

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE UM AÇO BAIXO CARBONO MICROLIGADO AO VANÁDIO E UM AÇO BAIXO CARBONO AISI 1020 UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE COMPONENTES MECÂNICOS

O. Moraes Junior^{1,2}; M. F. Pillis^{2*}

¹SENAI Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
R Ari Barroso, 305 - 06216-901 Osasco – SP

²IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – 05508-000 São Paulo-SP

[*mfpillis@ipen.br](mailto:mfpillis@ipen.br)

RESUMO

O presente trabalho estudou as propriedades mecânicas do aço microligado ao vanádio com 0,25%V e um aço AISI 1020. O aço microligado apresentou LRT, LE, alongamento e estrição, respectivamente, 735,29 MPa, 559,07 MPa, 22,7% e 67,15%. O aço AISI 1020 apresentou, respectivamente, 437,42 MPa, 268,71MPa, 32,92% e 63,29%. O aço microligado apresentou propriedade mecânica superior a do aço AISI 1020 e ductilidade equivalente. Os resultados de impacto Charpy nas temperaturas de 23 °C, -20 °C e -40 °C foram, para o aço microligado, respectivamente de, 33,83 J, 12,41 J, e 6,54 J, e para aço AISI 1020 33,18 J, 5,07 J e 3,04 J, respectivamente. Observa-se tenacidade superior do aço microligado, quando comparado com o aço AISI 1020. O ensaio revelou microestruturas refinadas em ambos os aços, e tamanho de grão ASTM E 112 n° 8 e n° 7 para o aço microligado e para o AISI 1020, respectivamente.

Palavras-Chave: aço microligado, vanádio, aços HSLA, Charpy, resistência à tração

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos 30 anos, a indústria brasileira tem utilizado cada vez mais aços especiais, denominados aços microligados que contêm, preponderantemente, os elementos Nb (nióbio), V (vanádio) e Ti (titânio) em sua composição química, em baixos teores, não ultrapassando 3% do total (considerando também os outros elementos de liga presentes), surgindo daí o nome de “microligados” ⁽¹⁾. Esses aços são ligas ferrosas que apresentam elevados valores de resistência mecânica, boa

soldabilidade, baixo teor de carbono, além de altos valores de tenacidade. Estas propriedades são obtidas através de composição química adequada, e resfriamento controlado do processo termomecânico de laminação a quente, obtendo-se o refino do tamanho de grão ferrítico com precipitação de carbonitretos estáveis de Nb, V e Ti em matriz ferrítica ⁽¹⁾. Laminação a 600°C de tiras de 3 mm de aço ao carbono com 0,003%C, 0,15%Mn, 0,02%Si, 0,01%P, 0,01%S, 0,055%Ti e 0,033%Nb tem sido realizada em laboratório obtendo-se recristalização dinâmica de grãos ferríticos de 25 a 30 µm para 0,5 a 1,5 µm com taxa de deformação de 50%, com substancial incremento propriedades mecânicas de 110MPa para 420MPa no escoamento e 191 MPa para 480 MPa de resistência ⁽²⁾.

O aumento das propriedades mecânicas dos aços microligados tem sido obtido também com temperaturas de laminação na região bifásica dos aços ao carbono ($\alpha + \gamma$). Aços do tipo S700MC como substrato principal de produtos tipo clad, de acordo com a norma europeia EM 10.149-2, tem sido produzido com valores de resistência ao escoamento e resistência a tração, respectivamente, de 740 MPa e 905 MPa laminados a 780°C e rebobinados a 493°C⁽³⁾.

Os aços microligados ao vanádio com baixo e médio teor de carbono têm sido estudados quanto ao seu comportamento, sob taxas controladas de deformação a quente, quanto a recristalização dinâmica. A recristalização dinâmica é um efeito muito importante para que se possa ter microestrutura controlada e refinada. Observou-se que o aumento do teor de carbono em aços microligados ao vanádio a taxa de recristalização foi aumentada com taxas de deformação entre 0,005/s a 10/s e em temperaturas de deformação de 900°C a 1000°C. ⁽⁴⁾

Outros tipos de aços podem ser classificados como da mesma família dos aços microligados ou ARBL, como os aços bifásicos (*dual-phase*), apresentando as características citadas anteriormente⁽⁵⁾. Com o advento dos aços microligados, cada vez mais, busca-se redução de custos, de peso e de energia na fabricação de componentes mecânicos ⁽⁵⁾. O uso dos aços microligados expande-se em aplicações nos mais variados segmentos industriais, como automotivo, construção civil, óleo e gás, equipamentos mecânicos, agroindústrias, onde tradicionalmente se utiliza aços carbono.

