

Revista Eletrônica



Volume 5 – Número 1 - 2025

Comparativo de Comportamento Mecânico entre Aço e Alumínio em Estruturas Aeronáuticas e Automobilísticas: Avaliação de Vantagens e Limitações

Breno Augusto Gabaldi Wolf

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

b.wolf@aluno.ifsp.edu.br

Pedro Virgílio Bueno

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

pedro.virgilio@aluno.ifsp.edu.br

Resumo

Este artigo apresenta uma análise técnica e quantitativa comparando o desempenho mecânico e a viabilidade econômica de três materiais de vanguarda: o aço avançado de alta resistência (AHSS) DP980, a liga de alumínio automotiva 6061-T6 e a liga de alumínio aeronáutica 7075-T6. O estudo visa determinar a adequação de cada material para aplicações estruturais nas indústrias automotiva e aeronáutica. A metodologia baseia-se na compilação e análise de dados de propriedades mecânicas e de custos de mercado. Uma análise crítica da relação peso/resistência é conduzida através do cálculo da Resistência Específica e da Rigidez Específica. Os resultados demonstram a superioridade absoluta do aço DP980 em rigidez, resistência e custo, consolidando-o como a solução predominante para produção em massa. As ligas de alumínio, especialmente a 7075-T6, exibem uma vantagem esmagadora em resistência específica, fator determinante para a indústria aeronáutica, apesar de seu custo significativamente mais elevado. Conclui-se que a seleção ótima do material é intrinsecamente dependente de uma matriz de decisão que pondera desempenho mecânico, eficiência estrutural, processos de manufatura e, crucialmente, o custo de aquisição no cenário brasileiro e global.

Palavras-chave

Resistência dos Materiais, Aço DP980, Alumínio 6061-T6, Alumínio 7075-T6, Análise de Custo, Estruturas Automotivas, Estruturas Aeronáuticas.

Abstract

This article presents a technical and quantitative analysis comparing the mechanical performance and economic viability of three cutting-edge materials: DP980 Advanced High Strength Steel (AHSS), 6061-T6 Automotive Aluminum Alloy, and 7075-T6 Aeronautical Aluminum Alloy. The study aims to

determine the suitability of each material for structural applications in the automotive and aeronautical industries. The methodology is based on the compilation and analysis of data on mechanical properties and market costs. A critical analysis of the weight/strength relationship is conducted through the calculation of Specific Strength and Specific Stiffness. The results demonstrate the absolute superiority of DP980 steel in rigidity, resistance and cost, consolidating it as the predominant solution for mass production. Aluminum alloys, especially 7075-T6, exhibit an overwhelming advantage in specific strength, a determining factor for the aircraft industry, despite their significantly higher cost. It is concluded that the optimal material selection is intrinsically dependent on a decision matrix that weighs mechanical performance, structural efficiency, manufacturing processes and, crucially, the acquisition cost in the Brazilian and global scenario.

Keywords

Strength of Materials, Steel DP980, 6061-T6 Aluminum, 7075-T6 Aluminum, Cost Analysis, Automotive Structures, Aeronautical Structures.

1 - Introdução

A engenharia moderna, em especial nos setores de transporte, vive sob a constante pressão de dois vetores primordiais: a busca por maior eficiência energética e a necessidade de garantir níveis de segurança cada vez mais elevados.

Essa dualidade impulsionou uma verdadeira revolução na ciência e engenharia de materiais, transformando a carcaça de veículos e aeronaves em complexos sistemas multifuncionais. As indústrias automotiva e aeronáutica, embora compartilhem o objetivo de otimização estrutural, operam sob paradigmas de projeto fundamentalmente distintos, ditados por suas realidades econômicas e operacionais.

A indústria automotiva, caracterizada pela produção em massa e sensibilidade ao custo, busca um balanço otimizado entre desempenho, segurança passiva (absorção de energia em colisões), durabilidade e, crucialmente, o custo de matéria-prima e de manufatura. Por outro lado, a indústria aeronáutica opera com um fator preponderante e quase absoluto: a minimização da massa.

Cada quilograma economizado em uma aeronave representa uma redução significativa no consumo de combustível ao longo de sua vida útil, além de um aumento direto na capacidade de carga paga (passageiros ou carga), impactando diretamente a viabilidade econômica da operação.

