



UFSC



JESTA

Journal of Exact Sciences and Technological Applications



ISSN 2965-694X  
OPEN ACCESS

JESTA, Cachoeira do Sul, v. 3, p. 01-15, e92077, 2025 • <https://doi.org/10.5902/2965694X92077>  
Submissão: 18/05/2025 • Aprovação: 16/09/2025 • Publicação: 01/12/2025

Aplicações Tecnológicas

## ***Vibranium, da ficção à engenharia – uma jornada pela ciência dos materiais***

*Vibranium, from fiction to engineering – a journey through the science of materials*

**Camila dos Santos Torres<sup>1</sup> , Andressa da Silva Mougenot<sup>1</sup> ,  
Lara Bonatto Lorenzonii<sup>1</sup> , Maria Clara Burgues Nepomuceno<sup>1</sup> ,  
Pietra Machado Unfer Santos<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil

### **RESUMO**

*O vibranium, metal fictício do Universo Cinematográfico Marvel representado no escudo do Capitão América, combina propriedades extremas como alta tenacidade à fratura ( $K_{IC} > 200 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ), restituição quase perfeita ( $\varepsilon \approx 0,98$ ) e estabilidade dimensional dinâmica, que são inalcançáveis simultaneamente em materiais reais. Este trabalho usa esse ideal como catalisador conceitual: compara suas funcionalidades com as de materiais reais (grafeno, aerogéis, ligas avançadas), identifica defasagens e propõe uma arquitetura híbrida para aproximar esses desempenhos. A abordagem exemplifica como a ficção científica pode inspirar e guiar a inovação em engenharia de materiais ao traduzir narrativas especulativas em direções de pesquisa plausíveis e multifuncionais.*

**Palavras-chave:** Inovação inspirada pela ficção; Materiais avançados; Engenharia de materiais; *Vibranium*

### **ABSTRACT**

*Vibranium, the fictional metal of the Marvel universe embodied in Captain America's shield, aggregates extreme and mutually challenging properties—high fracture toughness ( $K_{IC} > 200 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ), near-perfect restitution ( $\varepsilon \approx 0.98$ ), and dynamic dimensional stability that no known real material simultaneously achieves. This work treats that ideal as a conceptual catalyst for innovation: it systematically compares those fictional functionalities to real high-performance materials (e.g., graphene, aerogels, smart alloys), maps the resulting gaps, and proposes a hybrid multilayer architecture to approximate the desired multi-objective performance.*

**Keywords:** Fiction-inspired innovation; Advanced materials; Hybrid architectures; *Vibranium*; Materials engineering



Artigo publicado por JESTA sob uma licença CC BY-NC 4.0.



## INTRODUÇÃO

O *vibranium*, material fictício do universo Marvel, desafia os limites conhecidos da física ao reunir propriedades atualmente inatingíveis nos materiais reais como absorção quase perfeita de energia cinética, autorreparo espontâneo e resistência a impactos extremos. Seu uso mais emblemático ocorre no escudo do Capitão América, um disco côncavo de 76 cm de diâmetro e 5,4 kg, forjado, segundo a narrativa, a partir de uma liga acidental de *vibranium*, aço e um componente desconhecido, desenvolvida pelo metalurgista Myron MacLain durante a Segunda Guerra Mundial <sup>[1-4]</sup>.

Mais do que um objeto de ficção, o escudo representa um desafio técnico, ao combinar propriedades dificilmente compatíveis entre si. A combinação de alta tenacidade à fratura ( $K_{IC} > 200 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) e coeficiente de restituição próximo ao ideal ( $\varepsilon \approx 0,98$ ) exemplifica um caso-limite na engenharia de materiais, já que tais atributos normalmente se contrapõem devido às restrições mútuas entre rigidez, resistência à fratura e dissipação de energia <sup>[5-8]</sup>.

