

AVALIAÇÃO DA TENACIDADE VIA CHARPY DE AÇOS FERRAMENTA

Maicon Rodrigues de Pereira¹

Kalinka Pâmela Nery Moraes²

^{1, 2, 6} Universidade de Caxias do Sul - UCS

¹mrpereira@ucs.br, ²kpnmoraes@ucs.br

Carlos Maurício Sacchelli³

³Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

³Carlos.sacchelli@ufsc.br

Cesar Edil da Costa⁴

Julio Cesar Giubilei Milan⁵

^{4, 5}Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

⁴cesar.edil@udesc.br, ⁵julio.milan@udesc.br

Alexandre Fassini Michels⁶

⁶afmichels@ucs.br

Resumo: Moldes de fundição sob alta pressão (HPDC) estão expostos a altas cargas térmicas e mecânicas. As trincas por fadiga térmica são oriundas dos ciclos térmicos e podem diminuir significativamente a vida útil dos moldes. Estes defeitos superficiais típicos nos moldes de fundição para ligas de alumínio sob alta pressão deterioram a superfície das cavidades e consequentemente afetam as peças fundidas. Diversas pesquisas associam a tenacidade dos materiais à capacidade de resistência à fadiga térmica. O objetivo deste trabalho foi investigar um grupo de aços em relação à propriedade tenacidade via ensaio de impacto. Neste sentido, sete aços ferramenta para HPDC, classificados pela NADCA (B, C, E, H) foram avaliados via ensaio de Charpy e comparados estatisticamente pelo teste de Fisher com significância de 5%. Cinco aços ferramenta avaliados apresentaram diferenças significativas na tenacidade em relação aos demais avaliados. Dois aços ferramenta apresentaram os menores valores de energia absorvida e as maiores variâncias. Estes dois aços ferramenta tiveram redução superiores a 8 Joules (- 42%) em relação aos valores declarados pelos fabricantes. Quatro aços ferramenta atingiram valores de energia superiores aos declarados pelos fabricantes. Entretanto, todos os sete aços ferramenta avaliados obtiveram resultados compatíveis com os valores mínimos estabelecidos pela NADCA. Finalmente, cada aço ferramenta avaliado não apresentou diferenças significativas entre as amostras em relação as orientações de corte (0°, 45°, 90°) do lingote forjado.

Palavras-chave: Aços ferramenta, Tenacidade, Teste de Impacto, Charpy.

1. INTRODUÇÃO

As matrizes, como são chamados os moldes utilizados na indústria de fundição de alumínio sob pressão, são construídos de aço ferramenta resistente a elevadas temperaturas, sendo o aço H13 de ampla utilização na construção de moldes. No processo de injeção sob alta pressão, após o fechamento do molde, a liga de alumínio fundida em um forno independente é derramada com uma concha dentro de uma bucha na matriz. Um pistão hidráulico bombeia o líquido em distintos estágios de pressão para dentro da cavidade do molde. Durante a primeira fase, ocorre a expulsão do ar da bucha de injeção e na segunda fase, em alta velocidade, enche a cavidade em tempos da ordem de 50 e 100 milissegundos e na terceira etapa é a compactação para evitar os defeitos de contração do metal. Depois, a matriz é aberta e a peça ejetada por pinos extratores (Baldam e Vieira, 2014).

Entre os ciclos é aplicado desmoldante, geralmente em aerossol, que age como lubrificante e refrigerante na superfície da cavidade. Além disso, canais de refrigeração permeiam a estrutura e evitam superaquecimento, aumentando a vida útil do molde.

Outra característica desse processo é a necessidade de preaquecimento do molde. Para Shankar e Apelian (2002), a temperatura de preaquecimento deve ser entre 299 °C e 329 °C. Temperaturas mais altas resultarão em aplicação inadequada do lubrificante, enquanto temperaturas mais baixas podem resultar na formação de junta fria. Alguns autores (Dadić *et al.*, 2019), observaram que em certas ligas, temperaturas mais altas podem contribuir para a prevenção ao desgaste da superfície. Em contrapartida, Vendramim (2020) afirma que temperaturas muito altas podem acelerar este fenômeno.

Devido às características do processo a matriz precisa suportar altas temperaturas e velocidade de impacto do metal fundido, numerosos ciclos de aquecimento e resfriamento, entre outros fatores que causam desgaste e levam à fadiga do aço. A compreensão dos mecanismos de desgaste e falha é importante para maximizar a vida útil das matrizes.

