

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO TEOR DE MANGANÊS E CROMO NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVOS DOS AÇOS AUSTENÍTICOS AO MANGANÊS HADFIELD*

Adriel de Brito Maciel Trindade¹

Luciana Sgarbi Rossino²

Gilson Neves da Silva³

Resumo

O objetivo deste trabalho foi de analisar a influência da variação de manganês e cromo na resistência ao desgaste abrasivo de aços austeníticos ao manganês aplicados em britadores de minério e verificar mecanismos de encruamento. Este material possui grande importância para o setor de mineração quanto para a economia do país. Para tanto, produziram-se ligas com teor de manganês (Mn) variando entre 12 e 21%, contendo cromo (Cr) entre 0,31 a 2,06 %. A resistência ao desgaste foi determinada através da realização de ensaios de micro-abrasão por esfera fixa. Para a análise dos mecanismos de encruamento, realizaram-se ensaios de impacto por martelamento seguido de metalografia ótica e perfil de dureza. Os resultados evidenciaram que o aço com percentual mais elevado de manganês com adição de cromo possui maior resistência ao desgaste abrasivo. Observou-se que o mecanismo atuante no encruamento dessas ligas é maclação de deformação, podendo elevar a dureza destes aços em valores quatro vezes maiores que sua dureza inicial. Conclui-se que o teor de Mn e Cr presente nesses aços influenciam na resistência ao desgaste abrasivo, sendo o Mn de maior influência.

Palavras-chave: Aços auteníticos ao manganês; Desgaste abrasivo; Encruamento.

ANALYSIS OF THE VARIATION OF MANGANESE AND CHROMIUM CONTENT IN RESISTANCE TO ABRASIVE WEAR OF AUSTENITIC STEELS TO MANGANESE HADFIELD

Abstract

The target of this work is to analyze the influence of the variation of manganese and chromium contents on the abrasion wear of Hadfield austenitic manganese steels, applied in crushers of ores and to verify the work hardening mechanism. This steel is very important for the mining business and consequently for the Brazilian economy. For that, some alloys were produced varying the manganese range from 12 to 21% and chromium from 0,31 a 2,06 %. The wear resistance was determined by means of microabrasion tests using fixed spheres. For the analysis of the work hardening mechanisms, impact tests were performed by hammering, followed by optical microscopy and hardness profile. Results evidenced the Hadfield steel with higher manganese content and addition of chromium presented higher resistance to abrasion wear. It was observed the main mechanism acting on it was deformation twins, which may elevate the hardness of such steels in more than 4 times when compared to its initial hardness. The manganese content has more influence on the wear resistance.

Keywords: Hadfield austenitic manganese steel; abrasive wear; work hardening.

1. *Graduando em Tecnologia em Processos Metalúrgicos, Faculdade de Tecnologia José Crespo Gonzales, Fatec Sorocaba, Sorocaba, São Paulo, Brasil e funcionário da empresa Metso Fundação, Sorocaba, São Paulo, Brasil.*
2. *Doutora em Ciência e Engenharia dos Materiais, Professora Efetiva, Faculdade de Tecnologia José Crespo Gonzales, Fatec Sorocaba, Sorocaba, São Paulo, Brasil e Colaboradora do Programa de Pós Graduação em Ciência dos Materiais PPGCM, Universidade Federal de São Carlos - UFSCar Campus Sorocaba, Sorocaba, São Paulo, Brasil.*
3. *Mestre em Engenharia de Materiais, Engenheiro de Processos Sênior na Metso Fundação, Sorocaba, São Paulo, Brasil.*

* Contribuição técnica ao 19º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week 2019, realizada de 01 a 03 de outubro de 2019, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços austeníticos ao manganês são materiais desenvolvidos para aplicações de variada severidade, envolvendo impactos e/ou altas tensões de abrasão. Estes metais possuem uma fenomenal capacidade de encruamento superficial, distinguindo-os dos demais materiais ferrosos usados em aplicações abrasivas.

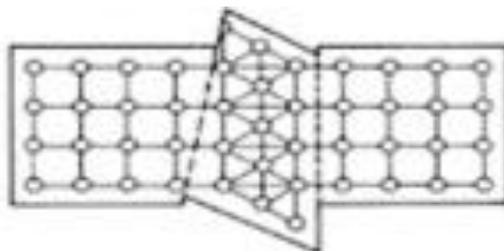
Após o término da revolução industrial, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas dos aços ao carbono, intensificou-se a utilização de elementos de liga como manganês (Mn), silício, alumínio e titânio, com a justificativa que os mesmos melhorariam as propriedades de soldabilidade, usinagem e resistência mecânica dos aços. Neste período, Sir Robert Abbot Hadfield, na cidade de Sheffield (Inglaterra), iniciou o estudo sobre a adição de altos teores de manganês em aços com elevado percentual de carbono. Seu estudo concluiu que os aços com carbono entre 1 e 1,4% e manganês de 10 a 14% possuíam propriedades de resistência ao desgaste, tenacidade a fratura e propriedades mecânicas algumas vezes superiores aos aços carbono [1]. Desde então, teve grande aceitação como material de desgaste, sendo grandemente aplicado na indústria de mineração, ferroviária e recycling.

