

## **ANÁLISE MICROESTRUTURAL DE UMA JUNTA SOLDADA - MICRODUREZA E FRAÇÃO VOLUMÉTRICA -**

S. I. Irikura; R. Hirayama; R. C. Tokimatsu.; V. A. Ventrella;  
J. Gallego.; W.J Yamakami.

[ilka@dem.feis.unesp.br](mailto:ilka@dem.feis.unesp.br), [hirayama@aluno.feis.unesp.br](mailto:hirayama@aluno.feis.unesp.br), [ruis@dem.feis.unesp.br](mailto:ruis@dem.feis.unesp.br)  
[gallego@dem.feis.unesp.br](mailto:gallego@dem.feis.unesp.br), [wyser@dem.feis.unesp.br](mailto:wyser@dem.feis.unesp.br)

UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”  
Campus de Ilha Solteira

### RESUMO

*Chapas de um aço estrutural foram unidas por soldagem, desta junta foram confeccionados corpos-de-prova que foram classificados pelos tratamentos térmicos aos quais foram submetidos. Nas condições onde apresentavam maiores quantidades do ferrita acicular foram particularmente realizados ensaios de microdureza. Com o objetivo de se montar uma equação correlacionando a microdureza de cada constituinte individualmente e a dureza macro da amostra, fez-se separadamente um grande número de indentações em cada constituinte. Variou-se a carga observando-se o aumento da variação de leitura de dureza à medida que a carga diminuía e verificando assim o efeito de tamanho da indentação. As leituras das indentações foram realizadas utilizando-se os recursos do software Image Tool. Novos métodos foram adotados com o intuito de se minimizar alguns dos fatores que influenciam no ensaio de microdureza, na análise quantitativa foram utilizados recursos do software de tratamento de imagens, para que facilitasse a técnica de contagem de pontos.*

Palavras-chave: microestrutura, microdureza, fração volumétrica.

## INTRODUÇÃO

Segundo a norma *ASTM (American Society for Testing and Materials) E 384 – Standard Test Method for Microhardness of Materials*, define-se ensaio de microdureza como a dureza de microindentações realizadas em equipamento calibrado com penetradores de diamantes de geometrias específicas, utilizando-se cargas variando entre 1 e 1000 gf sobre a superfície de ensaio do material para se medir as diagonais das indentações opticamente. Porém, muitos fatores podem influenciar nos resultados do ensaio, como: equipamento para ensaio, modo de aplicação da carga, controle de vibração, tipo de indentador, equipamento de medição, preparação das amostras, precisão e tolerâncias, habilidade do operador; esses fatores podem gerar grandes variações nos resultados de dureza devido à sua condição de ensaio microscópico, onde uma pequena perda por folga no parafuso do micrômetro óptico de leitura pode significar uma grande variação na dureza lida. Na tentativa de se minimizar essas pequenas perdas, adotou-se o recurso de captura das imagens das indentações por fotografia digital e posterior medição com auxílio de software.

Para aplicação de cargas muito pequenas – abaixo de 100 gf, segundo *Metals Handbook* – ocorre um efeito de tamanho da indentação chamado *ISE – Indentation Size Effect*, que pode ser definido como aumento do valor de microdureza pela diminuição da carga para indentação. O valor de dureza deveria ser independente da carga aplicada ou do tamanho da indentação, com isso muitos mecanismos foram sugeridos para explicar esse efeito (ISE), o atrito entre o indentador e a amostra, presença de camadas superficiais deformadas, a necessidade de medições eficientes em indentações rasas ou a presença de camadas superficiais de óxidos e contaminações químicas. Historicamente, um dos primeiros marcos no ensaio de indentações foi estimar o limite de escoamento pela medição de dureza, definido como a carga no indentador dividida pela área produzida impressão. Baseadas nesses estudos, pesquisas foram realizadas como a teoria do gradiente de deformação (OLIVER e PHARR, 1992, pp.1564-1583), que cada vez mais são implementadas tentando descartar parâmetros negligenciados anteriormente, como Shu e Fleck (1998, pp. 1363-1383) utilizando método de elementos finitos, sempre em escalas micrométricas. Recentemente, a dureza é mostrada como dependente do tamanho da indentação quando sua profundidade é menor que aproximadamente