Neste cenário de otimização, o aço e o alumínio consolidaram-se como protagonistas. Os Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS), e em particular o aço bifásico (Dual-Phase) DP980, representam

o estado da arte em soluções de baixo custo e altíssimo desempenho para a carroceria automotiva (Body-in-White). Em paralelo, as ligas de alumínio tratáveis termicamente, como a versátil 6061-T6 e a ultra-resistente 7075-T6, oferecem uma densidade aproximadamente três vezes menor que a do aço, tornando-se materiais essenciais onde o peso é o fator crítico a ser combatido.

O presente artigo propõe uma análise comparativa, técnica e quantitativa, focada nestes três materiais de alto desempenho. O objetivo central é dissecar e avaliar o comportamento mecânico não apenas através de suas propriedades intrínsecas (como resistência e rigidez), mas, fundamentalmente, através de métricas de eficiência estrutural, como a relação peso/resistência e peso/rigidez.

Adicionalmente, o estudo incorpora uma análise das implicações de custo e dos processos de manufatura associados. Desta forma, este artigo visa fornecer um panorama técnico-econômico abrangente que possa elucidar as complexas decisões de engenharia por trás da seleção de materiais nestes setores estratégicos da indústria global.

2 - Fundamentação Teórica

2.1 - Conceitos Essenciais da Mecânica dos Sólidos

A avaliação de um material para aplicação estrutural se baseia em seu comportamento sob a aplicação de cargas, descrito pelo diagrama Tensão-Deformação.

Região Elástica: Nesta fase inicial, a deformação é temporária e proporcional à tensão aplicada, seguindo a Lei de Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$). A inclinação desta reta é o Módulo de Elasticidade (E), ou Módulo de Young, que quantifica a rigidez do material. Materiais com alto E, como o aço, são mais rígidos e deformam-se menos sob uma mesma carga.

Escoamento: O Limite de Escoamento (σ_e) marca o fim da deformação elástica e o início da deformação plástica, que é permanente. Este é um dos critérios de falha mais importantes em projetos de engenharia.

Encruamento (Strain Hardening): Após o escoamento, o material continua a resistir a cargas crescentes, necessitando de mais tensão para continuar a se deformar.

Limite de Resistência à Tração (σ_r): É o ponto de máxima tensão que o material suporta. Após este ponto, inicia-se o fenômeno da estrição (necking), onde a deformação se localiza em uma pequena região do corpo de prova.

Fratura: Ponto final do teste, onde o material se rompe. A deformação total até este ponto é uma medida da ductilidade do material. A área total sob a curva Tensão-Deformação representa a tenacidade, ou seja, a capacidade do material de absorver energia antes de fraturar.

2.2 - Aço Avançado de Alta Resistência (AHSS): O DP980

Os aços AHSS são uma classe sofisticada de ligas de aço que obtêm suas propriedades superiores através de um controle metalúrgico preciso de sua microestrutura.

O Aço DP980 (Dual-Phase) é um exemplo proeminente. Sua microestrutura, como o nome sugere, é composta por duas fases distintas:

Matriz de Ferrita: Uma fase macia e dúctil, que confere ao material a capacidade de se deformar (formabilidade).

Ilhas de Martensita: Uma fase extremamente dura e frágil, dispersa na matriz de ferrita, que é responsável pela altíssima resistência mecânica do material.

Essa microestrutura é obtida através de um ciclo de aquecimento controlado a uma temperatura intercrítica (entre as temperaturas de transformação da austenita e da ferrita), seguido de um resfriamento rápido.

O resultado é um material que combina alta resistência (o "980" indica um limite de resistência mínimo de 980 MPa) com uma taxa de encruamento elevada, o que o torna ideal para componentes estruturais automotivos que precisam absorver grande quantidade de energia em uma colisão.

2.3 - Ligas de Alumínio de Alta Performance

As ligas de alumínio das séries 6xxx e 7xxx são endurecíveis por precipitação, ou seja, suas propriedades são otimizadas por tratamentos térmicos.

2.3.1 - A Liga 6061-T6: Versatilidade e Desempenho

A liga 6061 pertence à série 6xxx, cujos principais elementos de liga são Magnésio (Mg) e Silício (Si). Estes elementos se combinam para formar o precipitado intermetálico Mg₂Si, que é o principal agente de endurecimento. O tratamento "T6" consiste em três etapas:

Solubilização: Aquecimento da liga para dissolver os elementos de liga em uma solução sólida.

