



Control de la Corrosión en la Industria Aeroespacial

NACE Colombia

Septiembre 22, 2020

Luz Marina Calle, Ph.D.

Kennedy Space Center, FL, 32899, USA



- Planes actuales de la NASA para la exploración espacial.
- La NASA ha enfrentado la corrosión desde el inicio del programa espacial en 1962.
- La NASA lleva a cabo sus operaciones de lanzamiento y exploración espacial en ambientes que son únicos con relación a la corrosión.
- La NASA lanza desde uno de los ambientes naturales de mayor corrosión en Norte América. Las condiciones naturales de corrosión en las plataformas de lanzamiento son agravadas por los productos de escape de los cohetes propulsores de combustible sólido (SRBs).
- Las naves espaciales están sometidas a ambientes muy variados con relación a la corrosión:
 - Orbitas alrededor de la tierra
 - Areas interiores con ambiente purificado y humedad controlada
 - Areas interiores con ambiente no controlado
 - Plataformas de lanzamiento (cerca del océano)
 - Ambientes en otros planetas
- La NASA considera el desarrollo de tecnologías de control de la corrosión como una de las áreas necesarias para reducir el costo y mejorar la sostenibilidad y la eficiencia de sus misiones de exploración.
- La historia de control de la corrosión en la NASA es una ilustración del control de la corrosión en la industria aeroespacial.

Planes Actuales de la NASA para la Exploración Espacial



HUMANITY'S RETURN
TO THE MOON

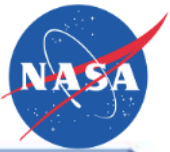
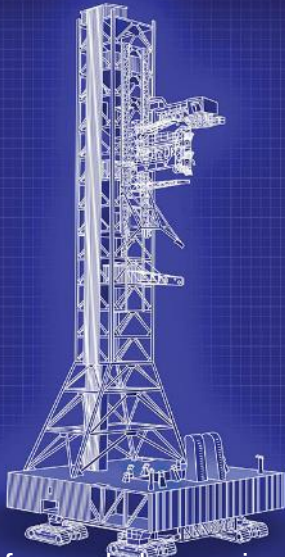
<https://www.youtube.com/watch?v=vl6jn-DdafM>

Planes Actuales de la NASA para la Exploración Espacial



- **Artemisa es el programa de la NASA con la meta de llevar la primera mujer y el próximo hombre al polo sur de la Luna en el 2024. Artemisa es la hermana gemela de Apolo y la diosa de la Luna en la mitología griega.**
- **El Sistema de Lanzamiento Espacial (SLS), el módulo de tripulación Orión, el módulo de aterrizaje lunar, y la estación Portal (Gateway) permitirán extender la exploración humana más allá de la Luna.**
- **La NASA está desarrollando las tecnologías, construyendo el hardware y los equipos de operaciones de ingeniería que pondrán en marcha el vehículo que un día llevará una nave tripulada a Marte.**

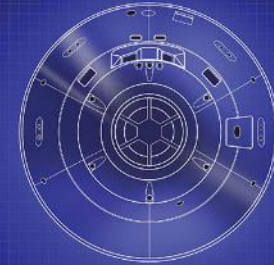
Programa Artemisa



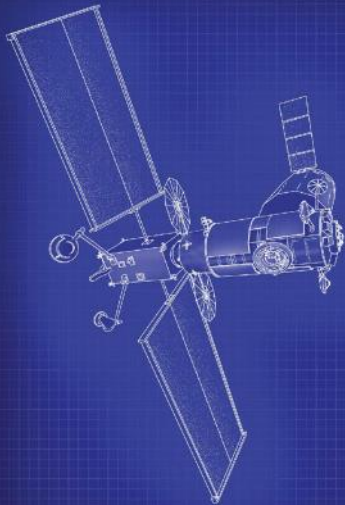
Plataforma de lanzamiento



SLS



Orión



Portal (Gateway)



Modulo de Aterrizaje

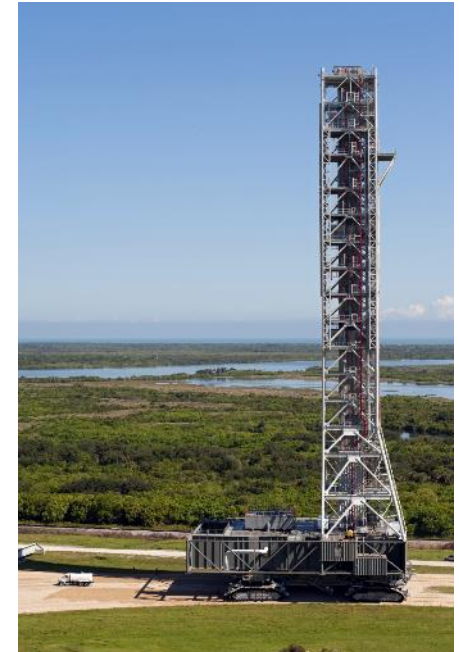


Trajes Espaciales

Plataforma de Lanzamiento

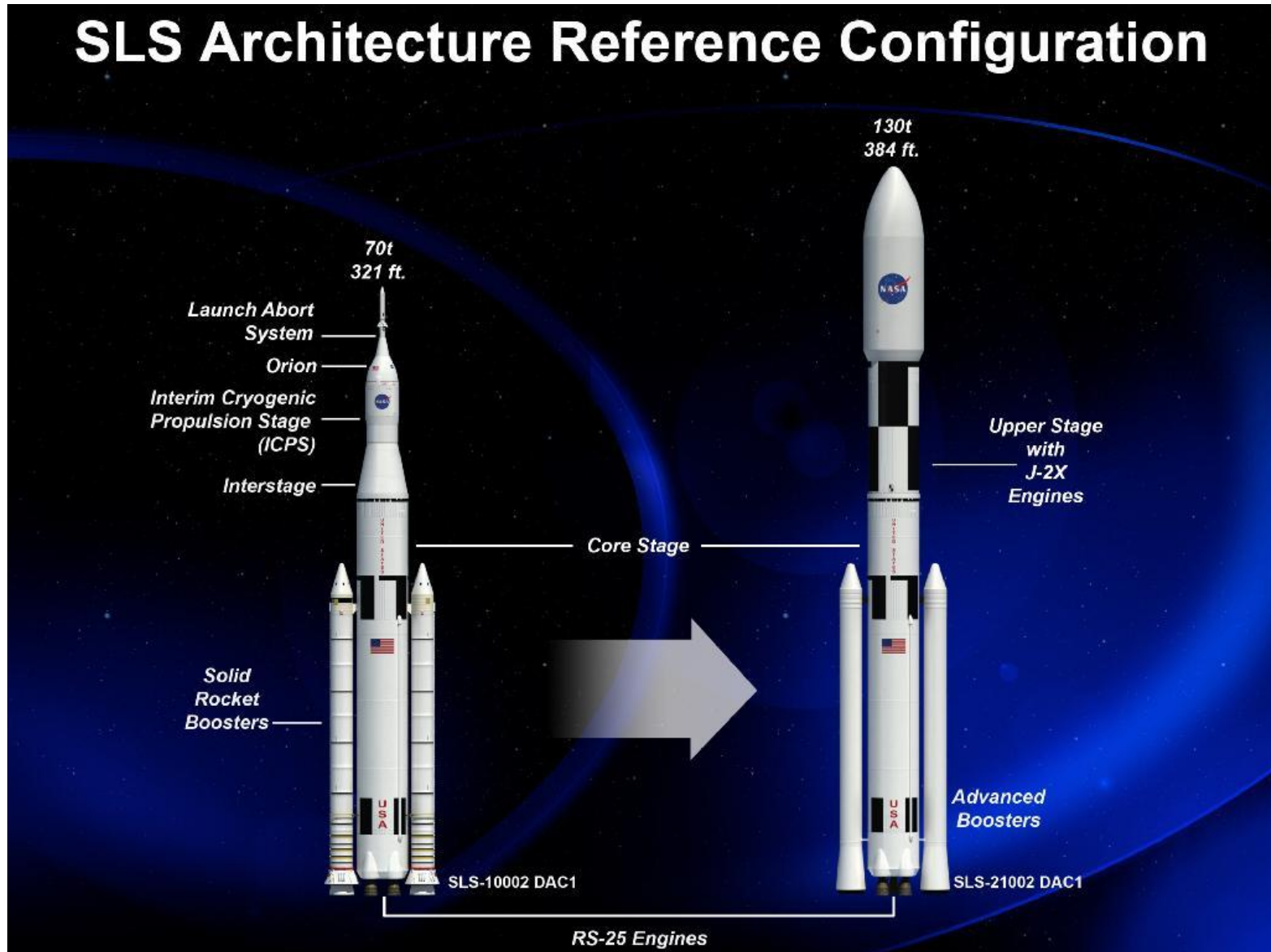


Plataforma de lanzamiento (39B)
del Transbordador Espacial

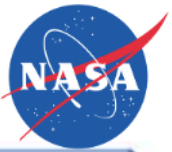
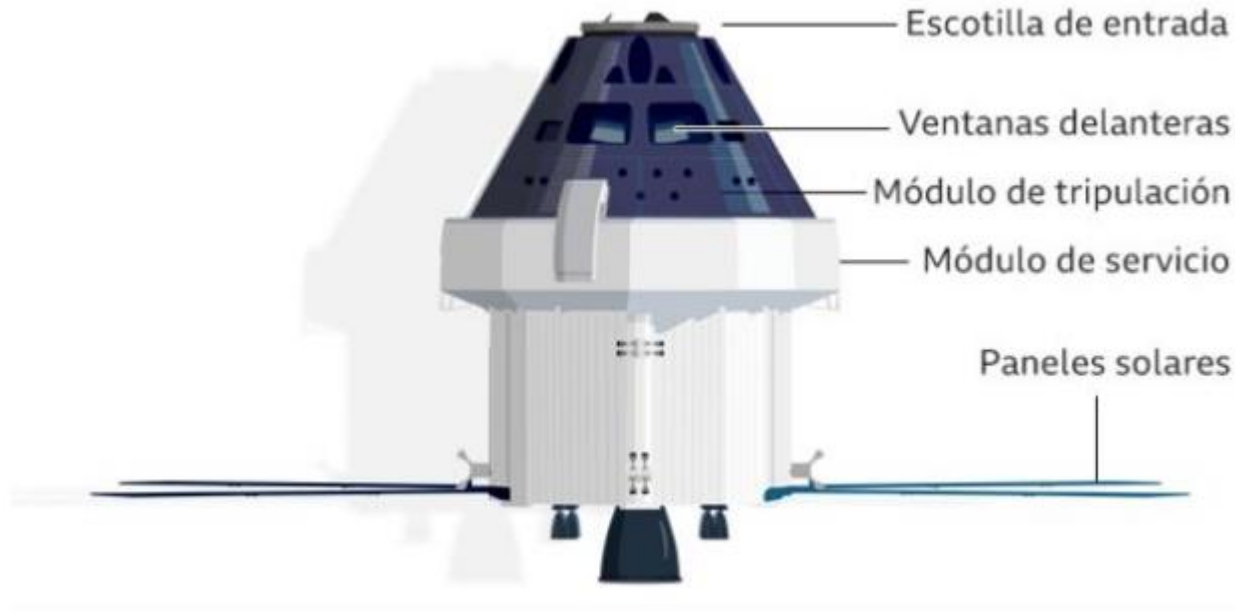


Plataforma de lanzamiento 39B lista para el SLS

SLS Architecture Reference Configuration



Módulo de Tripulación Orión

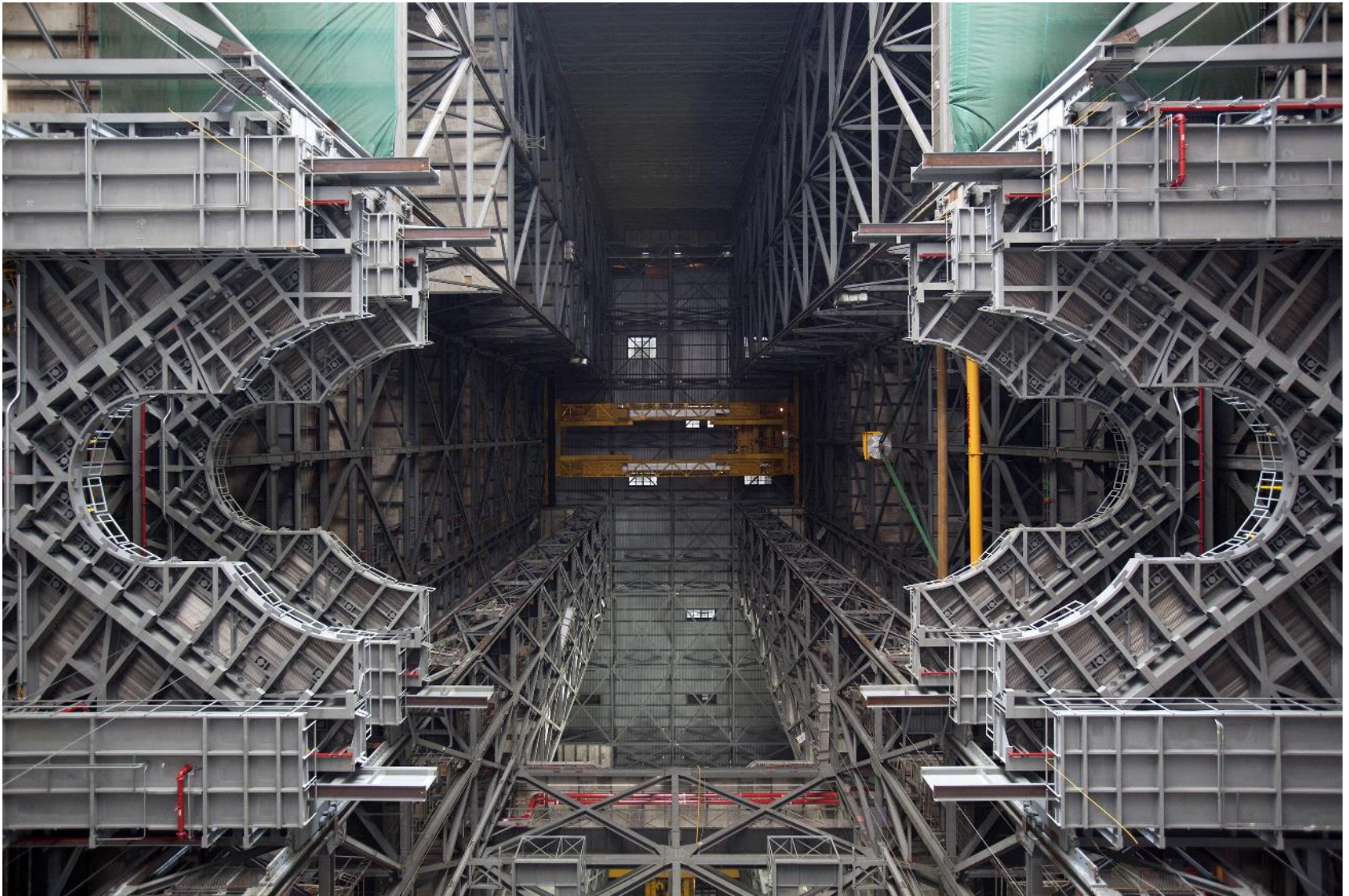


La combinación del módulo de tripulación Orión/SLS es crítica para extender la presencia humana más allá de la órbita baja terrestre

Edificio de Ensamblaje de Vehículos



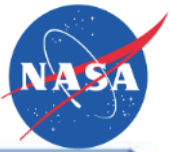
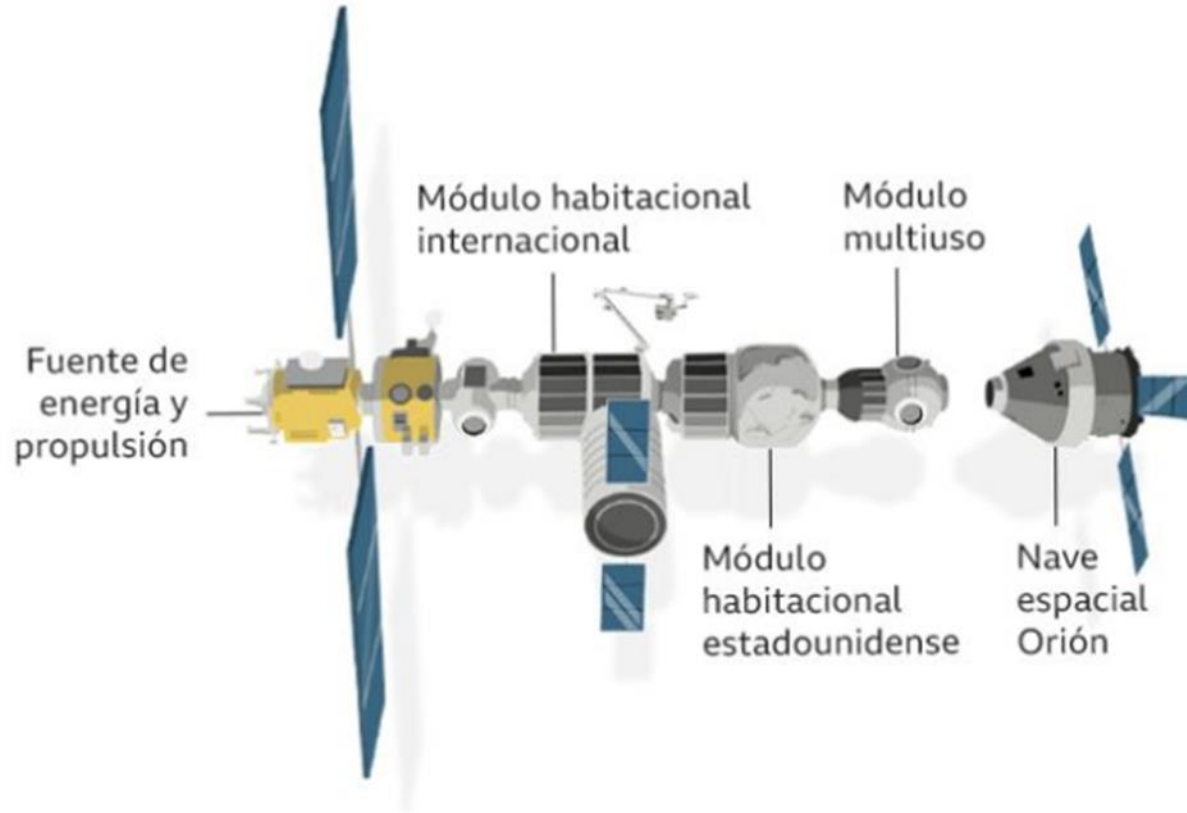
Edificio de Ensamblaje de Vehículos (interior)



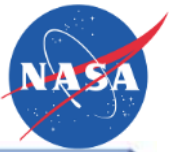
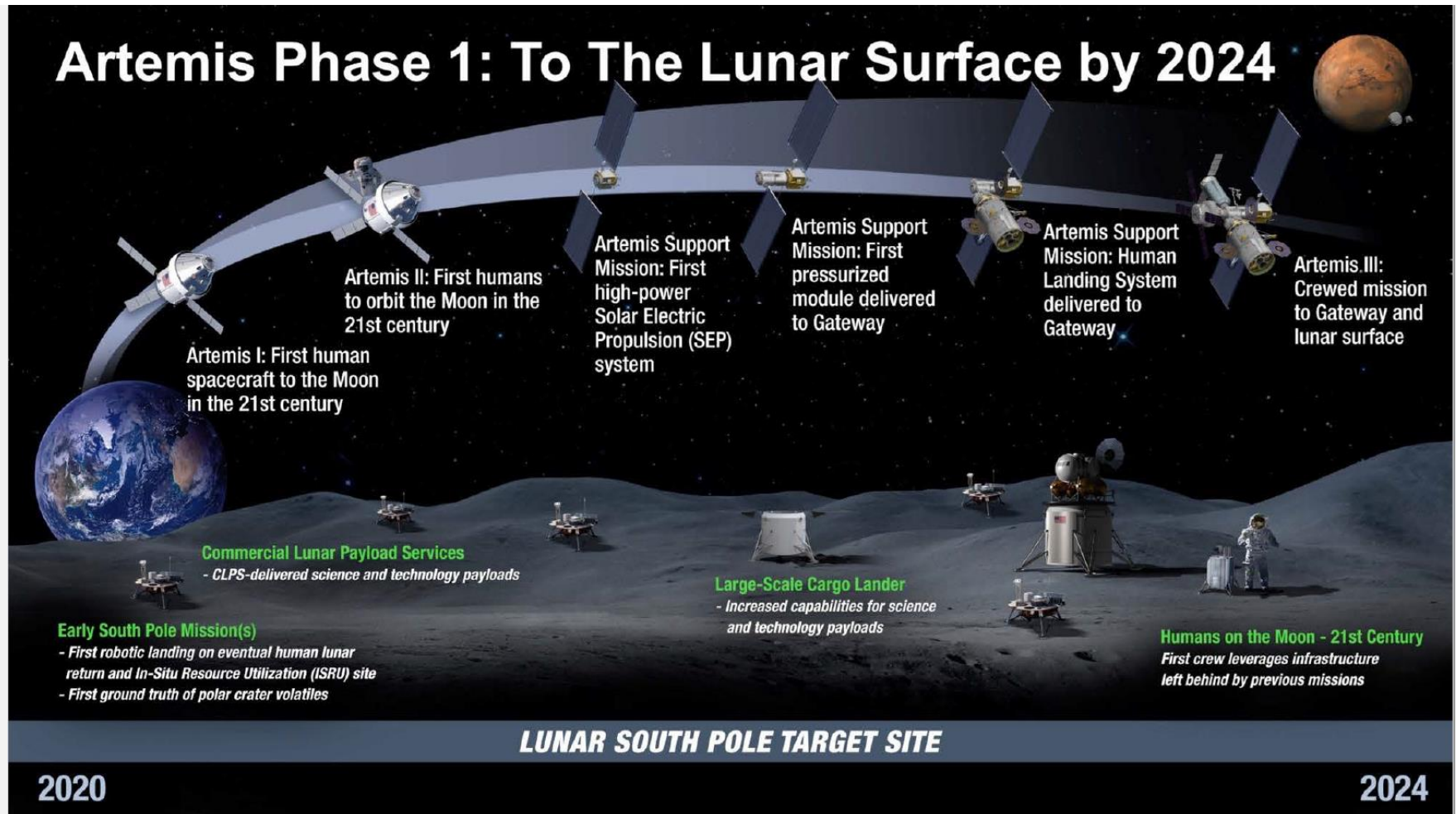
Orión/SLS son la Base para la Exploración más allá de la Órbita de la Tierra



Estación Portal (Gateway)



Primera Fase de Artemisa

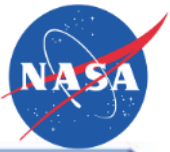
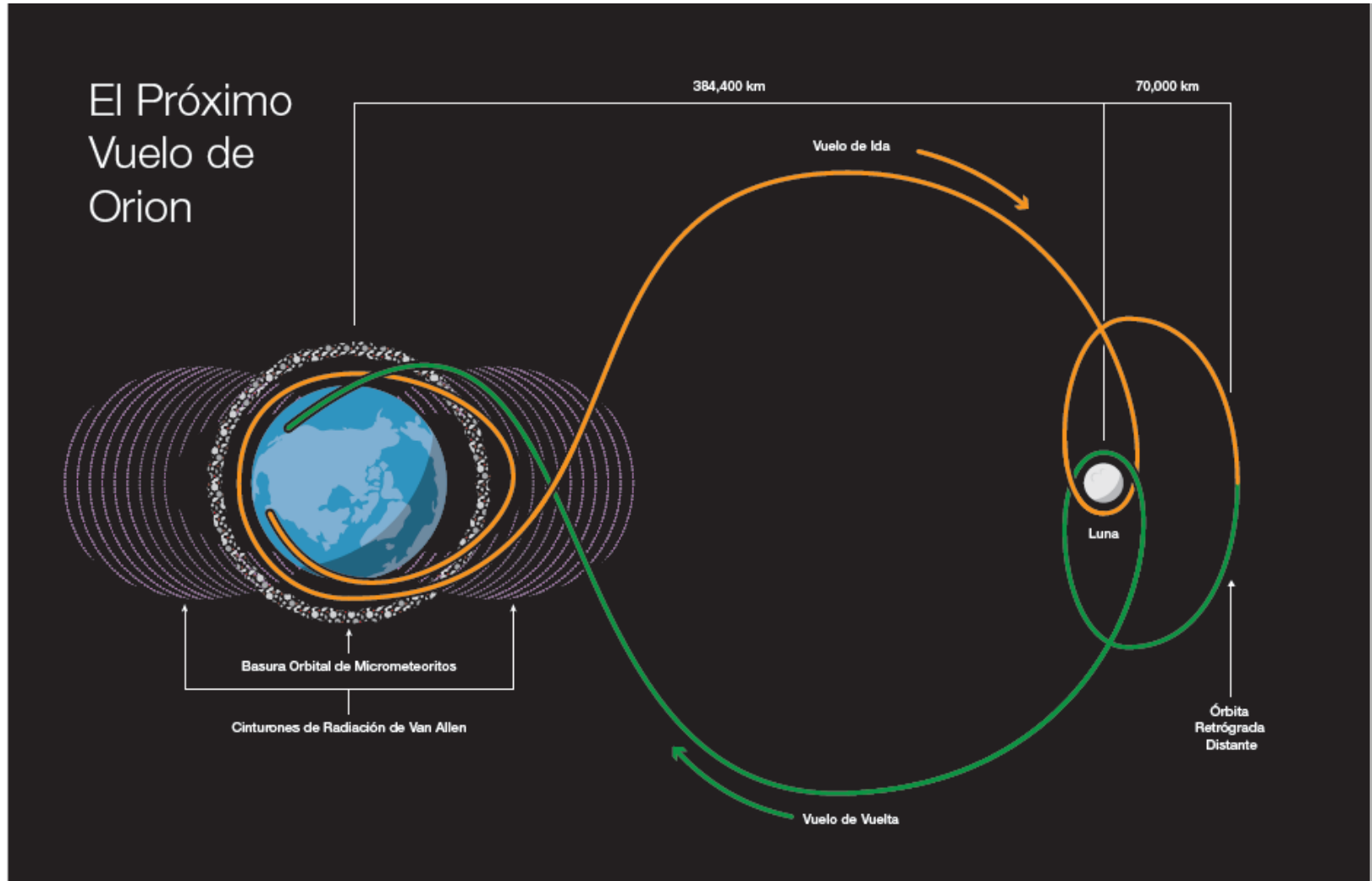


Artemisa I: Primer vuelo de prueba del cohete SLS y Orión como un sistema integrado

Artemisa II: Primer vuelo tripulado del cohete SLS y Orión a la Luna

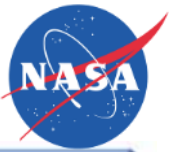
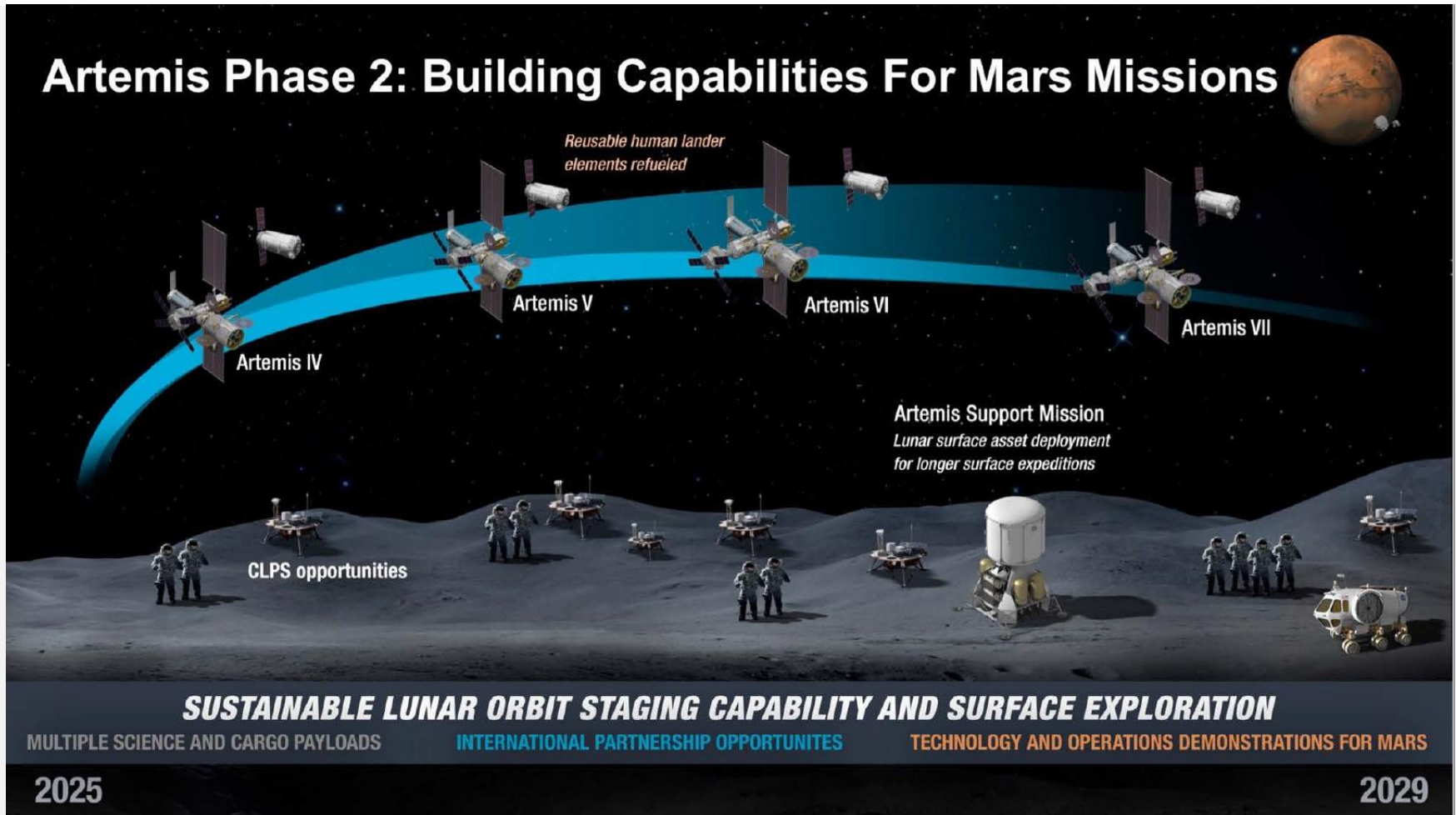
Artemisa III: Primera misión tripulada a la superficie de la Luna (2024)

Artemisa I*



*Planeada para Noviembre 2021

Segunda Fase de Artemisa



Artemisa IV – VII Vuelos tripulados a la estación Portal (Gateway)

Ambiente Espacial

El ambiente del espacio se caracteriza por:

- **Baja presión (vacío)**
- **Oxígeno atómico (causa la erosión de los materiales)**
- **Radiación ultravioleta (UV)**
- **Partículas cargadas**
- **Temperaturas extremas**
- **Radiación electromagnética**
- **Micro meteoritos**
- **Escombros fabricados por los humanos**

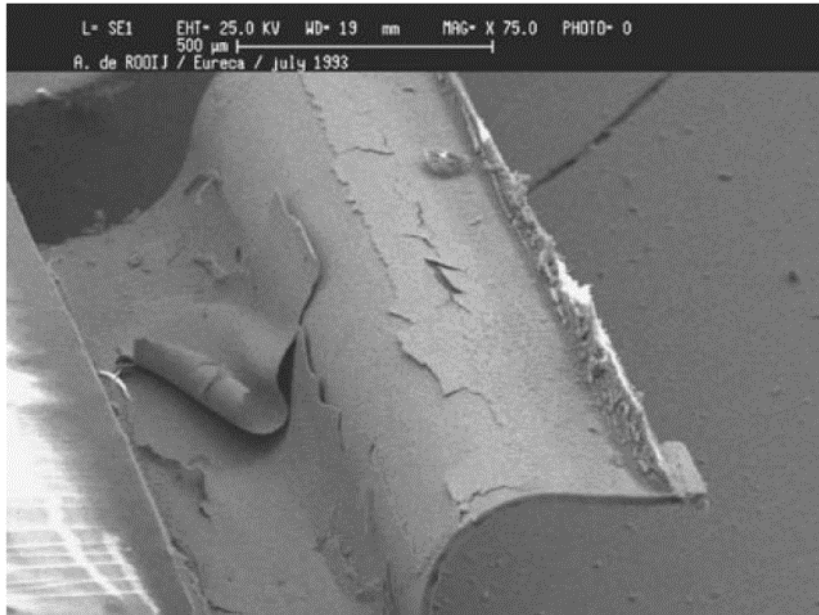
Interacción entre el Oxígeno Atómico y los Materiales



La interacción del transbordador espacial con la atmósfera superior crea una corona vista en la noche (foto de la derecha), en parte, debido al oxígeno atómico

En la parte alta de la atmósfera, a unos 200-700 km, una forma elemental de oxígeno se crea a partir de la exposición a la luz ultravioleta solar intensa. Las moléculas de oxígeno (O_2) se descomponen en dos átomos de oxígeno separados. Esta forma de oxígeno elemental es altamente reactiva y expone una nave espacial a la corrosión que acorta su vida útil.

Corrosión causada por Oxígeno Atómico



Interconector de plata en una celda solar de Eureka



Plata cubierta con oro donde se ve la formación de óxido de plata causada por oxígeno atómico en los defectos del recubrimiento



EURECA fue una misión de la ESA (Agosto 1992 - Julio 1993). Su objetivo principal fue el estudio de los efectos ambientales en la nave espacial.

Crédito de imagen: ESA

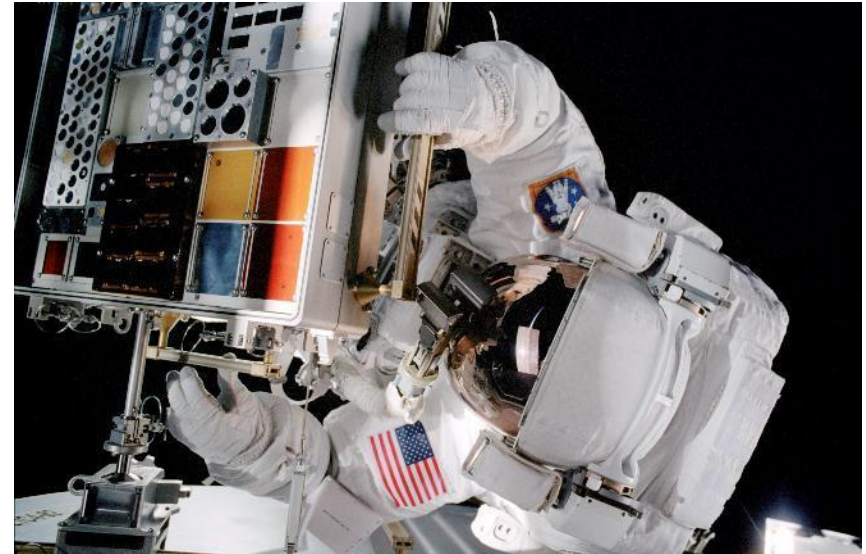
Pruebas de Materiales para el Espacio



Los materiales se prueban en el exterior de la Estación Espacial Internacional.

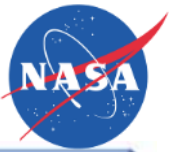


Astronauta de la NASA, Patrick G. Forrester, instala experimentos de exposición diseñados para recopilar datos sobre cómo los diferentes materiales se comportan en el ambiente del espacio durante un largo periodo de tiempo.



Astronauta de la NASA, Andrew Feustel, recupera materiales de los experimentos de exposición largos antes de instalar otros durante una caminata espacial el 20 de mayo del 2011.

Beneficios Inesperados del Oxígeno Atómico



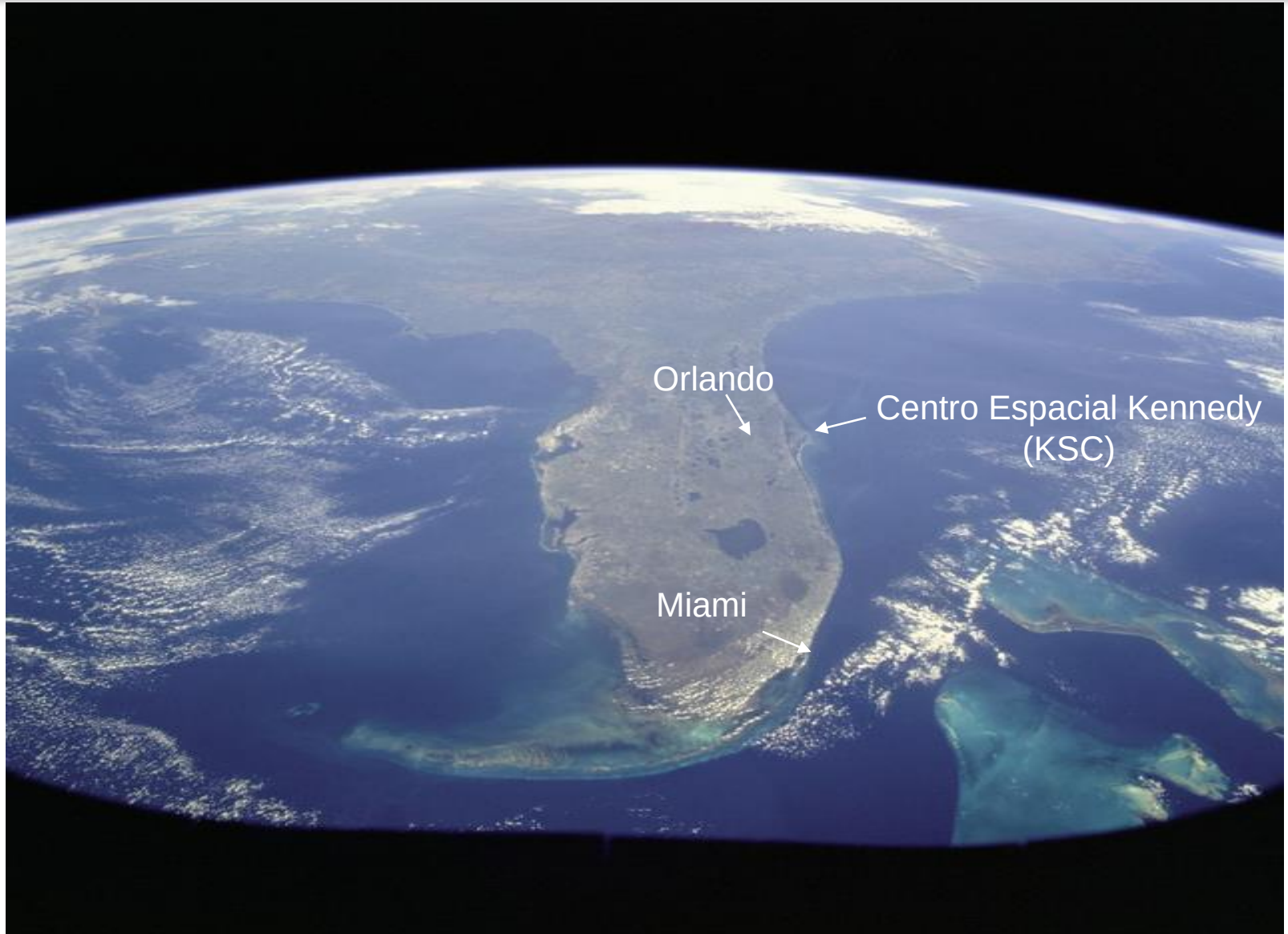
Durante el desarrollo de métodos para prevenir el daño de oxígeno atómico, se descubrió que también podría eliminar las capas de hollín u otro material orgánico de una superficie. El oxígeno atómico no reacciona con los óxidos, por lo que la mayoría de los pigmentos de la pintura no es afectada por la reacción.

La foto de la izquierda fue tomada después de que el personal del Museo de Arte de Cleveland trató de limpiar y restaurar una pintura con el uso de acetona y cloruro de metileno. La foto de la derecha es después de la limpieza mediante la técnica de oxígeno atómico.

La Corrosión y la Exploración Espacial

Uno de los retos para la exploración del espacio es que el equipo debe soportar condiciones extremas del calor, del escape del cohete y del frío extremo en el espacio. Sorprendentemente, uno de los factores más destructivos es el efecto corrosivo de la niebla cargada de agua salada del océano que causa la corrosión de las estructuras y equipos de lanzamiento en el Centro Espacial Kennedy.

Ambiente Natural de Lanzamiento de la NASA



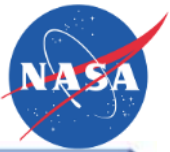
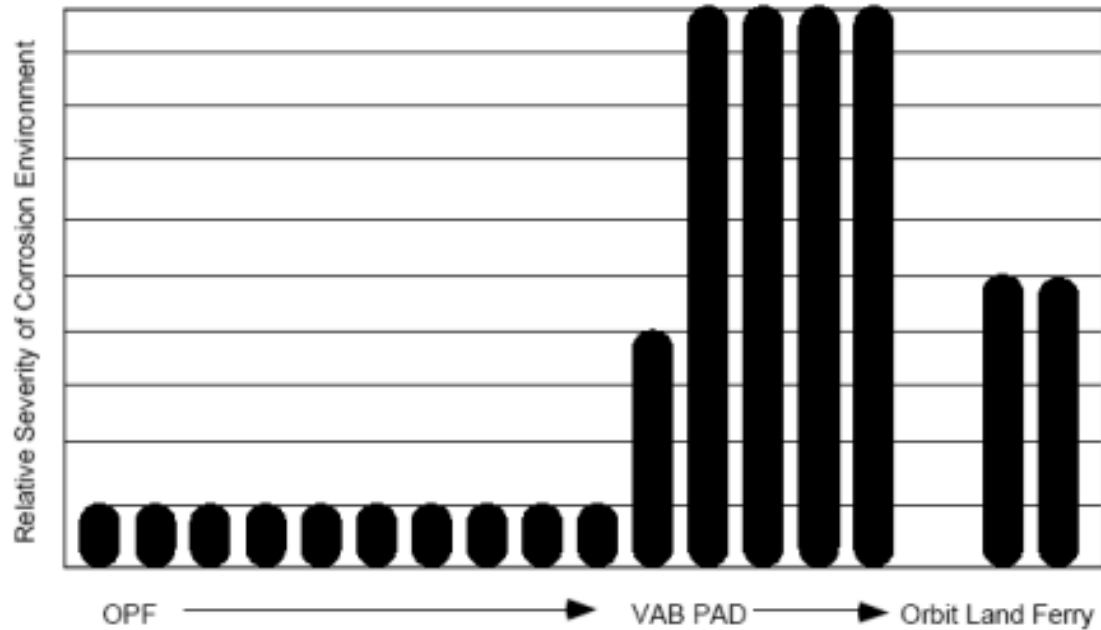
Medio Ambiente Natural en las Plataformas de Lanzamiento



Cámara de Niebla Salina Natural



Condiciones Ambientales del Orbitador



FERRY



Orbiter preparation facility (OPF)



VAB



PAD



LAND



- Entorno de funcionamiento normal - controlado por temperatura y humedad
- Expuesto a la briza salina en la plataforma de lanzamiento (30-90 días)
- En la realidad, los retrasos en los vuelos suelen prolongarse. Por ejemplo, Columbia pasó 166 días en la plataforma de lanzamiento antes de su décimo vuelo
- La humedad elevada condujo a la condensación en el espacio que dejaría detrás residuos de la sal
- Expuesto a ambientes externos después del aterrizaje
- Vuelo de ferry - intrusión de agua

Medio Ambiente en la Plataforma de Lanzamiento



El entorno de lanzamiento en el Centro Espacial es extremadamente corrosivo:

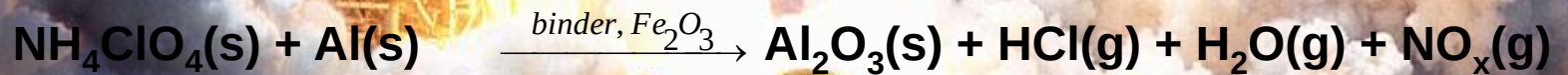
- Brisa salina del océano
- Calor
- Humedad
- Luz solar y radiación ultravioleta
- Escape de ácido generado por los cohetes propulsores de combustible sólido (SRBs)



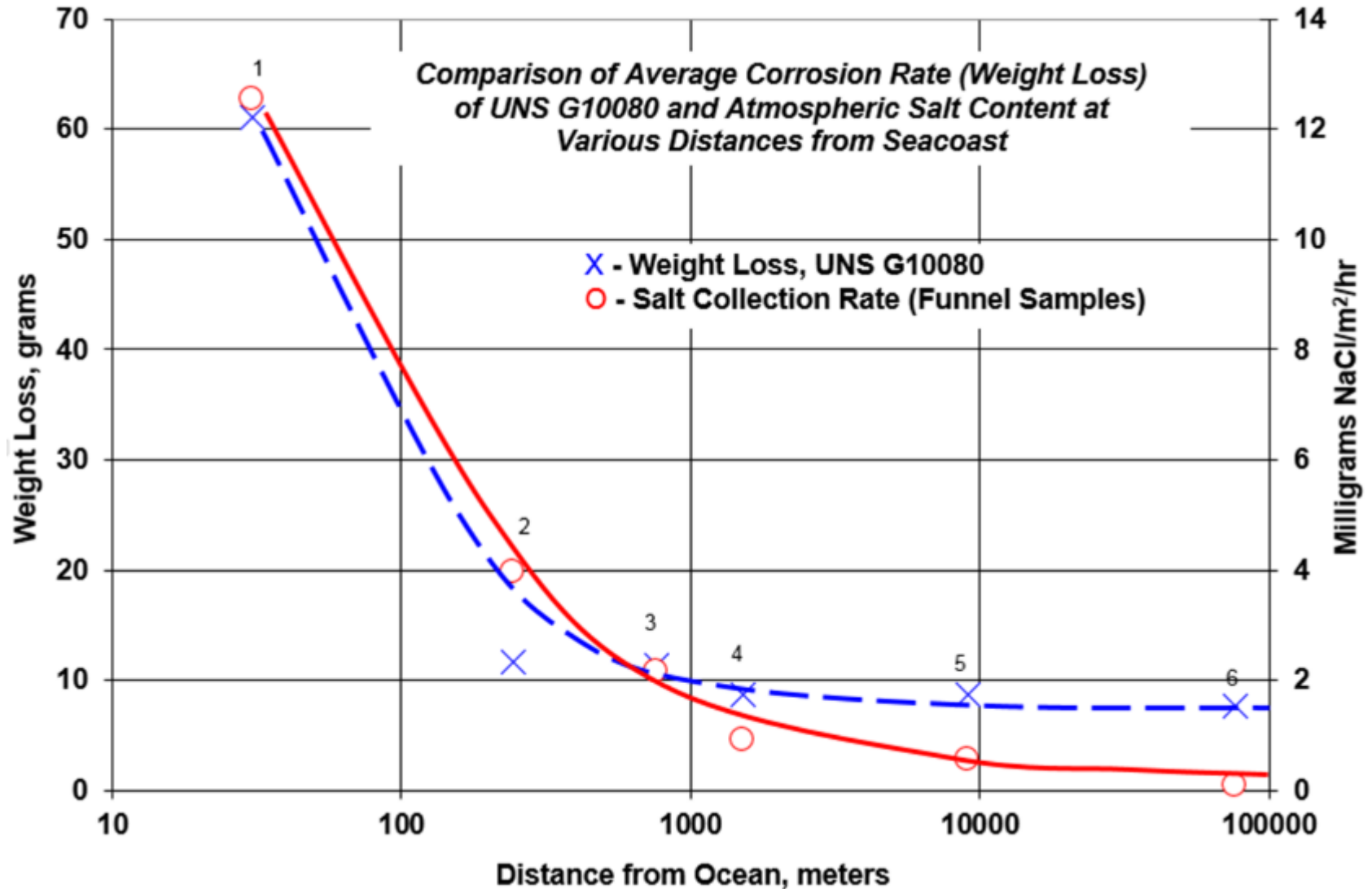
A photograph of the Space Shuttle Columbia during its ascent. The shuttle is white with a large orange external tank and two white solid rocket boosters. It is launching from the Kennedy Space Center, with a large plume of white smoke and fire at its base. A red arrow points from the text 'Escape ácido' to the base of the shuttle.

En 1981, el transbordador espacial introdujo la deposición ácida (70 toneladas de HCl). La NASA planea utilizar cohetes con el mismo combustible en misiones futuras.

Escape ácido



Cambios en la Tasa de Corrosión con la Distancia desde el Océano



Tasas de Corrosión del Acero al Carbono

Corrosion rates of carbon steel calibrating specimens at various locations*

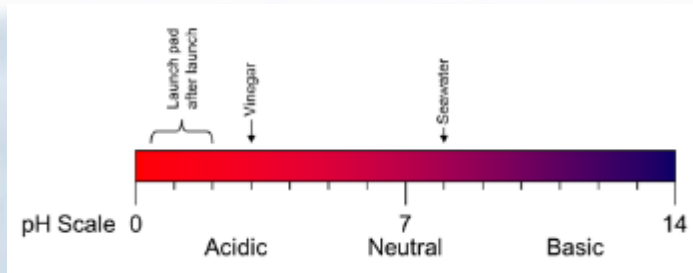
Location	Type Of Environment	$\mu\text{m/yr}$	Corrosion rate ^a mils/yr
Esquimalt, Vancouver Island, BC, Canada	Rural marine	13	0.5
Pittsburgh, PA	Industrial	30	1.2
Cleveland, OH	Industrial	38	1.5
Limon Bay, Panama, CZ	Tropical marine	61	2.4
East Chicago, IL	Industrial	84	3.3
Brazos River, TX	Industrial marine	94	3.7
Daytona Beach, FL	Marine	295	11.6
Pont Reyes, CA	Marine	500	19.7
Kure Beach, NC (80 ft. from ocean)	Marine	533	21.0
Galeta Point Beach, Panama CZ	Marine	686	27.0
Kennedy Space Center, FL (beach)	Marine	1070	42.0

^aTwo-year average

* Data extracted from: S. Coburn, Atmospheric Corrosion, in Metals Handbook, 9th ed, Vol. 1, Properties and Selection, Carbon Steels, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1978, p.720

A mil is one thousandth of an inch

Valores de pH en el Complejo de Lanzamiento después de un Lanzamiento del Transbordador Espacial



Zona 3:
pH ~2-3

Zona 2:
pH ~ 2-3

FSS 115" Level

Zona 1:
pH ~ 0-1

Especificación NASA-STD-5008B: Recubrimientos Protectores para Acero al Carbono, Acero Inoxidable, y Aluminio en Estructuras de Lanzamiento, Instalaciones, y Equipos de Operaciones Terrestres

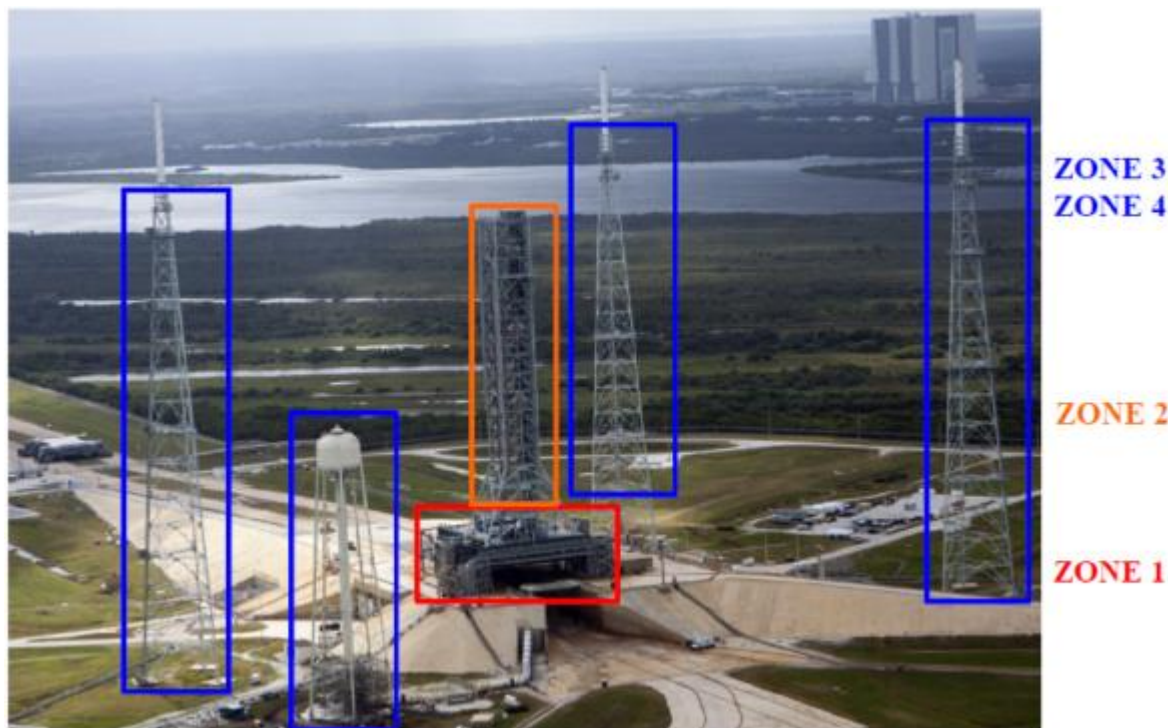
- Dirige el mantenimiento en el Centro Espacial John F. Kennedy y otros Centros de la NASA.
- Las zonas de exposición se establecen para definir los requisitos del sistema de recubrimiento para entornos como el complejo de lanzamiento

Zona 1: Impacto directo de escape de cohetes (pH 0-1)

Zona 2: Altas temperaturas y depósitos ácidos (pH 2-3)

Zona 3: Superficies que reciben depósitos de productos ácidos (pH 2-3)

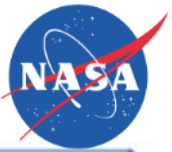
Zona 4: Ambiente marino (pH 7)



- El zinc inorgánico es el recubrimiento principal que se utiliza para proteger el acero al carbono en el Centro Espacial Kennedy:
 - Sacrificiales (recubrimientos ricos en zinc)
 - Galvanizado en caliente (HDG)
 - Pulverización térmica (TSC)
- Por lo general, el zinc inorgánico no tiene una capa superior, pero hay excepciones:
 - Áreas que están expuestas a efluentes altamente ácidos
 - Sistemas especializados tal como los tanques criogénicos



Protocolo de Pruebas



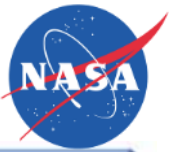
● Adherencia

- Pre- y post calentamiento (24 horas a 400 °C)
- El valor de adherencia después de calentar debe ser mayor que el valor previo y cumplir con los requisitos estadísticos para la repetibilidad.

● Pruebas de Exposición atmosférica

- Después de 18 meses de exposición (calificación inicial).
- Después de 60 meses de exposición (aprobación final).
- La suspensión ácida se coloca en los paneles apropiados cada seis semanas durante los primeros 18 meses de exposición.
- Fotografías: antes y después de 18 y 60 meses de exposición
- Color/Brillo (No es un criterio para pasar o fallar). El color y el brillo se toman antes, y después de 18 meses de exposición atmosférica
- Ampollamiento, corrosión bajo pintura y corrosión de rayadura (criterios para pasar o fallar). Las evaluaciones se realizan después de 18 y 60 meses de exposición ambiental

Preparación de Cupones



● Cupón de prueba de acero al carbono estándar AISI M1020

- Dos tipos: Compuesto y plano
- Cupones inspeccionados, medidos, y documentados antes de la aplicación de imprimación

Cupón Compuesto



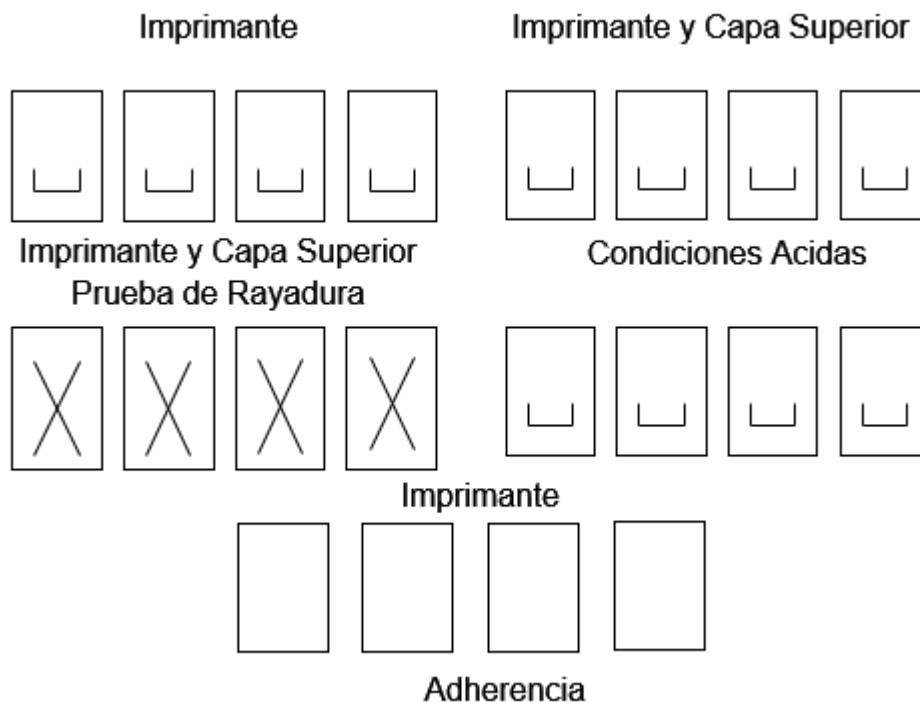
Cupón Plano



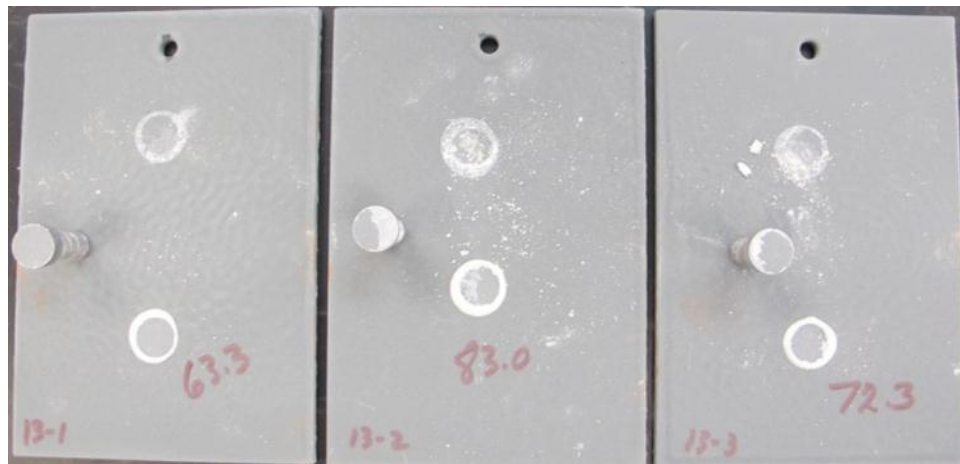
Matriz de Pruebas



- 4 cupones compuestos: imprimación solamente (condiciones normales)
- 4 cupones compuestos: imprimación y capa superior (condiciones normales)
- 4 cupones compuestos: imprimación y capa superior (condiciones ácidas)
- 4 cupones planos: imprimación y capa superior (prueba de rayadura - condiciones normales)
- 4 cupones planos: imprimación solamente (para medir la resistencia de la adherencia al calor)

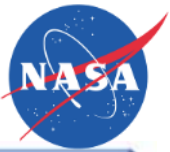


- La adherencia es un criterio para pasar o fallar.
- Pruebas de adherencia a la tracción se basan en ASTM D 4541, “Método de prueba estándar para la resistencia a la extracción de recubrimientos que utilizan probadores de adherencia portátiles.”
- Los valores de adherencia a la tracción se determinan en los paneles curados. Los paneles se colocan en un horno a 400 °C durante 24 horas y se vuelve a probar. Cualquier deterioro, como carbonización o quema, es un motivo para la descalificación. Pérdida de adherencia después de calentar es un motivo para la descalificación.



