

SELEÇÃO COMPARATIVA DE AÇOS PARA JARROS DE MOAGEM DE ALTA ENERGIA EM MOINHO ATTRITOR

**Autores: Lucas Pinheiro Moraes¹, Victor Girardi da Rocha¹,
Sayd Farage David¹.**

¹IFES - Instituto Federal do Espírito Santo, Rodovia Engenheiro Fabiano Vivácqua, 1568, Morro Grande - 29322-000 - Cachoeiro de Itapemirim-ES, Brasil, moraeslcs@gmail.com, victor_girardi@outlook.com, saydfd@ifes.edu.br.

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para seleção de materiais aplicados em jarros de moinhos do tipo Attritor utilizados em moagem de alta energia. Foram avaliados aços estruturais e de ferramenta, considerando operação com esferas de aço AISI 52100 temperado e revenido. O estudo concentrou-se em propriedades mecânicas associadas ao desempenho estrutural e tribomecânico, adotando como critérios dureza, tenacidade, resistência à fadiga e temperabilidade. Os dados foram normalizados em escala [0,1] e combinados por meio de modelo multicritério ponderado. Os resultados mostraram que o AISI 52100 (Q&T) apresentou o maior índice de desempenho, seguido do aço maraging 18Ni(300) e do AISI 4340 (Q&T). Já o AISI 440C (Q&T) e o aço ferramenta D2 apresentaram menor adequação. Conclui-se que o AISI 52100 (Q&T) é o material mais indicado, conciliando resistência ao desgaste, disponibilidade comercial e confiabilidade técnica.

Palavras-chave: seleção de materiais, moagem de alta energia, moinho attritor, aços temperados, propriedades mecânicas.

Área do Conhecimento: Engenharia de Materiais e Metalúrgica.

Introdução

A moagem de alta energia em moinhos do tipo Attritor é um processo amplamente utilizado para a obtenção de ligas metálicas, redução de tamanho de partículas e síntese de materiais com microestruturas refinadas (SURYANARAYANA, 2001). O desempenho do equipamento está diretamente relacionado à integridade estrutural e à durabilidade dos jarros de moagem, componentes que sofrem intenso desgaste devido ao contato contínuo com esferas de aço e partículas metálicas em regime de alta energia.

A seleção adequada do material do jarro é, portanto, um fator crítico para garantir eficiência operacional, vida útil prolongada e confiabilidade do processo. Entre os critérios de maior relevância destacam-se a dureza, responsável pela resistência ao desgaste abrasivo, a tenacidade, que minimiza o risco de fratura, a resistência à fadiga, associada a carregamentos cíclicos, e a temperabilidade, que assegura endurecimento uniforme em maiores seções.

Neste contexto, este trabalho propõe uma metodologia de seleção comparativa de aços candidatos à fabricação de jarros de moagem em moinho Attritor. A análise foi conduzida por meio de normalização das propriedades em escala [0,1] e aplicação de modelo multicritério ponderado, permitindo identificar o material mais adequado em termos de desempenho mecânico e tribológico, sem considerar tratamentos superficiais adicionais.

Metodologia

A presente metodologia estabelece o procedimento para seleção comparativa de materiais candidatos à fabricação de jarros para moagem de alta energia em moinho do tipo Attritor, considerando operação exclusivamente com metais e esferas de aço AISI 52100 temperadas e revenidas. O enfoque é restrito às propriedades mecânicas diretamente relacionadas ao desempenho estrutural e tribomecânico do componente, sem considerar tratamentos superficiais como nitretação ou revestimentos.

1. Definição do escopo e requisitos mecânicos

Durante a operação, o jarro é submetido a pressões de contato Hertziano elevadas, decorrentes da interação esfera–parede, combinadas a impactos repetidos e deslizamento relativo. Essas condições provocam desgaste abrasivo e adesivo, fadiga de contato e risco de spalling. Para suportar tais solicitações, a superfície interna deve apresentar elevada dureza e resistência à indentação, enquanto o núcleo deve manter tenacidade e resistência à fadiga adequadas para absorver energia de impacto e retardar a propagação de trincas.

