

ESTUDO DO EFEITO DA DIREÇÃO DE SOLDAGEM E DO ENTALHE NA ENERGIA ABSORVIDA NO ENSAIO DE IMPACTO CHARPY DE CORDÕES DE SOLDA

Alexandre Gondim Pereira

Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: gondim@demec.ufmg.br

Resumo

Dentre os vários ensaios mecânicos existentes, o ensaio de impacto Charpy tem sido muito utilizado para avaliar metais de solda. Neste ensaio, geralmente são utilizados corpos de prova de tamanho padrão e extraídos de depósitos de passes múltiplos. Já outros pesquisadores, têm escolhido corpos de prova de tamanho reduzido e extraídos de depósitos de passes simples. Este trabalho foi realizado para verificar o efeito da direção de solidificação e do entalhe na energia absorvida durante o ensaio de impacto de corpos de prova de tamanho reduzido e, posteriormente, de tamanho padrão. Cordões de solda foram depositados em chanfro e os corpos de prova foram extraídos para o ensaio de impacto Charpy. Os resultados mostraram que corpos de prova com entalhe na direção contrária à direção de soldagem apresentaram energia absorvida, em média, 10% superior àqueles com entalhe na direção de soldagem, para corpos de prova de ambos os tamanhos.

Palavras-chave: Ensaio de impacto Charpy, Solidificação em soldagem.

1 INTRODUÇÃO

Muitos tipos de ensaios e análises são utilizados para determinar o comportamento dos materiais sob solicitações dinâmicas. Dentre estes ensaios, um dos mais utilizados é o ensaio de impacto em barras entalhadas. Os ensaios de impacto são normalizados e dentre as diversas modalidades destaca-se o ensaio do tipo Charpy.

Tendo em vista a importância que o ensaio de impacto Charpy tem no campo da soldagem e também pelo fato dele estar sendo vastamente utilizado para a caracterização de metais de solda, acredita-se que uma avaliação sistemática do efeito da direção do entalhe e da direção de soldagem na energia absorvida durante o ensaio de corpos de prova de impacto Charpy seja de grande importância.

Os resultados desta pesquisa são úteis principalmente para estabelecer critérios mais precisos na escolha adequada do tamanho do corpo de prova a ser utilizado, e também para chamar a atenção para os valores ou comparações entre os valores que estão sendo utilizados, os quais podem estar comprometidos ou podem comprometer a qualidade do metal de solda.

Apesar deste tipo de ensaio apresentar muitas facilidades na sua execução, tais como rapidez e baixo custo, ele fornece informações limitadas a respeito do comportamento mecânico dos materiais. Em vista disto, tem-se procurado desenvolver testes de impacto instrumentalizados que possam fornecer um número maior de informações.

O objetivo desse trabalho é de verificar o efeito da direção de solidificação e do entalhe na energia absorvida durante o ensaio de impacto de corpos de prova de tamanho reduzido e, posteriormente, de tamanho padrão. Pela figura 1, é possível observar como é feito a retirada dos corpos de prova e a confecção do entalhe.

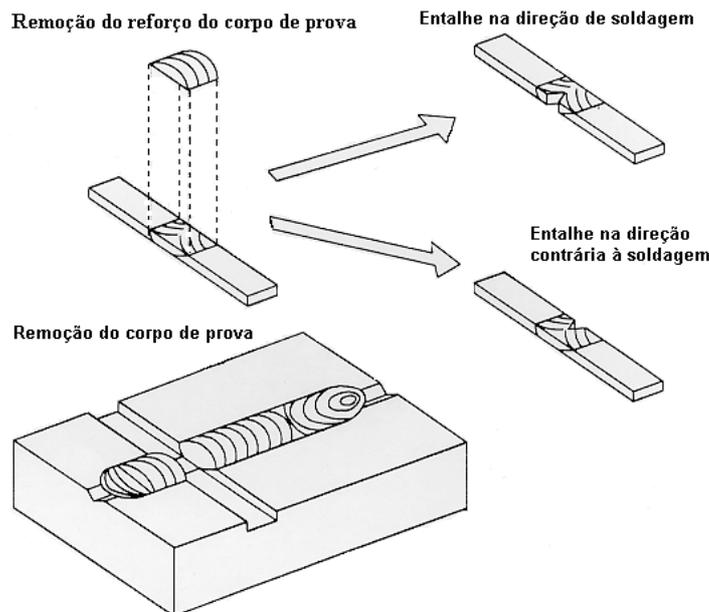


Figura 1 – Remoção do corpo de prova e confecção do entalhe

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Por muitos anos o teste de impacto Charpy vem sendo utilizado pela comunidade científica como teste de aceitação de produtos de aço, principalmente para controle de qualidade na verificação da resistência à fratura frágil.

