



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000094217

SEMINÁRIO

"ESTUDOS DE INOCULAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS CINZENTOS LAMELARES
ELABORADOS EM FORNO ELECTRICICO DE INDUÇÃO"

ALFREDO MARQUES

PEDRO ALVIM

JOSE JOAQUIM

Orieo to do?

Quem o objecto fuzado no
sino do ano?

TRABALHO REALIZADO POR:

Alfredo José de Castro Faria da Fonseca Marques

Pedro Alvim de Castro

José Joaquim da Silva

FEUP - DEMET, NOV 86 - JUL 87

INDICE

0 - OBJECTIVO.....	1
I - INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	3
II - TÉCNICA EXPERIMENTAL.....	8
III - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	22
IV - CONCLUSÕES.....	41
ANEXOS.....	42
AGRADECIMENTOS.....	49
V - BIBLIOGRAFIA.....	50

Ø-OBJECTIVO

A estrutura metalurgica de um ferro fundido, após solidificação, está condicionada pela sua história: aparelho de fusão, composição e constituintes do leito de fusão, modo de fusão (e.g temperatura máxima e natureza dos refractários), manutenção em fornos ou em colheres, tratamentos antes do vazamento, modo de vazamento, modo de arrefecimento da peça e tipo de moldação.

Um dos problemas da tecnologia de elaboração de ferros fundidos cinzentos em forno eléctrico é o baixo potencial de germinação intrínseco do banho. Isto deve-se a vários factores, entre os quais:

- A não existência de contacto do banho com materiais carboníferos.
- Uso quase exclusivo de sucata de aço nas cargas.
- Elevadas temperaturas necessárias à dissolução da grafite e à homogeneização dos banhos.
- Formas de manutenção onde o banho está numa atmosfera oxidante e a temperaturas mais ou menos elevadas durante longos períodos.

Uma solução para este problema é a utilização de um tratamento que produza um banho de alto potencial de germinação da grafite. Este tratamento é a Inoculação.

Deste modo, o objectivo deste trabalho é:

a) Estabelecer a técnica de inoculação adequada, caracterizada pela escolha da composição química dos inoculantes, teor, forma e momento de adição.

b) Determinar o efeito da temperatura de inoculação e tempo de manutenção do banho sobre o grau de germinação da grafite após inoculação.

c) Avaliar, para o sistema de inoculação escolhido o desvanecimento do inoculante.

mai 5x e temperat. de P. pictus?

e que propiedade tem a fructura?

se se forme por estas faces o arfecto pouco o nenhum; e
transmitem o p. 2º? não parece. Formam (pouco ou nada),
logo a todos muito vizinhos na p. 1ª face da fructura.

I- INTRODUÇÃO TEÓRICA

I.1- Caracterização de um ferro fundido

O ferro fundido de grafite lamelar, não ligado, é, essencialmente, uma liga ferrosa ternária Fe-C-Si na qual o teor em carbono é superior ao seu limite de solubilidade no ferro gama e inferior à composição eutética. O teor em Silício varia desde alguns traços até cerca de 5%. Consoante o modo de elaboração, contém sempre um teor variável de Mn, S, P e outros elementos residuais como o Ni, Cr, Mo, V, Cu, Sn e Al.

Os ferros fundidos contém sempre Carbono insolúvel no estado sólido que, no caso dos ferros fundidos de grafite lamelar, precipita parcialmente durante a reacção eutética sob a forma de Carbono livre.

Os ferros fundidos são caracterizados pela existencia duma reacção eutética durante a sua solidificação, o que implica que, quanto mais próxima estiver a sua composição química da composição eutética, mais baixa é a sua temperatura de liquidus.

Nos ferros fundidos de grafite lamelar a fractura ocorre segundo os planos intercristalinos da grafite, os quais são de menor coesão e, portanto, de mais baixa resistencia mecânica. A fractura é caracterizada pela presença de faces que são os planos de base ou de clivagem da grafite. A presença destas faces dá um aspecto cinzento à superfície da fractura, o que não acontece nos ferros fundidos em que o Carbono não dissolvido se encontra sob a forma combinada (Cementite) cuja fractura tem um aspecto brilhante.

I.2- Solidificação

A solidificação dum ferro fundido lamelar pode ser explicada pelo recurso ao diagrama binário Fe-C, como é representado na fig. I.1.

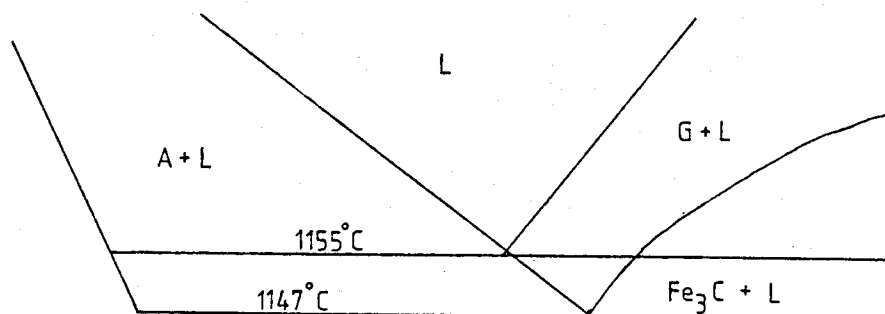


fig. I.1

Como pode ser observado, durante a solidificação do ferro fundido existem duas reacções eutéticas possíveis: a reacção estável austenite/grafite (característica dos ferros fundidos cinzentos) e a reacção metaestável (característica dos ferros fundidos brancos).

A reacção eutética estável ocorre a cerca de 1155 C, se o arrefecimento for infinitamente lento. Nas mesmas condições, a reacção eutética metaestável ocorre a cerca de 1147 C.

A solidificação dum ferro fundido com composição hipoeutética começa com a nucleação e crescimento de dendrites de austenite, o que origina um enriquecimento do líquido residual em C até que este atinge a composição eutética. Se este líquido residual for sobrefarrefecido abaixo da temperatura de equilíbrio da reacção eutética estável, ele solidificará sob a forma de células eutéticas de austenite e grafite. Todavia, se o mesmo líquido residual for sobrefarrefecido abaixo da temperatura da reacção eutética metaestável, então a cementite nucleará e crescerá em preferencia à grafite. Isto deve-se ao facto de a grafite ser

uma fase não-metálica que tem de germinar e crescer no seio de uma fase metálica e de a sua velocidade de crescimento ser menor do que a da austenite e da cementite. Logo, se durante a solidificação de um banho metálico se atingir a temperatura de germinação da cementite, formar-se-á o eutético ledburítico (austenite/cementite) e não o grafitico (austenite/grafite).

Assim, a estrutura e, conseqüentemente, as propriedades de um ferro fundido cinzento de grafite lamelar dependem da composição química, grau de nucleação do banho e velocidade de arrefecimento, pois estas variáveis determinam a forma, quantidade e distribuição da grafite bem como o tipo de matriz.

1.3- Tratamento de inoculação

A inoculação é um tratamento de um metal líquido que permite obter estruturas de grafite numa matriz que pode ser perlítica, ou perlítico-ferrítica, isto é, estruturas simultaneamente resistentes e de boa maquinabilidade.

Este tratamento consiste na introdução no banho de uma quantidade bem doseada de certas ligas (inoculantes) que aumentam, durante um tempo limitado, o potencial de germinação do banho. Esta adição traduz-se, durante a solidificação, numa diminuição da sobrefusão e um crescimento do número de células eutéticas.

- Inoculantes

Um dos inoculantes mais utilizados na indústria é composto de Ferro e Silício, contendo, normalmente, pequenos teores em certos elementos como o Sr, Ba, Al, Mg, Ce e Ca que são practi-

a que grandeza há a referir?
de modo preciso?
" Fui ?

2) pois não há um erro c) a prolongar a discussão?

camente insolúveis no banho.

A função do Si do inoculante no banho é provocar, em determinados pontos, um aumento de concentração de átomos de Carbono que se vão ligar pela acção de um substracto (geralmente sulfuretos) dando origem aos cristais de grafite. A função do ferro no inoculante é de aumentar a densidade deste, permitindo uma melhor homogeneização.

- Factores que influenciam a eficácia da inoculação

A granulometria do inoculante tem uma influência importante sobre a marcha do processo: os grãos demasiado grosseiros são difíceis de dissolver, enquanto os demasiados finos ou pulvulentos tendem a flutuar, impedindo uma boa homogeneização, e são susceptíveis de oxidação.

O teor de inoculante adicionado ao banho varia segundo a espessura da peça, o tipo de moldação, natureza do ferro fundido e modo de inoculação. Normalmente, quanto maior for o teor em inoculante, mais eficaz é o tratamento de inoculação. No entanto, não se pode adicionar inoculante de uma forma indiscriminada, uma vez que a composição química final do banho poderá ser alterada (alterando também a estrutura e propriedades mecânicas).

A temperatura do banho no momento de adição é um factor importante porque condiciona, em parte, o estado físico-químico do banho e, portanto, a natureza e a estabilidade dos germes resultantes da inoculação.

O inoculante tem um efeito transitório. Ao fim de um certo tempo "desvanece", isto é, deixa de ter um efeito germinador. O tempo de desvanecimento é função da quantidade de metal tratado, da natureza do inoculante, das temperaturas de adição e manutenção do banho e, de certo modo, da composição química do banho.

entire number of the right is when?

Há dois métodos de inoculação: inoculação no molde e na colher.

A inoculação na colher faz-se geralmente no jacto de metal durante a transferencia do forno para a colher.

A inoculação no molde faz-se colocando no poço do gito da moldação um "bloco" do inoculante.

este o propoziție a cărei s-a prezentat cu o formă
prescurtată de câte puțin de 3 e în prezentare
de formă fudică?

Se observă de unde este a cărei s-a prezentat
de f. f. breviați înțeles, f. f. de viața prof.
prescurtată de puțin fudică e în viziune prin
comp. prin f. f.

II- TÉCNICA EXPERIMENTAL

II.1- Plano de Trabalho

O presente trabalho consistiu inicialmente em duas partes:

A primeira parte em que se faria o estudo do desvanecimento de três inoculantes utilizando duas temperaturas de inoculação e uma segunda parte em que estava previsto fazer-se, a uma temperatura de inoculação fixa, o estudo do desvanecimento de diversos teores de um mesmo inoculante.

No entanto, por motivo de falta de tempo, apenas foi possível a realização da primeira parte.

II.2- Cálculo da composição do ferro fundido

Como o estudo do desvanecimento dos inoculantes deve, neste caso, ser efectuado num ferro fundido cinzento que tenha após solidificação uma resistencia à tracção de 25 Kg/mm², a composição química foi escolhida tendo em conta a obtenção deste valor.

Nos ferros fundidos cinzentos de grafite lamelar a resistencia à tracção de 25 Kg/mm² corresponde a uma estrutura perlítica. Neste tipo de ferro fundido a resistencia à tracção depende da distancia interlamelar da perlite, a qual por sua vez é função da velocidade de arrefecimento e da composição química. A velocidade de arrefecimento é condicionada pelo tipo de moldação (neste caso areia verde) e pela espessura do provete (neste caso constante e igual a 30 mm de diametro).

De acordo com estes factores e por consulta dos diagramas estruturais de UHLITZSCH e WEICHELDT [1], a composição química em termos de C e Si é de 3.2% de C e de 1.9% de Si.

Quem se o Mr. baixo Rm do J.P.?
Quem o julgamento sobre a de facta?

Qual a Ligeira por justiça e introdução de fact,
Do S e por a de ser an hith tempo de
fate Mr.?

Desambosam por Mr. por baixo de
0.75 p/ 1,2 7/0.25 2?

Esta composição foi escolhida também tendo em conta que a resistencia à tracção baixa com o aumento do Carbono equivalente ($C_{eq} = \%C + 1/3 \%Si$).

Outro aspecto considerado na escolha da composição química foi a relação S/Mn.

Uma vez que o S e o Mn são elementos anti-grafitizantes que se neutralizam mutuamente formando MnS, o seu teor deve ser proporcional: $\%Mn = 1.7 * \%S + K$ em que K é o excesso de Mn [2].

Este excesso de Mn foi determinado tendo em conta quer a necessidade de evitar a existencia de S livre, quer a resistencia à tracção do ferro fundido, a qual varia inversamente com o excesso de Mn até valores de .3 [2].

O excesso de Mn relativamente ao necessário para neutralizar estequiometricamente o S foi determinado a partir do trabalho efectuado por A. Alderson [2]. Segundo este, o excesso de Mn necessário para obter uma resistencia à tracção de 25 Kg/mm² é de 0.14.