Os requisitos mínimos adotados como restrições (gates) para inclusão na matriz de decisão foram:

- Dureza superficial $\geq 54\text{--}58$ HRC na face interna;
- Presença de gradiente de dureza caracterizando perfil “casca dura / núcleo mais tenaz”, comprovado por mapeamento de dureza;
- Valores de tenacidade (Charpy ou K_{IC}) compatíveis com resistência a impacto repetitivo, obtidos sob condição de tratamento térmico equivalente à utilizada nos demais dados;
- Rota de tratamento térmico reproduzível em escala industrial, sem aplicação de tratamentos superficiais adicionais.

2. Seleção de materiais candidatos

Foram considerados exclusivamente aços ferramenta e aços estruturais endurecíveis, na condição tratada termicamente, sem aplicação de tratamento termoquímico ou revestimento superficial:

- AISI 52100 (Q&T);
- AISI 4340 (Q&T);
- Aço maraging 18Ni(300) (envelhecido);
- AISI 440C (Q&T);
- Aço-ferramenta D2 (Q&T).

3. Critérios de avaliação e pesos

A avaliação foi conduzida por meio de matriz de decisão com critérios ponderados, definidos de acordo com a influência no desempenho mecânico do jarro representados na Tabela 1, seguindo abordagens consolidadas em seleção de materiais com múltiplos atributos (ASHBY, 2017; SHANIAN; SAVADOGO, 2006).

Tabela 1 - Critérios, Pesos e Métricas para Seleção de Aços.

Critério	Peso	Métrica
Dureza superficial	0,4	HRC/HV na face interna após tratamento térmico; correlaciona-se à resistência à indentação e ao desgaste.
Tenacidade	0,2	Energia Charpy (J) à temperatura ambiente e/ou fator de intensidade de tensão K_{IC} ; representa resistência à fratura por impacto.
Fadiga/fadiga de contato	0,35	Limite de fadiga σ_f (MPa); na ausência, estimativa a partir de σ_{UTS} para a microestrutura e TT específicos.
Hardenabilidade/profundidade de endurecimento	0,05	Resultado de ensaio Jominy, diâmetro ideal (D_I) ou perfil de dureza em espessura equivalente à parede real.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4. Coleta de dados

Para cada material foram obtidos ou medidos — conforme metodologias e tabelas do ASM Handbook (Vol. 4A – Steel Heat Treating Fundamentals and Processes) — os seguintes parâmetros (ASM INTERNATIONAL, 2013):

- Dureza Rockwell C e/ou microdureza Vickers (superfície, 0,5 mm e 1 mm);
- Energia Charpy ou K_{IC}
- Limite de fadiga σ_f ou valor estimado;

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

- Ensaio Jominy, D_I ou mapeamento de dureza em seção; quando aplicável, o D_I foi estimado a partir do D_C usando os valores de severidade de têmpera H e o diagrama de conversão $D_I/D_C \times H$ de Grossmann, conforme o ASM Handbook, Vol. 4A (ASM INTERNATIONAL, 2013).

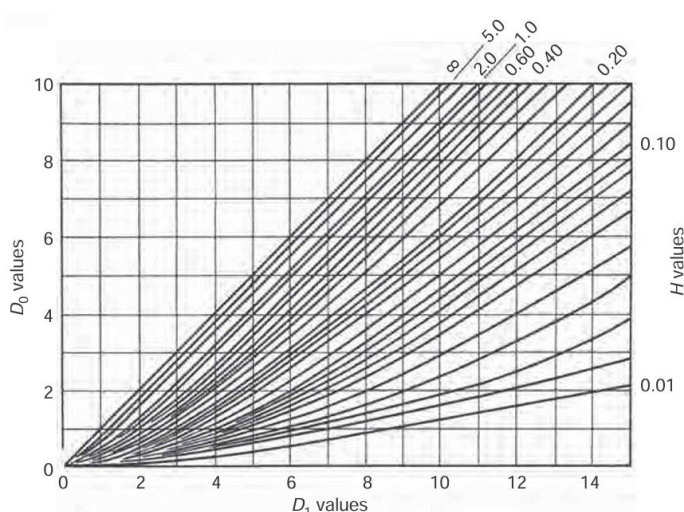
Tabela 2 - Números de Grossmann para diferentes condições de têmpera.