Na área de soldagem, apesar do teste ser extremamente utilizado como critério para comparação entre metais de solda produzidos por diferentes condições de soldagem e/ou diferentes composições químicas quanto à fratura a diferentes temperaturas e, conseqüentemente, como critério para escolha de metal de base e de adição que sejam compatíveis para uma determinada aplicação [1,2], pouca atenção tem sido dada às principais variáveis inerentes ao próprio processo de soldagem e que podem afetar os resultados do teste [3-5].

2.2 Ensaios de Impacto

Basicamente, os ensaios de impacto consistem em criar um entalhe em um corpo de prova do material que se deseja analisar, com a finalidade de localizar o ponto no qual se deseja a ruptura e produzir assim, um estado triaxial de tensões. Este corpo de prova é submetido a um impacto produzido por um martelo pendular. Após a ruptura do corpo de prova, o pêndulo sobe até uma altura que é inversamente proporcional à energia absorvida

pela fratura. Esta energia é lida diretamente em um mostrador (dial) calibrado da máquina de ensaio.

Neste tipo de ensaio, os dados não fornecem, necessariamente, indicações precisas sobre o comportamento do material quando submetido ao impacto, uma vez que o único resultado quantitativo é a medida de energia absorvida. Utiliza-se ainda, a observação da superfície da fratura, para se determinar se a fratura é dúctil ou frágil, ou uma mistura destas duas. A superfície da fratura frágil possui elevada refletividade e, conseqüentemente, aparência brilhante, enquanto que a superfície da fratura dúctil é fibrosa (composta de pequenas cavidades, *dimples*) e absorve a luz incidente, tendo assim, uma aparência escura e fosca. Informações adicionais, com valores dos vários componentes de tensões existentes, não são possíveis de serem obtidos nestes ensaios convencionais.

Tendo em vista as limitações do ensaio Charpy convencional, procurou-se nas últimas duas décadas desenvolver algum tipo de instrumentação, com a finalidade de permitir a obtenção de um maior número de informações. Basicamente, todos os sistemas desenvolvidos consistem em criar uma célula de carga que mede a reação do corpo de prova durante impacto e registrar estas medidas em um gráfico de carga versus tempo ou energia versus tempo.

Uma das informações que pode ser obtida através do formato da curva de carga versus tempo é uma noção do tipo de fratura no corpo de prova. A figura 2 mostra os vários formatos de curvas que ocorrem para um material genérico que tem seu comportamento variando de frágil para dúctil.

Outra informação importante que pode ser extraída dessas curvas é a possibilidade de decomposição de energia total absorvida pelo corpo de prova em outros dois valores de energia: energia para iniciação (E_i) e energia para propagação (E_p) de trinca. A energia para iniciação de trinca é a que corresponde à área sob a curva do instante inicial do impacto até o ponto de carga máxima e a energia para propagação de trinca é a que correspondente à área sob a curva deste ponto até o final do impacto. Estes valores dão uma dimensão muito maior para o conhecimento das propriedades do material sob impacto, criando-se melhores condições para se prever o comportamento do material.

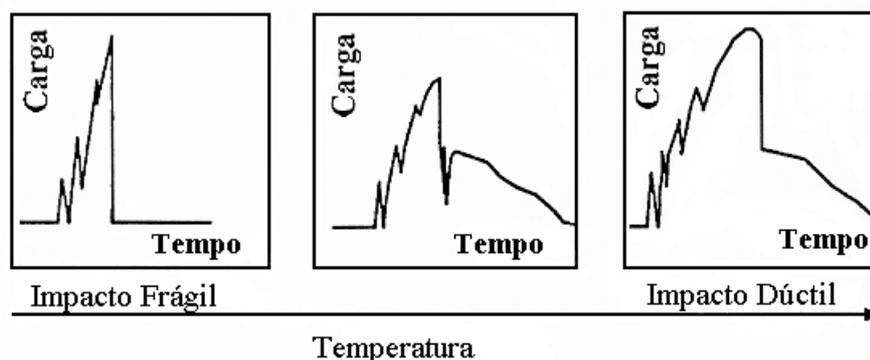


Figura 2 - Curvas esquemáticas de carga versus tempo, mostrando a transição de um impacto frágil para um impacto dúctil [10] .

