

INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DA TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO NA MICROESTRUTURA E NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE AÇOS FERRAMENTA PARA TRABALHO A QUENTE*

Natasha Nogueira de Morais¹

Elaine Carballo Siqueira Corrêa²

Wellington Lopes³

Adriene Anita dos Santos Pimenta⁴

Carlos Ferreira da Silva⁵

Resumo

Aços ferramenta para trabalho a quente são aqueles utilizados em ferramentais que trabalham a elevadas temperaturas, chegando a ultrapassar 500°C em operação. Esses aços são aplicados principalmente na confecção de matrizes de forjamento, extrusão e fundição sob pressão. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento mecânico e a microestrutura de três distintos aços ferramenta para trabalho a quente, AISI H13, AISI H11 e DIN 1.2367, submetidos a diferentes temperaturas de austenitização na têmpera. A avaliação foi realizada mediante o uso das técnicas de microscopia óptica e de varredura, bem como por meio de ensaios mecânicos de dureza, impacto e tração. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura de austenitização na têmpera promoveu um aumento de dureza dos materiais, em função do aumento da fração volumétrica da martensita formada. Nos ensaios de impacto tipo Charpy o maior teor de silício, levou a um menor nível de energia absorvida do aço AISI H13. Em termos de resistência à tração, para os três aços, foi observado o aumento do limite de resistência à tração e, de forma geral, do limite de escoamento, com o aumento da temperatura de austenitização.

Palavras-chave: Aços ferramenta para trabalho a quente; propriedades mecânicas; austenitização; microestrutura.

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION AND AUSTENITIZATION TEMPERATURE ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL BEHAVIOR OF HOT WORK TOOL STEELS

Abstract

Hot work tool steels are those used in tooling that work at high temperatures, reaching up to 500°C in operation. These steels are mainly applied in the manufacture of forging, extrusion and die castings. In this context, the objective of this work was to evaluate the mechanical behavior and microstructure of three different hot work tool steels, AISI H13, AISI H11 and DIN 1.2367, subjected to different austenitization temperatures on quenching. The evaluation was carried out using the techniques of optical and scanning microscopy, as well as mechanical tests of hardness, impact and tensile test. The results showed that the increased temperature of austenitization in quenching promoted an increase in the hardness of the materials, due to the increase in the volumetric fraction of the martensite formed. In the Charpy impact tests the higher silicon content led to a lower level of energy absorbed by AISI H13 steel. In terms of tensile strength, for the three steels, it was observed an increase of the ultimate tensile strength and, in general, in the yield, with the increase of the austenitization temperature.

Keywords: Hot work tool steels; mechanical properties; austenitization; microstructure.

¹ Eng. de Materiais, Mestranda Eng. de Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Eng. Mecânica, Dra. Professora, Dept. Eng. de Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Eng. Mecânico, Dr. Professor, Dept. Eng. de Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Química, Msc. Eng. de Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁵ Eng. Mecânico, Msc. Eng. de Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A fundição em ligas de alumínio é vista como uma tecnologia estratégica, uma vez que é possível obter peças com diferentes geometrias, em larga escala de produtividade [1]. O processo de fundição sob pressão, também conhecido por HPDC, é responsável pela moldagem de grande parte dos fundidos produzidos em ligas leves. Neste processo, o metal líquido é injetado em altas velocidade e pressão no interior de uma cavidade conhecida como matriz [2].

O bom desempenho do processo de fundição pelo processo HPDC depende de inúmeros parâmetros, dentre eles, ressalta-se a seleção adequada dos materiais utilizados na confecção das matrizes e o tratamento térmico aplicado, fatores tais que influenciam diretamente na vida útil dos ferramentais [3]. O processo HPDC expõe as matrizes a esforços cíclicos com altas cargas mecânicas e a altas temperaturas [4], dessa forma, a fim de obter ferramentas que apresentem características tais como, tenacidade e resistência ao desgaste a altas temperaturas e resistência ao impacto, a correta seleção do material utilizado na confecção das ferramentas é fator preponderante.

Aços ferramenta para trabalho a quente são aços utilizados em aplicações que expõem o material a ciclos de tensões mecânicas e térmicas. Esses aços são largamente empregados na confecção de ferramentas para extrusão de alumínio, forjamento de aços e matrizes para fundição sob pressão. Dessa forma, a manutenção de elevados níveis de dureza e tenacidade à temperatura de trabalho são requisitos para a utilização destes aços.

Sob a perspectiva econômica, a confecção destas complexas matrizes de fundição sob pressão compõe uma etapa de alto custo do processo de fabricação de peças fundidas, refletindo diretamente no valor agregado do produto acabado. Assim, a busca constante pelo aumento de vida útil destas ferramentas é de importância fundamental para toda a cadeia produtiva desde o fabricante ao consumidor final de peças, por exemplo, da indústria automotiva, como blocos de motor e transmissões.

O tratamento térmico é uma das últimas etapas do processo de manufatura dos moldes, no entanto, é a etapa mais crítica do processo de confecção, sendo as propriedades mecânicas das ferramentas intimamente relacionadas à microestrutura obtida após o processo [5,6,7]. Sua qualidade reflete diretamente na vida útil do ferramental e, portanto, sua importância. A realização do tratamento de maneira adequada é, não somente condição indispensável para obtenção das propriedades operacionais e mecânicas de ferramentas, mas também para a economia em sua utilização [5].