Modo de têmpera	Valor de H
Resfriamento em ar parado	0,02
Agitação moderada em óleo	0,4 - 0,5
Sem agitação na água	1,0
Óleo com alta velocidade/agitação	1,5
Agitação moderada em salmoura morna	2,0
Agitação moderada na água	3,0 - 4,0
Agitação extrema na água	5,0 ou mais

Fonte: (ASM INTERNATIONAL, 2013, ADAPTADO)

Com os valores de H contidos na Tabela 2, será utilizado o diagrama da Figura 1 para encontrar o diâmetro ideal (D_I).

Figura 1 - Diagrama de Grossman.



Fonte: (ASM INTERNATIONAL, 2013)

Todos os valores foram obtidos de ensaios realizados sob condição de tratamento térmico equivalente, garantindo comparabilidade. Propriedades estimadas foram indicadas e justificadas.

5. Normalização e cálculo do índice de desempenho

Os valores de cada critério foram normalizados na faixa $[0,1]$ conforme:

$$s_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

Para métricas cujo menor valor representa melhor desempenho (ex.: distorção, austenita retida), aplicou-se inversão de sinal antes da normalização.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

O índice de desempenho total para cada material foi calculado por:

$$Score = \sum (peso_j \cdot s_{ij})$$

Materiais que não atenderam aos requisitos mínimos foram eliminados antes da pontuação.

Resultados

Os valores das propriedades obtidas são apresentados a seguir para as ligas avaliadas, sob condições equivalentes de tratamento térmico.

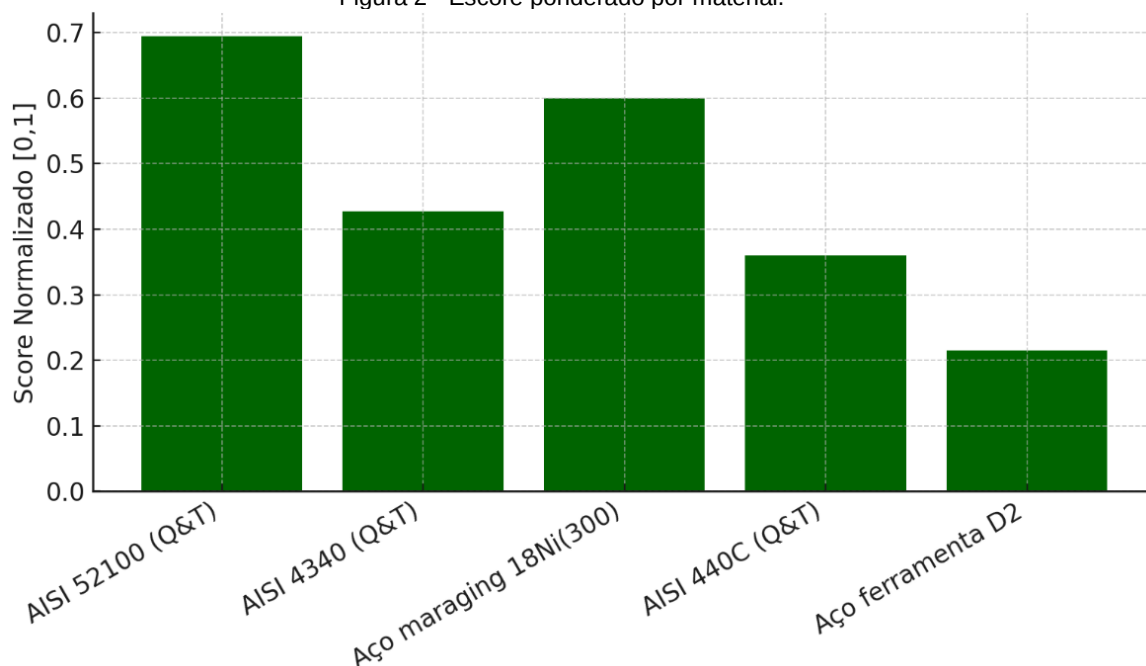
Tabela 3 - Propriedades dos materiais.