Aços microligados contendo 0,15% a 0,20% e 0,10% a 0,15% de V foram desenvolvidos com teores de 0,010% a 0,015% de N nas décadas de 1960 e 1970,

sendo aplicados em larga escala, por exemplo, em tubulações de gases com espessura de parede reduzida⁽⁶⁾.

O vanádio contribui para o aumento de resistência mecânica dos aços pela formação de precipitados finos (5 a 100 nm) de carbonitretos de V que se distribuem na ferrita, durante o ciclo de resfriamento da laminação a quente. São utilizados em teores de até 0,10%. O vanádio causa um aumento da resistência mecânica de 5 a 15 MPa para cada 0,01% V dependendo do teor do carbono e da taxa de resfriamento da laminação a quente ⁽⁷⁾.

O manganês tem o efeito de se dissolver na ferrita promovendo seu endurecimento, retarda a decomposição da austenita, diminui a temperatura de transição de fratura dúctil/frágil, forte formador de sulfetos e estabilizante da perlita ⁽⁸⁾

O trabalho foi concebido no sentido de caracterizar um aço microligado ao vanádio quanto aos ensaios químicos, mecânicos e microestruturais e comparar essas propriedades com as de um aço ao carbono comum equivalente em teor de carbono.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

As amostras, tanto do aço microligado como do aço AISI 1020 foram retiradas de barras de aço de 50,8 mm de diâmetro laminadas a quente. A laminação de ambos os materiais foi realizada na faixa de temperatura de 1100°C a 1200°C e esfriadas ao ar no leito de laminação.

A Tabela 1 mostra a composição química nominal dos aços microligado e AISI 1020, conforme especificado no certificado da usina.

Tabela 1 – Composição química nominal dos aços microligado e 1020(% em peso)

aço	elementos								
	Fe	C	Mn	P	S	Si	Al	V	N
microligado	97,13- 98,38	0,22	1,4-1,8	0,05	0,05	0,2-0,5	0,02	0,25	0,0065
AISI 1020	99,26	0,18- 0,23	0,3-0,6	0,04 max	0,05 max				

Fonte: Certificado de Análise do Fabricante – 2018

As propriedades mecânicas típicas do aço AISI 1020 são apresentadas na Tabela 2 ⁽⁷⁾

Tabela 2 – Propriedades mecânicas típicas do aço AISI 1020

Limite de Resistência a Tração (MPa)	Limite de Escoamento 0,2%offset (MPa)	Alongamento 50 mm (%)	Impacto (J) a 25°C
448	331	36	86,8

2.2 Análise química

A análise química foi realizada pelo método de espectrometria de emissão ótica no equipamento marca FOUNDRY-MASTER de acordo com a norma ABNT NBR 16137:2016. O teor de carbono foi avaliado pelo método de combustão de cavaco e analisado no equipamento ELTRA CS 800, de acordo com as normas para análise de Carbono e Enxofre, respectivamente, ISO 9556 e ISO 4935.

2.3 Ensaios metalográficos

2.3.1 Preparação das amostras

O lixamento foi realizado com lixas de granulometria e na sequência 120, 220, 320, 400, 600. O polimento foi realizado com o abrasivo de solução aquosa de alumina de 1 µm e 0,5 µm. O ataque químico foi realizado com solução de Nital 5% com tempo de imersão 5s e, em seguida, lavadas em água, álcool e secadas por ventilação. O procedimento foi realizado conforme a norma ABNT NBR 13284:1995.

2.3.2 Microscopia

As amostras para análise metalográfica foram observadas em um microscópio óptico, marca OLIMPUS PME3 111B. O tamanho de grão foi determinado conforme a norma ASTM E 112 pelo método dos interceptos utilizando programa analisador de imagens OLYMPUS versão 5.0(*Build 1224*).

Análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas em microscópio eletrônico de varredura modelo ZEISS AURIGA observando-se a secção de fratura de amostras provenientes do ensaio de impacto.