Ao longo do século passado, a composição desses aços foi amplamente estudada, sofrendo algumas alterações em relação à composição padrão proposta por Hadfield em 1882, sendo que as alterações de maior aceitação foram as envolvendo o teor de manganês e carbono [2].

O teor de Mn acima de 11 % possibilita a formação de uma estrutura totalmente austenítica em temperatura ambiente, porém o resfriamento lento em moldes de areia na confecção de peças por fundição gera um grande volume de carbonetos precipitados em contorno de grão, reduzindo drasticamente a tenacidade. A solução clássica para este inconveniente tem sido o tratamento térmico de solubilização com resfriamento em água agitada [2].

Os mecanismos de deformação plástica atuantes nos aços Hadfield conferem a estes materiais as propriedades de resistência ao desgaste necessária para sua aplicação na indústria e sua alta capacidade de encruamento tem sido motivo de inúmeras pesquisas. G. T. Andrade (2015) menciona em seu trabalho que diversos autores sugerem respostas para este fenômeno [3]. Jost & Shimidt (1986) e Zum-Gahr (1987) correlacionam a capacidade de elevação de dureza superficial dos aços austeníticos ao manganês à movimentação de átomos intersticiais para os defeitos da estrutura deformada. Porém os mecanismos de encruamento citados com maior frequência na literatura estão vinculados aos fenômenos de transformação fase por deformação e maclas de deformação [3].

A transformação de fase por deformação (transformação martensítica) refere-se alteração da estrutura cristalina de alguns aços austeníticos para martensíticos através da deformação plástica, como apresenta a figura 01.



Fonte: [4]

Figura 01: esquema da transformação de fase martensítica por deformação.

Por muito tempo, o potencial de elevação de dureza dos aços autênticos ao Mn foi associado a este tipo de transformação martensítica, porém, nos anos 80, constatou-se que a transformação martensítica nesses materiais ocorreria somente em aços com teores de Mn ou C inferior ao estabelecido por Hadfield.

Tal transformação pode ser encontrada nos aços hadfield descritos pela grade F da tabela 1 da norma ASTM A128, cujo teor de Mn varia entre 6 a 8%. [4].

Outra possibilidade de ocorrer transformação martensítica é durante o tratamento térmico de solubilização em aços Hadfield, quando pode ocorrer uma considerável decarbonetação, gerando regiões de maior instabilidade da austenita ocasionando a transformação martensítica por deformação. Restringe-se a poucos milímetros.

Esse mecanismo não proporciona melhorias significativas na resistência ao desgaste em altas tensões de abrasão como é esperado para estes materiais. [2].

Esse tipo de rearranjo estrutural por deformação plástica está associado a valores de energia de defeito ou falha de empilhamento (EDE)/(EFE) inferior a 18 mJ/m^2 [4].

Para entender o grande papel da energia de falha de empilhamento no modo de deformação dos aços Hadfield, seguem alguns comentários.

A energia de falha de empilhamento (EFE) é tradução direta do inglês Stacking Fault Energy (SFE).

Resumidamente, tem-se o esquema da falha de empilhamento em duas condições:

- por lacunas (falta de átomo);
- por intersticiais (presença de átomos de raio pequeno).