Material	Dureza Vickers	Tenacidade (MPa*m ^{0,5})	Res. Fadiga (MPa)	D _i (mm)
AISI 52100 (Q&T)	710	23	796	40
AISI 4340 (Q&T)	590	61	701	122
Aço maraging 18Ni(300) (envelhecido)	530	81	842	280
AISI 440C (Q&T)	629	25	684	60
Aço ferramenta D2	612	19	605	200

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Agora aplicando a normalização e cálculo de índice de desempenho com os dados da Tabela 3, tem-se que:

Figura 2 - Escore ponderado por material.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Discussões

A análise comparativa dos aços candidatos, realizada a partir da normalização dos critérios de seleção e da aplicação dos pesos definidos, permite identificar diferenças significativas no desempenho global dos materiais frente às exigências tribomecânicas do jarro do moinho do tipo Attritor.

O aço AISI 52100 (Q&T) apresentou o maior índice de desempenho, sendo favorecido principalmente por sua elevada dureza superficial, fator determinante para resistir à abrasão e ao desgaste severo decorrente do contato direto com esferas de mesma liga (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Embora sua tenacidade seja a menor entre os materiais analisados, esse parâmetro recebeu menor peso relativo no modelo multicritério, o que reduziu seu impacto negativo no resultado final. Além disso, sua resistência à fadiga se mostrou adequada, garantindo comportamento satisfatório sob carregamentos cíclicos.

O aço maraging 18Ni(300), envelhecido, apresentou desempenho intermediário, com destaque para sua elevada tenacidade e resistência à fadiga, que o tornam atrativo sob a ótica de resistência à fratura. Entretanto, sua dureza superficial relativamente baixa compromete a resistência ao desgaste por atrito contra as esferas de AISI 52100, aspecto crucial no processo de moagem. Assim, apesar de seu bom equilíbrio estrutural, não se configura como a opção mais adequada para a aplicação.

O AISI 4340 (Q&T) obteve desempenho competitivo, beneficiado por sua maior tenacidade em relação ao 52100 e por uma boa resposta em profundidade de endurecimento (D_1), comportamento já amplamente relatado em estudos de aços estruturais de alta resistência (KRAUSS, 2015). Contudo, sua dureza superficial inferior o torna menos eficiente frente às demandas tribológicas do jarro, quando comparado ao 52100.

Já o AISI 440C (Q&T) e o aço ferramenta D2 apresentaram os menores índices globais. O primeiro, embora possua elevada dureza, combina baixa tenacidade com limitada resistência à fadiga. O segundo, por sua vez, apresentou desempenho ainda mais desfavorável, devido à combinação de dureza e resistência à fadiga insuficientes para a aplicação.

Conclusão

Dessa forma, considerando o modelo de decisão proposto, conclui-se que o aço AISI 52100 (Q&T) é o material mais indicado para a fabricação do jarro do moinho Attritor. Sua elevada dureza assegura resistência ao desgaste por contato com as esferas, enquanto suas demais propriedades, ainda que inferiores em certos aspectos, mostram-se suficientes para garantir desempenho estrutural satisfatório. Além disso, trata-se de um material amplamente estudado e de fácil obtenção comercial, o que reforça sua viabilidade técnica e econômica.

Referências

- ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook. v. 4A: **Steel Heat Treating Fundamentals and Processes**. Editado por Jon L. Dossett; George E. Totten. Materials Park, OH: ASM International, 2013.
- SURYANARAYANA, C. **Mechanical alloying and milling**. Progress in Materials Science, v. 46, p. 1–184, 2001.
- ASHBY, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**. 5. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.
- SHANIAN, A.; SAVADOGO, O. **A material selection model based on the concept of multiple attribute decision making**. Materials & Design, v. 27, n. 4, p. 329–337, 2006.
- HUTCHINGS, I. M.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 2. ed. Butterworth-Heinemann, 2017.
- KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. 2. ed. Materials Park: ASM International, 2015.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) – Termo de Outorga nº 1223/2024 e do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes).