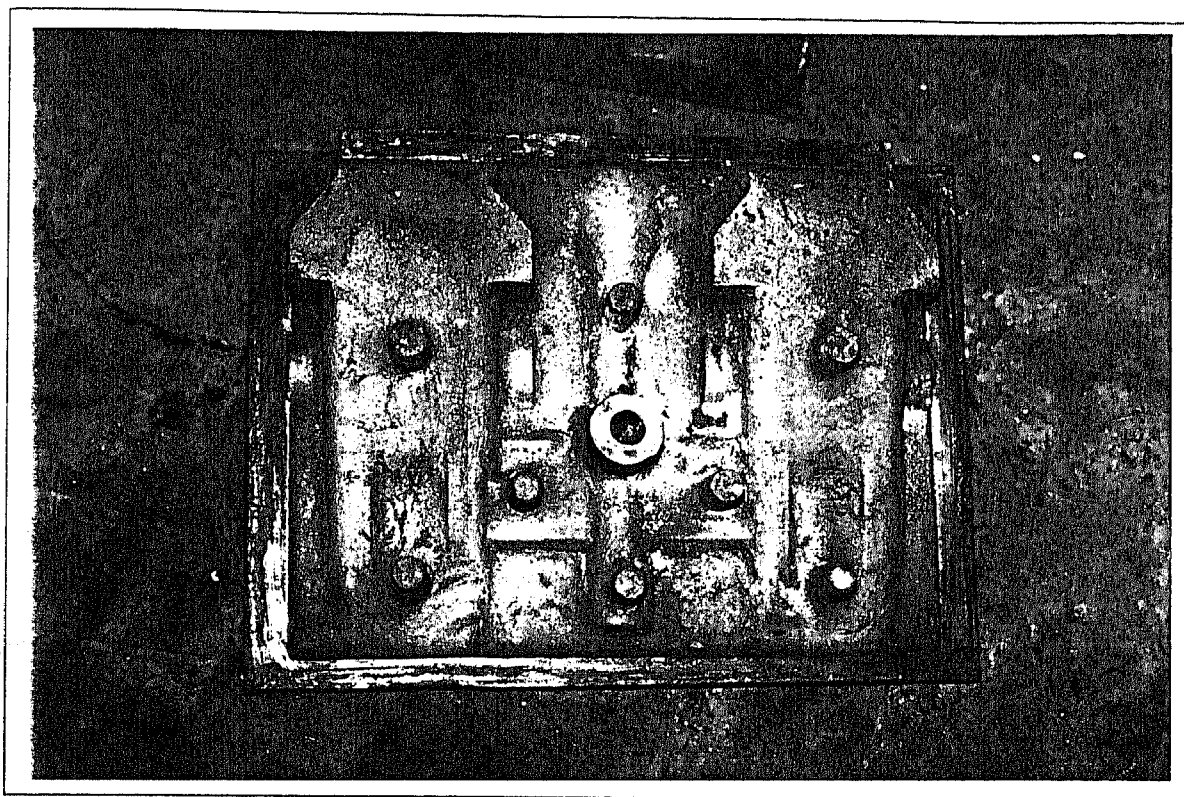


Foto 70 - Parte posterior de uma meia coquilha das luvas. Na foto pode verse que, excepção feita para o furo roscado, nada mais foi maquinado na meia coquilha

3.3.3. Conclusões

As nossas coquilhas não tem uma particular exigência em termos de precisão dimensional. Deste modo, os métodos empregues por nós para a execução das coquilhas serviram perfeitamente. A coquilha de 6 provetes, apesar de ter sido rectificada na zona da apartação, foi utilizada as cast na zona dos provetes. A coquilha de 3 provetes foi utilizada da mesma maneira. A coquilha das luvas de rectroescavadora só foi furada e roscada no duro de aperto.

As tolerâncias dimensionais não eram de particular importância ao contrário do tempo de que dispunhamos. Este, sendo escasso, obrigou-nos a optar por um metodo rapido (e barato) de produção das coquilhas.

Industrialmente terão que se fazer algumas alterações mas o caminho a seguir deverá assentar no mesmo método. O molde deverá ser produzido num material de fácil maquinagem e as dimensões deverão ser adequadas em cada caso , ou a que a peça fique tal qual ou a que sofra uma ligeira operação de maquinagem-rectificação.O método de moldação é que deverá ser escolhido de acordo com a precisão exigida

3.4 - Austempera directa

3.4.1 Introdução

No capítulo 6 (inoculação) vimos como se conseguiram ultrapassar os problemas de inclusões causados pela inoculação tardia. Todo o trabalho que então se desenvolveu seria absolutamente inútil se não pensássemos em produzir peças em A.D.I. vazado em coquilha. Com efeito as inclusões que provocavam o abaixamento das características mecânicas não se produzem com a inoculação tradicional no vazamento em areia.

Mas se utilizarmos o vazamento em coquilha inevitavelmente seremos tentados a utilizar o método de **Austempera Directa**, o qual, pelo menos teoricamente, oferece indubitáveis vantagens, tanto práticas como económicas.

Este método (cuja patente da autoria do Professor Barbedo de Magalhães) é de muito difícil implementação (na prática impossível) na moldação em areia, mas extremamente simples de executar na moldação em coquilha.

3.4.2. Comparação dos dois métodos

O método de austempera clássica do A.D.I parte de peças em nodular à temperatura ambiente. Estas peças, fundidas em areia ou coquilha são aquecidas até completa austenitização sofrendo depois a tempera em banho de sais.

No método de austempera directa as peças são extraídas da coquilha ainda no estado austenítico sendo de seguida mergulhadas no banho de sais. O método aproveita o facto de a peça à saída da coquilha estar no estado austenítico, evitando assim uma operação cara em termos de energia, de espaço, de equipamento e de tempo.

A Fig 71 mostra em esquema os dois metodos

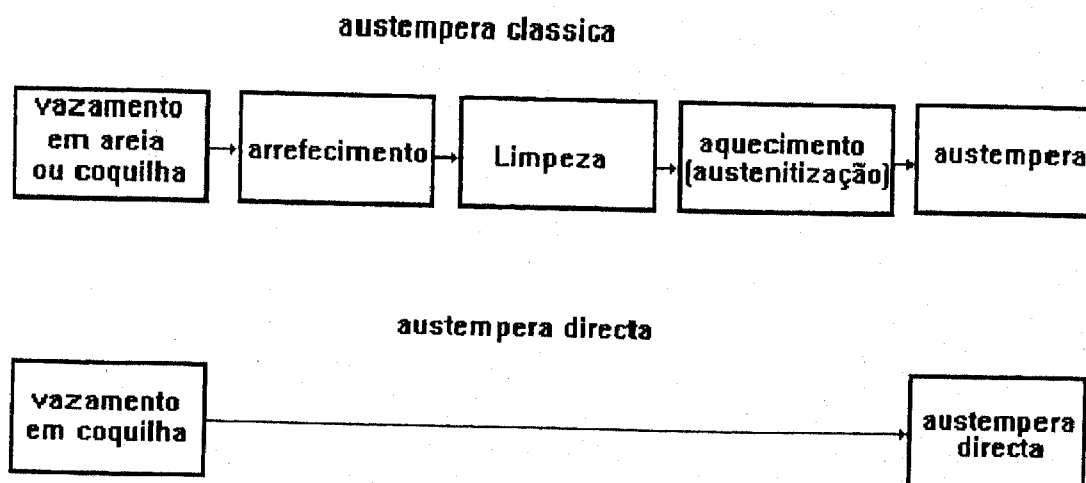


Fig. 71 Esquema comparativo da austempera classica e da austempera directa

O esquema é bem elucidativo das poupanças que o método de austempera directa permite em relação à austempera classica.

3.4.3. Realização da operação de austempera directa

Para a realização das operações de Austempera Directa foi necessário colocar o forno de banho de sais nas proximidades da coquilhadora. A foto 72 mostra o posicionamento relativo do forno de banho de sais e da coquilhadora.

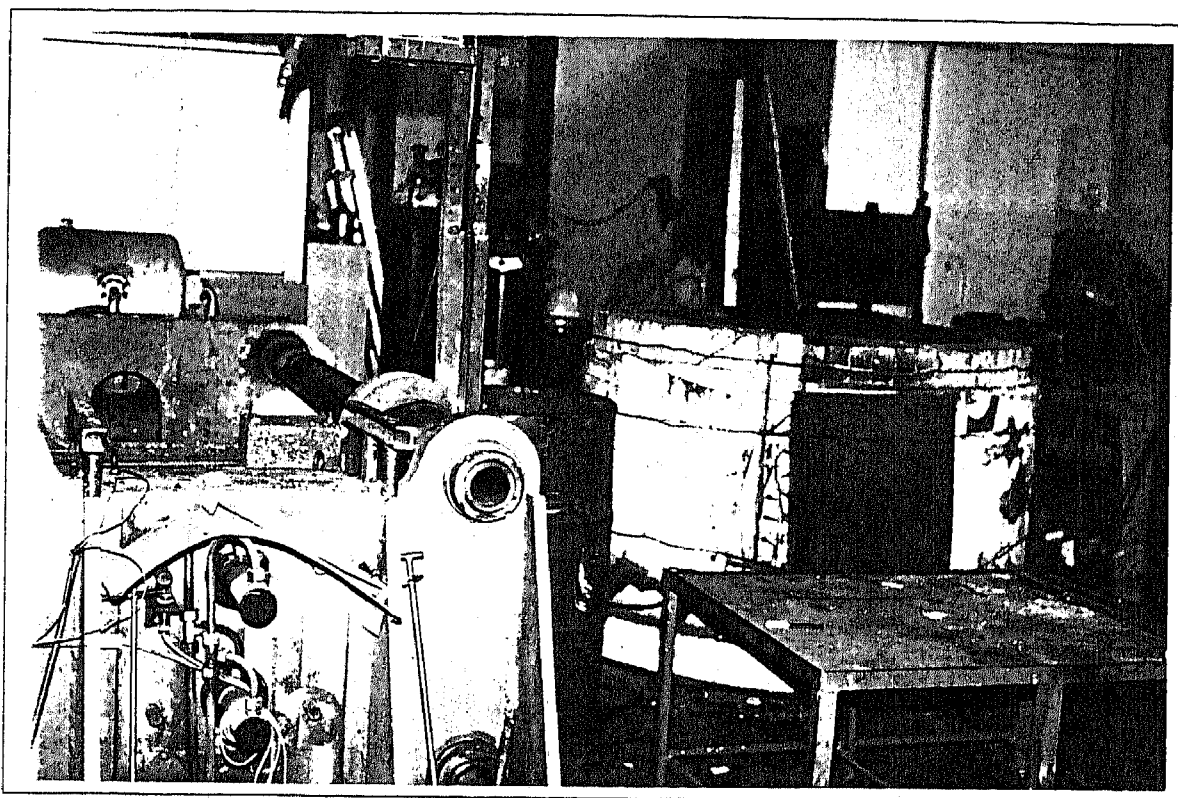


Fig 72 - Posição relativa do forno de banho de sais e da Coquilhadora

A foto 73 mostra o forno de banho de sais, o qual é aquecido por resistências eléctricas tendo uma potência de 16 Kw. A capacidade da cuba é de 300 litros, mas nas nossas experiências a cuba estava cheia a 50 %, ou seja, tinha 400 litros.

A temperatura do banho é controlada por termopar

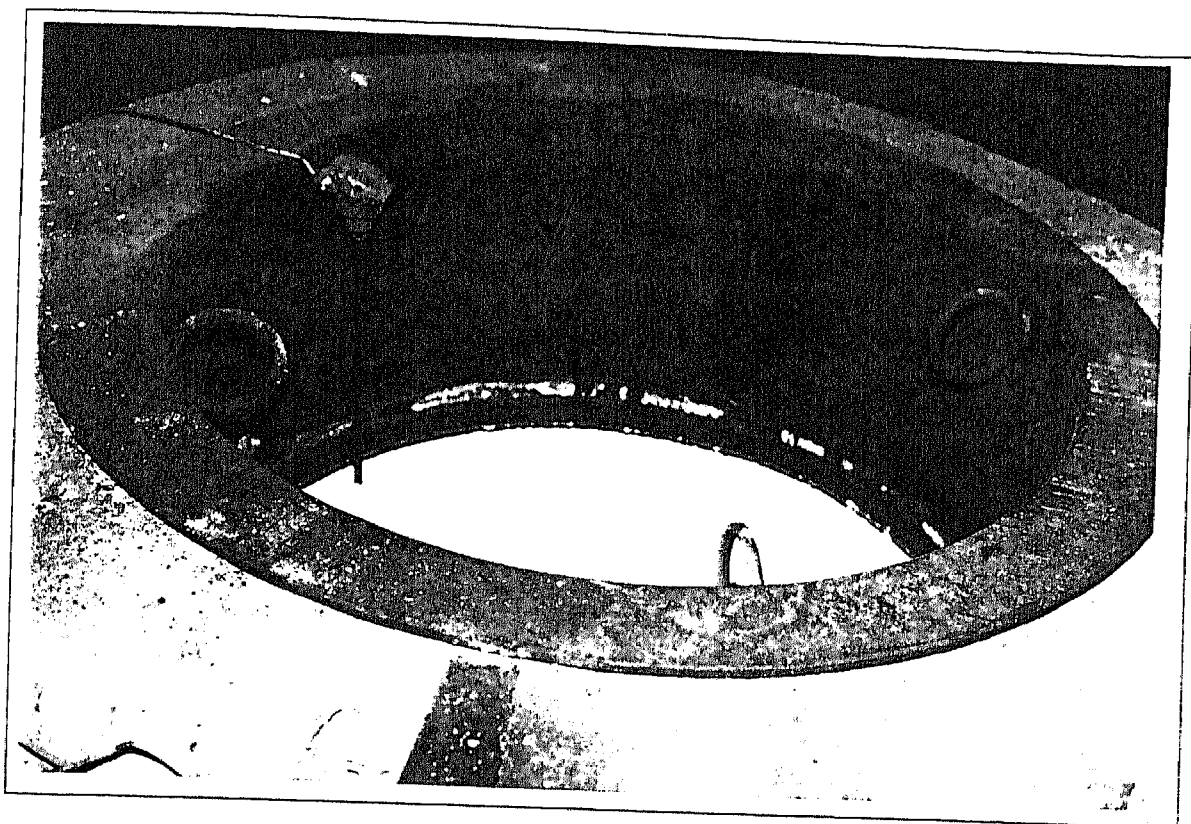


Foto 73 - Forno de banho de sais

Na nossa instalação, para além de podermos controlar a temperatura do banho de sais, temos possibilidade de medir e registar a temperatura da coquilha de um modo contínuo. Temos também a possibilidade de colocar termopares no interior da cavidade moldante de modo a poder acompanhar a evolução da temperatura das peças (neste caso provetes) desde o vazamento até à estabilização de temperatura no banho de sais.

Quanto ao controlo dos tempos decidimos utilizar uma câmara de filmar para registar em vídeo todas as nossas experiências de modo a poder fazer posteriores cronometragens. Também decidimos fazer a aquisição de dados de temperatura de segundo a segundo de modo a poder localizar nos gráficos obtidos os pontos correspondentes às diversas operações.

Cabe aqui referir que estas experiências envolvem cinco pessoas para a sua realização e que basta uma falha pontual humana ou de equipamento para comprometer todo um trabalho de vários dias de preparação.

3.4.3.1. 1ª Experiencia de austempera directa

3.4.3.1.1. Descrição da experiencia:

Foram vazados 8 cachos de provetes tendo cada cacho 2 provetes de diametro 30 mm e 1 provete de 45 mm. O quadro seguinte mostra as composições químicas dos varios cachos

Quadro 21 - Composições químicas dos cachos relativos à 1ª experiencia

Vaz.	Cacho	C	Si	Mn	Cu	Ni	Observações
E52	1	3,5	2,9	0,17			
E52	2	3,5	2,9	0,17			
E52	3	3,5	2,9	0,17	0,6	0,5	Austempera directa
E52	4	3,5	2,9	0,17			Austempera directa com registro gráfico
E52	5	3,5	2,9	0,17			
E52	6	3,5	2,9	0,17			
E52	7	3,5	2,9	0,17			
E52	8	3,5	2,9	0,17			

Todos os cachos foram inoculados a partir de blocos de areia contendo tarugos inoculantes electrofundidos.

Só os cachos 3 e 4 sofreram austempera directa, tendo sido registadas as curvas de solidificação e austempera para o cacho nº 4. Para tal, foram colocados 2 termopares axialmente ficando um no eixo de um provete de 30 mm e outro no eixo do provete de 45 mm. A ponta dos termopares ficou a 55 mm da parte superior dos provetes. A temperatura do banho de sais foi de 375 °C

Durante todo o tempo de vazamento foi registada a temperatura da coquilha num ponto situado a 3 mm do provete de 45 mm.

3.4.3.1.2. Registos gráficos das temperaturas da coquilha e dos provetes

A fig. 74 mostra o gráfico completo da evolução da temperatura da coquilha durante o vazamento de todos os cachos, assim como a evolução da temperatura dos termopares colocados nos provetes. A figura inclui um esquema da localização dos termopares.

Grafico completo das temperaturas da coquilha e dos provetes sujeitos a austempera directa
(4º vazamento)

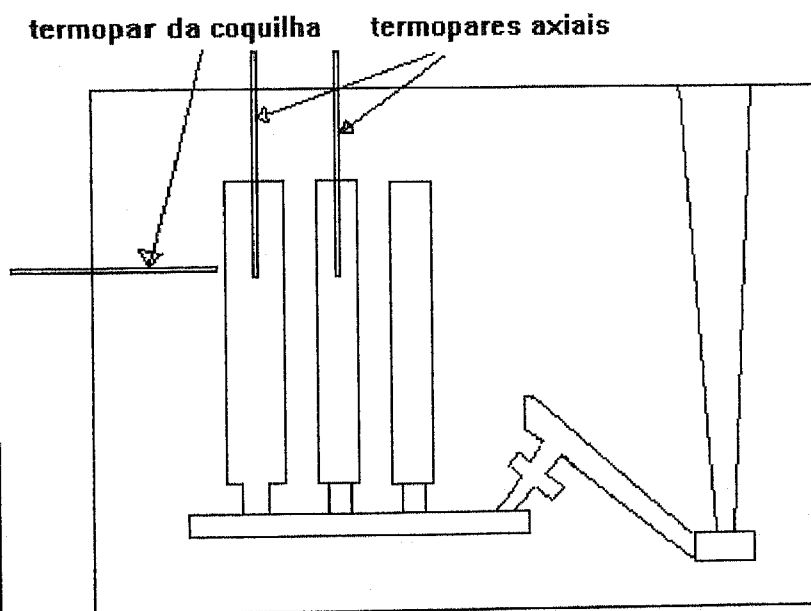
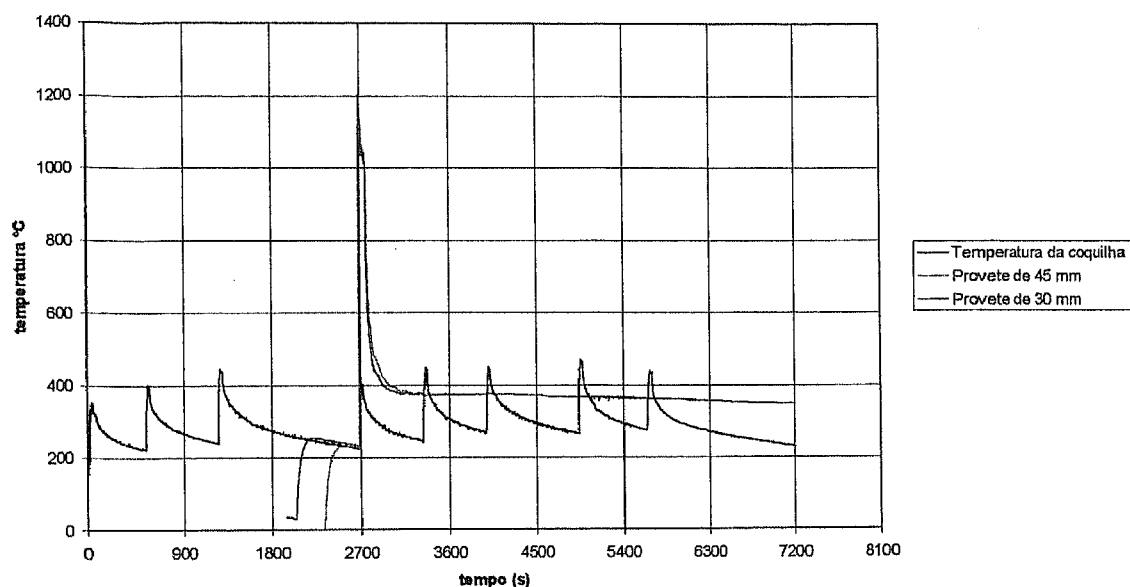


Fig. 74. Gráfico completo da evolução da temperatura da coquilha durante o vazamento dos 7 cachos, e da temperatura dos provetes sujeitos a austempera directa (4º cacho). A parte correspondente ao 4º cacho pode ver-se com mais detalhe nas figuras seguintes. A figura inclui um esquema de colocação dos termopares

A Fig. 75 mostra a parte do grafico da Fig. 74 referente ao vazamento do cacho nº 4 (austemper directa).

evolução da temperatura dos provetes de 30 e de 45 mm de diametro desde o fim do vazamento ate temperatura proxima do banho de sais

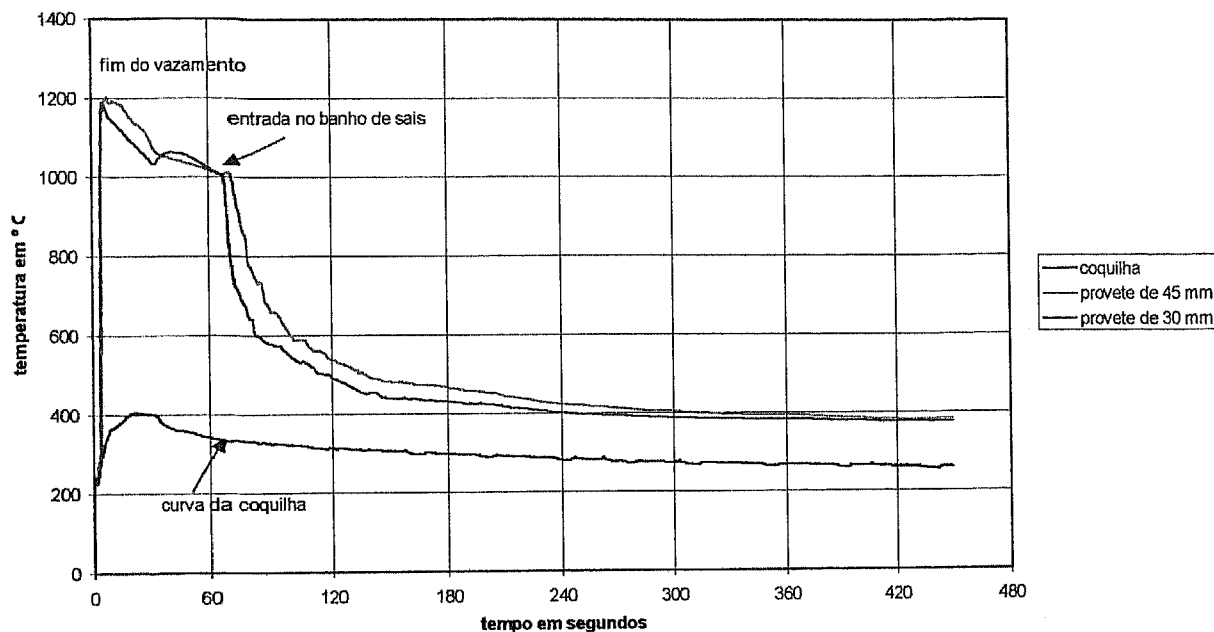


Fig. 75 Ampliação da figura anterior mostrando a zona do 4º vazamento . Na figura pode ver-se a curva da coquilha , que dada a ampliação do eixo dos X aparece muito esbatida . Pode tambem ver-se a evolução das temperaturas dadas pelos provetes colocados axialmente (ver esquema de localização dos termopares na fig. anterior) . A cronometragem dos tempos feita através da filmagem de toda a experiencia permite localizar o ponto de entrada dos provetes no banho de sais. Este pode ver-se com mais detalhe na figura seguinte.

A Fig 76 é uma ampliação da Fig. 75 . Foca a solidificação e a entrada no banho de sais.

Com base na gravação video foi possivel assinalar os pontos do grafico correspondentes a abertura da coquilha, saída da peça da coquilha e entrada no banho de sais.

evolução da temperatura dos provetes de 30 e de 45 mm de diametro desde o fim do vazamento ate à parte inicial da austempera

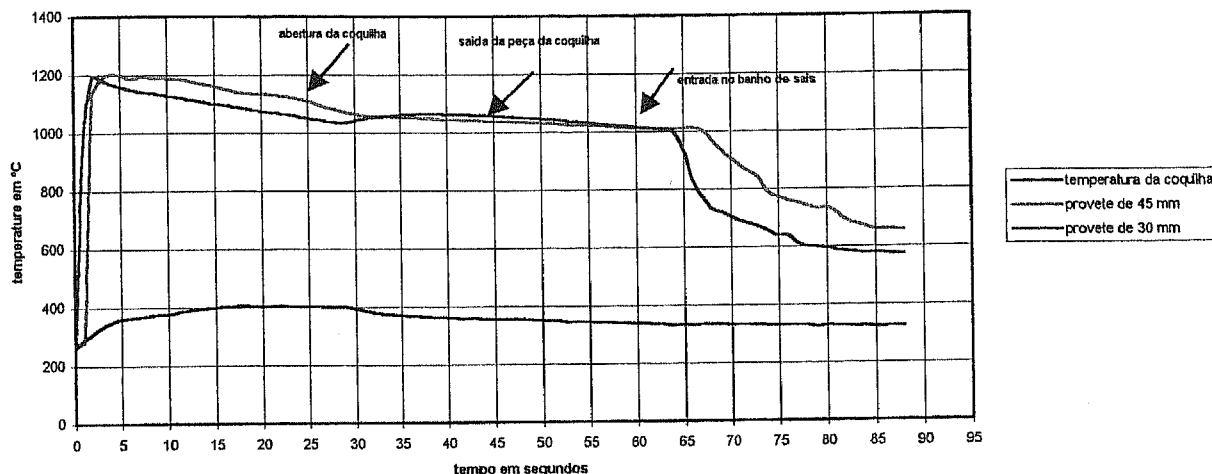


Fig 76. Pormenor do grafico anterior mostrando a evolução da temperatura dos provetes de 30 e 45 mm na zona axilal. O grafico apenas foca o tempo que decorre entre o vazamento e alguns segundos (cerca de 30) após a entrada dos provetes no banho de sais.

Embora não tenhamos curvas para os provetes do cacho nº 3 os tempos medidos a partir da gravação são iguais o que permite admitir que as curvas deverão ser idênticas.

3.4.3.1.3. Estruturas metalográficas obtidas.

Dos provetes referentes aos cachos 3 e 4 foram cortadas patelas para observação metalográfica.

O provete de 45 mm do cacho 4 (sem liga) apresenta tem estrutura totalmente perlítica como se pode observar na fotomicrografia da Fig. 77 , (500 X), a qual mostra que mesmo na periferia do provete temos 100% perlite. Os provetes de 30 mm tem uma estrutura “bainítica” desde a periferia ate uma profundidade de 6 mm a partir da qual começa a aparecer perlite. O nucleo da amostra é constituído por 100% de perlite. A fotomicrografia da Fig. 78 tirada do provete de 30 mm a 6 mm da superfície mostra já algumas zonas perlíticas. (1000 X)

Vazamento: 52
Cacho: 4
Provete: 3
Ampliação: 500 X
Amostra: 247
Negativo: 36
Rolo: 1



Foto 77 - Periferia do provete de 45 mm do 4º cacho. Nodular não ligado – Austempera Directa
Apesar da dificuldade de focagem devido a amostra não ser plana na periferia, pode verificar-se que mesmo na superfície do provete se encontra perlite. Conforme já referimos, este provete tem uma extrutura completamente perlítica Nital 4 % 500 X

Vazamento: 52
Cacho: 4
Provete: 1
Ampliação: 1000 X
Amostra: 232
Negativo: 35
Rolo: 1

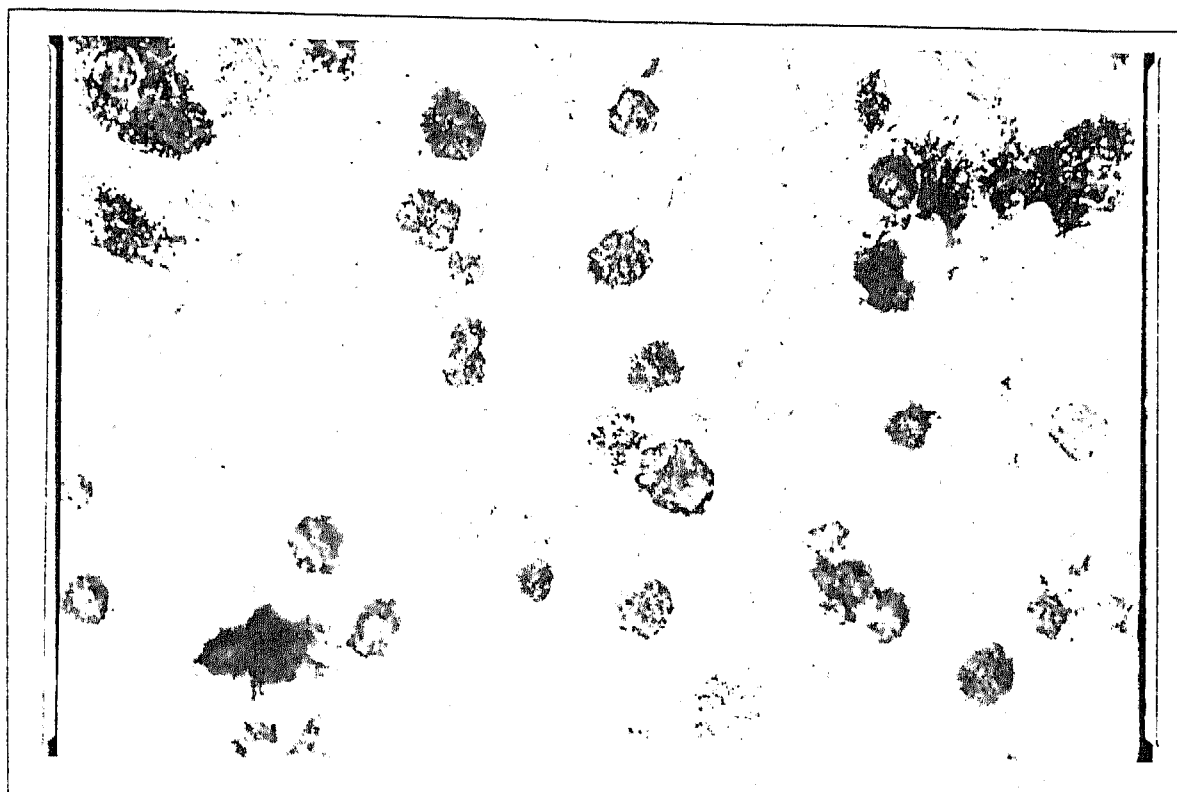


Foto 78

Provete de 30 mm do 4º cacho a 6 mm da superfície. Nodular não ligado. Austempera directa. Bainite superior com pequenas zonas perlíticas. Neste provete a periferia é bainítica, começando a aparecer perlite a aproximadamente 6 mm da periferia, local onde esta foto foi tirada. No centro do provete a amostra é 100 % perlítica

Relativamente ao cacho nº 3 (com liga) as estruturas são muito diferentes em relação ao cacho 4 (sem liga) . Os provetes de 30 mm são constituídos por 100 % bainite , ao passo que o provete de 45 mm apenas tem uma orla bainítica de 2 mm. A 3 mm da superfície já a estrutura é 50 % perlite e 50 % bainite e a 6 mm a estrutura é 100% perlítica. A transição é muito brusca. A Fig. 79 (1000 X) mostra que a estrutura da parte central do provete de 30 mm é 100 % bainítica.

Vazamento: 52
Cacho:3
Provete:1
Ampliação: 1000 X
Amostra: 231
Negativo:33
Rolo:1

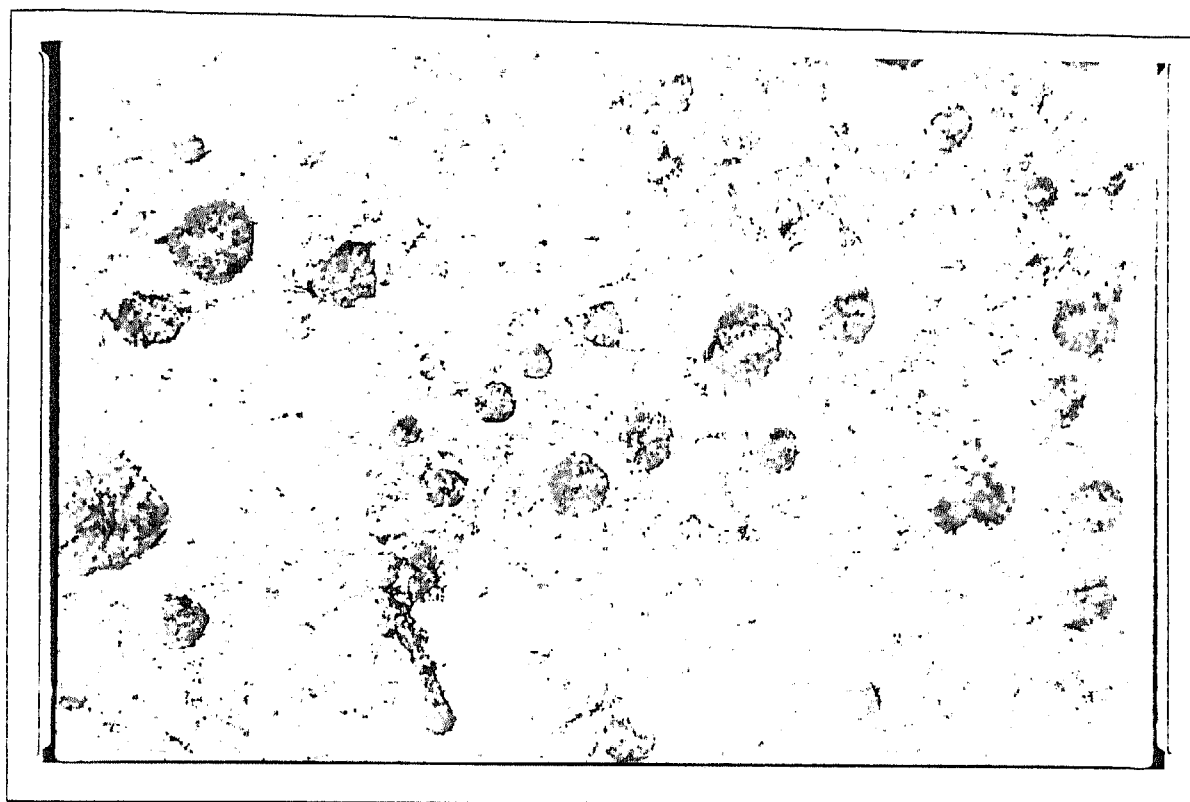


Foto 79 - Provete de 30 mm do 3ºcacho na zona central. Nodular ligado(0,6% Cu; 0,5% Ni) – Austempera directa. 100% bainite superior. O provete tem esta estrutura em toda a sua extensão.

A Fig. 80 (1000 X) mostra a estrutura do provete de 45 mm a 3 mm da superfície . A amostra é contituida aproximadamente por 50 % de perlite e 50 % de bainite.

Vazamento: 52
Cacho: 3
Provete: 3
Ampliação: 1000 X
Amostra: 248
Negativo: 34
Rolo: 1

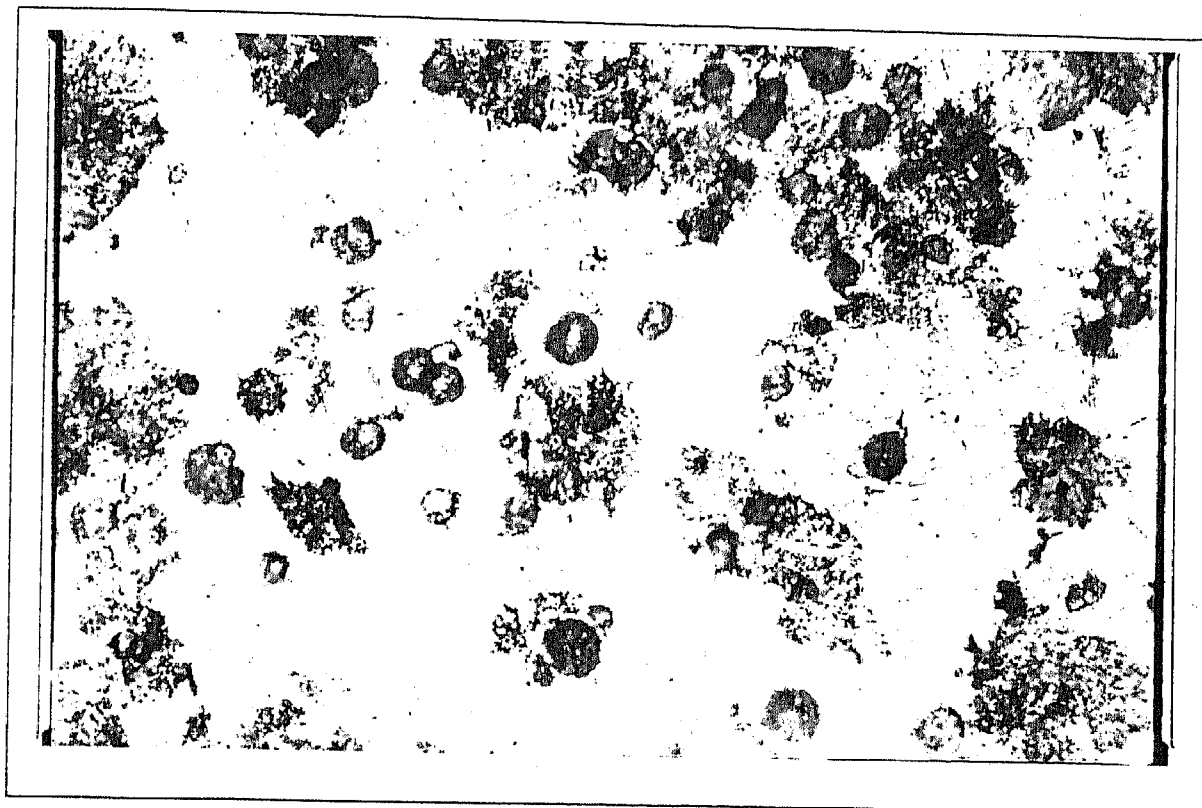


Foto 80 - Provete de 45 mm do 3º cacho a 3 mm da superfície . Nodular ligado (0,6 % cu; 0,5 % Ni) – Austempera directa . A esta profundidade pode observar-se uma estrutura costituída por 50 % perlite e 50 % de bainite . A transição entre a superfície (bainite) e o centro (perlite) é muito brusca . A 2 mm da superfície é 100 % bainite e a 4 mm da superfície é 100 % perlite .

3.4.3.1.4. conclusões

O nosso material de base (não ligado) não permite temperar até ao centro provetes de 30 mm – Profundidade atingida = 6 mm. Em redondos de 45 mm a profundidade de tempera é zero.

0,6 % de Cu e 0,5 % de Ni permitem temperar até ao nucleo um redondo de 30 mm mas em provetes de 45 mm apenas temperam até 2 mm de profundidade

3.4.3.2. 2ª Experiência de austempera directa

3.4.3.2.1. Descrição da experiência:

Com a finalidade de testar uma composição química que à priori permite maior profundidade de tempera foram vazados 7 cachos de provetes tendo cada cacho 2 provetes de diâmetro 30 mm e 1 provete de diâmetro 45 mm.

A composição química final foi a seguinte para todos os cachos

C	Si	Mn	Cu	Ni	Mg
3,6	2,9	0,51	1,06	1,0	0,04

Durante todo o tempo de vazamento foi registada a temperatura da coquilha em dois pontos situados a 3 mm dos provetes de 30 mm e de 45 mm.

Os cachos nºs 3 e 7 sofreram austempera directa tendo sido registada a temperatura da parte central e periférica do provete de 45 mm durante o vazamento, solidificação e austempera.

Os restantes cachos foram produzidos para estudar assuntos que não se prendem com a austempera directa.

A razão desta experiência é a seguinte: A composição química do cacho n.º 3 do vazamento anterior permite obter 100 % de bainite superior em provetes redondos de 30 mm, mas não em provetes redondos de 45 mm. Além disso a “profundidade de tempera” não é igual para os dois provetes. Se no tarugo de 30 mm atinge o centro (15 mm de profundidade) , no provete de 45 mm a profundidade é de 2 mm (ver foto 80 e os comentários a esta foto). Esta é a razão pela qual decidimos medir a descida de temperatura para a periferia e para o centro do provete de 45 mm , ou seja, para o provete para o qual ainda não tínhamos conseguido tempera bainítica até ao centro.

Para a realização desta experiência foram abertos dois rasgos na coquilha por onde se introduziram os termopares. Ver Figura 81

3.4.3.3.2. Registos Gráficos

A Fig. 81 mostra evolução da temperatura da coquilha durante o vazamento de todos os cachos, assim como a evolução da temperatura dos termopares colocados nos provetes. Na parte inferior pode ver-se em esquema a localização dos termopares

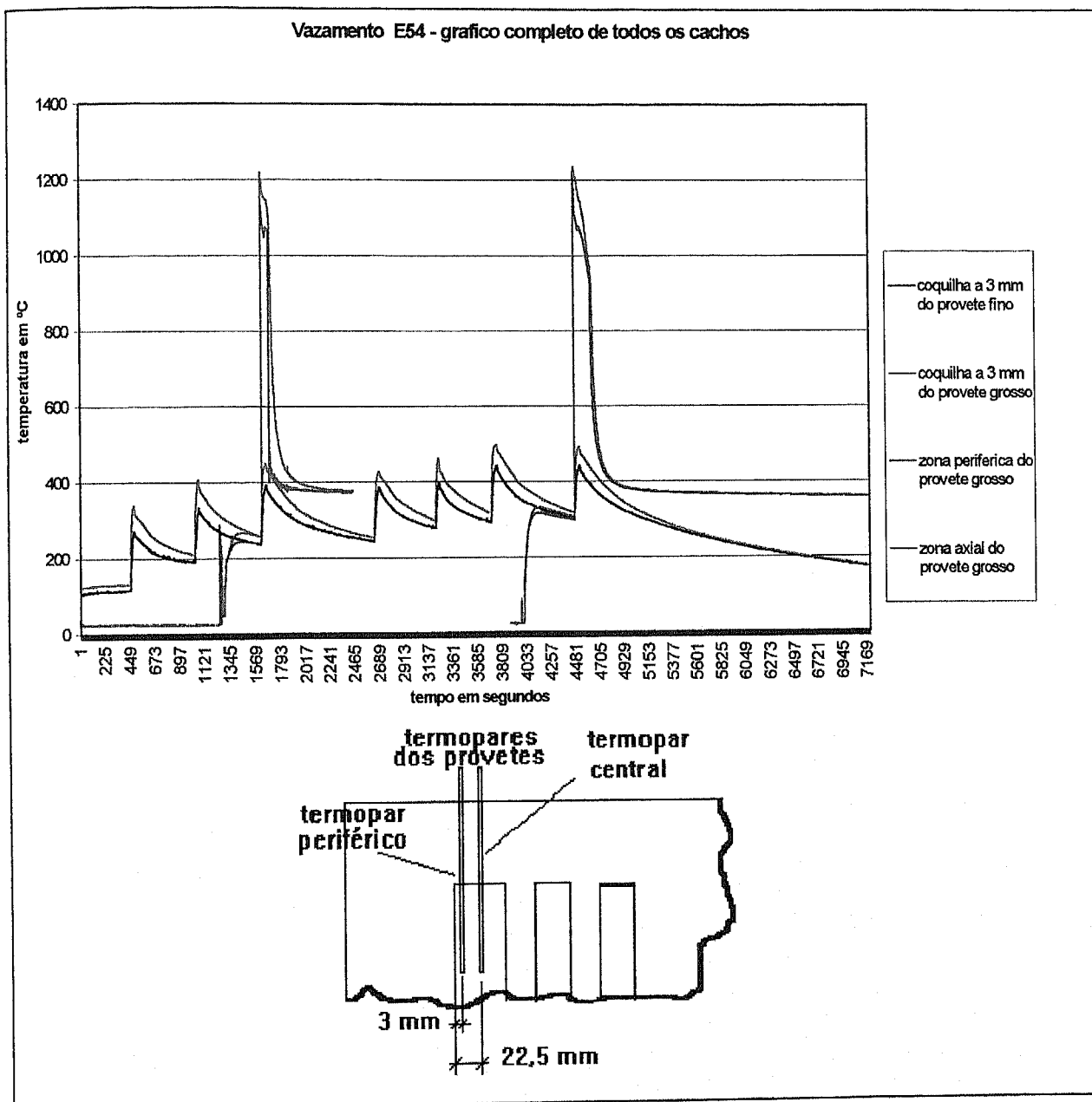


Fig. 81 - Grafico completo do vazamento de todos os cachos, e esquema de colocação dos termopares dos provetes. Austempera directa dos cachos n.º 3 e 7. Ver mais detalhes nas figuras seguintes. Temperatura do banho de sais – 375 °C

A figura 82 mostra a parte do grafico da Fig.81 referente ao vazamento do cacho n.º 3 (austempera directa).

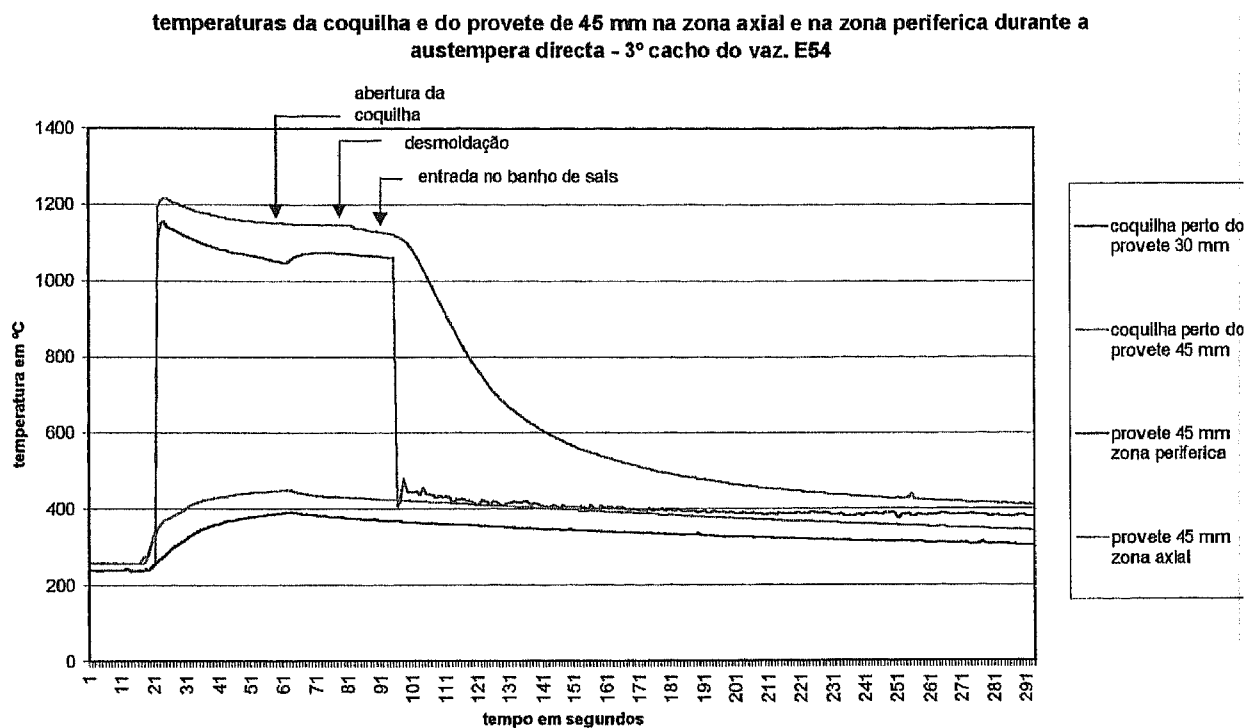


Fig. 82 Registos graficos relativos ao cacho n.º 3 . Notar a forte descida de temperatura da zona periférica do provete de 45 mm (a 1,5 mm da periferia)

A fig. 83 mostra a parte do grafico da Fig.81 referente ao vazamento do cacho nº 7 (tambem austempera directa).

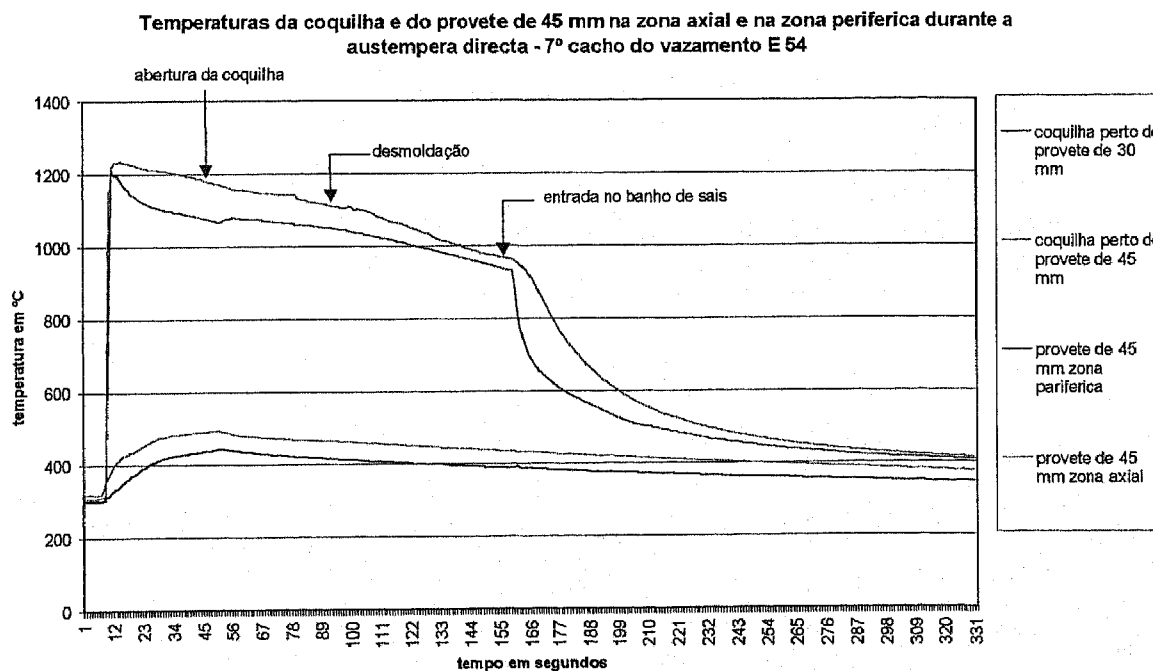


Fig. 83 – Iden Fig 82 mas para o cacho n.º 7. Neste provete o termopar periférico estava colocado a 4,5 mm da periferia

4.3.2.3. Comparação dos gráficos obtidos

Comparando os gráficos relativos ao 3º e ao 7º cacho notamos duas diferenças importantes:

A primeira diferença mostra que no cacho nº 7 se esperou que a temperatura da periferia do provete de 45 mm atingisse os 950°C* para introduzir o cacho nos sais fundidos, ao passo que o cacho numero 3 foi introduzido nos sais tão cedo quanto possível. Esta espera foi intencional para ver os efeitos nas curvas e na estrutura metalográfica.

A segunda diferença foi acidental e consiste na grande diferença de andamento das curvas relativas à periferia dos provetes. Tal diferença deve-se à dificuldade de colocar e manter os termopares a distancias exactas da periferia.

Com efeito posteriormente ao vazamento os provetes foram desbastados lateralmente para se determinar a distancia exacta a que estavam os termopares da arede lateral do provete. Assim verificou-se que o termopar da periferia do provete de 5 mm reletivo ao cacho 3 estava a 1,5 mm da superfície ao passo que o termopar correspondente para o cacho 7 estava a 4,5 mm de profundidade. (Foto 34)

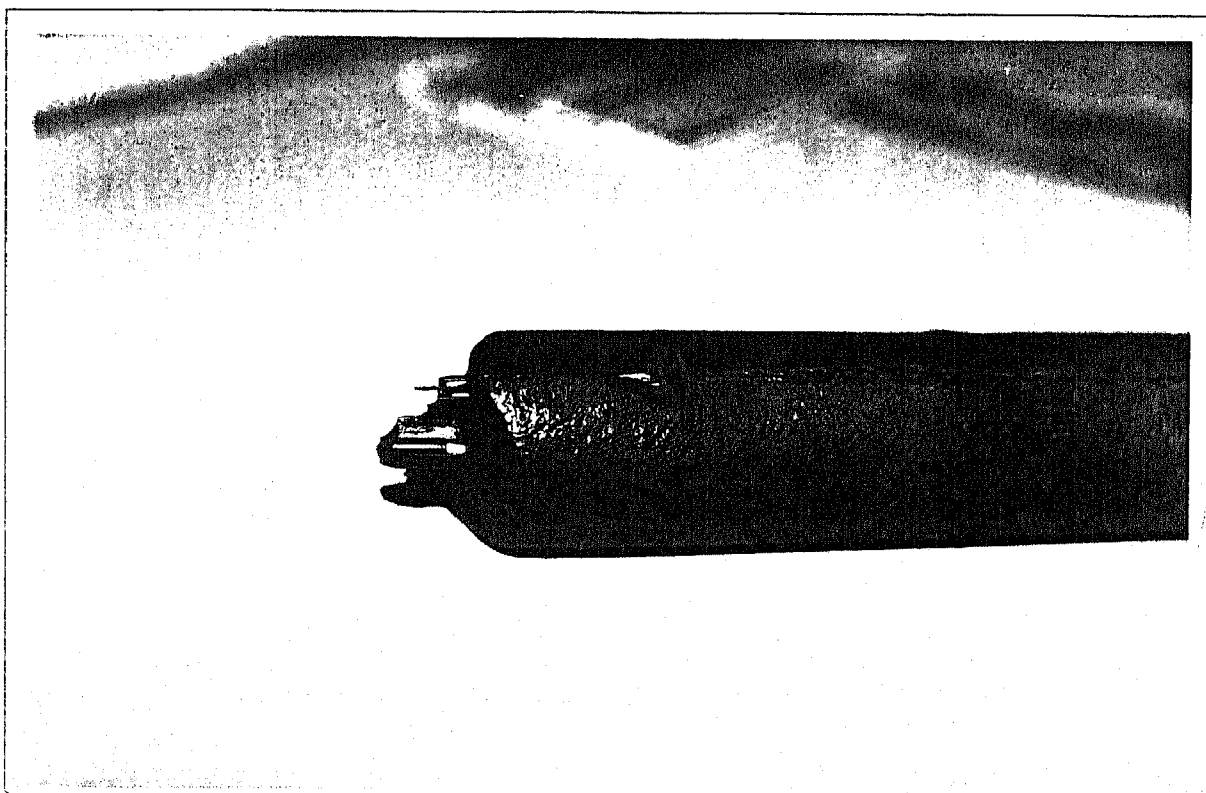


Foto 34 - Parte superior do provete de 45 mm podendo ver-se os termopares (axial e periférico). O provete foi rebarbado na zona lateral até a ponta do termopar periférico para se poder medir a profundidade real do termopar.

Essa diferença de andamento pode ser vista no grafico da figura 85 que se obteve alinhando os graficos relativos aos termopares periféricos dos cachos 3 e 7.

Vaz E.54. Graficos sobrepostos dos cachos 3 e 7 alinhados pela periferia dos provetes de 45 mm

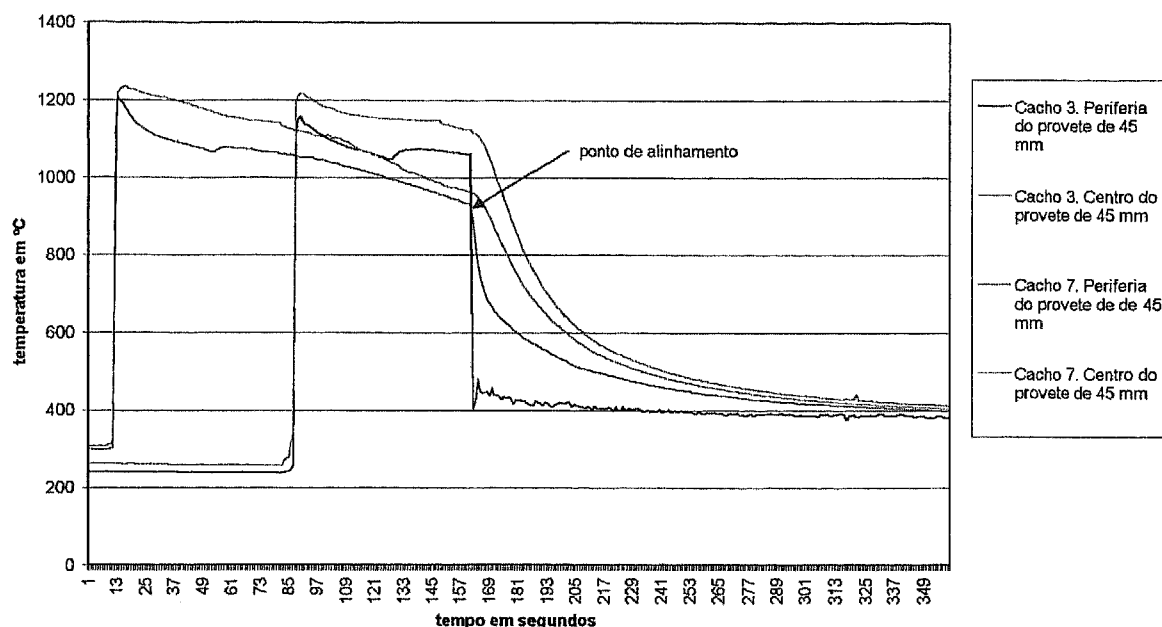


Fig. 85 - Gráficos sobrepostos dos cachos n.º 3 e n.º 7 alinhados pela periferia do provete de 45 mm . A diferença de velocidade de descida de temperatura é bem visível e deve-se a pequenas diferenças de posicionamento dos termopares diferenças essas que na zona periférica tem, como se vê , enorme influencia. O posicionamento exacto é difícil , dado que o rasgo do termopar tem que proporcionar alguma folga para introdução deste e, por outro lado, a chegada do metal força o termopar. Ao contrário das moldações em areia , o termopar terá que entrar na zona da apartação se queremos poder retirar o termopar juntamente com a peça.

Idêntico alinhamento se fez para as curvas relativas à parte central dos provetes de 45 mm dos cachos 3 e 7 (Fig. 86). O alinhamento foi feito para a temperatura de 900°C . As curvas coincidem perfeitamente o que permite concluir que um tempo de espera antes da austempera não influencia o andamento das curvas entre os 850°C e a temperatura do banho de sais.

Vaz. E 54. Gráficos sobrepostos dos cachos 3 e 7 alinhados polo centro dos provetes de 45 mm

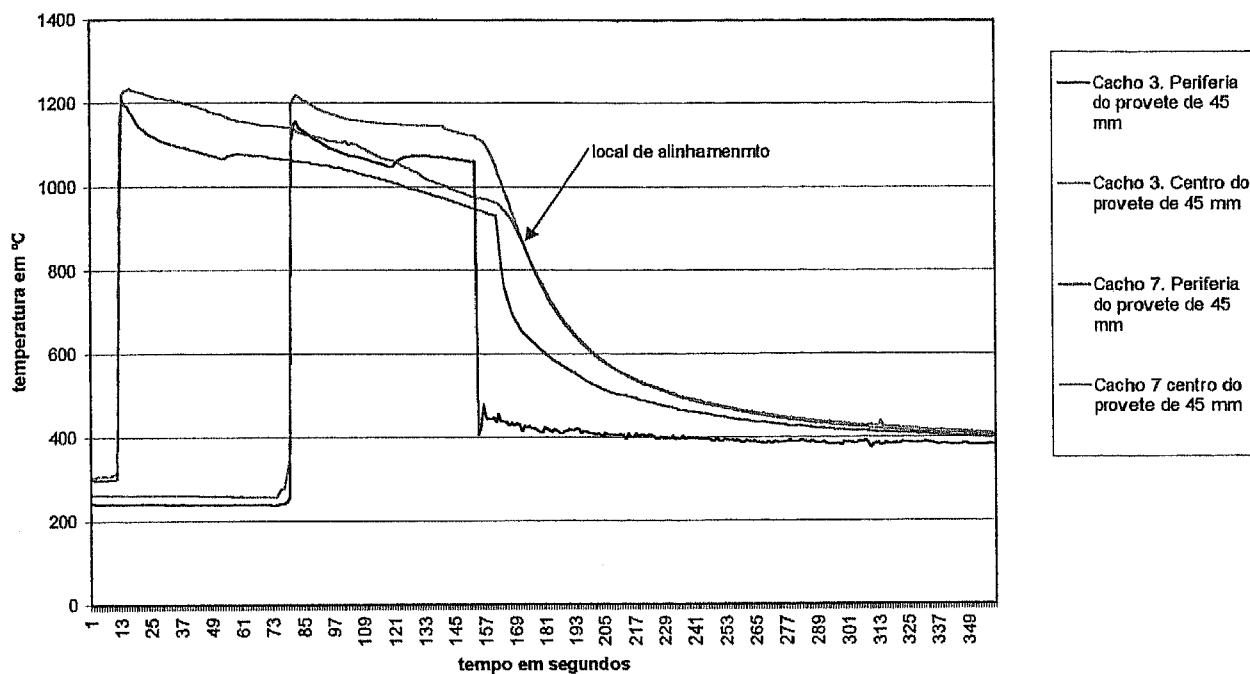


Fig. 86 Gráficos sobrepostos dos cachos n.º 3 e n.º 7 alinhados pelo centro do prevete de 45 mm. Como se pode observar as curvas sobrepõe-se perfeitamente mostrando que para a zona central do provete há reproductibilidade de andamento das curvas, e que o seu andamento não depende da temperatura de introdução bo banho de sais.

A Fig.87 mostra as 4 curvas alinhadas pelo vazamento . Este tipo de alinhamento apenas permite observar o tempo de espera diferente para o cacho 3 e 7.

