



INFLUÊNCIA DA POROSIDADE SOBRE O COMPORTAMENTO DE MATERIAIS SINTERIZADOS SOB IMPACTO

Osmar R. Lourenço

Marco A. D. Quinan

Centro de Desenvolvimento em Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN

Av. Antônio Carlos, 6627 – Caixa Postal 941

Belo Horizonte – MG

30123-970

quinanm@urano.cdtm.br

Ernani S. Palma

Departamento de Engenharia Mecânica

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC.MINAS

Av. Dom José Gaspar, 500

30535-610 - Belo Horizonte – MG

palma@pucminas.br

***Resumo.** A influência da porosidade sobre o comportamento de materiais sinterizados quando submetidos a esforços de impacto foi analisada através de ensaios de impacto tipo Charpy instrumentado, realizados à temperatura ambiente. Utilizou-se corpos de prova de ferro sinterizado com três densidades distintas e de um ferro de porosidade nula (produzido pelos processos convencionais). A instrumentação utilizada permitiu a medição da força aplicada e da energia absorvida pelos corpos de prova durante os ensaios. A partir de curvas Força x Tempo, Energia x Densidade e Temperatura x Energia, várias propriedades mecânicas foram obtidas e correlacionadas com a porosidade do material. Além dos valores das energias totais envolvidas no processo, foram calculadas as energias necessárias para iniciar e para propagar trincas para cada tipo de material. Para tanto, todas as energias envolvidas no ensaio como inércia, deformação tipo Brinell e rigidez da máquina foram determinadas quantitativamente. Os resultados experimentais obtidos foram analisados e discutidos. Deu-se ênfase especial à influência da porosidade presente em cada material nos valores obtidos e à comparação do comportamento do ferro sinterizado com o comportamento do ferro de porosidade nula.*

Palavras-chave: Material sinterizado, Carga de impacto, Porosidade, Fratura.

1. INTRODUÇÃO

Esforços aplicados sob a forma de impacto é uma condição comum em componentes estruturais. Este tipo de carregamento torna-se bastante crítico na presença de entalhes e

outras descontinuidades geométricas (Ghoneim, 1996). Materiais sinterizados constituem-se em um exemplo típico de componentes com concentradores internos de tensão, já que eles apresentam em sua microestrutura uma porosidade residual devido ao processo de fabricação. A porosidade total e a morfologia dos poros (tamanho, forma e distribuição), além da composição química e microestrutura, são os fatores determinantes das propriedades mecânicas dos materiais sinterizados (Hammiuddin, 1986, Kim and Kwon, 1993). A influência da porosidade sobre o comportamento mecânico de materiais sinterizados já foi bastante estudada e é bastante conhecida [Kubick, B. 1995, Danninger, D. et al, 1997, Straffelini et al, 1993]. De maneira geral, porosidade crescente e formato irregulares de poros provocam uma diminuição da resistência mecânica e da ductilidade. Isto ocorre em virtude da diminuição da área útil resistente e principalmente, devido ao efeito de entalhe dos poros. Apesar de bastante estudados, existem poucos trabalhos sobre a influência da porosidade sobre o comportamento mecânico de materiais sinterizados quando sujeitos a esforços dinâmicos. Sabe-se que a energia total absorvida pelo material diminui com o aumento da porosidade [Straffelini, G. et al, 1995]. Entretanto, não há informações a respeito dos valores da energia necessária para iniciar e para propagar uma trinca. O objetivo deste trabalho é comparar o comportamento mecânico de ferro puro sinterizado com três porosidades distintas com ferro (44 ppm de C) de porosidade nula quando submetidos a impacto.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Os materiais utilizados foram ferro comercialmente puro sinterizado com várias porosidades distintas e um ferro comercialmente puro (44 ppm de C) de porosidade nula (convencional), cujas composições químicas estão mostradas nas Tabelas 1 e 2. Estes materiais apresentaram uma microestrutura semelhante.

Tabela 1 - Composição química do pó de ferro puro.

Elemento	Ferro	Si e Mn	Ca, Ti e Al
Teor (%)	98%	> 1%	Traço < 0,1%

Tabela 2 - Composição química do ferro de porosidade nula (44ppm de C).

Elemento	C (x1000)	Mn (x1000)	Si (x100)	P (x1000)	S (x1000)	Cu (x100)	Ni (x100)	Cr (x100)
Teor (%)	4	18	1	13	8	0	2	2

O ferro sinterizado apresenta três níveis distintos de densidades após a sinterização: $\rho = 5,0, 5,5$ e $6,0 \text{ g/cm}^3$. Estes três níveis de porosidades foram obtidos através da variação da pressão de compactação. A compactação foi realizada em uma matriz de simples ação bipartida. Após a compactação, os corpos-de-prova foram sinterizados à temperatura de 1200°C , durante 60 minutos em pressão nunca maior do que 10^{-5} tor. Após a sinterização foram produzidos entalhes em V na maioria dos corpos-de-prova como mostra a Fig. 1. Alguns corpos-de-provas foram ensaiados sem o entalhe em V.

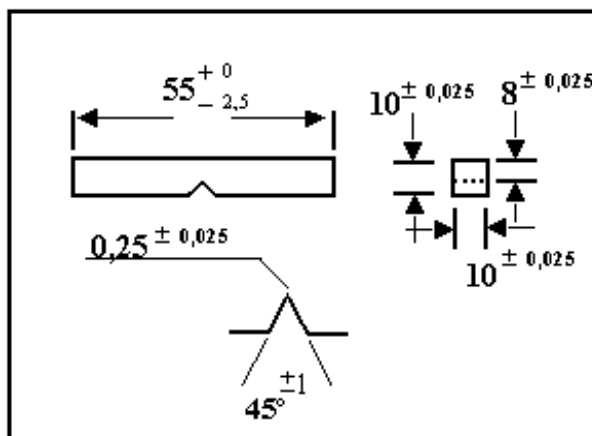


Figura 1 – Corpos-de-prova para ensaios de impacto tipo Charpy (dimensões em mm).

2.2 Metodologia

Os ensaios de impacto foram realizados em uma máquina de impacto tipo Charpy, de capacidade máxima de 325 J. Todos os ensaios foram conduzidos na escala de 162 J, utilizando-se um martelo de 27,287 kg e altura de 0,605 m, correspondendo a uma velocidade de impacto de 3,44 m/s. Estes ensaios foram realizados em temperaturas variando de -90°C até 90°C .

Utilizou-se um cutelo de impacto como célula de carga, construído segundo norma DIN 51222 com aço VW-3 (equivalente ao aço ASTM A 681). Este cutelo foi instrumentado com extensômetros resistivos para solicitações dinâmicas com alto ganho ($K=3,5$). Adotou-se ligação em ponte completa, com dois extensômetros ativos e dois extensômetros colados em uma região não sujeita à deformação, para atuarem como compensadores para variações de temperatura. Após a colagem, os extensômetros foram protegidos para evitar o choque de corpos de provas.

Para a alimentação da célula de carga e o condicionamento dos sinais, utilizou-se um sistema composto de fontes e amplificadores programáveis por software apropriado para medidas dinâmicas, com resposta de frequência de até 100 kHz. Este sistema foi controlado por um microcomputador através de uma interface IEEE-488 e de um software específico fornecido pelo fabricante do equipamento. A aquisição de dados foi realizada através de um osciloscópio digital de 150 MHz, com conversor A/D de 8 bits e gatilhamento ajustável, o que permitia medir o sinal exatamente após o impacto.

Após a instrumentação, a célula de carga foi calibrada estática e dinamicamente [Quinan, M.A.D. 1996]. A calibração estática consistiu na aplicação de compressão diretamente no cutelo, usando-se um dispositivo com a mesma geometria dos corpos-de-prova. A calibração dinâmica foi baseada em uma série de ensaios de impacto em corpos-de-provas de vários materiais distintos utilizando todo o espectro da máquina [Quinan, M.A.D. 1996].

A área sob a curva de carga versus tempo obtidos nos ensaios de impacto fornece o valor da energia total absorvida pelo material (E_T). O cálculo desta área é realizada automaticamente pelo sistema de instrumentação e aquisição de dados utilizados [Quinan, M.A.D. 1996]. A partir destes resultados pode-se obter ainda os valores das energias

necessárias para iniciar (E_I) e para propagar a trinca (E_P), como mostra a Fig. 2 esquematicamente.

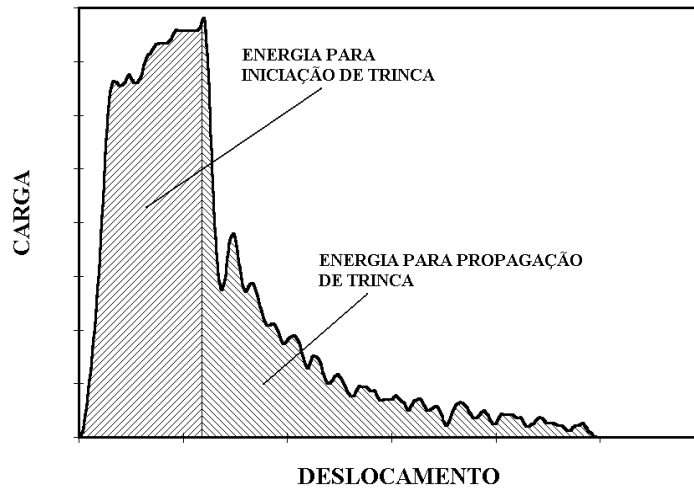


Figura 2 – Energia necessária para iniciar e para propagar a trinca. (Esquemático).

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Fig. 3 mostra o resultado da calibração dinâmica do sistema de impacto usado. Esta calibração foi realizada comparando-se os valores de energia obtidos através da instrumentação com aqueles obtidos diretamente no dial da máquina. Observa-se uma excelente linearidade entre os dois tipos de medidas.

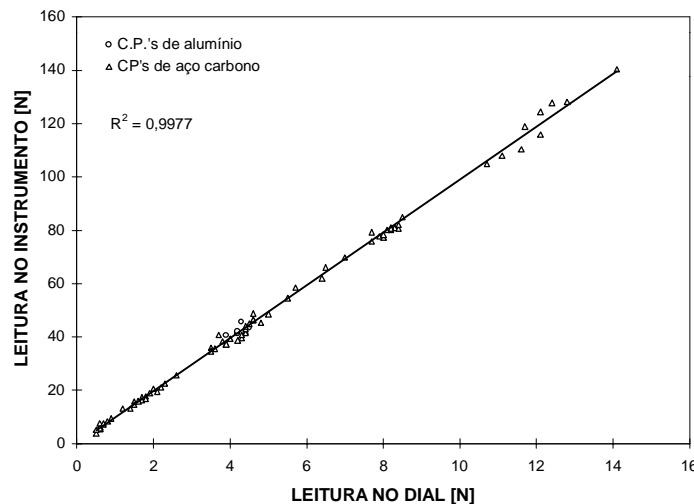


Figura 3 – Calibração dinâmica do sistema de impacto utilizado.

As Fig. 4 e 5 mostram curvas típicas da variação da carga obtida nos ensaios de impacto de densidades $\rho = 5,0$ e $6,0 \text{ g/cm}^3$ em função do tempo, à temperatura ambiente ($22,5^\circ\text{C}$). Independente da porosidade, observa-se que as fraturas são tipicamente dúcteis, como mostram as superfícies dos corpos-de-provas com entalhes fraturados.

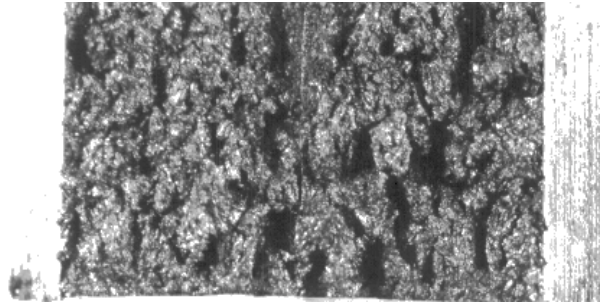
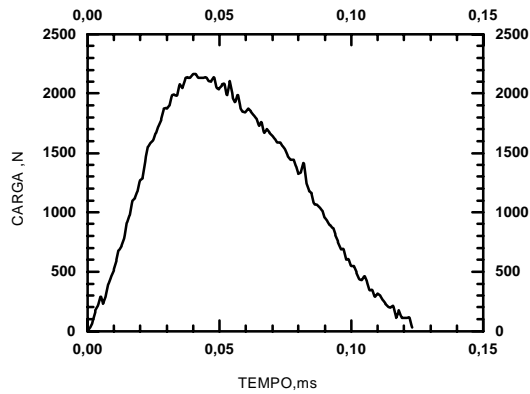


Figura 4 – Curva de carga versus tempo e superfície de fratura para $\rho = 5,0 \text{ g/cm}^3$ ($T=22,5^\circ\text{C}$).

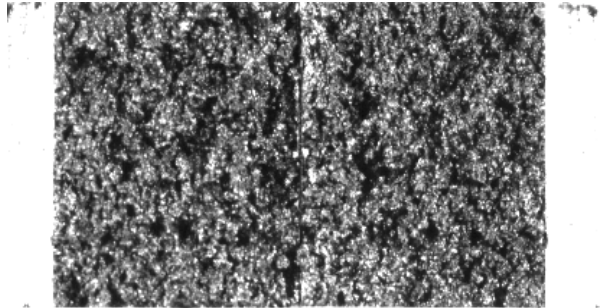
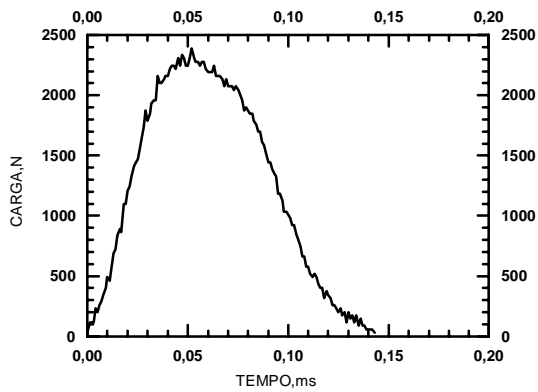


Figura 5 – Curva de carga versus tempo e superfície de fratura para $\rho = 6,0 \text{ g/cm}^3$ ($T=22,5^\circ\text{C}$).

As Fig. 6 e 7 mostram as curvas de carga versus tempo de corpos-de-prova de ferro puro sinterizado, sem entalhe, nas densidades $\rho = 5,0$ e $6,0 \text{ g/cm}^3$, temperatura de $22,5^\circ\text{C}$.

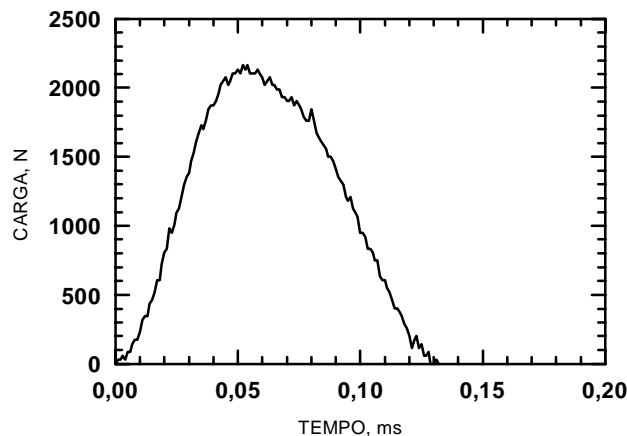


Figura 6 – Curva de carga versus tempo para corpo-de-prova sem entalhe, densidade $\rho = 5,0 \text{ g/cm}^3$. Temperatura $22,5^\circ\text{C}$.

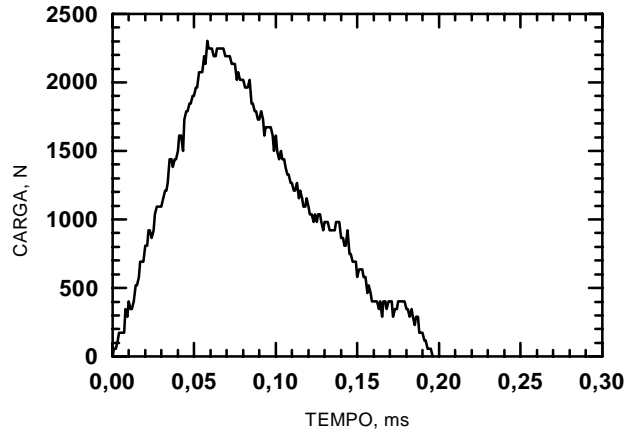


Figura 7 – Curva de carga versus tempo para corpo-de-prova sem entalhe, densidade $\rho = 6,0 \text{ g/cm}^3$. Temperatura $22,5^\circ\text{C}$.

A partir dos valores de carga versus tempo, os valores das energias desenvolvidas foram calculadas. As Fig. 8 a 10 mostram a influência da densidade sobre os valores da energia total absorvida durante o impacto (E_T), das energias necessárias para iniciar (E_I) e para propagar a trinca (E_P), em ensaios realizados a temperatura ambiente ($22,5^\circ\text{C}$), $T = 90^\circ\text{C}$ e $T = -90^\circ\text{C}$, respectivamente.