50  $\mu\text{m}$ . Tais escalas pequenas referem-se aos ensaios de micro ou nano dureza. As medidas de dureza podem dobrar ou até triplicar com a diminuição da indentação variando de 50 a 1  $\mu\text{m}$  (BEGLEY e HUNTCHINSON, 1998, pp. 2049-2068).

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Duas chapas de 5 m de comprimento foram preparadas para a soldagem automática multi-passe. Na junção das chapas efetuou-se um chanfro em “V”, com ângulo de  $90^\circ$  ao longo do comprimento, com nariz de 2 mm e abertura de raiz de 2 mm. O desenho esquemático da seção transversal da junta soldada está representado na Fig. 1.

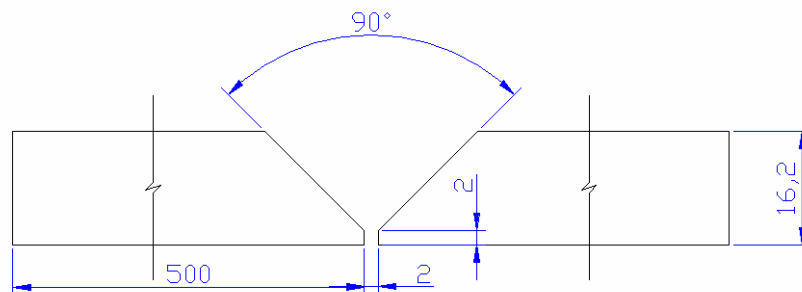


Figura 1. Representação esquemática da junta soldada [mm]

Para a confecção da junta depositaram-se dois passes de solda a arco submerso. Entretanto, primeiramente, realizou-se um passe de raiz (*backing*) com o processo de soldagem MIG, tal passe foi realizado no lado oposto ao chanfro. Depois realizou-se, então, o primeiro passe de arco submerso, que foi realizado sobre o chanfro. Terminado o primeiro passe a chapa foi devidamente posicionada e realizado um processo de goivagem sobre o cordão de solda MIG, realizado previamente, até que se alcançasse o cordão-de-solda do primeiro passe a arco submerso. Após esta etapa, realizou-se o 2º passe de arco submerso, no lado oposto ao primeiro. Finalizada a soldagem, a junta soldada foi submetida ao ensaio não-destrutivo de ultra-som, com a finalidade de se verificar a possível existência de defeitos, como porosidade excessiva, falta de penetração, trincas, entre outros. Realizado o ensaio, constatou-se que a chapa se encontrava isenta de defeitos.

Devido as dimensões da junta soldada, sobretudo, ao seu comprimento de 5 m, a mesma foi seccionada em cinco partes de 1 m de comprimento para facilitar o seu manuseio e transporte.

Para a obtenção de mais informações sobre o comportamento mecânico do material, os corpos-de-prova foram retirados segundo as norma de preparação de amostras para ensaio de impacto Charpy (ASTM E 23). A Figura 2 ilustra o modo como os corpos-de-prova foram retirados das juntas soldadas.