3 MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

Para garantir o repetibilidade de resultados, além do completo domínio sobre as variáveis de soldagem, o processo GMAW (*gas metal arc welding*) foi utilizado. Para manter a repetibilidade e homogeneidade dos cordões de solda, o equipamento de

soldagem foi acoplado a um sistema mecanizado, responsável pelo deslocamento da tocha de soldagem, a qual permitiu garantir constância na velocidade de soldagem e *stick-out*.

Para a realização das soldagens foram feitos testes preliminares a fim de determinar as condições de soldagem que melhor favoreciam o aparecimento acentuado de crescimento colunar de grãos nos cordões de solda a partir do crescimento epitaxial. A partir de análises metalográficas dos cordões de solda, definiu-se a melhor combinação de parâmetros para a soldagem das chapas que estão mostradas na tabela 1, respectivamente para soldagem das chapas para extrair CP's de tamanho reduzido e de tamanho padrão.

Como metal de base utilizou-se o aço 1020 de baixo teor de carbono, não impedindo que o estudo seja futuramente estendido para outros materiais. Para o depósito de cordões de solda, no caso dos corpos de prova de tamanho reduzido, foram preparadas chapas de 8 mm de espessura, 145 mm de largura e 250 mm de comprimento. Em cada chapa foi feito um chanfro de 60° com 5 mm de profundidade no sentido longitudinal, paralelo a direção de laminação. No caso de corpos de prova de tamanho padrão, foram preparadas chapas com 12,7 mm de espessura, 32 mm de largura e 250 mm de comprimento. O ângulo de bisel escolhido foi 45°, de tal forma que quando unidas topo a topo, as chapas formassem um chanfro em “V” de 90°. O nariz do chanfro foi de 1 mm.

Executadas as soldas, a direção de soldagem foi marcada nas chapas. O início e o final do cordão de solda (cratera) foram descartados, o reforço das chapas foi retirado e a espessura das chapas foi reduzida à 2,8 mm, no caso dos corpos de prova de tamanho reduzido e para 10,8 mm, no caso de corpos de prova de tamanho padrão.

Os corpos de prova foram confeccionados segundo Norma ASTM E-23 [6], tipo C (entalhe em V) e com as dimensões de 55x10x10 mm (no caso dos corpos com tamanho padrão - extraídos de passes múltiplos) e 55x10x2,5 mm (no caso de corpos com tamanho reduzido - extraídos de passes simples). De cada chapa, tentou-se extrair o maior número possível de corpos de prova. Cada corpo de prova levou uma identificação da posição em que foi retirado da chapa e da direção de soldagem.

Tabela 1 -Parâmetros utilizados na soldagem das chapas para extração de corpos de prova.

Corpos de prova de tamanho reduzido – Passe único					
Parâmetros variados					Valores constantes
Corrente (A)	Voltagem (V)	Stick Out (mm)	Velocidade (mm/s)	Velocidade do arame (m/min)	Vazão do gás: 12 l/min Argônio+16% CO ₂ +2% O ₂ Arame: ER70S6 com 1,2 mm de diâmetro
250	30	10	3,7	5,8	
Corpos de prova de tamanho padrão – Múltiplos passes					
Parâmetros que foram variados					Valores constantes
Corrente (A)	Voltagem (V)	Stick Out (mm)	Velocidade (mm/s)	Velocidade do arame (m/min)	Vazão do gás: 12 l/min Argônio + 20% CO ₂ Arame: ER70S6 com 0,8 mm de diâmetro
130	30	10	3.13	8,22	

Os corpos de prova foram atacados com uma solução de nital de 2% para determinar a posição exata do cordão de solda. Com o cordão revelado, realizou-se os entalhes utilizando uma brochadeira. Os entalhes obedeceram a seguinte distribuição: para os CP's com numeração ímpar, o entalhe foi feito na direção contrária à de soldagem e para os CP's com numeração par, o entalhe foi feito na mesma direção de soldagem. A forma com que foram feitos os entalhes, fez com que eles abrangessem uma mesma região do

cordão. Este procedimento ajudou a minimizar diferenças de um corpo de prova para o outro, permitindo a comparação entre os corpos de prova sucessivos.