Têmpera (Quenching): Resfriamento rápido em água para "congelar" os átomos em solução.

Envelhecimento Artificial: Reaquecimento a uma temperatura moderada por um tempo controlado, permitindo a precipitação fina e dispersa de partículas de Mg₂Si, que obstruem o movimento de discordâncias e aumentam drasticamente a resistência da liga.

O resultado é um material de média a alta resistência, excelente resistência à corrosão, boa soldabilidade e conformabilidade, tornando-o um "pau para toda obra" em aplicações estruturais, desde chassis de bicicletas e veículos até componentes arquitetônicos.

2.3.2 - A Liga 7075-T6: O Padrão Aeronáutico

A liga 7075 faz parte da série 7xxx, que utiliza o Zinco (Zn) como principal elemento de liga, frequentemente com adições de Magnésio (Mg) e Cobre (Cu). O tratamento T6 nesta liga leva à formação de precipitados finíssimos, como o MgZn₂, resultando em uma das mais altas resistências mecânicas entre todas as ligas de alumínio, comparável à de muitos aços. Essa altíssima resistência, combinada com a baixa densidade do alumínio, faz dela o material padrão para aplicações aeroespaciais críticas, como revestimentos e longarinas da estrutura superior das asas (onde as tensões de compressão são máximas) e cavernas da fuselagem. Suas principais limitações são um custo muito elevado, menor tenacidade à fratura e maior suscetibilidade à corrosão sob tensão, exigindo projetos e tratamentos superficiais cuidadosos.

2.4 - Métricas de Seleção de Materiais para Leveza Estrutural

A simples comparação de propriedades absolutas, como a resistência à tração, é insuficiente ao comparar materiais de densidades distintas. Para projetos onde a massa é um fator crítico, utilizam-se métricas de desempenho específico:

Rigidez Específica (E/ρ): Mede a rigidez de um material por unidade de massa. É o critério principal para componentes projetados para resistir à flambagem sem exceder um limite de peso.

Resistência Específica (σ_r/ρ): Mede a resistência de um material por unidade de massa. É o critério dominante para componentes sob tração que precisam suportar a maior carga possível com o mínimo de peso.

Essas métricas são a base dos chamados "Mapas de Ashby", ferramentas gráficas que permitem a seleção otimizada de materiais para uma dada função de engenharia.

3 - Metodologia

O presente estudo foi conduzido seguindo uma metodologia estruturada em três etapas principais:

Revisão Bibliográfica Sistemática: Foi realizado um levantamento aprofundado em literatura técnica, incluindo manuais de engenharia (como o ASM Handbook), artigos científicos, e publicações de associações setoriais (ABAL, Instituto Aço Brasil) para consolidar os fundamentos teóricos sobre os materiais em estudo e seus respectivos contextos de aplicação.

Coleta e Tabulação de Dados: Foram extraídas de bases de dados de materiais reconhecidas, como o MatWeb, as propriedades mecânicas nominais (densidade, módulo de elasticidade, limites de escoamento e resistência, alongamento) para o Aço DP980, Alumínio 6061-T6 e Alumínio 7075-T6.

Análise Comparativa e Discussão: Os dados absolutos foram tabulados e utilizados para calcular as propriedades específicas (rigidez e resistência). Um diagrama Tensão-Deformação esquemático foi construído para ilustrar visualmente as diferenças de comportamento. A análise dos resultados foi então conduzida, contextualizando os dados numéricos com as implicações práticas de manufatura, custo e sustentabilidade para os setores automotivo e aeronáutico.

4 - Resultados e Discussão

4.1 - Análise Comparativa das Propriedades Mecânicas Absolutas

A compilação dos dados nominais resulta na Tabela 1, que serve como base para a análise.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais.