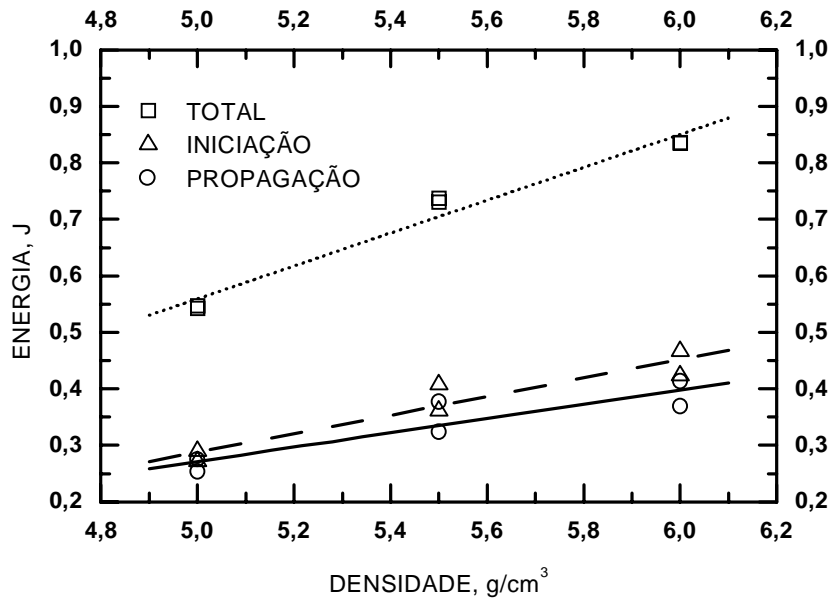


Figura 8 – Curvas de ensaio de impacto do tipo Charpy . Temperatura ($22,5^\circ\text{C}$).

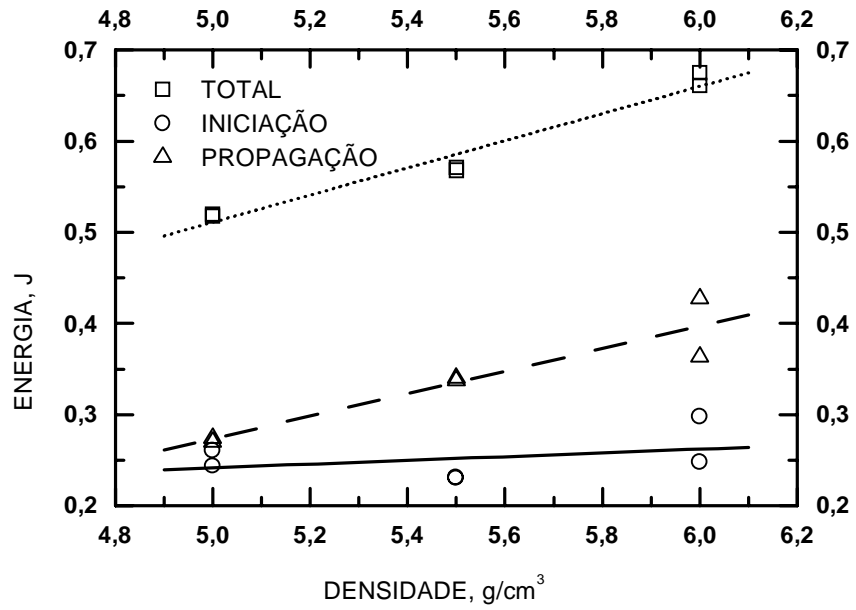


Figura 9 – Curvas de ensaio de impacto do tipo Charpy. Temperatura (90°C).