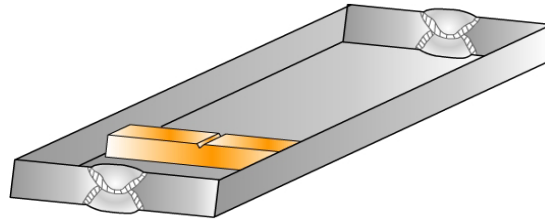


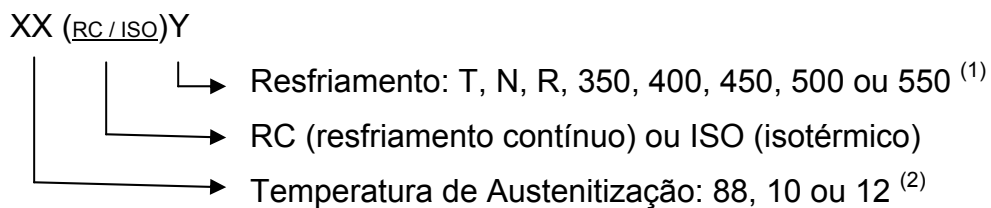
Figura 2. Representação esquemática da orientação de retiradas dos corpos-de-prova das juntas soldadas.

Foram realizados tratamentos térmicos nos corpos-de-prova retirados das juntas soldadas com o objetivo de se realizar uma análise exploratória para melhoria da tenacidade, quando comparado com a condição “como soldado”. Os corpos-de-prova foram submetidos a uma das duas rotas de resfriamento: resfriamento contínuo ou resfriamento isotérmico.

- *Temperatura e tempo de austenitização*: os corpos-de-prova foram austenitizados à: 880, 1000 ou 1225°C. Nas três temperaturas de austenitização, uma vez atingida a temperatura no interior do forno, o tempo de permanência foi de 25 minutos.
- *Resfriamento Contínuo (RC)*: depois de decorrido 25 minutos em uma das três temperaturas de austenitização, os corpos-de-prova foram resfriados em um dos seguintes meios: em água, ao ar tranqüilo ou no interior do próprio forno, correspondendo, respectivamente, aos tratamentos térmicos de têmpera, normalização e recozimento.
- *Resfriamento Isotérmico (ISO)*: depois de decorrido o tempo de 25 minutos em uma das três temperaturas de austenitização, os corpos-de-prova foram retirados do forno e rapidamente mergulhados em banho de chumbo mantido aquecido em um forno vertical. Permaneceram mergulhados no banho durante uma hora, numa das

cinco seguintes temperaturas: 350, 400, 450, 500 ou 550°C. Depois foram retirados e resfriados bruscamente em água, mantida a temperatura ambiente. O banho de chumbo teve como principais funções: tornar mais rápido e uniforme o aquecimento dos corpos-de-prova e também atuar como meio protetor da oxidação.

Portanto, no total foram realizadas 25 condições, sendo 24 por tratamento térmico e 1 do material como soldado. Para cada condição foi confeccionado 5 amostras, totalizando 125 corpos-de-prova Charpy. A nomenclatura adotada foi a seguinte:



<sup>(1)</sup> T → Temperado

N → Normalizado

R → Recozido

<sup>(2)</sup> 88 → Austenitizado à 880°C

10 → Austenitizado à 1000°C

12 → Austenitizado à 1225°C.

Por exemplo: 12 ISO 350: Austenitizado a 1225°C, resfriado isotermicamente a 350°C.

E, 'CS' → condição de Como Soldado – amostra do material sem nenhum tratamento.

Os ensaios mecânicos foram realizados com a finalidade de se avaliar o mérito dos ciclos térmicos empregados. E, conseqüentemente, estimar quais parâmetros microestruturais tendem a melhorar ou piorar a propriedade medida. Realizaram-se primeiramente ensaios de impacto Charpy e dureza Vickers para todas as condições. A partir dos resultados desses ensaios e da análise metalográfica foram selecionadas algumas condições para análise quantitativa e ensaio de microdureza.