Propriedades	Unidade	Aço DP980	Alumínio 6061-T6	Alumínio 7075-T6
Densidade (ρ)	g/cm ³	7,85	2,70	2,81
Modulo de Elasticidade	GPa	210	69	71,1
Limite de Escoamento	MPa	~780	~276	~503
Limite de Resistência	MPa	~980	~310	~572
Alongamento na Ruptura	%	~10	~17	~11

Em termos absolutos, a dominância do aço DP980 é evidente. Sua rigidez (Módulo E) é três vezes superior à das ligas de alumínio, e seu limite de resistência ultrapassa o da liga 7075-T6 em mais de 70%. Isso implica que, para uma mesma geometria, um componente de aço será muito mais rígido e resistente. O gráfico 1 abaixo comprova a análise da tabela quanto a densidade.

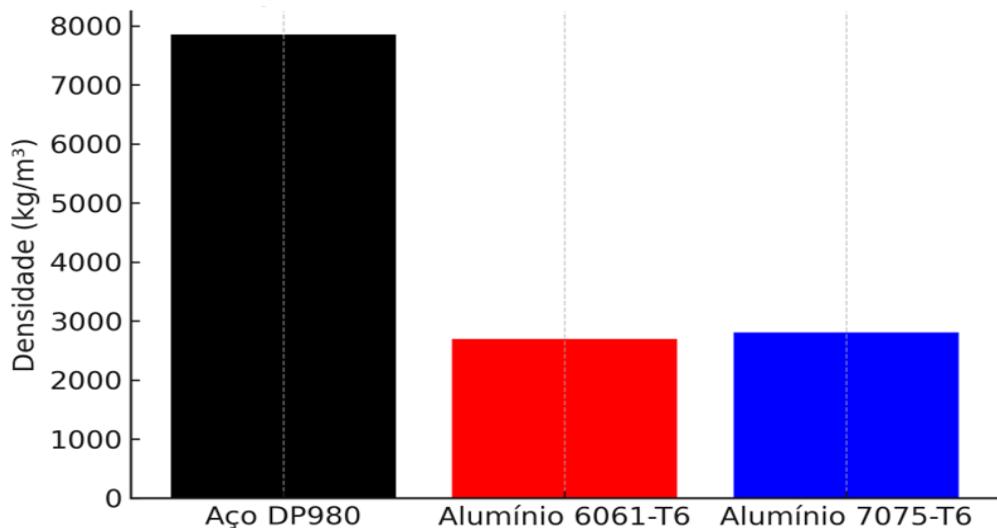


Figura 1 – Comparaçāo de densidade dos materiais.

4.2 - Análise Comparativa das Propriedades Específicas

Quando a massa entra na equação, o cenário se transforma radicalmente, como mostra os resultados obtidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades específicas dos materiais.

Propriedade Específica	Unidade	Aço D980	Alumínio 6061-T6	Alumínio 7075-T6
Rigidez Específica (E/ρ)	$\text{MN} \cdot \text{m/Kg}$	26,75	25,55	25,51
Resistência Específica (σ_r/ρ)	$\text{KN} \cdot \text{m/Kg}$	125,5	114,8	203,5

A rigidez específica dos três materiais é notavelmente similar, um fato físico conhecido para a maioria dos metais estruturais. No entanto, a resistência específica do alumínio 7075-T6 se destaca de forma esmagadora, sendo 62% superior à do aço DP980. Este único dado é a principal justificativa técnica para o domínio das ligas de alumínio de alta performance na indústria aeroespacial. Para ilustrar os dados da tabela, o gráfico 3 foi criado, ajudando a comprovar a larga vantagem do alumínio nesse cenário.