A evolução narrativa do escudo, do modelo triangular original (*Captain America Comics* #1) ao icônico disco circular (*Captain America Comics* #2) <sup>[9,10]</sup>, reflete não apenas uma mudança estética, mas também otimizações funcionais. O formato circular favorece aerodinâmica eficiente, com baixa resistência ao ar e ricochete controlado, enquanto sua estrutura fictícia confere resistência a temperaturas extremas, radiação e impactos balísticos <sup>[3,4]</sup>. Esses atributos tornaram o escudo não apenas um símbolo cultural, mas também um paradigma teórico para o desenvolvimento de materiais multifuncionais avançados.

Embora nenhum material real consiga reproduzir integralmente as propriedades do *vibranium*, avanços recentes na ciência dos materiais têm apontado caminhos promissores para aproximações parciais. Compósitos de grafeno oferecem resistência mecânica excepcional, aerogéis dopados demonstram elevado desempenho na absorção de energia e ligas com memória de forma possibilitam autorreparo sob



estímulo térmico [11-15]. Este estudo propõe uma metodologia para traduzir atributos ficcionais em parâmetros de engenharia mensuráveis, como tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ), módulo de elasticidade e coeficiente de restituição, estabelecendo uma ponte sistemática entre narrativas especulativas e pesquisa aplicada em ciência dos materiais. A abordagem aqui apresentada busca não apenas avaliar o desempenho de materiais reais frente ao ideal ficcional, mas também posicionar a ficção científica como catalisadora de inovação na engenharia.

Além de seu valor conceitual, o exame do *vibranium* como objeto fictício oferece uma ferramenta pedagógica para despertar a curiosidade de estudantes e aumentar o engajamento com temas complexos da engenharia e da ciência dos materiais. Ao empregar referências da cultura pop, como o escudo do Capitão América, é possível tornar mais acessíveis conceitos como resistência, dissipação de energia, estabilidade sob cargas dinâmicas e limitações estruturais, promovendo uma conexão entre imaginação e investigação técnica. Essa abordagem interdisciplinar e lúdica pode servir como ponto de partida para discussões mais profundas sobre inovação, fronteiras tecnológicas e os desafios de materializar ideais extremos no mundo real. A abordagem ancora conteúdos de engenharia de materiais em um artefato cultural reconhecido, aumentando engajamento e retenção conceitual em cursos introdutórios.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo realiza uma comparação entre materiais reais de engenharia e o *vibranium* fictício representado no escudo do Capitão América, com foco nas propriedades físico-mecânicas que definem seu desempenho idealizado. A metodologia consistiu em três etapas principais:

1. Levantamento do cânone Marvel: foi feita uma revisão estruturada das propriedades atribuídas ao *vibranium* e ao escudo em fontes canônicas (quadrinhos, filmes e compêndios oficiais), registrando descrições qualitativas e quantificações fictícias relativas à tenacidade, restituição, absorção, estabilidade e autorreparo;



#### 4 *Vibranium*, da ficção à engenharia – uma jornada pela ciência dos materiais

---

2. Mapeamento de análogos reais: com base na literatura de ciência dos materiais, foram identificados materiais e classes de materiais (ex.: grafeno, aerogéis de sílica, ligas com memória de forma e compósitos) que aproximam individualmente algumas dessas funcionalidades. A seleção considerou parâmetros como tenacidade à fratura, coeficiente de restituição, capacidade de dissipação/absorção, razão resistência/peso e mecanismos adaptativos.

3. Avaliação comparativa e conceitual: os desempenhos esperados dos materiais reais foram confrontados com o ideal fictício para identificar defasagens e compensações inerentes. A partir disso, propôs-se uma arquitetura híbrida multicamadas que combina mecanismos complementares para atenuar tais defasagens. Os valores foram normalizados tomando o *vibranium* idealizado como referência máxima e usados para construir uma visualização radar que sintetiza essas relações.

