

UTILIZAÇÃO DE COMPONENTES DE AÇO CALDEADOS EM FERRO FUNDIDO NODULAR COMO PARTE INTEGRANTE DE UMA PEÇA ^[1]

Leandro Pereira de Souza^[2]
Fernando César Lee Tavares^[3]
Yelson Natal Duboc^[4]

RESUMO

Quando dois metais são colocados em contato e um aquecimento localizado é estabelecido na interface, podemos observar a ocorrência de alguns fenômenos que podem propiciar um caldeamento entre as partes.

No presente trabalho, desenvolvido em parceria com a Thyssenkrupp Fundições LTDA, objetivou-se estudar o caldeamento de uma chapa de aço em meio ao ferro fundido nodular, sendo este, inicialmente, no estado líquido e a chapa no estado sólido. A chapa de aço é colocada dentro de um molde de areia e em seguida o ferro fundido líquido é vazado para seu interior. A energia de ativação do processo de caldeamento vem do sobreaquecimento do ferro para o vazamento, sendo também de suma importância, a preparação da superfície da chapa.

Observou-se na micrografia, que o aço de matriz ferrítica, enriqueceu em perlita devido à difusão do carbono proveniente do ferro fundido nodular. Houve também uma faixa na região de contato do aço com o ferro fundido, onde a matriz perlítica apresentou carboneto no contorno de grão.

Os resultados mostraram que, em função da limitação da temperatura máxima de vazamento do ferro fundido, o caldeamento é difícil de ser realizado mas, após terem sido testados alguns tipos de preparação da superfície da chapa, o uso de um estanhamento eletrolítico se mostrou mais efetivo, favorecendo o caldeamento. Com o estanhamento das chapas foram obtidos os melhores resultados nos ensaios realizados.

Palavra chave

Caldeamento

- [1] – V Seminário de Fundição – 17 a 19 de maio de 2004 – Salvador – Ba.
- [2] – Engenheiro de Processo de Fundição/Thyssenkrupp Fundições
- [3] – MSc. Engº Metalúrgico - Chefe de Engenharia/Thyssenkrupp Fundições
- [4] – MSc. Engº Metalúrgico - Prof. da Universidade Federal Fluminense

1 - INTRODUÇÃO

A união dos metais vem de um passado distante. O uso de chapas de aço para estabelecer a união entre duas peças em ferro fundido está sendo estudado como uma alternativa para produção de peças. Além disso, o caldeamento de chapas de aço em ferro fundido pode ter outras aplicações, como por exemplo, em peças que necessitam de resistência ao desgaste. Em determinada região podem ser produzidas em ferro fundido, sendo que na região onde se deseja maior resistência, faz-se o uso de uma chapa de aço caldeada. A chapa de aço pode ser devidamente preparada para resistir ao desgaste, enquanto que o restante da peça, em ferro fundido, não necessita ter tal resistência.

A poucos anos atrás, a soldagem de ferros fundidos era considerado inviável. Hoje em dia esse conceito vem mudando mas, mesmo assim, é necessário cuidado e atenção especial para esse tipo de soldagem.

O ferro fundido é relativamente mau condutor de calor, logo, os aquecimentos localizados causam expansões que resultam em tensões térmicas elevadas. Sendo este um metal com tenacidade e ductilidade relativamente baixa, pode trincar ou mesmo fraturar, quando sujeito às tensões térmicas oriundas de solda.

Quando se solda a frio uma peça em ferro fundido, tensões térmicas ocorrem. O primeiro é um aquecimento rápido, seguido de um resfriamento também muito rápido do metal fundido na pequena poça de fusão, cujo calor é logo absorvido pela massa fria circundante. Essas mudanças de temperatura em uma liga metálica sensível ao trincamento, explica a dificuldade em soldá-lo. A absorção do carbono é outra causa de trincamento no cordão de solda. Em grande parte, no processo de soldagem há diluição do metal base no metal de solda e, embora os eletrodos utilizados na soldagem com eletrodos revestidos de ferro fundido sejam de baixo teor de carbono, o metal de solda absorverá carbono suficiente para tornar-se quebradiço. Isso é mais verdade quanto mais espesso for o cordão de solda.

