

PMT-594

TRABALHO DE FORMATURA

# **ENSAIO**

# **CHARPY**

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800004064

Vasilios Stergiou  
No. U.S.P. 8230774  
Orientador: Hélio Goldenstein  
1993

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>2</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
<b>ENSAIOS DE IMPACTO DO TIPO CHARPY .....</b>	<b>5</b>
<b>FERROS FUNDIDOS DÚCTEIS OU NODULARES .....</b>	<b>6</b>
<b>PROCESSOS DE OBTENÇÃO DE FERROS FUNDIDOS NODULARES FERRÍTICOS .....</b>	<b>7</b>
<b>ENSAIO DE IMPACTO DE FERROS FUNDIDOS NODULARES .....</b>	<b>8</b>
<b>DESCRIÇÃO DO MATERIAL .....</b>	<b>11</b>
<b>SEQUÊNCIA DE OPERAÇÕES PARA A REALIZAÇÃO DE UM ENSAIO .....</b>	<b>12</b>
<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>13</b>
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>18</b>

# **INTRODUÇÃO**

Os ensaios de impacto tem sido utilizados como instrumento para uma melhor entendimento da tenacidade dos materiais. Antes da mecânica da fratura tornar-se uma disciplina científica, espécimes reais eram testados em laboratórios em condições que simulavam falhas estruturais, com claros problemas que este tipo de teste proporcionava. As variáveis que simulavam tais condições eram uma alta taxa de carregamento, uma concentração de tensões e um estado triaxial de tensões; que acabaram sendo encontradas em ensaios com corpos de prova entalhados.

Esses ensaios se desenvolveram portanto pela necessidade de uma melhor compreensão dos mecanismos da fratura frágil, em particular, e da fratura em geral. O conhecimento sobre a temperatura de transição de fratura dúctil à frágil é um fator importante na utilização de componentes estruturais, que devem ser utilizados em temperaturas sempre superiores à esta, para evitar a fratura. Assim, diversos tipos de ensaios de impacto com corpos de prova entalhados foram desenvolvidos para se determinar a tendência de um material metálico ou não, se comportar de maneira frágil. Além disso, estes tipos de teste detectavam diferenças entre materiais, que não eram detectadas em ensaios de tração.

Nos Estados Unidos foi padronizado então o ensaio Charpy através da norma ASTM E23 (4), que discorre sobre as formas e medidas dos corpos de provas, tratamento de dados, suportes e garras para os corpos de prova, aferições e outros problemas relativos ao ensaio.

Os principais fatores que determinam um comportamento frágil de um metal são um estado triaxial de tensões; baixas temperaturas de utilização; e uma grande taxa de deformação ou uma taxa de carregamento rápida. Porém, não é necessário que esses fatores ocorram simultaneamente para que ocorra uma fratura frágil. A maioria das fraturas frágeis que ocorrem em serviço são devidas ou a um estado triaxial de tensões ou a baixas temperaturas de utilização.

Nesse trabalho será dado um enfoque maior aos valores de energia absorvida em um ensaio de impacto, porém serão feitas também algumas considerações à respeito da fratura do material utilizado.

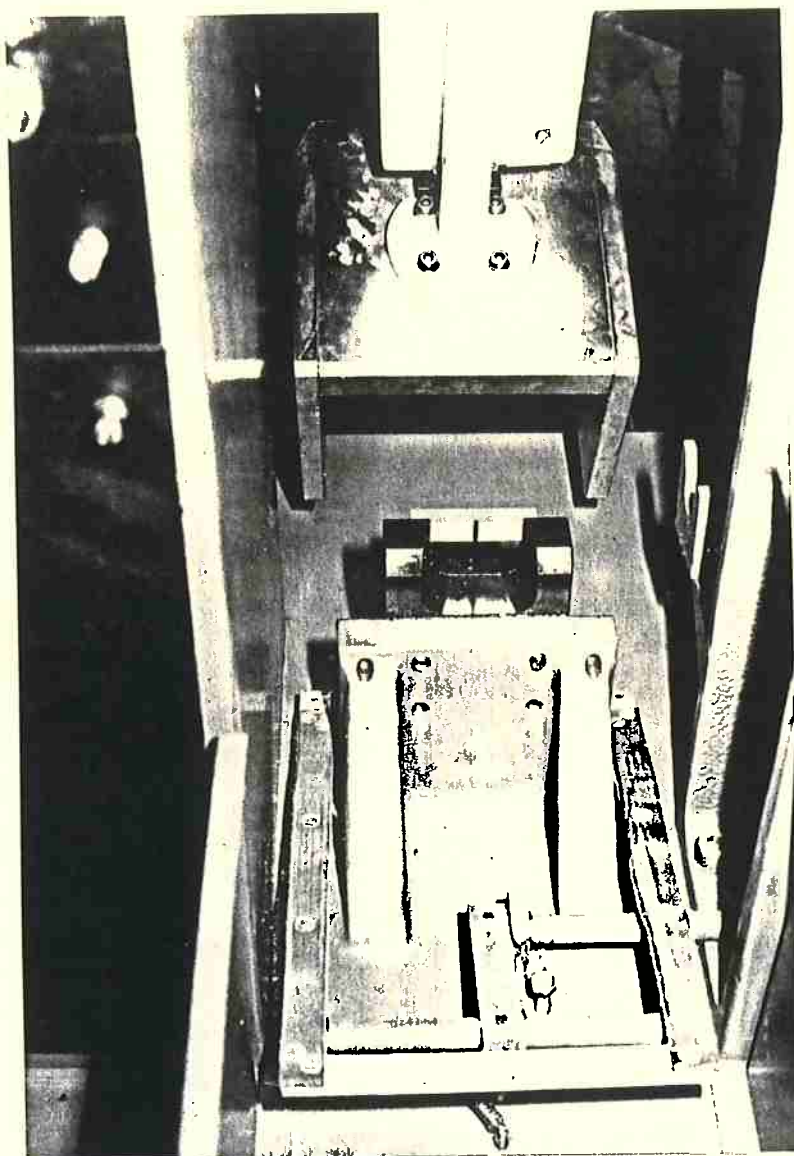
## **OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho consiste na calibração de uma máquina de ensaios de impacto, através de um ensaio do tipo Charpy. A máquina é fabricada pela indústria Heckert (Alemanha), e pode realizar ensaios de impacto do tipo Charpy e Izod, possuindo para esse fim martelos com capacidade para ensaios de 15 J e 50 J. Neste trabalho foi utilizado o martelo de 50 J.

