

"FABRICAÇÃO DE PEÇAS EM FERRO FUNDIDO NODULAR PELO PROCESSO
"IN MOLD" (1)"

HECTOR HUGO FIGUEROA (2)

R E S U M O

São apresentados aspectos relativos à fabricação de peças, em ferro fundido nodular, na indústria automobilística e de máquinas e equipamentos industriais, vazadas pelo processo "in mold".

São discutidos alguns pontos de importância, tais como:

- a) característica do processo,
- b) parâmetros a serem considerados para o projeto do ferramental,
- c) características da liga nodulizante, e
- d) controles de qualidade do processo "in mold".

Este sistema foi desenvolvido a partir de ferramentais desenhados e projetados na Itália, utilizando-se liga nodularizante de fabricação européia, sendo que, logo após o início da produção, foram feitas as modificações necessárias nos sistemas de alimentação, adaptando-os à liga desenvolvida no Brasil.

(1) Contribuição técnica a ser apresentado no Seminário sobre Tecnologia de Fundição ABM/COFUN, São Paulo, em setembro de 1982.

(2) Chefe do Departamento de Desenvolvimento Tecnológico da FMB S/A - Produtos Metalúrgicos.

"FABRICAÇÃO DE PEÇAS EM FERRO FUNDIDO NODULAR PELO PROCESSO "IN MOLD"

I - INTRODUÇÃO

No ano de 1976, a FMB S/A - Produtos Metalúrgicos iniciou no Brasil a fabricação de peças em ferro fundido nodular, utilizando o processo "in mold".

No início da produção, utilizava-se liga nodularizante importada da Europa e ferramentais projetados na Itália.

Transcorrido o primeiro ano de atividades, a FMB decidiu desenvolver no Brasil uma liga nodulizante que pudesse satisfazer as necessidades de fabricação, mantendo os requisitos de qualidade intactos e similares aos da liga importada.

No começo da experiência, foi necessário superar uma série de problemas de natureza físico-química das ligas, antes de conseguir bons resultados.

Cabe destacar o grande esforço feito pelos fabricantes de ferro-liga e a assistência ao pessoal da FMB neste desenvolvimento.

Foi necessário, para conseguir resultados satisfatórios, modificar ou adaptar os ferramentais trazidos da Itália, para as características da liga fabricada no Brasil. Isto porque determinados parâmetros, a exemplo: tempos de reação, velocidade de dissolução, tendência a coquilhamento, formação de defeitos de contração (rechupes), e a formação de inclusões, eram diferentes da liga importada.

Por último, foi necessário desenvolver um sistema de controle, tanto no recebimento das ligas nodulizantes, quanto durante a produção das peças, para garantir uma boa nodularização.

II - DESCRIÇÃO DO PROCESSO "IN MOLD"

C.M. Dunke e J.L. McConlay (1), são os autores do denominado "IN MOLD PROCESS", tendo utilizado, para isto, uma liga de FeSiMg na forma de grãos, a qual era colocada em uma câmara, denominada de "reação" (vide figura 1a), devidamente dimensionada, de modo tal a manter, durante o vazamento, a velocidade de dissolução e o fluxo constante de metal na câmara. Estas câmaras de reação podem ser dimensionadas de várias maneiras, como é observado nas figuras 1b, 1c e 1d, vistas lateralmente.

A figura 2 mostra um feixe correspondente a um girabrequim, que caracteriza o processo "In mold". Nela destaca-se a bacia de vazamento, canal de descida, as duas câmaras de reação, sendo 1 câmara para cada 2 peças (a placa modelo possui 4 figuras), canal que liga a câmara com o massalote centrífugo, o canal distribuidor de metal e os massalotes de entrada e saída da peça.

Para manter a velocidade de dissolução da liga o mais uniforme possível, durante o vazamento, é necessário que, na câmara de reação, a seção horizontal seja mantida praticamente constante em todas as alturas. O desenho da câmara deve ser tal que não permita a entrada de resíduos de liga ou grãos não dissolvidos dentro da peça. Normalmente, na prática é suficiente que a câmara possua uma seção quadrada no plano horizontal e uma profundidade não superior ao comprimento da quina horizontal.

Na figura 3 pode ser observado o sistema de alimentação, que liga o canal de descida à câmara de reação e as entradas e saídas do metal. É recomendável que o sistema seja mantido em "pressão", com seção progressivamente decrescente de, no mínimo, 10%, de modo a permitir a entrada uniforme do metal, reter as inclusões e dar tempo suficiente para a completa dissolução dos grãos da liga.

Na velocidade de dissolução da liga, é importante o denominado "fator de dissolução". Este parâmetro depende da relação entre a quantidade do metal a ser tratado, e o tempo em segundos empregado para isto. De fato, a quantidade de liga dissolvida no metal, na unidade do tempo, é diretamente proporcional à velocidade do fluxo do metal. Conhecido o peso do feixe, deverá ser determinado: o peso da liga (em gramas) que deverá ser utilizada, o volume que a liga vai ocupar na câmara de reação e as dimensões da câmara.

É muito importante evitar que o fluxo de metal, entrando na câmara, incida com violência numa área reduzida sobre a liga, porque isto provocaria projeções de grãos de liga sem diluir e a possível formação de vértices ou ângulos mortos na câmara. Deve ser evitado também o fenômeno da turbulência, procurando eliminar áreas de aceleração e velocidades de dissolução inadequadas que poderiam conduzir a má nodularização nas peças. É preferível que a seção de entrada na câmara seja estendida em largura, procurando dispor a saída num nível superior àquele da entrada, à vezes na abóbada da câmara.

III - CARACTERÍSTICAS DA LIGA NODULIZANTE

A liga nodulizante empregada no processo "in mold" deve possuir características especiais, procurando obter:

- a) boa resistência ao desvanecimento de modo a obter rendimento do magnésio acima de 90%;

- b) diluição homogênea e garantia de uma constância de concentração desde o início até o fim do vazamento;
- c) distribuição granulométrica que garanta o item b) e a ausência de impurezas ou corpos estranhos.