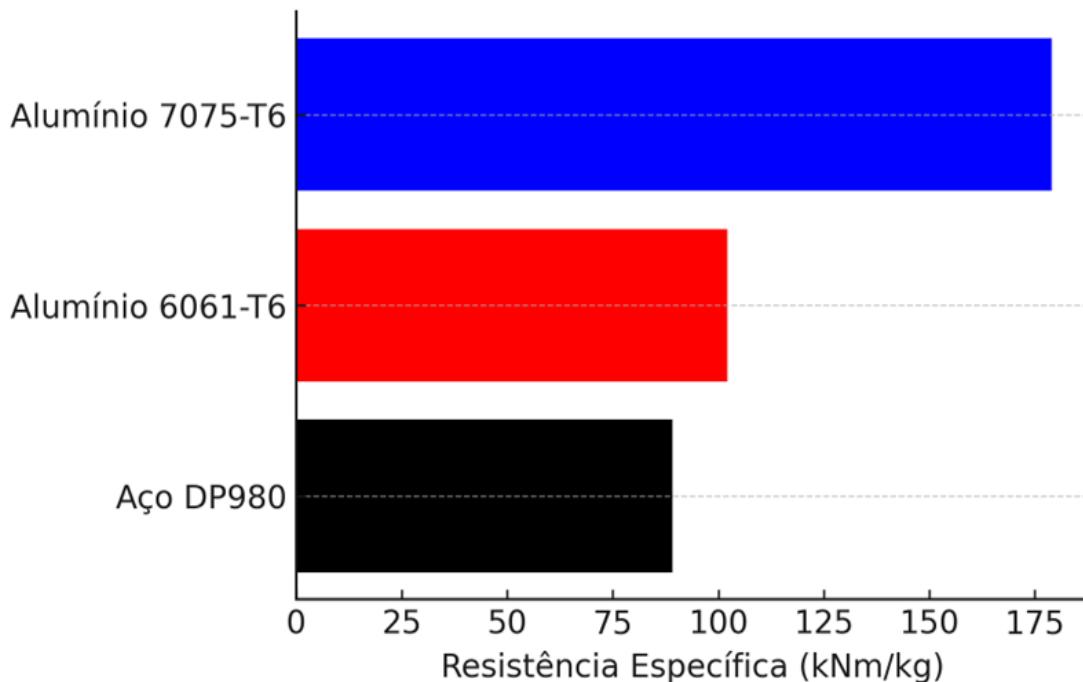


Figura 2 – Comparaçāo de resistēcia especfica.

4.3 - Discussāo Detalhada por Material e Aplicaāo

Aço DP980: A combinação de altíssima resistēcia e tenacidade (grande área sob a curva) faz dele o material ideal para a "célula de sobrevivēcia" de um automóvel. É aplicado em colunas A e B, reforços de teto e soleira, e travessas de para-choque, onde sua função é resistir à deformação em um impacto e proteger os ocupantes.

Sua rigidez superior também contribui para uma melhor dinâmica veicular e redução de ruídos e vibrações (NVH).

Alumínio 6061-T6: Sua boa ductilidade (maior alongamento) e formabilidade permitem a criação de componentes complexos via extrusão, como longarinas de chassis e berços de baterias para veículos elétricos. Nestes, o alumínio oferece não apenas leveza, mas também excelente condutividade térmica para ajudar na gestão de calor das células da bateria, e uma natural resistēcia à corrosão.

Alumínio 7075-T6: Seu uso é justificado onde a falha não é uma opção. Na estrutura superior de uma asa, por exemplo, o material está sob compressão durante o voo.

A altíssima resistēcia específica do 7075-T6 permite projetar componentes que suportam essas cargas com a menor massa possível, maximizando a eficiêcia da aeronave. Sua menor ductilidade e tenacidade em comparação com outras ligas é um compromisso de projeto aceito em troca de sua performance em resistēcia.

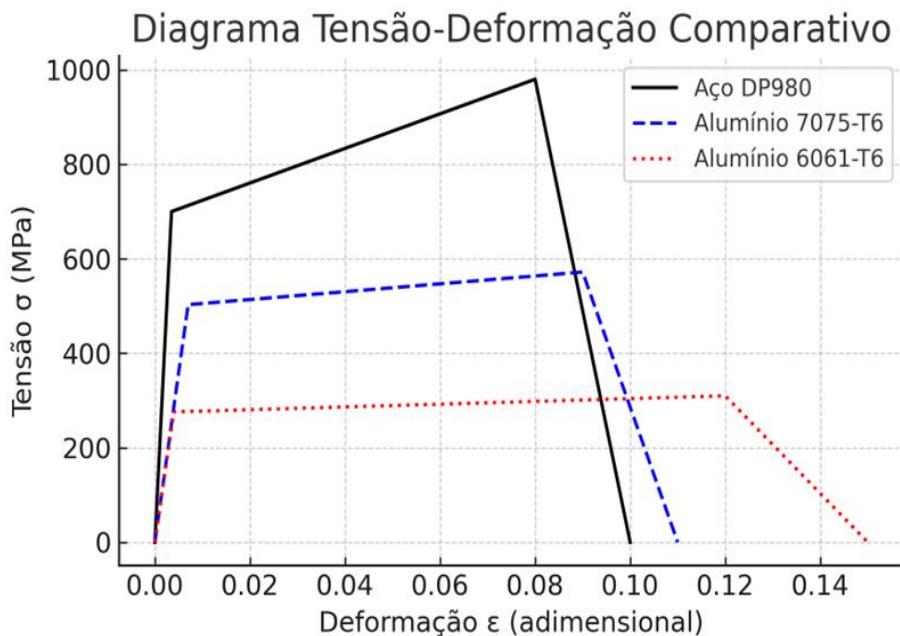


Figura 3 – Diagrama tensão-deformação comparativo.