Para o ensaio dos corpos de tamanho reduzido foi utilizada uma máquina de capacidade reduzida, de até 30 J. Para o ensaio dos corpos de tamanho padrão foi usada uma máquina de ensaio Charpy marca AMETEK, de capacidade máxima de 325 J, modelo PI-2. Além das máquinas serem diferentes em tamanho, a utilizada para ensaiar os corpos de tamanho padrão é instrumentalizada. As condições de ensaio foram: temperaturas de 23°C e abertura do suporte de 40 mm. O ensaio foi feito a uma temperatura ambiente porque não se desejava verificar a faixa de temperatura de transição e sim, o efeito da direção do entalhe em relação a direção de soldagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Corpos de Prova com Tamanho Reduzido

Os valores da energia absorvida pelos corpos de prova de tamanho reduzido no ensaio de impacto Charpy estão apresentados na figura 3. Vale ressaltar que os corpos de prova com numeração par tiveram seus entalhes feitos na direção de soldagem e os de numeração ímpar tiveram seus entalhes na direção contrária à de soldagem.

Pela forma que foram feitos os entalhes é possível comparar os valores de energia absorvida dos CP's 1 e 2, 3 e 4, 5 e 6, 7 e 8, 9 e 10, 11 e 12, 13 e 14, 15 e 16, 17 e 18. A observação da figura confirma que existem diferenças entre os valores da energia absorvida pelos corpos de prova com entalhes nas diferentes direções. Como esperado, os valores de energia absorvida são, em média, até 10% maiores para os corpos de prova com entalhe na direção oposta a de soldagem. Nos CP's 1 e 2, os valores de energia refletem um padrão diferente do observado. Este fato pode ser previsto quando se analisa as condições da placa no momento da soldagem. Como estes CP's foram retirados próximo do início da solda ou da região feita quando a placa ainda está fria, a rápida perda do calor para o metal de base pode ter dado origem a uma microestrutura diferente da desejada.

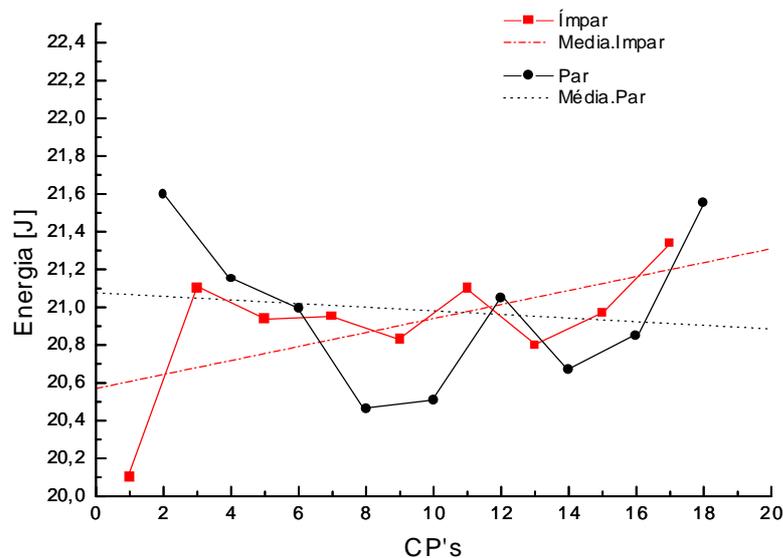


Figura 3 – Valores médios de energia absorvida pelos corpos de prova de tamanho reduzido no ensaio de impacto Charpy.

A análise da fratura dos corpos de prova com entalhes em diferentes direções (figura 4) revela que existe uma diferença entre as superfícies das fraturas. Os corpos de

prova com entalhe na direção contrária à de soldagem (figura 4a) revelaram uma superfície de fratura com aspecto mais rugoso (áspero) enquanto que os corpos de prova com entalhe na direção de soldagem (figura 4b) revelaram um superfície mais polida. Estes resultados novamente confirmam os resultados obtidos no ensaio, reforçando a evidência de que a direção de soldagem e do entalhe podem mascarar os valores do ensaio.