2.4 Ensaios mecânicos

O ensaio de tração foi realizado com determinação do limite de resistência à tração, limite de escoamento (0,2% *offset*), alongamento percentual total e estrição e complementado pelos ensaios de dureza Brinell e absorção de energia de impacto Charpy. As temperaturas utilizadas no ensaio de impacto foram 23°C, -20°C e -40°C. As temperaturas foram definidas com base nas especificações do fabricante para aços de composição química semelhante.

2.4.1 Dureza Brinell

O ensaio foi feito em um durômetro de bancada BRINELL WOLPERT BK 300a com capacidade de 15,625 a 3000 Kgf e de acordo com a norma ABNT NBR NM ISO 6506 -1:2010. Foram executadas quatro medições a meio raio, com esfera de aço de 10 mm e carga de 3000 Kgf aplicada durante 15 segundos.

2.4.2 Resistência à tração

Os ensaios foram executados em uma máquina universal de ensaios com capacidade de carga de 60 toneladas da marca WOLPERT, com “*software*” e extensômetro de 50 mm Panantec. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013. Foram utilizados 6 corpos de prova usinados retirados a meio raio da barra laminada de 50,8 mm, de acordo com a norma ASTM A370 Tipo 3 conforme dimensões na Figura 1.

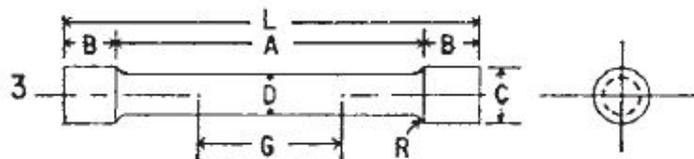


Figura 1 – Geometria e dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio de tração.

Onde:

G é o comprimento útil = 50,00 ±0,10 mm

D é o diâmetro = 12,50 ±0,25 mm

R é o raio mínimo de concordância = 2 mm

A é o comprimento mínimo da seção reduzida = 100 mm

L é o comprimento total aproximado = 140 mm

B é a seção de aderência = 20 mm

C é o diâmetro da seção de extremidade = 18 mm

2.4.3 Impacto Charpy

Os ensaios foram executados em uma máquina universal de ensaios de materiais WOLPERT – modelo PW 30/15, com capacidade para 30 Kgfm e de acordo com a norma ABNT NBR ISO 148-1:2013.

Foi preparado um conjunto de 9 corpos de prova retirados da direção longitudinal da barra e preparados com entalhe tipo A. Os ensaios foram realizados em 3 amostras em cada temperatura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise química

A Tabela 3 mostra o resultado obtido na composição química da amostra do aço microligado. Observa-se que a amostra apresentou teor de Mn acima do máximo especificado no valor de 0,7%. Observa-se que foram detectados também microligantes como o Cr, Cu, Nb e Ti. Os demais elementos apresentaram valores de acordo com a composição do fabricante. A presença de microligantes contribuiu para o refino do grão ferrítico da microestrutura do aço microligado.

Tabela 3 – Resultado da análise química do aço microligado (% peso)

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Al	Cu	V	Nb	Ti	N
Teor	0,17	1,87	0,034	0,008	0,331	0,20	0,008	0,04	0,018	0,23	0,005	0,003	0,009

3.2 Microscopia óptica

A análise metalográfica do aço microligado revelou uma microestrutura constituída de perlita fina com ferrita proeutetóide em contorno de grão, como ilustra a Figura 2, com tamanho de grão nº 8 conforme ASTM E 112. Isso contribuiu para o aumento da resistência mecânica do aço microligado quando comparado com a do aço AISI 1020, como pode ser observado nas Tabelas 4 e 5.

A análise metalográfica do aço AISI 1020 revelou uma microestrutura constituída de perlita fina com ferrita proeutetóide em contorno de grão semelhante à do aço microligado, porém com tamanho de grão nº 7 conforme ASTM E 112.