A figura 4 apresenta, de maneira simples, as distintas etapas de fabricação de uma liga FeSiMg, empregadas no procedimento "in mold". Nesta figura podemos observar os componentes básicos, desde a carga do forno até a obtenção do FeSiMg líquido. A granulometria e a análise química final resultam de grande importância para o processo "in mold". A composição química básica, utilizada na maioria das ligas nodulizantes, é apresentada na tabela I.

Tabela I - COMPOSIÇÃO QUÍMICA PERCENTUAL DAS LIGAS "IN MOLD"

	Si	Mg	Ca	Al	Ce	Cr
PERCENTUAL	44	05	0,30	0,60	0,40	-
	47	07	0,50	0,90	0,70	0,05

As dificuldades encontradas, no início da produção das peças em ferro fundido nodular pelo processo "in mold" com a liga nodulizante, foram as relacionadas com problemas da natureza química e granulométrica.

Outra característica importante é a metalográfica. Na figura 5, observam-se as características morfológicas de um grão de liga. As figuras 5 a 13 mostram as distintas fases que compõem a liga nodulizante e, nas figuras 14 e 15 os diagramas obtidos por dispersão de energia, das análises das zonas que contêm cério e os outros componentes das terras raras (lantânio, praseodímio, neodímio).

A "constância da qualidade" é muito importante no fornecimento da liga, pois garante o êxito no processo "in mold". Problemas com a granulometria, por exemplo, teor de finos elevado e análise química fora da especificação, podem prejudicar a nodulização. Os finos normalmente não possuem características químicas homogêneas, tratando-se, geralmente, de óxidos e impurezas que criam numerosas inclusões nas peças.

Para evitar as inclusões, que resultam num dos maiores problemas que possam ser provocados nas peças, é necessário recorrer aos artificios já conhecidos: canais com expansão, massalotes centrí-fugos, ou massalotes providos de machos para reter as escórias (a figura 16 mostra um deles).

IV - CONTROLES DO PROCESSO "IN MOLD"

O processo "in mold", para ser tem desenvolvido, requer o estabelecimento de um rigoroso esquema de controle que podemos resumir assim:

- a) controles de recebimento da liga nodulizante,
- b) controles durante a produção,
- c) controles do ferramental,
- d) controles finais da peça.

a) CONTROLES DE RECEBIMENTO DA LIGA NODULIZANTE

Na figura 17 podemos observar basicamente o sistema de controle utilizado na FMB, para a liga nodulizante.

Destacam-se os testes físico-químicos feitos no laboratório e os testes práticos que deverão ser feitos em duas modalidades:

- 1) Em placa tecnológica padrão, na qual são controlados: velocidade de dissolução e poder nodulizante.
- 2) Em modelo padrão: constituída por uma peça considerada de grande importância (ex.: ponta de eixo), na qual são controlados: nodulização, estrutura e defeitos internos ou externos.

b) CONTROLES DURANTE A PRODUÇÃO

Nas fundições da TEKSID, foi desenvolvido um sistema automático de dosagem e de introdução da liga na proporção exata (ver figura 18 e 19). No caso em que a liga não tenha sido introduzida ou tenha sido mal pesada (a menos), a linha de produção para automática-mente.

c) CONTROLES DO FERRAMENTAL

Todo novo ferramental antes de entrar no processo produtivo passa por uma série rigorosa de testes práticos, que garantirão que os fundidos estão isentos de quaisquer defeitos sistemáticos, tanto de microestrutura, quanto de integridade. Podemos então aceitar a hipótese de que, se a adição do tipo de liga certa, na quantidade certa, foi realizada corretamente, o resultado deverá ser satisfatório.

d) CONTROLES FINAIS DA PEÇA

A adoção do processo de nodulização "in mold" comporta a adequação de um sistema de controle final das peças que garantam as características metalúrgicas exigidas.

Como já foi mencionado anteriormente, os controles efetuados durante a produção dos feixes de cada lote de peças vazadas, já garantem o andamento do ferramental limitando-se então, a inspeção final, a controles pro amostragem de dureza, metalografias e ensaios mecânicos.

Para as peças consideradas de segurança (ponta de eixo, girabrequins, árvore comando válvula, etc.), a FMB desenvolveu um sistema de controle automático por ultrassom, o qual é inserido na linha de inspeção final das peças.

Na figura 20 pode-se observar o posicionamento de uma peça em ferro nodular para controle de nodulização.

Outros métodos de controles automatizados, utilizando técnicas por imersão, estão sendo estudados para serem desenvolvidos.

V - CARACTERÍSTICA METALÚRGICA DAS PEÇAS VAZADAS PELO SISTEMA "IN MOLD"

No processo "in mold", aproveita-se o fato de que a nodulização é feita no último momento, ou seja, que o metal ao entrar na câmara de reação, é submetido simultaneamente aos processos de nodulização e inoculação o que significa que, em igualdade com todas as outras condições, alcança-se, desta forma, uma situação de nucleação e aumento extremamente favorável dos nódulos de grafite, enquanto que é decididamente menor a eventual tendência a formação de cementita. Na metalografia, pode ser observada uma elevada densidade de nódulos (normalmente entre 400/500 mm²) nas espessuras compreendidas entre 5 e 30 mm. Isto é devido ao fato de que também a sua regularidade morfológica (esferas quase perfeitas), e pela presença de um halo de ferrita ao redor da esfera, sensivelmente maior e mais regular que os obtidos em outros tipos de ferros nodulares.

Estas características estruturais, nas peças obtidas pelo processo "in mold", garantem excelentes propriedades mecânicas, tanto para o que diz respeito a resistência a tração, como ao comportamento a fadiga e a tenacidade a fratura.

Na figura 21, observa-se a comparação da resistência a tração sobre corpos de prova normalizados tirados de girabrequin fabricados em aço C40 utilizado normalmente na indústria automotriz e gusa, obtidos pelo processo "in mold" e "sandwich". Os dados na figura indicam que, no estado normalizado, tratado pelo processo "in mold", obtivemos valores de 85 a 92 kg/mm², valores estes que permitem competir com bons resultados, com o aço C40, beneficiado. Ainda há uma mudança favorável na relação entre o peso específico ao metal e a resistência à tração entre o metal obtido pelo processo "in mold" e obtido com aço C40 beneficiado (vida tabela II).