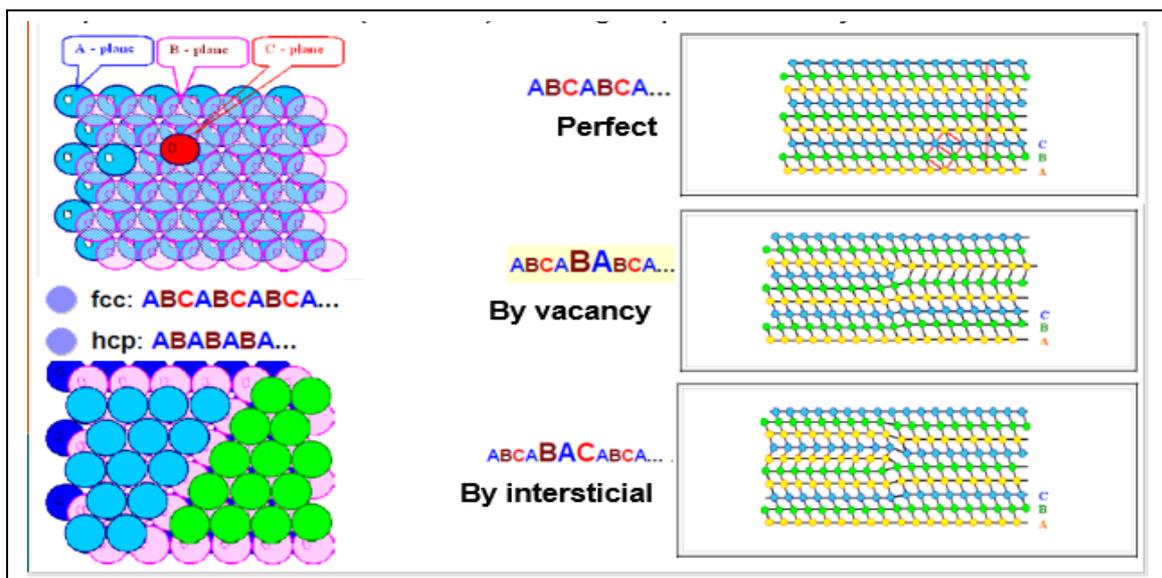


Figura 02: esquema da energia de falha de empilhamento.

A energia de falha de empilhamento (EFE) descreve a energia da interface entre uma sequência perfeita de empilhamento (ABCABC) e uma estrutura defeituosa (ABABAB) de uma rede cristalina.

Aços Hadfield padrão possuem estrutura cúbica de face centrada (CFC) com baixa energia de falha de empilhamento (cerca de 23 mJ/m^2).

A energia de falha de empilhamento dita o mecanismo de encruamento desse aço.

A medida da falha de empilhamento governa a distância entre discordâncias.

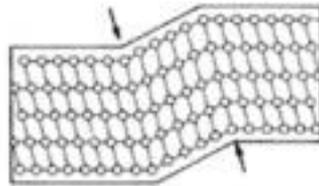
Essa distância afeta mecanismos, tais como escalada cruzada que permite que deslocamentos ultrapassem obstáculos.

A mobilidade de discordâncias (deslocações) também dita o modo de deformação (escorregamento ou maclação) que inevitavelmente altera o comportamento macroscópico mecânico e propriedades do material (limite de escoamento, resistência à fluência, envelhecimento e endurecimento por deformação).

Nos metais que apresentam deformação predominantemente por maclação, observa-se elevada ductilidade e altas taxas de encruamento.

Este sistema de deformação plástica é evidenciado em metais cuja EFE é superior a 18 e inferior a 35 mJ/m² [4].

Na estrutura cristalina estes materiais, mediante a aplicação de uma tensão de cisalhamento, uma porção dos átomos são reestruturados de maneira a formar uma imagem em espelho dos átomos ao seu redor que não sofreram a deformação, como exemplificado na figura 02 [1].



Fonte: [4]

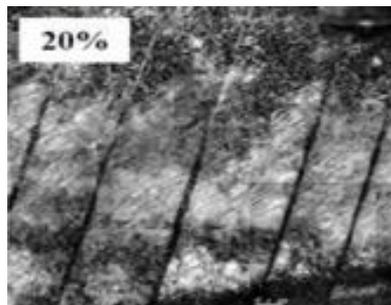
Figura 03: Esquemática da deformação plástica por maclação mecânica

A variação do comportamento plástico dos aços austeníticos ao manganês pode ser associada a teores de carbono e manganês que o compõem, pois estes elementos possuem efeito na energia de defeito de empilhamento.

Considerando o sistema cúbico, o mecanismo de deformação plástica não depende unicamente da EFE, mas sim de um conjunto de fatores, tais como:

- EDE, taxa de deformação e temperatura.

No sistema cúbico de face centrada, por exemplo, a austenita dos aços Hadfield tendo a energia de defeito de empilhamento inferior a 25 mJ/m², vai predominar a maclação como mecanismo de deformação plástica [4].



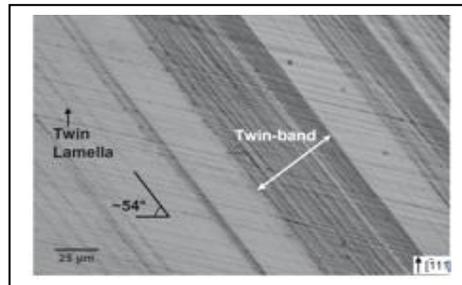
Fonte: [5]

Figura 04: Material com 20% de deformação apresentando maclas e o bloqueio das discordâncias, observado via microscópio eletrônico de transmissão (MET).

Nos aços deformáveis por maclação, tem-se a diminuição da mobilidade das discordâncias dentro do grão austenítico em virtude das novas fronteiras formadas em seu interior. Este mecanismo assemelha-se ao refinamento de grão [5].

Considerando que a resistência ao desgaste desta família de aços é proporcionada pela composição, o trabalho tem como objetivo analisar a variação de manganês e cromo (Cr) na resistência ao desgaste abrasivo.