Os modos de falha que ocorrem na superfície do molde são classificados por Sun *et al.* (2008) como: erosão mecânica ou *washout*, adesão e abrasão por ataque químico ou *soldering*, e fadiga térmica que é a causa mais frequente de degradação do molde.

Zhu *et al.* (2004), observam que há algum nível de correlação entre três mecanismos, apesar de não haver intrínseca relação entre eles. O que ocorre é que a fadiga térmica provocará formação de trincas na superfície por consequência a trinca aumentará a rugosidade da superfície da matriz, já a superfície rugosa aumentará a tendência à adesão e erosão.

As variações de temperatura acarretam a expansão e contração recorrente do material na superfície. Devido à pequena camada aquecida e resfriada e às diferentes temperaturas nas redondezas, este processo cria tensões compressivas e de tração. Isso pode levar partes do material a excederem a tensão de escoamento próximo à superfície. O acúmulo local de deformações plásticas provoca a nucleação de trincas iniciais, cuja propagação leva ao descolamento de partículas de material da superfície, caracterizando o efeito de fadiga térmica (Alba, 2018; Dadić *et al.*, 2019).

Os pesquisadores Knotek *et al.* (1993), Shivpuri *et al.* (1995) e Wang (1997), salientam que a fadiga térmica é o mecanismo de falha com maior ocorrência em moldes de injeção de alumínio.

Roberts *et al.* (1980), destacam que: para resistir a esse efeito de fadiga é imprescindível que o material da matriz possua alta tenacidade com o objetivo de inibir e minimizar a probabilidade de propagação de trincas reduzindo os danos causados pelo processo de fundição.

Os testes de impacto são rotineiramente utilizados devido ao baixo custo e facilidade de execução. Embora, estes ensaios não sejam capazes de revelar a propriedade específica do material, o valor da energia absorvida é suficiente para comparar qualitativamente a tenacidade entre aços ferramenta (Arieta, 2021).

Com o objetivo de estabelecer os padrões e garantir a similaridade dos materiais disponíveis no mercado a NADCA (*North American Die Casting Association*), define os procedimentos recomendados para os aços utilizados na construção de moldes de injeção e estabelece requisitos de qualidade, tratamento térmico e testagem destes materiais.

Essas informações estão descritas na norma NADCA 207-2018, onde os aços são distribuídos em categorias “grau” (A, B, C, D, E, F, G, H), conforme suas especificações e características.

Considerando o cenário competitivo mundial é fundamental para a indústria de fundição de alumínio brasileira o aperfeiçoamento do processo de fabricação, neste sentido, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar a propriedade de tenacidade de alguns materiais certificados pela NADCA por meio de ensaios de impacto e análise estatística dos valores encontrados.

Os estudos aqui relatados pertencem ao projeto “Melhoria no projeto de ferramentas de injeção de alumínio”, da linha IV do Programa Rota 2030, descrito na Lei Federal nº 13.755/2018 (Brasil, 2018; FUNDEP, 2022).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta deste trabalho é investigar a tenacidade de um grupo de aços pré-selecionados quando submetidos a testes de impacto (Charpy). Os sete aços selecionados atendem à norma da *North American Die Casting Association* (NADCA) 207-2018. Na obtenção das médias da resistência ao impacto, foram avaliadas cinco amostras de cada aço ferramenta, eliminando, conforme norma, o valor máximo e mínimo da amostragem de cada aço. A partir destas medidas, adotando uma significância de 5%, foi possível comparar estaticamente as médias através do método de Fisher da mínima diferença significativa.

2.1. Corpos de prova

Os corpos de prova foram extraídos da porção central dos blocos dos aços. A escolha da região se deve às propriedades decorrentes do processo de solidificação do aço na aciaria. Segundo Baldam e Vieira (2014), nesta região, os grãos assumem morfologia equiaxial e distribuição homogênea. Por este motivo, a liga tende a possuir propriedades mecânicas com comportamento isotrópico. Entretanto, nesta zona, os grãos são maiores, há heterogeneidade na distribuição de soluto, maior ocorrência de microdefeitos e microrrechupes causados pela velocidade e direção de solidificação.