O procedimento de têmpera consiste em elevar a temperatura do aço até sua austenitização (que nos aços ferramenta pode ser total ou parcial) por um tempo específico seguido do resfriamento brusco. Esta etapa leva à formação de uma microestrutura martensítica [8]. A martensita origina-se da austenita e é conhecida como a microestrutura dura de aços temperados. Trata-se de uma fase metaestável produzida a partir do resfriamento brusco na têmpera, durante o qual os átomos de carbono não se distribuem entre ferrita (α) e cementita (Fe_3C), já que não há movimentação de átomos por difusão [9]. Os átomos de carbono deslocam-se por cisalhamento ou movimento cooperativo [10] para sítios octaédricos da estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), formando a martensita. A martensita assume a estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC), uma vez que se excede a solubilidade do carbono na estrutura CCC sendo que, dessa forma, o parâmetro de rede na direção [0 0 1] não é o mesmo nas direções [1 0 0] e [0 1 0] [11]. Essa transformação é denominada como displaciva, ou seja, uma transformação adifusional.

A austenitização é "o ponto de partida para as transformações posteriores desejadas, as quais se processarão em função da velocidade de resfriamento adotada" [12]. Neste estágio, juntamente à transformação da matriz ferrítica proveniente de um processo de resfriamento lento anterior em austenita, ocorre a dissolução dos carbonetos da liga [5]. Após o aquecimento e encharque para austenitizar o material, este é submetido ao resfriamento brusco. O tipo de

resfriamento a ser utilizado depende do aço, podendo ser ao ar, gás, sal, salmoura, água e óleo [13].

Neste trabalho foi estudada a influência da temperatura de austenitização no arranjo microestrutural e no comportamento mecânico, bem como a influência da composição química, de três tipos de aços ferramenta para trabalho a quente, esses utilizados na confecção de matrizes para fundição sob pressão, aplicadas na fabricação de peças para a indústria automotiva.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Neste trabalho foram utilizados três diferentes aços ferramenta para trabalho a quente, sendo eles os aços AISI H13, AISI H11 e DIN 1.2367. Na tabela 1 são apresentados os resultados de análise química (% em peso) obtidos nos três aços avaliados.

AISI H13	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Mo	%V	%P	%S	%Ni
	0,388	0,328	1,05	5,15	1,36	0,880	0,0099	0,0013	0,0956
	%Al	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Pb	%Sb	%Fe
	0,0554	0,103	0,0056	0,0069	0,880	<0,0002	<0,0002	0,00049	90,6
AISI H11	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Mo	%V	%P	%S	%Ni
	0,377	0,351	0,243	5,22	1,84	0,516	0,0088	0,0017	0,0732
	%Al	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Pb	%Sb	%Fe
	0,0122	0,0488	0,0071	0,0057	0,516	<0,0002	0,00026	<0,0004	91,3
DIN 1.2367	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Mo	%V	%P	%S	%Ni
	0,361	0,296	0,211	4,88	2,74	0,549	0,0172	0,0018	0,0903
	%Al	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Pb	%Sb	%Fe
	0,0188	0,0940	0,0071	0,0060	0,549	<0,0002	0,00028	<0,0004	90,7

Tabela 1. Composição química dos aços ferramenta AISI H13, AISI H11 e DIN 1.2367.

Inicialmente, os três materiais citados foram caracterizados quanto às suas composições químicas, microestruturas e dureza no estado como recebido. Em seguida, amostras dos aços foram processadas termicamente, por meio dos tratamentos térmicos de têmpera, em duas diferentes temperaturas de austenitização. Para tais condições, análises microestruturais e a caracterização mecânica por meio de ensaio de dureza Rockwell, de impacto e tração foram realizadas.

Os materiais foram fornecidos pela NEMAK Alumínio do Brasil como placas de 15mm de espessura.

2.2 Composição Química e Caracterização Microestrutural

O controle inicial dos materiais foi realizado por meio da avaliação da composição química, cuja análise foi conduzida empregando um espectrômetro de emissão óptica da marca Spectro modelo SpectroLab 120463/06. O processamento térmico realizado nos três aços estudados foi constituído da etapa de têmpera e conduzido em um forno elétrico da marca Fornitec modelo 4236 com resfriamento em óleo.

A caracterização microestrutural dos aços foi realizada por meio de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise microestrutural foi embasada na identificação dos constituintes formados em cada ciclo de processamento térmico bem como no estado inicial dos aços, sendo realizada de maneira qualitativa. A preparação metalográfica das amostras foi constituída pelas etapas lixamento em lixas de granulometria #80, #320 e #1000 e polimento em diamante em suspensão de 3µm, lubrificadas em álcool etílico por movimentos circulares e na direção contrária à movimentação do disco de polimento. Após a preparação metalográfica, as amostras foram avaliadas por MO em um microscópio Olympus modelo GX51 empregando um analisador de imagem Analysis e por MEV em um microscópio Shimadzu modelo SSX-550.

2.2 Caracterização Mecânica

Para a avaliação da dureza dos corpos-de prova, o ensaio foi conduzido em durômetro Rockwell marca Newage modelo Versitron. Para a análise do comportamento mecânico em termos de tenacidade do material após os ciclos térmicos, corpos-de-prova foram confeccionados para ensaios de impacto do tipo Charpy conforme a norma ASTM A370-05. Os ensaios de impacto foram conduzidos em uma máquina de impacto marca Jinan Time Shijin, com velocidade de impacto de 5,2m/s, braço do martelo de 750mm e resolução digital de 0,1J. A fim de avaliar, ainda, o comportamento mecânico quanto a resistência mecânica à esforços uniaxiais de tração, corpos-de-prova foram confeccionado conforme norma ASTM E8/E8M em escala sub-size. Os testes foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios marca Instron modelo 4482 com célula de carga 100 kN. A velocidade do travessão móvel do equipamento utilizada foi de 1,44 mm/min. Utilizou-se, ainda, um extensômetro marca Instron, tipo estático, número serial 198, com comprimento de 25mm.

