REVESTIMENTOS DE BARREIRA TÉRMICA: DESAFIOS, APLICAÇÕES E TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS CONTEMPORÂNEAS

Agatha C. Corrêa[1,2], Nazir M. Santos[1]

[1]*Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos, Brasil*
(agathacoelho.correa@gmail.com)
[2]*FATEC Prof. Jessen Vidal, São José dos Campos, Brasil*

Resumo: O avanço tecnológico contemporâneo tem ampliado a demanda por materiais capazes de suportar condições extremas de operação. Nesse contexto, os revestimentos de barreira térmica (TBCs) destacam-se por aumentar o rendimento, a vida útil e a performance de componentes sob elevadas temperaturas. Este trabalho discute os desafios, aplicações e tendências da pesquisa em TBCs, enfatizando sua natureza interdisciplinar, papel na inovação científica e relevância para o desenvolvimento tecnológico atual.

Palavras-chave: Ciência dos materiais; Revestimento de barreira térmica; Transformação tecnológica; Materiais avançados; Inovação científica.

INTRODUÇÃO

As constantes evoluções tecnológicas têm impulsionado o desenvolvimento de materiais capazes de atender às crescentes demandas por integridade estrutural e alta performance em condições severas de operação. Em diferentes setores industriais, o aumento das temperaturas de trabalho e a busca por otimização do consumo de combustível têm estimulado soluções capazes de proteger componentes metálicos submetidos a ambientes extremos (Clarke e Levi, 2003).

Nesse contexto, os revestimentos de barreira térmica destacam-se como importantes tecnologias voltadas ao isolamento térmico e à proteção superficial de componentes expostos a elevadas temperaturas. Esses revestimentos atuam reduzindo a transferência de calor para o substrato metálico, promovendo aumento da vida útil e melhoria do desempenho térmico dos sistemas (Padture et al., 2002).

Os TBCs são geralmente constituídos por sistemas multicamadas compostos por um substrato metálico, uma camada intermediária metálica (*bond coat*) e uma camada cerâmica (*top coat*) de baixa condutividade térmica, frequentemente composta por zircônia estabilizada com ítria (YSZ) (Darolia, 2013). O entendimento dos mecanismos de falha e a evolução estrutural dos revestimentos cerâmicos têm sido amplamente documentados ao longo das últimas décadas por referências seminais na área de engenharia de superfícies (Levi, 2004; Busso et al., 2007; Vaßen et al., 2010). A Figura 1 apresenta uma micrografia da seção transversal de um sistema TBC multicamada, evidenciando a organização típica das camadas utilizadas nesses revestimentos.

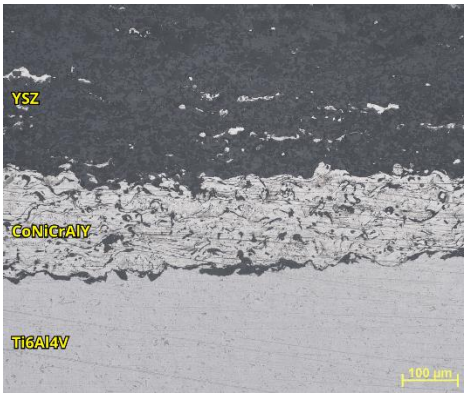

Figura 1. Micrografia da seção transversal do TBC.
Fonte: Próprios autores (2026)

Além de suas aplicações tecnológicas essenciais nos setores aeroespacial, automobilístico e de geração de energia, a pesquisa em TBCs evidencia a crescente necessidade de integração entre diferentes áreas do conhecimento, envolvendo engenharia de materiais, processos de deposição, química, física e caracterização microestrutural. Dessa forma, o estudo desses revestimentos representa um exemplo da natureza interdisciplinar da ciência dos materiais contemporânea, especialmente diante dos cenários de constante modernização industrial.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo discutir os desafios, as principais aplicações industriais e as tendências contemporâneas na pesquisa de revestimentos de barreira térmica,