II.3- Constituição da Carga

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS

	%C	%Si	%Mn	%S	%P
Aço	0.12	0.02	0.46	0.013	0.012
FeSi	-	75	-	-	-
FeS (*)	-	-	-	55	-
Grafite	99	-	-	0.6	-

(*)- Cu= 0.86% Pb= 1.42% Zn= 3.89% As= 0.55%

Remorse a *firmica* de *h* e vai estar
o piscante + *h* o *Fernando*.

Com estes dados foi feito o cálculo da carga (ver ANEXO I), que deu a seguinte composição em percentagem:

Aço -	93.75 %
Grafite -	3.5 %
FeSi -	2.5 %
FeS -	0.25 %

Na constituição da carga utilizou-se só sucata de aço pois pretendia-se um banho com baixo potencial de germinação da grafite para que se fizesse o estudo do inoculante a partir das condições mais desfavoráveis.

Adicionou-se grafite e FeSi para aumentar os teores em C e Si do banho. O cálculo da quantidade de grafite teve em conta o rendimento em C no forno (70%) e as perdas no sobreaquecimento.

O FeS foi adicionado para neutralizar parte do elevado teor em Mn da carga, ficando este com um excesso de 0.141.

Os constituintes utilizados em todas as fusões foram retirados dos mesmos lotes.

O numero total de cargas efectuadas foi seis (6).

II.4- Fusão da carga

A fusão da carga foi efectuada num forno eléctrico de indução de média frequência e sem núcleo.

O revestimento do cadinho era básico (MgO).

O carregamento do forno foi efectuado em camadas de sucata

e grafite para facilitar a dissolução desta e evitar perdas por volatilização e na escória.

A adição de FeSi fez-se após a fusão da sucata e o FeS foi adicionado após retirada a escória.

A temperatura do banho foi medida com um pirômetro de imersão e com um pirômetro óptico.

Para o posterior vazamento utilizou-se uma colher de 40 Kg de capacidade, revestida a "pisée", a qual foi colocada em cima do cadinho para pré-aquecimento e, posteriormente, aquecida por uma quantidade de metal retirado do forno.

Antes e após o tratamento de inoculação era retirada uma amostra ("medalha") para análise da composição química pelo método clássico. Os resultados destas análises estão representados em anexo.

II.5- Preparação das moldações

Na preparação das moldações foi utilizada areia verde existente no circuito de areias do CINFU.

A areia tinha as seguintes características:

- Índice AFS : 60-65
- Teor em humidade : 3.5-4.5%
- Teor em bentonite activa : 4.5-5%
- Resistencia à compressão : 900-1200 g/cm²
- Permeabilidade : 100-130
- Compactibilidade : 50%

Foi projectada uma placa molde para a moldação dos tarugos a partir dos quais se fez o fabrico dos provetes para os ensaios

de tracção. Esta placa foi projectada de forma a que na caixa de moldação existissem dois cachos como mostra o desenho (ANEXO II)

Os tarugos têm 30 mm de diametro pois este é o valor de referência para a determinação da resistencia à tracção dos ferros fundidos cinzentos.

As caixas de moldação têm as seguintes dimensões:

400*400*25 (em mm)

Fizeram-se seis caixas de moldação por cada fusão e aquelas foram obtidas mecanicamente.

As caixas de moldação das cunhas para a determinação da sensibilidade de tempera foram efectuadas manualmente, tendo cada caixa doze cunhas. Para duas cargas eram moldadas três caixas.

Características da cunha (segundo a NORMA ASTM A-367-60):

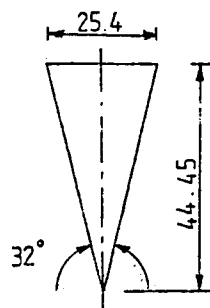
Num. W 3 1/2

Base= 25.4 mm

Altura= 44.45 mm

Comprimento= 127 mm

Angulo (a)= 32



No ensaio de cunha esta é partida ao meio, medindo-se, então, a base do triângulo de ferro branco formado. A redução da altura de tempera (base do triângulo) traduz a eficácia do inoculante.

Le vainqueur M. o. es de la juncant.

11.6- Técnica de inoculação

O plano de trabalho previa o estudo dos seguintes inoculantes:

- FeSi Standard
- Superseed
- Escalloy 40

No entanto não foi possível utilizar o Escalloy 40 devido a um engano de fornecimento, pois em vez deste foi fornecido o Procalloy 16. Este último foi utilizado apenas num ensaio a 1380 C por desconhecimento deste engano, o qual foi detectado no segundo ensaio (1480 C) no momento de inoculação (verificaram-se reacções violentas que não se tinham dado no primeiro ensaio).

Assim, recorreu-se ao SPHERIX para substituição do Escalloy 40.

A escolha dos outros inoculantes (FeSi Standard, Superseed) foi feita tendo em atenção o seu uso generalizado na indústria e ainda:

- O FeSi Standard ser o inoculante mais comum, devido ao seu baixo preço e facilidade de dissolução, sem provocar escórias de difícil decantação.
- O Superseed ser apresentado como um inoculante eficaz e fortemente redutor da sensibilidade de tempera, embora seja caro.

a) Composição Química

- FeSi Standard - 74-79% Si
.8-1.1% Al

1-1.45 Ca

- Superseed - 73-78% Si

.6-1% Sr

< .5% Al

< .1% Ca

- Spherix - 70-73% Si

.55-.6% Ca

.15-.25 Al

1% Bi

.4-.45% Terras Raras

b) Granulometria

A granulometria usada foi constante e igual ao calibre de fornecimento (< 3 mm).

c) Teor

O teor em inoculante utilizado em todos os ensaios foi constante e igual a .3%. Este valor foi escolhido dado ser um valor intermédio em relação aos valores correntemente utilizados.

d) Temperatura de inoculação e sobreaquecimento

As temperaturas de inoculação de 1380 C e 1480 C foram escolhidas de modo a situar uma delas abaixo e outra acima da temperatura de reversão, a qual é função do teor em C e Si do banho. A temperatura de reversão é a temperatura em que ocorre a reação $\text{SiO}_2 + 2[\text{C}] = [\text{Si}] + 2\langle\text{CO}\rangle$.

pg? kitchan acor de fupnat de
povero, p e h e povero?

gravi e povero e povero p1 e povero
de povero?

A temperatura de equilíbrio desta reacção para a composição química pretendida no banho (3.2% C e 1.9% Si) situa-se entre 1430 e 1435 C.

A influencia da temperatura de reversão no tratamento de inoculação é a seguinte:

- Acima desta, a reacção desloca-se para a direita e, por um lado, há diminuição da concentração de SiO₂ (que actua como germinador de grafite) e, por outro, há diminuição do teor em C do banho, C este que se liberta sob a forma de CO. Estes factores são desfavoráveis à germinação da grafite e, portanto, baixam o grau de germinação intrínseco do banho.

A temperatura de sobreaquecimento de 1500 C foi escolhida com vista à destruição do potencial de germinação da grafite, mediante a consulta da figura II.2.

e) Tempo de manutenção após inoculação

Os tempos médios previstos no plano de trabalho foram :

- Imediatamente após inoculação (tempo 0), e a partir deste 1.5, 3, 4.5, 6, 8, 10 e 15 min.

f) Modo de inoculação

Após fusão e adição de todos os constituintes da carga, sobreaquecia-se o banho até 1500 C com vista à destruição do potencial de germinação da grafite.

A duração do sobreaquecimento foi controlada por ensaios de cunha e análise térmica, tendo variado entre 30 e 45 min.

Quando o ensaio de cunha e a análise térmica revelavam que o banho solidificava segundo o diagrama metaestável (obtenção de ferro fundido branco) baixava-se a temperatura até ao valor pretendido para o subsequente tratamento de inoculação.

A indicação que o banho solidifica segundo o diagrama meta-

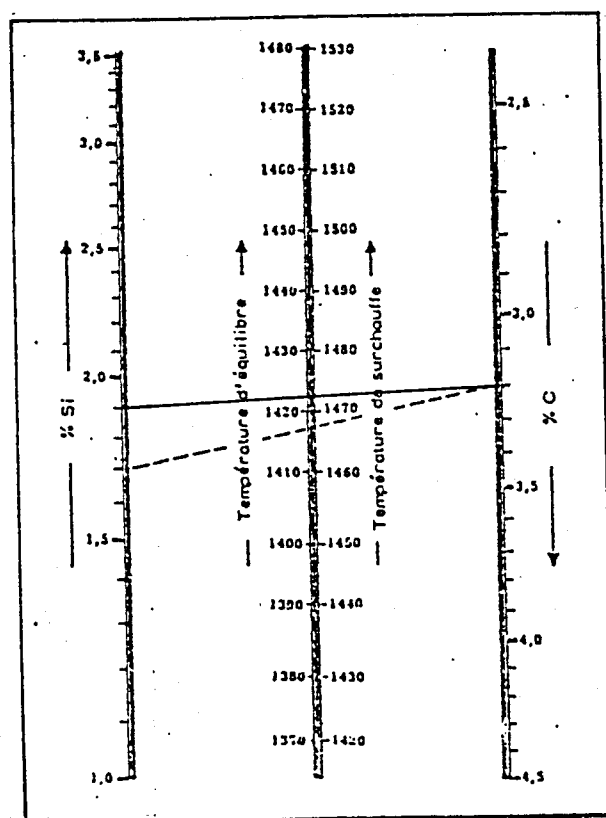


fig. II.2

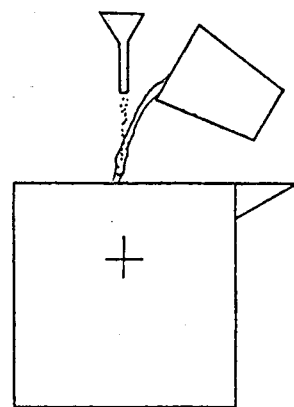
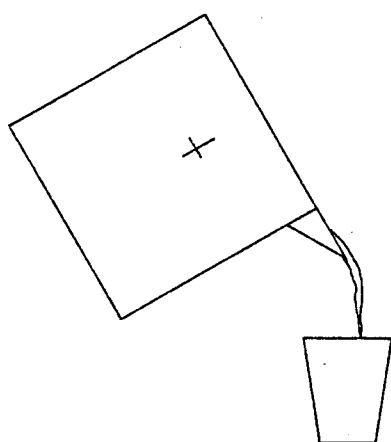
Abaco para a determinação da temperatura de equilíbrio da redução da sílica e do sobreaquecimento necessário. [4]

estável é revelada:

1) Pelo método da análise térmica, através de um abaixamento acentuado da sobrefusão eutética.

2) Pelo ensaio de cunha, através da dimensão da base do triângulo de ferro branco formado (grau da cunha).

O abaixamento da temperatura do banho até ao valor desejado era efectuado por um lado, através da diminuição da potencia do forno e, por outro, através do aquecimento da colher de vazamento com metal. Atingida a temperatura desejada para o tratamento de inoculação, vazava-se parte do banho para a colher, dado esta não ter volume suficiente para conter todo o metal. Em seguida, o metal é novamente transferido para o forno, sendo nesta altura adicionado o inoculante (no jacto do metal da colher para o forno). A distribuição homogênea do inoculante no banho era conseguida através das correntes de convecção geradas pela bobine do forno.



Método de inoculação

Est-ce possible de se faire imposer se
maintenant en tant que devant la tâche
de espérer pour les moments ?

Notre jour de 47 ?

Les jours s'écoulent !

II.7- Vazamento

Após inoculação procedia-se ao vazamento do metal segundo os tempos anteriormente definidos. Antes do vazamento em cada caixa era vazado um provete de cunha e, sempre que possível, efectuada uma análise térmica (num registador LEEDS & NORTHUP) usando copos de areia "Shell" sem pintura. Os vazamentos efectuados encontram-se esquematizados no Quadro II.1

Antes dos ensaios referentes ao estudo da inoculação foram efectuados dois ensaios experimentais para aquisição da técnica de inoculação e vazamento.

II.8- Método de avaliação das propriedades

Após efectuados todos os vazamentos referentes ao estudo da inoculação, proceeu-se à análise metalográfica e ensaios mecânicos.

Os ensaios mecânicos consistiram na realização de:

- Macroduresas (Vickers com carga de 306,5 N, aplicada durante 15 seg.). Foram efectuadas, em cada amostra, duas incisões, uma no centro e outra na periferia.
- Enaios de tracção para confirmação da resistencia à tracção de 25 Kg/mm². Para cada tempo de manutenção após inoculação foram ensaiados dois provetes.