Vaz. E.54. Gráficos sobrepostos dos cachos 3 e 7 do alinhados pelo vazamento

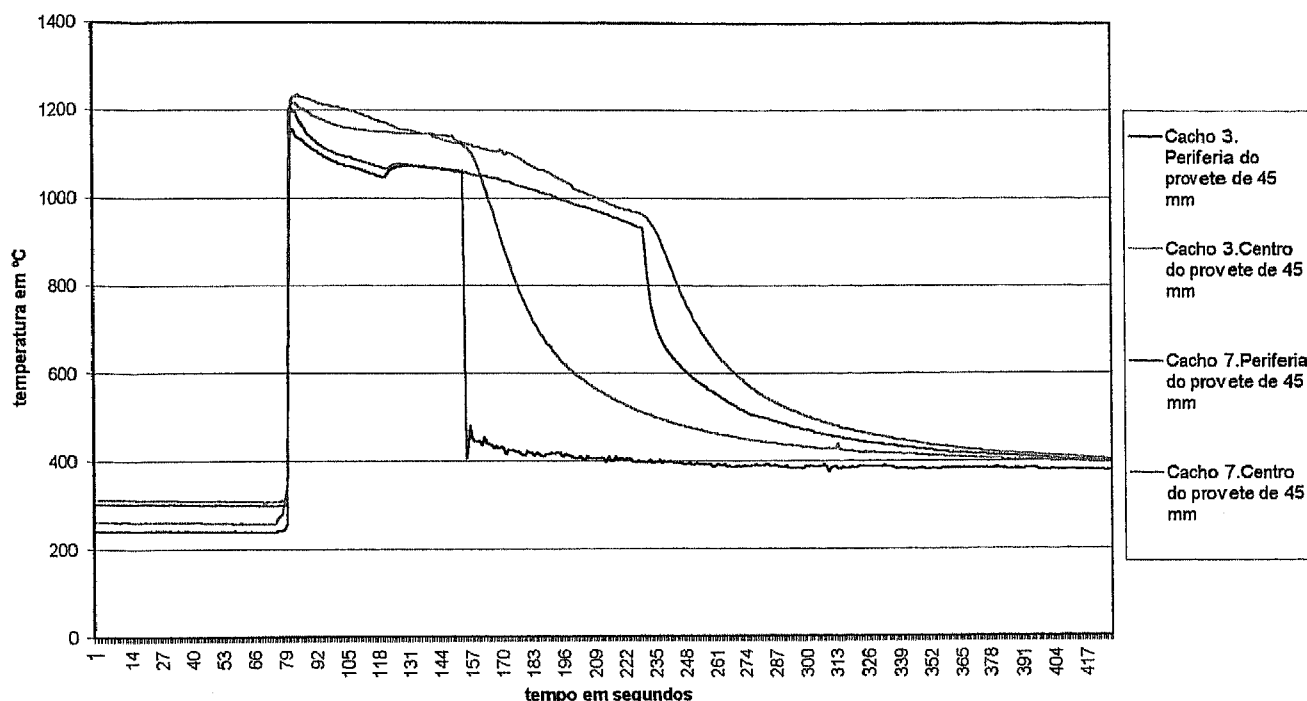


Fig. 87 Gráficos sobrepostos dos cachos 3 e 7. alinhados pelo vazamento. Pode notar-se que, para o cacho 7, houve um tempo de espera entre a retirada da peça da coquilha e a sua introdução no banho de sais.

3.4.3.2.4. Estruturas metalográficas obtidas

A composição química utilizada na segunda experiência

C	Si	Mn	Cu	Ni	Mg
3,6	2,9	0,51	1,06	1,0	0,04

permite obter estrutura 100 % bainítica mesmo no centro do provete de 45 mm Para os cachos austemperados por austempera directa. As estruturas podem ver-se nas Figuras 88 e 89. O mesmo material as cast tem uma estrutura constituída por perlite (90 %) e Ferrite (10 %) como de pode observar na Figura 90

Vazamento: 54
Cacho: 3
Provete: 3
Ampliação: 500 X
Amostra: 244
Negativo: 1
Rolo: 2

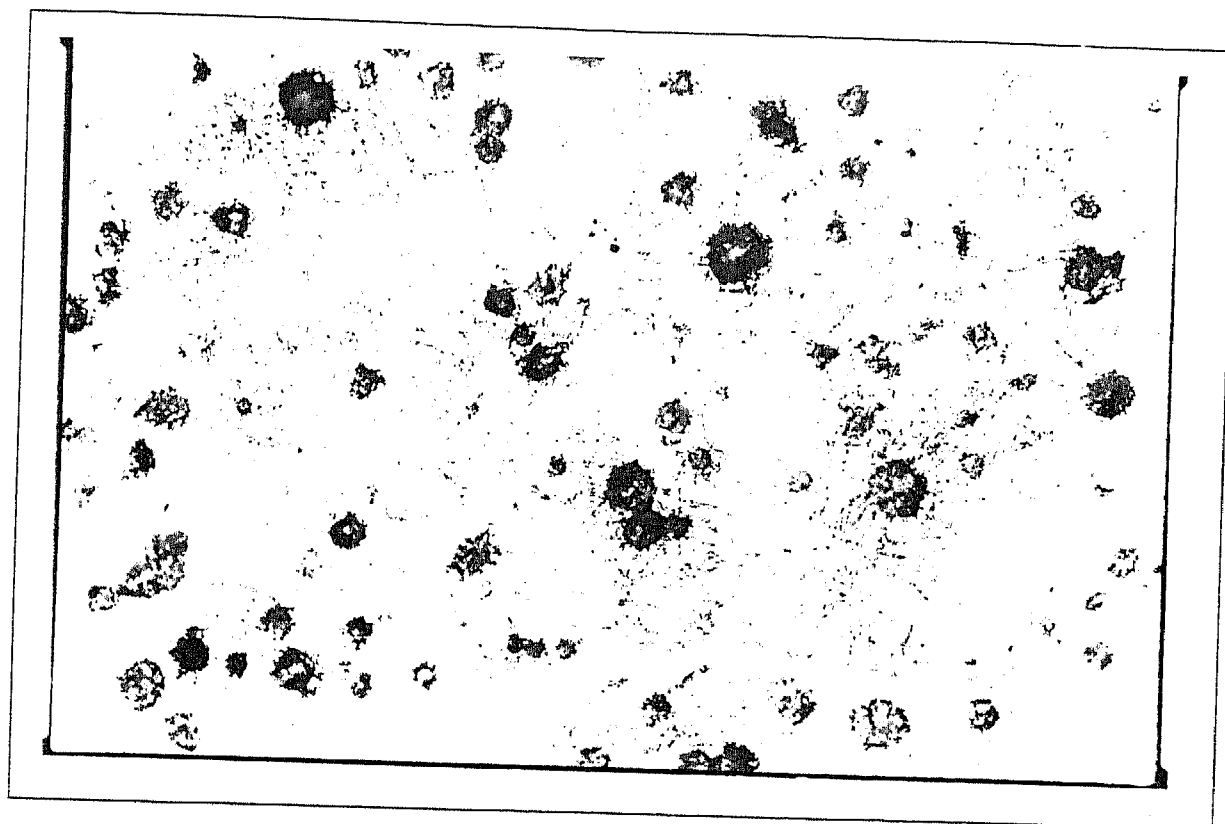


Fig. 88 - Centro da amostra de 45 mm. Cacho n.º 3 (1,0 % Ni ; 1,06 % Cu) Austempera directa - 100 % bainite superior

Vazamento: 54
Cacho: 7
Provete: 3
Ampliação: 500 X
Amostra: 245
Negativo: 3
Rolo: 2

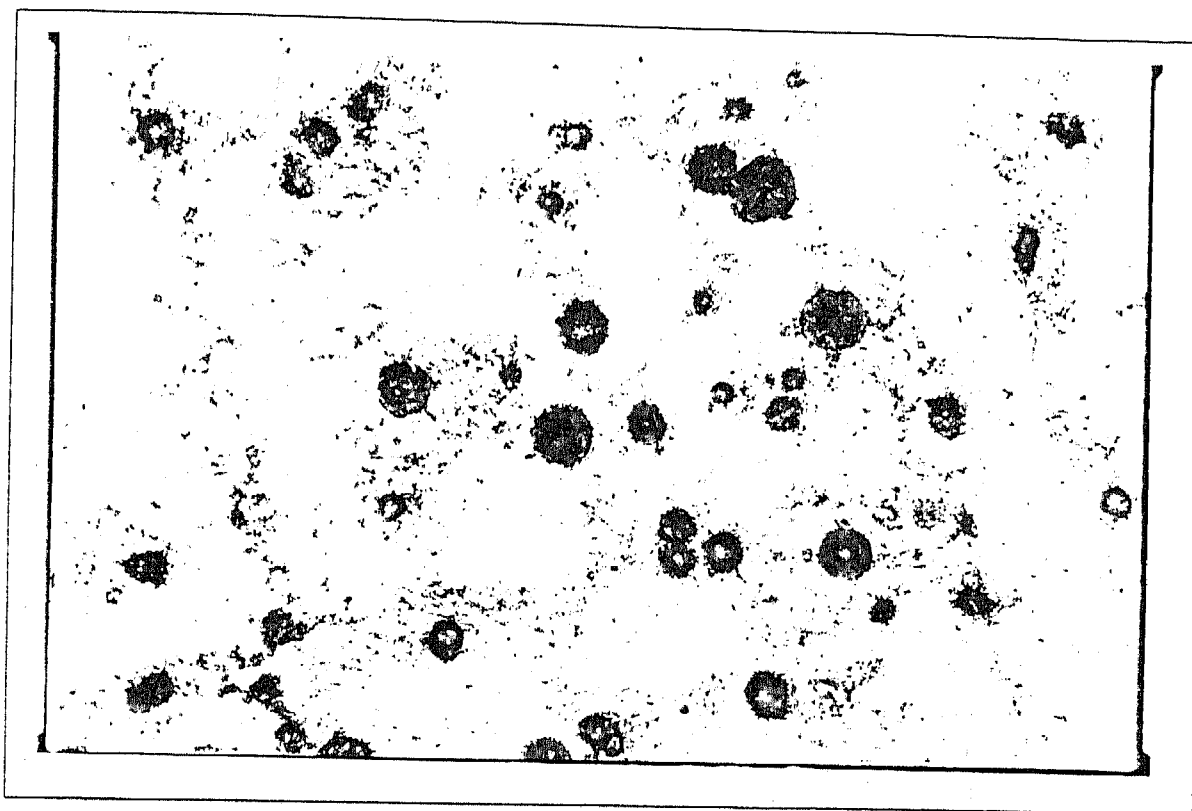


Foto 39 - Centro da amostra de 45 mm. Cacho n.º 3 (1,0 % Ni ; 1,06 % Cu) Austempera directa 100 % bainite superior.

3.4.3.2.5. Conclusões:

Ao contrário da composição química usada na 1ª experiência de austempera directa a composição química usada na 2ª experiência permite obter estruturas 100 % bainíticas mesmo para tarugos redondos de 45 mm de diâmetro.

Na zona periférica a velocidade de arrefecimento desde a temperatura de extracção da coquilha até ao banho de sais varia muito com a profundidade.

Para diâmetros idênticos há perfeita reproductibilidade das curvas de arrefecimento na zona axial. (Foto 36) Esta velocidade não depende da temperatura a que a peça está quando entra no banho de sais.

3.4.3.3 3ª Experiência de austempera directa-Austempera mista

3.4.3.3.1. Descrição da experiência:

Foram vazados 6 cachos de provetes tendo cada cacho 2 provetes de diâmetro 30 mm e 1 provete de 45 mm.

A composição química final foi a seguinte

C	Si	Mn	Cu	Ni	Mg
3,61	2,9	0,39	0,41	0,09	0,038

Durante todo o tempo de vazamento foi registada a temperatura da coquilha em dois pontos situados a 3 mm dos provetes de 30 mm e de 45 mm.

O cacho nº 2 sofreu austempera directa mista em agua e banho de sais tendo sido registada a temperatura da parte central e periférica do provete de 45 mm durante o vazamento, solidificação e austempera. Para a sua execução foi colocado um bidom com agua junto ao forno de banho de sais. Após extracção do cacho da coquilha esperou-se que a temperatura periférica do provete de 45 mm atingisse 950°C e então todo o cacho foi mergulhado em agua ate que a temperatura da periferia fosse de 300°C. Nessa altura o cacho foi retirado da agua e introduzido no banho de sais tendo permanecido duas horas no banho.

3.4.3.3.2. Registos gráficos da evolução de temperatura

A Fig. 90 mostra o gráfico completo da evolução da temperatura da coquilha durante o vazamento de todos os cachos, assim como a evolução da temperatura dos termopares colocados nos provetes.

Vaz. E 55 Grafico de todo o vazamento

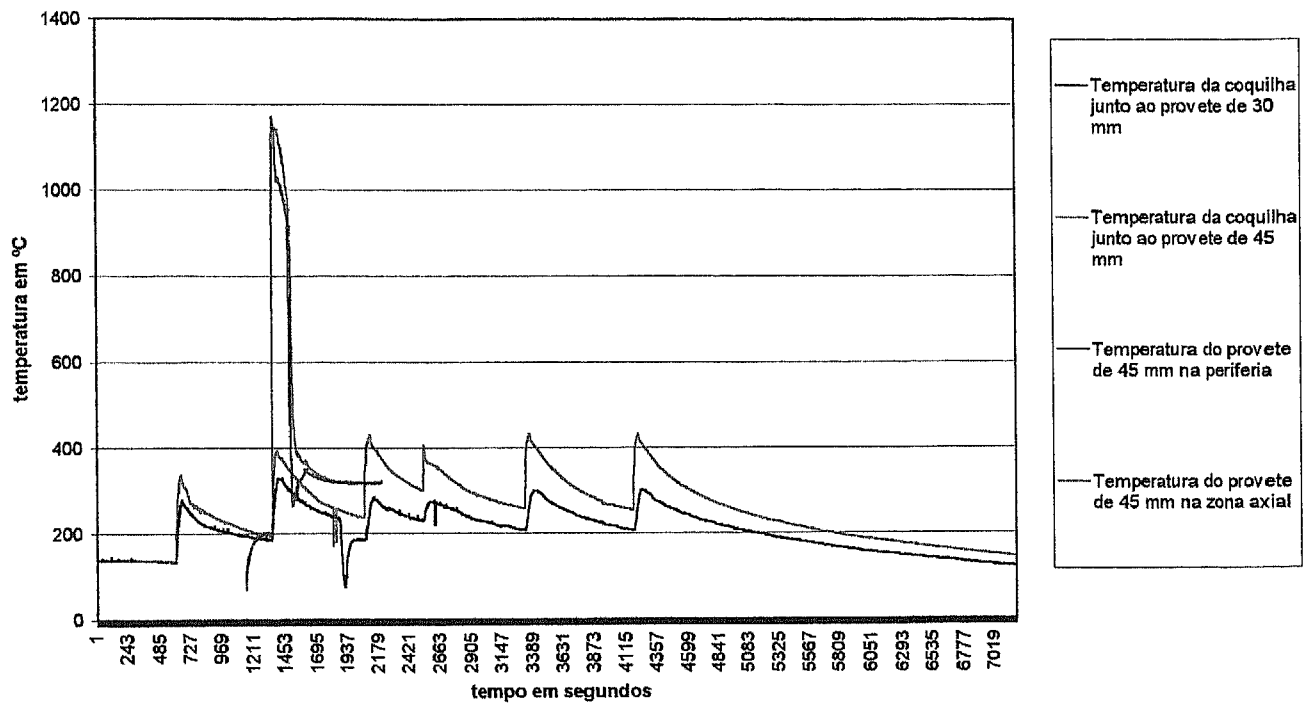


Fig. 90 Gráfico completo da evolução da temperatura da coquilha durante o vazamento de todos os cachos, assim como a evolução da temperatura dos termopares colocados nos provetes. Pode ver-se que durante o vazamento do cacho nº 2 o termopar relativo à temperatura da coquilha na zona do provete de 30 mm se deslocou da sua posição dando temperaturas inferiores as reais.

A Fig. 91 mostra a parte do gráfico da Fig. 90 referente ao vazamento do cacho nº 2 (austempera directa água + banho de sais). A cronometragem dos pontos importantes do ciclo feita a partir da gravação em vídeo permitiu assinalá-los no gráfico.

Notar que na periferia do provete de 45 mm a temperatura desce abaixo da temperatura do banho de sais sendo reaquescida quando da reentrada no banho de sais,

ao passo que a parte central tem um andamento mais regular sendo o andamento da curva sempre descendente.

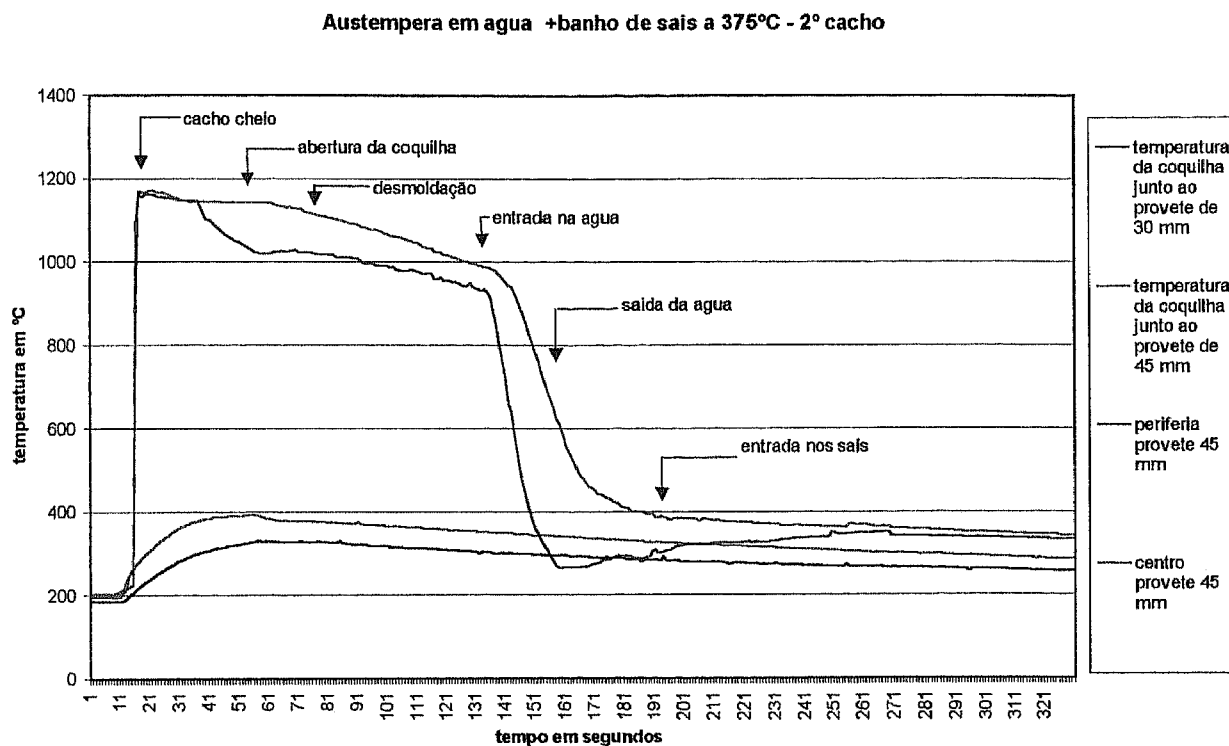


Fig. 91 Zona do grafico anterior correspondente ao cacho n.º 2 que sofreu o tratamento de austempera mista água+banho de sais . Notar que a curva relativa à periferia do provete atinge 300 °C sendo esta zona reaquecida ao entrar no banho de saia, ao passo que a zona central apresenta uma curva de descida de temperatura mais regular. Os provetes foram retirados da água quando a temperatura da periferia atingiu 300 °C porque abaixo desta temperatura corre-se o risco de aparecimento de Martensite

3.4.3.3.3. Comparação das curvas obtidas com as curvas da austempera directa simples (não mista)

Para melhor podermos comparar o arrefecimento em banho de sais com o arrefecimento misto água banho de sais foi construído o gráfico da Fig. 92 que compara o arrefecimento das partes centrais de provetes de 45 mm de varios vazamentos. Foi escolhida a parte central dos provetes de 45 mm porque de experiências anteriores sabemos que esta zona produz gráficos muito reprodutíveis.