Em monocristais de aço Hadfield, maclas aparecem como regiões uniformes macroscópicas, mas na realidade as regiões são não uniformes e contém mistura de regiões alternadas maclas tipo lamelas e material da matriz separadas por cerca de 100 a 200 nm.



Fonte: [5]

Figura 05: Esquema de maclação em monocristais de aço Hadfield.

Há discussão sobre mecanismos que atuam em aços Hadfield com manganês acima de 20% e energias de falhas de empilhamento que ultrapassam 35 mJ/m^2 [4].

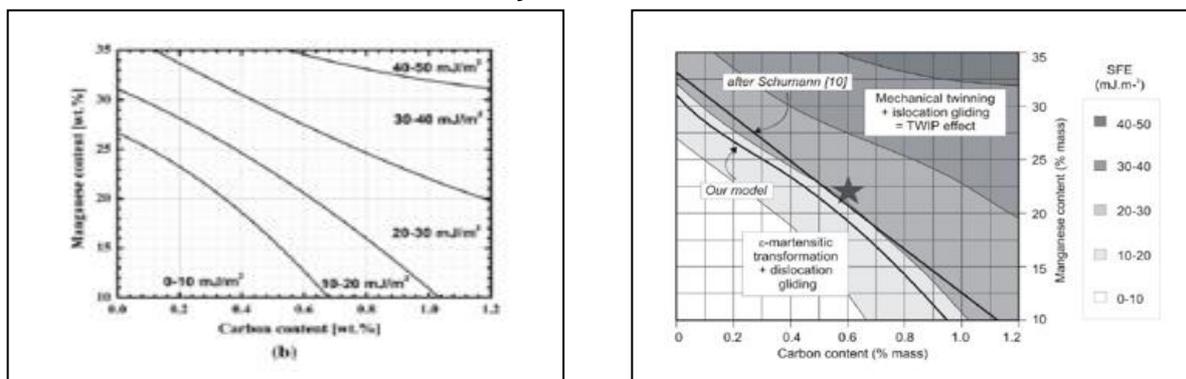
Algumas teorias não encontram muita consistência, mas algumas podem ser citadas por envolver mecanismos mais experimentados. Vamos citar duas dessas teorias:

- Deslizamento de discordâncias (Glide dislocation) para carbono e manganês mais altos, acima dos valores da norma ASTM A 128, como 20 a 30% de manganês, além de carbono acima de 1,30% (e com cromo ou não, dependendo da aplicação) seria o mecanismo para encruar o aço Hadfield considerando energias de falha (ou defeito) de empilhamento acima de 30 mJ/m^2 [4] como parâmetro principal junto com o mecanismo de maclagem (ou maclação) como efeito secundário.

Outra teoria cita o mecanismo Envelhecimento Dinâmico por Deformação, tradução de Dynamic Strain Aging, que torna-se importante quando o processo de maclação perde sua validade como efeito principal.

A energia de falha de empilhamento para esse mecanismo é acima de 50 mJ.m^{-2} .

À esquerda, tem-se variação de energia de falha de empilhamento versus C e Mn. À direita, tem-se modos de deformação versus C e Mn.



Fonte: [5]

Figura 06: variação de energia de falha de empilhamento versus C e Mn.

Figura 07: modos de deformação versus C e Mn.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 LIGAS PRODUZIDAS PARA O TRABALHO

Foram fundidos corpos de prova com composições químicas da tabela 1. Após isso, fabricaram-se corpos de prova com dimensões cúbicas entre 20 e 25 mm, figura 04, para a realização dos ensaios de desgaste e análise metalográfica.

Tabela 1. Composição química dos materiais fundidos

| Aço | C | Mn | Si | P | S | Cr |
|------------|------|-------|------|-------|--------|------|
| 21 Mn2Cr | 1,3 | 21,26 | 0,69 | 0,034 | 0,0005 | 2,06 |
| 18 Mn1,8Cr | 1,28 | 17,8 | 0,75 | 0,031 | 0,0005 | 1,84 |
| 13 Mn0,3Cr | 1,1 | 13,3 | 0,7 | 0,03 | 0,0007 | 0,31 |
| 12 Mn1,3Cr | 1,16 | 12,6 | 0,66 | 0,036 | 0,0005 | 1,33 |

Análises de composição química realizadas na empresa Metso fundição em Sorocaba SP

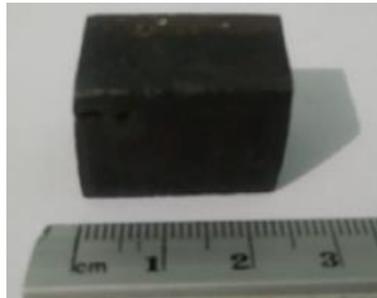


Figura 08: Dimensões dos corpos de prova utilizados para os estudos e ensaios

2.2 TRATAMENTO TÉRMICO- SOLUBILIZAÇÃO

Os corpos de prova foram tratados termicamente pelo processo de solubilização com a finalidade de dissolver em matriz austenítica os carbonetos e produtos de segunda fase formada no resfriamento em moldes de areia. Os parâmetros do processo foram realizados conforme apresentado na figura 9.