Os ensaios metalográficos foram efectuados sobre amostras retiradas dos tarugos correspondentes a cada tempo de manutenção e dos provetes de análise térmica.

Cada amostra passou pelas várias fases de desbaste e acabamento. Todas foram atacadas quimicamente com reagente de STEAD, à temperatura ambiente (Composição do reagente: 10% CuCl₂ + 40%

Quadro II.1

ENSAIO	INOCULANTE	TEMPERATURA	TEOR	ANALISE TÉR MICA	CUNHA	PROVETES
EXPERIÊNCIA	—	1380 °C	0.3 %	—	3	6
	Fe-Si	1380 °C		—	5	10
A	Fe-Si	1380 °C		—	8	16
B	Fe-Si	1480 °C		4	7	14
C	SPHERIX	1380 °C		5	6	12
D	SPHERIX	1480 °C		4	8	16
E	SUPERSEED	1480 °C		6	9	18
F	PROCALOY-16	1380 °C		—	7	14

foram funções e partidas
modo 1

AgCl₂ + 20 ml de HCl + 100 ml de Etanol) para evidenciar as células eutéticas. O Cobre depositado após ataque das amostras foi retirado com Amoníaco. O tempo de ataque foi variável de amostra para amostra. Com o objectivo de aumentar o contraste das células, todas as amostras foram, em seguida, atacadas com reagente NITAL 4 durante 4 a 6 seg. Com o mesmo objectivo foram realizados dois ciclos de polimento e ataque.

O ataque químico para observação da estrutura da matriz foi apenas efectuado com reagente NITAL 4 durante 3 a 5 seg.

A observação das amostras consistiu em:

- Observação e contagem das células eutéticas
- Observação da estrutura da matriz
- Observação do tipo de grafite

Houve sérias dificuldades na contagem das células eutéticas porque estas, embora visíveis a olho nu, foram extremamente difíceis de fotografar com qualidade suficiente para que, através da fotografia, se pudesse proceder à sua contagem.

Foram utilizados vários processos para efectuar a contagem das células:

- Observação indirecta (que inclui contagem por fotografia)

- * Micrografia (não resultou devida à elevada ampliação do microscópio mesmo no seu valor mais baixo).

- * Macrografia com e sem ampliação (não resultou pois não se conseguiu resolução das células que possibilitasse a sua contagem)

- * Recurso a uma lente Zoom de 200 mm (não resultou pelo motivo anterior)

- * Microscopia electrónica de varrimento (apenas se conseguiu a obtenção de algumas fotografias em que eram visíveis as células eutéticas, mas

o' Bizarro for having do it from the
an to a paper as for the p. form
to a an representative of new new
new white ; Brecken for another.
Can either be in limitation?

como na maior parte das fotografias era impossível a sua distinção, este processo também não foi eficiente para proceder à referida contagem)

- Análise de imagem (não permitiu a mínima distinção das células em ampliações indicadas para se proceder à sua contagem)

- Lupa e observação à vista desarmada foram os únicos métodos que permitiram a contagem das células. Assim, a contagem de cada amostra foi efectuada na zona mais representativa e num campo quadrado com .5 mm de lado. A zona mais representativa foi sempre considerada como sendo a zona onde as células tinham um tamanho entre as grandes (e pouco numerosas) existentes no centro e as muito pequenas (e numerosas) existentes à periferia.

Para minimizar os erros que advêm duma contagem deste género, cada série de amostras correspondente a um ensaio foi efectuada pela mesma pessoa. Para evitar valores dispares entre as contagens efectuadas, os resultados foram confirmados por mais de uma pessoa assim como pelas poucas fotografias obtidas através da microscopia electrónica.

O motivo fundamental da impossibilidade de execução da segunda parte deste trabalho foi a dificuldade de contagem das células eutéticas pois, para além do tempo gasto nas tentativas da referida contagem, o que diminuiu muito o já limitado tempo disponível, não haveria interesse na sua continuação dado não se ter conseguido rigor científico neste método de avaliação das propriedades.

Le calculer par rétrocalcul° par des données
ou l'écarter, pour justifier par un peu de
indépendance varier entre 6 et 12 p.p.
Le 0 pour la possibilité d'100% avec
cavités par suite de l'écarter?

Ouvrez si vous pouvez!

Remettre de l'écarter à plus vite

par pour l'écarter en fait? et à
de l'écarter à plus vite !!!

III- APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

III.1- Altura de Tempera

Os valores correspondentes às alturas de tempera são apresentados na tabela III.1 e no gráfico III.1.

Foram calculados índices de diminuição de altura de tempera, definidos por Hecht e Cloarec que são apresentados na tabela III.2. As fórmulas utilizadas para os cálculos foram:

$$- i(H) = (H_0 - H_1) / H_0 * 100 \quad (\text{para determinação do potencial inicial do inoculante})$$

$$- C(H) = (H_2 - H_1) / (H_0 - H_1) * 100 \quad (\text{para avaliação resistência ao desvanecimento do inoculante})$$

No cálculo do índice do potencial inicial do inoculante, quando a altura de tempera da cunha correspondente ao primeiro tempo, após inoculação, era superior à do segundo tempo, escolhia-se esta para H_1 .

Pela análise do gráfico III.1 pode verificar-se que o inoculante SUPERSEED é aquele que permite uma maior redução da altura de tempera, tendo atingido o valor zero ao fim de 1'40''. Por outro lado, verifica-se que se mantém efectivo na redução da altura de tempera durante um maior período de tempo, pois ao fim de 15' o banho ainda se encontra inoculado.

Quanto ao SPHERIX, verifica-se que a 1480 C se mostra eficiente na redução da altura de tempera, embora a altura de tempera inicial seja reduzida (apenas 7). No entanto, a 1380 C ve-

Tabela III.1

Fe-Si - 1380°C		Fe-Si - 1480°C		SPHERIX - 1380°C		SPHERIX - 1480°C		SUPERSEED 1480°C		PROCALOY 16 1380°C	
	9		8		12		7		10		6
0.48"	2	1.10"	4	0.38"	6	0.59"	2	0.47"	2	0.53"	3
2.07"	2	2.50"	4	2.03"	7	2.27"	2	1.40"	0	2.03"	1
3.35"	2	4.45"	5	3.42"	12	4.33"	2	3.21"	2	3.52"	2
4.57"	3	6.21"	5	5.40"	9	6.18"	3	4.46"	1	5.05"	2
6.33"	3	8.09"	6	7.46"	9	8.12"	4	6.24"	3	7.38"	2
8.42"	4	9.11"	5	10.31"	9	10.07"	2	8.38"	2	9.10"	2
10.29"	4	10.35"	6			14.50	3	10.31"	3	10.57"	3
								12.20"	3	14.32"	4

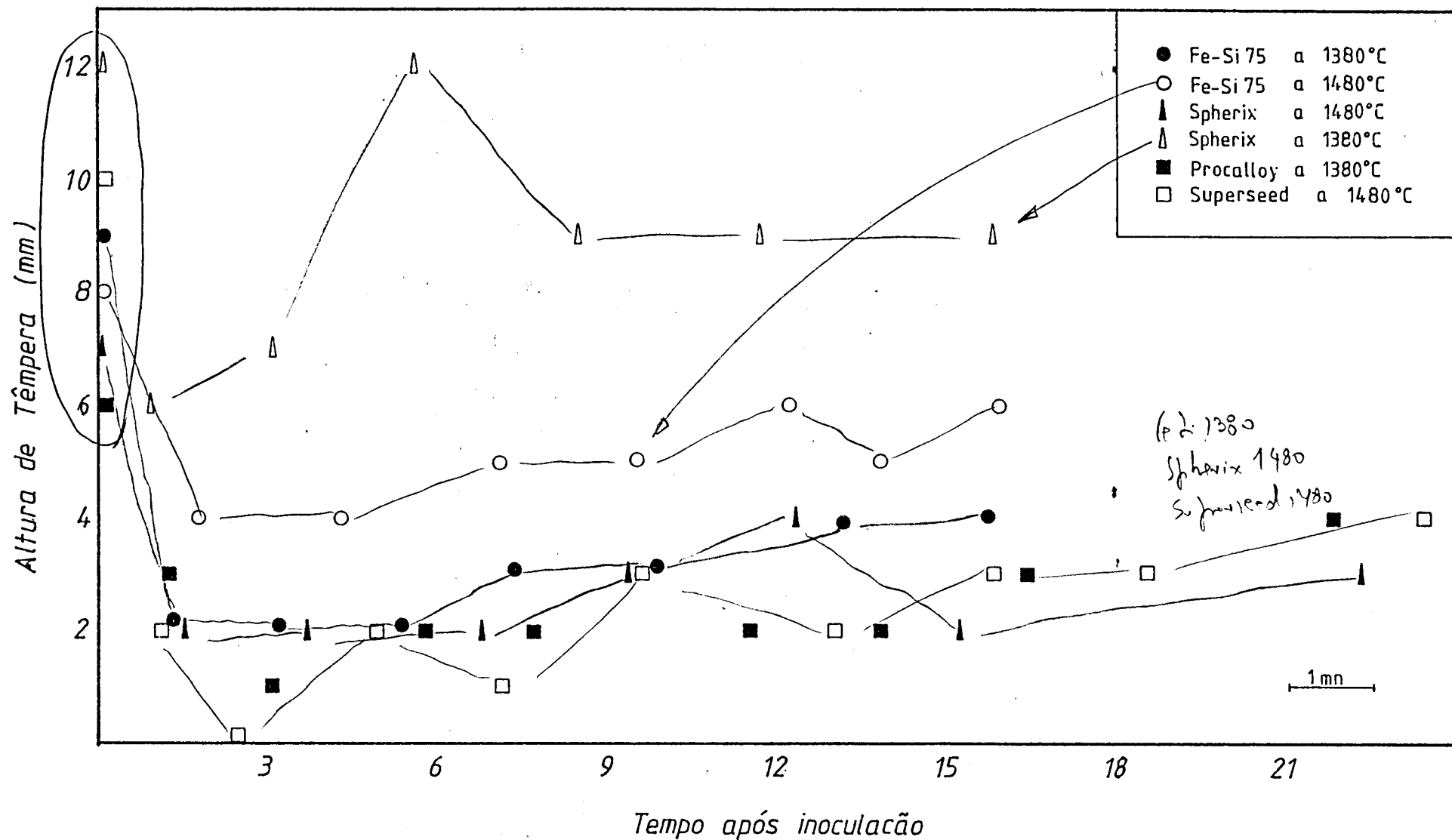


grafico III.1

Tabela III.2

Fe-Si - 1380°C		Fe-Si - 1480°C		SPHERIX-1380°C		SPHERIX-1480°C		SUPERSEED 1480°C		PROCALOY 16 1380°C	
TEMPOS	INDICES										
0,48"	77,8%	1,10"	50%	0,38"	50%	0,59"	71%	0,47"		0,53"	
2,07"	0	2,50"	0	2,03"	16,7%	2,27"	0	1,40"	100%	2,03"	83,3%
3,35"	0	4,45"	25%	3,42"	83%	4,33"	0	3,21"	20%	3,52"	20%
4,57"	14,3%	6,21"	0	5,40"	-50%	6,18"	20%	4,46"	-10%	5,05"	0
6,33"	0	8,09"	25%	7,46"	0	8,12"	20%	6,24"	20%	7,38"	0
8,42"	14,3%	9,11"	-25%	10,31"	0	10,07"	-40%	8,38"	-10%	9,10"	0
10,29"	0	10,35"	25%			14,50"	20%	10,31"	10%	10,57"	20%

rifica-se que ele se mostra muito pouco eficaz e, pelos resultados obtidos vê-se que não chegou a inocular o banho. Isto pode ser justificado por um lado admitindo que, dado a temperatura ser mais baixa, o inoculante não se tenha dissolvido, por outro as alturas de tempera iniciais são bastante diferentes. No entanto, em qualquer destes dois ensaios se verificaram anomalias:

- No primeiro (1480 C), devido ao engano já referido com os inoculantes, houve uma adição do PROCALLOY 16 e, em seguida, adicionou-se SPHERIX. Este facto pode ter alterado completamente o estado de germinação do banho.

- No segundo (1380 C), devido à demasiada carga do forno, o banho subiu demasiado e foi contaminado pelos resíduos da escória existentes no cimo do cadinho, o que pode ter contribuído para aquele comportamento.

