

Normas y Criterios de Selección de Materiales en la Industria Aeroespacial

Alan Gonzalez Montes de Oca
e-mail: al20760015@ite.edu.mx

Standards and Criteria for Material Selection in the Aerospace Industry

RESUMEN: *La selección de materiales en la industria aeroespacial es un proceso fundamental que impacta directamente en la seguridad, eficiencia y rendimiento de las aeronaves. El artículo examina las diversas normas y criterios que guían este proceso, destacando la importancia de seguir regulaciones estrictas, los principios, criterios técnicos para la selección de materiales, así como su impacto ambiental y sostenibilidad.*

PALABRAS CLAVE: *Aeroespacial, impacto, materiales, normas, residuos, sostenibilidad*

ABSTRACT. *The selection of materials in the aerospace industry is a fundamental process that directly impacts the safety, efficiency, and performance of aircraft. The article examines the various standards and criteria that guide this process, highlighting the importance of following strict regulations, principles, technical criteria for the selection of materials, as well as their environmental impact and sustainability.*

Keywords. *Aerospace, impact, materials, standards, sustainability, waste,*

1 INTRODUCCIÓN

La selección de materiales en la industria aeroespacial implica un proceso complejo y riguroso que tiene en cuenta una variedad de factores técnicos y normativos. La necesidad de materiales que ofrezcan una combinación óptima de peso, resistencia, durabilidad y comportamiento frente a temperaturas extremas es crucial. Además, la seguridad y el cumplimiento de normativas internacionales estrictas son primordiales. También la eficiencia, seguridad y rendimiento de las aeronaves y naves espaciales dependen en gran medida de los materiales utilizados. Este artículo explora las principales normas que rigen la selección de materiales en la industria aeroespacial, los criterios técnicos clave, los desafíos que enfrenta la industria y las innovaciones recientes.

2 Principio de la selección de materiales

Uno de los objetivos del diseño de estructuras aeroespaciales es minimizar su tamaño y peso. En el pasado, la atención se centraba en la resistencia estática de los componentes, descuidando a menudo o prestando una atención limitada a su tenacidad plástica. Ej. [1]

La industria aeroespacial utiliza una variedad de materiales clave para el desarrollo de sus productos, entre ellos se destacan las aleaciones de Titanio (Ti), Magnesio (Mg), Aluminio (Al), Cobre (Cu), Acero inoxidable y Níquel (Ni). Estos materiales son fundamentales para la fabricación de componentes que requieren resistencia, ligereza y durabilidad en las condiciones extremas del espacio y la atmósfera terrestre. Ej. [1]

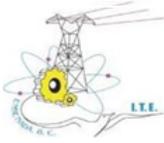
En las distintas zonas de carga se aplican criterios de resistencia y los materiales se eligen en función de los requisitos específicos de cada componente. Para las zonas de carga elevada, se utilizan criterios de resistencia y se seleccionan materiales de alta resistencia. En las zonas de carga media, se aplican criterios de rigidez y se eligen materiales con módulos elásticos elevados. En las zonas de baja carga, la estabilidad dimensional es la consideración primordial para garantizar que los componentes sean mayores que el tamaño crítico mínimo.



Figura 1. Estructura de un lanzador espacial

Fuente: <https://www.ikonet.com>

En el diseño de aviones y otros dispositivos altamente detallados no hay absolutamente ningún margen de error, por lo que los metales utilizados en el sector aeroespacial deben funcionar de forma excepcional en todo momento. Algunas de las propiedades específicas que necesitan los materiales utilizados en la industria aeroespacial son una gran solidez y resistencia al calor, así como una larga vida útil y resistencia a la fatiga y el desgaste.



3 Materiales utilizados en la industria Aeroespacial

Dentro de los principales materiales utilizados en la industria Aeroespacial se encuentra el aluminio por su bajo peso y alta resistencia. Después se encuentran aleaciones de Níquel que son famosas por su gran resistencia a la corrosión, la oxidación y el calor, también el titanio gracias a su resistencia al calor y a continuación en la siguiente tabla se muestra los diferentes aceros:

Designation	Commercial Names	Typical Composition	Typical Aerospace Applications
Ultra high Strength Steels			
	4340	Fe-0.35C-0.7Mn-0.3Si-0.8Cr-1.8Ni-0.25Mo-	Landing gear, fasteners
	300M	Fe-0.43C-0.8Mn-1.6Si-0.8Cr-1.8Ni-0.4Mo-0.05V	Fasteners, landing gear, airframe parts
	D6-AC	Fe-0.45C-0.75Mn-0.25Si-1.1Cr-0.6Ni-1.0Mo-0.08V	Motor cases for solid fuel rockets
High Fracture Toughness Steels			
	HP 9-4-30	Fe-0.30C-0.25Mn-0.2Si-1.0Cr-7.5Ni-1.0Mo-0.1V-4.5Co	Aircraft structural components
	AF1410	Fe-0.15C-0.1Mn-0.1Si-2.0Cr-10Ni-1.0Mo-14Co	Aircraft structural components
Maraging Steels			
	18Ni (250)	Fe-18Ni-5Mo-8.5Co-0.4Ti-0.1Al	Aircraft structural parts, shafts, missile cases
Corrosion Resistant Steels			
Austenitic Stainless Steels			
	301,302	Fe-18Cr-8Ni	General purpose corrosion and heat resistant steel
	304, 304L	Fe-LowC-19Cr-10Ni	General purpose corrosion resistant – better than 301
	316, 317	Fe-18Cr-13Ni-Mo	Tubing in propulsion systems
	321	Fe-18Cr-10Ni-Ti	Aircraft structural tubing
	347, 348	Fe-18Cr-10Ni-Nb	Aircraft structural tubing
	21-6-9	Fe-LowC-20Cr-6.5Ni-9Mn-0.28N	Aircraft hydraulic line tubing
Martensitic Stainless Steels			
	403, 410, 416	Fe-LowC-12Cr	Engine parts
	440A, B, C and F	Fe-HighC-17Cr-0.5Mo	Cryogenic bearings
Precipitation Hardening Stainless Steels			
	17-4PH	Fe-17Cr-4Ni4Cu	Structural parts requiring corrosion resistance
	17-7PH	Fe-17Cr-7Ni-1Al	Structural parts requiring corrosion resistance
	15-5PH	Fe-15Cr-4.5Ni-0.3Cb-3.5Cu	Structural parts requiring corrosion resistance
	Custom 455	Fe-LowC-12Cr-8Ni-2Co-1Ti+Cb	Structural parts requiring corrosion resistance
Nickel Chromium Steels			
	A-286	Fe-25Ni-15Cr-2Ti-1.5Mn-1.3Mo-0.3V	Propulsion systems
	JBK-75	Fe-30Ni-15Cr-2Ti-0.1Mn-1.3Mo-0.3V-0.3Al	Propulsion systems
	Incoloy	Fe-34Ni-20Cr	Hot sections of engines

Tabla 1. Aceros aeroespaciales comunes.
Fuente: <https://ntrs.nasa.gov>

4 Criterios Técnicos para la Selección de Materiales

Uno de los criterios más críticos en la selección de materiales para aplicaciones aeroespaciales es la relación entre peso y resistencia. Los materiales deben ser lo suficientemente ligeros para mejorar la eficiencia del combustible y el rendimiento de vuelo, pero también deben ofrecer una alta resistencia para soportar las cargas mecánicas y dinámicas durante la operación. Como lo son las aleaciones de aluminio que ofrecen una excelente relación peso-resistencia y son ampliamente utilizadas en estructuras de fuselaje. También los compuestos de fibra de carbono que son utilizados en componentes críticos como alas y fuselajes gracias a que combinan baja densidad con alta resistencia y rigidez.

Durabilidad y fatiga

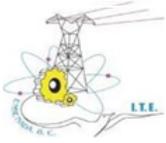
La durabilidad y la resistencia a la fatiga son esenciales para asegurar la longevidad de los componentes aeroespaciales. Los materiales deben poder resistir cargas cíclicas y dinámicas repetidas sin fallar. Entre estos se encuentra el acero inoxidable que ofrece alta resistencia a la fatiga y es utilizado en componentes sometidos a cargas repetitivas. También se encuentra el compuesto de fibra de vidrio que es utilizado en estructuras secundarias ofreciendo buena resistencia a la fatiga y la corrosión. Ej. [2]

Comportamiento frente a la corrosión

La resistencia a la corrosión es crucial, especialmente para componentes expuestos a ambientes agresivos, como la exposición a la humedad y productos químicos Ej. [2]. Algunos ejemplos de estos pueden ser las aleaciones de aluminio-litio que ofrecen excelente resistencia a la corrosión y son utilizadas en estructuras de fuselajes y el recubrimiento protector que es aplicado a metales para mejorar su resistencia a la corrosión y extender la vida útil de los componentes.