3 Resultados e Discussão

3.1 Caracterização no Estado como Recebido

Os três aços ferramenta para trabalho a quente, objetos de estudo deste trabalho, foram caracterizados quanto às suas microestruturas e durezas no estado como fornecidos.

Essencialmente, observa-se microestrutura inicial constituída de uma matriz ferrítica com carbonetos dispersos nos três aços analisados. Tal microestrutura apresenta características típicas aquelas de aços ferramenta processados termicamente por recozimento [14].

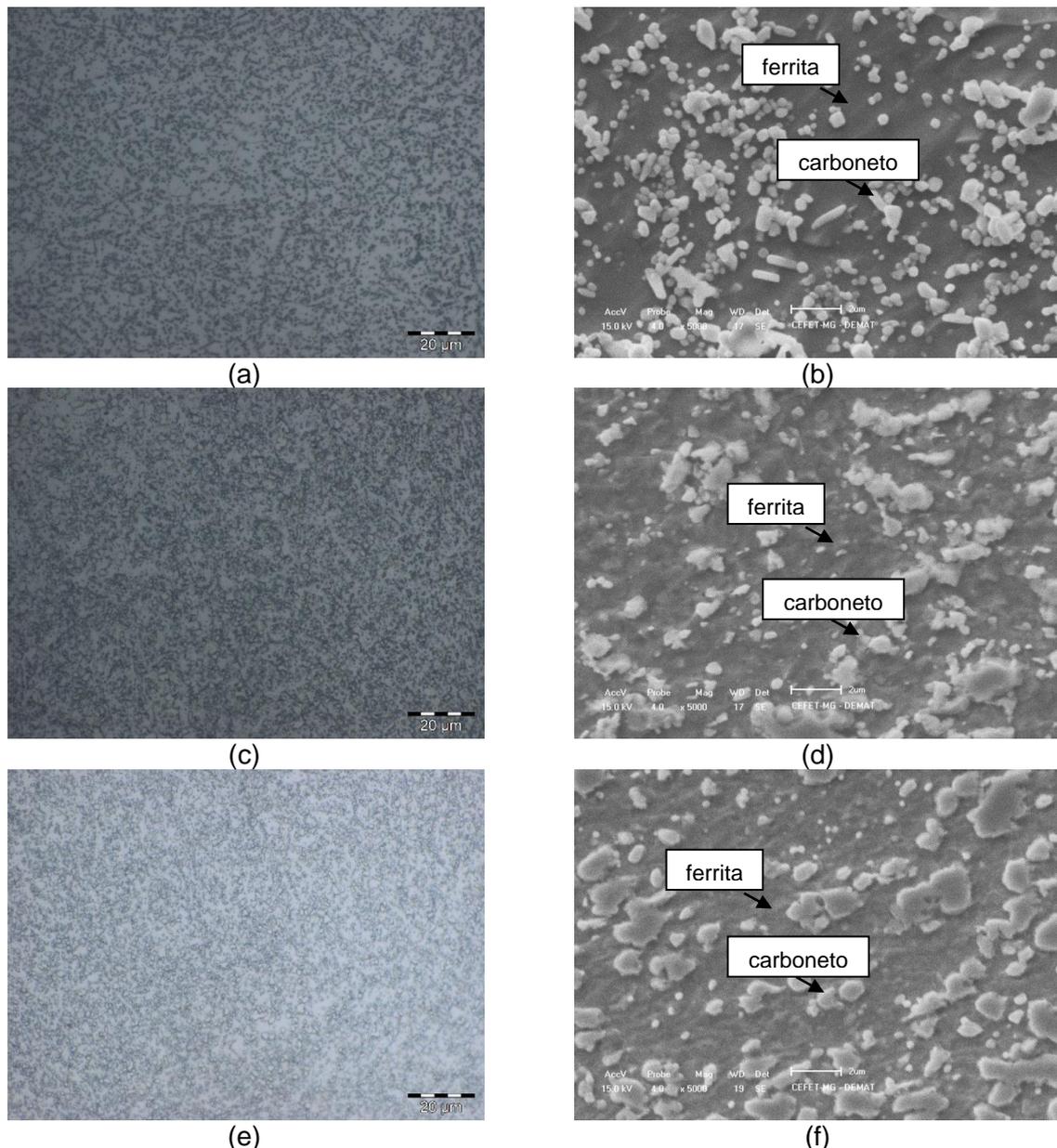


Figura 1. Microestrutura dos aços no estado como recebido (a) e (b) AISI H13, (b) e (c) AISI H11, (d) e (e) DIN 1.2367.

Após caracterização microestrutural, os aços foram analisados quanto à sua dureza. De acordo com a NADCA (2015), a dureza esperada para os aços ferramenta para trabalho a quente recozidos não deve ultrapassar o limite de 235HBW, ou, convertendo-se para dureza Rockwell B, 99HRB. Na tabela 2 são apresentados os resultados obtidos.

Material	Dureza HRB
AISI H13	88,4 ± 0,4
AISI H11	90,8 ± 1,6
DIN 1.2367	84,6 ± 0,3

Tabela 2. Resultados de dureza para os materiais no estado como recebidos.