4.4 - Implicações de Manufatura, União e Custo

A seleção de um material transcende suas propriedades mecânicas, envolvendo todo o ecossistema produtivo.

Conformação: O aço DP980, apesar de sua alta resistência, é projetado para ser estampado, processo de altíssima cadênci da indústria automotiva. Contudo, exige prensas de maior tonelagem e ferramentas mais robustas, além de um controle cuidadoso do efeito "springback" (retorno elástico). O alumínio 6061-T6 é excelente para extrusão, criando perfis complexos, mas é mais desafiador de estampar a frio. O 7075-T6 é frequentemente usinado a partir de blocos sólidos para componentes aeroespaciais, um processo de alto custo e baixo volume.

União: Aços são tradicionalmente unidos por solda a ponto (Resistance Spot Welding - RSW), uma tecnologia madura e de baixo custo. A soldagem de AHSS como o DP980, no entanto, requer parâmetros de controle mais rígidos para evitar a fragilização da Zona Afetada pelo Calor (ZAC). A soldagem de ligas de alumínio é mais complexa devido à sua alta condutividade térmica e à presença de uma camada de óxido refratária. Por isso, na indústria aeronáutica, a união é predominantemente mecânica (rebitagem), e na automotiva, combina-se rebitagem, adesivos estruturais e técnicas de solda especiais (laser, MIG).

Custo: O custo da matéria-prima por quilograma segue uma escala clara: Aço DP980 (base), Alumínio 6061-T6 (3 a 5 vezes mais caro) e Alumínio 7075-T6 (8 a 12 vezes mais caro). Ao considerar

os custos de processo (ferramental, energia, tecnologias de união), a diferença no custo do componente final pode ser ainda maior. Para ilustrar a diferença na proporção dos custos, foi criado o gráfico 4, que mostra larga vantagem do Aço DP980 (focado no contexto brasileiro).

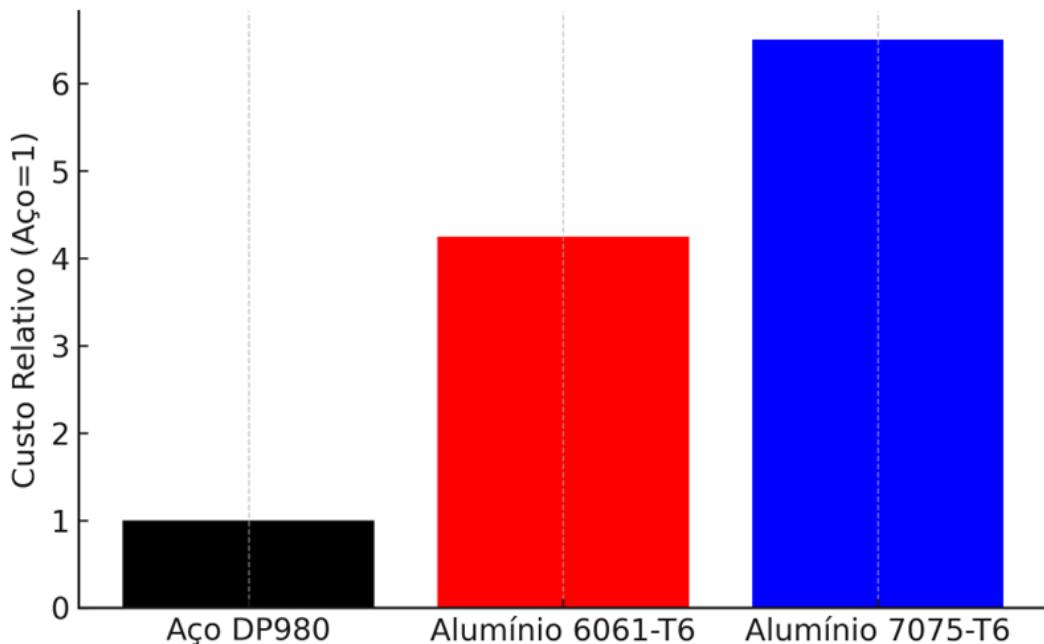


Figura 4 – Comparação de custo relativo (Brasil, 2025).