Observa-se na Fig. 1 o layout do esquema de corte dos corpos de prova. As regiões destinadas aos ensaios de impacto, posicionadas na região central do bloco, estão destacadas em amarelo. Para cada aço, foram extraídas amostras em três direções diferentes: a 0°, 45° e 90° e nomeadas nos experimentos como: longitudinal, diagonal e transversal. Essas direções correspondem, respectivamente, às porções superior, central e inferior em destaque na figura. Para cada direção, foram extraídas cinco amostras. No total, 105 amostras foram ensaiadas (15 de cada material).

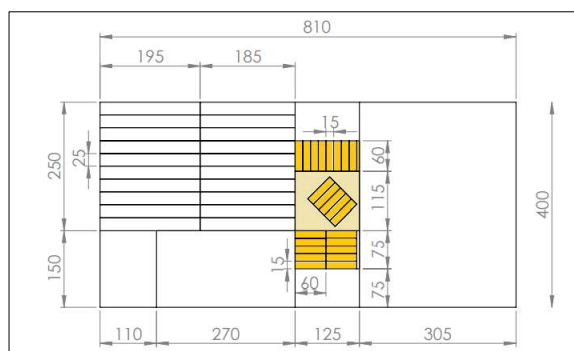


Figura 1. Esquema de corte de um bloco (Parucker, 2022)

Esses blocos foram submetidos a têmpera e revenimento, os fabricantes dos aços estabelecem condições de contorno variadas para tratamento térmico em seus catálogos, optou-se por executar os tratamentos seguindo a norma NADCA 207-2018 em todas as ligas garantindo a padronização. Foi escolhida a empresa Isoflama Processos Térmicos para realizar o procedimento.

A partir dos blocos temperados e revenidos, foram cortadas as amostras para os ensaios, conforme norma ASTM E23 ensaio Charpy tipo A; A empresa Metalab foi selecionada para realizar a preparação dos corpos de prova.

Os corpos de prova utilizados são de grau B, C, D e E (NADCA 207-2018), na Tab. 1 estão os requisitos com relação à composição química conforme a classificação por grau da norma.

Tabela 1. Requisitos de composição química conforme o grau da liga; *Valor não especificado pelo fabricante (NADCA, 2018)

Grau	Tipo	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P (Máx.)	S (Máx.)
B	H13 - Superior	0,37 - 0,42	0,20 - 0,50	0,80 - 1,20	5,00 - 5,50	1,20 - 1,75	0,80 - 1,20	0,015	0,003
C	2367 - Modificado	0,32 - 0,40	0,20 - 1,10	0,10 - 0,50	4,70 - 5,75	2,00 - 3,30	0,40 - 0,70	0,020	0,003
E	H11 - Modificado/Superior	0,32 - 0,43	0,10 - 0,70	0,10 - 0,55	4,70 - 5,70	1,10 - 2,10	0,30 - 0,80	0,020	0,003
H	2367 - Modificado/Baixo Mo	0,35	0,3	0,3	5,00	1,75	0,8	*	0,003

2.2. Teste de Fisher

A análise de variância (ANOVA) é utilizada para determinar se as médias de vários grupos são diferentes.

Suponha-se que existam diferentes níveis de um único fator que se deseja comparar. Em alguns casos de análise de variância, algumas das médias dos níveis dos fatores – também chamados de tratamentos – são diferentes. Os métodos de comparações múltiplas são utilizados para investigar esses casos. Dentre eles, o método de Fisher da mínima diferença significativa compara todos os pares de médias com a hipótese nula, que estabelece que as médias dos tratamentos são iguais. Portanto, nos casos em que há diferença entre as médias, o número do P-valor calculado deverá ser inferior ao valor do nível de significância escolhido na análise. Exemplificando para um nível de confiança de 95% e significância de 5%, quando P-valor calculado na análise for inferior a 0,05 as médias amostrais apresentam diferenças significativas (Montgomery e Runger, 2003).

O teste de Fisher pode ser executado em programas de computador e gerar gráficos para melhor analisar as comparações. Graficamente, “as condições que não apresentam diferença significativa entre as médias dos níveis são visíveis quando a barra da incerteza da diferença das médias está posicionada sobre a linha zero”. As diferenças negativas significam que o valor da primeira condição é menor do que a segunda e as diferenças positivas significam que o valor da primeira condição é maior que a segunda (Ferreira, 2017).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a análise estatística foram desconsiderados os valores extremos de cada grupo amostral. Das cinco amostras de cada grupo, o maior e o menor valor de energia foram retirados. Este procedimento está descrito na norma NADCA 207-2018 e tem como objetivo eliminar valores discrepantes ou *outliers* que podem deturpar a análise estatística.