4.2 Corpos de Prova com Tamanho Padrão

Como já foi dito anteriormente, a segunda etapa do projeto foi feita usando uma máquina de ensaio Charpy instrumentalizada. Com isto conseguiu-se obter curvas de energia absorvida em função do tempo em vez de valores fornecidos pelo dial da máquina.

A forma das curvas encontradas revelam que a fratura em todos os corpos de prova foi do tipo dúctil. O perfil das curvas encontradas para cada corpo de prova é compatível com o esperado para o aço 1020, mesmo a fratura sendo numa região solda.

De um modo geral, pode-se notar que as curvas para corpos de prova com entalhe na direção contrária à de soldagem são bastante parecidas com aquelas para corpos de prova com entalhe na direção de soldagem, diferenciando apenas nos valores de energias. Os corpos de prova ímpar apresentam uma área abaixo da curva maior do que dos corpos de prova pares, indicando que o primeiro absorve mais energia que o segundo. Outras indicações são os valores de cargas máximas e cargas no final da propagação da trinca, os corpos ímpares apresentam cargas máximas e cargas no final da propagação maiores que os corpos pares.

O gráfico da figura 5 mostra a variação estatística de todos os corpos de prova. Cada ponto no gráfico corresponde a uma média dos valores das energia alcançadas nas quatro placas para uma mesma posição na placa. Com a curva de regressão linear, pode-se verificar que o valor do coeficiente de correlação linear (R) e o valor de desvio padrão (SD) foram de:

$R = 0.9082$	$SD = 2.70687$
--------------	----------------

para valores da curva referentes aos corpos de prova com entalhe na direção contrária à de soldagem, e de:

$R = 0.97739$	$SD = 2.50249$
---------------	----------------

para valores da curva referentes aos corpos de prova com entalhe na direção de soldagem. Com base nesses valores pode-se verificar que houve pouca dispersão dos valores.

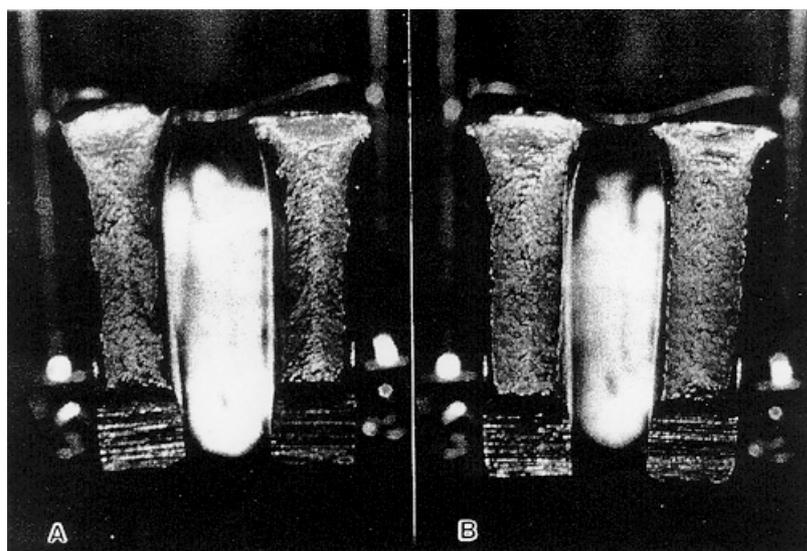


Figura 4 – Vista da superfície de fratura de corpos de prova com entalhe na direção contrária à de soldagem (a) e na direção de soldagem (b).

No gráfico da figura 5, pode-se verificar que realmente ocorre um aumento de diferença dos valores de energia a medida que caminha-se ao final da chapa.

Este fenômeno de aumento da diferença entre os valores de energia à medida que se chega ao final da chapa, talvez seja devido à evolução dos campos de temperatura ao longo do cordão de solda durante a soldagem. No começo da soldagem a taxa de resfriamento é maior e portanto tem-se grãos colunares menores e no final eles são maiores, facilitando a discrepância de energia

No início da chapa tem-se um maior número de grãos equiaxiais e grãos colunares menores, já no fim do cordão estas quantidades se invertem. A trinca, no início da chapa, propaga-se por entre os grãos equiaxiais, tanto nos corpos pares quanto nos ímpares. Em direção ao fim da chapa a quantidade de grãos colunares aumenta e com isso, nos corpos pares (entalhe na direção de soldagem), a energia tende a diminuir, certamente devido ao fato da trinca se propagar numa direção facilitada pela orientação dos grãos colunares. Já os corpos ímpares (entalhe na direção contrária à de soldagem), a trinca tende a se propagar numa direção contrária à orientação dos grãos colunares, resultando com isso num aumento da energia absorvida.