Gráfico comparativo das velocidades de austempera possíveis para arrefecimento em banho de sais e em arrefecimento misto água-banho de sais

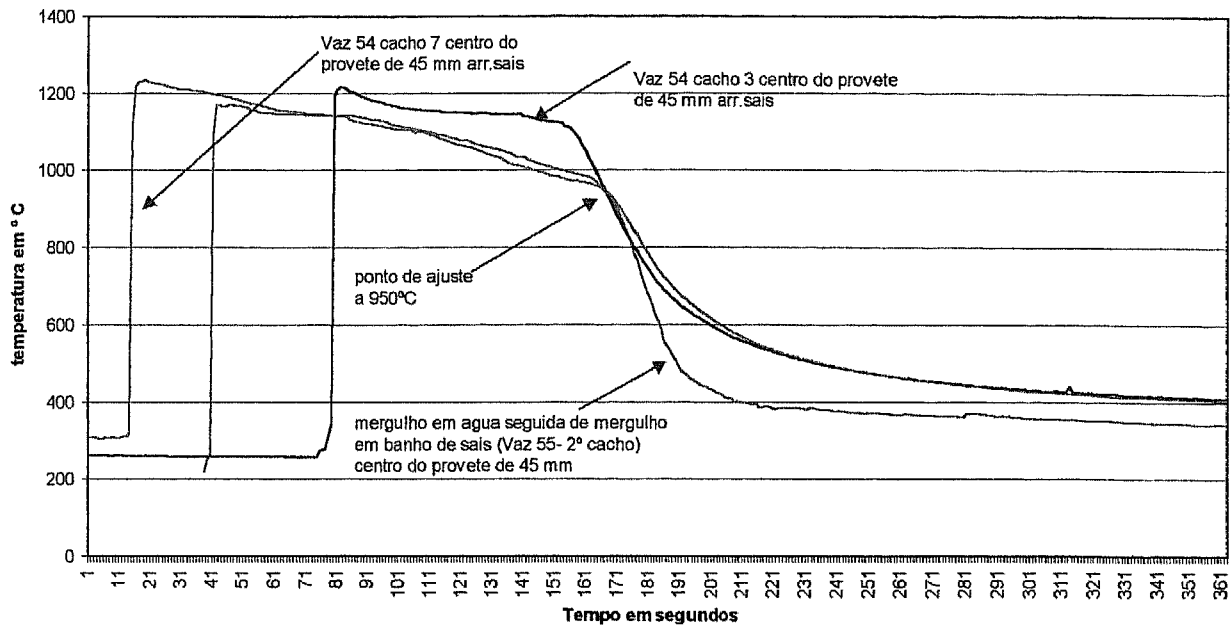


Fig.92 Comparação das velocidades de descida de temperatura da parte central de provetes de 45 mm arrefecidos em banho de sais versus parte central de provete de 45 mm com arrefecimento misto água + banho de sais.

Sabemos que para a maior parte das composições químicas normalmente empregues na produção de A. D.I. o “nariz” da perlite se situa na zona dos 600°C. (Dorazil 1991) . No gráfico da Fig. 92 verificamos que a 600 °C o afastamento das curvas é já significativo (20 segundos). Esse afastamento cresce muito rapidamente de modo que a 500 °C se situa nos 50 segundos.

3.4.3.3.4. Estruturas metalográficas obtidas

Embora não tenhamos curvas de arrefecimento das zonas mais finas do cacho sabemos (o filme mostra-o claramente) que o canal de distribuição e os ataques estavam já abaixo dos 100 °C quando o cacho saiu da água . Estas zonas estavam húmidas produzindo grande agitação do banho de sais quando da introdução do cacho nos sais. Ao contrário do que esperávamos (esperávamos encontrar martensite) estas zonas são constituídas por perlite e ferrite como se pode ver na Foto 93.

Isto deve-se a que quando da entrada do cacho na água embora os provetes estivessem a 900°C os gitos estavam abaixo de 600°C e portanto a perlite já se tinha formado nessa altura. A observação do filme mostra que estas zonas já estão frias quando da introdução do cacho na água. Deste modo esperar que os provetes atinjam

900°C para introduzir o cacho na água OU EM BANHO DE SAIS pode ser proibitivo se as peças tiverem partes finas.

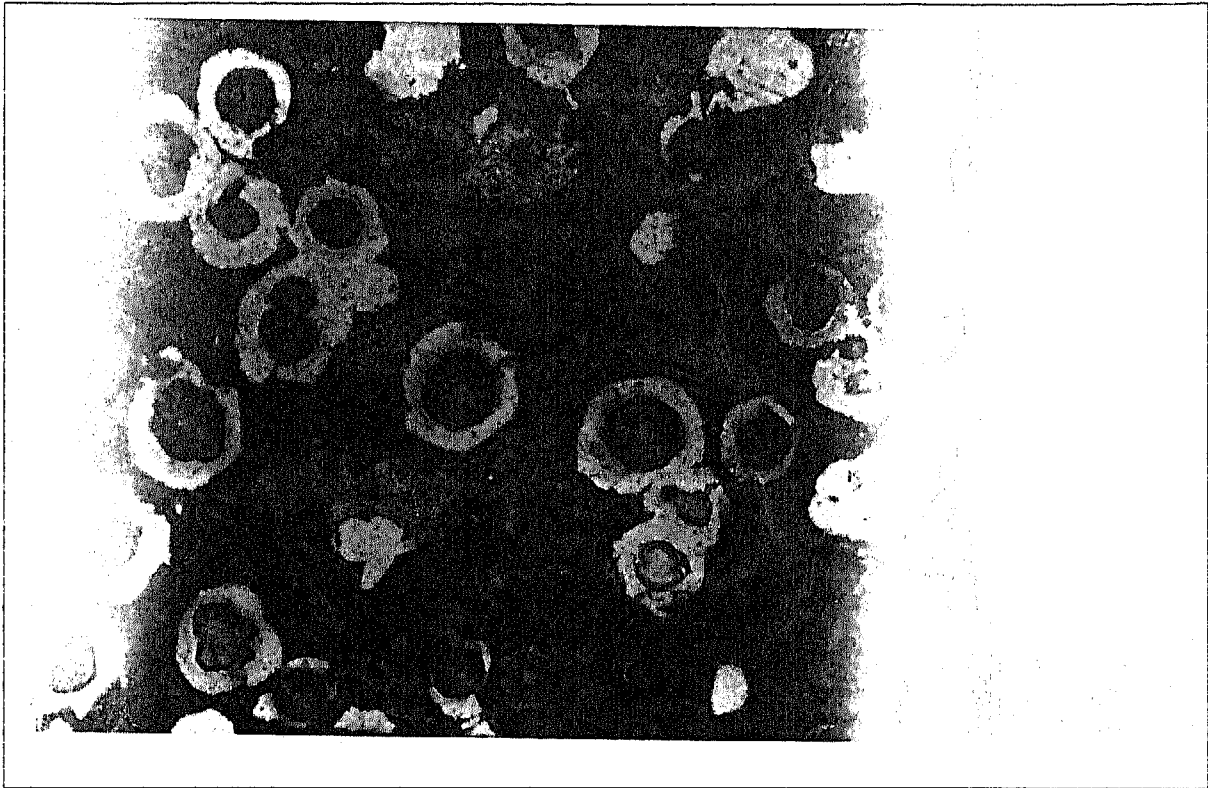


Fig 93 - Zonas mais finas (10 mm . trata-se de um ataque) do cacho que sofreu austempera mista . estas zonas tinham já sofrido a reação perlítica quando da entrada na água

Por outro lado não achamos diferenças metalográficas entre as estruturas dos provetes dos caños 3 e 7 do vazamento E 54 , os quais tem como principal diferença o facto de no cacho 7 se ter esperado pelos 950°C para introduzir o cacho nos sais , e no caño 3 não ter havido essa espera. Deste modo pensamos que o cacho deverá ser introduzido na água ou nos sais tão cedo quanto possível pois aumenta a produtividade e diminui o risco de formação de perlite nas partes finas.

Assim, a austempera directa em peças com grandes diferenças de espessura não é praticável sem um judicioso estudo do arrefecimento da coquilha pois esperar que as partes grossas atinjam temperaturas da ordem dos 900 °C para abrir a coquilha pode significar ter partes finas já perlíticas. O uso de pinturas isolantes nas partes finas será imperativo. Em casos extremos (raros) a austempera directa poderá não ser viável sem a utilização de um forno de homogenização de temperatura.

3.4.3.3.5. Comparação da austempera directa simples com a austempera direct mista agua sais

Comparando a composição química do vaz E 55 (igual para todos os cachos) com o Vaz E 52 (cacho 3)

	C	Si	Mn	Cu	Ni	Mg
Vaz E 55	3,61	2,9	0,39	0,41	0,09	0,038
Vaz E 52	3,5	2,9	0,17	0,6	0,5	0,04

Verificamos que os dois metais tem temperabilidade idêntica. De acordo com Dorazil[4] o factor de temperabilidade do manganês é 2,5 vezes o do cobre e do níquel. Assim para o metal do vazamento 55 temos:

$$0,39 \times 2,5 + 0,41 + 0,09 = 1,56$$

E para o vazamento 52 temos:

$$0,17 \times 2,5 + 0,6 + 0,5 = 1,52 \quad \text{ou seja, os materiais tem temperabilidade idêntica}$$

No vazamento E 52 cacho 3 o provete de 45 mm (austempera directa simples) apresenta uma orla de 2 mm com estrutura bainítica tendo o resto do provete de estrutura perlítica. No vazamento E 55 Cacho 2 (austempera em água+banho de sais) todo o provete de 45 mm apresenta estrutura bainítica como se pode ver pelas fotos 94 e 95.

Vazamento: 55
Cacho: 2
Provet 3
Ampliação : 500 X

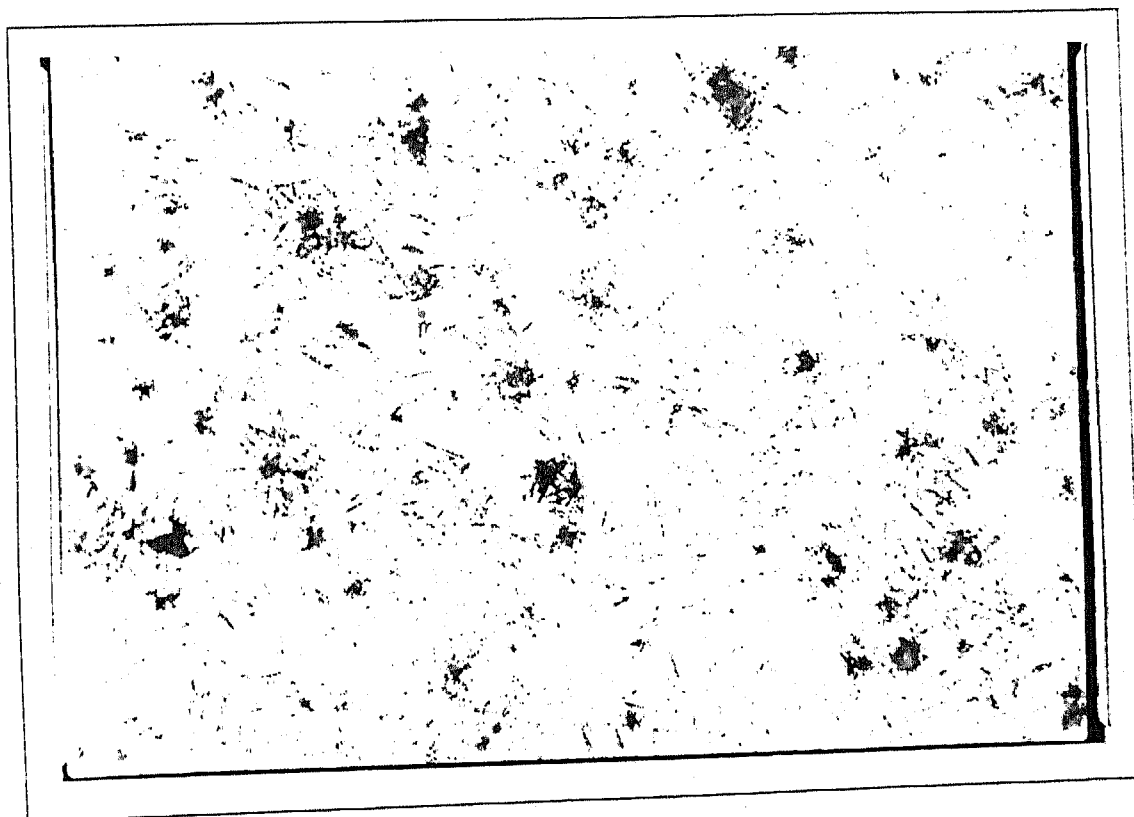


Fig 94 - Centro da amostra de 45 mm . Austempera mista - 100 % bainite inferior.
(Neste vazamento a temperatura do banho de sais era de 325°C , o que produz bainite inferior , o que se pode comprovar quer pela microestrutura quer pelas durezas obtidas.)

Vazamento: 55
Cacho 2
Provete 3
Ampliação : 1000 X

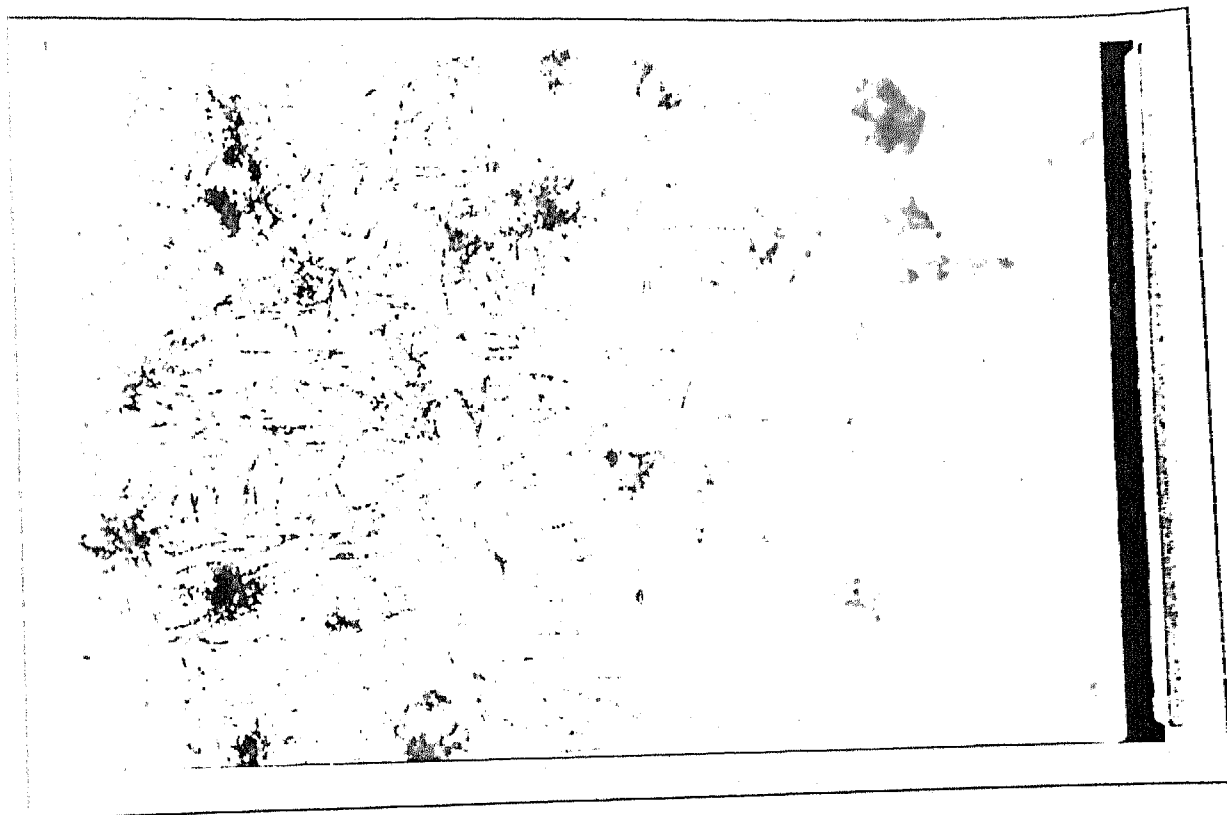


Foto 95 - Mesma amostra qua a da foto 94 mas a 1000 ampliações

3.4.3.3.6. Considerações sobre a austempera mista

Relativamente à austempera em água + banho de sais (mista) faremos as seguintes considerações:

- 1) É aplicável tanto à austempera convencional como à austempera directa. A austempera clássica é sempre mais fácil de realizar que a austempera directa.
- 2) A quantidade de elementos de liga necessários para obter estrutura bainítica em austempera mista é inferior à necessária para o mesmo efeito em austempera clássica. Para além da economia de elementos de liga sabemos que quanto menos elementos de liga forem usados mais curto é o tempo necessário para austempera. Pouparamos nos elementos de liga e nos tempos de permanência no banho de sais.
- 3) Em austempera mista não temos que condicionar a composição química à temperatura do banho de sais. Em austempera mista a severidade do meio de tempera é sempre a mesma, uma vez que é a água quem a determina, e é sempre muito superior à possível com banho de sais.
- 4) A principal dificuldade de aplicação encontra-se nos casos em que há grandes diferenças de espessura na mesma peça.
- 5) Teoricamente deverá ser possível prescindir do banho de sais, substituindo-o por um forno. Para tal basta retirar a peça da água quando esta tem a sua periferia a atingir M_s , e depois efectuar imersões alternadas até podermos introduzir a peça num forno à temperatura de austempera desejada. Será necessário que o núcleo da peça esteja pelo menos a 420°C e que a periferia nunca tenha descido abaixo de M_s . O forno deverá ter circulação de ar forçada. Também a utilização de um leito temperante fluidizado poderá ser uma solução para evitar os sais que terão sempre um efeito mais ou menos poluente. Este ponto fica em aberto para estudos futuros.

Nesta experiência (austempera mista) a temperatura do banho de sais estava a 325°C o que produz bainite inferior. Como vimos no ponto 3 das considerações acima isso é irrelevante no tocante à severidade do meio de tempera, pois aqui essa severidade é fornecida pela água.

Deste modo no vazamento E 55 tentamos produzir bainite inferior o que conseguimos como se pode ver pelas fotos 94 e 95. Também as durezas medidas confirmam que a estrutura obtida é bainite inferior, como se pode ver pelo gráfico da Fig. 96 Obtido a partir do Quadro 22.

Quadro 22 Durezas obtidas por austempera mista . As medições foram efectuadas no provete de 45 mm segundo duas direcções (raios) perpendiculares.

1º raio		2º raio	
Distancia à borda (mm)	Dureza Brinel	distancia à borda (mm)	Dureza Brinel
1,8	427	2	439
6	414	5	430
11	415	10	422
15	411	15	415
20	424	20	425

Podemos assim concluir que, pelo menos pera certa geometria de peças, podemos efectuar austempera mista com economia de elementos de liga e consequente encurtamento dos tempos de austempera.

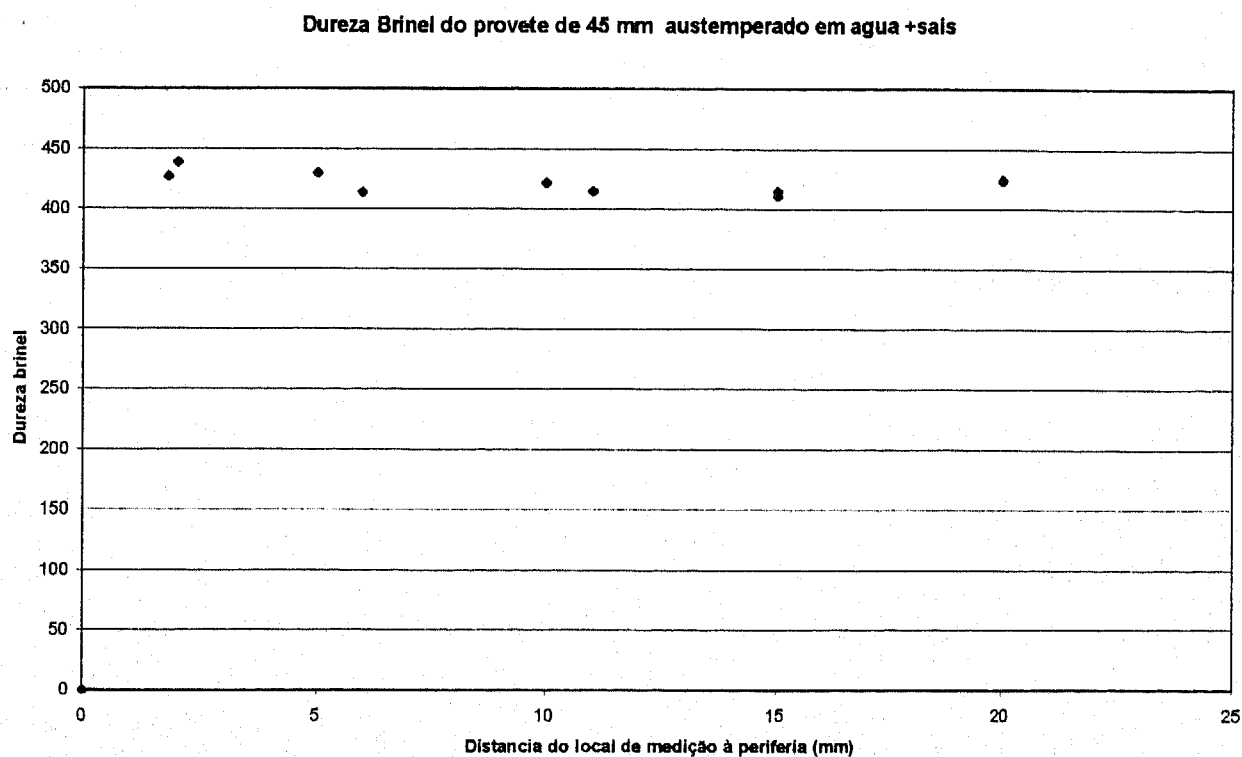


Fig. 96 . Durezas obtidas por austempera mista num provete de 45 mm em duas direcções (raios) perpendiculares

3.4.3.3.7. Vantagens e limitações da austempera mista

O quadro seguinte resume as vantagens e limitações da austempera mista.