Essa abordagem busca não apenas evidenciar o contraste entre ficção e realidade, mas também extrair inspirações conceituais para o desenvolvimento de materiais multifuncionais de alto desempenho. Com base nos critérios acima, foram selecionados e analisados materiais reais com potencial de simular parcialmente as propriedades atribuídas ao *vibranium*.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das propriedades individuais como tenacidade, razão resistência/peso, coeficiente de restituição, absorção de energia, autorreparo e estabilidade dimensional, revela defasagens e compensações inerentes nos materiais reais quando comparados ao *vibranium* idealizado. A Tabela 1 quantifica essas diferenças, enquanto o diagrama da Figura 1 sintetiza uma proposta conceitual para atenuar tais defasagens por meio de uma arquitetura híbrida multicamadas. As propriedades foram normalizadas tomando *vibranium* = 1,0 e os valores dos materiais reais foram escalonados por faixas de referência da literatura para comparação qualitativa. Nos parágrafos seguintes são

discutidas, primeiramente, as contribuições e limitações de materiais isolados (grafeno e aerogel), depois o papel de mecanismos adaptativos como o autorreparo, e, por fim, como a integração dessas funcionalidades pode reduzir a defasagem em relação ao desempenho teórico do *vibranium*.

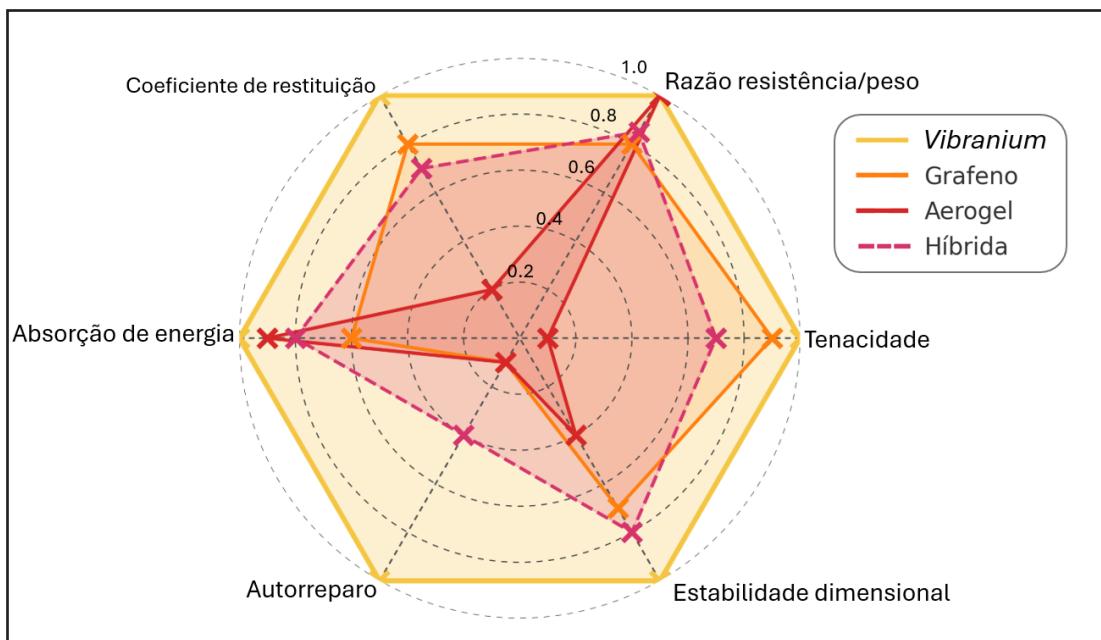
**Tabela 1** - Comparação de propriedades normalizadas. *Vibranium* como referência teórica máxima = 1,0. Valores para grafeno, aerogel e a arquitetura híbrida multicamadas são aproximações parciais dos ideais. *Vibranium* e combinação híbrida são idealizações, os demais valores têm base na literatura <sup>[8,15-17]</sup>

\* Proposta conceitual: arquitetura híbrida multicamadas integrando resistência, dissipação e autorreparo.