Figura 2. Entrada a la tierra del transbordador espacial de SpaceX en su tercera prueba de vuelo, teniendo una visión de las fuertes temperaturas que se tienen que enfrentar los materiales con los que están contruidos estas naves. Fuente: www.x.com/spacex



5 Impacto Ambiental y Sostenibilidad

La industria aeroespacial está en constante búsqueda de soluciones sostenibles para reducir su impacto ambiental. A medida que avanzamos hacia un futuro más consciente del medio ambiente, se han desarrollado innovaciones y estrategias para mejorar la sostenibilidad en esta industria.

Los lanzamientos de cohetes generan una cantidad significativa de carbono y otros gases de efecto invernadero. Aunque esta cantidad es pequeña en comparación con las emisiones industriales globales es importante tomarlo en cuenta. [3]

Además, los incidentes durante el despegue, como la dispersión de escombros de hormigón y metal en áreas cercanas, generan preocupaciones sobre el impacto ambiental. Estos incidentes resaltan la necesidad de evaluar más a fondo las medidas de seguridad y las regulaciones vigentes para prevenir daños en áreas protegidas

SpaceX, la compañía fundada por el CEO de Tesla Inc., Elon Musk, ha estado en el centro de atención debido a su innovación en la industria espacial. Sin embargo, como cualquier empresa que opera en un ámbito tecnológico y científico, también enfrenta desafíos relacionados con el impacto ambiental y la sostenibilidad.

SpaceX ha sido pionera en la reutilización de cohetes. Al diseñar cohetes reutilizables, se reduce la necesidad de fabricar nuevos componentes metálicos en cada lanzamiento. [4]

La reutilización no solo reduce los recursos necesarios, sino que también contribuye a la sostenibilidad al minimizar la cantidad de desechos generados.

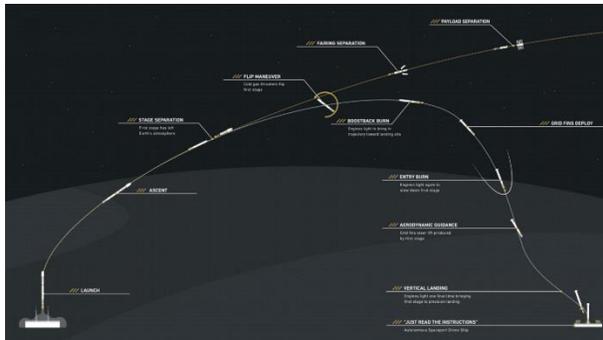


Figura 3. Secuencia de vuelo de la nave Falcón 9 de la compañía SpaceX que transporta satélites a la órbita del planeta tierra.
Fuente: www.spacex.com

En la figura anterior se puede visualizar perfectamente como es que la parte inferior de la nave Falcón 9 tiene otra instrucción de vuelo que es el aterrizaje donde en determinada altura se despega de la base para maniobrar su aterrizaje y caer de nuevo en el punto de extracción donde será vuelto a utilizar por la misma compañía para realizar otro despegue más.

6 Innovaciones en materiales aeroespaciales

Combustibles sintéticos

Los combustibles sintéticos, obtenidos a través de procesos químicos utilizando energía renovable, también han despertado interés en la industria aeroespacial. Estos combustibles pueden ser producidos a partir de dióxido de carbono capturado y renovable, lo que los convierte en una opción atractiva para reducir las emisiones netas de carbono. Según un estudio realizado por Brown y Smith (2020), los combustibles sintéticos podrían reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 70% en comparación con los combustibles fósiles. Ej. [5]



Figura 4. Primer combustible sintético neutro en carbono. *Fuente: www.xataka.com*

Avances en fabricación aditiva

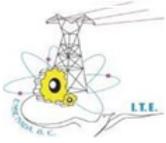
También conocida como impresión 3D, está revolucionando la forma en que se fabrican los componentes aeroespaciales. Esta tecnología permite una flexibilidad de diseño sin precedentes y puede reducir los costos y los plazos de fabricación. En el futuro, es probable que se vea una mayor adopción de la fabricación aditiva en la industria aeroespacial, así como avances en las técnicas de impresión 3D para metales y compuestos.