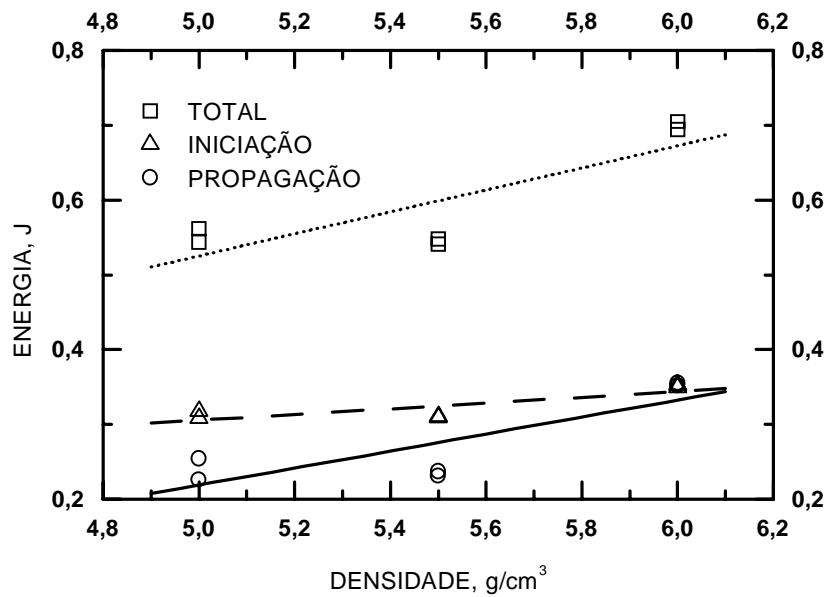


Figura 10 – Curvas de ensaio de impacto do tipo Charpy. Temperatura (-90°C).

A variação das energias absorvidas durante o impacto em corpos-de-provas entalhados com densidades $\rho = 5,0 \text{ g/cm}^3$ em função da temperatura estão mostrada na Fig. 11.

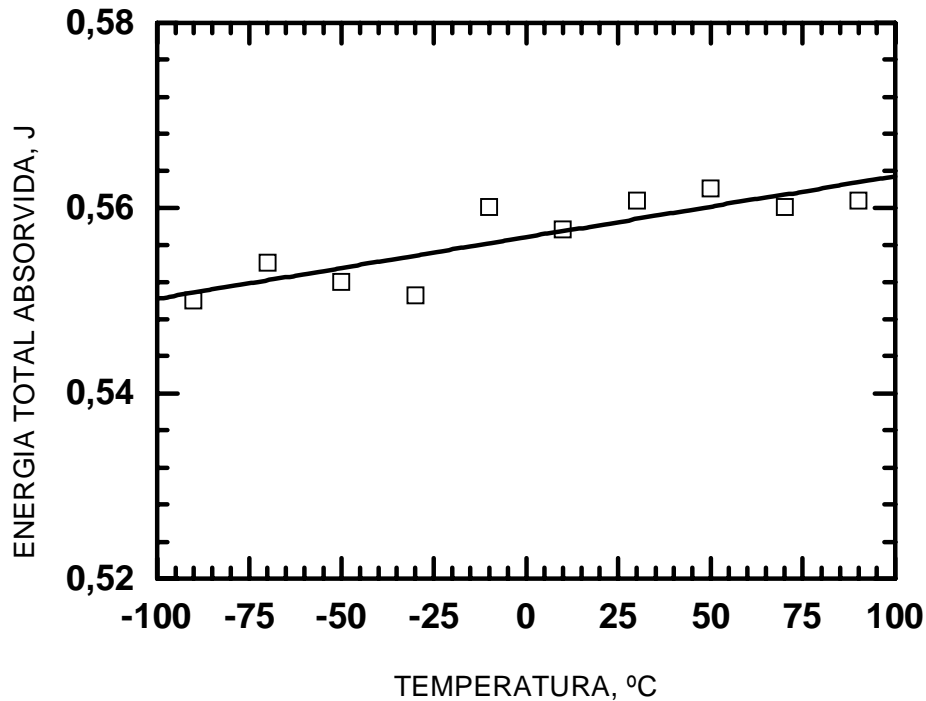


Figura 11 – Influência da temperatura sobre os valores de energias absorvidas durante o ensaio de impacto em corpos-de-prova entalhados, com densidade $\rho = 5,0 \text{ g/cm}^3$.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A presença de poros nos materiais sinterizados provoca uma forte redução nos valores da energia total absorvida durante o impacto. Conforme mostrado nas Fig. 8 a 10, as energias envolvidas no ensaio aumentam com o aumento da densidade, independente da temperatura de ensaio. Apesar da redução de energias absorvidas, os materiais sinterizados apresentam superfícies de fratura com todas as características de fratura dúctil, como pode-se observar nas Fig. 4 e 5.

A dispersão dos resultados obtidos foi bastante grande em função da própria heterogeneidade da microestrutura dos materiais sinterizados. A distribuição volumétrica, da forma e do tamanho dos poros ao longo do volume do material ocorre de maneira extremamente heterogênea e irregular. Os valores da densidade indicados são valores médios. A densidade pode variar bastante ao longo do corpo-de-prova (Palma, 1994). Esta heterogeneidade provoca uma enorme variação dos valores de suas propriedades mecânicas em corpos-de-prova distintos.