Os ferros fundidos de grafita lamelar e esferoidal, necessitam, em quase todos os casos onde há fusão do metal base, de cuidados metalúrgicos e térmicos particulares e mesmo assim, dentro da junta soldada dos ferros fundidos de grafita esferoidal, pode-se não conseguir obter características mecânicas equivalentes àquelas do material base.

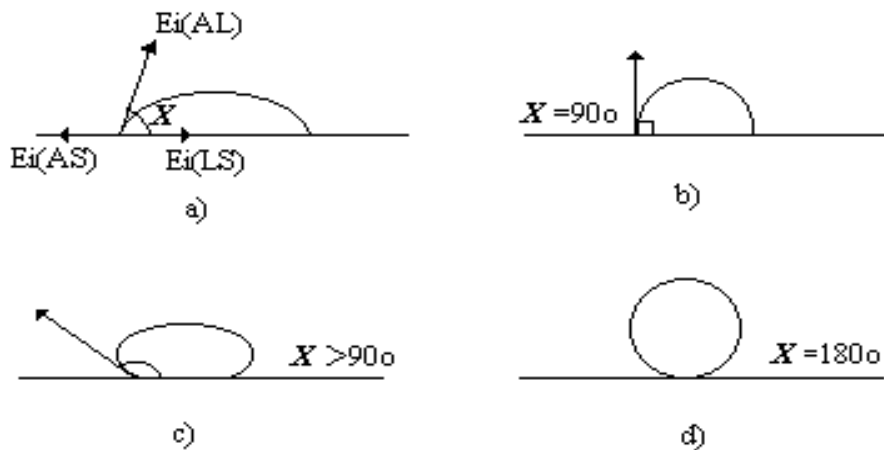
Devido as altas temperaturas e a velocidade de resfriamento, há uma modificação na estrutura da junta soldada, que tem como principal efeito um maior endurecimento e fragilidade do material. Um pré aquecimento e posterior tratamento térmico são necessários.

A soldabilidade dos aços depende do seu teor de carbono e da sua liga. A característica de soldabilidade de um aço é essencialmente determinada pela possibilidade de soldar sem incidentes, nem dificuldades técnicas, consecutivas à formação de zonas duras e frágeis, de crescimento de grãos, precipitação de carbonetos complexos, de trincas e etc.. Os aços mais facilmente soldados são os de teor de carbono na ordem de 0,15 a 0,20% no máximo. Um aço pode ser não soldável a frio mas plenamente soldável com a utilização de um pré-aquecimento, portanto à

quente. O pós-aquecimento não é normalmente necessário, apenas promover um resfriamento lento, como no caso de fundidos, pode ser suficiente.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Colocando uma gota de líquido sobre uma superfície sólida, podemos observar que o líquido pode se espalhar inteiramente sobre a superfície sólida, ou permanecer, caso não molhe a superfície do sólido, na forma de gota. Na figura abaixo, são mostradas as formas que a gota assume à medida que decresce a capacidade do líquido de molhar a superfície sólida.



$$E_i(AS) = E_i(LS) + E_i(AL) \times \cos X$$

X = ângulo de contato

Figura 01: Uma gota de um líquido em contato com uma superfície sólida.

$E_i(AS)$ = tensão interfacial ar – sólido;
 $E_i(LS)$ = tensão interfacial líquido sólido;
 $E_i(AL)$ = tensão interfacial ar – líquido.

O ângulo de contato é uma medida conveniente da molhabilidade de uma superfície.

O trabalho de adesão será então:

$$T(LS) = E_i(AL) + E_i(AS) - E_i(LS) \quad (2.1)$$

Observando a figura, verificamos que o ângulo de contato é uma medida da molhabilidade de uma superfície sólida por um líquido.