Quadro 23 - Vantagens e limitações da austempera mista.

Tipo de peça	Possibilidade de aplicação	Compatibilidade com austempera directa	vantagens	limitações
Com espessuras idênticas, sem paredes finas	Possível	compatível	Economia de elementos de liga	Nenhuma
Com espessuras idênticas, com paredes finas	Possível, mas desnecessária			
Algumas diferenças de espessura	Possível desde que as diferenças sejam razoáveis	compatível	Economia de elementos de liga	Peças de paredes finas (inferiores a 10 mm)
Grandes diferenças de espessura mas sem paredes finas.	Possível mas com ajuda de elementos de liga	compatível	Economia de elementos de liga e de tempo de austempera	nenhuma
Grandes diferenças de espessura com paredes finas.	Praticamente impossível	A austempera directa é ela própria difícil nestes casos		Muito limitado – praticamente impossível de realizar.
Peças com machos	Possível se o macho puder ser retirado antes da austempera	compatível	Economia de elementos de liga	Peças de paredes finas (inferiores a 10 mm)

3.4.3.3.8. Conclusões sobre a austempera mista.

As conclusões podem ser tiradas directamente do quadro anterior. Deste modo a austempera mista poderá ser aplicada com sucesso quando:

As peças forem de espessura mais ou menos regular e sem partes finas. Cada caso porá (ou não) problemas particulares. Os tempos de imersão em água terão que ser objecto de estudo experimental. Isto implica que este método só interessa para séries grandes. Para séries pequenas deverá ser utilizada a austempera directa simples ou mesmo a austempera clássica. Mas deveremos ter em atenção que se se construiu uma coquilha é porque a série é justificativa do investimento.

As peças com dificuldade de execução em austempera directa sofrem acrescimo de dificuldade se se tentar a austempera mista . O reciproco é verdadeiro. Quando a austempera directa for praticavel, então a austempera mista terá muitas possibilidades de vir a ser possivel.

3.4.4. Resultados mecânicos do A.D.I. produzido por austempera directa.

Os resultados mecânicos dos provetes em nodular austemperado cuja estrutura pode ser considerada “correcta” (constituída apenas pos uma matriz bainítica com mais de 95 % de nodularidade) constam do quadro seguinte

Quadro 24 - Resultados mecânicos do A.D.I. produzido por austempera directa.

Vazamento	Colher	Alongamento	Tensão de rotura (Kg7mm2)
		2,00	84,48
		2,20	85,22
		2,60	85,46
		4,00	92,93
		4,80	101,91

Colocando agora no gráfico os valores destes ensaios, e ainda os valores da I.S.O. 1083 para nodular , e os valores da A.S.T.M. 987 para A.D.I. (ainda não há norma internacional para o ferro nodular austemperado) obteremos o gráfico seguinte:

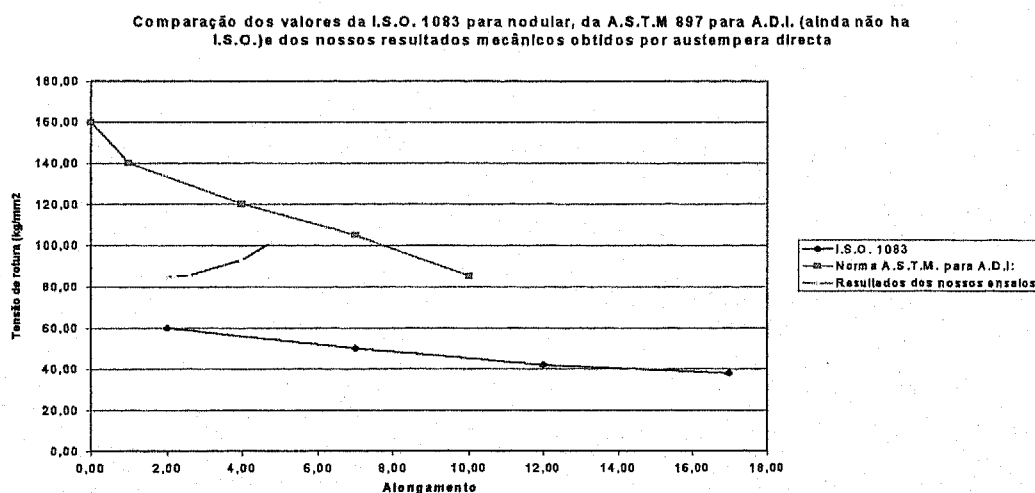


Fig 97 - Comparação dos valores da I.S.O 1083 para nodular, da A.S.T. M. 897 para A.D.I e dos resultados obtidos por austempera direct. Todos os provetes foram austemperados directamente durante 2 horas a 375 °C

3.4.5. Interpretação dos resultados.

Dado o escasso numero de provetes ensaiados apenas se pode concluir que não atingimos os valores estabelecido para a norma ASTM.

A forma da curva parece sugerir a presença de defeitos, mas não deve ser o caso , pois os defeitos estudados na secção 3.2 . não foram por nos identificados.

Por outro lado analisando os resultados obtidos por Dorazil [4] High Strenght Austempered Ductile Cast Iron, 1991 Pag. 102 vemos que dependendo do tempo de austempera (factor que não estudamos por falta de tempo) se obtém resultados idênticos aos nossos se o tempo de austempera for demasiado curto. Dorazil utilizou teores de manganês inferiores aos nossos (0,34 % contra 0,48 %) o faz aumentar o tempo necessário para a obtenção das características óptimas. Alguns autores como por exemplo] D.J.Moore, T.N.Rouns, K.B.Rundman [20] consideram que a partir de 0,5 % de Mn é impossível realizar completamente a reacção de austempera sem que se inicia a precipitação de carbonetos, os quais fazem baixar drasticamente o alongamento.

Deste modo os nossos trabalho deverão ser continuados no sentido de se optimizar o conjunto composição química (teor de manganês fundamentalmente) com o tempo de austempera.

3.5. Produção de luvas de rectroescavadora

3.5.1. Introdução

Na secção 3.3 vimos como foram produzidas as coquilhas e caixas de machos das luvas de rectroescavadora.

O vazamento e E 44 foi efectuado com o intuito de estudar aspectos técnicos do funcionamento da coquilha, como gitagem, desmoldação, e utilização de pinturas.

3.5.2. Estudo da operacionalidade da coquilha-

3.5.2.1. Composição química

A composição química usada para o estudo de funcionalidade da coquilha das luvas de rectroescavadora foi a seguinte:

Vaz N.º	C	Si	Mn	Cu	Ni	Mo
44	3.7	2.7	0.25	0.17	-	-

3.5.2.2. Funcionalidade da coquilha

A principal dificuldade que tivemos do ponto de vista da operacionalidade da coquilha foi a dificuldade de desmoldação que se deve a que a cavidade por cima do macho (ver Fig.68) onde em princípio não deveria chegar o metal não está completamente isolada do resto da coquilha e além disso não tem saída. O defeito já deveria existir na coquilha original e ao reproduzir a coquilha por fundição reproduzimos o defeito.

3.5.2.3. Analise das peças obtidas

Embora exteriormente as peças estivessem aparentemente bem, após executarmos cortes para verificar a sanidade interna, verificamos a existência de rechupe como se pode ver na foto 98 – peça da esquerda.

Metalograficamente as peças tinham estrutura perlito-ferrítica (20 a 25 %) de ferrite e não apresentavam carbonetos.

3.5.2.4. Conclusões

Quanto à dificuldade de desmoldação teremos que tentar minimiza-la, mas nesta altura esta fora de questão, devido à escassez de tempo, executar uma nova coquilha.

Quanto ao rechupe terá que ser eliminado. Para tal deveremos aumentar a espessura do ataque (pois fica nessa zona) e pinta-lo com tinta isolante para conseguir alterar a direcção de solidificação no bom sentido (do ataque para a peça).

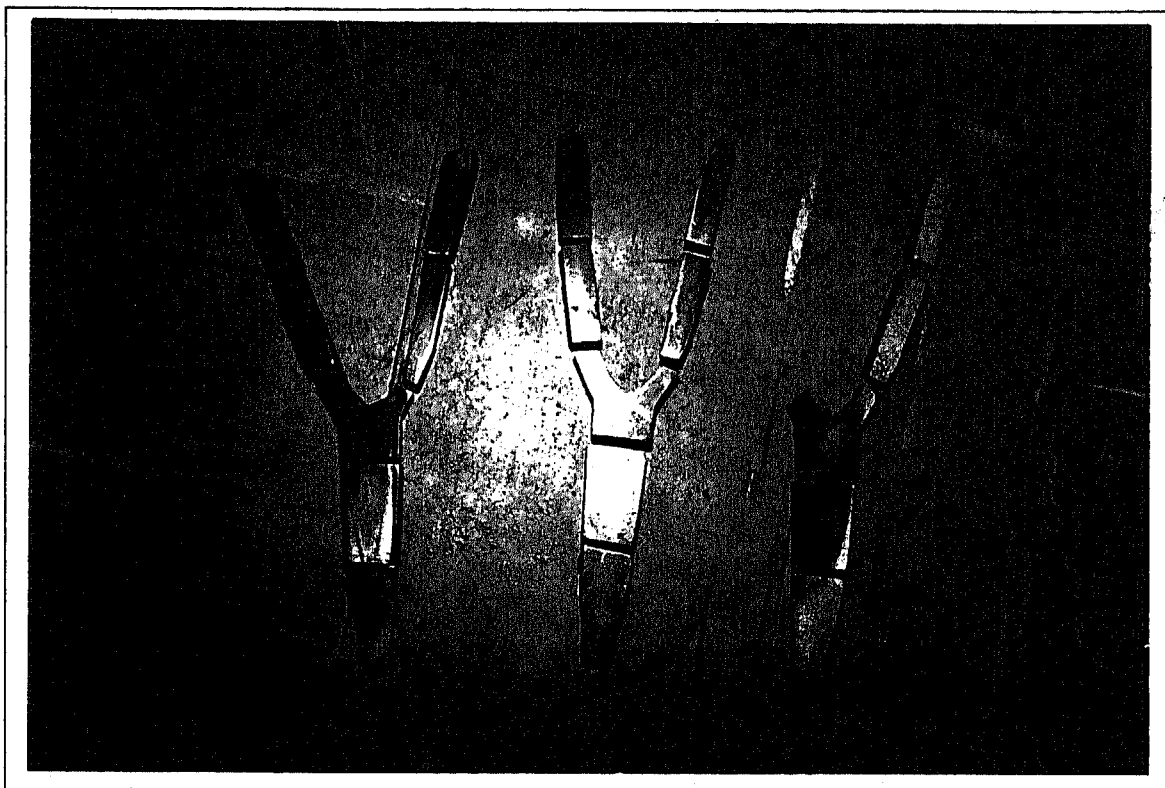


Fig. 98. Luvas de retroescavadora austemperadas Directamente – corte longitudinal.

As amostras estão segmentadas para se poder fazer o polimento e observação metalografica.

A luva da esquerda apresenta rechupe na parte central.

Para a produção da luva da direita (Vaz E 46) foi utilizada uma pintura isolante no gito junto ao ataque. O rechupe foi eliminado , mas a zona mais massiva da peça apresenta perlite que, curiosamente , devido à posição do flash, adquiriu coloração verde.

A peça central (Vaz E 57) apresenta estrutura correcta (excepção feita para uma pequena quantidade de ferrite de que falaremos mais adiante) em toda a peça e não tem rechupe

3.5.3 Austempera directa.

3.5.3.1 1º vazamento – introdução

A geometria da peça é adequada à austempera directa, pois a espessura é regular. Tem no entanto uma dificuldade que consiste na existência de um macho que, tal como supúnhamos, não desagrega em quente tendo por isso que acompanhar a peça no seu tratamento de austempera, o que altera as condições de arrefecimento.

A temperatura de austempera usada foi de 375 °C o que produz bainite superior. (correctamente não é bainite mas uma estrutura constituída por ferrite e austenite enriquecida em carbono e por isso estabilizada) O tempo de austempera foi para todas as peças de 2 horas

3.5.3.1.1. Composição química

A composição química usada no 1º Vazamento foi a seguinte:

Vaz N.º	C	Si	Mn	Cu	Ni	Mo	Tratamento Térmico	Matriz na parte mais massiva
E 46	3.5	2.7	0.66	1.01	-	-	Austempera directa	Perlite

3.5.3.1.2. Estrutura as cast

A estrutura as cast é constituída por uma matriz perlito-ferrítica com aproximadamente 90 a 95 % de perlite.

A sua estrutura pode ver-se na foto 99

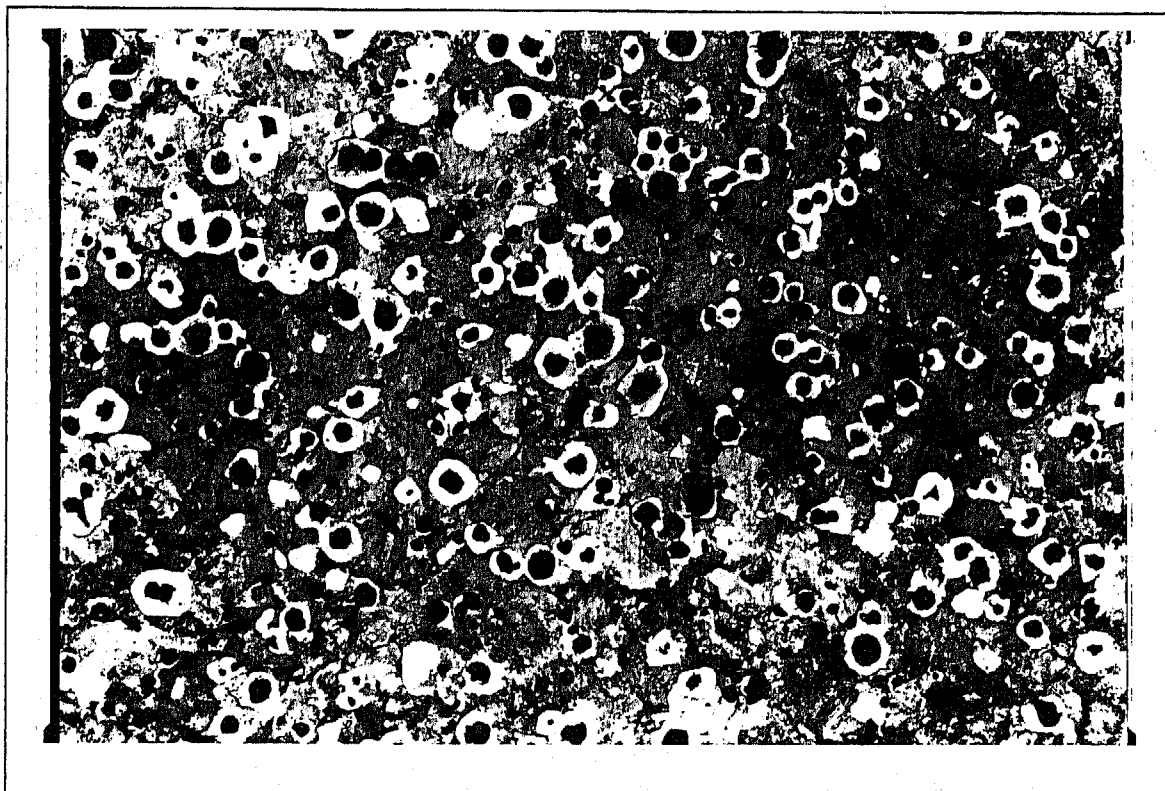


Foto 99. Vaz E 46 Estrutura da luva As cast 200 X
95 % de perlite e 5 % de Ferrite

3.5.3.1.3. Estruturas obtidas por austempera

Foi cortada uma peça e feito estudo metalográfico . A estrutura é bainítica em algumas zonas e perlítica noutras. A distribuição pode ver-se na foto 98 – peça da direita . A perlite adquiriu por acção do flash uma coloração verde

As Fotos das Figuras; 100 , 101, 102 , e 103 referentes a esta peça mostram as respectivas estruturas metalográficas. Anexo à foto vem indicado o local onde a foi tirada e a dureza HB.

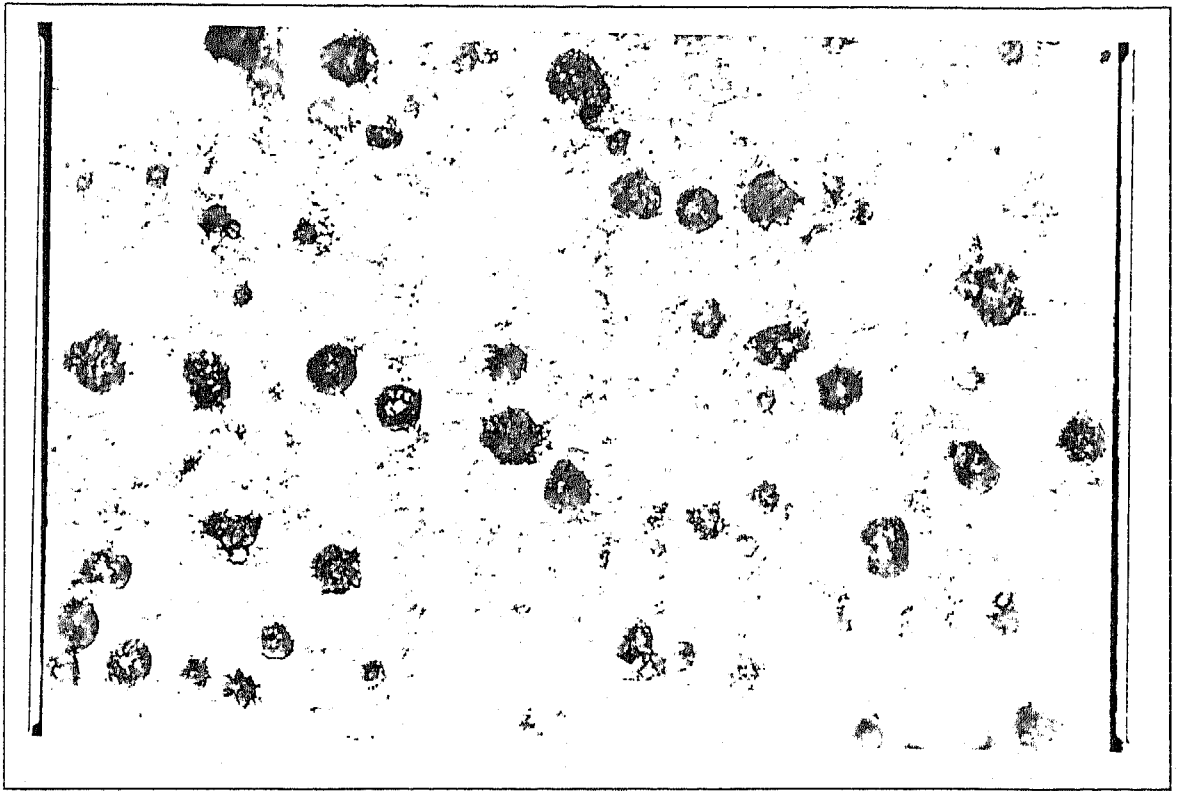


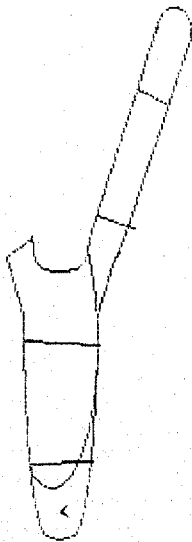
Foto 100 Vaz. E 46

Ampliação 1000 X

Localização X

Dureza 303 HB
mais adiante)

bainite superior (e alguma ferrite de que falaremos



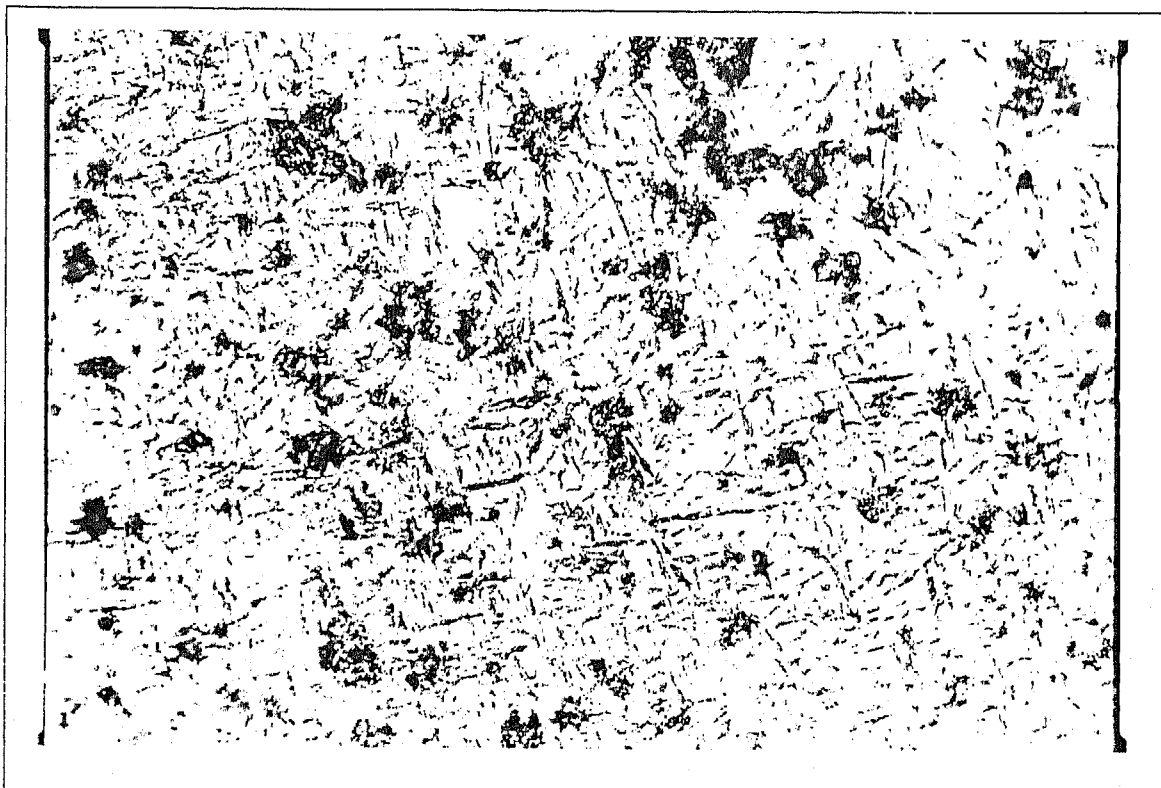
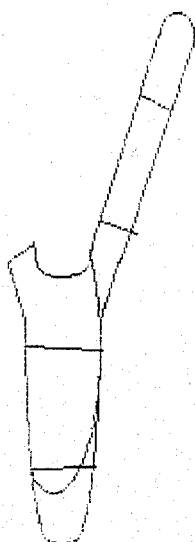