Tabela II - Comparação entre propriedades de materiais

TIPO DE METAL	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO - KG/MM2	PESO ESPE- CÍFICO	RELAÇÃO: PESO ESPECÍFICO/ RESISTÊNCIA
AÇO FORJADO C40 BENEFICIADO	85	7.85	92
FERRO FUNDIDO NODULAR NORMALIZADO	75	7.10	95
FERRO FUNDIDO NODULAR NORMALIZADO OBTIDO "IN MOLD"	85	7.10	83

No referente a resistência à fadiga, na figura 22, podemos observar que os resultados obtidos também com girabrequin, em aço C40 forjado e beneficiado para $R=90a95$ kg/mm², o ferro fundido nodular, obtido pelo processo "in mold", supera aos ferros obtidos pelo processo "sandwich", ou similar, enquanto que se aproxima bem para o aço, chegando até $90a100$ kg/mm².

Além disso, e levando em conta a melhor relação entre peso específico e resistência à tração do ferro fundido nodular obtido pelo processo "in mold", que observamos na tabela I, podemos dizer que isto é válido também para o limite da fadiga (78×10^{-3} para o ferro, contra 8.10^{-3} , para o aço) que significa um ponto de interesse como projeto de peças.

Devemos acrescentar que recentes progressos nas técnicas de fundição tem aumentado ainda mais as vantagens do ferro fundido nodular em comparação com o aço forjado, pois o limite de fadiga para o ferro fundido nodular, obtido pelo processo "in mold", sobe de 95 para 133 (em valores relativos) enquanto que para o aço C40, sobe de 100 para 128.

Finalmente, é interessante observar a marcante vantagem conferida pelo processo "in mold" nos ferros nodulares no que se refere à tenacidade à fratura.

Numerosos ensaios foram efetuados pela TEKSID, seguindo o conhecido método ASTM - E - 399/72 que constitui um dos mais significativos meios de avaliação da tendência a fragilidade de material metálico.

Os dados ilustrados na figura 23, mostram que, para o ferro fundido nodular perlítico, a resistência a fratura (expressa em $\text{kg/mm}^{-3/2}$), para as peças obtidas pelo processo "in mold", aumenta em + 40% (de 130 para 182) a temperatura de 200°C, e de 59% (de 107 para 170) a temperatura de - 40°C.

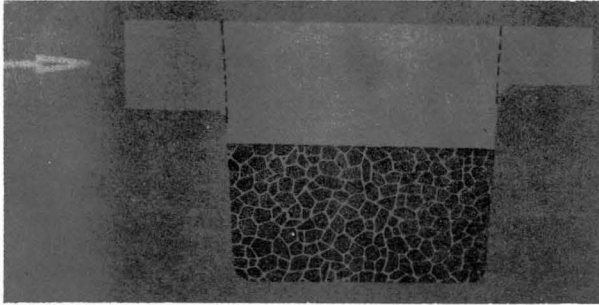
VI - CONCLUSÕES

Entre as características mais importantes que definem o processo "in mold" podemos resumir finalmente os seguintes pontos:

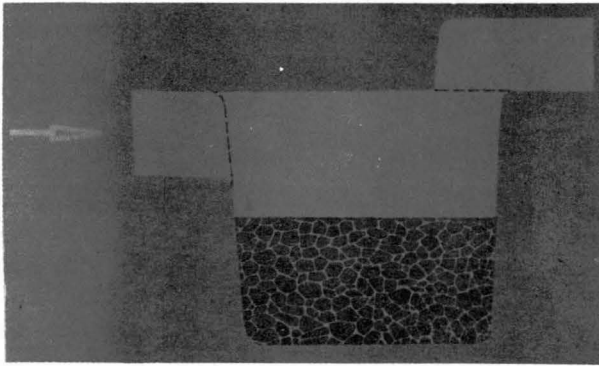
- 1) É necessário um adequado sistema de controle da liga nodulizante realizado em testes físico-químicos e testes práticos para garantir o processo de fabricação.
- 2) Na produção de peças pelo processo "in mold" é necessário a projeção adequada dos ferramentais, da câmara de reação, canais e massalotes para evitar problemas com a nodulização das peças.
- 3) O problema sério que deverá ser bem analisado é o das inclusões, devendo para isto, recorrer a sistemas de massalotes centrífugos ou canais de expansão.
- 4) Na fabricação da liga "in mold" é necessário controle rigoroso das matérias primas utilizadas de modo a garantir uma constância de qualidade.
- 5) Nos controles a efetuar durante a fabricação das peças, pelo processo "in mold", é necessário controlar a colocação de quantidade da liga certa na posição certa, podendo-se recorrer para isto a controles automáticos ou semi-automáticos.
- 6) Finalmente, é necessário desenvolver controles de qualidade adequados para verificar a nodulização das peças. Estes controles, segundo o tipo do particular pode ser por feixe completo e amostragem do lote, ou de 100% do lote quando se tratar de particular de segurança.

VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

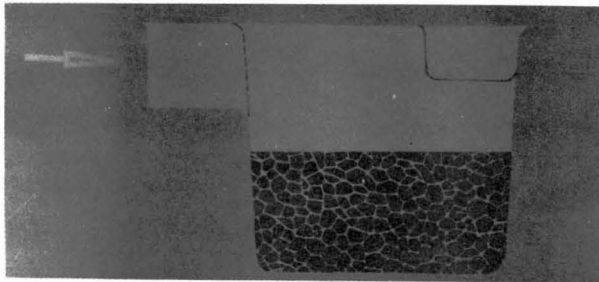
1. Brevet Britannique 33970/68 da Soc. Materials and Methods Ltd.
2. M. REMONDINO, F. PILASTRO, E. NATALE P. COSTA, G. PERETTI - Inoculating and Spheroidizing Treatments Directly Inside the Mold. AFS Transactions, 1975 - pg. 239 - 252.
3. W.W. HOLDEN e C.M. DUNKS, FIB - The practical application and economic aspects of the "in mold process" in the United States.
4. M. COSTAQUA, P. FERRERO R. MEDAME, E. NATALE - Fatigue Properties of "in mold" Ductile Iron.
5. R.K. NANSTAD, F.J. WORZALA and C.R. LOPER "Static and Dynamic Toughness of Ductile Cast Iron". AFS Transactions, Vol. 83, pag. 245 - 256 (1975).
6. G. MAGISTRALI - "Developments in Automatic NDT Special Iron Casting for Motor Vehicles". Nondestructive Testing (British - Feb. 1975 - pag. 32 - 37).