Quando o ângulo de contato é igual a zero, se observa que o trabalho de adesão líquido-sólido iguala ou supera o trabalho de coesão do líquido. Em outras palavras o

líquido se espalha pela superfície do sólido quando as forças de atração sólido-líquido igualam ou superam as forças de atração líquido-líquido.

Quando o ângulo for 180° , é o caso limite no qual não há adesão entre as duas fases.

Para realizar o caldeamento, é necessário que o ferro líquido molhe a chapa de aço. A molhabilidade é um fenômeno que está também associado à difusão e podemos defini-la como a capacidade que um líquido tem de se espalhar sobre a superfície de um sólido.

Para que a gota de metal de adição (ferro líquido) molhe o metal base (chapa de aço), há necessidade que a temperatura da chapa de aço seja elevada até uma certa temperatura, afim de que o ferro líquido se espalhe e caldeie normalmente, agindo fundamentalmente por difusão. Alguns fatores influenciam o caldeamento, tais como:

- temperatura de pré-aquecimento da chapa;
- tensão superficial do metal líquido;
- temperatura de vazamento do metal líquido;
- viscosidade do metal líquido.
-

2.1 - Pré-aquecimento:

A finalidade do pré-aquecimento, assim como nos processos de soldagem, é diminuir o gradiente térmico entre o ferro líquido e a chapa de aço. Ele irá agir no sentido de diminuir a velocidade de resfriamento.

2.2 - Temperatura de vazamento do metal líquido:

Quanto maior a temperatura de vazamento maior é a possibilidade de caldeamento.

2.3 - Viscosidade do metal líquido:

Quanto mais fluido melhor a penetração e mais fácil o ferro irá se espalhar sobre a chapa de aço.

Em resumo, deve-se satisfazer algumas condições básicas para o processo:

- ponto de fusão do fundido mais baixo possível;
- metal líquido deve molhar facilmente o metal base;
- evitar a formação de materiais frágeis.

Sendo este processo um fenômeno de superfície, é muito importante a preparação e conservação da mesma. A molhabilidade é influenciada pelo grau de acabamento e limpeza, além da temperatura e fluidez do metal líquido. Na brasagem de ferros fundidos, vários métodos tem sido usados na preparação da superfície, porém, somente alguns tem sido bem sucedidos. O jateamento de abrasivos, como granalha de aço ou areia grossa, tem promovido resultado aceitável na preparação da superfície de ferro fundido dúctil e maleável, mas raramente adequado para o ferro fundido cinzento. Outros métodos tem sido usados com moderado sucesso, incluindo desoxidação e tratamento químico.

2.4 - Tratamentos de superfície^[6]:

Os principais tipos de tratamentos de superfície de interesse industrial são os térmicos, os de difusão, os de bombardeamento iônico, os mecânicos e os físico-químicos. Eles modificam as características da superfície, deixando-as mais adequadas para a utilização do processo que se deseja. Na realidade industrial, a mais vasta gama de aplicações de tratamentos de superfícies e revestimentos se destina a proteção e melhoria de propriedades de superfícies ferrosas e não ferrosas.

2.5 - Tratamentos mecânicos^[6]:

Esse tratamento inclui todos os tratamentos que atuam sobre a superfície a tratar com ações de natureza mecânica, incluindo o bombardeamento com micro esferas (shotpeening) e todos os processos de decapagem de superfícies metálicas destinadas a revestimentos. A técnica de pulverização catódica (sportinhg), possibilita a aplicação de revestimentos dos mais diversos materiais sob diferentes tipos de substrato, permitindo assim trabalhar em função das propriedades mecânicas (atrato, proteção corrosiva, dureza, proteção ao desgaste, etc.).

2.6 - Tratamentos químicos e físico-químicos:

Fosfatização: consiste na adição de uma camada de fosfato à superfície metálica. A camada de fosfato inibe processos corrosivos e constitui-se quando aplicada em camada fina e uniforme, em uma excelente base para pintura em virtude de sua rugosidade^[6].