evidenciando sua natureza interdisciplinar e os principais mecanismos de falha microestrutural. O diferencial deste estudo reside em uma abordagem exploratória que conecta a prospecção bibliográfica preliminar via Inteligência Artificial à análise crítica manual, mapeando soluções avançadas frente às demandas da indústria moderna.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica exploratória, com abordagem qualitativa, voltada à análise de revestimentos de barreira térmica (*Thermal Barrier Coatings – TBCs*), suas aplicações, mecanismos de degradação e tendências tecnológicas. A prospecção bibliográfica foi realizada com apoio de ferramentas de Inteligência Artificial (*ChatGPT* e *Gemini*), baseadas em processamento de linguagem natural e busca semântica, utilizadas exclusivamente para identificação preliminar de publicações potencialmente relevantes sobre revestimentos de barreira térmica. A partir de termos-chave como *Thermal Barrier Coatings*, *YSZ degradation*, *Thermally Grown Oxide*, *thermal fatigue*, *advanced thermal barrier coatings* e *environmental barrier coatings*, as ferramentas indicaram inicialmente cerca de 30 artigos.

A seleção final dessas referências foi realizada manualmente pelos autores por meio da triagem por títulos e resumos, resultando na seleção de 11 artigos que se alinhavam perfeitamente ao escopo da pesquisa. Para compor o portfólio final de 19 artigos utilizados na revisão, as publicações foram validadas e complementadas por buscas nas bases *Google Acadêmico*, *Scopus* e *Web of Science*. A análise final priorizou referências clássicas e recentes, considerando sua relevância científica, aderência ao tema e contribuição para a compreensão dos desafios, aplicações e perspectivas tecnológicas dos revestimentos de barreira térmica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Bogdan e Peter (2024), os TBCs apresentam ampla relevância tecnológica devido à diversidade de aplicações industriais, com destaque para os setores aeroespacial, energético e automotivo, conforme ilustrado na Figura 2. Nessas aplicações, os revestimentos atuam como isolantes térmicos, permitindo operações em temperaturas superiores aos limites convencionais das ligas metálicas e contribuindo para ganhos relacionados ao rendimento energético, desempenho operacional e conservação de combustível.



Figura 2. Principais aplicações dos TBCs
Fonte: Próprios autores (2026)

No setor aeroespacial, os TBCs são amplamente empregados em turbinas aeronáuticas e motores de alta performance, permitindo operações em temperaturas superiores a 1500 °C e contribuindo diretamente para a eficiência térmica e confiabilidade dos sistemas (Bogdan e Peter, 2024). De acordo com Padture et al. (2002), a utilização desses revestimentos possibilita maior eficiência energética em turbinas a gás, favorecendo o aumento do desempenho operacional e a redução do consumo de combustível. Na área energética, esses revestimentos são utilizados em turbinas industriais e sistemas de geração termoelétrica, auxiliando na proteção de componentes submetidos a longos períodos de operação em temperaturas elevadas. Segundo Clarke e Levi (2003), a utilização de TBCs contribui significativamente para o aumento da eficiência termodinâmica de sistemas de potência, além de mitigar custos associados à degradação térmica e manutenção de componentes.

No setor automotivo, os TBCs vêm sendo aplicados em motores de combustão interna visando melhorias relacionadas ao aproveitamento térmico**,** desempenho energético e redução das emissões de gases poluentes (Uchida, 2022). Nesse contexto, a aplicação desses revestimentos acompanha as demandas contemporâneas por tecnologias mais eficientes e sustentáveis, evidenciando sua relevância no desenvolvimento de soluções voltadas à transição energética e à otimização de sistemas mecânicos.

A análise da literatura evidencia que o avanço tecnológico contemporâneo ampliou a demanda de materiais capazes de operar em condições extremas, consolidando os TBCs como sistemas de revestimento de elevada relevância industrial. Entretanto, as exigências relacionadas à eficácia térmica, extensão da vida útil e sustentabilidade ampliaram também os desafios científicos associados

ao desenvolvimento e caracterização desses materiais.