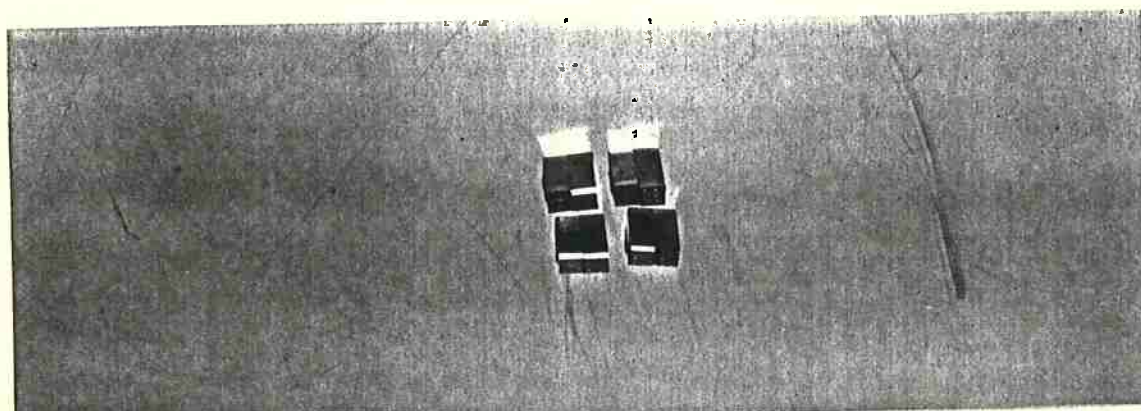
Os corpos de prova utilizados no trabalho foram de ferro fundido nodular ferrítico, fabricados e usinados no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas). Foram adotadas as medidas para calibração previstas na norma técnica D-256-92b (7), e feitos ensaios comparativos em uma máquina calibrada, no IPT, a partir de corpos de prova do mesmo lote. As figuras 1, 2 e 3 mostram a máquina de ensaio de impacto e os corpos de prova utilizados.



**FIG.1** Aspectos da máquina de ensaio Charpy. Notar o botão de operação ao lado do display.



**FIG. 2 Aspectos da máquina de ensaio Charpy: suporte e martelo.**



**FIG. 3 Corpos de prova ensaiados.**

# **ENSAIOS DE IMPACTO DO TIPO CHARPY**

O ensaio de impacto do tipo Charpy consiste numa flexão por impacto produzida por um martelo colocado na extremidade de um pêndulo sobre um corpo de prova padronizado pela norma E-23 da ASTM (4) para aços e ferros fundidos, entalhado de forma à que a ruptura ocorra devido ao estado de tensões triaxial produzido por esse entalhe. A energia absorvida por esse corpo de prova durante o impacto é lida no diretamente no marcador, e quanto maior for a energia absorvida, menos frágil será o material para este tipo de solicitação mecânica. Este tipo de ensaio permite um teste severo para a fratura frágil.

Os corpos de prova tem uma seção lateral quadrada com 10 mm de lado, e um comprimento de 55 mm. O entalhe em V é feito exatamente no centro do corpo de prova, com ângulo de 45 graus e profundidade de 2 mm. O corpo de prova com essas características é colocado num suporte de modo à que o martelo bata no lado contrário ao do entalhe. O pêndulo é levantado até atingir a sua capacidade máxima, e em seguida liberado, quando então ele realiza o impacto sobre o corpo de prova. A energia absorvida pelo corpo de prova não deve ser maior que 80% da capacidade máxima do pêndulo.

Esse ensaio resulta em uma medida da energia absorvida pela amostra, e não fornece evidências sobre o comportamento do material para choques em geral, pois não se ensaiam peças sob as condições observadas na prática (5). Apesar disso, um exame visual da fratura, aliado à energia absorvida pelo corpo de prova na fratura podem servir para análises de fratura em serviço desses materiais.

A grande vantagem da utilização do ensaio de impacto Charpy com entalhe em V é a sua relativa simplicidade, aliada à fácil obtenção de corpos de prova, que tem pequeno tamanho e custo. Além disto, o projeto dos corpos de prova permite que sejam realizados ensaios em materiais totalmente diferentes, que vão desde materiais mais frágeis até aços estruturais, e ainda permite comparar a resistência ao entalhe de diferentes tratamentos térmicos e de adições de elementos de liga. Porém ele também apresenta algumas limitações, como a falta de diferenciação entre a energia necessária para se iniciar a fratura e a necessária para se propagar a fratura.

A principal utilização do ensaio Charpy na engenharia está na seleção de materiais resistentes à fratura, através das curvas de temperatura de transição de fratura dúctil para frágil, que permitem selecionar um material que possua tenacidade suficiente quando este for exposto à condições severas de uso (6). Ele ainda é utilizado para se estudar as alterações na tenacidade devido à variação de composição química e nas propriedades físicas e mecânicas de um material. As típicas propriedades físicas de interesse são a microestrutura e o tamanho de grão, e as propriedades mecânicas são o limite de escoamento e a dureza.