Estanhagem: consiste em cobrir com uma camada de estanho a superfície metálica. A camada de estanho inibe processos corrosivos e constitui-se na aplicação de uma fina e uniforme camada. De acordo com o artigo “Seleção e efeitos gerais de elementos de liga em ferros cinzentos e nodulares”, da ABIFA, o estanho é usado como promotor da perlita. A dureza, a resistência e a resistência ao desgaste aumentam num ferro parcialmente ferrítico. O estanho é um perlizador extremamente eficaz mas sua maior desvantagem está no fato de reduzir a tenacidade^[5].

Na preparação das superfícies não podem existir matérias estranhas tais como óleos, gorduras, produtos de corrosão, fluxos de solda, etc.. Isto porque interfere nas forças de natureza química, físico-química e mecânica que atuam na interface.

Limpeza Química: são utilizados meios químicos como solventes, ácidos, detergentes que limpam e provocam um “ataque” na superfície beneficiando o caldeamento.

Limpeza Mecânica: é o método mais usual e utiliza meios mecânicos para efetuar a limpeza. Lixamento manual, lixadeiras, rebolos de esmeril, rebolos de vídria, jateamento de areia, esfera de vidro ou de aço, utilização de escovas de aço são alguns exemplos.

3 - PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho tem por objetivo unir peças através da utilização de componentes de aço, caldeados em ferro fundido nodular como parte integrante de uma peça.

A experiência teve início da seguinte forma:

Primeiro foi desenvolvido um projeto definindo o modelo, os canais, os massalotes e o número do “TF” (entende-se por TF uma caracterização da peça). Em seguida determinado a placa na qual seria acoplado como “carona” (entende-se por carona aquele que é moldado junto com outro modelo e na mesma placa).

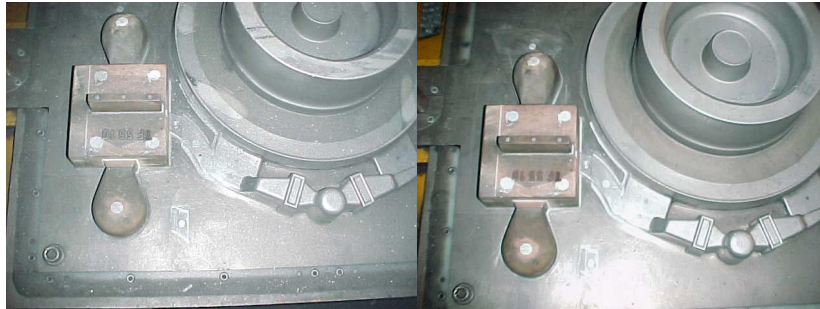


Foto destacando a posição do modelo na placa, a qual foi acoplado como carona e realizado as experiências



Foto destacando a parte superior da amostra; (b) – Foto destacando a parte inferior da amostra (dimensões 150x150x60mm).

Tendo acertado todos os detalhes sobre o modelo, foi agendado uma data para fundir a primeira amostra. O material, ou o tipo de ferro, ficou amarrado com o do “TF” no qual o modelo de experiência foi acoplado. Ficou definido que para a primeira experiência seriam fundidas três amostras identificadas como “amostra 01”, “02” e “03”.

O aço utilizado para a realização das experiências tinha 0,1%C.

As chapas de aço, com dimensões padrão de 100x100x12mm, foram estanhadas, usinado um corpo de prova reduzido para ensaio de tração e medido dureza.

Limite de Resistência	412 N/mm ²
Limite de Escoamento	289 N/mm ²
Alongamento	38,8 %
Dureza	99,3 HB

A composição química do ferro fundido nodular era a seguinte

Elemento	Porcentagem	Elemento	Porcentagem
Carbono	3,57	Níquel	0,0039
Silício	2,23	Alumínio	0,0054
Manganês	0,2815	Titânio	0,0072
Enxofre	0,013	Bismuto	0,0041
Cromo	0,0279	Boro	< 0,001
Cobre	0,2119	Zinco	0,0303
Magnésio	0,0357	Cério	< 0,001
Fósforo	0,0375	Lantânio	< 0,001
Estanho	0,0037	Vanádio	0,0017
Molibdênio	0,0015	Chumbo	< 0,001
Zircônio	0,0027	Ferro	93,5

O forno utilizado para fundir as amostras era a indução, e com revestimento ácido (sílico aluminoso), com capacidade para aproximadamente 14 toneladas.