Nesse contexto, diversos estudos apontam que o aumento das temperaturas operacionais e das exigências industriais intensificaram problemas relacionados à degradação microestrutural dos TBCs, especialmente mecanismos associados à oxidação, delaminação, camada de óxido crescido termicamente (*Thermally Grown Oxide* - TGO), sinterização e fadiga térmica (Evans et al., 2001; Darolia, 2013). Segundo Lima e Guilemany (2007), a longevidade desses revestimentos está diretamente relacionada ao controle microestrutural e aos processos de deposição utilizados durante sua fabricação.

Além dos desafios associados ao desempenho térmico, a literatura recente demonstra uma crescente busca por revestimentos mais eficientes, sustentáveis e adaptáveis às novas demandas industriais, impulsionando pesquisas voltadas ao desenvolvimento de materiais avançados, novas rotas de deposição e revestimentos inteligentes (Song et al., 2023). A evolução dos processos de aspersão térmica, como a transição para o uso de suspensões e o desenvolvimento de revestimentos funcionais e inteligentes, representa uma forte tendência científica (Tejero-Martin et al., 2019). Adicionalmente, sistemas de barreiras ambientais (EBCs) começam a ser integrados para atuar em conjunto com os TBCs tradicionais em turbinas de última geração (Tejero-Martin et al., 2020; Tejero-Martin et al., 2021). Dessa forma, a evolução tecnológica contemporânea não apenas consolidou os TBCs como materiais de elevada relevância industrial, mas também ampliou a complexidade científica relacionada ao seu desenvolvimento e caracterização.

Pesquisas recentes focadas nas propriedades mecânicas, microestruturais e na resistência à degradação térmica em alta temperatura demonstram que novos dopantes e arquitetura de revestimento são essenciais para mitigar falhas catastróficas (Mondal et al., 2021; Liu et al., 2022; Patel et al., 2022). Esse cenário impõe desafios constantes no design de materiais cerâmicos avançados para as demandas industriais atuais (Li et al., 2024; Mahfouz et al., 2024).

Nesse cenário, a pesquisa em TBCs evidencia o caráter interdisciplinar da ciência dos materiais, integrando conhecimentos relacionados à engenharia, química, física, manufatura avançada e caracterização microestrutural. Assim, os desafios associados a esses revestimentos refletem diretamente as transformações tecnológicas que impactam a pesquisa científica contemporânea.

CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica permitiu concluir que os revestimentos de barreira térmica (TBCs) constituem sistemas estratégicos para aplicações em altas temperaturas, especialmente nos setores aeroespacial, energético e automotivo. Sua utilização contribui para a proteção de componentes metálicos, o aumento da eficiência térmica e a ampliação da vida útil de sistemas submetidos a condições severas de operação.

Embora sejam tecnologias consolidadas em diversas aplicações industriais, o desempenho dos TBCs em longo prazo ainda depende do controle integrado entre composição, processamento, microestrutura e condições de serviço. Esse controle é fundamental para aumentar a durabilidade dos revestimentos e reduzir falhas associadas à exposição prolongada a ambientes térmicos severos.

As tendências atuais indicam que o avanço dos TBCs está relacionado ao desenvolvimento de novos materiais cerâmicos, sistemas multicamadas, revestimentos funcionais e inteligentes, bem como à integração com barreiras ambientais (EBCs) para aplicações em turbinas de nova geração. Assim, conclui-se que os TBCs permanecem como uma tecnologia essencial para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes, duráveis e sustentáveis, em consonância com as demandas contemporâneas por materiais avançados para ambientes extremos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio concedido por meio do processo nº 157898/2025-3, e ao COMAER – Ed. CAPA IEAV/PropHiper, processo nº 67720.009933/2024-93, pelo apoio e incentivo à pesquisa científica.

REFERÊNCIAS

BOGDAN, M.; PETER, I. A comprehensive understanding of thermal barrier coatings (TBCs): applications, materials, coating design and failure mechanisms. *Metals*, v. 14, n. 5, p. 575, 2024. DOI: 10.3390/met14050575.

BUSSO, E.; WRIGHT, L.; EVANS, H. E.; MCCARTNEY, L. N.; SAUNDERS, S. R. J.; OSGERBY, S.; NUNN, J. A physics-based life prediction methodology for thermal barrier coating systems. *arXiv*, 2007. DOI: 10.48550/arXiv.cond-mat/0703069.