No que respeita ao FeSi STANDARD, verifica-se que a redução da altura de tempera é maior a 1380 C do que a 1480 C. No entanto, a sua efectividade na primeira temperatura (1380) é inferior à efectividade dos inoculantes SUPERSEED (1480 C), SPHERIX (1480 e PROCALLOY 16 (1380)).

Quanto ao PROCALLOY 16, que foi utilizado por engano, mostra redução na altura de tempera e efectividade durante aproximadamente 15'. No entanto, nada se poderá afirmar quanto ao seu poder inoculante pois a altura de tempera inicial é reduzida, o que significa que o banho ainda possuía poder de germinação da grafite.

Quanto aos índices da diminuição da altura de tempera, o primeiro índice (que representa o potencial inicial de efectivi-

dade), no caso do SUPERSEED e do PROCALLOY 16 é superior aos outros.

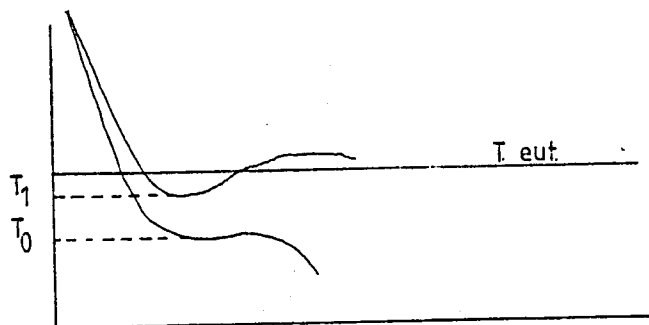
Os índices que avaliam a resistência ao desvanecimento não permitem tirar qualquer ilação devido às oscilações verificadas nos valores obtidos.

III.2- Análise Térmica

As curvas de arrefecimento são representadas nos gráficos III.2.1, III.2.2, III.2.3 e III.2.4.

Pela análise das curvas foram determinadas as temperaturas de sobrefusão eutética e, a partir destas, determinados os índices da diminuição da sobrefusão eutética, cujos valores se encontram na tabela III.4.

Quando há solidificação de um ferro fundido branco ocorre uma sobrefusão eutética, apresentando esta um mínimo para uma dada temperatura T_0 . Quando se adiciona o inoculante, aquele mínimo aproxima-se da temperatura eutética, passando a corresponder a uma temperatura T_1 .



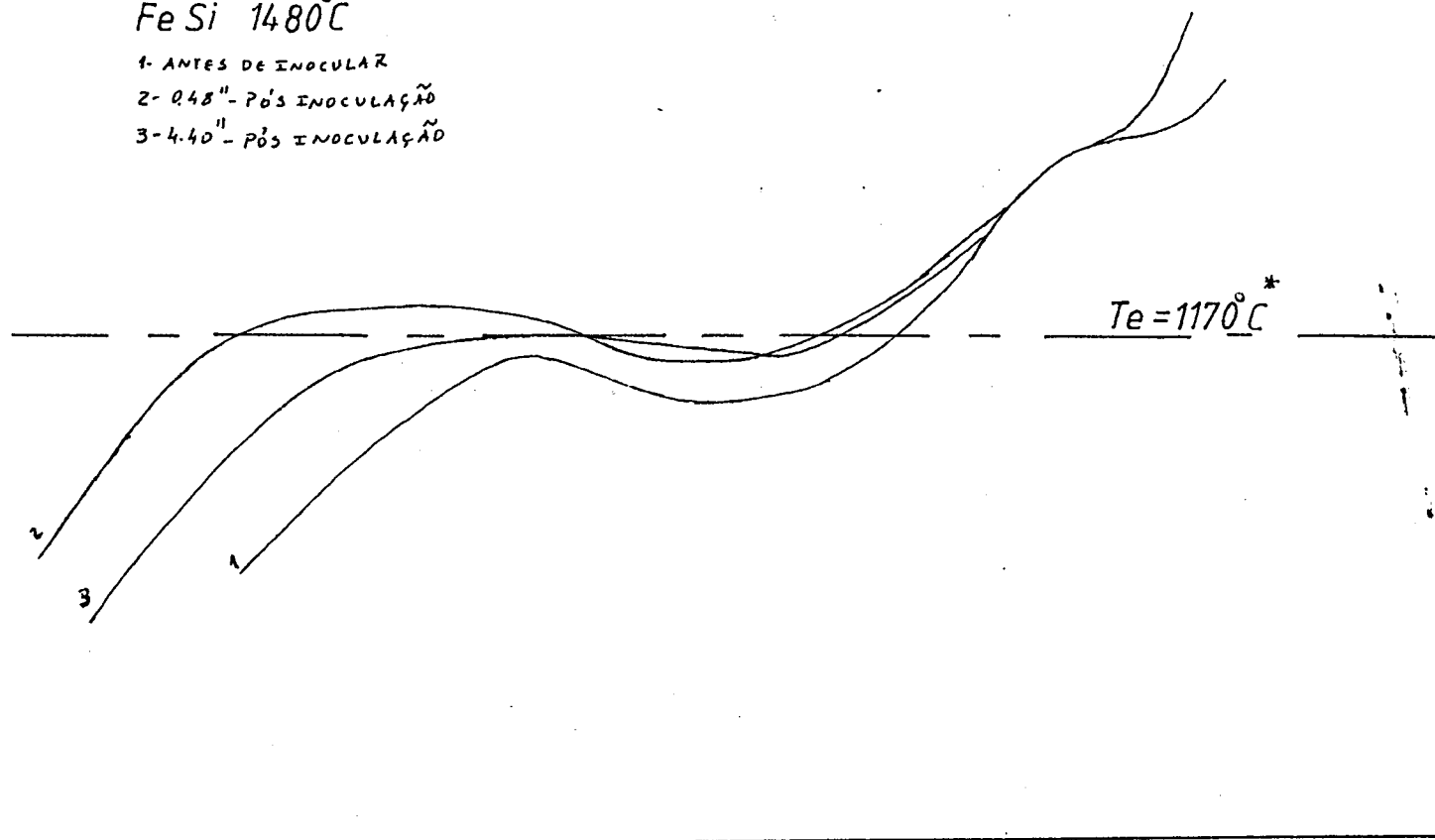
Quanto maior for a diferença entre T_1 e T_0 , mais eficaz será o inoculante. Esta eficácia é avaliada através do índice acima referido :

FeSi 1480°C

1- ANTES DE INOCULAR

2- 0.48" - PÓS INOCULAÇÃO

3- 4.40" - PÓS INOCULAÇÃO



* VALOR ESTIMADO

grafico III.2.1

Spherix 1380°C

1- ANTES DE INOCULAR

2- 0,48" - Pós INOCULAÇÃO

3- 3.30" - "

4- 6.48" - "

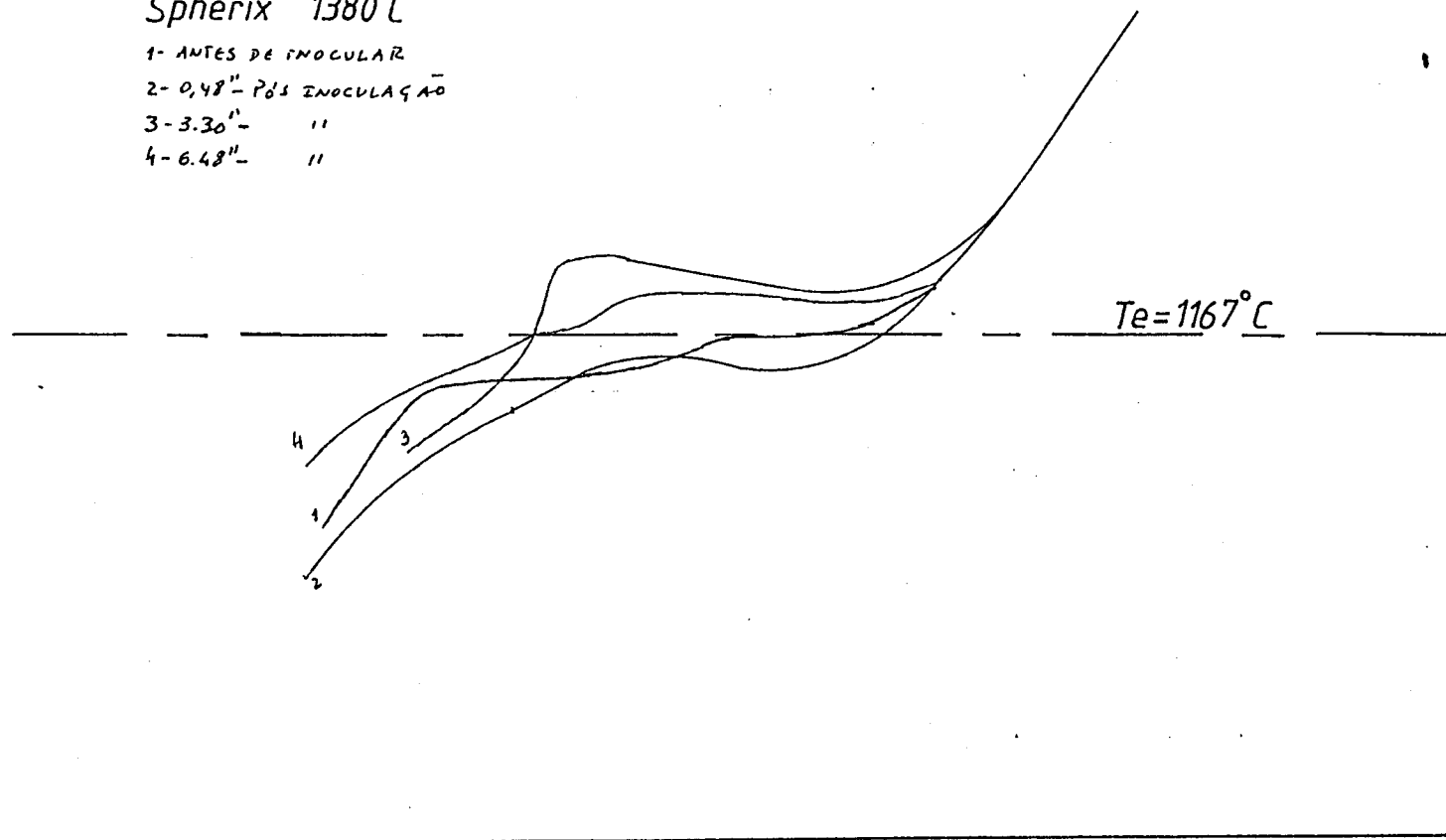


grafico III.2.2

Spherix 1480°C

- 1- ANTES DE INOCULAR
- 2- 0,47" PÓS INOCULAÇÃO
- 3- 6.10" "
- 4- 14.40" "