4.5 - Perspectivas de Sustentabilidade e Ciclo de Vida

A análise moderna de materiais não pode ignorar o impacto ambiental.

Produção Primária: A produção de alumínio primário a partir da bauxita é um processo extremamente intensivo em energia elétrica, com uma pegada de carbono significativamente maior que a do aço produzido via alto-forno ou aciaria elétrica.

Reciclagem: Neste ponto, o alumínio leva uma grande vantagem. A reciclagem do alumínio consome apenas cerca de 5% da energia necessária para a produção primária, tornando-o um material com excelente circularidade. O aço também é amplamente reciclado, mas a economia de energia é menos dramática.

Fase de Uso: É aqui que o benefício do alumínio se manifesta. A redução de massa em veículos e aeronaves leva a uma menor queima de combustível (fóssil ou eletricidade) ao longo de toda a vida útil do produto. Um estudo de ciclo de vida completo (LCA - Life Cycle Assessment) é necessário para determinar qual material é mais vantajoso, pesando o maior impacto na produção do alumínio contra o menor impacto na fase de uso.

5 - Conclusões

A análise integrada das propriedades mecânicas, específicas, de manufatura e sustentabilidade permite concluir de forma inequívoca que não existe um material universalmente superior. A seleção é um exercício de engenharia que depende intrinsecamente do balanço de requisitos técnicos e econômicos da aplicação final.

O Aço DP980 consolida-se como a solução dominante para a indústria automotiva de produção em massa. Sua combinação imbatível de alta resistência, tenacidade, rigidez e baixo custo de matéria-prima e processamento garante a construção de veículos seguros e acessíveis. Seus desafios residem no gerenciamento de peso e nos processos de conformação e união, que, embora maduros, exigem maior controle.

O Alumínio 6061-T6 se posiciona como uma alternativa estratégica e crescente, especialmente em nichos de mercado onde o custo adicional pode ser justificado pelo benefício em desempenho. Em veículos elétricos, sua leveza aumenta a autonomia, e em veículos de luxo e esportivos, melhora a dinâmica. Sua versatilidade de processos (extrusão, usinagem) abre novas possibilidades de design estrutural.

O Alumínio 7075-T6 permanece insubstituível como material de escolha para estruturas aeronáuticas primárias. Sua excepcional resistência específica permite projetar aeronaves mais leves e eficientes, um fator que se sobrepõe economicamente ao seu altíssimo custo de aquisição e processamento. Ele representa o pináculo do desempenho para ligas metálicas leves, onde a segurança e a eficiência operacional são absolutas.

Portanto, a escolha final recai sobre uma complexa matriz de decisão. Para trabalhos futuros, sugere-se aprofundar a análise incluindo materiais compósitos avançados, como polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP), que representam a próxima fronteira na busca pela máxima eficiência estrutural.

6 – Referências Bibliográficas

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Anuário Estatístico 2023-2024. São Paulo: ABAL, 2024.

ASHBY, Michael F. Seleção de Materiais no Projeto Mecânico. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

HIBBELER, R. C. Resistência dos Materiais. 10. ed. São Paulo: Pearson, 2019.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Anuário da Siderurgia Brasileira 2023. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2023.

MILLER, W. S. et al. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering A*, v. 280, p. 37-49, 2000.

ASM INTERNATIONAL. Properties and Selection of Metals. Materials Park: ASM Handbook, 2019.

ISO 6892-1: Metallic materials – Tensile testing. International Organization for Standardization, 2019.

ASTM E8: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International, 2020.

ABNT NBR 8800: Projeto de Estruturas de Aço. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

DOWLING, N. E. Mechanical Behavior of Materials. New York: Pearson, 2018.

DIETER, G. E. Mechanical Metallurgy. New York: McGraw-Hill, 1988.

SMITH, W. F. Foundations of Materials Science and Engineering. New York: McGraw-Hill, 2011.