3.2 Tratamentos Térmicos

A fim de se verificar a influência da temperatura de austenitização nas propriedades mecânicas dos aços AISI H13, AISI H11 e DIN 1.2367, duas condições distintas foram testadas. Inicialmente, definiu-se o tempo de tratamento térmico igual a 35 minutos, para as duas temperaturas de avaliadas. Os tratamentos foram realizados a 950°C e 1100°C, sendo a etapa de resfriamento realizada em óleo. Desta forma, considerando a faixa referência de tratamento térmico recomendada de 995°C a 1025°C [15], foi possível avaliar o comportamento dos aços quando tratados abaixo (950°C) e acima (1100°C) das temperaturas recomendadas.

As microestruturas obtidas para o três aços são apresentadas nas figuras 2 e 3.

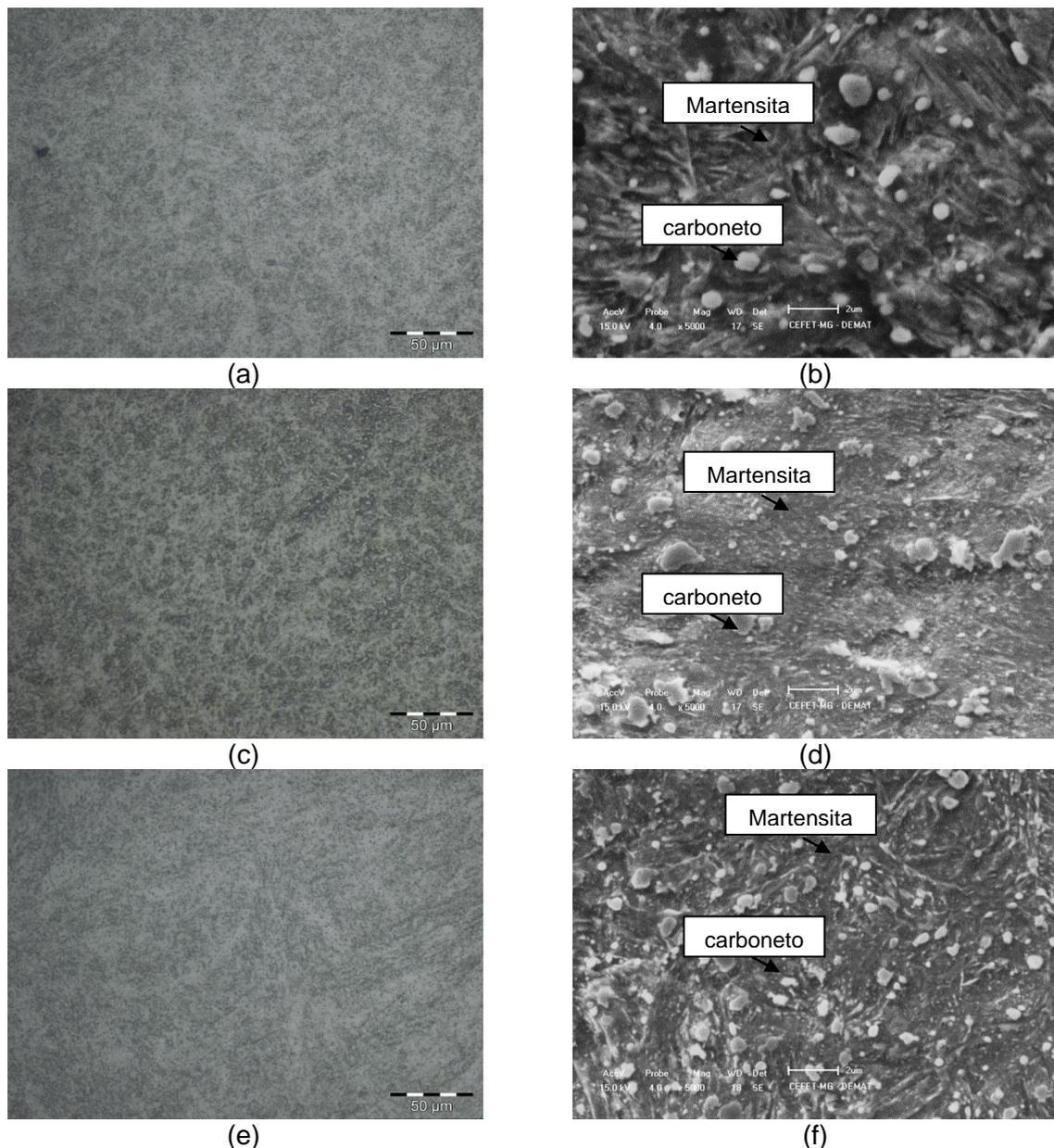


Figura 2. Microestrutura dos aços austenitizados à 950°C (a) e (b) AISI H13, (b) e (c) AISI H11, (d) e (e) DIN 1.2367.

Observa-se a formação de microestrutura essencialmente martensítica para os três aços avaliados, observa-se, ainda, a presença clara de carbonetos nos três

materiais. No entanto, as agulhas de martensita formadas não estavam muito nítidas, sugerindo o desenvolvimento desse microconstituente com teor de carbono relativamente baixo. Esse fenômeno indicaria que a temperatura de austenitização escolhida estaria abaixo do adequado para os aços ferramenta para trabalho a quente, não tendo sido elevada o suficiente para levar à dissolução de uma maior quantidade de carbonetos e, conseqüentemente, a uma austenita parente de elevado teor de carbono [16].

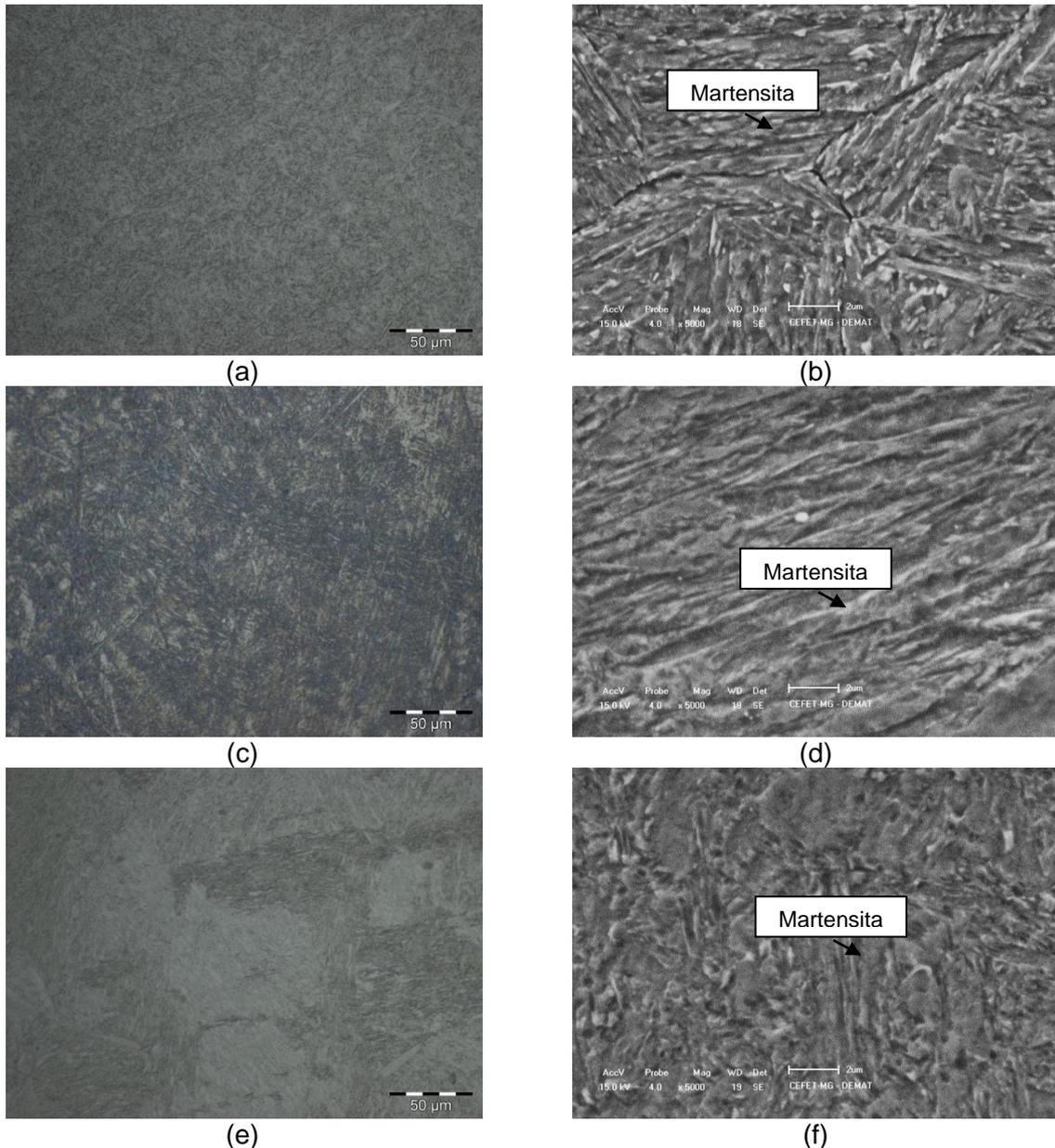


Figura 3. Microestrutura dos aços austenitizados à 1100°C (a) e (b) AISI H13, (b) e (c) AISI H11, (d) e (e) DIN 1.2367.

Para as amostras temperadas a 1100°C, as microestruturas obtidas mostram-se essencialmente martensíticas para os três aços avaliados. Em contrapartida, de maneira distinta a temperatura menor de austenitização, observa-se que os três aços apresentaram contornos de grãos austeníticos maiores e mais marcados, além de poucos carbonetos, indicando uma solubilização dos mesmos devido à alta temperatura de austenitização [17].

À medida que a temperatura de aquecimento da têmpera foi elevada, tanto os elementos de liga como o carbono, com o desaparecimento dos carbonetos, entraram em solução sólida. A presença desses elementos de liga em solução sólida substitucional elevou a temperabilidade do material, ou seja, afastou as curvas tempo - temperatura - transformação (TTT) do eixo das ordenadas, facilitando a obtenção da estrutura martensítica [11]. O carbono, em maior quantidade na austenita, além de elevar a temperabilidade, contribuiu para a formação de martensita exibindo estrutura cristalina com maior tetragonalidade e agulhas mais nítidas

3.3 Caracterização Mecânica

Na tabela 2 estão exibidos os resultados do ensaio de dureza Rockwell C (HRC) após tratamento térmico de têmpera com resfriamento em óleo, para as duas diferentes temperaturas de austenitização as quais os aços AISI H13, AISI H11 e DIN 1.2367 foram submetidos, 950°C e 1100°C, durante 35 minutos.