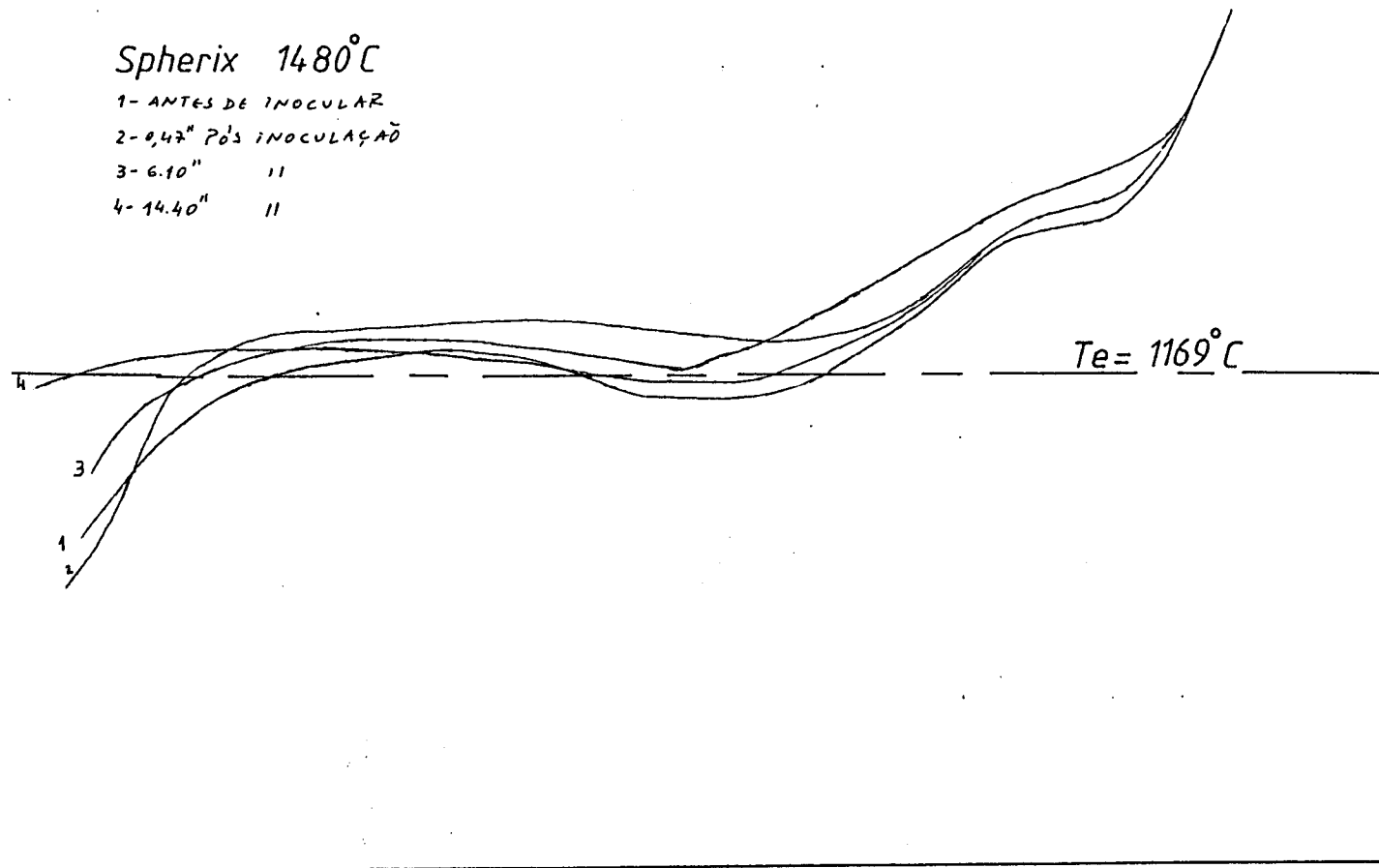


grafico III.2.3

Superseed 1480°C

- 1- ANTES DE INOCULAR
- 2- 0,52"- PÓS INOCULAÇÃO
- 3- 4,56"- "
- 4- 8,52"- "

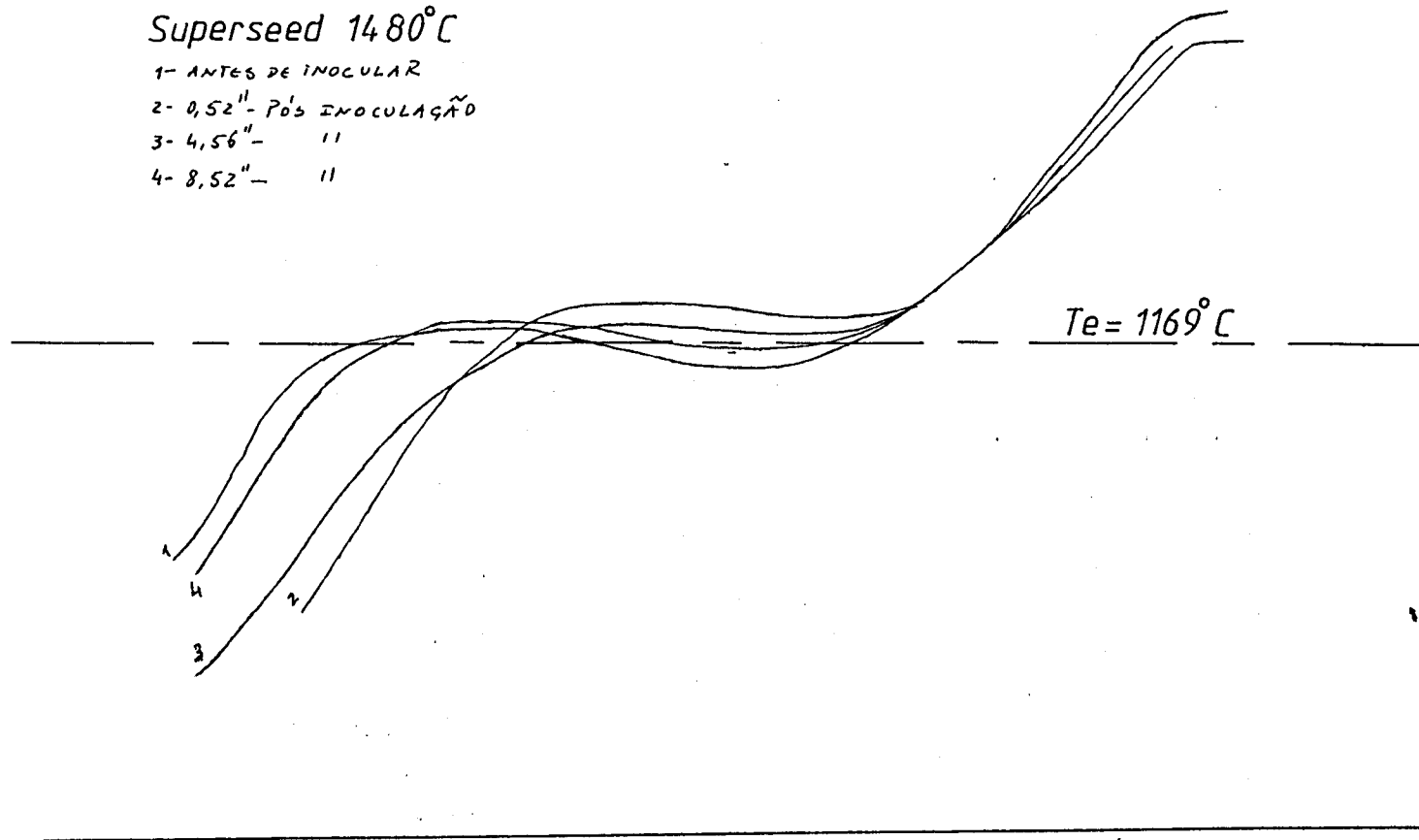


grafico III.2.4

Tabela III.4

EMULANTES	TEMPERATURA EUTÉTICA	TEMPERATURA DE SOBRESATURA EMULAR	TEMPEROS TEMPERATURAS				$\frac{T_i - T_o}{T_E - T_o} \times 100$	$\frac{T_i - T_o + 1}{T_i - T_o} \times 100$		
FR-Li 1480°C	—	1153°C	0,48"	4,40"	8,00"	—	—	$\frac{1168-1163}{1168-1153} = 13$	—	
			1165°C	1168°C	1169°C	—				
SPHERIX 1380°C	1167°C	1160°C	0,48"	3,30"	6,48"	—	$\frac{1177-1160}{1167-1160} = 243$	$\frac{1177-1176}{1177-1160} = 6$	—	
			1158°C	1177°C	1176°C	—				
SPHERIX 1480°C	1169°C	1163°C	0,47"	6,10"	14,40"	—	$\frac{1176-1163}{1169-1163} = 217$	$\frac{1176-1170}{1176-1163} = 46$	$\frac{1176-1168}{1176-1163} = 15$	
			1176°C	1170°C	1168°C	—				
SUPERSEED 1480°C	1169°C	1163°C	0,52"	4,56"	8,52"	15,50"	$\frac{1176-1163}{1169-1163} = 217$	$\frac{1176-1173}{1176-1163} = 23$	$\frac{1173-1167}{1176-1163} = 46$	
			1176°C	1173°C	1167°C	1175°C				

$$- i(T) = (T_1 - T_0) / (T_e - T_0) * 100$$

Este índice será tanto maior quanto maior a diferença entre T_1 e T_0 . A temperatura eutética (T_e) foi calculada usando a relação:

$$- T_e = 1155 + 6.5 * \%Si$$

Para avaliar a resistência ao desvanecimento do inoculante o índice de comensuração é:

$$- C(T) = (T_1 - T_2) / (T_1 - T_0) * 100$$

Os valores destes índices encontram-se na tabela III.4.

Os valores dos índices não são conclusivos pois o intervalo de tempo entre o primeiro e o segundo ensaio é muito grande, podendo haver um tempo intermédio ao qual corresponderia uma temperatura máxima.

Os dados da Análise Térmica permitem verificar que todos os inoculantes reduziram o grau de sobrefusão eutética. Por outro lado, o grau de sobrefusão aumenta com o tempo de manutenção, o que traduz o desvanecimento do inoculante.

A contagem das células eutéticas nas amostras de análise térmica mostram que o SUPERSEED é o inoculante que permite obter estruturas com maior densidade de células eutéticas.

III.3- Ensaio de tracção

Quanto aos valores obtidos nos ensaios de tracção, verifica-se que todos eles excepto os correspondentes ao SPHERIX têm

În fabrici metalice, eu principiu

a doua și e' cauză mai eșu e
reținu. a d' c'rist e tr.; pe
druga e' =, e tr. e p'ist e tr.
H' din sur

um valor igual ou superior a 25 Kg/mm². Os valores encontram-se no ANEXO IV.

Os baixos valores obtidos nos ensaios de tracção dos provetes inoculados com SPHERIX a 1380 C poderão ser explicados pela existencia de microrrechupes visiveis à vista desarmada nos provetes, os quais são devidos à má inoculação que se verificou neste ensaio. Para esses baixos valores também poderiam ter contribuido:

- Um elevado valor do Carbono equivalente, o que baixa a resistencia à tracção, mas pelos resultados da análise química isso não se verifica.

Quanto à relação S/Mn, verifica-se que o excesso de Mn, embora inferior ao valor pretendido (0.14), é muito superior a todos os outros, o que poderá ter contribuido para o abaixamento da resistencia à tracção.

- O tamanho, a distribuição e a forma da grafite. No entanto não se verifica qualquer diferença em relação às estruturas das outras amostras.

- A distancia interlamelar da perlite. Comparações do valor desta entre as estruturas respeitantes ao ensaio com o SUPERSEED e com o SPHERIX, não revelaram diferença significativa.

- Dureza. Os ensaios dedureza realizados entre as amostras de SPHERIX 1380 C e SUPERSEED não mostraram diferenças significativas. Os resultados destes ensaios encontram-se no ANEXO III.

- Problemas de maquinagem. Dado que estes provetes (SPHERIX

1380 C) não foram todos maquinados na mesma altura, não será de considerar este tipo de problema.

Por uma análise global dos resultados, verifica-se que os valores mais elevados da resistencia à tracção se relacionam com os verificados na eficiencia da redução da altura de tempera e densidade de células eutéticas.

Verifica-se que em cada série os valores do ensaio de tracção não sofrem alteração apreciável, não mostrando qualquer variação com o desvanecimento.

III.4- Durezas

Os resultados indicam que os valores da dureza são semelhantes para todos os ensaios. A dureza é função da distancia interlamelar da perlite, a qual foi medida e se mostrou constante em todas as amostras, daí que os valores das durezas sejam todos semelhantes. Os resultados encontram-se no ANEXO VI.

III.5- Células eutéticas e microestrutura

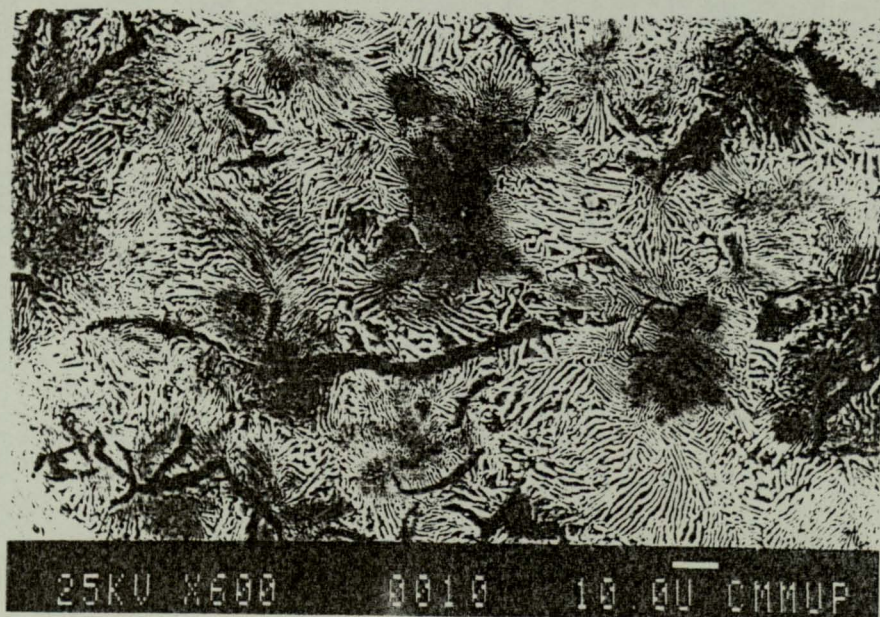
Em todas as amostras se verificou uma matriz constituida por aprox. 100% de perlite (fotografia 1).