Figura 5. Primer cohete espacial impreso con tecnología 3D de relativity space "Terran 1"
Fuente: www.3dmarket.com.mx

Inteligencia artificial y aprendizaje automático

Las IA y el aprendizaje automático desempeñarán un papel cada vez más importante en la industria metalmeccánica y se podrán utilizar para optimizar la producción, mejorar la calidad del producto y acelerar el desarrollo de nuevos materiales y aleaciones. Además, el aprendizaje automático también puede ayudar a predecir y prevenir las fallas de los componentes aeroespaciales, mejorando así la seguridad y la confianza. Ej. [6]



7 Normas Internacionales para Materiales aeroespaciales

7.1 Norma AS9100

Es un sistema de control de calidad basado en la norma ISO 9001 y centrado en la calidad aeroespacial. Ya sea para distribuidores, organizaciones de mantenimiento o fabricantes, la certificación AS9100 respalda la seguridad, la confiabilidad y el cumplimiento de la normativa de sus productos.

Esta norma estandariza los requisitos de los sistemas de gestión de calidad para organizaciones relacionadas con la industria aeroespacial y la cadena de suministro. La norma se basa en la ISO 9001, añadiendo requisitos y directrices específicos para el desarrollo, producción y distribución seguro de piezas y productos aeroespaciales.

Aplica para:

- Diseñadores de piezas aeroespaciales
- Organizaciones de gestión de calidad que trabajen con fabricantes de la industria aeroespacial



Figura 6. Logo de la norma AS9100
Fuente: www.ursmexico.com

7.2 AMS 5662

Esta norma especifica los requisitos para las superaleaciones de níquel-cromo-hierro, particularmente aquellas usadas en componentes de motores a reacción.

La AMS 5662 especifica las propiedades y requisitos técnicos para las barras, alambres, forjas, y anillos de la aleación de níquel-cromo-hierro Inconel 718. El objetivo de esta norma es asegurar que los materiales producidos bajo esta especificación cumplan con los estándares necesarios para aplicaciones críticas en la industria aeroespacial y otros sectores donde se requieren materiales de alta resistencia y durabilidad

Los productos fabricados bajo la norma AMS 5662 deben estar claramente marcados con la identificación de la aleación, el tratamiento térmico aplicado, y el número de lote para asegurar la trazabilidad completa desde la producción hasta el uso final. Ej. [7]



Figura 7. Grabado de los componentes fabricados bajo la norma AMS 5662
Fuente: <https://www.sd-metals.com>

7.3 Norma SAE AMS 5659

La norma SAE AMS 5659 es una especificación desarrollada por SAE International que define los requisitos para las barras y el alambón de acero inoxidable martensítico. Esta norma es crucial para aplicaciones en la industria aeroespacial debido a las propiedades únicas de este tipo de acero, que combina alta resistencia mecánica con buena resistencia a la corrosión y capacidad de endurecimiento por tratamiento térmico.

La AMS 5659 establece los requisitos para la composición química, las propiedades mecánicas, los tratamientos térmicos, y las pruebas de calidad necesarias para asegurar que las barras y el alambón de acero inoxidable martensítico cumplan con los estándares necesarios para aplicaciones críticas. Estos productos se utilizan en componentes estructurales y mecánicos que deben soportar condiciones extremas de tensión y temperatura. Ej. [7]

Pruebas de Tensión: Se realizan para verificar que el material cumpla con los requisitos de resistencia a la tracción y límite elástico.

7.4 AMS 4911

La norma AMS 4911 es una especificación de SAE International que define los requisitos para las láminas, placas y tiras de la aleación de titanio Ti-6Al-4V. Esta aleación es una de las más utilizadas en la industria aeroespacial debido a su combinación de alta resistencia, baja densidad, y excelente resistencia a la corrosión.

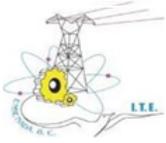
La AMS 4911 establece las propiedades químicas, mecánicas, y los requisitos de calidad para las láminas, placas y tiras de la aleación de titanio Ti-6Al-4V. Esta norma asegura que los materiales fabricados cumplan con los estándares estrictos necesarios para aplicaciones aeroespaciales y otras aplicaciones industriales críticas.

La norma especifica las tolerancias permitidas para las dimensiones de las láminas, placas y tiras, garantizando que los productos finales cumplan con las especificaciones precisas requeridas para su aplicación.