Os resultados de dureza mostram um aumento progressivo desta propriedade com aumento da temperatura de austenitização para os três aços estudados. Observa-se um aumento mais acentuado de dureza dos aços AISI H13 e AISI H11, quando comparados ao aço DIN 1.2367.

Material	Dureza HRC	Dureza HRC
	(950°C)	(1100°C)
AISI H13	48 ± 0,6	55 ± 0,3
AISI H11	49 ± 0,5	56 ± 0,4
DIN 1.2367	50 ± 0,3	54 ± 0,5

Tabela 2. Resultados de dureza para os materiais temperados em óleo a diferentes temperaturas de austenitização

A elevação da dureza com a temperatura de aquecimento, observada para os três aços ferramenta estudados, é explicada pela solubilização dos carbonetos que ocorre com o aumento da temperatura de austenitização, levando a formação de uma austenita mais rica em carbono, que, conseqüentemente, eleva a dureza média do material na têmpera pelo desenvolvimento de estrutura martensítica mais dura [17].

Avaliando-se os resultados obtidos de energia absorvida (J), gráfico 1, para o aço AISI H13 observa-se que o maior valor de resistência ao impacto foi obtido para a temperatura de 950°C. O resultado possivelmente baseia-se no fato do aço AISI H13 temperado à 950°C apresentar menor valor de dureza inicial, 48HRC, contra 55HRC obtido à 1100°C, uma vez que, quanto maior o valor de dureza, menor tende a ser a tenacidade do material [17,18]. Esse fenômeno deve estar relacionado às características da martensita formada na têmpera.

Para os materiais austenitizados a 1100°C, a martensita, sendo de teor de carbono mais elevado, apresenta maior distorção da rede cristalina tetragonal de corpo centrado com esse elemento intersticial, além de uma morfologia mais acicular. Para o aço AISI H11, não foram observadas diferenças significativas entre a tenacidade do material temperado à 950°C e a 1100°C.

O aço AISI H11, comparado ao AISI H13, apresenta menor teor de Si. [19] O Si tem influência direta na tenacidade ao impacto do material, sendo seu teor inversamente proporcional à tenacidade do material [19]. A explicação baseia-se na mudança da sequência de precipitação dos carbonetos de liga, com a formação de carbonetos do tipo M_3C , rico em Cr e Fe. O teor de Si, embasa, portanto, a maior tenacidade do AISI H11.

O aço DIN 1.2367 apresentou melhor maior tenacidade à temperatura de austenitização de 1100°C. O baixo teor de silício do aço DIN 1.2367 implica uma menor tenacidade ao impacto. Observa-se que os resultados obtidos para este aço são semelhantes aos obtidos para o AISI H11, o que reitera o grau de importância do teor de Si na tenacidade dos aços ferramenta para trabalho a quente [19].

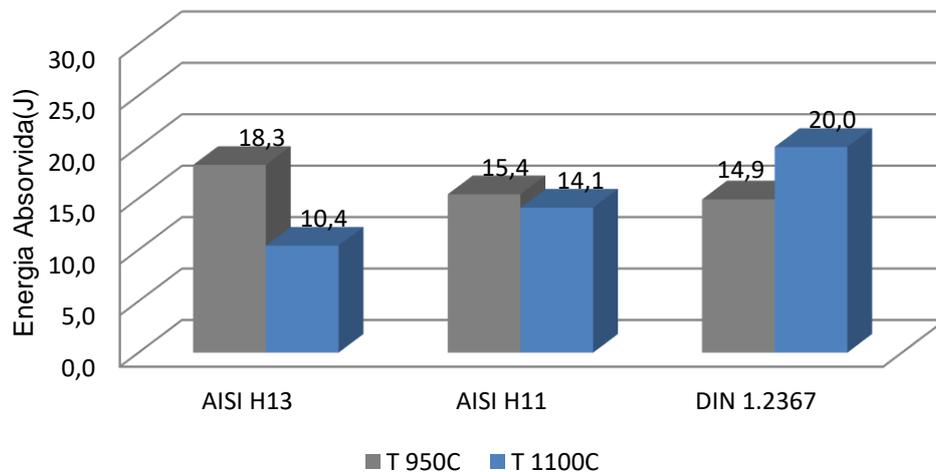


Gráfico 1. Energia absorvida (J) para diferentes parâmetros de tratamento térmico

Em relação aos resultados em tração, tabela 3 e gráfico 2, nota-se que, para todos os materiais, o aumento da temperatura de austenitização na têmpera levou a maiores resultados de limite de resistência à tração (LRT) e limite de escoamento (LE). Em relação ao LRT, observa-se que o aço AISI H11 foi o que apresentou os maiores resultados. O maior teor de carbono na martensita, oriundo da dissolução de carboneto dos aços austenitizados a temperaturas elevadas, leva a maiores valores de resistência mecânica em tração [17,20], o que, por sua vez, justifica os maiores resultados dos três aços estudados quando austenitizados à temperatura de 1100°C.