3.1. Teste de comparações múltiplas

Os valores de energia de impacto obtidos em laboratório foram submetidos ao teste de comparações múltiplas de Fisher, via software *Microsoft Excel*, com a finalidade de avaliar os diversos aços ferramenta.

Para simplificar os gráficos e tabelas do teste de Fisher, foi utilizada nomenclatura conforme a Tab. 2 para os materiais. Este código considera a letra referente à classificação da NADCA e um número atribuído ao fabricante do aço ferramenta.

Tabela 2. Códigos dos corpos de prova (os autores)

Fabricante	Grau	Código
1	B	B1
1	E	E1
2	C	C2
2	H	H2
3	C	C3
4	E	E4
5	C	C5

3.2. Análise de variância por liga de aço

A primeira análise realizada consistiu em comparar as sete diferentes ligas de aço entre si, independente da orientação de corte da amostra. Interpretando os números de P-valor calculados, pode-se definir se existe ou não diferença significativa entre os dois aços do par que está sendo comparado. Neste estudo foi utilizado valor de significância de 5%.

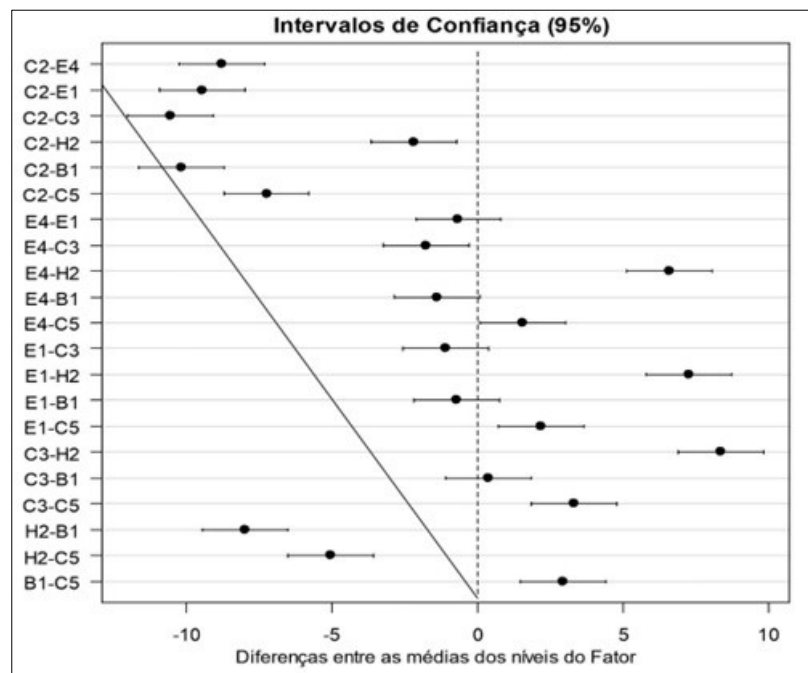


Gráfico 1 – Teste de Fisher (os autores)

Os resultados completos podem ser apreciados no Gráf. 1, que ilustra as comparações entre cada par, bem como apresenta os intervalos de confiança.

Na avaliação do Gráf. 2 são apresentadas apenas as amostras com diferenças significativas entre si.

A interpretação dos P-valores permitiu avaliar que existe diferença significativa somente nos casos abaixo:

- C5 é melhor que C2;
- E4 é melhor que C5, C2 e H2;
- E1 é melhor que E4 e C5;
- B1 é melhor que E1 e E4;
- C3 é melhor que B1, E1, E4, C5, C2 e H2.

No *boxplot* ou diagrama de caixa do gráfico 2 é possível visualizar a distribuição e valores discrepantes (*outliers*) dos dados, proporcionando melhor apreciação dos valores para análise. Cada caixa do *boxplot* representa um grupo de amostras do mesmo material. No eixo vertical temos a energia em Joule do ensaio Charpy e no eixo horizontal os distintos

grupos de aço ferramenta. As caixas com maior amplitude são as com maior variabilidade nos valores obtidos nos ensaios experimentais.