\*\* Aproximação conceitual do equilíbrio entre restituição e dissipação em um sistema híbrido

Propriedade	<i>Vibranium</i>	Grafeno	Aerogel de sílica	Arquitetura híbrida
Tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ )	ideal >>200 (1,0)	~ 4 MPa·m <sup>1/2</sup> (~0,02)	~0,01–0,1 MPa·m <sup>1/2</sup> (~0,005–0,05)	~100–150 MPa·m <sup>1/2</sup> (~0,5–0,75)*
Coeficiente de restituição ( $\epsilon$ )	≈0,98 (1,0)	~0,8	~0,2–0,3	~0,7–0,8 (~0,75)**
Absorção de energia	muito alta (1,0)	moderada a baixa	Alta (~0,9)	alta (~0,8)*
Razão resistência/peso	muito alta (1,0)	alta (~0,85)	muito alta (~1,0)	alta (~0,9)*
Autorreparo / adaptação	instantâneo (1,0)	—	—	moderado (0,6–0,8)*
Estabilidade dimensional	alta (1,0)	—	—	alta (~0,9)*

O diagrama da Figura 1 sintetiza a abordagem híbrida proposta, enquanto a Tabela 1 resume as diferenças relativas às propriedades-chave.



**Figura 1** – Radar de propriedades normalizadas (vibranium = 1,0) comparando grafeno, aerogel e uma arquitetura híbrida proposta. O diagrama evidencia equilíbrios entre atributos e aproximações parciais ao ideal; valores são qualitativos e a arquitetura é conceitual

O diagrama da Figura 1 materializa a estratégia conceitual de aproximação do *vibranium* por meio de uma arquitetura híbrida. Cada vértice do radar corresponde a uma das propriedades discutidas a seguir, e os polígonos mostram como materiais isolados (grafeno e aerogel) e sua integração equilibram esses atributos. A arquitetura híbrida multicamadas integra pontos fortes, por exemplo, a tenacidade localizada do grafeno, a dissipação do aerogel e mecanismos adaptativos de autorreparo, atenuando limitações isoladas e reduzindo a defasagem em relação ao ideal teórico. As linhas internas tracejadas e os marcadores evidenciam visualmente onde ocorrem essas compensações e o grau de contribuição de cada material para o desempenho multiobjetivo.

Os valores representados são idealizações e normalizações qualitativas baseadas em tendências conhecidas na literatura; a combinação híbrida é uma proposta conceitual e exigiria desenvolvimento experimental para validar sua efetividade conjunta.



## Tenacidade à Fratura

A tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) quantifica a capacidade de um material resistir à propagação de trincas, sendo crucial para aplicações estruturais. No caso do *vibranium*, assume-se um valor idealizado superior a  $200 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , um limite teórico inatingível para materiais atuais. Em contraste, o grafeno apresenta tenacidade real baixa: estudos em monocamadas com pré-trinca reportam  $K_{Ic} \approx 4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , valor compatível com seu comportamento frágil apesar da altíssima resistência à tração<sup>[16]</sup>. Versões multicamadas e compósitos de grafeno podem elevar esse valor para faixas entre 10 e 15  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , mas ainda longe dos limites teóricos<sup>[16]</sup>. Já aerogéis de sílica exibem tenacidades da ordem de 0,01–0,1  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , refletindo extrema fragilidade<sup>[15]</sup>. Essas diferenças realçam o conflito clássico entre resistência e tenacidade em materiais rígidos, conforme descrito por Ritchie<sup>[5]</sup> e Anderson<sup>[6]</sup>, e motivam a busca por arquiteturas híbridas capazes de retardar a propagação de trincas ao combinar reforços locais (p. ex. lamelas de grafeno) com suporte estrutural e mecanismos de dissipação para atrasar a propagação de trincas e aproximar o desempenho do ideal.

## Absorção de Energia

A absorção de energia refere-se à capacidade de um material capturar, dissipar ou armazenar a energia cinética de um impacto, reduzindo a transmissão de forças a componentes adjacentes e evitando falhas catastróficas<sup>[19]</sup>. No universo ficcional do *vibranium*, essa propriedade é quase perfeita, o escudo absorve, retém e redistribui energia com perdas mínimas enquanto mantém integridade estrutural, um comportamento que combina amortecimento com resiliência sem o comprometimento observado em materiais reais.

Entre os materiais reais, aerogéis de sílica dopados destacam-se pela altíssima capacidade de amortecimento térmico e por oferecerem algum nível de dissipação energética durante choques, especialmente quando combinados com modificações de composição ou reforços (por exemplo, nanopartículas incorporadas para

melhorar estabilidade mecânica). Aerogéis puros têm densidade ultra baixa e baixa condutividade térmica, e versões dopadas ou reforçadas podem absorver grande parte da energia de impacto inicial, embora sofram colapso estrutural sob pressões elevadas e apresentem fraca resistência à compressão contínua [15,20].

Outros sistemas que oferecem absorção eficaz de energia são estruturas viscoelásticas e espumas de polímero com comportamento dependente da taxa de deformação. Esses materiais absorvem energia pela deformação e atrito internos, mas frequentemente sacrificam recuperação rápida ou sofrem degradação sob carregamentos repetidos. Combinações de camadas viscoelásticas com substratos rígidos são usadas em aplicações como proteção balística e sistemas de isolamento sísmico exatamente porque tentam equilibrar absorção com estabilidade dimensional [20,21].

A implementação de uma estratégia híbrida para se aproximar do comportamento ideal do *vibranium* poderia envolver um núcleo de absorção energética baseado em um aerogel dopado de baixa densidade, encapsulado por camadas viscoelásticas intercaladas que suavizam picos de tensão e aumentam o tempo de resposta ao impacto. Esse núcleo poderia ser protegido por uma casca externa rígida que distribui a carga inicial, enquanto camadas internas viscoelásticas e microestruturadas dissipam a energia ao longo do tempo, evitando o colapso súbito. Essa arquitetura busca juntar amortecimento de curto prazo (viscoelasticidade) com dissipação e desaceleração progressiva (aerogel), adicionando redundância estrutural para prevenir falhas localizadas. No entanto, limitações práticas incluem a degradação cíclica das camadas viscoelásticas, a fragilidade dos aerogéis sob compressão contínua e desafios de aderência intercamadas que podem levar a delaminação sob impactos repetidos [15,21].

Além disso, a taxa de carregamento, ou quanto rápido a energia é aplicada, influencia fortemente o desempenho desses sistemas: materiais viscoelásticos têm respostas que variam com a frequência, e aerogéis podem apresentar comportamento diferente dependendo do regime de deformação, limitando a generalização



de soluções para uma ampla gama de cenários de impacto. A incorporação de estruturas com resposta adaptativa (como camadas cuja rigidez muda com a taxa de deformação) poderia atenuar parte dessas limitações, aproximando o sistema de um comportamento “inteligente” onde a absorção se ajusta dinamicamente à severidade do impacto. Ainda assim, atingir a combinação de eficiência, velocidade de resposta e recuperação instantânea idealizada no *vibranium* permanece fora do alcance com a tecnologia atual <sup>[21]</sup>.

## Autorreparo

O autorreparo é uma funcionalidade que permite a recuperação parcial ou total de danos sem intervenção externa significativa, reduzindo degradação acumulada e estendendo a vida útil estrutural <sup>[22]</sup>. No *vibranium*, esse mecanismo é instantâneo e abrangente, restaurando forma e propriedades imediatamente após a solicitação. Em materiais reais, o autorreparo ainda é limitado em velocidade, extensão e condições de ativação, mas tem avançado em duas frentes principais: ligas com memória de forma e polímeros autorreparáveis.

As ligas com memória de forma, em especial as baseadas em NiTi (nitinol), exibem transições de fase reversíveis que permitem a recuperação de deformações significativas (tipicamente até ~8%) quando ativadas termicamente ou por carregamento mecânico apropriado. Esse comportamento decorre da transformação martensítica/austenítica e tem sido amplamente estudado tanto do ponto de vista fundamental quanto aplicado. No entanto, o autorreparo em ligas como NiTi exige um estímulo externo (como aquecimento), tem limites na quantidade de deformação recuperável e pode sofrer fadiga de transformação após ciclos repetidos, o que restringe sua capacidade de mimetizar a autorrecuperação instantânea do *vibranium* <sup>[23,24]</sup>.

Já os polímeros autorreparáveis empregam estratégias químicas e físicas para restaurar ligações rompidas. Sistemas pioneiros, como os baseados em microcápsulas contendo agentes de cura <sup>[24]</sup> ou redes dinâmicas reversíveis (por exemplo, ligações



covalentes reversíveis), permitem reparos localizados sem necessidade de calor externo intenso, embora frequentemente com limitações na eficiência de cura e na repetibilidade de múltiplos ciclos. Outras abordagens usam interações não covalentes (como ligações de hidrogênio) para promover recuperação sob condições ambientais moderadas, mas normalmente esses sistemas costumam apresentar um equilíbrio difícil: quanto maior a força mecânica, menor a capacidade de cura espontânea, e vice-versa<sup>[22,24]</sup>.

Uma estratégia para aproximar-se do ideal do *vibranium* poderia integrar uma camada estrutural de liga com memória de forma para reparos mais robustos e de maior amplitude (ativados sob um estímulo térmico controlado), combinada com um revestimento superficial de polímero autorreparável que trate danos menores de forma quase autônoma e contínua. Essa combinação permitiria uma hierarquia de autorreparo: pequenas fissuras seriam seladas rapidamente pela fase polimérica, enquanto deformações maiores seriam restauradas pela transição de fase da liga subjacente. Ainda assim, desafios persistem, como a compatibilização de coeficientes térmicos de expansão, a integração mecânica entre fases distintas e a degradação acumulada em ciclos repetidos, além da necessidade de fontes de energia ou ativação para restaurar completamente a estrutura<sup>[24-26]</sup>.

### **Estabilidade dimensional e coeficiente de restituição**

A estabilidade dimensional sob cargas dinâmicas refere-se à capacidade de um material manter sua geometria, integridade e desempenho funcional diante de impactos repetidos, vibrações e variações rápidas de carregamento, sem acumular deformações permanentes ou falhas progressivas (fadiga). O coeficiente de restituição ( $\epsilon$ ), por sua vez, quantifica quanta energia cinética é conservada durante uma colisão, valores próximos de 1 indicam perdas mínimas e um comportamento quase elástico, enquanto valores muito menores revelam forte amortecimento interno. No modelo ficcional do *vibranium*, essas duas características coexistem: o escudo retorna à forma original após impactos severos (alta estabilidade dimensional) e retém quase toda

a energia de impacto em sua trajetória ( $\epsilon \approx 0,98$ ), um conjunto de atributos difícil de conciliar em materiais reais devido às limitações físicas subjacentes <sup>[8,17]</sup>.

Materiais rígidos e pouco dissipativos, como cerâmicas e algumas ligas metálicas tratadas termicamente, podem apresentar alta estabilidade geométrica sob cargas estáticas e um coeficiente de restituição elevado em impactos de baixa deformação, mas são tipicamente vulneráveis à fratura súbita e à propagação de trincas sob carregamento cíclico, comprometendo a estabilidade a longo prazo. Por outro lado, materiais com alta dissipação interna (como elastômeros viscoelásticos) apresentam boa resistência à fadiga local e amortecimento de vibrações, mas perdem grande parte da energia de impacto ( $\epsilon$  baixo) e sofrem deformações permanentes sob solicitação repetida. Essas compensações de desempenho entre conservar energia (alto  $\epsilon$ ), resistir à fadiga e evitar deformações permanentes ilustram a dificuldade de alcançar simultaneamente elevada restituição e estabilidade dimensional dinâmica <sup>[17,21]</sup>.

Uma abordagem híbrida para atenuar essas limitações pode envolver sistemas com gradientes funcionais e camadas múltiplas: uma superfície externa rígida e elástica forneceria alta restituição e controle da forma inicial do impacto, enquanto camadas internas mais dúcteis ou com propriedades viscoelásticas absorveriam os picos de tensão, protegendo o núcleo contra falhas e espalhando a energia ao longo do tempo para preservar a estabilidade global. Alternativamente, revestimentos superficiais de baixa dissipação podem ser combinados com núcleos com capacidade de amortecimento adaptativo, de forma que a resposta do sistema mude conforme o regime de carregamento, mantendo  $\epsilon$  elevado em colisões de menor severidade, mas ativando amortecimento quando o impacto é mais severo, reduzindo acúmulo de dano. O uso de metamateriais dinâmicos e estruturas com resposta não linear controlada também permite projetar caminhos preferenciais para a propagação de deformações, desviando tensões longe de regiões críticas e retardando a degradação acumulada <sup>[17,18]</sup>.

Ainda assim, combinar alta restituição com estabilidade dimensional prolongada é desafiador porque conservar energia implica, em geral, evitar mecanismos internos



de dissipação que amortecem e distribuem tensões; sem esses mecanismos, o sistema se torna mais suscetível a tensões localizadas e falhas por fadiga. A integração eficaz de amortecimento “sob demanda” (ativado apenas em regimes severos) e rigidez elástica no regime de serviço normal representa uma estratégia promissora para aproximar o comportamento do *vibranium*, mas exige controle sofisticado de materiais e interfaces, bem como respostas adaptativas que ainda estão em estágios iniciais de desenvolvimento [8,17].

Apesar de nenhum material real conseguir reunir isoladamente a alta tenacidade à fratura, a eficiente absorção de energia, o autorreparo e a combinação de estabilidade dimensional com restituição quase elástica idealizadas no *vibranium*, a análise separada dessas propriedades revela caminhos complementares e os obstáculos inerentes à sua integração. As tensões entre resistência e ductilidade, a fragilidade de reforços nanoestruturados em macroescala, a dependência de estímulos para autorreparo e os compromissos entre conservar energia e dissipá-la explicam por que o *vibranium* permanece um referencial extremo. A partir desses *insights*, é possível esboçar arquiteturas híbridas, por exemplo, camadas de reforço superficial, núcleos dissipativos e subsistemas de reparo, que combinam seletivamente mecanismos de cada família de materiais, minimizando limitações individuais. Em síntese, a arquitetura híbrida reduz a defasagem em relação ao ideal de *vibranium*, mas requer validação experimental.

## CONCLUSÃO

Este estudo é conceitual e comparativo, com normalizações qualitativas e sem validação experimental da arquitetura híbrida proposta. O *vibranium*, embora fictício, funciona como um referencial conceitual extremo que ajuda a mapear defasagens e orientar a evolução de materiais estruturais reais. Este estudo mostra que, mesmo sem existir na realidade, o *vibranium* pode catalisar ideias em áreas como nanomateriais, metamateriais e materiais inteligentes, servindo de



inspiração para projetos que busquem combinações multifuncionais de tenacidade, dissipação, autorreparo e leveza. Nenhum material conhecido reúne todas essas características simultaneamente, mas arquiteturas híbridas, como a proposta aqui, e avanços em engenharia de superfícies, compósitos e sistemas adaptativos estão reduzindo gradualmente essas defasagens. O desafio é traduzir essas aproximações conceituais em protótipos validados experimentalmente e em modelos quantitativos que equilibrem os ganhos e perdas entre propriedades, passo necessário para transformar a inspiração ficcional em inovação prática.

## REFERÊNCIAS

- [1] LEE, Stan; KIRBY, Jack. (1964). The Avengers #4. New York: Marvel Comics.
- [2] Thomas, Roy; Buscema, Sal. (1981). Captain America #255. New York: Marvel Comics.
- [3] Marvel Comics. (1986). The Official Handbook of the Marvel Universe: Deluxe Edition #2. New York: Marvel Comics.
- [4] Sanderson, Peter. (2009). The Marvel Encyclopedia. London: DK Publishing.
- [5] Ritchie, R. O. (2011). The conflicts between strength and toughness. *Nature Materials*, 10(11), 817-822.
- [6] Anderson, T. L. (2017). Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications (4th ed.). Boca Raton: CRC Press.
- [7] Ashby, M. F. (2011). Materials Selection in Mechanical Design (4th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [8] Goldsmith, W. (1960). Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids. London: Edward Arnold.
- [9] Captain America's shield – the origins and history of the iconic Marvel symbol. (2025). GamesRadar+. Acesso em: 17/05/2025.
- [10] MARVEL COMICS. (1941). Captain America Comics nº 2. New York: Timely Comics.
- [11] Callister, W. D.; Rethwisch, D. G. (2020). Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.). New York: Wiley.
- [12] ASM INTERNATIONAL. (1993). Titanium and Titanium Alloys. ASM Specialty Handbook.
- [13] Lee, C.; Wei, X.; Kysar, J. W.; Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 321(5887), 385-388. DOI:10.1126/science.1157996.