A análise quantitativa foi realizada priorizando as amostras que possuíam o constituinte ferrita acicular, por este ser o constituinte que apresenta melhores desempenhos em tenacidade, pois sua morfologia de ripas entrelaçada dificulta a propagação da trinca, necessitando assim um gasto adicional de energia para que

ocorra propagação da trinca (BYUN, 2001, pp. 326-331). Esta análise foi realizada segundo a norma ASTM E 562 – *Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count*, o método descreve um procedimento sistemático de contagem manual de pontos para estimativa estatística da fração volumétrica de uma fase ou constituinte identificável de seções, através da microestrutura por meio de uma grade de pontos. Esta grade de pontos, com uma distribuição regular, deve ser sobreposta à imagem ou à projeção da imagem produzida por um microscópio ou fotografia. O número de pontos do ensaio que incluam a fase ou constituinte de interesse são contados e divididos pelo número total de pontos da grade produzindo uma fração de pontos. A média da fração de pontos para  $n$  campos medidos fornece a estimativa da fração volumétrica do constituinte. Para a contagem de 1000 pontos foram utilizadas 10 fotografias aleatórias de cada amostra, com sobreposição da grade com 100 pontos. Com a utilização de uma câmera digital acoplada ao microscópio óptico foi possível efetuar a análise quantitativa através de um software de tratamento de imagens, onde a malha de pontos foi sobreposta à fotografia tratada em preto e branco, posicionando-se 'bolinhas' coloridas nas intersecções das linhas de acordo com o constituinte. Este processo mostrou-se mais rápido e prático, possibilitando o arquivamento dos resultados para discussões ou análises futuras. A Figura 3 ilustra o posicionamento da malha e dos marcadores coloridos, cada cor representando uma microestrutura.

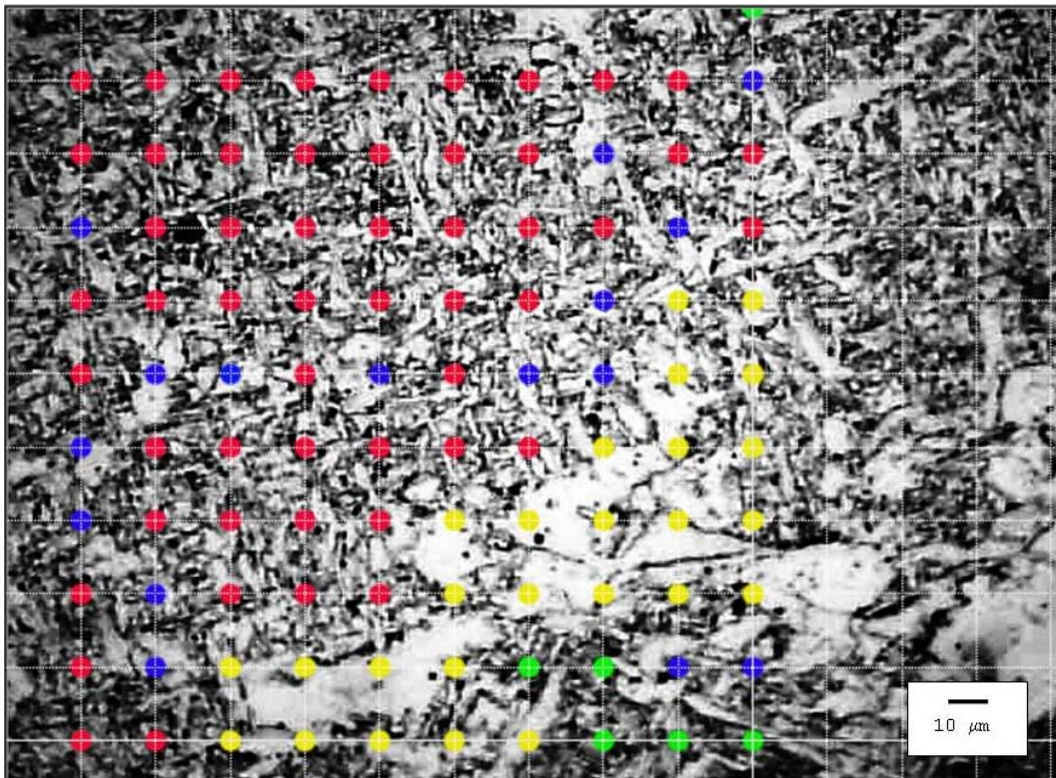


Figura 3. Fotomicrografia com sobreposição de malha e marcadores coloridos durante processo de quantificação – aumento 500X / Amostra Como Soldada P2256654 – Lente 50X – Fator de ampliação 10X – Resolução Q2(640x480dpi).