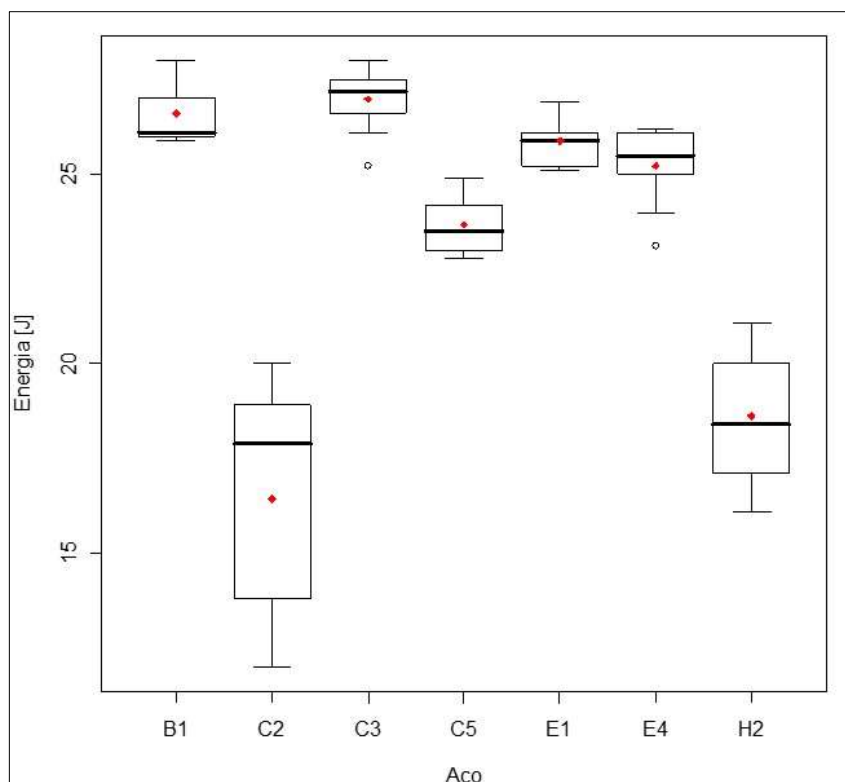


Gráfico 2. Energia de impacto do ensaio Charpy classificada por tipo (os autores)

É possível observar que o material C2 apresenta maior variabilidade nos valores dos ensaios e H2 tem a segunda maior variabilidade nos valores de energia. Eles também são os dois materiais com os menores valores de energia absorvida no ensaio de impacto.

Os demais materiais apresentam menor variância na energia absorvida em diferentes amostras. C5 está ligeiramente abaixo dos demais, mas ainda há sobreposição de valores com E4; C3, B1, E1 e E4, ainda assim, para a significância adotada de 5%, existe diferença significativa entre eles.

Abaixo das caixas dos aços C3 e E4 existem dois pontos deslocados em relação ao valor mínimo do diagrama. São os chamados pontos discrepantes ou *outliers*. São valores atípicos que excedem a variação aceita pelo método gráfico de caixa e são excluídos dos cálculos.

Confrontando os valores obtidos experimentalmente com os dados disponíveis nos catálogos dos fabricantes (Tab. 3) é possível averiguar se os fabricantes cumprem os valores de energia de impacto alegados. A Tabela 3 descreve a energia mínima exigida para cada classe pela norma da NADCA para aços nas distintas classificações à temperatura de 25 °C. A energia mínima obtida nos ensaios de impacto à temperatura ambiente estimada de 20 °C e a energia de impacto declarada pelo fabricante a temperatura ambiente ou não especificada.

Tabela 3. Comparação de energia de impacto; *Valor não especificado em catálogo para temperatura ambiente e calculado por tendência linear a partir dos dados de temperatura de 100 a 500 °C (os autores)

Liga de aço	Energia mínima NADCA [J]	Energia mínima experimental [J]	Energia em catálogo [J]	Dureza (HRC)
B1	8,1	25,9	13,5	44,7 ± 0,3
C2	8,1	12	~20,9*	45,3 ± 0,6
C3	8,1	25,2	25	45,2 ± 0,3
C5	8,1	22,8	Não especificado	45,3 ± 0,3
E1	12,2	25,1	14,9	45 ± 0,8
E4	12,2	23,1	16	45,3 ± 0,3
H2	11,0	16,1	~24,7*	45,7 ± 0,2

É possível observar na Tab. 3 que todos os materiais superaram a energia mínima exigida pela norma da NADCA nos ensaios de impacto. Os materiais C3, B1, E1 e E4 atingiram valores de energia experimentais maiores que os declarados

em catálogo. Já o material C5 está especificado em catálogo com valor de energia de impacto diferente do obtido em ensaio Charpy tipo A, impossibilitando comparação. Os materiais C2 e H2 não atingiram nos ensaios os valores de energia declarados nas fichas técnicas.