Não houve possibilidade de caracterizar exhaustivamente o tipo de grafite obtida por falta de tempo. No entanto, a observação efectuada nas amostras referentes à análise térmica mostrou predominancia de grafite tipo A, D e E (fotografias 2 e 3).

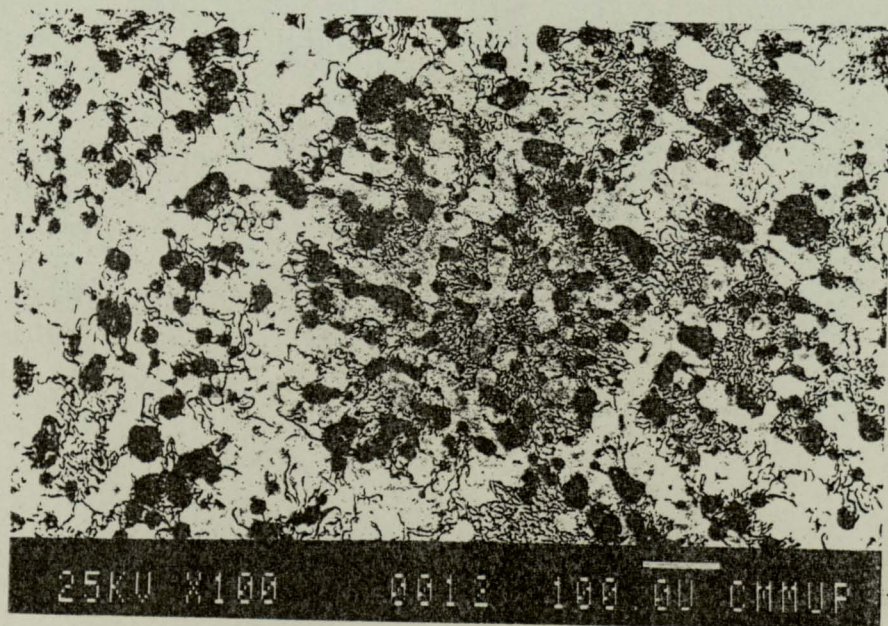
Verificou-se a presença de inclusões de MnS (fotografia 4).

A grande parte das microestruturas mostravam a existência de dendrites formadas durante a solidificação da austenite primária (fotografia 5), o que é confirmado pelo baixo Carbono equivalente.

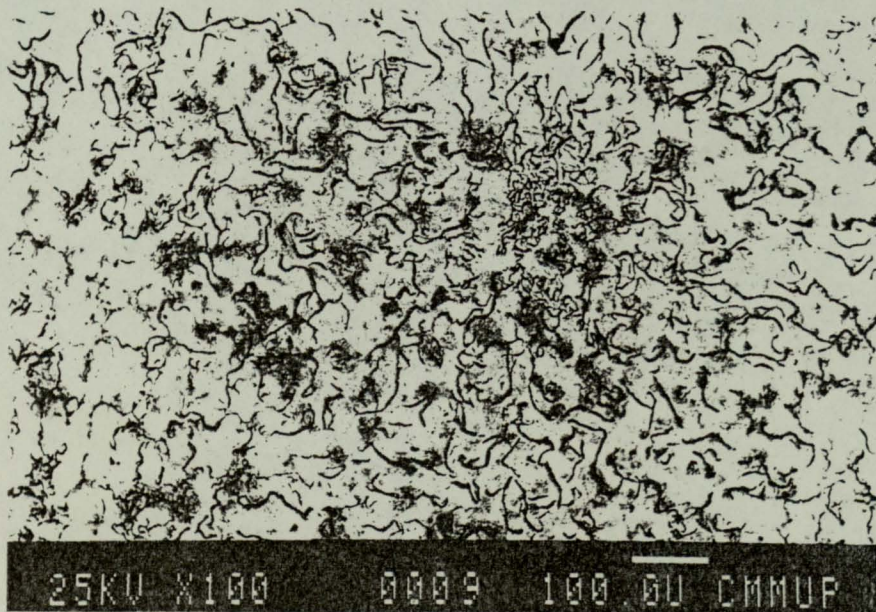
Quanto às células eutéticas, as poucas fotografias obtidas são apresentadas apenas a título elucidativo (fotografias 6, 7, 8 e 9). Os valores obtidos nas contagens encontram-se nos ANEXOS V e VII.