Pela análise quantitativa selecionou-se 6 condições com a presença de ferrita acicular significativa descartando-se algumas amostras que apresentaram apenas colônias esparsas ou ripas dispersas do constituinte, destas apenas 3 condições foram selecionadas para se realizar os ensaios de microdureza, as amostras foram escolhidas por apresentarem regiões de ferrita bem distintas, o que possibilitou o posicionamento do indentador num só constituinte, as outras amostras apresentam ripas de ferrita acicular muito refinadas, necessitando assim de cargas ainda menores e conseqüentemente outros procedimentos de ensaio.

A metodologia utilizada para o ensaio de microdureza consistiu em produzir as indentações com o microdurômetro (*N. Hanemann*) e efetuar as medições através das imagens capturadas utilizando recursos do software *Image Tool*. As imagens foram obtidas acoplando-se a câmera digital ao microscópio, tomando-se sempre o cuidado de manter as mesmas condições de aumento, zoom, resolução fotográfica; para a calibração do software foi fotografada uma escala conhecida sempre sob as mesmas condições. A confiabilidade do método foi comprovada realizando-se 30 indentações em cada constituinte para as cargas de 100, 70 e 10 gf, todas as

indentações foram fotografadas e cada uma das diagonais das indentações medidas 3 vezes (HVi, HVii, HViii), aproximadamente 540 leituras por condição. As variações foram menores que 5%, a Tab. 1 a seguir exemplifica as medições.

Tabela 1. Tabela de dureza Vickers para condição Como Soldado / Ferrita Primária / Carga aplicada: 100 gf / Lente 50X – Fator de ampliação 20X – Resolução Q2(640x480dpi).

	Foto	HVi	HVii	HViii	Hvmédio	Desvio
1	P4097998	192,64	190,65	192,65	191,98	1,15
2	P4097999	193,46	187,74	189,43	190,21	2,94
3	P4098000	211,03	190,87	199,92	200,61	10,10
4	P4098001	206,94	200,46	207,59	205,00	3,94
5	P4098002	205,75	190,29	194,35	196,80	8,02
6	P4098003	201,80	184,06	194,93	193,60	8,94
7	P4098004	205,02	201,29	197,02	201,11	4,00
8	P4098005	203,93	201,22	203,77	202,98	1,52
9	P4098006	193,91	195,17	183,47	190,85	6,42
10	P4098007	190,50	184,83	174,20	183,17	8,28
11	P4098008	188,72	188,00	190,07	188,93	1,05
12	P4098009	195,68	196,72	197,20	196,53	0,78
13	P4098010	206,01	204,73	202,11	204,28	1,99
14	P4098011	178,36	180,96	176,91	178,75	2,05
15	P4098012	206,46	197,02	202,91	202,13	4,77
16	P4098013	182,52	183,68	186,90	184,37	2,27
17	P4098014	203,87	193,75	194,35	197,32	5,68
18	P4098015	184,86	174,97	174,17	178,00	5,95
19	P4098016	199,27	192,47	193,53	195,09	3,66
20	P4098017	187,73	189,21	191,72	189,55	2,02
21	P4098018	189,79	190,29	194,37	191,49	2,51
22	P4098019	181,88	185,14	182,35	183,12	1,76
23	P4098020	195,22	200,39	193,54	196,38	3,57
24	P4098021	194,37	192,23	189,03	191,88	2,69
25	P4098022	192,45	197,02	193,75	194,41	2,35
26	P4098023	188,19	193,38	191,10	190,89	2,60
27	P4098024	204,80	207,78	202,33	204,97	2,73
28	P4098025	197,41	195,12	193,44	195,32	2,00
29	P4098026	192,28	190,06	191,04	191,13	1,11
30	P4098027	173,56	173,21	166,46	171,08	4,00

<b>Médias</b>	194,95	191,76	191,49	<b>192,73</b>	1,92
<b>Desvio</b>	9,41	8,03	9,43	8,96	0,80

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise quantitativa foi realizada em 6 amostras e o ensaio de microdureza foi realizado em apenas 3 posteriormente selecionadas. A Tabela 2 apresenta os valores da quantificação das amostras.