A primeira hipótese ponderada para os resultados distintos entre as ligas de aço é a distinção na composição química. Altas concentrações de molibdênio são encontradas na maioria das ligas classe C que afetam as propriedades do material principalmente em trabalhos à quente. Porém, o comportamento da liga C3, que possui as mais altas médias de energia, é inverso ao da liga C2, que possui as médias mais baixas. A liga C3 possui baixa quantidade de silício e a liga B1 possui alta quantidade do mesmo elemento. Entretanto, ambas apresentam comportamento semelhante. A liga B1 possui a maior concentração de carbono e de vanádio. Os demais elementos químicos não apresentaram variações significativas entre diferentes ligas de aço.

A segunda hipótese considerada para as diferenças significativas é a variação no grau de dureza. A tabela 3 exibe as médias de dureza e os desvios padrão de cada aço. Os dados de dureza superficial foram obtidos através da avaliação dos corpos de prova conforme norma ASTM E18.

Todos os aços seguiram a especificação de dureza exigida pela norma NADCA 207-2018 com valores entre o mínimo de 44 HRC e máximo de 46 HRC. Neste sentido, apesar de sua composição química o aço B1 apresenta elevada energia absorvida no ensaio de impacto que pode ser atribuída parcialmente ao valor de dureza dos corpos de prova.

3.2.1 Análise de variância por direção

A segunda análise realizada consistiu em comparar três diferentes orientações das amostras: extraídas a 0°, 45° ou 90° do bloco original de aço. As direções são tratadas como longitudinal, diagonal e transversal, respectivamente.

No gráfico 4 é possível observar que não houve mudanças significativas entre as médias e as medianas dos grupos amostrais. Os valores de energia absorvida pelas amostras cortadas nas direções diagonal e transversal apresentam maior variabilidade, mas os valores máximos para as três direções são bastante próximos. Além disso, as amostras cortadas na direção longitudinal exibem valores mínimos mais altos comparadas às demais.

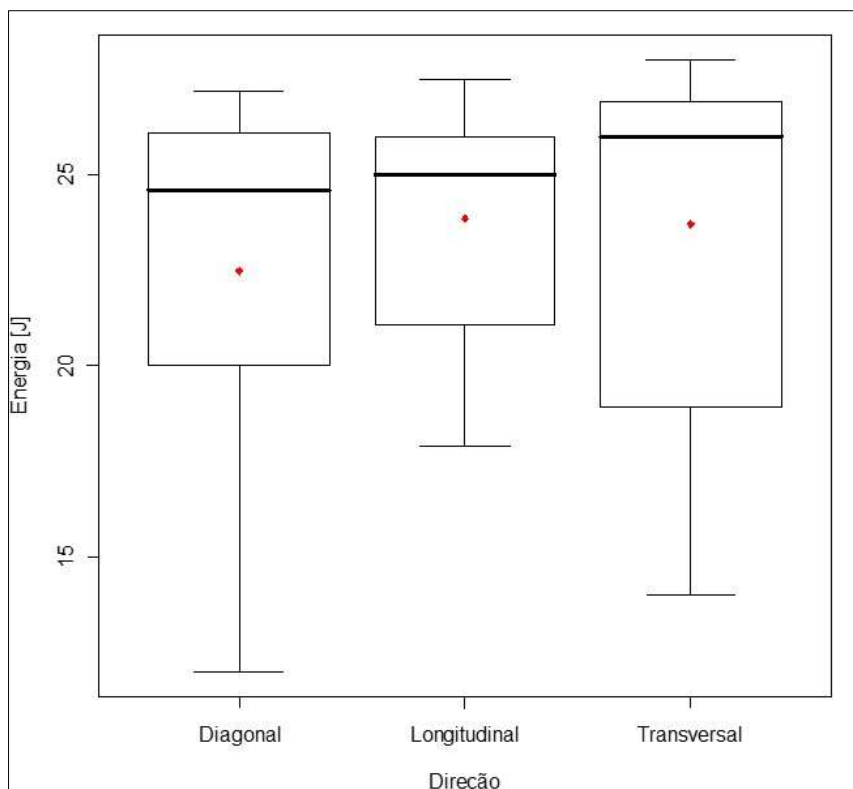


Gráfico 4. Dureza média dos aços (os autores)

A despeito das mínimas variações citadas, o teste de Fisher revela que não existem diferenças significativas entre as médias das diferentes direções das amostras. Para o teste de comparação múltipla novamente foi utilizado valor de significância de 5%, ou seja, confiança de 95%. Os resultados completos podem ser consultados no Apêndice B.