## 14 *Vibranium*, da ficção à engenharia – uma jornada pela ciência dos materiais

---

- [14] Chen, D.; Li, J.; Sun, K.; Fan, J. (2023). Graphene-reinforced metal matrix composites: fabrication, properties, and challenges. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(1), 1–41. DOI:10.1007/s00170-023-10886-4.
- [15] Pierre, A. C.; Pajonk, G. M. (2002). Chemistry of aerogels and their applications. *Chemical Reviews*, 102(11), 4243–4265. DOI:10.1002/chin.200304237.
- [16] Zhang, P.; Ma, L.; Fan, F.; et al. (2014). Fracture toughness of graphene. *Nature Communications*, 5, 3782. DOI:10.1038/ncomms4782.
- [17] Ashby, M. F.; Jones, D. R. H. (2012). *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design* (4th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [18] Kadic, M.; Bückmann, T.; Schittny, R.; Wegener, M. (2013). Metamaterials beyond electromagnetism. *Reports on Progress in Physics*, 76(12), 126501. DOI:10.1088/0034-4885/76/12/126501.
- [19] Jones, N. (2006). *Structural Impact* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511820625.
- [20] Gibson, L. J.; Ashby, M. F. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. DOI:10.1017/CBO9781139878326.
- [21] Lakes, R. (2009). *Viscoelastic Materials*. Cambridge: Cambridge University Press. DOI:10.1017/CBO9780511626722.
- [22] White, S. R.; et al. (2001). Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, 409(6822), 794–797. DOI:10.1038/35057232.
- [23] Otsuka, K.; Wayman, C. M., editors. (1998). *Shape Memory Materials*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [24] Toohey, K. S.; Sottos, N. R.; Lewis, J. A.; Moore, J. S.; White, S. R. (2007). Self-healing materials with microvascular networks. *Nature Materials*, 6(8), 581–585. DOI:10.1038/nmat1944.
- [25] Liu, Y.; Et al. (2006). Shape-memory materials and hybrids: a review of their characteristics and applications. *Progress in Materials Science*, 51(6), 705–775. DOI:10.1016/j.pmatsci.2006.08.002.
- [26] Cordier, P.; et al. (2008). Self-healing and thermoreversible rubber from supramolecular assembly. *Nature*, 451(7181), 977–980. DOI:10.1038/nature06684.

### **Sobre os autores:**

#### **Camila dos Santos Torres**

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, Brasil  
E-mail: camila.torres@uol.com.br - <https://orcid.org/0000-0001-6755-9288>

#### **Andressa da Silva Mougenot**

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, Brasil  
E-mail: andressa-mougenot@hotmail.com - <https://orcid.org/0009-0006-7064-2510>

#### **Lara Bonatto Lorenzoni**



Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, Brasil  
E-mail: lara.lorenzoni@acad.ufsm.br - <https://orcid.org/0009-0005-9306-6416>

**Maria Clara Burgues Nepomuceno**

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, Brasil  
E-mail: albionwakanda@gmail.com - <https://orcid.org/0009-0009-3701-7969>

**Pietra Machado Unfer Santos**

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, Brasil  
E-mail: pietra\_machado@hotmail.com - <https://orcid.org/0009-0005-6959-0058>

**Como citar este artigo**

Torres, C. S., Mougenot, A. S., Lorenzoni, L. B., Nepomuceno, M. C. B., & Santos, P. M. U. (2025). *Vibranium, da ficção à engenharia – uma jornada pela ciência dos materiais.* *JESTA*, Cachoeira do Sul, (3) e92077. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/JESTA/article/view/92077>.