As figuras 6a e 6b comparam as superfícies de fratura de dois corpos de prova, um par e um ímpar (CP's 14 e 15 da placa 01), respectivamente. Através de inspeção visual pode-se notar que na superfície de fratura dos corpos pares, aparece com mais frequência uma região brilhante, indicada por uma seta, indicando provavelmente a propagação da trinca contornando os grãos colunares intergranulares. Deve-se ressaltar que se a região brilhante observada no CP 14 for um defeito de soldagem, ele apareceria no CP seguinte, o que não aconteceu.

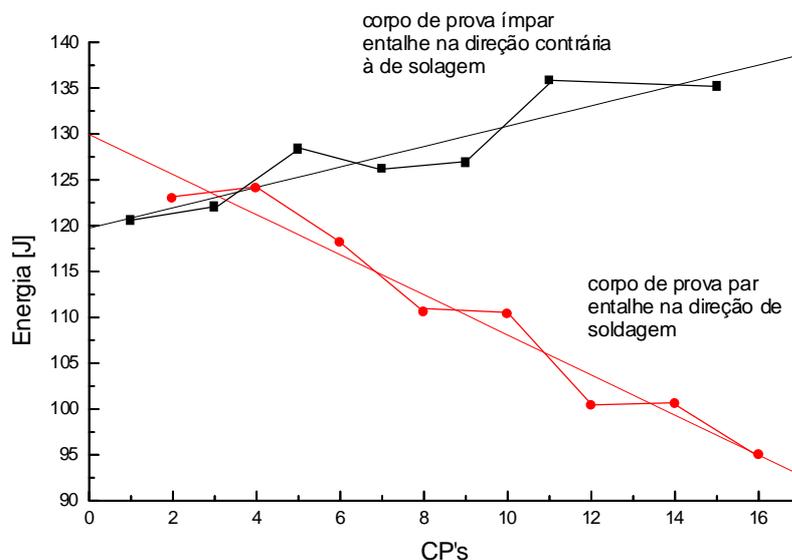


Figura 5 - Curva de valores médios de energia versus CP's para todas as placas

Esta observação pode ser explicada pelo fato da trinca tender a acompanhar os contornos de grãos colunares, absorvendo menos energia. Nos corpos ímpares, onde a direção do entalhe é contrária à direção de soldagem a trinca tem tendência a penetrar os grãos (transgranular) absorvendo mais energia. O plano brilhante, quando aparece nesses corpos de prova é menos evidente que nos corpos de prova pares.

Na formação desses planos brilhantes, há uma tendência de que eles fiquem mais evidentes em direção ao fim das chapas, ou seja, nos corpos de prova com numeração maior. Isso talvez possa ser explicado pela formação de uma microestrutura mais grossa no final do cordão de solda devido ao aumento dos campos de temperatura. Observou-se

também a ocorrência da formação de “orelhas” nas superfícies fraturadas, indicadas por setas na figura 6. Nos corpos ímpares, essas “orelhas” são mais bem formadas e localizam-se em uma das metades do corpo de prova. Nos corpos de prova pares, elas não são tão bem definidas e, na maioria das vezes, cada “orelha” aparece em uma das superfícies.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos corresponderam ao esperado. Tanto nos corpos de prova de tamanho reduzido, onde foram utilizados passes simples, quanto nos corpos de prova de tamanho padrão, onde foram utilizados passes múltiplos, encontrou-se os maiores valores de energia absorvida nos corpos de prova com entalhe na direção contrária a de soldagem.

Em média, o valor de energia absorvida para corpos de prova com entalhe na direção contrária à de soldagem, podem apresentar valores até 10% maior do que os corpos de prova com entalhe na direção de soldagem. Sugere-se então que na preparação de corpos de prova, de ambos os tamanhos estudados nesse trabalho, utilize-se como prática colocar os entalhes na direção de soldagem, pois esta é a condição de menor energia, portanto mais crítica.