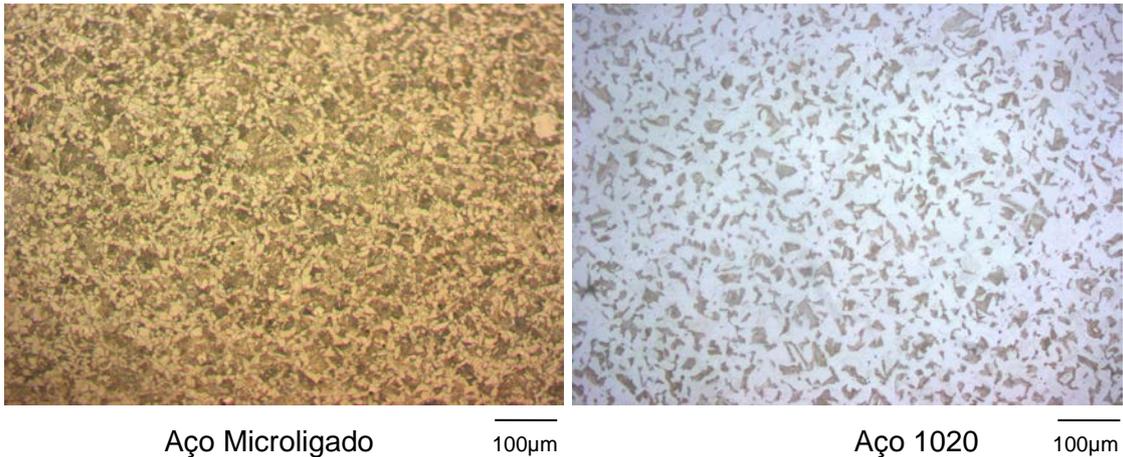


Figura 2: Micrografias da secção transversal. Ataque nital 5%.

3.3 Dureza Brinell

Como pode ser observado na Tabela 4, o aço microligado apresentou valor de dureza superior à do aço AISI 1020 em até 75%.

Tabela 4 – Resultados do Ensaio de Dureza Brinell nas amostras dos aços

Dureza HBS10/3000	
Aço Microligado	Aço AISI 1020
232,00 ± 4,24	136,5 ± 7,78

3.4 Tração

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos no ensaio de tração dos aços microligado e AISI 1020. Observa-se que o valor de resistência à tração do aço microligado mostrou-se superior em até 68% em relação ao aço AISI 1020. O limite de escoamento apresentou valor superior em até 208%, alongamento menor em 10,2% e estrição maior em 3,9%. É de se notar que muito embora o aço microligado apresente resistência à tração e escoamento superiores ao do aço AISI 1020, apresenta valores de alongamento percentual e estrição compatíveis com uma boa ductilidade.

O aço AISI 1020 apresenta-se com valores de resistência e ductilidade de acordo com a literatura, conforme se observa na Tabela 2. A presença de menor teor de manganês na composição química do aço AISI 1020 pode, provavelmente, ter sido responsável pelos valores de resistência mecânica, quando comparados com os do aço microligado ⁽⁶⁾.

Os resultados obtidos no ensaio de dureza Brinell mostraram-se coerentes com as propriedades mecânicas obtidas para ambos os aços.

Tabela 5 – Resultado dos ensaios de tração dos aços microligado e AISI 1020

Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento 0,2% (MPa)	Alongamento 50 mm (%)	Estricção (%)
735,29 ± 3,34	559,97 ± 2,21	22,70 ± 0,27	67,15 ± 0,38
437,41 ± 6,76	268,70 ± 83,43	32,92 ± 0,42	63,29 ± 0,58

3.5 Impacto Charpy

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos nos valores de energia de impacto nos aços microligados e AISI 1020. Observa-se que na temperatura ambiente de 23°C o aço microligado apresentou energia de impacto igual a 33,83 J, menor que ao do aço AISI 1020 que apresentou o valor de 52,6 J. Os valores de energia absorvida do aço microligado nas temperaturas de -20°C e -40°C ainda são superiores ao do aço AISI 1020 sendo 12,41 J contra 5,07 J a -20°C e 6,54 J contra 3,04 J a -40°C, evidenciando, portanto, um aço mais tenaz que o aço AISI 1020 nessas temperaturas. É possível observar que a transição de fratura dúctil x frágil nos aços estudados podem estar na faixa de temperatura entre -20°C e -40°C para o aço microligado e entre 23°C e -20°C para o aço AISI 1020.

Não foi possível comparar com a literatura os resultados obtidos no ensaio Charpy para o aço microligado, devido tratar-se de aço especial não normalizado. No entanto, aços da série ASTM A 808 classificados como aços HSLA com propriedade de impacto com entalhe apresentam tenacidade de 40 J a 60 J a -45°C (7).