O fósforo (P) é um elemento conhecido por fragilizar a estrutura, levando ao surgimento de fratura intergranular na martensita revenida, uma vez que há sua migração e segregação para os contornos de grão durante a austenitização [19,20]. O aço DIN 1.2367 foi o que apresentou maior teor de P em sua composição química, o que por sua vez, passa a ser um indicativo de pior desempenho em tração, comparado aos aços AISI H13 e DIN 1.2367. Assim como para os resultados de LRT, o aço DIN 1.2367 é o que, de forma geral, apresentou os menores valores de limite de escoamento, sendo, portanto, mais um indicativo do efeito do fósforo nas propriedades mecânicas dos aços ferramenta para trabalho a quente. Observa-se que os valores de LE aumentaram com o aumento da temperatura de austenitização. Vale ressaltar que, o aumento da temperatura em serviço dos aços ferramenta para trabalho a quente leva a uma diminuição do LE, havendo em contrapartida, um aumento da tenacidade [21]. Esse comportamento deve estar

relacionado a uma eventual modificação da estrutura martensítica com a elevação da temperatura de serviço que, à medida que se afasta da morfologia acicular obtida na têmpera, bem como reduz a distorção da rede cristalina, dentre outras características, torna-se mais próxima de estruturas de equilíbrio e, portanto, menos frágil. A análise do comportamento dos três aços avaliados em termos de alongamento percentual mostra que a menor temperatura de austenitização levou a relativamente maiores valores. O aço AISI H11 foi o que apresentou a queda mais significativa de alongamento com a elevação da temperatura de austenitização.

	AISI H13		AISI H11		DIN 1.2367	
	T 950°C	T 1100°C	T 950°C	T 1100°C	T 950°C	T 1100°C
LRT (MPa)	1516,3	1934,4	1631,1	2206,2	1587,3	2045,0
LE (MPa)	1071,7	1447,3	1156,5	1621,6	1119,6	1386,8
A (%)	6,3	2,9	6,4	2,0	6,1	4,6

Tabela 3. Resultados de LRT, LE e A

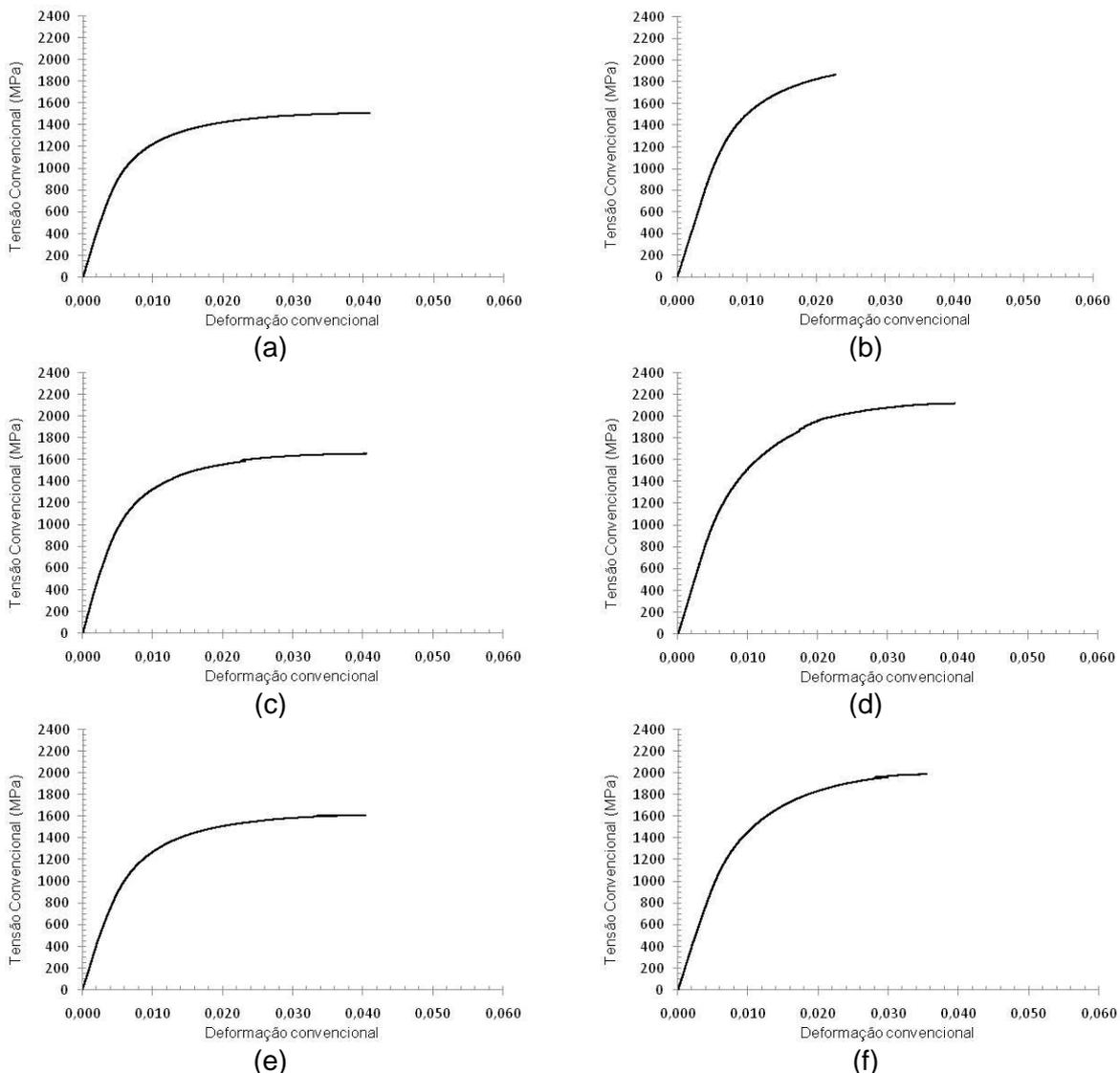


Gráfico 2. Curvas tensão x deformação. (a) e (b) AISI H13 austenitizado à 950°C e 1100°C, (c) e (d) AISI H11 austenitizado à 950°C e 1100°C e (e) e (f) DIN 1.2367 austenitizado à 950°C e 1100°C.