Desta forma conclui-se que não houve anisotropia nas propriedades de absorção de energia de impacto em relação ao sentido de forjamento (0°, 90° e 45°) para as três direções estudadas.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho investigou e comparou a resistência ao impacto, via ensaio de Charpy, de sete aços ferramenta dos principais fabricantes mundiais, classificados pela NADCA (B, C, E, H) que utilizados para construção de moldes para injeção de alumínio para HPDC. Percorrendo a literatura, foi possível constatar:

- a) que a fadiga térmica é o mecanismo de desgaste mais citado e difícil de controlar sem planejamento prévio do substrato do molde.
- b) a tenacidade é a propriedade mecânica mais adequada para mensurar a capacidade do aço em resistir à fadiga térmica;
- c) o ensaio de impacto é o método mais adequado para inferir a tenacidade.

Por meio de uma série de ensaios mediu-se a energia absorvida no teste de impacto de Charpy para amostras das sete diferentes ligas de aço, retiradas em três diferentes orientações dos blocos originais. Os dados foram submetidos a análise estatística via teste de comparações múltiplas de Fisher. Constatou-se que, para significância de 5% que:

- a) não existe diferença significativa entre a energia absorvida para amostras retiradas em diferentes orientações;
- b) existe diferença significativa entre as ligas C3, B1, E1, E4 e C5 entre si;
- c) as ligas C3, B1, E1 e E4 atingiram valores de energia experimentais maiores que os declarados em catálogo;
- d) não existe diferença significativa entre as ligas C2 e H2;
- e) as ligas C2 e H2 apresentam os menores valores mínimos e máximos de energia absorvida e não atingiram nos ensaios os valores de energia declarados nas fichas técnicas;
- f) todos os materiais apresentaram resultados compatíveis com os valores mínimos estabelecidos pela NADCA 207-2018;
- g) a liga B1 é diferente de todas as outras ligas e apresenta as maiores médias de energia absorvida;
- h) as ligas B1 e C3 apresentam os maiores valores máximos de energia absorvida;
- i) não foi possível relacionar a composição química com a variação nos valores de energia de impacto;
- j) Para as amostras ensaiadas nas propriedades de absorção de energia de impacto, em relação ao sentido de forjamento (0°, 90° e 45°), não houve anisotropia para as três direções estudadas.

Sugere-se para trabalhos futuros investigar, por micrografia detalhada, as regiões da fratura dos corpos de prova, investigando possíveis impurezas no material. Particularmente, os materiais C2 e H2 devem ser examinados detalhadamente, pois combinam elevada dispersão dos dados e baixo desempenho nos ensaios de Charpy.

3. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Rota 2030 - Linha IV “Ferramentarias Brasileiras Mais Competitivas” e a FUNDEP pelo apoio financeiro ao projeto 27194*10 - Melhoria no projeto de ferramentas de injeção de alumínio.

4. REFERÊNCIAS

- Alba, D. R., 2018. Vida em fadiga termomecânica de matrizes de forjamento. Ferramental, [S. L.], 24 ago. Disponível em: <https://www.revistaferramental.com.br/artigo/-vida-em-fadiga-termomecânica-de-matrizes-de-forjamento>. Acesso em: 20 out. 2021.
- Arieta, F., 2021. Mecanismos de desgaste em ferramentas de injeção sob pressão de ligas de alumínio. [S.L.]: Projeto Fundep – Rota 2030. Color.
- ASTM, 2012. **E23-12C**: Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. West Conshohocken: ASTM International.
- Baldam, R. L. e Vieira, E. A., 2014. Fundição: Processos e tecnologias correlatas. São Paulo: Editora Érica.
- BRASIL. Lei nº 13755, de 10 de dezembro de 2018. Estabelece requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos no Brasil; institui o Programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística; dispõe sobre o regime tributário de autopeças não produzidas [...]. Brasília, 11 dez. 2018. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2018/Lei/L13755.htm. Acesso em: 16 set. 2022
- Dadić, Z. *et al.*, 2019. Influence of steel preheat temperature and molten casting alloy AlSi9Cu3(Fe) impact speed on wear of X38CrMoV5-1 steel in high pressure die casting conditions. Wear, [S.L.], v. 424-425, p. 15-22.
- Ferreira, E., 2017. Avaliação de diferentes condições de temperatura de molde e hidratação no desempenho de compósitos de poliamida 6 com fibra de vidro. 2017. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.
- Knotek, O., Löffler, F. and Bosserhoff, B., 1993. PVD coatings for diecasting moulds, surface and coatings technology, V. 62, I. 1-3, pág. 630-634.
- Montgomery, D. and Runger, G., 2003. Applied statistics and probability for engineers. 3. ed. New York: John Wiley & Sons.