Figura 9: Parâmetros utilizados para o tratamento térmico de solubilização, realizado no laboratório da Faculdade de tecnologia de Sorocaba (FATEC)

2.3 ENCRUAMENTO POR IMPACTO

O encruamento por impacto foi realizado em 2 das composições citadas na tabela 1, 13Mn0,3Cr e 21Mn2Cr, com finalidade de analisar os mecanismos de deformação plástica com a variação do percentual de Mn em 8% e adição de 2% de Cr.

O ensaio foi realizado através de sucessivos impactos produzidos por martelamento manual em uma das faces do corpo de prova.

A principal finalidade deste ensaio é analisar os mecanismos de deformação plástica atuantes nas ligas.

2.4 ENSAIO DE DUREZA

Para analisar a dureza antes e depois do processo de encruamento, bem como a profundidade de encruamento gerada, foram realizados ensaio de microdureza Vickers, utilizando carga de 250g com o equipamento da marca Mitutoyo HM 200 disponível no Laboratório de Microscopia da FATEC Sorocaba.

A esquematização do ensaio é representada pela figura 10.

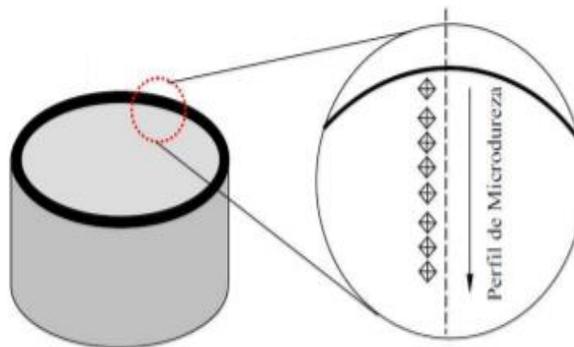


Figura 10: Esquematização do ensaio de perfil de dureza

Para as amostras ensaiadas por perfil de dureza Vickers, foi necessário realizar anteriormente a preparação metalográfica da amostra, a qual foi embutida em baquelite, lixada, polida e atacada.

2.5 PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA

Para a análise das microestruturas bruta de fusão, solubilizada e encruada por impacto, foi realizada preparação metalográfica seguindo parâmetros estabelecidos pela norma ASTM E395-00.

As amostras foram cortadas transversalmente, embutidas em baquelite e lixadas utilizando lixas com as seguintes granulometrias crescentes 80, 220, 320, 400, 600, 1200 e 2000.

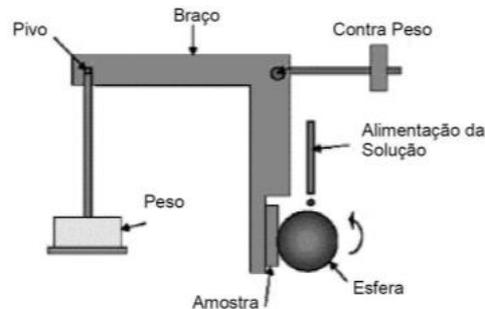
O polimento foi realizado utilizando pasta de diamante com granulometria de 1µm. Para revelar a microestrutura bruta de fusão e a solubilizada, utilizou-se reagente Nital 3% (97% álcool etílico e 3% ácido nítrico).

Para as microestruturas deformadas, utilizou-se Nital 5% (95% álcool etílico e 5% ácido nítrico).

As imagens foram obtidas através do software de captura de imagem do microscópio LEICA com camera e software de captura e análise de imagens pertencente ao Laboratório de Microscopia da FATEC Sorocaba.

2.6 ENSAIO DE DESGASTE MICRO-ABRASIVO POR ESFERA FIXA

A análise da resistência a abrasão dos aços produzidos foi realizada utilizando o equipamento de desgaste micro-abrasivo por esfera fixa, cujo esquema ilustrativo é apresentado na figura 11, pertencente ao LabTES - Laboratório de Tecnologia e Engenharia de Superfície, FATEC Sorocaba.



Fonte: [7]

Figura 11: Esquema do ensaio utilizado para análise da resistência ao desgaste abrasivo

Este ensaio consiste em gerar o contato físico entre a esfera e o corpo de prova fixo, com a esfera girando com precisão em relação à amostra que se mantém inerte durante o ensaio.

Através desse sistema é possível gerar cargas elevadas e alta tensão entre as superfícies durante o ensaio [7].

O ininterrupto movimento da esfera de aço temperado AISI 51100 de 1" de diâmetro gera uma região desgastada em forma de calota esférica.