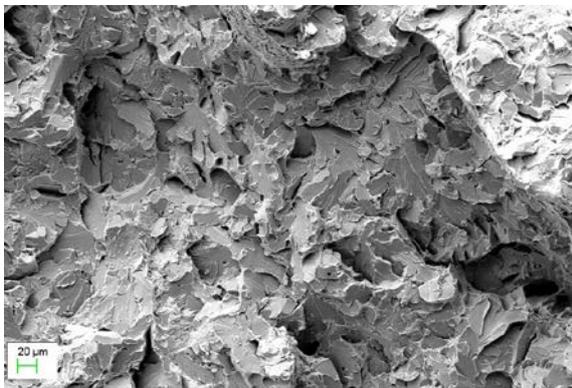
Tabela 6 – Energia absorvida média (J) no ensaio de impacto dos aços microligado e AISI 1020.

Material	Temperatura (°C)		
	23	-20	-40
microligado	33,83 ± 2,43	12,41 ± 0,92	6,54 ± 0,93
AISI 1020	33,18 ± 10,68	5,07 ± 1,98	3,04 ± 0,45

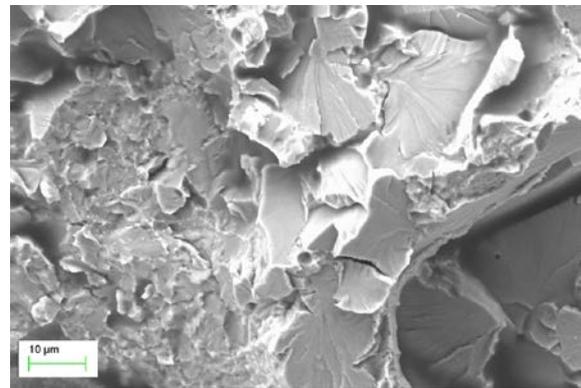
3.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As análises por MEV estão indicadas na Figura 3 para o aço microligado e na Figura 4 para o aço AISI 1020 nas temperaturas indicadas.

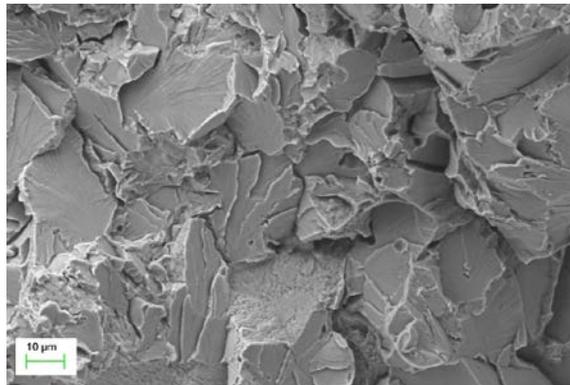
As análises efetuadas para o aço microligado e para aço AISI 1020 na temperatura de 23°C, revelaram a presença de “*dimples*” os quais são característicos de uma microestrutura fibrosa de materiais dúcteis. Nas temperaturas de -20°C e -40°C, observam-se fraturas com a presença de planos de clivagem caracterizando material com fratura frágil, coerente com os valores de energia absorvida obtida mostrados na Tabelas 6 para ambos os aços em estudo.



(a)



(b)



(c)

Figura 3: Imagens por MEV da secção de fratura do aço microligado ensaiado nas temperaturas de: (a) 23°C; (b) - 20°C; (c) - 40°C.