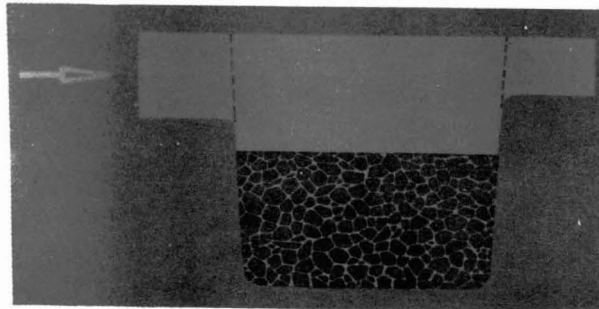
a) Câmara classica, vista lateral



b) Câmara com entrada no plano inferior e saída no plano superior



c) Câmara com saída lateral



d) Câmara com entrada e saída no plano inferior

Fig. 1 - Diferentes geometrias da câmara de reação do processo "In-Mold"

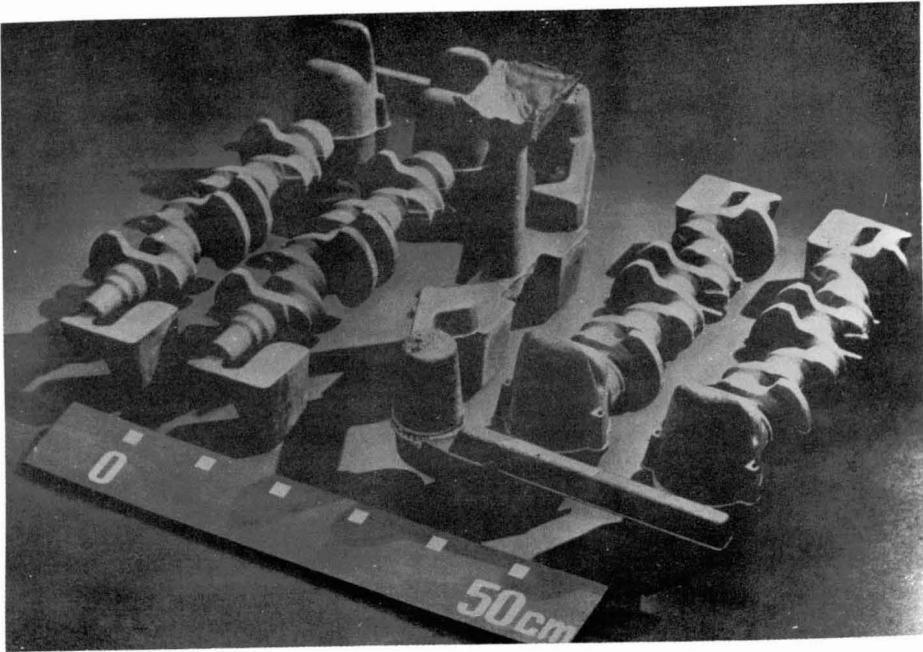


Fig.2 - Feixe, correspondente a 1 girabrequim tipo automotivo, vazado em sistema "In-Mold".

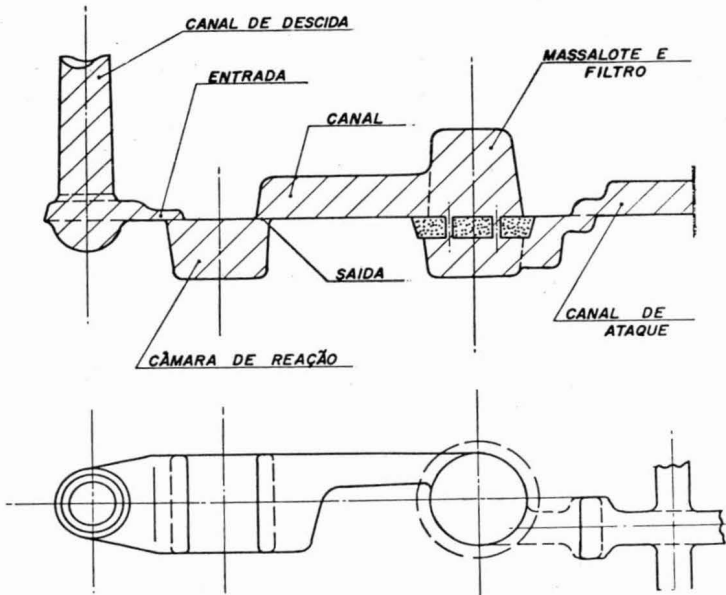


Fig.3 - Sistema de alimentação do processo "In-Mold".

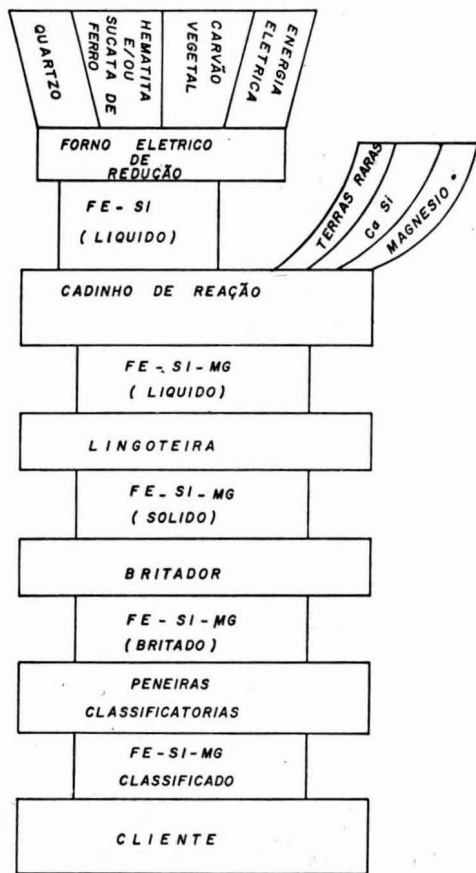


FIGURA 4: ESQUEMA DE PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA LIGA "IN MOLD"