Esto garantiza la seguridad, fiabilidad y rendimiento de los componentes en la industria aeroespacial, contribuyendo al éxito y sostenibilidad de las operaciones aeroespaciales y otras aplicaciones de alta ingeniería.



Figura 8. Logo de la norma para las especificaciones de los materiales aeroespaciales que se utilizan en esta industria.
Fuente: <https://www.onlinemetals.com>



8 Conclusión

En conclusión, el enfoque en materiales avanzados, como las aleaciones de titanio y las superaleaciones de níquel, ha sido crucial para soportar las extremas condiciones del espacio mientras se mantiene la eficiencia. También la utilización de estos materiales, junto con innovaciones en compuestos y procesos de fabricación aditiva (impresión 3D), permite la creación de componentes más ligeros y fuertes. La impresión 3D, en particular, permite la fabricación precisa de piezas con menos desperdicio de material, optimizando así el uso de recursos y reduciendo la huella de carbono asociada a la producción.

Además, la industria espacial en general está adoptando prácticas más sostenibles. Esto incluye el desarrollo de propulsores más limpios, como los basados en metano, que producen menos residuos contaminantes comparados con los combustibles tradicionales. Las iniciativas de sostenibilidad también se extienden a la gestión de satélites, donde se están implementando tecnologías para reducir la generación de desechos orbitales, como la desorbitación controlada de satélites al final de su vida útil.

Considero que la innovación de las demás agencias espaciales viene de la empresa líder SpaceX que ha impulsado un enfoque renovado hacia el uso de materiales que no solo mejoran el rendimiento, sino que también minimizan el impacto ambiental. Con su filosofía de reutilización y desarrollo de cohetes más eficientes, ha marcado un hito en la sostenibilidad espacial. Los cohetes Falcon 9 y Starship, diseñados para ser reutilizables, representan un avance significativo en la reducción de residuos espaciales y el consumo de recursos. Esta reutilización no solo disminuye la cantidad de desechos generados por cada lanzamiento, sino que también reduce la demanda de materiales nuevos, lo que lleva a una menor explotación de recursos naturales.

Para finalizar la innovación en materiales y procesos de fabricación en la industria espacial están a la vanguardia, desde empresas como SpaceX, Agencia Espacial Australiana (ASA), Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), la Administración Nacional del Espacio de China (CNSA), entre otras.

9 Referencias

- [1] Shane, «MachineMFG,» 20 Agosto 2023. [En línea]. *globally Available*:<https://www.machinemfg.com/es/aerospace-materials/>. [Último acceso: 28 mayo 2024]
- [2] A. r. Prieto, «ResearchGate,» septiembre 2017. [En línea]. Available:https://www.researchgate.net/publication/319651376_Criterios_tecnicos_de_seleccion_de_materiales_en_la_fabricacion_de_recipientes_especiales_destinados_a_aplicaciones_de_alta_exigencia. [Último acceso: 28 Mayo 2024].
- [3] OpenmindBBVA, «OpenMindBBVA,» 17 Enero 2023. [En línea]. Available:<https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/investigacion/vuelos-espaciales-amenaza-clima-capaz-ozono/>[Último acceso: 28 Mayo 2024].
- [4] AXESS networks, «AXESS networks,» 04 Julio 2017. [En línea]. Available: <https://axessnet.com/spacex-reutiliza-partes-cohetes/> [Último acceso: 28 mayo 2024].
- [5] J. Londoño, «Medium,» 24 mayo 2023. [En línea]. Available: <https://medium.com/@jelondonoj/combustibles-avanzados-en-la-aeronautica-innovaciones-hacia-una-industria-mas-sostenible-ccaaff4c429>. [Último acceso: 28 mayo 2024].
- [6] *Metalmecánica*, «Metalmecánica,» 28 Julio 2023. [En línea]. Available:<https://www.metalmecanica.com/es/noticias/industria-aeroespacial-desafios-y-soluciones-innovadoras>. [Último acceso: 28 mayo 2024].
- [7] <https://www.sae.org/standards/content/ams5659/>. [Último acceso: 28 mayo 2024].

Adaptado por:

Alan Gonzalez Montes de Oca, para el desarrollo de artículos académicos y científicos del Instituto Tecnológico de Ensenada, a partir de otros formatos y guía de presentación de artículos.