CLARKE, D. R.; LEVI, C. G. Materials design for the next generation thermal barrier coatings. *Annual Review of Materials Research*, v. 33, p. 383–417, 2003. DOI: 10.1146/annurev.matsci.33.011403.113718.

DAROLIA, R. Thermal barrier coatings technology: critical review, progress update, remaining challenges and prospects. *International Materials Reviews*, v. 58, n. 6, p. 315–348, 2013. DOI: 10.1179/1743280413Y.0000000019.

EVANS, A. G.; MUMM, D. R.; HUTCHINSON, J. W.; MEIER, G. H.; PETTIT, F. S. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings. *Progress in Materials Science*, v. 46, n. 5, p. 505–553, 2001. DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00020-7.

LEVI, C. G. Emerging materials and processes for thermal barrier systems. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, v. 8, n. 1, p. 77–91, 2004. DOI: 10.1016/j.cossms.2004.03.009

LIMA, C. R. C.; GUILEMANY, J. M. Adhesion improvements of Thermal Barrier Coatings with HVOF thermally sprayed bond coats. *Surface and Coatings Technology*, v. 201, n. 8, p. 4694-4701, 2007. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.09.030.

LI, H.; YANG, S.; LI, X.; LI, W. Failure mechanisms and surface treatment processes of thermal barrier coatings: review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024. DOI: 10.1016/j.cja.2024.07.015.

LIU, B.; ZHOU, J.; WANG, L.; WANG, Y. Research progress of self-healing thermal barrier coatings: a review. *Coatings*, v. 12, n. 11, p. 1724, 2022. DOI: 10.3390/coatings12111724.

MAHFOUZ, L.; MAUREL, V.; GUIPONT, V.; MARCHAND, B.; EL HOURANY, R.; COUDON, F.; MACK, D. E.; VAßEN, R. Thermal barrier coatings in burner rig experiment analyzed through laser shock for damage monitoring (LASDAM) method. *arXiv*, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2404.06629.

MONDAL, K.; NUÑEZ, L.; DOWNEY, C. M.; VAN ROOYEN, I. J. Thermal barrier coatings overview: design, manufacturing, and applications in high-temperature industries. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 60, n. 17, p. 6061–6077, 2021. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c00788.

PADTURE, N. P.; GELL, M.; JORDAN, E. H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications. *Science*, v. 296, n. 5566, p. 280–284, 2002. DOI: 10.1126/science.1068609.

PATEL, H.; PRAJAPATI, D.; PATEL, H. Thermal barrier coatings: review. *Materials Today: Proceedings*, v. 56, part 3, p. 1201–1216, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.170.

SONG, J.; WANG, L.; YAO, J.; DONG, H. Multi-scale structural design and advanced materials for thermal barrier coatings with high thermal insulation: a review. *Coatings*, v. 13, n. 2, p. 343, 2023. DOI: 10.3390/coatings13020343.

TEJERO-MARTIN, D.; REZVANI RAD, M.; MCDONALD, A.; HUSSAIN, T. Beyond traditional coatings, a review on thermal sprayed functional and smart coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 28, p. 598–644, 2019. DOI: 10.1007/s11666-019-00831-8.

TEJERO-MARTIN, D.; BENNETT, C.; HUSSAIN, T. A review on environmental barrier coatings: history, current state of the art and future developments. *arXiv*, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2007.14914.

TEJERO-MARTIN, D.; BAI, M.; MATA, J.; HUSSAIN, T. Evolution of porosity in suspension thermal sprayed YSZ thermal barrier coatings through neutron scattering and image analysis techniques. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 41, n. 12, p. 6035–6048, 2021. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.04.020.

UCHIDA, N. A review of thermal barrier coatings for improvement in thermal efficiency of both gasoline and diesel reciprocating engines. *International Journal of Engine Research*, v. 23, n. 1, p. 3–28, 2022. DOI: 10.1177/1468087420978016.

VAßEN, R.; JARLIGO, M. O.; STEINBRECH, R. W.; MACK, D. E.; STÖVER, D. Overview on advanced thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, v. 205, n. 4, p. 938–942, 2010. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.151.