Determinando o diâmetro da calota gerada e utilizando a equação 01, é possível quantificar o volume de material desgastado durante o ensaio [7].

$$V = \frac{\pi b^4}{64R} \quad (01)$$

Os parâmetros utilizados para os ensaios estão descritos na tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros utilizados para o ensaio de desgaste micro-abrasivo

| Carga em (N) | Tempo de ensaio (s) | Frequencia em (Hertz) |
|--------------|---------------------|-----------------------|
| 30 | 120 | 40 |

2.7 RESULTADOS E DISCUSÕES

2.7.1 DUREZA DOS MATERIAS SOLUBILIZADOS

Os materiais após o tratamento de solubilização apresentaram durezas significativamente diferenciadas como é possível verificar na figura 12.

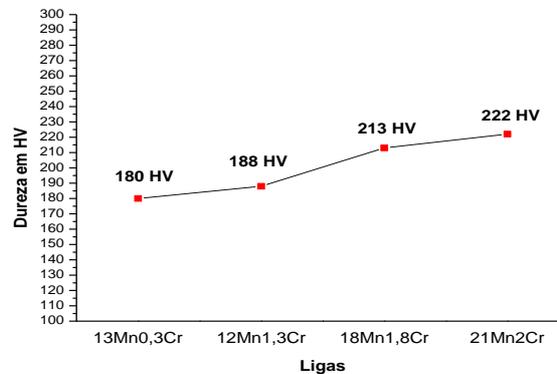


Figura 12: Dureza HV para as ligas estudadas após tratamento térmico de solubilização.

As ligas apresentaram variação de dureza conforme os diferentes percentuais de Mn e Cr que as constitui. A liga 12Mn1,3Cr possui 1% de Cr a mais em relação à liga 13Mn0,3Cr, o que pode ter sido responsável pela pequena elevação da dureza do material 12Mn em relação ao 13Mn.

Este comportamento pode ser justificado pelo endurecimento por solução sólida, causado pelos átomos de Cr na estrutura cristalina do ferro [8].

Comparando a dureza do aço 12Mn1,3Cr em relação ao aço 18Mn1,8Cr, é notório a significativa elevação da dureza com a variação do teor de Mn.

Os materiais 18Mn1,8Cr e 21Mn2Cr apresentaram durezas relativamente maiores que os materiais com menor teor de Mn, comprovando a influência deste elemento na dureza dos materiais solubilizados.

2.7.2 ANÁLISE DO PERFIL DE DUREZA E MATALOGRAFIA DOS MATERIAIS ENCRUADOS

Através dos ensaios de perfil de dureza e análises metalográficas, foi possível verificar os mecanismos atuantes no endurecimento por encruamento dos aços austeníticos ao manganês entre os teores de 13%p Mn a 21%p Mn.

A figura 13 demonstra os resultados obtidos na elevação da dureza por impacto, em que, para os diferentes materiais, a dureza máxima atingida aproximou-se de 4 vezes o valor inicial representado pela figura 12.

Grande parte da literatura que aborda o assunto, em especial as mais antigas, descrevem que a dureza por encruamento nesses aços pode atingir valores máximos da ordem de 600 HV [9].

No entanto, os resultados obtidos demonstram valores da ordem de 770 HV para o material 13Mn (figura 9 (a)) e 824HV para o aço 21Mn (figura 9 (b)).

Todavia, o encruamento máximo do material em aplicações industriais dependerá de diversos fatores como taxa de encruamento, composição da liga (pois influência na EDE do material), material britado ou moído e método de encruamento utilizado [2].

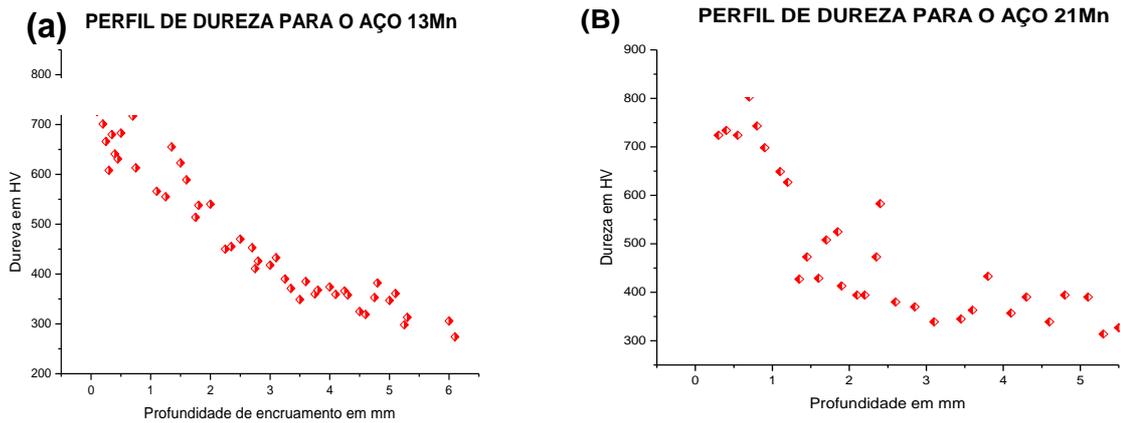


Figura 13: (a) Perfil de encruamento para o aço 13Mn0,3Cr
(b) Perfil de encruamento para aço 21Mn2Cr