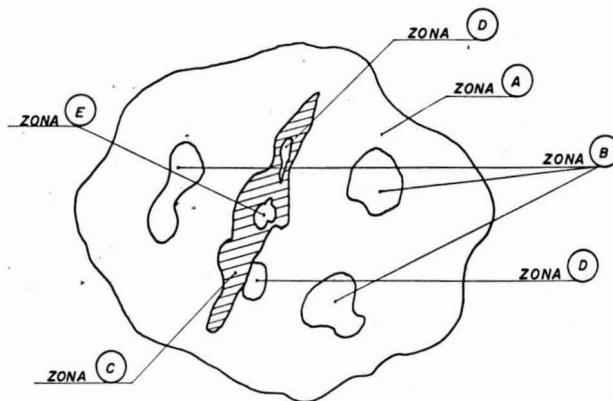


FIGURA Nº 5: CARACTERISTICAS MORFOLOGICAS DE UM GRÃO DE LIGA.

- ZONA A: MATRIZ DE LIGA RICA EM Fe e SI
- ZONA B: ÁREAS RICAS EM SI e Fe (SI EM MAIOR QUANTIDADE)
- ZONA C: CAVIDADE DE COR PRETA, POROSA E POUCA COMPACTA.
- ZONA D: ÁREAS DE Si - Fe - Mg - BÁRIO E ZIRCONIO AS VEZES Si - Ce - Fe - Ca - Mg
- ZONA E: ÁREAS DE Si - Ce - Mg - Fe e Ca POSSUI TAMBEM La - Na e Pr (LANTANIO - NEODIMIO - PROSEODIMIO)



Fig.6-Imagem de eletrons secundários, 300 x



Fig.7-Imagem de composição da figura 6, 500x. Aspecto da região analisada

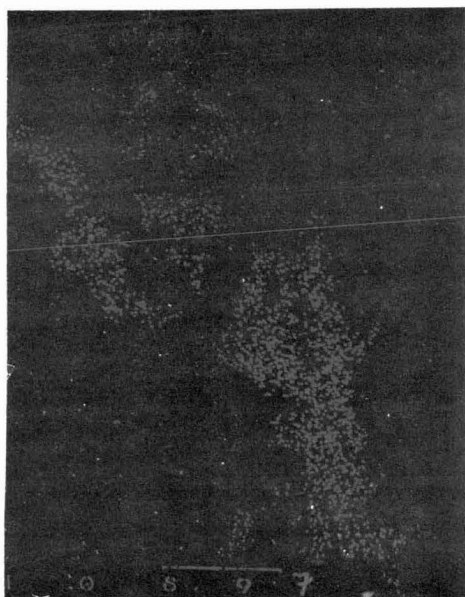


Fig.8-Imagem de Raios-X da fig.7, magnésio

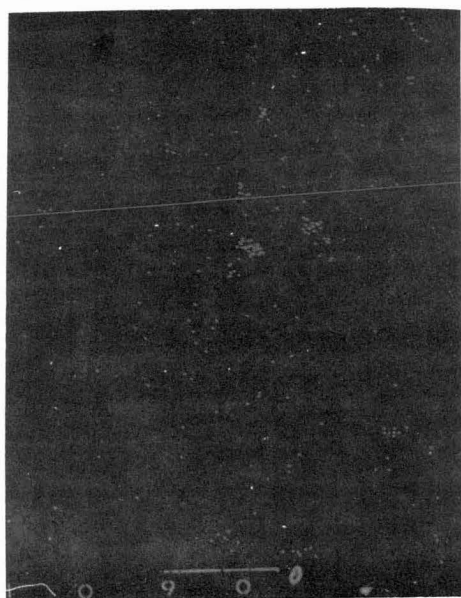


Fig.9-Imagem de Raios-X da fig.7, cálcio

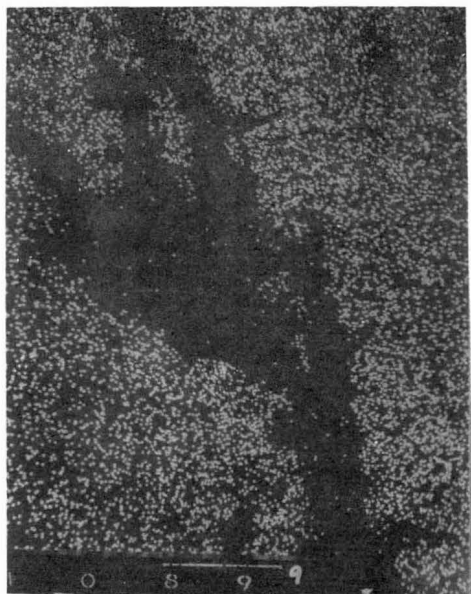


Fig.10-Imagem de Raios-X
da fig 7, ferro

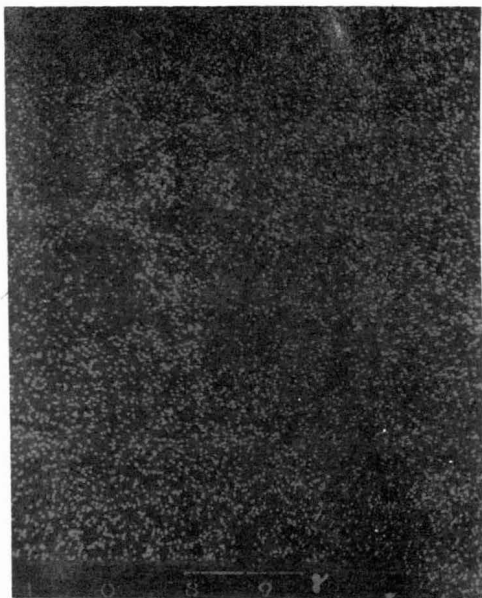


Fig.11-Imagem de Raios-X
da fig 7, silicio

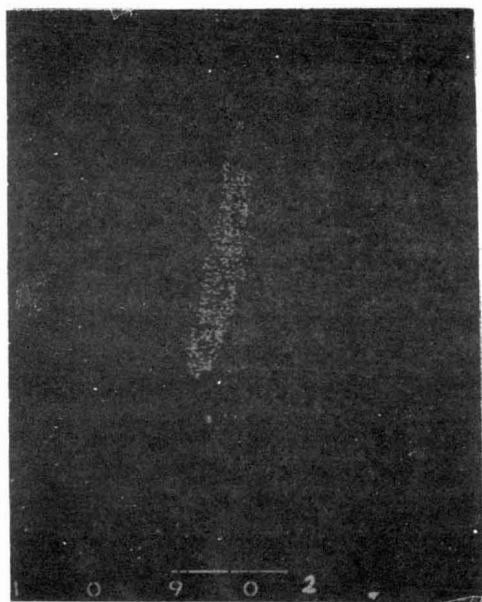


Fig.12-Imagem de Raios-X
da fig 7, cerio

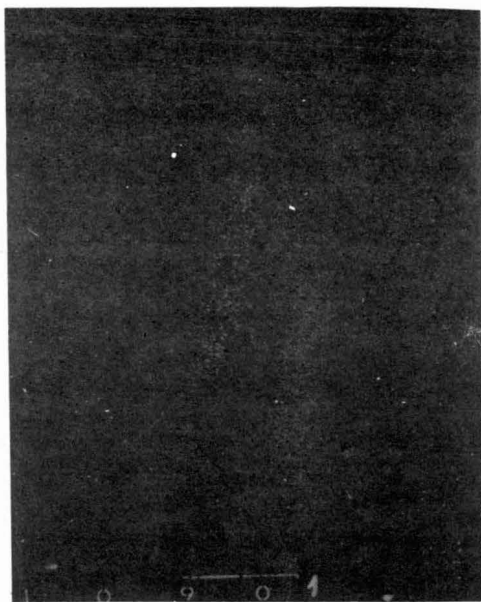


Fig.13-Imagem de Raios-X
da fig 7, lantânio

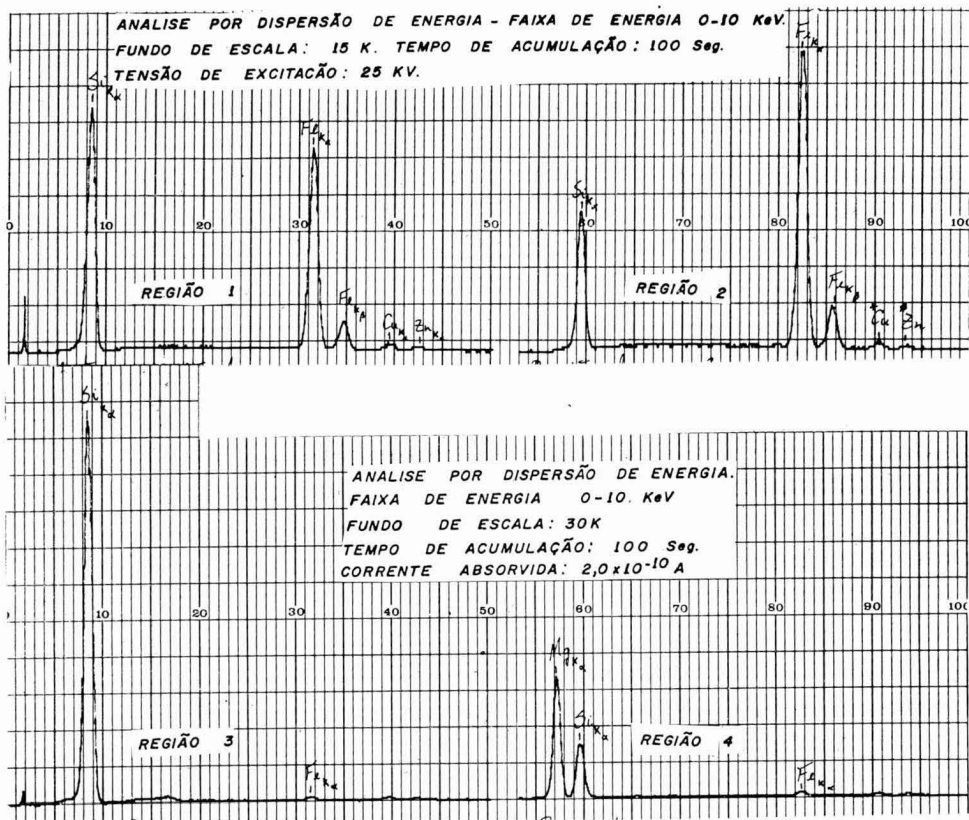


Fig.14 - Análise por microsonda das regiões assinaladas 1 a 4 da figura 6.

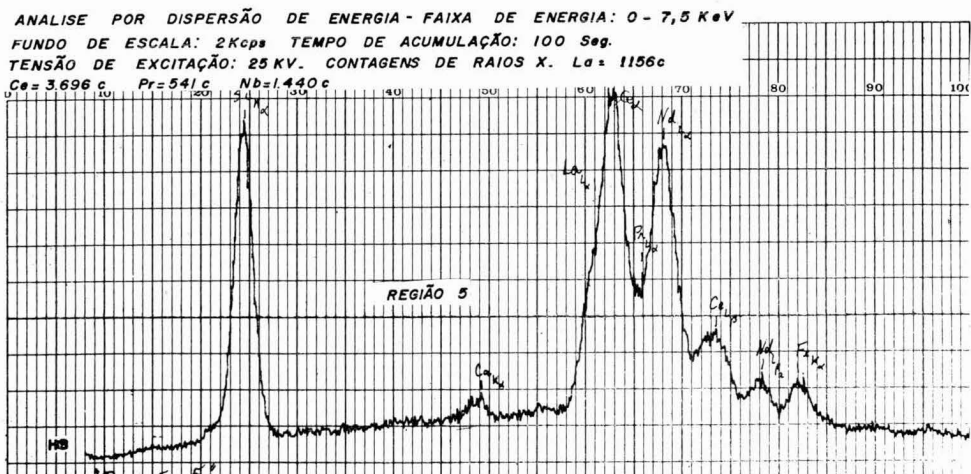


Fig 15 - Análise por microsonda da região 5 da figura 6.

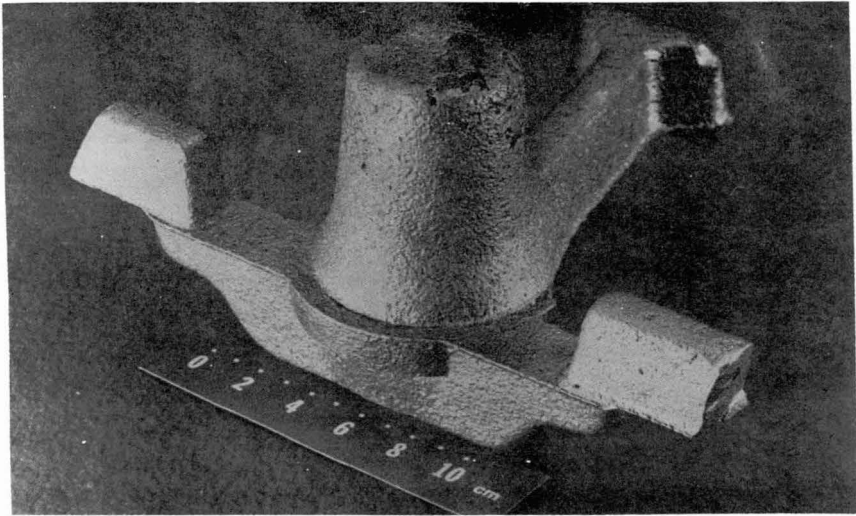


Fig.16 - Centrífuga utilizada para evitar a ocorrência de escória em peças vazadas no processo "In-Mold".

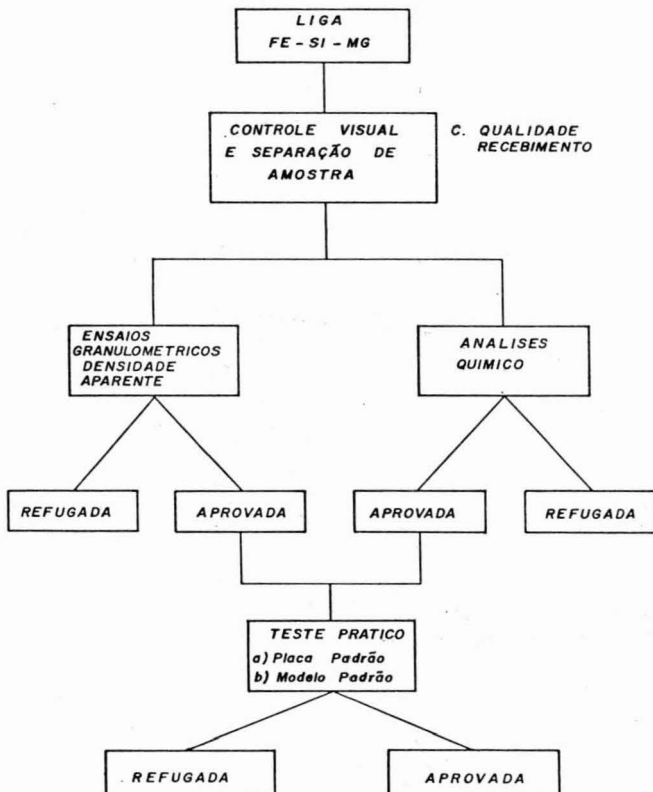


Fig.17 - Etapas de controle de liga nos testes de recebimento.

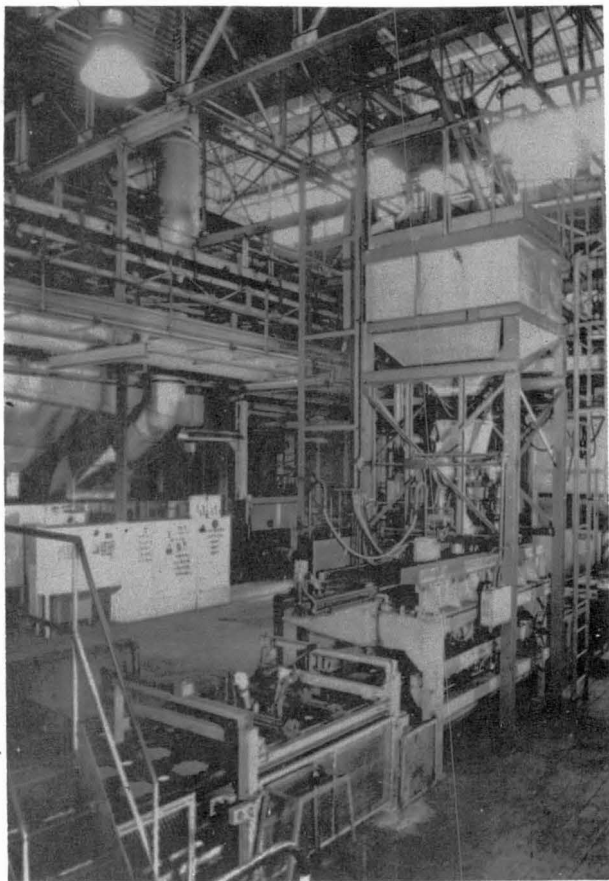


Fig.18 - Linha de produção, mostrando o dispositivo de dosagem e controle da liga nodulizante.



Fig.19 - Dispositivo de controle automático da liga nodulizante.