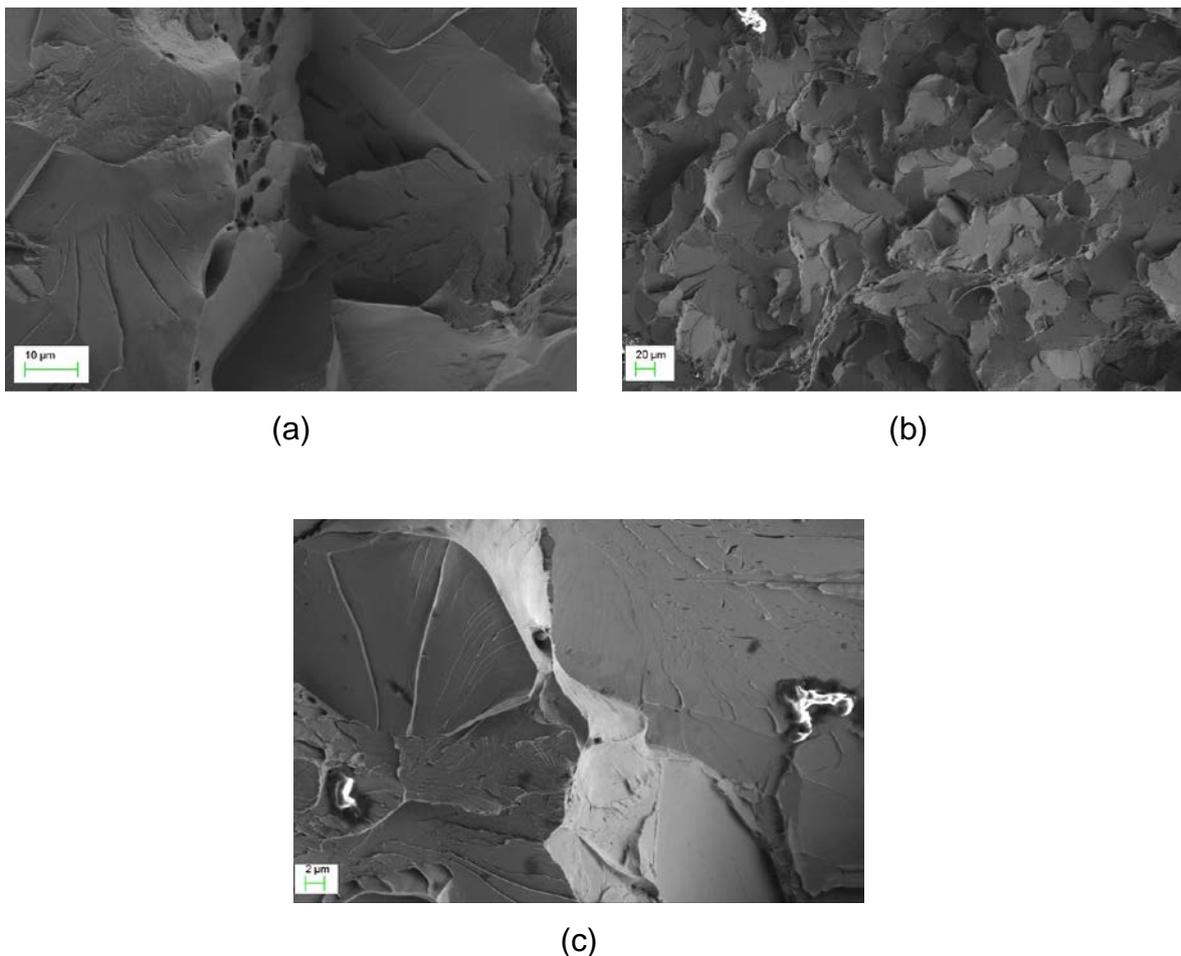


Figura 4: Imagens por MEV da secção de fratura do aço AISI 1020 ensaiado nas temperaturas de: (a) 23°C; (b) – 20°C; (c) – 40°C.

4. CONCLUSÕES

O aço microligado apresentou microestrutura com tamanho de grão ferrítico nº 8 de acordo com ASTM E 112 resultante da presença dos microligantes. Observou-se uma microestrutura refinada com a presença de perlita em lamelas finas, o que contribuiu para o aumento da resistência mecânica do aço microligado quando comparado com a do aço AISI 1020. O aço AISI 1020 revelou uma microestrutura semelhante à do aço microligado porém com tamanho de grão nº 7 conforme ASTM E 112. A presença de menor teor de manganês em sua composição química, assim como a ausência de microligantes, podem ser reponsáveis pelo maior tamanho de grão. Os valores de dureza Brinell mostraram-se coerentes com as propriedades mecânicas obtidas para ambos os aços.

O aço microligado apresentou limite de resistência à tração e limite de escoamento superiores em relação ao aço AISI 1020, coerentes com a composição

química, microestruturas e propriedades de ductilidade, como o alongamento total e estricção equivalente ao do aço AISI 1020.

O resultado do ensaio de impacto Charpy realizado em amostras dos dois aços revelou valores de tenacidade superiores do aço microligado quando comparado com aquele do aço AISI 1020. É possível observar que a transição de fratura dúctil-frágil nos aços estudados pode estar na faixa de temperatura entre -20°C e -40°C para o aço microligado e entre 23°C e -20°C para o aço AISI 1020.