A influência dos poros no comportamento mecânico de materiais sob impacto fica evidente através da análise dos resultados de ensaios Charpy de corpos-de-prova de ferro comercialmente puro de porosidade nula, à temperatura ambiente, conforme mostrado na Fig. 12. A energia total absorvida neste material foi da ordem de 135 J, enquanto os ferros sinterizados têm valores da ordem 0,5 a 0,8 J. A porosidade residual provocou uma queda de cerca de 99% dos valores de energia total absorvida pelo material sinterizado durante o impacto. Este resultado está de acordo com a literatura conforme mostrado por Straffellini et al, 1995.

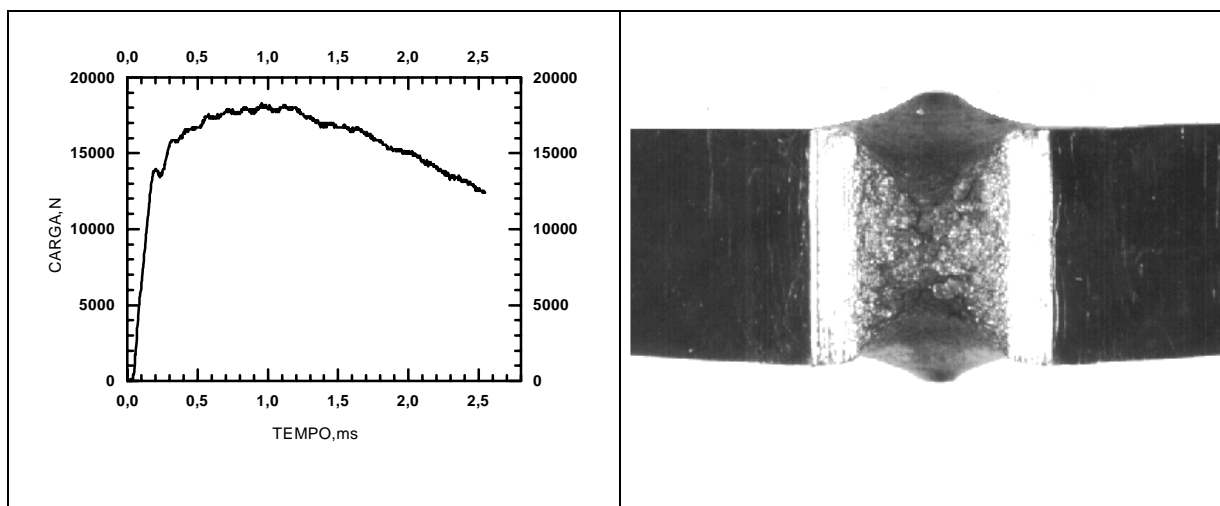


Figura 12 – Curva de carga versus tempo para ferro livre de intersticial de porosidade nula. ($T = 22,5^{\circ}\text{C}$).

A presença de entalhes externos em corpos-de-provas sinterizados não provocam reduções subsequentes nas energias absorvidas durante o impacto como mostra uma análise comparativa entre as Fig. 4 e 5 com as Fig. 6 e 7. Os inúmeros microentalhes internos representados pelos poros dominam completamente o processo, de tal forma que entalhes macroscópicos adicionais não exercem nenhuma influência no comportamento mecânico do corpo-de-prova.

A Fig. 13 mostra a influência da temperatura sobre a energia total absorvida pelo ferro de porosidade nula. O ferro sinterizado é menos sensível às variações da temperatura do que o ferro de porosidade nula, como mostra uma análise comparativa entre as Fig. 11 e 13. O material sinterizado apresentou variações de energia total absorvida entre 0,54 e 0,55 J, enquanto a variação ocorrida no ferro convencional foi de 16 J na faixa de temperatura ensaiada. Este fato é explicado de maneira semelhante à influência de entalhes externos, ou seja, os poros determinam de maneira predominante o comportamento mecânico dos materiais sinterizados.