Em muitas aplicações estruturais, o ensaio Charpy é usado como garantia de qualidade para diferentes aquecimentos para um mesmo aço. As diferenças entre aquecimentos nas propriedades de impacto podem ser amplas, e quando a segurança de seres humanos está envolvida, a prevenção de falhas é essencial. Exemplos claros desses usos está na indústria de vasos de pressão para usinas nucleares e na fabricação de pontes de aço (9).

## ***FERROS FUNDIDOS DÚCTEIS OU NODULARES***

Os ferros fundidos nodulares foram desenvolvidos a partir de ferros fundidos cinzentos e tem em comum com estes as faixas de composição química e os constituintes presentes em suas microestruturas ( grafita, ferrita , perlita ). Caracterizam-se pela sua ductilidade, tenacidade e resistência mecânica, propriedades que variam principalmente de acordo com a distribuição da grafita ao longo da estrutura. Nos ferros fundidos nodulares, a grafita apresenta-se esferoidizada, não interrompendo a continuidade da matriz, o que propicia uma melhor combinação de ductilidade e tenacidade em relação às estruturas com grafita em veios. Dentre as propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares, a de principal destaque é o limite de escoamento, que é mais elevado em ferros fundidos nodulares do que em outros ferros fundidos e até mesmo em aços carbono comuns que não contenham elementos de liga.

Uma das grandes vantagens dos ferros fundidos nodulares é a grande variação de combinações das propriedades mecânicas que pode ser obtidas, como por exemplo, limites de escoamento da ordem de 400 MPa para alongamentos de 20%, ou limites de escoamento de 700 MPa para

alongamentos de 5%. Essas diferentes propriedades podem ser obtidas através do controle das variáveis de processamento, da composição química, e da utilização de inoculantes.

## ***PROCESSOS DE OBTENÇÃO DE FERROS FUNDIDOS NODULARES FERRÍTICOS***

A esferoidização da grafita nos ferros fundidos nodulares é obtida através da adição controlada de alguns elementos no metal fundido, tais como o magnésio, cério e outros, que também anulam o efeito de outros elementos presentes, como o antimônio e o chumbo, que interferem no processo de nodulização (1).

Os agentes nodulizantes são em geral ligas a base de magnésio, de níquel ou ainda de magnésio, ferro e silício, que são adicionados no fundo da panela de vazamento imediatamente antes do metal fundido, e funcionando como inibidores de curta duração. Quando o metal fundido é vazado, o magnésio se vaporiza e atravessa o ferro líquido, diminuindo seu teor de enxofre e impedindo a formação de grafita. Assim, o ferro fundido se solidifica com a formação de cementita, que ao término da ação do nodulizante se decompõe, produzindo grafita que se distribui de forma esferoidal pelo metal.

A estrutura normalmente obtida no estado bruto de fusão é constituída de uma matriz perlítica com grafita esferoidal, podendo também apresentar ferrita ou cementita. Para que se obtenha a estrutura ferrítica é necessário proceder a um recozimento. O detalhamento do tratamento térmico utilizado nas amostras desse trabalho será feito posteriormente.

A seguir é mostrada a figura 4, que mostra a variação da energia de impacto em ensaios do tipo Charpy dependendo do tratamento térmico feito no ferro fundido nodular.

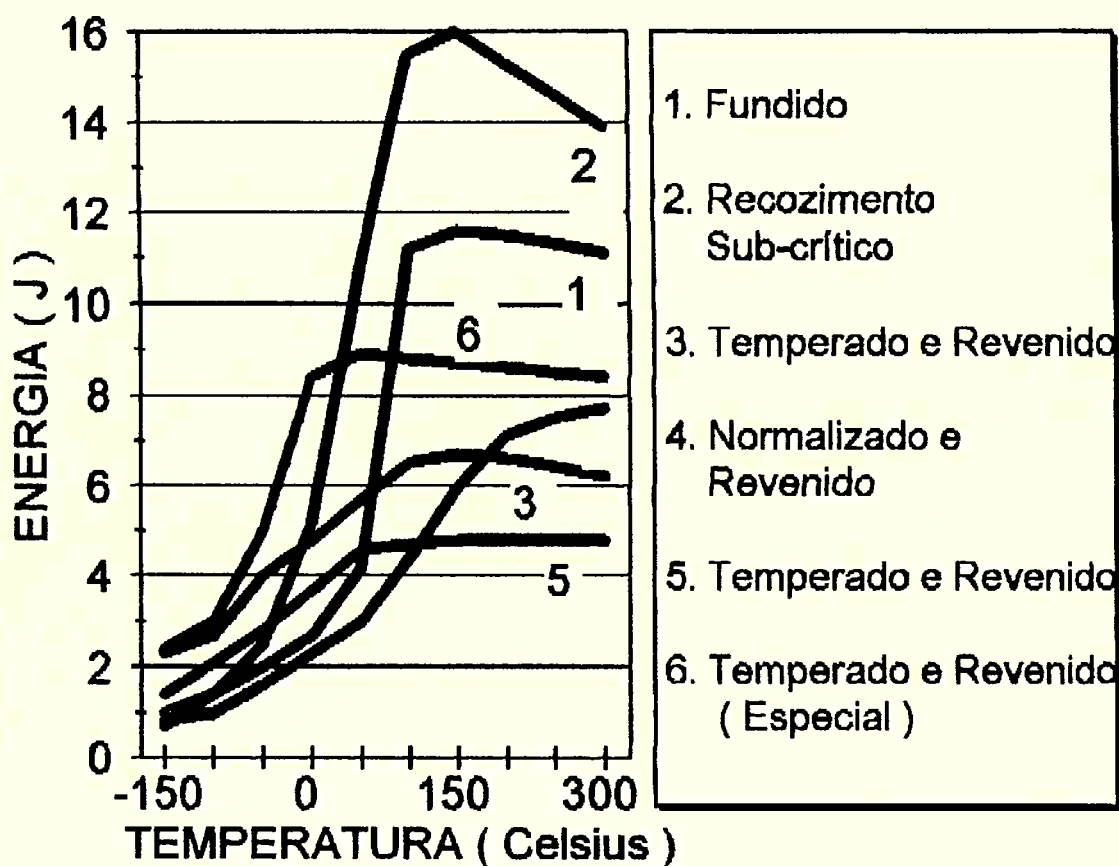


FIG.4 Efeito de diferentes tratamentos térmicos sobre a energia absorvida por ferros fundidos

## **ENSAIO DE IMPACTO DE FERROS FUNDIDOS NODULARES**

O ensaio Charpy tem sido usado por vários anos para caracterizar a energia absorvida por impacto e a temperatura de transição de ferros fundidos nodulares, e vários dados são conhecidos a respeito de seu comportamento nestes ensaios. A seguir, é mostrada a figura 5, que mostra a variação da energia de impacto com a temperatura para corpos de prova com e sem entalhe de ferros fundidos nodulares ferríticos. Com o aumento da temperatura, a fratura passa de um comportamento frágil, com clivagem, a um aspecto fibroso-dúctil.

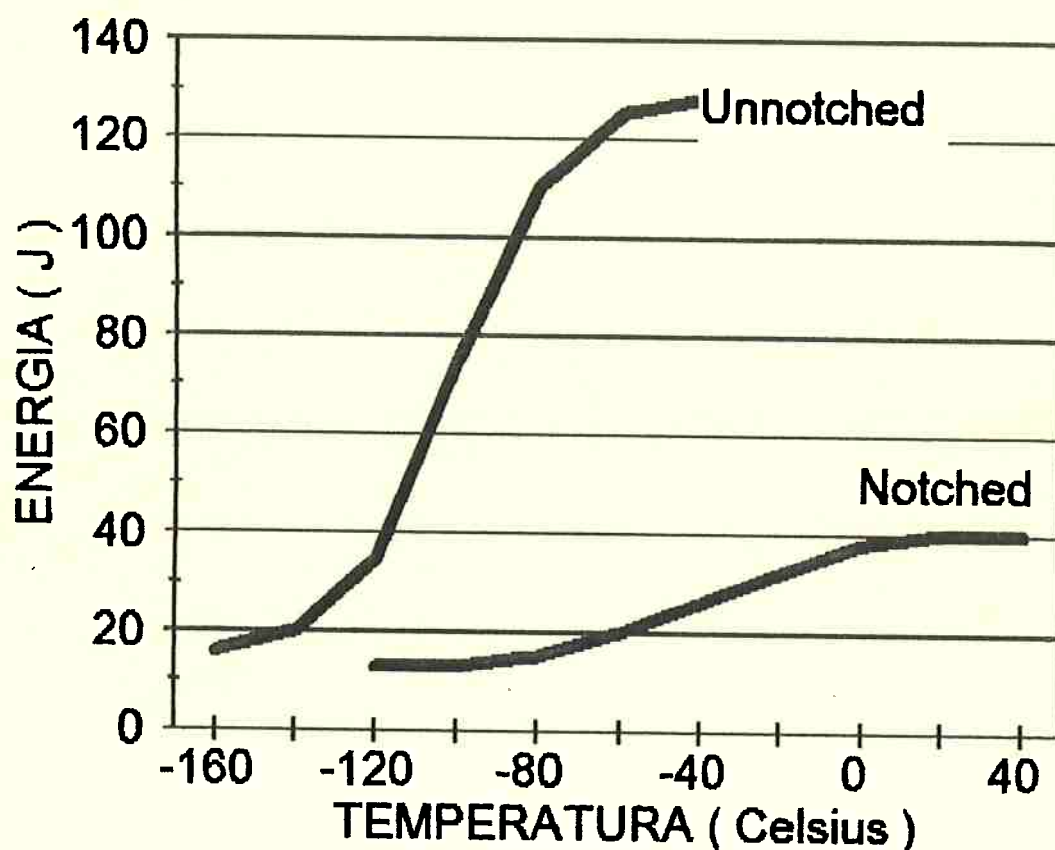


FIG. 5 Curvas de impacto Charpy para ferros fundidos nodulares ferríticos.

Várias variáveis influenciam o comportamento de ferros fundidos nodulares (2), como a microestrutura, a porcentagem de carbono, a quantidade de silício, elementos de liga, tratamentos térmicos e outros. A influência de algumas destas variáveis será mostrada a seguir.

### Porcentagem de Carbono

A porcentagem de carbono no ferro fundido está diretamente relacionada com a quantidade de grafita, sendo utilizado o maior teor de carbono possível, o que facilita a obtenção de nódulos melhores e em maior quantidade e também a obtenção de uma matriz ferrítica. A relação da quantidade de carbono e as propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares é ainda contraditória (3). Porém, o efeito deste elemento nos ensaios de impacto é conhecido, e está expresso pela figura 6

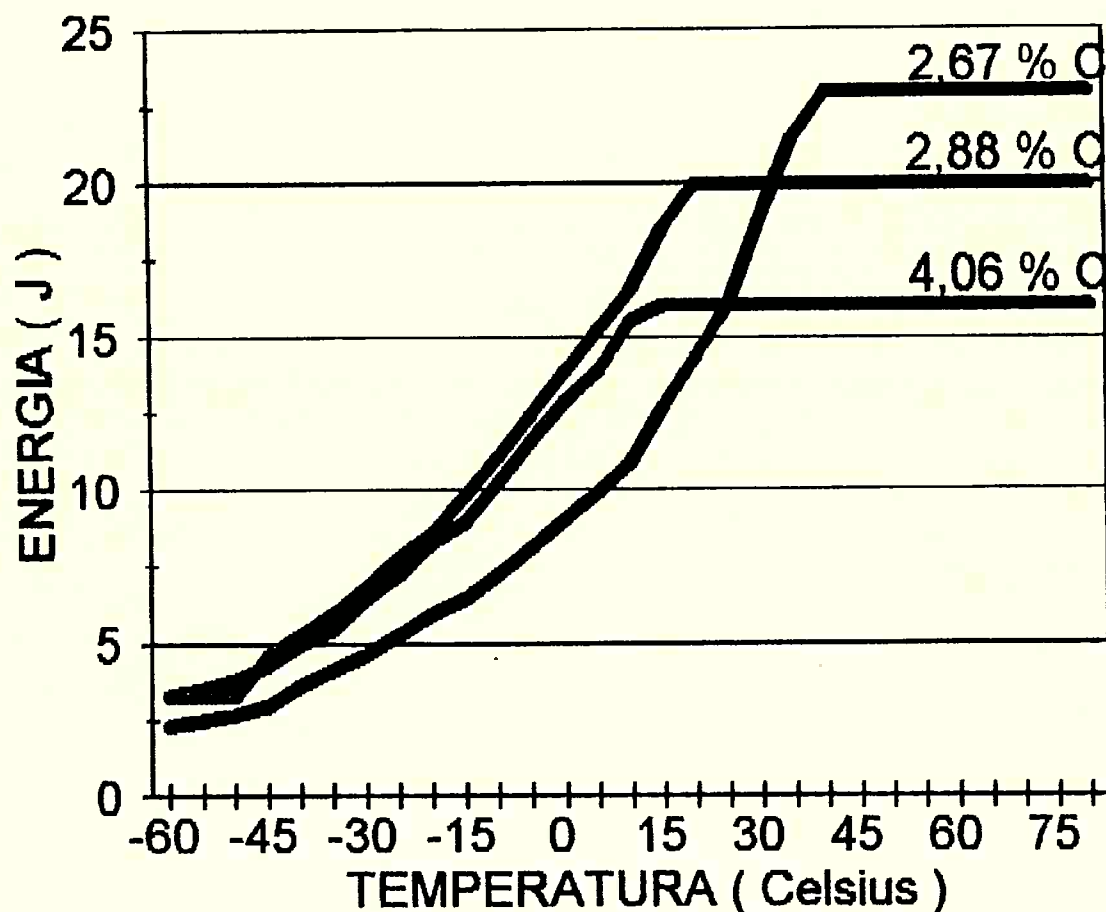


FIG. 6 Efeito do carbono na energia absorvida em ensaios Charpy de ferros fundidos nodulares

### Porcentagem de silício

Os efeitos do silício nas propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares devem-se a uma combinação de vários mecanismos. Em um material ferritizado por tratamentos térmicos, o principal efeito do silício é o endurecimento por precipitação sólida da matriz ferrítica (3), que resulta no aumento da resistência e na diminuição da ductilidade do ferro fundido. O silício tem um efeito prejudicial em ensaios impacto, como mostra a figura 7. Porém, esse efeito depende também dos teores de manganês e fósforo presentes no ferro fundido.

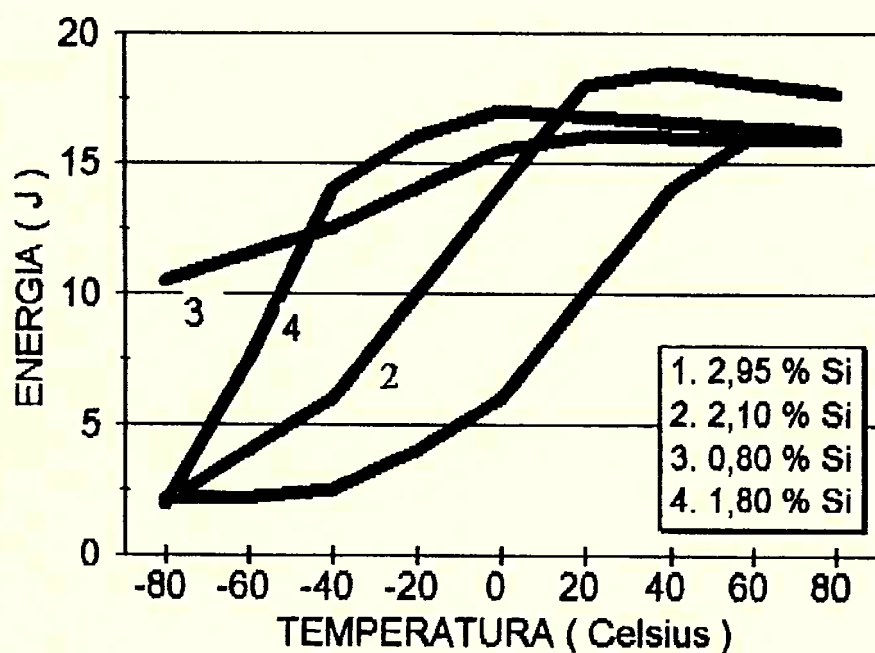


FIG.7 Efeito do Silício na energia absorvida em ensaios Charpy de ferros fundidos nodulares

## DESCRIÇÃO DO MATERIAL

Para a aferição da máquina, foram utilizados corpos de prova de ferro fundido nodular ferrítico, com a composição nominal dada pela figura 8

Elemento	%
C	3,5
Si	2,6
Mn	0,5

FIG. 8

O procedimento de fabricação dos corpos de prova foi o seguinte:

1) o ferro fundido com a composição nominal dada foi vazado em um molde Y;

2) após a solidificação, o ferro fundido sofreu um tratamento térmico, que consistiu em sua colocação num forno a uma temperatura de 950 °C durante 2 horas, abaixamento da temperatura do forno para 700 °C e tratamento nesta temperatura durante 4 horas, e finalmente, resfriamento ao ar. Esse tratamento é chamado de recozimento de ferritização, porque a partir dele se produz uma matriz essencialmente ferrítica (1);

3) terminado o tratamento térmico o ferro fundido sofreu uma usinagem na qual foram obtidos os corpos de prova na forma de paralelepípedos, com dimensões 10x10x55 mm;

4) finalizando a usinagem foi feito o entalhe em V que caracteriza os corpos de prova para o ensaio de impacto do tipo Charpy.

As operações de usinagem e entalhamento foram conduzidas de modo a se obter os corpos de prova de acordo com a norma ASTM A327-91 (8).

## ***SEQUÊNCIA DE OPERAÇÕES PARA A REALIZAÇÃO DE UM ENSAIO***

1) Erguer um pouco o pêndulo através da manivela no alto da caixa de comando, girar o botão de operação para a direita e apertar, com as duas mãos, os dois botões de partida ao mesmo tempo, liberando o martelo.

2) Parar totalmente o martelo e girar o botão de operação totalmente para a esquerda. Nesse momento, o display deve registrar 00.00 J como a energia inicial do martelo.

3) Levantar o martelo e encaixá-lo no braço elevatório.

4) Erguer, através da manivela, o conjunto até a energia desejada. Para aços e ferros fundidos, utilizar 50.00 J como a energia de partida do martelo. Para outros materiais, devem ser consultadas as normas técnicas antes de se realizar o ensaio.

5) Colocar o corpo de prova centralizado no suporte.

6) Girar o botão de operação para a direita. Isso somente deve ser feito após a colocação do corpo de prova no suporte, pois há risco de acidente.

7) Apertar os botões de partida, com as duas mãos, ao mesmo tempo, liberando o martelo, que deve quebrar o corpo de prova.

8) Anotar o valor da energia absorvida pelo corpo de prova durante o impacto, que está registrada no display.

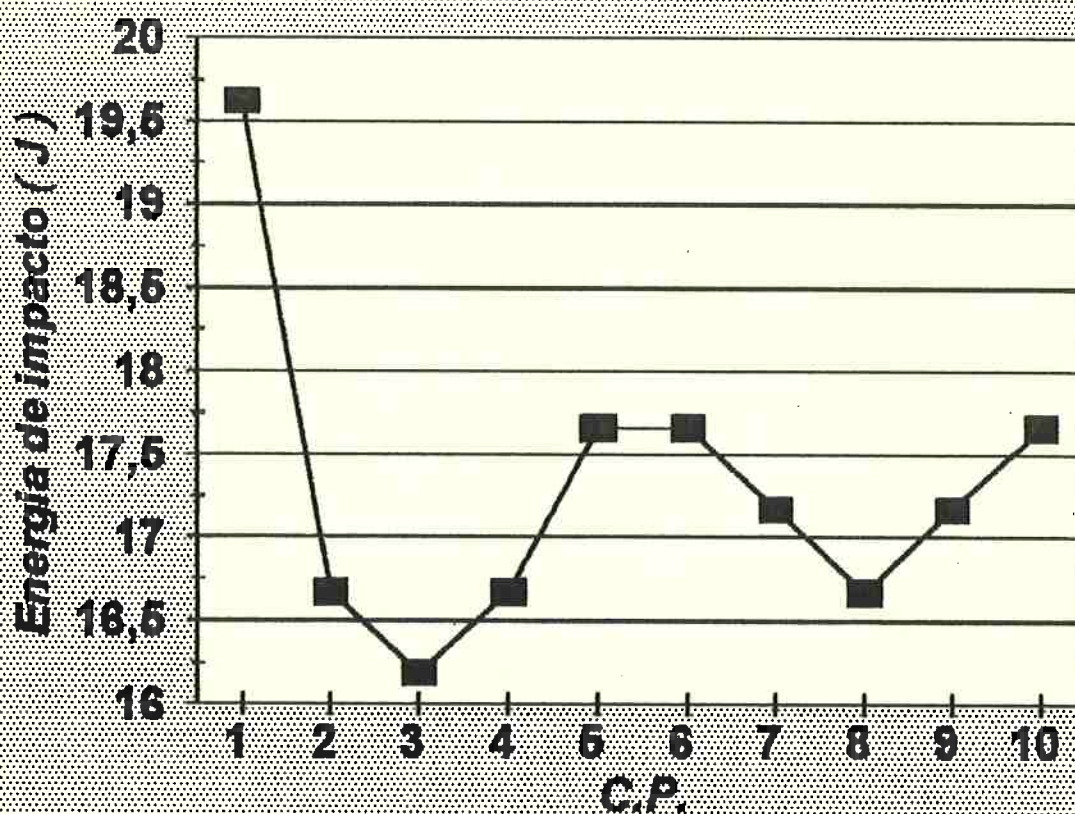
### **IMPORTANTE:**

Para o pêndulo de 50 J, devem ser utilizados materiais que absorvam no máximo 34 J durante o impacto. Para materiais que absorvam uma energia maior que esta, deve ser utilizada uma máquina com um martelo de 300 J. Se um material que absorva mais que 50 J de energia for utilizado para ensaio nesta máquina, há um risco de se danificar o cutelo do martelo.