Nas faces de fratura do aço microligado e do aço AISI 1020 observaram-se fraturas do tipo dúctil para ambos os aços na temperatura de 23°C e fraturas frágeis com aspecto cristalino para as temperaturas de -20°C e -40°C. As análises do MEV efetuadas para o aço microligado e para aço AISI 1020 na temperatura de 23°C, revelaram a presença de “*dimples*”, os quais são característicos de microestrutura fibrosa de materiais dúcteis. Nas temperaturas de -20°C e -40°C, observam-se fraturas com a presença de planos de clivagem caracterizando material com fratura frágil, coerente com os valores de energia absorvida obtidos no ensaio de impacto.

REFERÊNCIAS

- 1) BUTTON, S.T.; Aços microligados reduzem tempo e custo na produção de autopeças, *Jornal UNICAMP*, Universidade Estadual de Campinas, edição 26/11/2007 a 2/12/2007.
- 2) RUDSKOI, A.I.; KODZHASPIROV, G.E.; S. V., DOBATKIN; *Advanced Technologies for Manufacturing Sheet Products with Ultrafine-Grained Structure*; Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2012, No. 1, pg. 72–75. © Pleiades Publishing, Ltd., 2012.
- 3) A.I., ZAITSEV, A.I.; I.G. RODIONOVA, I.G.; A.A. PAVLOV, A.A.; O.N. BAKLANOVA, O.N.; I.V. LYASOTSKII, I.V.; *Development of a New Generation of High-Strength Low-Carbon Microalloyed Steels for Main Layer of Clad Rolled Products*; *Metallurgist*, Vol. 58, Nos. 9–10, January, pg 910, 2015
- 4) HAI-LIAN WEI; GUO-QUAN LIU; HAI-TAO ZHAO; MING-HE ZHANG; *Effect of Carbon Content on Hot Deformation Behaviors of Vanadium Microalloyed Steels*; *Materials Science & Engineering A*; pg 119, Elsevier, 2013
- 5) COSTA E SILVA, A.L.V.; MEI, P.R.; *Aços e Ligas Especiais*, Editora Blucher, 3ª edição, pg. 220, 221, 329 e 330, 2010

- 6) LAGNEBORG, R.; SIWECK, T.; ZAJAC, S.; HUTSHINSON, B.; The Role of Vanadium in Microalloyed Steels, Swedish Institute for Metals Research, Stockholm, Sweden, pg 2-3, 1999.
- 7) ASM INTERNATIONAL; High-Strength Low-Alloy Steel, American Society For Metals, Metals Park, Ohio, pg 1041, 1043, 1047.
- 8) BAKER, T.N.; Microalloyed Steels – A Review and Critical Assessment, Ironmaking & Steelmaking Journal, March, pg 265, 270, 2016

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo” pelas facilidades oferecidas para realização dos ensaios, e a empresa Bardella Aços Finos S/A pelo material gentilmente cedido.

COMPARATIVE STUDY BETWEEN A LOW CARBON VANADIUM MICROALLOYED STEEL AND AISI 1020 LOW CARBON STEEL USED IN THE MANUFACTURE OF MECHANICAL COMPONENTS

O. Moraes Junior¹; M. F. Pillis^{2*}

In this work, the mechanical properties of a vanadium microalloyed steel and AISI 1020 were studied and compared. The microalloyed steel presented LRT, LE, elongation and stiffness values of, respectively, 735.29 MPa, 559.07 MPa, 22, and 25% 7% and 67.15%. AISI 1020 presented, respectively, 437.42 MPa, 268.71 MPa, 32.92% and 63.29%. The microalloyed steel presented mechanical properties superior to AISI 1020 and equivalent ductility. The results of the Charpy impact tests at the temperatures of 23 ° C, -20 ° C and -40 ° C were 33.83 J, 12.41 J, 6.54 J, and for AISI 1020 steel the values were 33,18 J, 5.07 J and 3.04 J, respectively. The superior tenacity of the microalloyed steel is observed when compared to the AISI 1020 steel. The metallographic tests, showed fine grain microstructures ASTM E 112 No.8 and 7.for the microalloyed and for the AISI 1020, respectively.

Keywords: microalloyed steel, vanadium, HSLA steels, Charpy, tensile strength