- NADCA, 2018. 207: Special quality die steel & heat treatment acceptance criteria for die casting dies. Arlington Heights: North American Die Casting Association.
- Parucker, M., 2022. Estudo e caracterização dos materiais empregados e sua relação com a durabilidade do molde. In: Reunião do projeto melhoria em ferramentas de injeção de alumínio. Caxias do Sul. [Apresentação]. 24 slides, color. Não publicado.
- Roberts, G., Kraus, G. and Kennedy, R., 1980. Tool steels. 4 ed. Russell Township, Ohio, Usa: ASM International.
- Shankar, S. and Apelian, D., 2002. Mechanism and preventive measures for die soldering during Al casting in a ferrous mold. Jom, [S.L.], v. 54, n. 8, p. 47-54, Aug.
- Shivpuri, M., 1995. A study of erosion in diecasting dies by multiple pin accelerated erosion test, Journal of Material Eng. and Performance, pág. 145-153.
- Sun, F. *et al.*, 2008. An experimental study on the cooling effect of die casting die insert cooling devices. Heat Transfer, Washington, D.C., v. 3, p. 239-244, May.
- Vendramim, J. C., 2020. Molde para fundição de alumínio sob pressão. Ferramental, [S. L.], 21 set. Disponível em: <https://www.revistaferramental.com.br/artigo/molde-para-fundicao-de-aluminio-sob-pressao>. Acesso em: 26 set. 2022.
- Wang, Y., 1997. A study of PVD coatings and die materials for extended die casting die life. Surfaces and Coatings Technology, pág. 60-63.
- Zhu, Y. *et al.*, 2004. Evaluation of soldering, washout and thermal fatigue resistance of advanced metal materials for aluminum die-casting dies. Materials Science and Engineering: A, [S.L.], v. 379, n. 1-2, p. 420-431, Aug.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) o(s) único(s) responsável(is) pelas informações incluídas neste trabalho.

DIE STEEL TOUGHNESS EVALUATION BY CHARPY

Maicon Rodrigues de Pereira¹

Alexandre Fassini Michels²

Kalinka Pâmela Nery Moraes³

^{1, 2, 3}Universidade de Caxias do Sul - UCS

¹mrpereira@ucs.br, ²afmichels@ucs.br, ³kpnmoraes@ucs.br

Carlos Maurício Sacchelli⁴

⁴Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

⁴Carlos.sacchelli@ufsc.br

Cesar Edil da Costa⁵

Julio Cesar Giubilei Milan⁶

^{5, 6}Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

⁵cesar.edil@udesc.br, ⁶julio.milan@udesc.br

Abstract. High pressure die casting (HPDC) is exposed to high thermal and mechanical loads. Thermal fatigue cracking of dies due to thermal cycling can significantly shorten die life. Thermal fatigue cracking is a dominant surface defect of aluminum alloy casting molds. Cracks degrade dies surface quality and, consequently, the surface of the castings. Several studies associate the material's toughness with the ability to resist thermal fatigue. In this study, seven advanced die steel for HPDC, classified by NADCA (B, C, E, H) were evaluated by Charpy test and statistically compared using the Fisher test with a significance of 5%. Five die steels evaluated showed significant differences in toughness concerning die steel evaluated. Two die steels presented the lowest absorbed energy values and the highest variances. These two die steels had a reduction of more than 8 Joules (-42%) with the absorbed energy values declared by the manufacturers. Four die steels achieved energy values higher than those declared by the manufacturers. However, all die steel obtained results compatible with the minimum values established by NADCA. Finally, no differences were observed in the sample's toughness of the same die steel regarding the cut direction (0°, 45°, 90°) of the forged ingot.

Keywords: Tool steels, Tenacity, Crash Test, Charpy

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.