A análise da região encruada por impacto via metalografia ótica permitiu identificar somente a maclação presente no mecanismo responsável pela alta dureza nas regiões próximas à superfície, mas podemos correlacionar os mecanismos atuantes com a referência bibliográfica adquirida.

A figura 14 (a) e (b) mostram as regiões de maior dureza obtidas pelo ensaio.

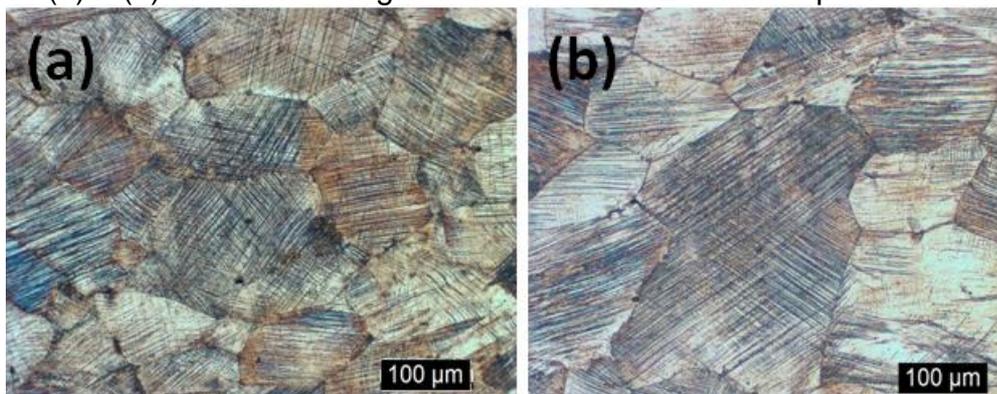


Figura 14: (a) mecanismos de encruamento atuantes no aço 13 Mn0,3Cr - 200X.
(b) mecanismos de encruamento atuantes do aço 21 Mn2Cr -200X.

São vistas maclas de deformação nas estruturas de ambos os materiais.

Observa-se nas duas figuras 14 (a) e (b) a formação de segundos planos de maclas em alguns grãos.

De acordo com a bibliografia, a formação do sistema secundário de maclação ocorre através do alto carregamento do sistema primário [4].

Ao atingir 25% de deformação, o sistema é aliviado, formando o plano secundário. Analisando a microestrutura apresentada, é possível verificar grãos contendo somente um sistema de maclas e outros contendo os dois sistemas, evidenciando que os grãos deformam-se de maneira heterogênea, de acordo com seus planos cristalográficos.

Os dois materiais analisados, mesmo contendo diferença de 8% de Mn e adição de 2% de Cr, apresentaram as maclas como mecanismos de deformação plástica.

Não vemos a transformação martensítica.

Porém, o microscópio ótico é limitado para ver outros mecanismos em aços com manganês acima de 20% que foram citados anteriormente.

2.7.3 ENSAIO DE DESGASTE MICRO-ABRASIVO POR ESFERA FIXA

Os aços austeníticos ao manganês analisados apresentaram variação em relação ao desempenho da resistência ao desgaste por abrasão, sendo que o material que apresentou maior volume de desgaste, e portanto menor resistência ao desgaste, possui menor quantidade de Mn e Cr.

O aço 21Mn2Cr (maior quantidade de elementos de liga) teve o menor volume de perda de material durante o ensaio. Os resultados são apresentados na figura 15.

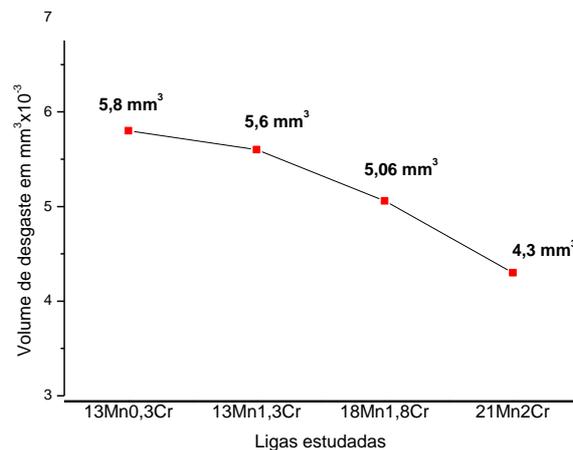


Figura 15: Variação do volume de desgaste em relação às ligas estudadas

Para os aços 13Mn0,3Cr e 12Mn1,3Cr, que possuem diferença de 1% de Cr em sua composição química, o volume de desgaste apresentado foi menor para o material contendo maior teor de Cr (12Mn1,3Cr), entretanto a diferença apresentada entre as duas ligas é relativamente pequena.