Foto 101 . Vaz E 46
 Ampliação 500 X
 Localização X
 Dureza 317 HB

Bainite superior 90 % e perlite 10 %



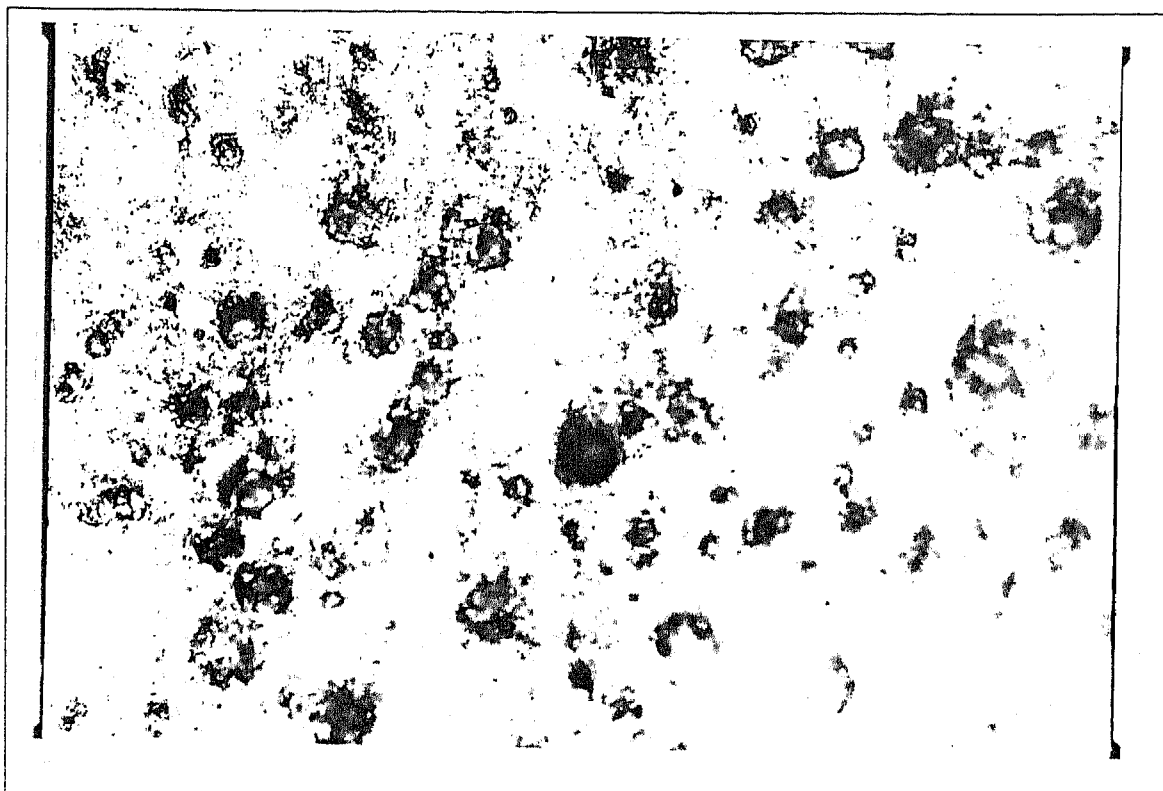


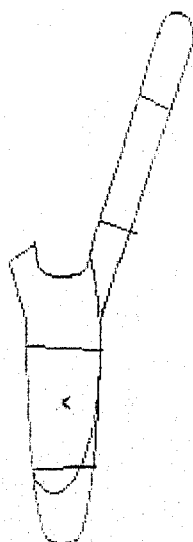
Fig. 102 Vaz E 46

Ampliação 500 X

Localização X

Dureza 394 HB

100 % de perlite



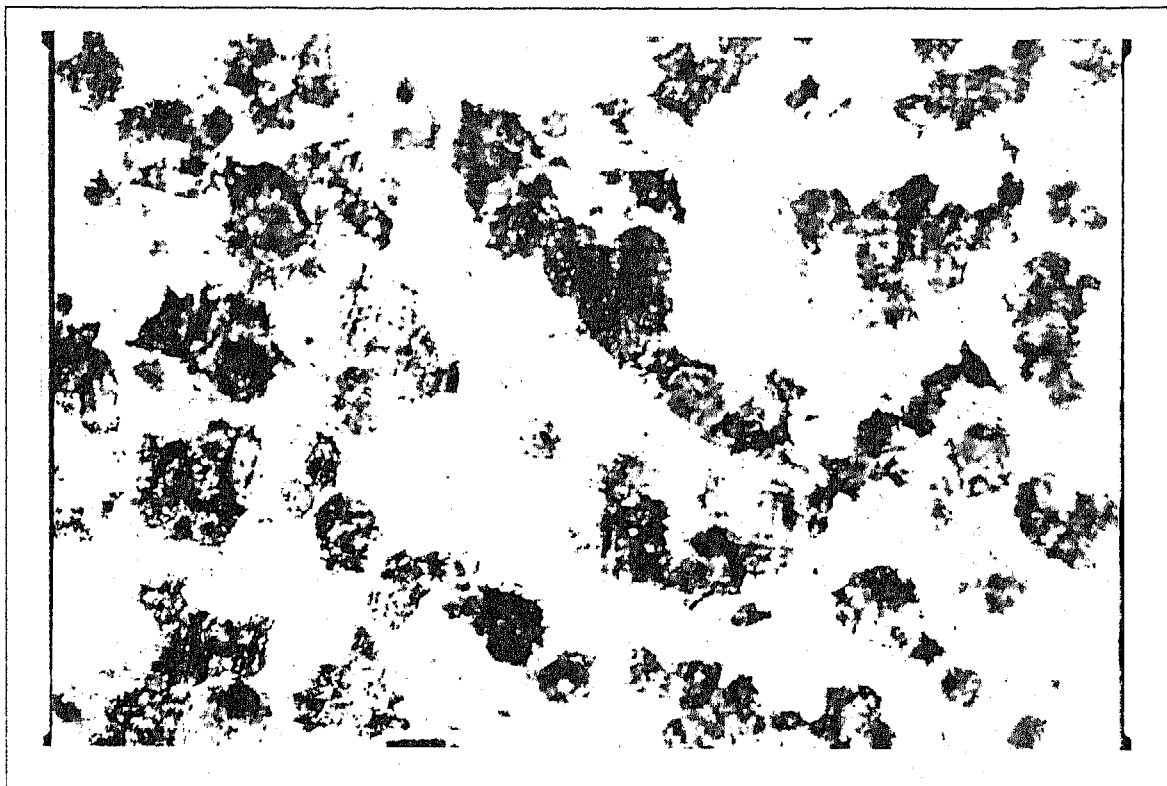


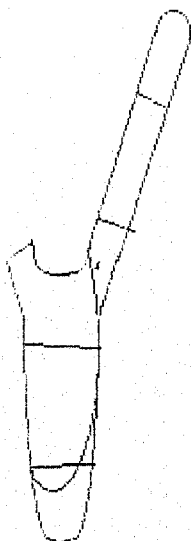
Fig. 103 Vaz E 46

Ampliação 500 X

Localização X

Dureza 333 HB

Bainite superior 80 % e perlite 20 %



3.5.3.1.4. Análise das peças obtidas

As fotos 104 e 105 mostram que as peças obtidas não tem rechupe.

3.5.3.1.5. Conclusões

Embora se tenha resolvido o problema da falta de sanidade interna a estrutura obtida não é 100 % bainite em toda a peça , pelo que deveremos aumentar os elementos de liga.

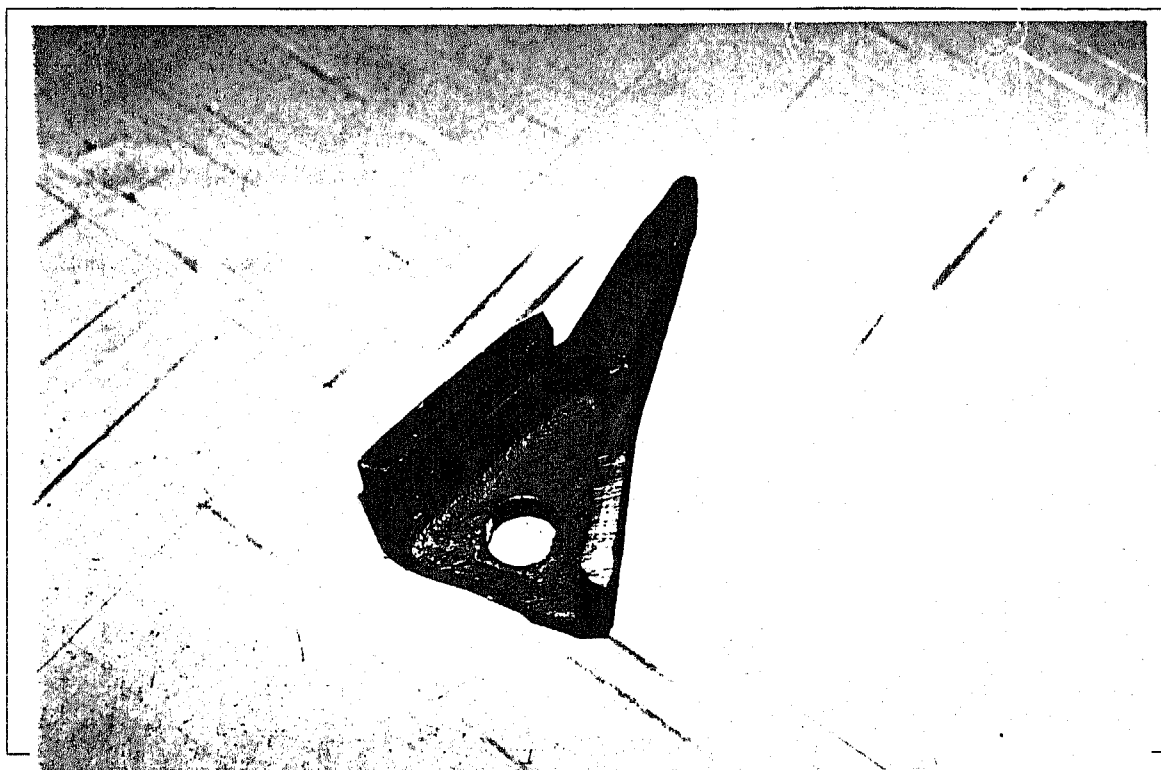


Foto 104 Luvas cortada para recolha de amostra metalograficas e verificação de sanidade

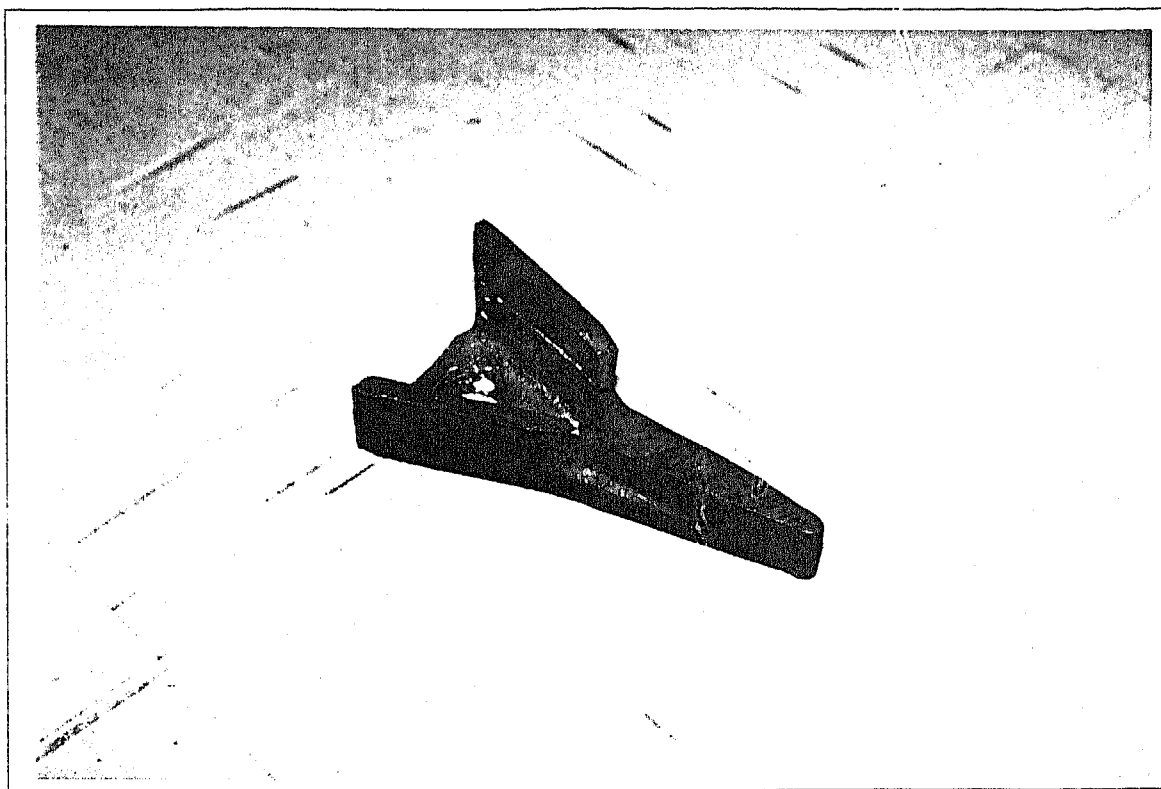


Foto 105 Luvas cortada para recolha de amostra metalográficas e verificação de sanidade

3.5.3.3. 2ª vazamento com austempera directa.

3.5.3.3.1. Composição química

A composição química usada no 2º Vazamento é a seguinte :

Vaz N.º	C	Si	Mn	Cu	Ni	Mo	Tratamento Térmico	Matriz na parte mais massiva
E 51	3.5	2.9	0.6	1.0	1.0	0.3	Austempera directa	Martensite

3.5.3.3.2. Estrutura as cast

A estrutura as cast é 100 % perlítica

3.5.3.3.3. Estrutura após austempera

O vazamento E 51 tem uma composição onde os elementos de liga pecam por nitido excesso. O manganês está acima daquilo que, nesta altura, consideramos ser o

máximo admissível (0,5 %) e alem disso 0,3 % de Mo aliado a 1 % de níquel e 1 % de Cu constituem uma liga com capacidade de tempera excepcional. As curvas T.T.T foram de tal modo “ puxadas “ para a direita que mesmo passadas duas horas de permanência a 375 °C a reacção bainítica não se iniciou, obtendo-se martensite pois a austenite não estava minimamente estabilizada.

3.5.3.3.4. Conclusão

A composição química utilizada neste vazamento é nitidamente exagerada para o fim em vista .

3.5.3.4. . 3ª vazamento com austempera directa.

3.5.3.4.1. Composições químicas usadas e resultados obtidos

O quadro 25 mostra a composição química usada no 3 ° Vazamento, bem como os resultados obtidos

Quadro 25 - Composição química usada no 3 ° Vazamento e resultados obtidos

Vaz N.º	C	Si	Mn	Cu	Ni	Mo	Tratamento Térmico	Matriz na parte mais massiva
57 colher1	3.5	2.8	0.5	1.02		-	Não tratado	90 %Perlite +10% ferrite
57 colher2	3.5	2.8	0.5	1.02		-	Austempera directa	85% bainite 15% perlite
57 colher3	3.5	2.8	0.5	1.50		-	Austempera directa	95% bainite 5% perlite
57 colher4	3.5	2.8	0.5	1.02	0.5	-	Austempera directa	98% bainite 2% perlite
57 colher5	3.5	2.8	0.5	1.02	1.0	-	Não tratado	90 %Perlite +10% ferrite
57 colher 6	3.5	2.8	0.5	1.02	1.0	-	Austempera directa	100 % Bainite

3.5.3.4.2. Análise dos resultados obtidos.

A composição do vazamento E.57 colher n.º 6, já utilizada no vazamento E.54 é a que de momento da melhores resultados. As composições das colheres n.º3,4,e,5 poderiam eventualmente ser aceitáveis do ponto de vista industrial . Tudo depende do grau de exigência .

3.5.4. Ferrite nas partes finas

Como vimos anteriormente persiste um problema que consiste no aparecimento de ferrite tipo “olho de boi “ no bico da luva .

3.5.4.1. Origem do problema

O fenómeno tem a seguinte explicação: O bico da luva é relativamente fino ao passo que o gito é grosso. Isso obriga a atrasar a abertura da coquilha pois o gito demora a solidificar. Para além disso temos tido dificuldades de desmoldação que são devidas a falta de saída das peças e que tem como consequência um aumento do atraso da entrada das peças no banho de sais. Deste modo o bico da luva já deu início à formação de ferrite, como se pode ver na foto 99

De todas as composições químicas utilizadas no vazamento E 57 a composição referente à 6ª colher (1% Ni; 1% Cu) é aquela onde este defeito se verifica em menor grau.

3.5.4.2. Soluções possíveis

Para o resolver teremos em princípio varias alternativas

- Retirar a peça da coquilha mais cedo (solução óptima caso seja possível)
- Utilizar mais elementos de liga
- Utilizar aquecimento localizado da coquilha

3.5.4.3. Utilização da desmoldação rápida

Deste modo realizamos o Vazamento E 60 com composição química idêntica à da 6ª colher do vazamento E 57 com o qual vazamos luvas.

C	Si	Mn	Cu	Ni	Mg
3,55	2,9	0,5	1,03	1,02	0,038

Este vazamento foi realizado para estudar a possibilidade de , retirando a peça da coquilha o mais cedo possível, eliminar a pequena percentagem de ferrite da ponta da luva.

A coquilha das luvas foi alterada de modo a dar maior saída às peças com a finalidade de se poder fazer uma rápida extracção destas da coquilha.

Foi colocado um termopar na cavidade da coquilha correspondente ao bico da luva.

O gráfico da Fig. 106 mostra os gráficos da evolução de temperatura do bico da luva para os dois cachos .

A análise pormenorizada dos dois gráficos reflecte bem a diferença de actuação que tivemos para cada cacho.

No primeiro cacho extraímos a peça o mais rapidamente possível .

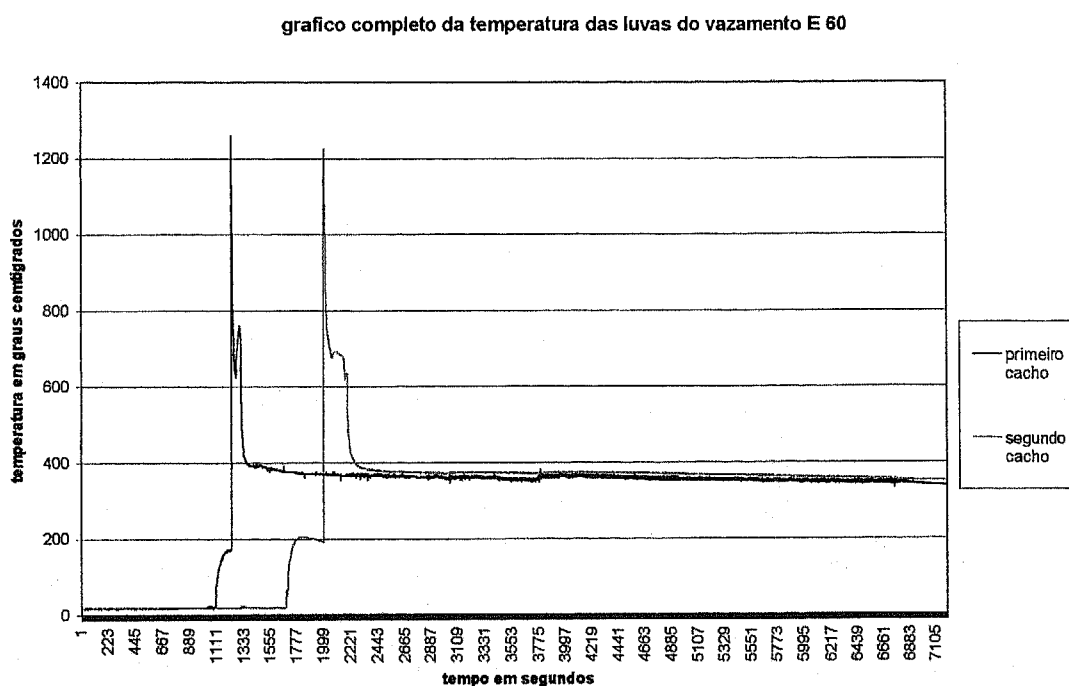


Fig. 106 Evolução de temperatura do bico da luva para os dois cachos . ensaiados.