A máquina para a moldagem a areia verde chama-se Künker Wagner.

A temperatura de início de vazamento foi de 1448° C e o tempo para desmoldagem foi o normal da máquina, ou seja, 80 minutos.

Após desmoldagem, as amostras foram jateadas com granalha de aço para retirada da areia e em seguida foi feito ensaio de ultra-som. As amostras "01" e "02" foram enviadas para tratamento térmico enquanto a amostra "03" foi cortada, feito líquido penetrante na face do corte, usinado corpos de prova para ensaio de tração, medido dureza e ensaiado. O tratamento térmico realizado nas amostras "01" e "02" foi uma normalização, com aquecimento de 150° C por hora até 900° C, encharque de 2 horas e 30 minutos, resfriamento no forno de 60° C por hora até 780° C, estabilização nessa temperatura durante 30 minutos e em seguida resfriamento ao ar. Após obtido todos os dados da primeira experiência e visto a necessidade de resultados melhores, foi preparado a realização da segunda experiência. Nesta usou-se um procedimento diferente na preparação das duas chapas de aço. Na primeira chapa foram feitos furos que atravessaram toda sua espessura e a segunda foi fresada nos dois lados em todo seu comprimento. Na seqüência, as chapas de aço foram jateadas com granalha de vidro e programado uma nova data para fundir e segunda experiência.

Com tudo pronto, no dia 06 de fevereiro de 2003 foi fundida a segunda experiência.

A temperatura de vazamento foi 1455° C e o tempo de desmoldagem foi o normal da máquina.

Após desmoldagem as duas amostras foram jateadas com granalha de aço e levadas para ensaio de ultra-som. Logo após foram cortadas para usinagem do corpo de prova para ensaio de tração além de ter sido feito líquido penetrante na face do corte.

Após terminada a segunda experiência decidiu-se mudar o canal de ataque, o qual era pelo massalote, atacando diretamente no meio da peça. Com isso, o ferro

líquido passou a incidir sobre a chapa de aço. Para essa mudança foi preciso alterar também a posição do modelo na placa. Essa mudança visou aumentar a quantidade de calor na chapa, pois o metal líquido iria encher o molde na direção da chapa, melhorando assim o caldeamento.

Feito as devidas modificações foi agendado a terceira experiência e no dia 22 de maio de 2003 foi fundido duas amostras. Nessa experiência as chapas de aço sofreram apenas um jateamento com granalhas de aço na preparação de sua superfície. As condições de vazamento foram as seguintes:

A temperatura de retirada de ferro do forno foi de 1552° C, a de início de vazamento foi de 1461° C e a temperatura final foi de 1435° C. O tempo de desmoldagem foi de cinco horas, ou seja, as amostras permaneceram na linha de vazamento durante o intervalo de turnos. Faz-se necessário observar que para esta experiência tanto a temperatura de vazamento quanto o tempo de desmoldagem foram maiores em relação às outras experiências anteriores. O motivo foi de se tentar melhorar, com isso, o caldeamento.

Mas, no entanto, tivemos problemas durante a moldação. Após desmoldagem e jateamento das amostras verificou-se que nas mesmas haviam defeitos provenientes da areia.

Um motivo que pode ter interferido nos resultados do caldeamento foi o fato de as chapas de aço não terem sido estanhadas. Tendo em vista isso optou-se por agendar a quarta experiência. Nessa foram fundidas quatro amostras sendo as quatro chapas de aço estanhadas. Dessa forma condições de vazamento foram as seguintes:

A temperatura de retirada de ferro do forno foi de 1549° C, a de início de vazamento foi de 1438° C e a temperatura final foi de 1401° C. O tempo de desmoldagem foi o mesmo da terceira experiência, ou seja, as amostras foram fundidas como última obra permanecendo no intervalo de turnos.