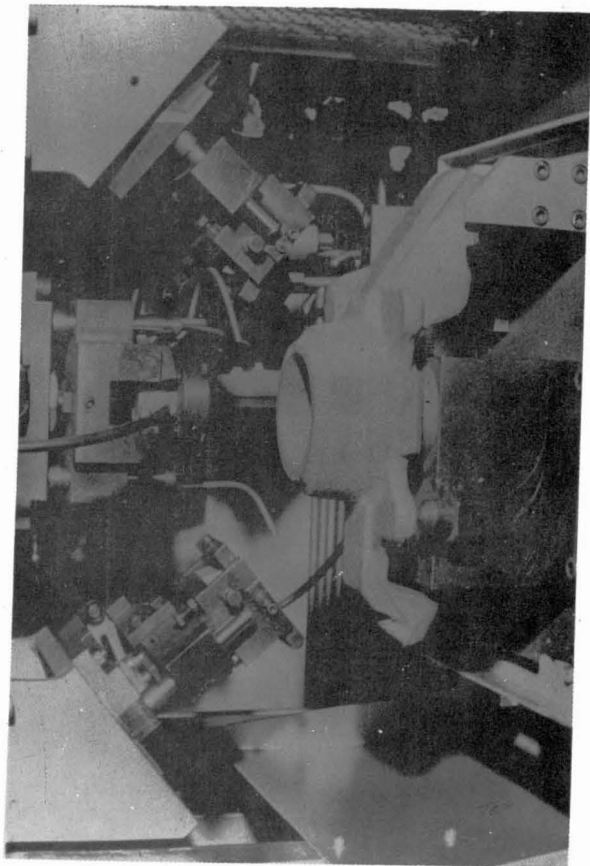


Fig.20 - Dispositivo de controle ultrasônico de uma pega, vazada no sistema "in-mold".

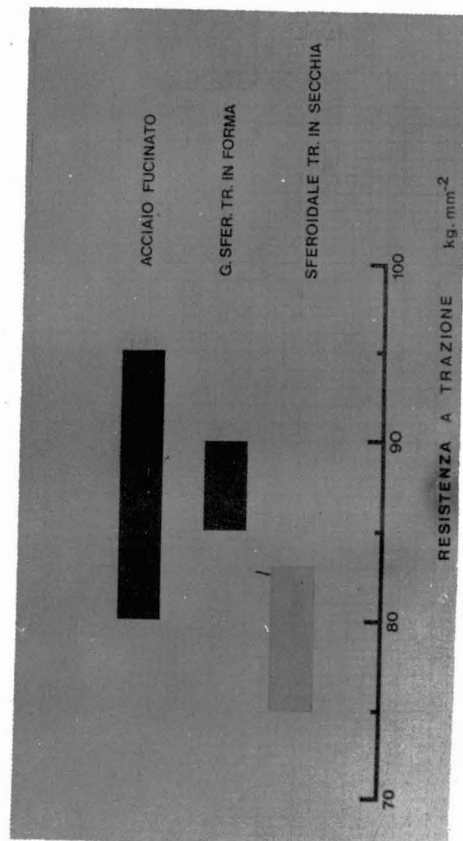


Fig.21 - Característica mecânica de resistência a tração obtida entre o aço C40 - ferro nodular obtido pelo processo "In-Mold" e pelo processo "Sandwich".

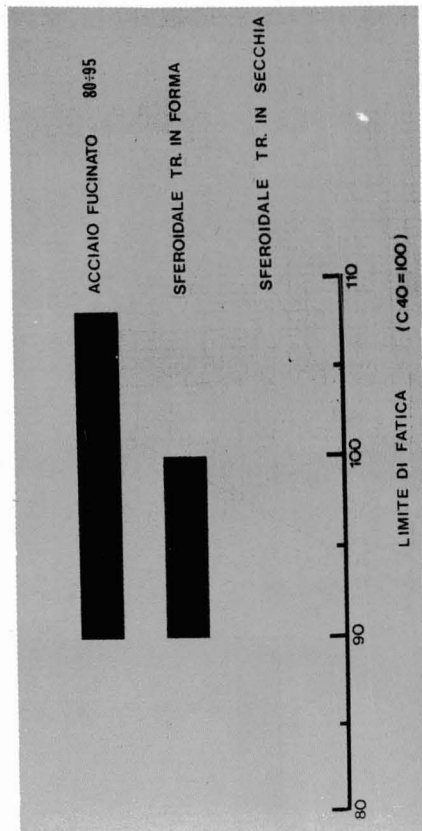


Fig.22 - Valores obtidos para limites de fadiga entre os distintos processos, (aço C40) forjado e ferro fundido nodular "In-Mold" e "Sandwich".

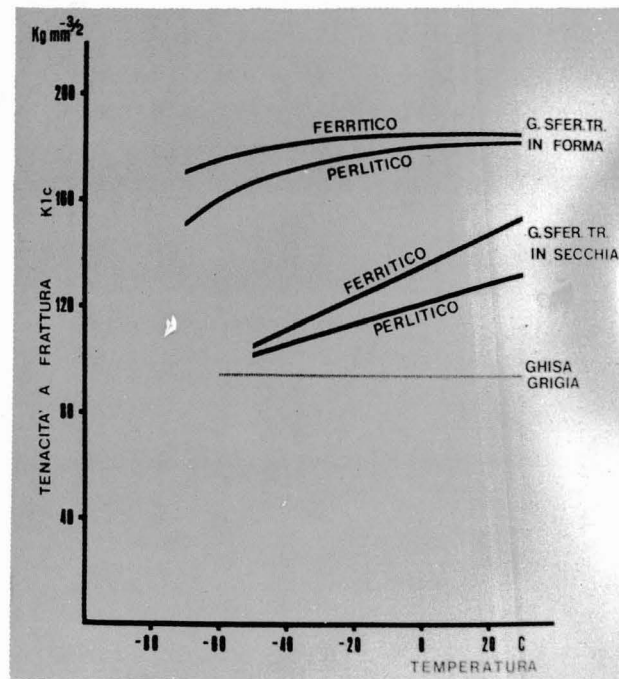


Fig.23 - Valores obtidos com a tenacidade a tratura segundo método ASTM - E - 399/72 para ferros fundidos nodulares perlíticos ou ferríticos, pelos processos "In-Mold" e "Sandwich".