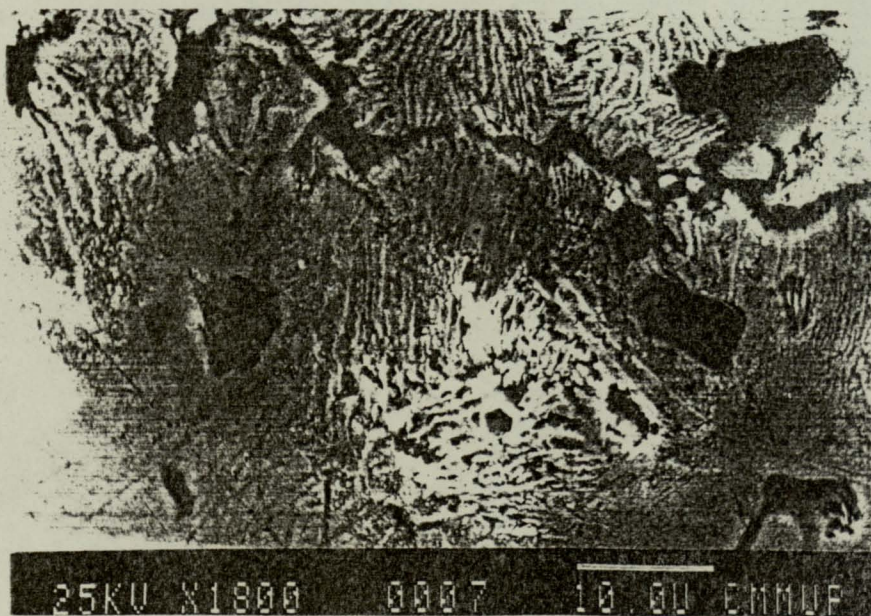
FOTOGRAFA N° 1



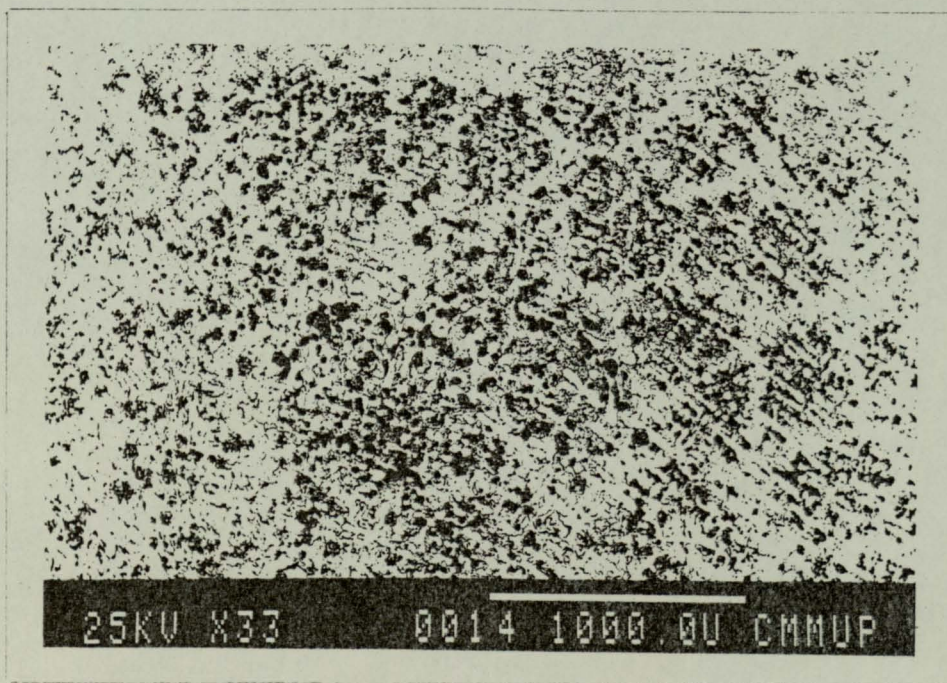
FOTOGRAFA N° 2



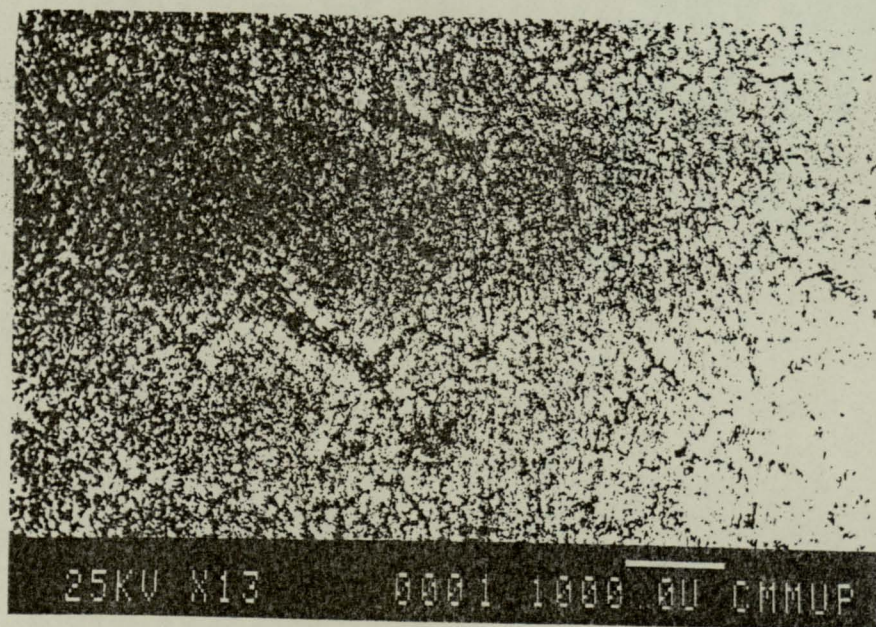
FOTOGRAFIA Nº 3



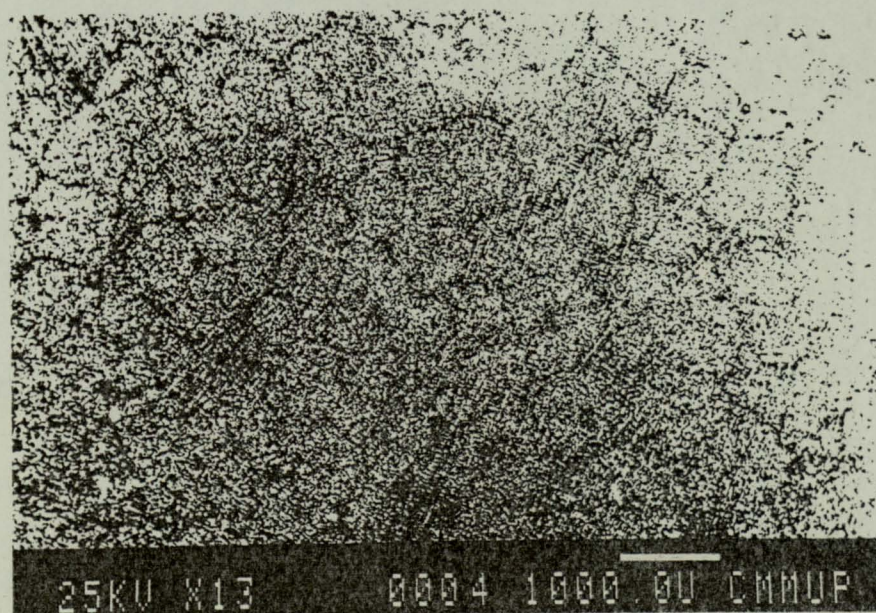
FOTOGRAFIA Nº 4



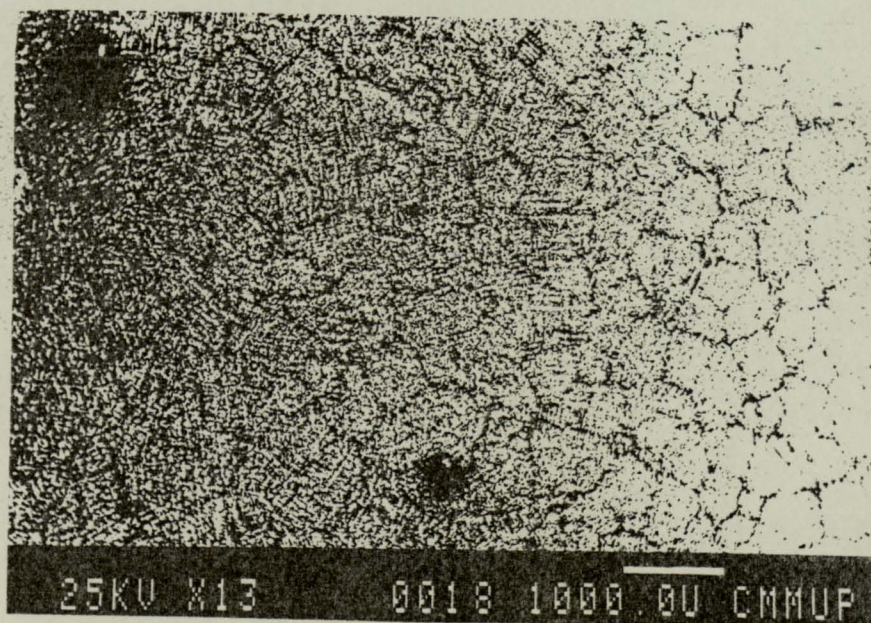
FOTOGRAFIA Nº 5



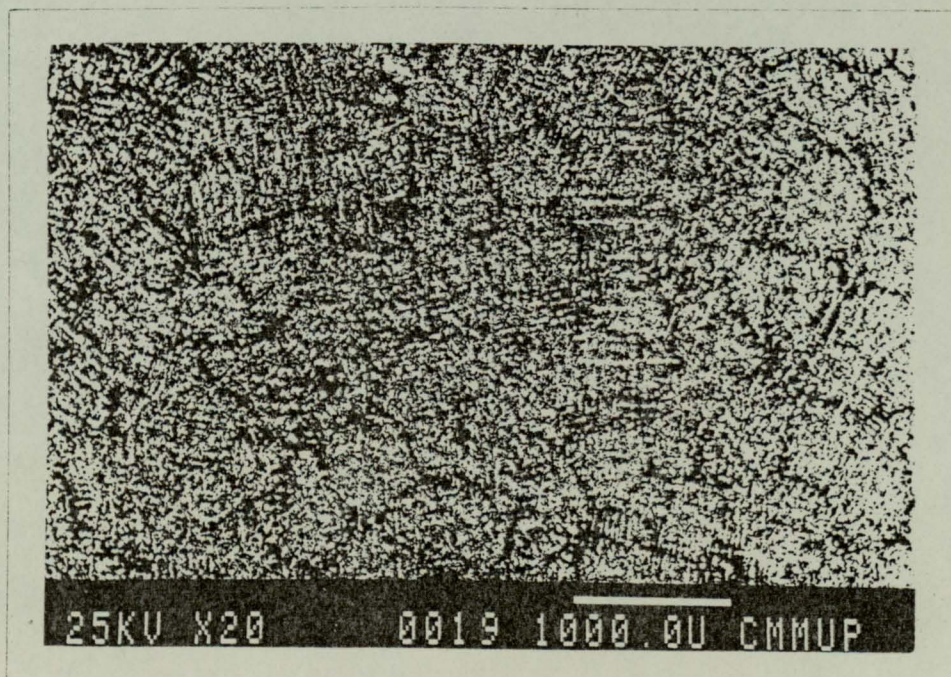
FOTOGRAFIA Nº 6



FOTOGRAFIA N° 7



FOTOGRAFIA N° 8



FOTOGRAFI-A N° 9

1:)

isto é um ponto à la Pörr, mas
podemos até de mesmo, não é?

2:)

o que tem

e excepção foi justificada no fs 15
e deveria ser feita pl/ps e incontestada,
depois o fim do processo e a
nítida do facto.

3:)

condição; não é zero pois o
valor incontestado.

Requerer por isso ~~uma~~ para dar
um tratado para tanto e até?
póis não foi visto no pl/ps
então de modo a caracterizar
o sujeito de facto no facto
no outro?

V- CONCLUSÕES

Das variáveis estudadas : tipo de inoculante, temperatura de inoculação e tempo de manutenção, pode concluir-se que

- Pelos dados obtidos na altura de tempera, análise térmica e densidade de células eutéticas, o desvanecimento aumenta com o tempo de manutenção, verificando-se em todos os casos um aumento da altura de tempera, um aumento da sobrefusão e diminuição da densidade de células eutéticas
- Quanto ao efeito da temperatura, os ensaios realizados e os dados obtidos não permitem tirar qualquer conclusão, à excepção do caso do FeSi Standard que, nos resultados obtidos às temperaturas de 1380 C e 1480 C, se mostra mais eficaz na redução da altura de tempera a 1380 C.
- No que diz respeito ao tipo de inoculante, verifica-se que o SUPERSEED se mostra um inoculante eficaz na redução da altura de tempera e no aumento da densidade de células eutéticas

Anexos

ANEXO I- Cálculo da Carga

Balanço ao Carbono

$$m(\text{aço}) * .12/100 + m(\text{grafite}) * 99/100 = 3.2/100$$

Balanço ao Silício

$$m(\text{aço}) * .02/100 + m(\text{FeSi}) * 75/100 = 1.9/100$$

Balanço ao Enxofre

$$m(\text{aço}) * .013/100 + m(\text{grafite}) * .6/100 + m(\text{FeS}) * 55/100 = .170/100$$

Balanço ao Manganês

$$m(\text{aço}) * .46/100 = .43/100$$

Resolvido o sistema de equações, obtém-se:

$$m(\text{aço}) = 93.75 \%$$

$$m(\text{grafite}) = 3.5 \%$$

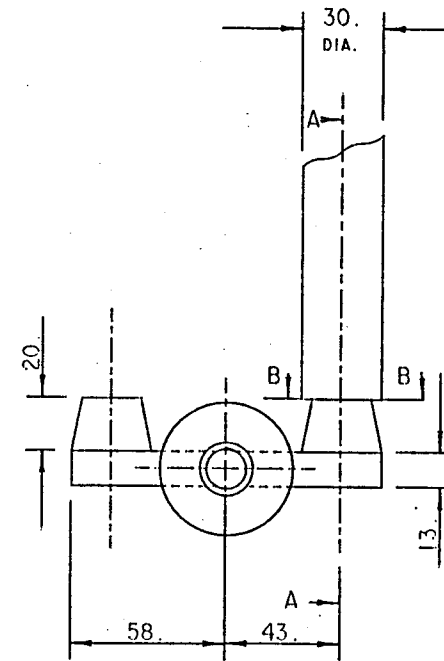
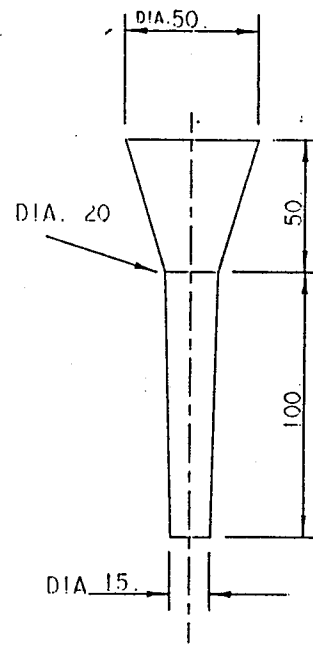
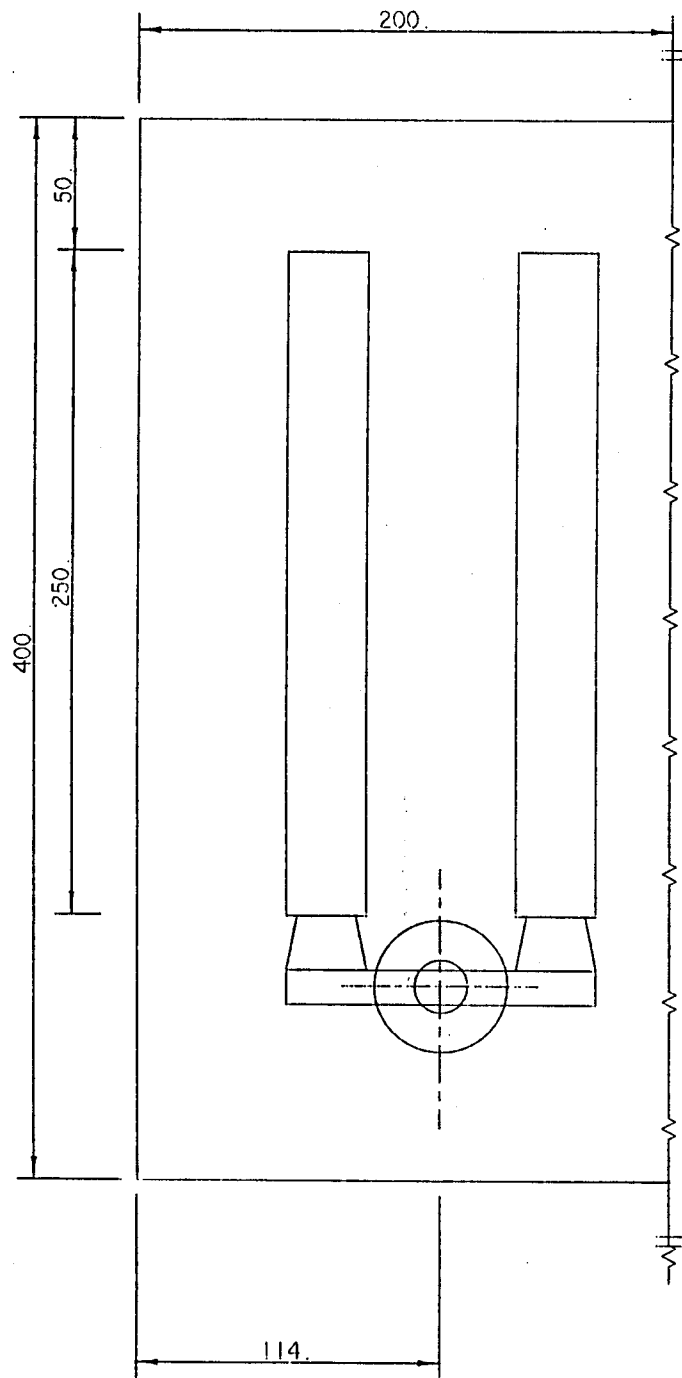
$$m(\text{FeSi}) = 2.5 \%$$

$$m(\text{FeS}) = .25 \%$$

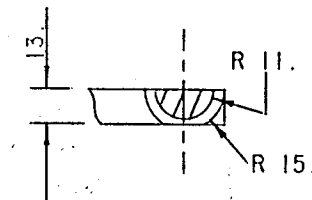
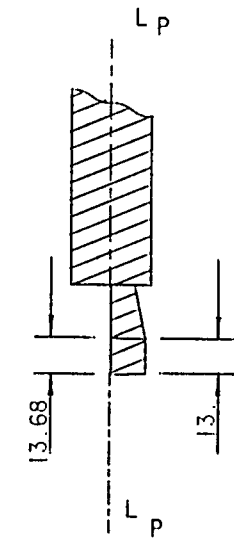
Composições Químicas

	%C	%Si	%Mn	%S
SPHERIX - 1480°C ANTES DA INOCULAÇÃO	3.35	2.08	0.24	0.14
SPHERIX - 1480°C APÓS INOCULAÇÃO	3.40	2.01	0.21	0.15
SUPERSEED - 1480°C ANTES INOCULAÇÃO	3.30	2.12	0.25	0.17
SUPERSEED - 1480°C APÓS INOCULAÇÃO	3.17	2.00	0.30	0.14
SPHERIX - 1390°C APÓS INOCULAÇÃO	3.23	1.80	0.35	0.15