Após realizados os ensaios mecânicos decidiu-se enviar as amostras para tratamento térmico. Foi feito uma normalização aquecendo 150°C por hora até 900°C com um tempo de encharque de 2h e 30 minutos, resfriando no forno 60°C por hora até 780°C, estabilizando durante 30 minutos e em seguida resfriando ao ar. Foi feito ainda uma microdureza nas amostras da terceira e quarta experiências, com o intuito de analisar a influência do estanho na difusão do carbono.

4 - RESULTADOS E CONCLUSÕES:

4.1 – Chapa sem Estanhagem

4.1.1 - Bruto de Fusão

Metal Base

Limite de Resistência	570 N/mm ²
Limite de escoamento	350 N/mm ²
Alongamento	11,3 %
Dureza	180 HB

Tabela 16: Propriedades mecânicas da amostra “06” corpo de prova retirado somente da parte em ferro fundido.

Interface ferro-aço

Limite de Resistência	164 – 196 N/mm ²
Limite de Escoamento	-- -- -- N/mm ²
Alongamento	-- -- -- %
Dureza na interface ferro-aço	133 – 133 HB

Tabela 15: Propriedades mecânicas da amostra “06” corpo de prova retirado da interface ferro-aço.

Limite de Resistência	278– 173 N/mm ²
Limite de Escoamento	-- -- -- N/mm ²
Alongamento	-- -- -- %
Dureza na interface ferro-aço	135 – 135 HB

Tabela 17: Propriedades mecânicas da amostra “07” corpo de prova retirado da interface ferro-aço.

4.2 – Chapa com Estanhagem

4.2.1 - Bruto de Fusão

Metal Base

Limite de Resistência	600 N/mm ²
Limite de Escoamento	383 N/mm ²
Alongamento	9,7 %
Dureza	187 HB

Tabela 22: Propriedades mecânicas da amostra “09” corpo de prova retirado somente da parte em ferro fundido.

Interface ferro-aço

Limite de Resistência	236 N/mm ²
Limite de Escoamento	-- -- -- N/mm ²
Alongamento	-- -- -- %
Dureza na interface ferro-aço	138 HB

Tabela 23: Propriedades mecânicas da amostra “09” corpo de prova retirado da interface ferro-aço.

Limite de Resistência	324 N/mm ²
Limite de Escoamento	-- -- -- N/mm ²
Alongamento	-- -- -- %
Dureza na interface ferro-aço	127 HB

Tabela 24: Propriedades mecânicas da amostra “10” corpo de prova retirado da interface ferro-aço.

4.2.2 – Tratado termicamente Interface ferro-aço

Limite de Resistência	503 N/mm ²
Limite de escoamento	370 N/mm ²
Alongamento	4,9 %
Dureza na interface ferro-aço	172 HB

Tabela 27: Propriedades mecânicas da amostra “09” corpo de prova retirado da interface ferro-aço após tratamento térmico.

Limite de Resistência	464 N/mm ²
Limite de escoamento	377 N/mm ²
Alongamento	6,1 %
Dureza na interface ferro-aço	170 HB

Tabela 28: Propriedades mecânicas da amostra “10” corpo de prova retirado da interface ferro-aço após tratamento térmico.



6 – CONCLUSÃO:

Para as condições ensaiadas, os resultados apresentados possibilitaram concluir que:

1 – As chapas de aço que foram estanhadas tiveram um melhor aquecimento.

2 – Houve um enriquecimento de perlita na matriz ferrítica da chapa de aço devido à difusão do carbono proveniente do ferro fundido.

3 – Na região de contato do aço com o ferro fundido, a matriz perlítica apresentou carboneto no contorno de grão. Um tratamento térmico, visando dissolver esses carbonetos, aumentou a resistência à tração na interface aquecida.