## **APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS**

Os corpos de prova ensaiados no IPT, mostraram os seguintes resultados:

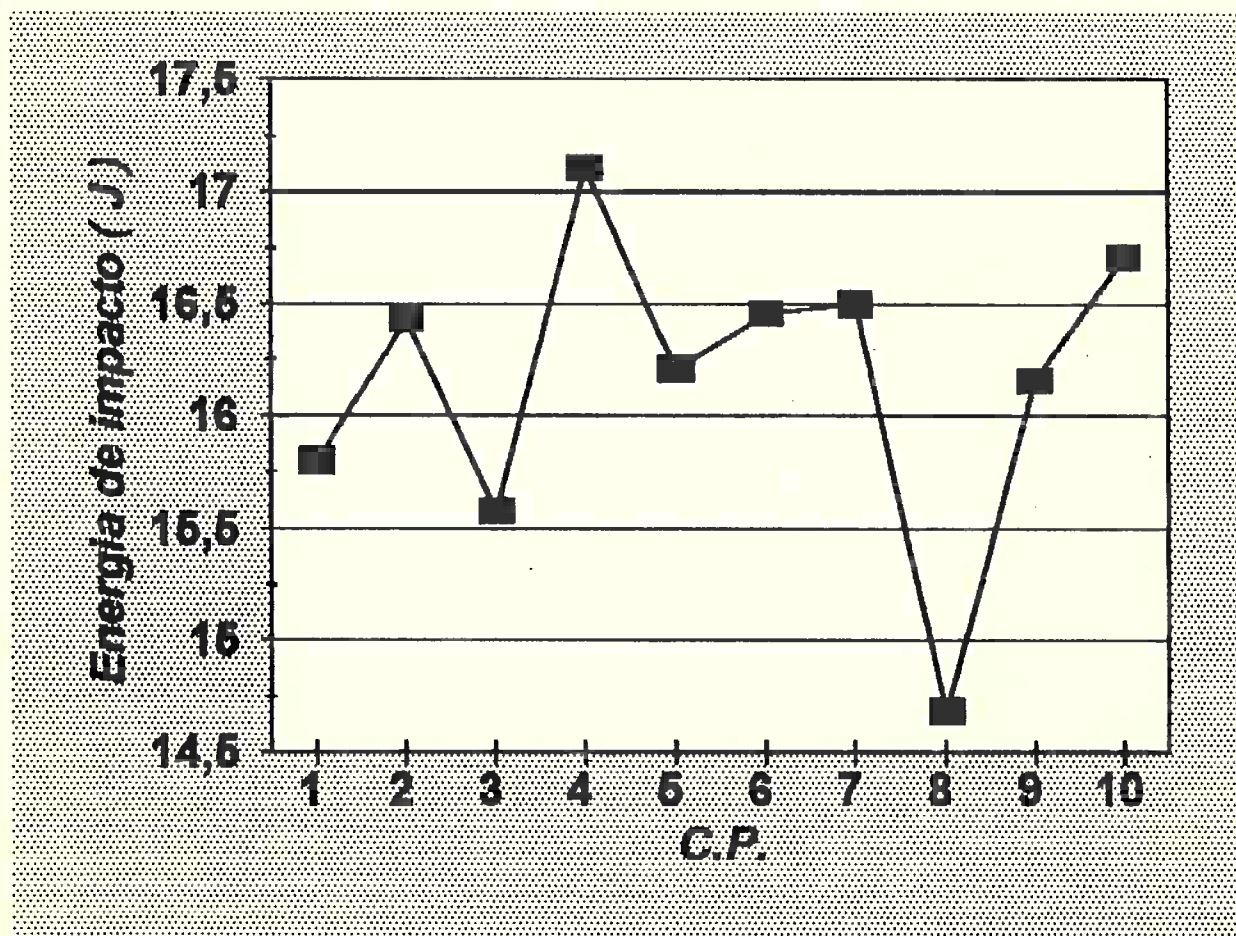
C.P.	ENERGIA ( J )
1	19,42
2	16,67
3	16,19
4	16,67
5	17,66
6	17,66
7	17,17
8	16,67
9	17,17
10	17,66



Temperatura de ensaio: 23 ° C

Os corpos de prova ensaiados na Escola Politécnica mostraram os seguintes resultados:

C.P.	ENERGIA ( J)
1	16,80
2	16,43
3	16,58
4	17,11
5	16,21
6	16,46
7	16,50
8	14,69
9	16,16
10	16,71



Temperatura de ensaio: 20 ° C

## **CONCLUSÃO**

Os ensaios realizados demonstram a aferição da máquina, e a confiabilidade dos resultados obtidos em testes nela realizados, para materiais com energia de impacto Charpy de no máximo 34 J. Para materiais que possuam uma energia absorvida em impacto maior que esta, a máquina não produz resultados confiáveis, e deve ser utilizada uma máquina com pêndulos de maior capacidade. Isto fica claro quando se analisa o resultado da energia absorvida pela amostra de número 21, que é um resultado totalmente sem significado.

As perdas de energia no martelo, que ocorrem devido problemas de atrito do pêndulo com o seu eixo transversal, de resistência da massa de vento deslocada, desníveis da base, oscilações, para citar os principais são de apenas 0.03 J em média, alcançando valores máximos de 0.04 J. Estes valores estão bem abaixo do limite máximo de perdas especificado pela norma ASTM E-23 (4), que as limita em 0.25% da capacidade nominal do pêndulo, que no caso portanto podem ser de até 0.25 J.

Foram aferidos: o nível da máquina, a massa do martelo, o comprimento do braço do pêndulo e as velocidades de queda em função do ângulo de partida do pêndulo.