A diferença de perda de material entre os aços 12Mn1,3Cr e 18Mn1,8Cr foi maior se comparada ao volume de desgaste apresentado entre as ligas 13Mn0,3Cr e 12Mn1,3Cr.

A liga 18Mn1,8Cr possui teor de Cr 0,5% maior do que a liga 12Mn1,3Cr, porém o percentual de Mn varia 6% entre elas.

O material 21Mn2Cr apresentou o menor volume de desgaste entre todas as ligas analisadas. Este aço apresenta em sua composição química somente 0,22% a mais de Cr em relação ao aço 18Mn1,8Cr, no entanto o teor de Mn entre as ligas variam 3,5%, sendo a possível causa da maior resistência ao desgaste abrasivo.

Estes resultados estão de acordo com aqueles apresentados por G. R. Lima (2011).

Ao realizar ensaios de pino sobre disco em diversos aços austeníticos ao manganês, a composição de menor percentual de Mn apresentou perda de massa 11,7% maior em relação ao material com maior teor deste elemento [09].

3 CONCLUSÃO

O estudo aqui apresentado comprova a influência da variação do teor de manganês e cromo na resistência ao desgaste dos aços austeníticos ao manganês Hadfield e a atuação do mecanismo de maclas de deformação como principal motivo para a alta taxa de encruamento verificado nesses materiais.

É importante enfatizar a limitação da técnica de microscopia ótica para confirmação de mecanismos para ligas com teores de manganês acima de 20%.

Através do ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera fixa, verificou-se que as ligas contendo teores de manganês e cromo inferiores apresentaram menor resistência ao desgaste.

As ligas 18Mn1,8Cr e 21Mn2Cr se destacaram das demais analisadas, possuindo somente 0,22% de cromo a mais que a composição 18Mn1,8Cr e apresentando uma variação significativa de 3,46% de Mn, a liga 21Mn2Cr apresentou volume de desgaste inferior, concluindo que há influência desde elemento na resistência a abrasão desses aços.

Os resultados apresentados em relação ao encruamento por impacto demonstraram que a dureza dos dois materiais analisados podem atingir valores da ordem de quatro vezes maior em relação a sua dureza inicial, sendo que estes resultados são promovidos pelo surgimento de maclas de deformação e a interação entre os planos de maclas formados na estrutura desses metais.

AGRADECIMENTOS

À empresa Metso Fundação em Sorocaba SP por ceder materiais para o estudo.

À Faculdade de Tecnologia de Sorocaba (Fatec) pela disponibilização de equipamentos e laboratórios

REFERÊNCIAS

1. Venturelli BN. Efeito do refinamento do tamanho de grão pela adição de Hf nas propriedades mecânicas de tração e impacto do aço Hadfield. Dissertação de mestrado apresentado à escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2018. (1): 20-51
2. Silva GN. Efeito da substituição do molibdênio pelo nióbio e nióbio-boro em aços Hadfield no desempenho ao desgaste abrasivo. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT.2004 (1) 10-50
3. Andrade GT. Resistência a abrasão de aço Hadfield para Britadores- efeito do tamanho do abrasivo e do pH do meio. Dissertação de mestrado apresentada à escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2015 (1) 28-29
4. Machado PC. Análismultiescala da abrasão de aços austeníticos ao manganês aplicados em britadores de minério.Tese de Doutorado apresentado a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2017. (1) 3-40
5. Zorzi JCS. Avaliação do processamento de aço TRIP-TWIP em escala piloto. Dissertação de mestrado do programa de pós graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. 2014 (1) 35-36
6. Lopes HSM. Estudo da resistência ao desgaste do Aço Ferramenta P20 Tratados Superficialmente por Cementação e Nitretação. Relatório final de Iniciação Científica entregue a Faculdade de Tecnologia de Sorocaba. 2014. (1) 35-50
7. Rondotaro RG. Mecanismos de desgaste abrasivo. Tese de doutorado, Apresentado ao departamento de Engenharia metalúrgica da Universidade de São Paulo. 1989.
8. Chiaverini V Aços e ferros fundidos. Ass. Brasileira de Metais. 1982. (5º) 315-320
9. Lima GR. Influência de elementos de liga no encruamento no aplainamento nos aços Hadfield. Dissertação de mestrado em Engenharia mecânica do programa de pós-graduação da Universidade Estadual Paulista UNESP. 2011(1) 45-61.