3 CONCLUSÃO

- a) Os três aços estudados apresentaram microestrutura inicial ferrítica com carbonetos dispersos, indicando a condição de recozimento dos materiais. Quando temperados em óleo, os aços apresentaram-se com a microestrutura essencialmente martensítica com carbonetos.
- b) Os três aços revelaram comportamento microestrutural semelhante com o aumento da temperatura de austenitização, havendo um aumento progressivo de agulhas de martensita e do tamanho de grão austenítico e morfologia acicular mais nítida, além de um maior volume de carbonetos secundários dissolvidos.
- c) O aumento da temperatura de austenitização na têmpera resultou em maiores valores de dureza para os três aços analisados.
- d) O aço AISI H13 é o que teve pior desempenho em termos de tenacidade ao impacto, já os aços AISI H11 e DIN 1.2367 apresentaram resultados semelhantes entre si.
- e) O teor de silício mostrou influência direta nos resultados de tenacidade dos materiais, sendo seu teor inversamente proporcional aos resultados de impacto.
- f) Em termos de resistência à tração, o aumento da temperatura de austenitização levou a maiores valores de LRT e LE, não sendo observado um padrão no comportamento dos aços em função do alongamento percentual.
- g) O fósforo é um elemento com efeito deletério em esforços de tração, o que levou a um pior desempenho do aço DIN 1.2367 quando comparado aos outros aços estudados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao departamento de pós graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, à FINEP e à Nematik Alumínio do Brasil.

REFERÊNCIAS

- 1 GARIBOLDI, E.; BONOLLO, F. PARONA, P. **Manuale della difettologia Nei getti pressocolati**. 2 ed. Grado: Associazione italiana di metallurgia, 2010, 127p.
- 2 CAMPBELL, J.; HARDING, R.A. **Introduction to casting technology**. TALAT Lecture 3201. EAA, 1994, 29p.
- 3 KLOBCAR, D.; TUSEK, J.; TALJAT, B. Thermal fatigue of materials for die-casting tooling. **Materials Science & Engineering A**. Ljubljana, v.472, p.198-207, Mar. 2007.
- 4 LU, Y.; RIPPLINGER, K.; HUANG, X.; MAO, Y.; DETWILER, D.; LUO, A. A new fatigue life model for thermally-induced cracking in H13 steel dies for die casting. **Journal of Materials Processing Tech**. Columbus, v.271, p.444-454, Apr. 2019.
- 5 KORECKI, M; OLEJNIK, J; KULA, P; WOLOWIEC, E. Best practice in heat treatment of large dies made of hot work tool steels. **Vacuum Technologies**, [s.l], v.4, p.39-45, [s.m], 2013.
- 6 BRUCHER, H. Proper heat treatment in critical for best die performance. **Die Casting Engineering**. Ohio, p.14-15, Nov./Dec. 1992.
- 7 PASTOR, A.; VALLES, P.; AMURRIO, I.; MENDINA, S. F. Heat treatment conditions to prevent failure in die cast X38CrMov5 steel parts. **Engineering Failure Analysis**. Torrejón de Ardoz, v.56, p.520-529, Oct. 2015.
- 8 LERCHBACHER, C.; ZINNER, S. LEITNER, H. Direct or indirect: Influence of type of retained austenite decomposition during tempering on the toughness of a hot-work tool steel. **Materials Science & Engineering A**. Leoben, v.564, p.163-168, Dec. 2012.
- 9 COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Blücher, 2008. 672p.
- 10 ASM HANDBOOK. **Properties and selection irons steels and high performance alloys**. Ohio: ASM International, 1993. 2521 p.
- 11 KRAUSS, G. **Steels: Processing, structure, and performance**. Ohio: Materials Park, 2005, 613 p.
- 12 CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6 ed. São Paulo: ABM, 1988.576 p.
- 13 COUTINHO, C. B. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1992. 405 p.
- 14 KANG, M.; PARK, G. JUNG, J.G.; KIM, B. H.; LEE, Y. K. The effects of annealing temperature and cooling rate on carbide precipitation behavior in H13 hot-work tool steel. **Journal of Alloys and Compounds**. Seoul, v. 627, p. 359-366, Ago. 2014.
- 15 ASM HANDBOOK. **Failure analysis and prevention**. Ohio: ASM International, 2002. 2909 p.
- 16 ARIETA, F. **Melhoria na Performance das Cavidades de Aço para Fundição sob Pressão de Ligas de Alumínio da Nemak através de uma Abordagem Sistêmica de Variáveis**.Betim: Tribo Systems, Jul. 2015.
- 17 GABARDO, J. F. **Estudo da tenacidade do aço ferramenta H13**. 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Paraná, UFPR, Paraná, 2008.
- 18 NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION NADCA#229-2015:**Special quality die steel & heat treatment acceptance criteria for die casting dies**. Arlington Heights: NADCA, 2015. 34 p.
- 19 MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. Aços ferramenta para trabalho a quente com baixo teor de silício: caracterização e aplicações.**Tecnologia em Metalurgia e Materiais**. São Paulo, v.4, n.4, p.7-15, abr-jun.2008
- 20 ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. **Tool steels**. 5 ed. ASM International,1998. 364 p.
- 21 BECKER, H. J. RASCHE, K. Hot-work tool steels for drop forging. **Journal of Mechanical Working Technology**. Amsterdam, v.2, p.267-278, mai.1978.