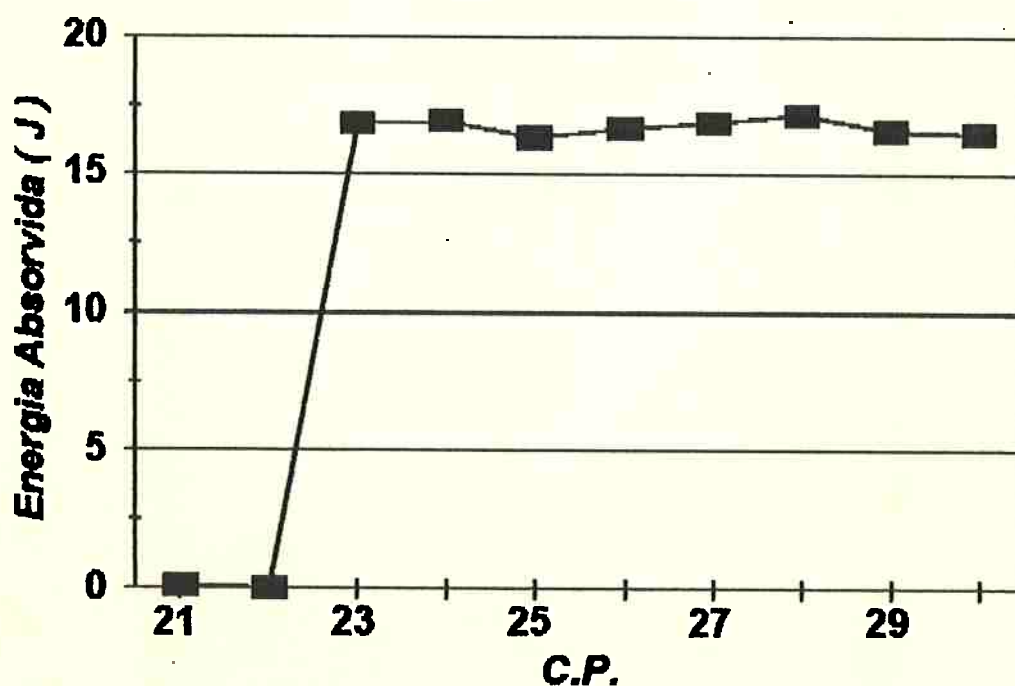
Os resultados obtidos nos ensaios foram compatíveis com os obtidos no IPT. Neste, foi obtida uma média de 17.06 J, com desvio padrão de 0.51 J para a energia absorvida pelos corpos de prova, em ensaios realizados à temperatura de 23 graus centígrados. Na USP, foi obtida uma média de 16.33 J, com desvio padrão de 0.46 J para ensaios realizados à temperatura de 20 graus centígrados. Esses resultados são compatíveis com as curvas de energia de transição obtidas na literatura para ferros fundidos nodulares, pois as temperaturas utilizadas neste ensaio encontram-se na região onde a energia absorvida aumenta com o aumento da temperatura.

Não foi observada variação significativa também quando a velocidade de impacto foi alterada, através da alteração do ângulo de queda do martelo. Os ensaios com o pêndulo colocado a um ângulo inicial de 110 graus, que corresponde a uma velocidade de impacto de 3.16 m/s, próxima do limite mínimo de 3 m/s exigido na norma ASTM E-23 (4), obtiveram uma média de 16.71 J para a energia de impacto, em ensaios realizados à temperatura de 21 graus centígrados.

Colocando o pêndulo com uma inclinação de 160 graus, que corresponde a uma velocidade de impacto de 3.80 m/s, e é a capacidade nominal do martelo, na qual foram realizados os primeiros ensaios, obteve-se uma média de 16.79 J, nas mesmas condições do primeiro ensaio. Esses resultados podem ser considerados idênticos, pois a diferença de 0.4% entre eles é irrelevante se lembrarmos que o tratamento de dados é estatístico (4) A figura 9, mostra esses resultados.

C.P.	A	Eo ( J )	V( m/s )	Eabs ( J )
21	80	21,30	2,48	0,10
22	60	12,89	1,93	*
23	110	34,59	3,16	16,87
24	110	34,59	3,16	16,94
25	110	34,59	3,16	16,35
26	110	34,59	3,16	16,67
27	160	50,00	3,80	16,90
28	160	50,00	3,80	17,17
29	160	50,00	3,80	16,59
30	160	50,00	3,80	16,49

Temperatura de ensaio: 21 ° C



(1) CHIAVERINI, V. - Aços e Ferros Fundidos - ABM - 1990 - pág. 537 a 546.

(2) DUCTILE IRON GROUP - Ductile Iron Data - QIT - 1990 - cap. III - pág. 3.41 a 3.45.

(3) ALBERTIN, E. - Obtenção de ferro fundido nodular ferrítico de alta qualidade no estado bruto de fundição - EPUSP - 1984 - pág. 26 a 31.

(4) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM) - Annual Book of ASTM Standards - 1993 - vol. 03.01 - pág. 206 a 226.

(5) SOUZA, S. A. de. - Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos - Ed. Edgard Blücher - 1974 - pág. 99 a 109.

(6) DIETER, G.E. - Mechanical Metallurgy - Ed. McGraw-Hill - 1976 - pág. 419 a 423.

(7) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM) - Annual Book of ASTM Standards - 1993 - vol. 08.01 - pág. 58 a 74.

(8) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM) - Annual Book of ASTM Standards - 1993 - vol. 01.02 - pág. 135 a 137.

(9) SERVER, W. L. - Metals Handbook - 9ª Edição - 1985 - vol. VIII - pág. 261 a 264.