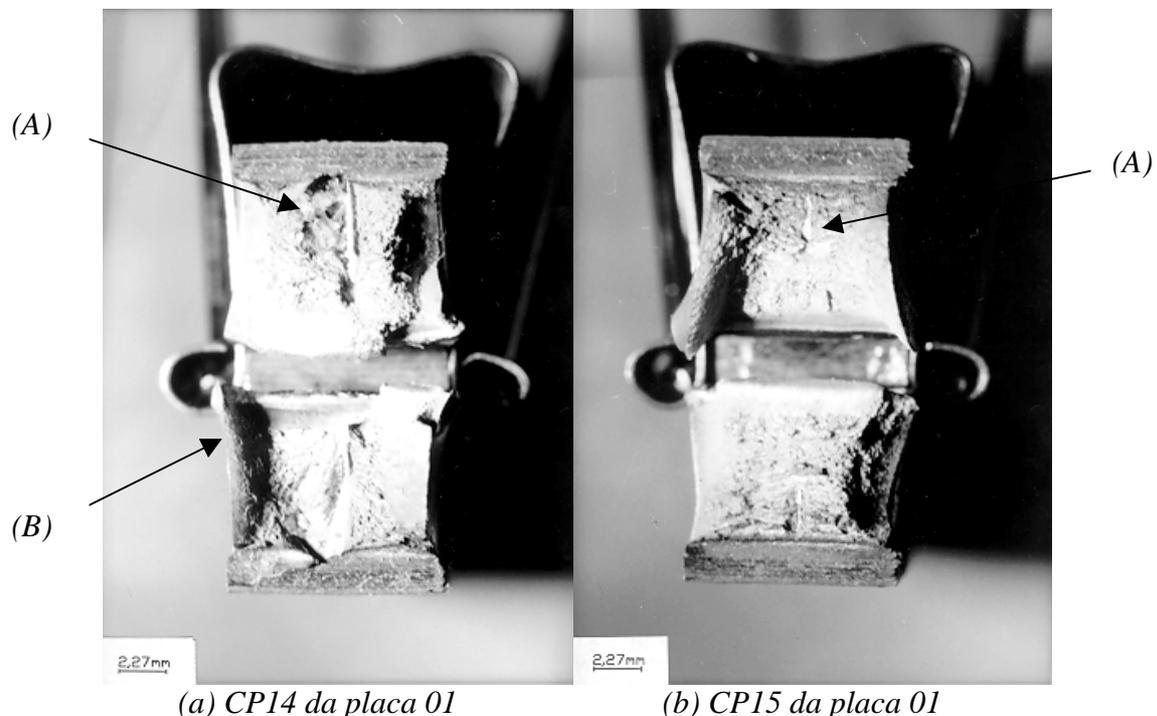


Figura 6 - Superfície de fratura dos corpos de prova. (A) Região brilhante e (B) “orelha” conforme comentado no texto.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Xi, W., “A Mathematical Treatment for Impact Test”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol 52, N° 2, pp 199-204, 1995.
- [2] S. Kou, “Welding Metallurgy”, *John Wiles & Sons*, 1987.
- [3] Siewert, T. A. e Vigliotti, D. P. , “The Effect of Charpy V-Notch Striker Radii on the Absorbed Energy”, *Pendulum Impact Machines: Procedures and Specimens for Verification*, ASTM STP 1248, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1995.

- [4] Fink, D.A., “Quantitative Comparison and Evaluation of Various Notch Machining Methods and How They Affect ASTM E 23 and ISO R442 Testing Equipment Results”, *Charpy Impact Test: Factors and Variables*, ASTM STP 1072, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.
- [5] Lowe, A.I., “Factors Influencing Accuracy of Charpy Impact Test Data”, *Symposium on Charpy Impact Test: Factors and Variables*, ASTM STP 1072, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.
- [6] “E 23-93a Standard Test Method for Notch Bar Impact Testing Of Metallic Materials”, *ASTM Standards*.
- [7] J. F. Lancaster. “Metallurgy of Welding”, 5th Edition, *Chapman & Hall*, 1993.
- [8] ASM, “Welding, Brazing and Soldering”, *Metals Handbook*, Vol 6, American Society for Metals, 1994.
- [9] K Easting, “Introduction to the Physical Metallurgy of Welding”, 2nd Edition, Butterworth – Heinemann, 1992.
- [10] Quinan, M. A. D., Análise de Ensaio Instrumentado de Impacto Charpy, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado N° 89 , Belo Horizonte, 1996, 98p.