4 – No ferro fundido, uma faixa de perlita foi observada na região de contato com o aço, além da ausência de grafita nessa região.

5 – Com as fotos feitas no Microscópio Eletrônico de Varredura foi possível visualizar que as lamelas de perlita tinham continuidade entre o ferro e o aço.

6 – A utilização de chapas furadas e fresadas, não melhorou o aquecimento.

7 – Nas chapas de aço apenas jateadas com granalha de aço, os resultados dos ensaios mecânicos foram inferiores aos da chapa estanhada. Na análise metalográfica observamos uma microestrutura diferente. Essa diferença foi notada no

ferro fundido na região de contato com o aço. A matriz não mais apresentou a “faixa” de perlita na interface de contato, sendo observado grafita mais ferrita.

8 – Para evidenciar a influência do estanho, foi realizada outra experiência com as chapas de aço estanhadas e obtivemos um bom caldeamento. A microestrutura apresentou-se idêntica à da primeira experiência e em virtude da presença de carbonetos foi feito um tratamento térmico o que aumentou a resistência à tração na interface, melhorando ainda mais o caldeamento.

9 – Na microdureza realizada no aço, na região próxima à interface caldeada (amostras da terceira e quarta experiência), a dureza da chapa que não foi estanhada foi maior, ou seja, pode ter ocorrido uma maior difusão de carbono do ferro fundido para o aço. Já na chapa que foi estanhada, a dureza na mesma região foi menor, ou seja, o estanho pode ter atuado de forma a impedir que o carbono se difundisse em maior quantidade para o aço.

Assim, pelo que foi apresentado, é possível realizar o caldeamento de uma chapa de aço com ferro fundido nodular mas há também necessidade de maiores estudos sobre as diversas variáveis que influenciam o processo. Com os resultados obtidos, mesmo sabendo que há possibilidade de se melhorar, encerramos as experiências de caldeamento.

5 – REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] – SAUER, A.. Tecnologia da Soldagem. Departamento de Engenharia Metalúrgica – UFRJ – 1987.

[2] – MOZART. Física dos Metais.

[3] – RABOCKAI, Tibor. Físico Química de Superfícies. Secretaria Geral da Organização dos Estados Americanos, Programa Regional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – 1979.

[4] – HILL, Robert E. Reed. Princípios de Metalurgia Física, 2ª edição.

[5] – Associação Brasileira de Fundição – ABIFA. Seleção e efeitos gerais de elementos de liga em ferros cinzentos e nodulares – 1981.

[6] – ALMEIDA, Elisabete. Tratamentos de Superfícies. WAGNER, Emílio; BRANDI, Sérgio D. MELO, Básio. Soldagem Processos e Metalurgia.

[7] – Infosolda: http://www.infosolda.com.br/soldagem_por_difusao2.htm – Acessado em 06/03/2003.

ABSTRACT

When two metals are put in contact and located heating is established in the interface, we can observe the occurrence of some phenomenon that can propitiate a fusion welding between the parts.

In this work, developed in partnership with Thyssenkrupp Fundições Ltda, aimed to study the fusion welding of the steel plate in the middle of ductile cast iron, been this startly in the liquid state and the plate steel in a solid state. The plate steel is put inside a sand mold and after the liquid iron is poured inside. The activation energy of the fusion welding process comes from iron hot spot for the pouring, been very important the plate surface preparation.

Observed in the micrography that the steel ferritic matrix enriched in pearlite due the carbon diffusion originating from ductile cast iron. There was too a range in the steel contact region with cast iron where pearlite matrix presented carbide in the grain boundary.

The results showed that due the limitation of pouring maximum temperature of cast iron, the fusion welding is difficult to be realized but after have been tested some types of plate surface preparation, the use of a electrolytic tin-plating showed to be more effective, favouring the fusion welding. With the electrolytic tin-plating of the plates there were achieved the better results in the tests made.