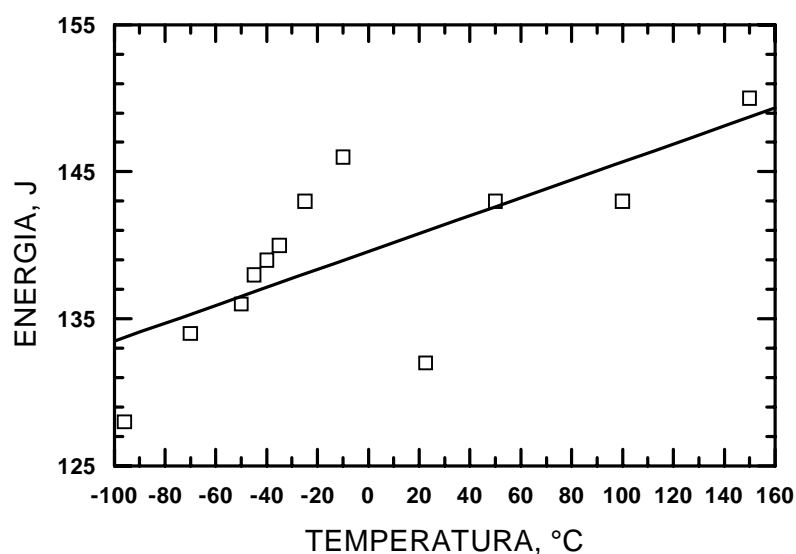


Figura 13 – Influência da temperatura no ensaio de impacto Charpy de ferro de porosidade nula.

5. CONCLUSÕES

Baseando-se nos resultados experimentais apresentados pode-se concluir que:

- A dispersão dos resultados foi grande em função da distribuição heterogênea dos poros.
- Todos os valores de energia envolvidas no impacto aumentam com a densidade do ferro sinterizado. A presença dos poros provocam uma queda de 99% da energia total absorvida em relação ao ferro puro de porosidade nula.
- A presença de entalhes macroscópicos externos no ferro sinterizado não exerce influência no seu comportamento mecânico sob impacto.
- O ferro sinterizado é menos sensível à variação de temperatura que o ferro de porosidade nula.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Danninger, H., Spoljaric, D. and Weiss, B., 1997, Microstructural Features Limiting the Performance of P/M Steels, *Int. J. of Powder Metallurgy*, vol. 33, n. 4, pp.43-53.
- Ghoneim, M. M. 1996, Instrumented Impact Properties of some Advanced Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels, *J. of Materials and Performance*, vol. 5, n. 3, pp.328-334.
- Hammiuddin, M., 1986, A Correlation between Mechanical Properties and Porosity of Sintered Iron and Steels - a Review, *Powder Metall. Int.*, vol. 18, pp.73-76.
- Kim, K.T. and Kwon, Y.S., 1993, Elastic-Plastic Response of Sintered Porous Iron Under Uniaxial Strain Cycling, *J. of Eng. Mat. and Technology*, vol. 115, pp.89-94.
- Kubicki, B., 1995, Stress Concentration at Pores in Sintered Materials, *Powder Metallurgy*, vol. 38, n. 4, pp.295-298.
- Quinan, M.A. D., 1996, Análise de Ensaio Instrumentado de Impacto tipo Charpy, Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG.
- Palma, E. S., 1994, Tese Doutorado, Verformungsverhalten von Sintereisenwerkstoffen bei einachsig homogen und inhomogen Beanspruchungen, Karlsruhe Universitaet.
- Straffelini, G., Fontanari, V., Molinari, A., and Tesi., B., 1993, Tensile and Fatigue Behaviour of Phosphorus alloyed Sintered Steels, *Powder Metallurgy*, vol. 36, n. 2, pp. 135-141.
- Straffelini, G., Fontanari, V., Molinari, A., and Tesi., B., 1995, Influence of Microstructure on Impact Behaviour of Sintered Ferrous Materials, *Powder Metallurgy*, vol. 38, n.1, pp.45-51.

ABSTRACT

Influence of Porosity on Impact Behaviour of Sintered Ferrous Materials

The influence of porosity on mechanical behaviour of iron sintered materials when subjected to impact loads are presented and discussed. Tests were performed at temperature range between -90 and $+90^{\circ}\text{C}$ with an instrumented Charpy pendulum, which allows the possibility of measuring, during impact, the force applied on the specimen as well as the total absorbed energy. The tests were conducted on sintered iron with three different densities and, for comparison, on a porefree iron. The load-time curves were utilized to obtain the fracture initiation energy and propagation energy. These parameters were analysed and correlated with porosity.