Tabela 2. Valores da análise quantitativa das amostras.

	<u>PF</u>		<u>AF</u>	<u>FS</u>		<u>FC</u>	<u>M</u>	<u>Inclusões</u>
	<u>PG(G)</u>	<u>PF(I)</u>		<u>FS(A)</u>	<u>FS(NA)</u>			
				<u>[WF, UB, LB]</u>	<u>[GB]</u>			
88 RCT	17,7	18	52,6	4,2 WF		7,5		
88 ISO 350	24,3	28,2	30	2,1 WF	6,7	8,3		0,4
12 RCT	44,1	4,1	43,2	0,9 WF		7,7		
12 ISO 350	63,5		32,9			3,6		
12 ISO 450	48,7	18,4	24,6			7,3		
CS	34,5	16,6	44,4			4,5		

(\*) Valores em porcentagem.

Legenda para Tabela 2, segundo *IIW – International Institute of Welding*:

- PF: Ferrita Primária
- PF(G): Ferrita Primária de Contorno de Grão
- PF(I): Ferrita Primária Poligonal Intragranular
- AF: Ferrita Acicular
- FS: Ferrita com Segunda Fase
- FS(A): Ferrita com Segunda Fase Alinhada
- WF: Ferrita de Widmånstatten
- UB: Bainita Superior
- LB: Bainita Inferior
- FS(NA): Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada
- GB: Bainita Granular
- FC: Agregado Ferrita Carboneto
- M: Martensita

Para o ensaio de microdureza foram selecionadas as amostras CS, 12ISO350 e 88ISO350. As microindentações foram realizadas apenas na ferrita primária e na ferrita acicular; apesar das amostras apresentarem outros constituintes como agregado ferrita carboneto, ferrita de Widmånstatten, ferrita com segunda fase não-alinhada, inclusões não-metálicas. Nesses constituintes não foram realizados ensaio devido à incapacidade no procedimento, como para o agregado ferrita carboneto,

que se apresenta em tons escuros na fotomicrografia, o que dificulta e muitas vezes não permite a visualização das indentações em cargas pequenas.

A Tabela 3 apresenta os valores de dureza medidos nos ensaios de dureza macro utilizando carga de 20 kgf e microdureza utilizando cargas de 100, 70 e 10gf, também apresenta a fração volumétrica dos constituintes (Vv).

Tabela 3. Tabela comparativa dos valores de dureza.

	HV <sub>20kgf</sub>	PF/AF	Vv (%)	HV <sub>100gf</sub>	HV <sub>70gf</sub>	HV <sub>10gf</sub>
<b>CS</b>	197,5	PF	51,1	192,73	205,66	282,02
		AF	44,4	246,5	222,45	—
<b>88ISO350</b>	159,6	PF	52,5	177,59	175,31	215,19
		AF	30	194,04	199,06	—
<b>12ISO350</b>	153,3	PF	63,5	240,38	216,79	216,67
		AF	32,9	245,17	233,51	226,88

Fazendo a multiplicação da fração volumétrica pela microdureza de cada constituinte, e somando-se as duas teremos (Tabela 4):

Tabela 4. Equacionamento dos valores de microdureza pela fração volumétrica das ferrita primária e acicular

	Carga (gf)	Equação	HV	Diferença (micro/macro)
<b>CS</b>	100	$0,511(192,73)+0,444(246,5)=$	207,93	5,28%
	70	$0,511(205,66)+0,444(222,45)=$	203,86	3,22%
<b>88ISO350</b>	100	$0,525(177,59)+0,30(194,04)=$	194,04	5,12%
	70	$0,525(175,31)+0,30(199,06)=$	199,06	4,91%
<b>12ISO350</b>	100	$0,635(240,38)+0,329(245,17)=$	233,30	52,18%
	70	$0,635(216,79)+0,329(233,51)=$	248,49	39,91%
	10	$0,635(216,67)+0,329(226,88)=$	212,22	38,44%

A última coluna apresenta a diferença no fechamento da equação levando apenas em consideração a presença de ferrita primária e ferrita acicular, essa diferença se mostra menor que 10% para as condições CS e 88ISO350, porém, para a condição 12ISO350 chega a ser maior que 50%. Em experimento realizado, estimou-se que o valor de microdureza para o agregado ferrita carboneto (FC) seria de aproximadamente 400 HV, para esse experimento, tomou-se uma amostra austenitizada à 1000°C e normalizada (10RCN) porque esta, apresentou o mesmo

valor de dureza para a ferrita primária e também por apresentar regiões mais concentradas de agregado ferrita carboneto. A carga utilizada para produzir indentações foi de 10 gf, para que a indentação se posicionasse inteiramente apenas no constituinte FC. Utilizando-se cargas maiores as indentações se posicionariam entre PF e FC. No entanto, devido ao efeito de tamanho da indentação, a carga de 10 gf gera um desvio de aproximadamente 70 HV.

## CONCLUSÃO

Concluiu-se que para o fechamento de uma equação correlacionando os valores obtidos pela microdureza com sua fração volumétrica, reconstituí-se o valor da macro dureza, com a presença de um fator possivelmente gerado pelo *Indentation Size Effect* (ISE) - efeito de tamanho da indentação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM E 384 – Standard Test Method for Microhardness of Materials – *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, PA, 1989, pp. 385 – 403.

ASTM E 23 – Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials – *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, PA, 2003, pp. 01 – 27.

ASTM E 562 – Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count – *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, PA, 1995, pp. 500 – 505.

BEGLEY, M.R., HUNTCHINSON, J.W., 1998. *The mechanics of size dependent indentation*. J. Mech. Phys. Solids. Vol. 46, Number 10, pp. 2049 – 2068.

BYUN, J. et al. (2001). *Inoculated acicular ferrite microstructure and mechanical properties*. Materials Science and Engineering A319-321, pp. 326-331.

IIW, 1986. *International Institute of Welding*. Guideline for Classification of Ferritic Steel Weld Metal Microstructural Constituents Using the Light Microscope. *Welding in the World*, 24 (7/8), pp. 144 – 149.

Metal Handbook, 1976. *ASM – American Society for Metals*, Metals Park, OH, v.11, pp. 15 –19.

OLIVER, W.C., PHARR, G.M., 1992. *Improved Technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments*. Journal of Material Research. Vol 7, Number 6, pp. 1564 – 1583.

SHU, J.Y., FELCK, N.A. 1998. *The Prediction of a SizeEffect in Micro-Indentation*. Int. J. Solids Structures, Vol. 35, nº 13, pp. 1363 – 1383.

## **MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF A WELDING JOINT - MICROHARDNESS AND VOLUME FRACTION -**

### **ABSTRACT**

*Plates of a structural steel had been joined by welding, of this joint had been confectioned specimen that had been classified by the heat treatments to which had been submitted. In the conditions where they presented greater amounts of the acicular ferrite particularly had been tested by microhardness. Attempting to an equation correlating the microhardness of each constituent and the hardness macro of the sample, a great number of indentações in each constituent became separately. It varied load observing itself the increase of the variation of hardness when reduce de load, verifying the indentation size effect. The readings of the indentations had been carried through using the resources of software Image Tool. New methods had been adopted with the intention of minimizing some of the factors that influence in the microhardness test, in the quantitative analysis had been used resources of the software of treatment of images, so that it facilitated the technique of counting of points.*

*Keywords: microstructure, microhardness, volume fraction.*