No segundo vazamento deixamos a peça dentro da coquilha bastante mais tempo. O quadro 26 resume estes tempos , os quais foram retirados da gravação vídeo que fizemos.

Quadro 26 - Tempos em segundos relativos às operações de coquilhagem e austempera

	1º cacho	2ª cacho
Início do vazamento	0	0
Fim do vazamento	7	11
Abertura da coquilha	40	65
Desmoldação	43	164
Entrada no banho de sais	74	191

O gráfico seguinte mostra a evolução das temperatura para o primeiro cacho.

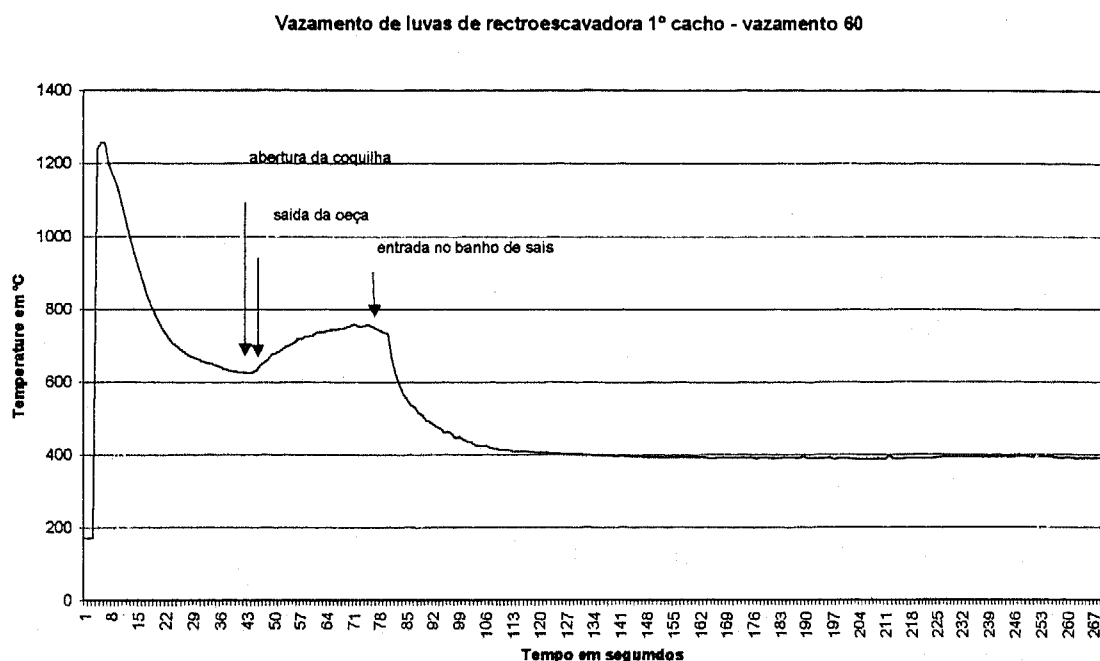


Fig. 107 Evolução das temperatura para o primeiro cacho

O gráfico mostra uma subida de temperatura imediatamente após a abertura e desmoldação da peça, as quais distam no tempo 3 segundos. Como a zona da peça onde medimos as temperaturas tem a forma de cunha, a zona adjacente está mais quente que o bico. Após a desmoldação há um fluxo de calor da zona adjacente para o bico que faz subir a temperatura deste.

A foto seguinte (Foto 108) mostra a estrutura metalográfica do bico, a qual é 100 % bainítica, como o resto da peça.

Os tempos relativos ao segundo cacho foram propositadamente dilatados. Em consequência disso a peça tem estrutura 100 % perlítica, tendo essa perlite sido formada acima dos 650 °C. O gráfico relativo ao segundo cacho pode ver-se em pormenor na Fig. 109

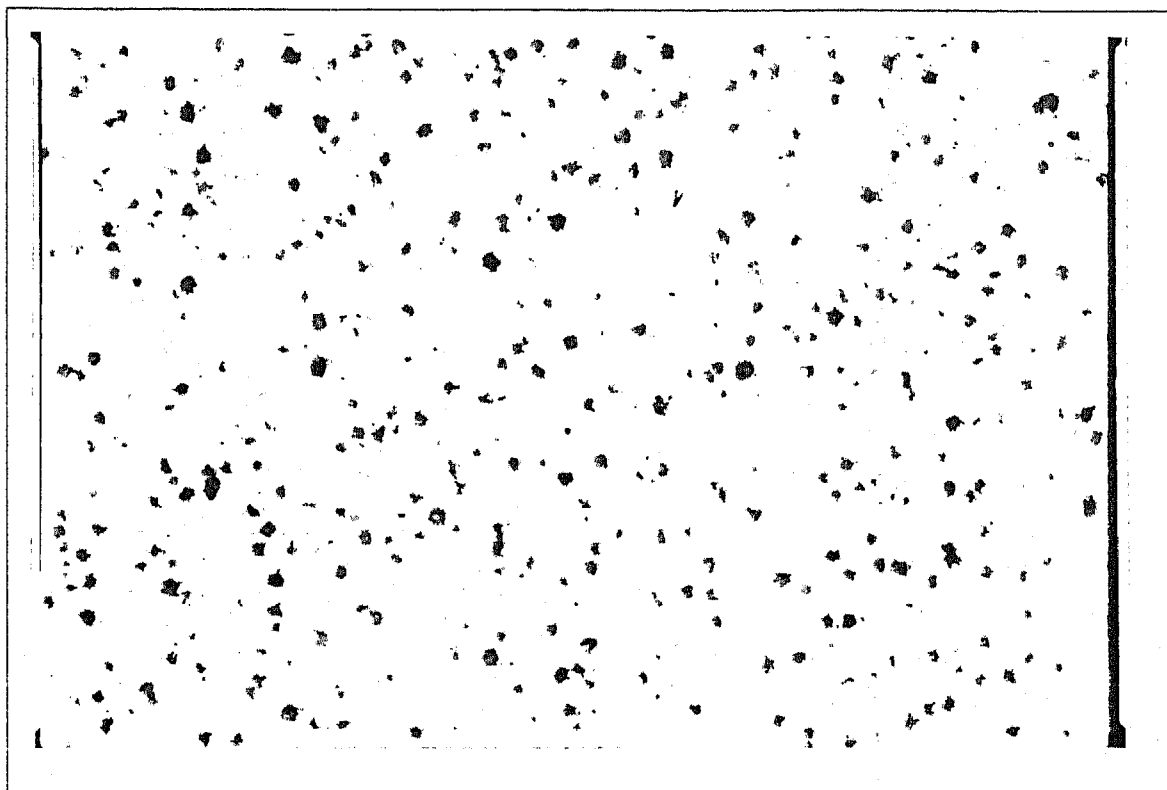


Foto - 108 Estrutura metalográfica do bico da luva do 1º cacho

Vazamento de luvas de retroescavadora 2º cacho vaz 60

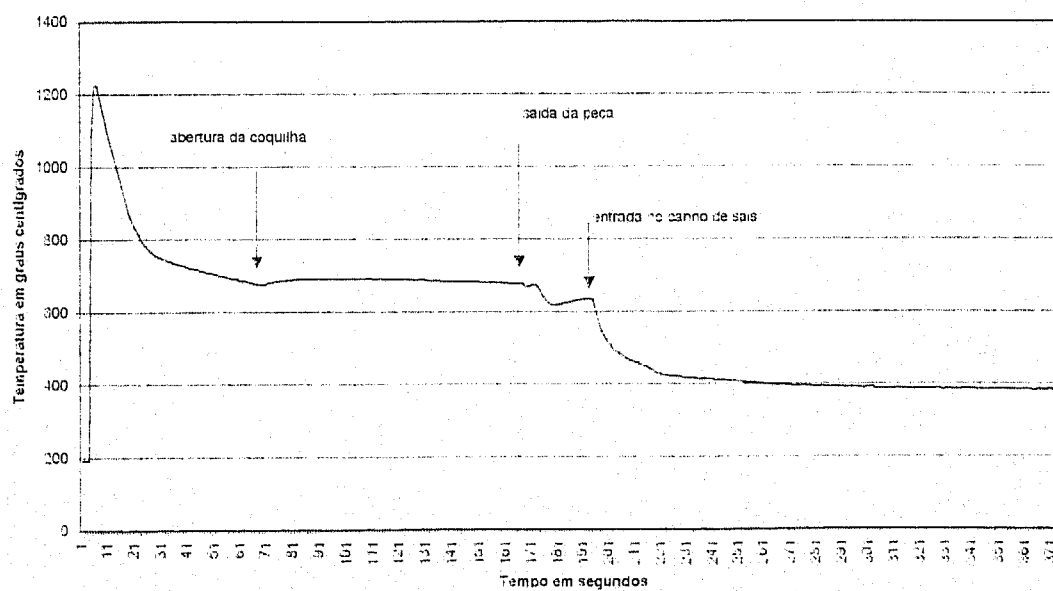


Fig. 109 Gráfico relativo ao segundo cacho

O gráfico da Fig. 110 mostra as duas curvas sobrepostas de modo a ser possível a comparação de tempos.

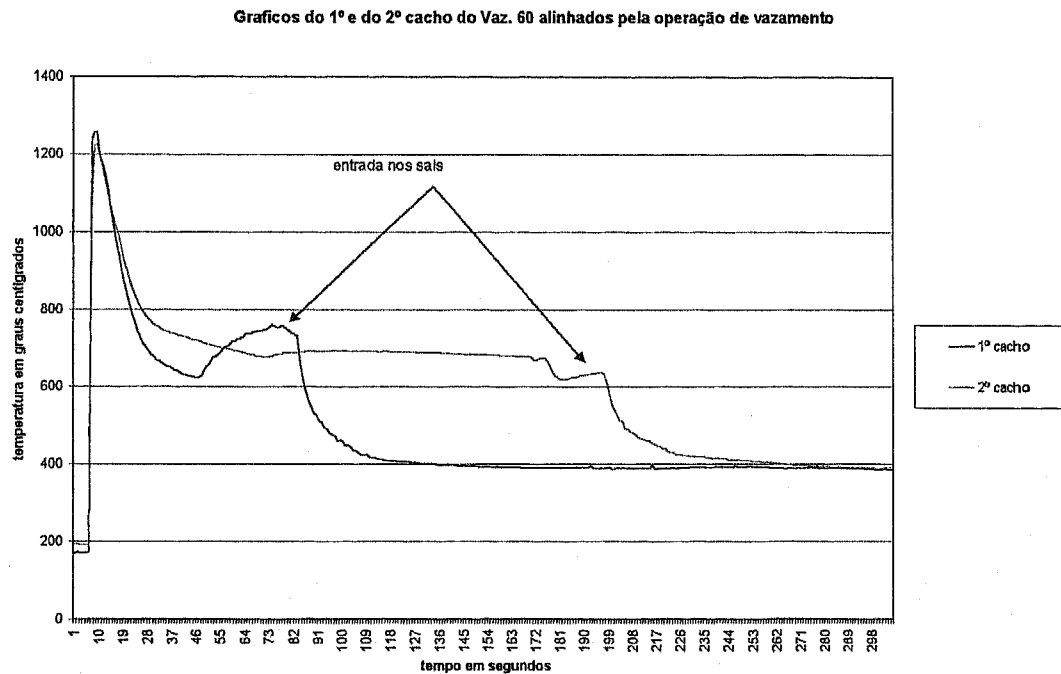


Fig 110 Curvas do 1º e do 2º Cacho sobrepostas de modo a ser possível a comparação de tempos

3.5.4.4. Conclusões

Para esta peça é possível a obtenção de estrutura 100 % Bainítica desde que se promova a rápida desmoldação da peça.

Deste gráfico e de gráficos anteriores podemos concluir que há um acentuado aumento da velocidade de arrefecimento quando da introdução da peça no banho de sais. Isto significa que o banho de sais é um extractor de calor mais intenso que a coquilha.

3.6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

3.6.1. Conclusões

- Relativamente ao vazamento em coquilha do ferro nodular podemos afirmar que é possível obter ferro nodular de boa qualidade metalúrgica, apto à austempera convencional e directa. Para tal a inoculação deve ser **tardia e realizada com inoculantes electrofundidos**.
- Até ao momento usamos coquilhas espessas (4 a 6 cm de espessura) em nodular ferrítico. As coquilhas por nós estudadas trabalharam fundamentalmente a 220/240 °C medidos a 4 mm da cavidade moldante medidos imediatamente antes do vazamento.
- Não há alteração metalográfica significativa da estrutura bainítica por variação da temperatura (que no caso da austempera directa depende do tempo de desmoldação, e eventualmente de espera intencional) de austenitização , salvo se esta for de tal maneira baixa a ponto de aparecer ferrete ou mesmo perlite. Isto permite , dentro de certos limites , austemperar directamente peças constituídas por partes de espessuras diferentes .
- Os gráficos por nós obtidos mostram claramente que a velocidade de arrefecimento é muito maior no banho de sais que dentro da coquilha. As peças que arrefecem dentro da coquilha tem estruturas perlito-ferríticas.
- A composição química de base a utilizar terá 3,5 a 3.6 % de C e 2,8 a 3 % de Si. O manganês , do ponto de vista metalográfico poderá ir até 0,4 / 0,5 % , mas este valor deverá ser confirmado em trabalhos posteriores baseados fundamentalmente em resultados do ensaio de tracção. Há muita informação escrita (Dorazil e outros) referindo que o manganês baixa o alongamento na bainite superior. O Cobre e o Níquel , tem como única contra-indicação o preço. 1% de Cu, e 1 % Ni permitiram temperar até ao núcleo um provete redondo de 45 mm. O molibdénio será sempre uma solução de recurso para grandes secções .
- A austempera mista poderá significar economia de elementos de liga e de tempo. Poderá ainda significar ser possível austemperar uma espessura de peça considerada excessiva para austempera convencional.

3.6.2. Sugestões para trabalhos futuros.

3.6.2.1. Temperatura de austempera

A austempera é , em princípio , um tratamento isotérmico. Excluindo a fase inicial de mergulho no meio de austempera, e a que imediatamente lhe segue, a temperatura mantém-se constante durante todo o tempo de tratamento. Esta temperatura é uma das principais determinantes das características mecânicas a obter. De tal modo é assim que se tem tido a preocupação de conseguir banhos a temperatura constante , mesmo após a imersão de peças massivas.

Mas nada encontramos publicado sobre austempera não isotérmica. Que se pode esperar obter se a austempera for realizada em dois , três ou mais patamares de temperatura? E que acontece se a temperatura for progressivamente subindo ou descendo?

6.3.2.2. Meio de austempera

Já vimos que a austempera pode ser mista em água e banhos de sais. Infelizmente o tempo não deu para continuar os nossos ensaios. Mas muito mais fica por experimentar, desde sólidos a gases . A termografia poderá nestes casos prestar grande ajuda. Uma austempera mista água, circulação de ar forçado , caso seja conseguida , seria não poluente e possivelmente de custo térmico reduzido ou nulo.

6.3.2.3. Material das coquilhas

Nos nossos trabalhos utilizamos coquilhas de ferro nodular ferrítico. Materiais de maior condutividade calorífica como por exemplo o cobre poderão **em teoria** fornecer cadências de produção mais elevadas. Mas para tal a coquilha deverá trabalhar mais quente. Mas nada sabemos sobre tais condições operatórias, e tudo o que estabelecemos para o nosso caso poderá aqui ter que ser modificado, ou poderá até acontecer que o sistema seja impossível. Isto passa por estudo experimental e merece em nossa opinião ser estudado.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A Barbedo de Magalhães
Fundição em coquilha
Comunicação 1988

- [2] A Barbedo de Magalhães
Ferros Fundidos Austemperados Vazados em Coquilha
Comunicação 1998

- [3] Le remplissage des empreintes de moules em sable
Centre Tecnique des Industries de Fonderie (sem data)

- [4] Eduard Dorazil
High Strenght Austempered Ductile Cast Iron, 1991

- [5] Stephen Istvan Karsay
Ductile Iron Production Practices, 1975

- [6] Jean Van Eeghem
Inoculation des fontes, 1979

- [7] M.M. Parisien et Camuset
La Coulee En Coquille
Ecole Superieure De Fonderie (sem data)

- [8] Le Remplissage des Empreintes de Moules en Sable
C.T.I.F. (sem data)

- [9] R. Viau, M. Gagne, R.Thibau
Cu Ni Alloyed Austempered Ductile Irons
AFS Transactions, 1987 (87_77)

- [10] B. Faucher, K.C.Wang , M. Gagne
Dynamic Fracture Toughness of Austempered Ductile Iron
AFS Transactions, 1987 (87_71)

- [11] M.Gagne
Effect of Mn and Si on the Quality of Heavy Section
ADI Castings
AFS Transactions, 1987 (87_70)

- [12] Y.J.Patk, R.B.Gundlach, J. F. Janowak
Monitoring the Bainite Reaction during Austempering of
Ductile Iron and High Silicon Cast Steel By Resistivity
Measurement
AFS Transactions, 1987 (87_97)
- [13] J.Janowack
ADI Beyond the metalurgical Mystic
Modern Casting, Jan 1985
- [14] D.J.Moore, T.N.Rouns, K.B. Rundman
Structure and Mechanical Proprieties of Austempered
Ductile Iron
AFS Transactions, 1985 (85-103)
- [15] J. F. Janowak, P.A.Morton
A Guide to mecanical Poperties Possible by Austempering
1,5 % Ni- 0,3 % Mo Ductile Iron
AFS Transactions, 1984 (84-120)
- [16] T.N.Rouns, K.B. Rundman, D.M. Moore
On thr Estructure and Proprieties Of Austempered Ductile
Cast Iron
AFS Transactions, 1984 (84-121)
- [17] Y.J.Parj, P.A.Morton, M. Gagne R. Goller
Continuous Cooling Transformation and Austempering Bahsvior of
Cu-Mo Ductile Irons
AFS Transactions, 1984 (84-153)
- [18] J. F. Janowak, R.B.Gundlach
Develoement of a Ductile Iron for Commercial Austempering
AFS Transactions, 1983 (83-54)
- [19] K.B.Rundman, R.C.Clug
An X-Ray and Metalographic Study of an Austempered
Ductile Cast Iron
AFS Transactions, 1982 (82-115)
- [20] D.J.Moore, T.N.Rouns, K.B.Rundman
The Relationship Between Microestructure and Tensile
Proprieties in Austempered Ductile Irons
AFS Transactions, 1987 (87-115)
- [21] T.N.Rouns, K.B.Rundman
Constitution of Austempered Ductile Iron and Kinetics
of Austempering
AFS Transactions, 1987 (87-116)

- [22] J.P. Chobaut, P. Brenot, J.M. Schisseler
Secondary Martensite Formation Durin the Tempering of
Bainite S.G. Cast Irons
AFS Transactions, 1988 (88-07)
- [23] S.-C. Lee, C. -C. Lee
The Effects of Heat Treatment and Alloying Eelements on
Fracture Thughness of Bainite Ductile Cast Iron
AFS Transactions, 1988 (8-145)
- [24] B.V. Kovacs, Sr
Austempered Ductile Irin: Fact and Fiction
Modern Castings , Mar 1990
- [25] M.Grech, J.M. Young
Influence of Austempering Temperature on the Characteristics
of Austempered Ductile Iron Alloyed whith Cu and Ni
AFS Transactions, 1990 (90-160)
- [26] K.L.Hayrynen , D.J. More , K.B.Rundman
Tensile proprieties of a Clean
Austempered Ductile Iron
AFS Transactions, 1990 (90-127)
- [27] E. Dorazil , T. Podrabsky , J. Svejcar
Micro-Inhomegeneity of Low-Alloy Austempered Ductile
Cast Iron Matrix
AFS Transactions, 1990 (90-13)
- [28] Stephen Istvan Karsay
Fundição de ferro nodular III
Gitagem e alimentação
QIT-Fer et titane Inc. , 1981
- [29] Carlos Alberto da Silva Ribeiro
Ferros fundidos Nodulares de Matriz Ferritica em Bruto
Vazados em Coquilha de Ferro Fundido
Dissertação de Doutorado
Junho de 1989
- [30] Barrau et Larose – Mecanique des Structures