Anexo II



DISTRIBUICAO



CINFU-CAD/CAM-DOGS	
PROVETES ... SEMINARIO	
ESC. 1/2	VC870IN2

Anexo III

	TEMPOS	DUREZAS HV									
SPHERIX - 1380°C	1,00"	460	447	435	424	435	402	424			
	2,15"	232	232	251	232	251	242				
	3,53"	232	232	232	232	232	232	242			
	5,50"	232	232	232	232	232	232	232			
	8,00"	251	232	232	232	232	232				
	10,45"	232	251	232	232	232	242	242	242	232	
SUPERSEED - 1480°C	5,00"	251	257	251	242	251	242	257	251		
	6,10"	242	251	251	251	251	251	242	251		
	9,00"	242	242	251	251	251	251	257			
	12,35"	251	242	251	242	242	242	251	251		

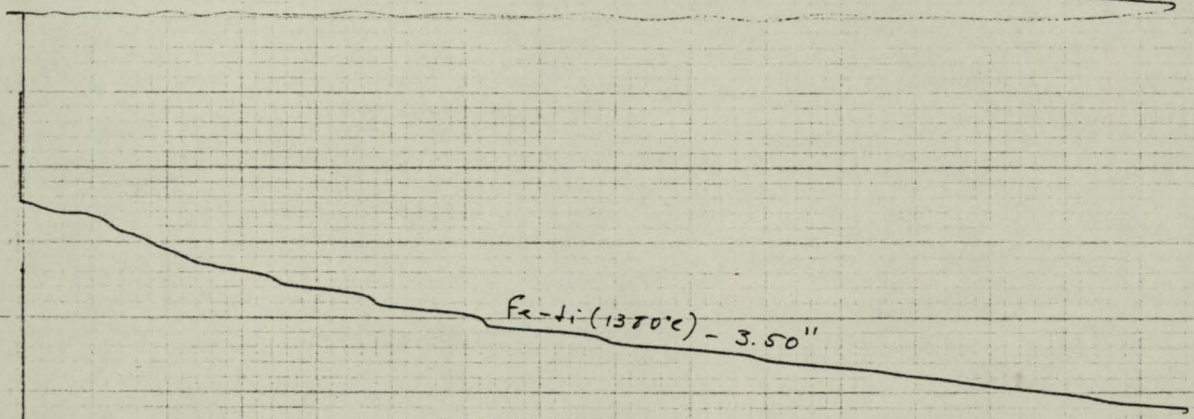
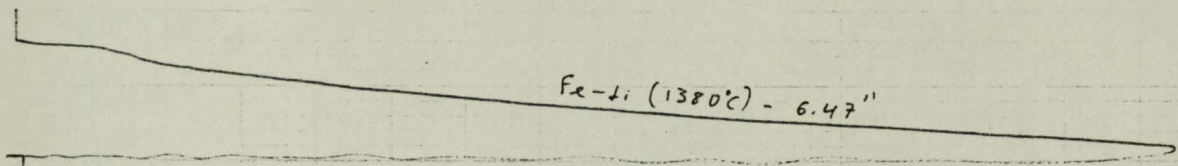
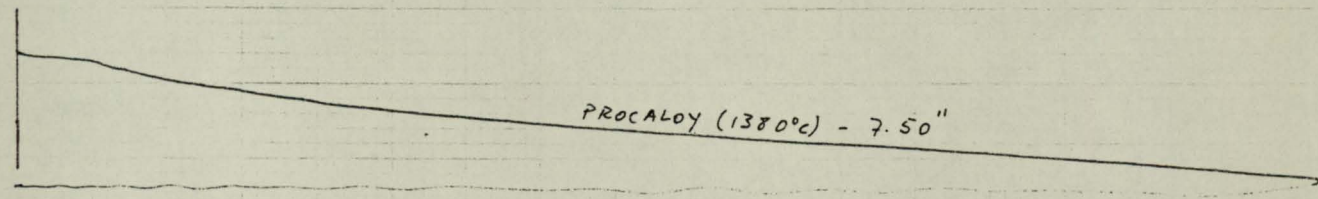
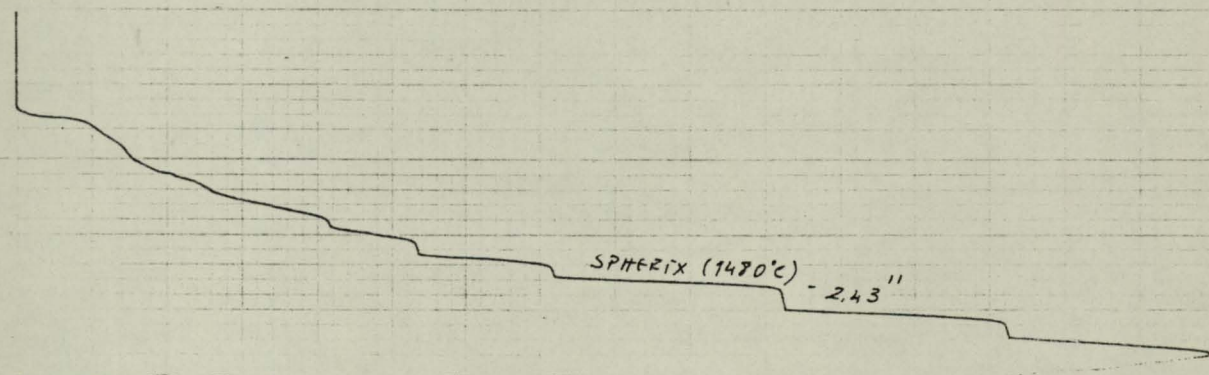
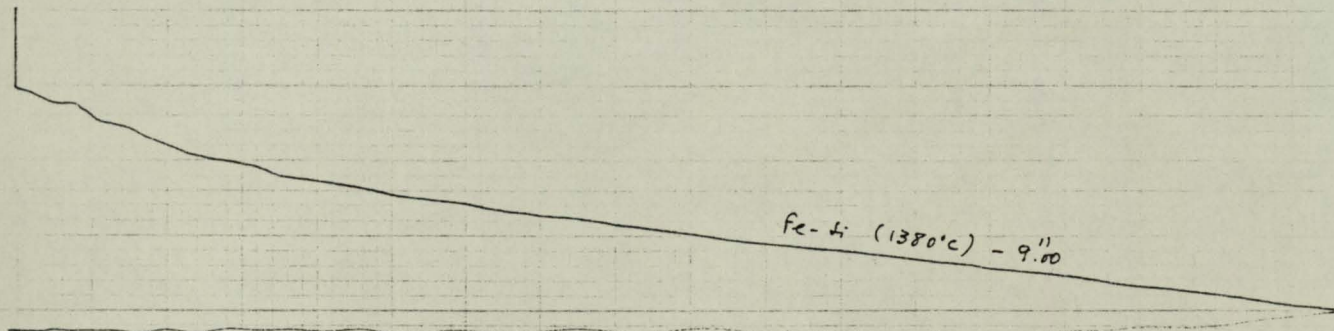
Anexo IV- Ensaios de Tracção

Fa-Si - 1380°C		Fe-Li - 1480°C		SPHERIX-1380°C		SPHERIX-1480°C		SUPERSICED 1480°C		PROCALOY-16 1380°C	
TEMPOS	(1)										
0,38"	28,4	1,20"	23,4	1,00"	18*	1,10"	19	0,35"	32,1*	1,05"	26,6
2,18"	27,1	3,01"	25,8	2,15"	15,3*	2,43"	24,8*	1,55"	30,1	2,15"	30,3
3,60"	27*	4,53"	25,7*	3,53"	18,1	4,45"	17,2*	3,37"	28,9	4,03"	28,8
5,08"	25,9	6,30"	23,4	5,50"	16,3	6,30"	23,7*	5,00"	29,5	5,18"	
6,47"	27	8,17"	26,2*	8,00"	12,2*	8,25"	23,3*	6,40"	29,3	7,50"	27,1*
9,00"	27,2	9,21"	25,8	10,45"		10,19"		9,00"	28,5	9,19"	26,4
10,51"	26,1	10,46"	27,8*			15,01"	24,6	10,45"		12,08"	26,2*
								12,35"	28,2*	14,48	↓

(1) - CARGA APLICADA - 5000 Kgf

* - VALOR CORRESPONDENTE APENAS A UM ENSAIO

SUMMARY



NO	SAMPLE	LOAD RANGE	ELONG. MAGNIF.	DATE
----	--------	------------	----------------	------

SUMMARY

PROCALOY-16 (1380°C) - 1.65"

PROCALOY 16 (1380°C) - 9.19"

Fe-Li (1480°C) - 1.20"

Fe-Li (1480°C) - 6.30"

PROCALOY (1380°C) - 2.15"

SPHERIX (1480°C) - 15.01"

SPHERIX (1380°C) - 5.50"

SPHERIX (1380°C) - 8.00"

100 90 80 70 60 50 40 30 20 10

Anexo U- Celulas Eutéticas

Fe-Li - 1380°C		Fe-Li - 1480°C		SPHEREX-1380°C		SPHEREX-1480°C		SUPERSTETD 1480°C		PROCALOY-18 1380°C	
TEMPOS	Nº de CELULAS										
0,38"	280	1,20"	140	1,00"		1,10"	168	0,35"	325	1,05"	280
2,18"	260	3,01"	140	2,15"	177	2,43"	164	1,55"	205	2,15"	260
3,50"	280	4,53"	140	3,53"	0	4,45"	160	3,37"	205	4,03"	200
5,08"	200	6,30"	144	5,50"	177	6,30"	168	5,00"	205	5,18"	140
6,47"	180	8,17"	128	8,00"	170	8,25"	136	6,40"	185	7,50"	140
9,00"	180	9,21"	120	10,45"	175	10,19"	132	9,00"	220	9,19"	150
10,51"	160	10,46"	100			15,01"	120	10,45"	175	12,08"	80
								12,35"	130	14,48"	↓

Anexo VI- Ensaios de Dureza

Fe-Si - 1380°C		Fe-Si - 1480°C		SPHERIX-1380°C		SPHERIX-1480°C		SUPERSEED 1480°C		PRICALOY- 16 1380°C	
TEMPOS	DUREZA HV										
0,38"	240	1,20"	250	1,00"	445	1,10"	245	0,35"	257	1,06"	245
2,18"	245	3,01"	250	2,15"	261	2,43"	250	1,55"	250	2,15"	240
3,50"	240	4,53"	255	3,53"	240	4,45"	145	3,37"	251	4,03"	250
5,08"	245	6,30"	261	5,50"	245	6,30"	245	5,00"	257	5,18"	250
6,47"	230	8,17"	258	8,00"	245	8,25"	250	6,40"	251	7,50"	240
9,00"	255	9,21"	250	10,45"	262	10,19"	245	9,00"	251	9,19"	245
10,51"	240	10,46"	261			15,01	240	10,45"	251	12,08	240
								12,35	251	14,48	↓

Anexo VII- Ensaios de Dureza e Células Eutéticas da Análise Térmica

Fe-4 - 1480°C			SPHERIX - 1380°C			SPHERIX - 1480°C			SUPERSEED - 1480°C		
TEMPO	Nº DE CÉLULAS (6x2)	DUREZA HV									
	—			—						75	260
0,48"	250	230	0,48"	40	240	0,47"	96	235	0,52"	325	267
4,40"	170	245	3,30"	72	267	6,10"	108	235	4,56"	175	261
8,00"	115	240	6,48"	—	261	14,40"	80	230	8,52"	140	255
									15,50"	100	240

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de expressar os seus mais vivos agradecimentos ao Sr. Eng. Silva Ribeiro, ao Sr. Eng. Vieira de Castro, ao Sr. Soares, Sr. Domingos, Sr. Mário e Sr. Gonçalves o apoio científico e técnico que amavelmente prestaram.

Agradecem também a todos os que de algum modo os ajudaram, apresentando sugestões e críticas.

V- BIBLIOGRAFIA

- [1]- LAPLANCHE, H. - "Les fontes et leur traitement thermique"
- [2]- ALDERSON, A. - "The influence of Manganese and Sulphur on structure and mechanical properties of grey cast iron" - THE BRITISH FOUNDRYMAN, AUG/SEP 85
- [3]- SILVA RIBEIRO, C. A. - "Noções de inoculação de ferros fundidos cinzentos de grafite lamelar e nodular" - CINFU, 87
- [4]- "L'inoculation des fontes" - C.T.I.F. OUT 77
- [5]- COLLAUD, A. - "Réflexions sur les propriétés mécaniques des fontes grises"
- [6]- HECHT, M. & CLOAREC, P. - "Inoculation des fontes a graphi-lamellaires et tendance à la re-tassure" - FONDERIE 352-76
- [7] - SILVA RIBEIRO, C. A. - "Aplicabilidade da Análise Térmica a banhos de ferro fundido" - 1985