Sistema de recubrimiento calificado para su uso

Pruebas de Exposición Atmosférica



Pruebas de exposición
a la atmósfera junto a
la playa

1.6 km

Laboratorio para Pruebas de exposición a la Atmósfera



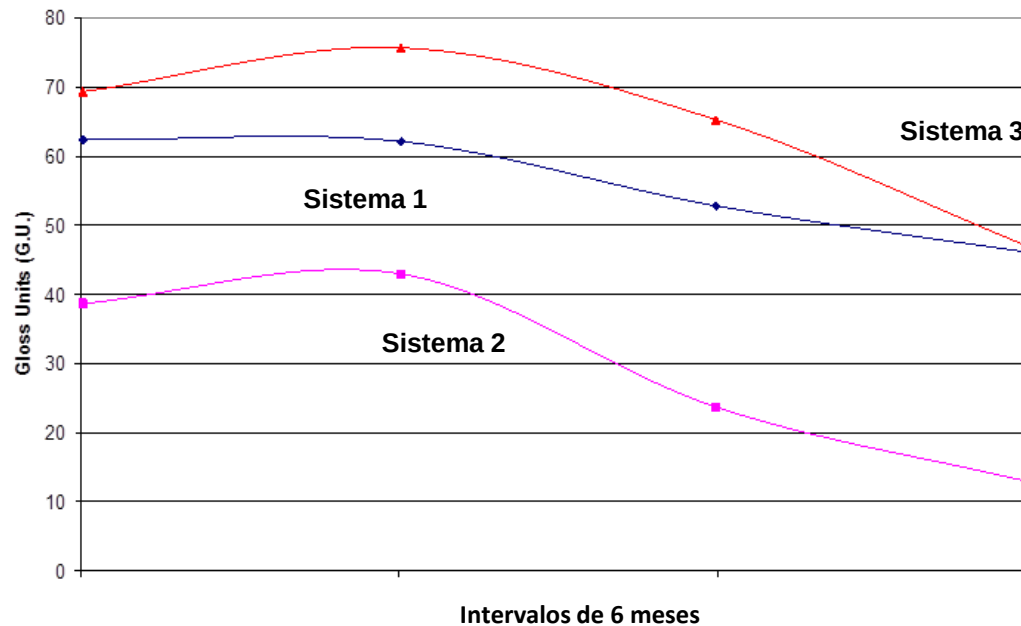
Pruebas de Exposición Atmosférica



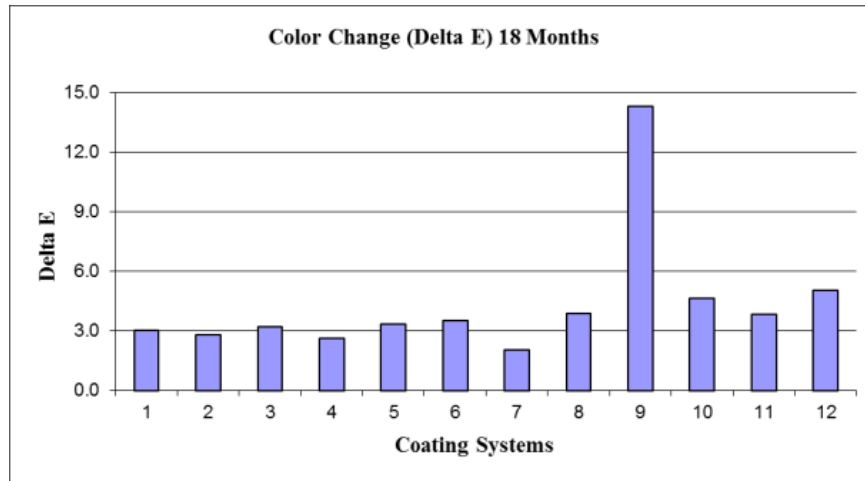
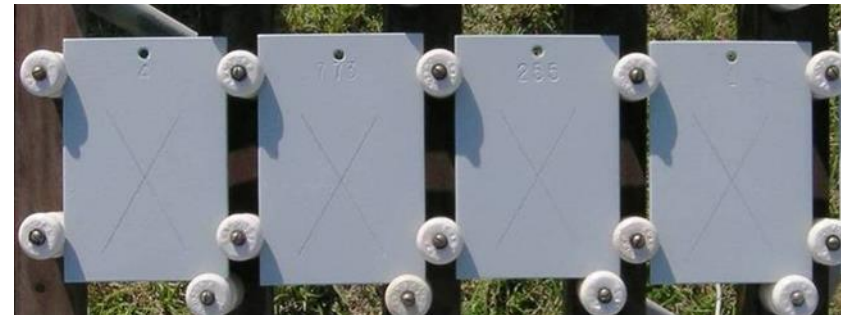
Pruebas de exposición a la atmósfera junto a la playa y cerca de las plataformas de lanzamiento en el Centro Espacial Kennedy de la NASA

- El brillo no es un criterio para pasar o fallar.
- Los valores de brillo son importantes para la estética.
- Una reducción en el brillo puede indicar degradación del recubrimiento.
- Las medidas de brillo se realizan con un medidor de brillo portátil de acuerdo con ASTM D523, "Método de Prueba Estándar para el Brillo Especular."

Sistema	Brillo Promedio		Retención de Brillo
	Inicial	18 Meses	
1	62	46	74%
2	39	13	33%
3	69	47	67%



- El color no es un criterio para pasar o fallar pero puede ser importante para las cualidades estéticas y de seguridad.
- Un cambio de color puede indicar degradación del recubrimiento.
- El cambio en el color se calcula a través de ASTM E308, "Práctica estándar para la computación de colores de objetos mediante el uso del sistema CIE."



Sistema 9 – Condición inicial

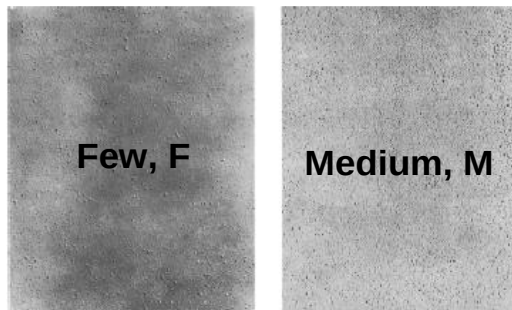


Sistema 9 – 18 Meses después

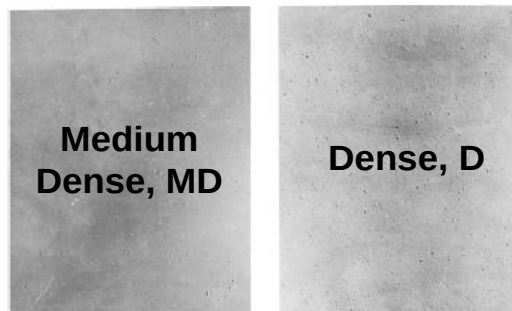
Ampollamiento



- El ampollamiento es un criterio para pasar o fallar.
- El ampollamiento se determina a través de ejemplos pictóricos en ASTM D714, “Método de prueba estándar para evaluar el grado de ampollamiento de pinturas.”
- Según NASA-STD-5008B, se requiere una calificación de 9F para obtener la aceptación y aprobación final.



Blister Size 8



ASTM D714 Ejemplo pictórico para el tamaño 8 de ampollas



Ampollamiento de capa superior acrílica sobre zinc inorgánico

Corrosión debajo del Recubrimiento



- La corrosión debajo del recubrimiento es un criterio para pasar o fallar.
- Recubrimientos con y sin baño de ácido son evaluados por este método.
- Corrosión debajo del recubrimiento se determina a través de ejemplos pictóricos en ASTM D610, “Método de prueba estándar para evaluar el grado de oxidación en la superficie de acero pintado.”
- Según NASA-STD-5008B, una calificación de 8 (>0,03% a 0,1% oxidado para poliuretano alifático, recubrimientos solubles en agua, y capas superiores de polisiloxano) o 9 (>0,01% a 0,03% oxidado para zinc inorgánico)



Exposición de 18 y 60 meses
– Aprobado para su uso

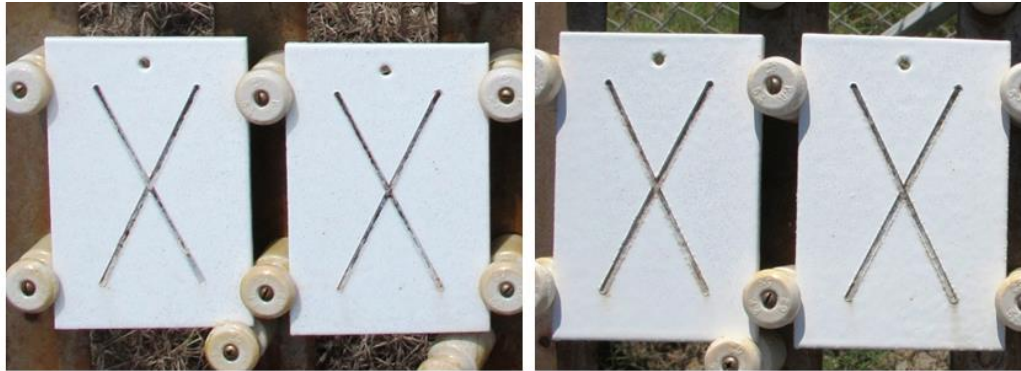


Exposición de 18 y 60 meses – No aprobado para su uso

Corrosión desde la Rayadura



- La distancia de fuga desde la rayadura es un criterio para fallar o pasar
- Estos paneles no son enjuagados con ácido.
- La corrosión desde la rayadura se determina según ASTM D1654, “Método de prueba estándar para la evaluación de especímenes pintados o recubiertos sometidos a ambientes corrosivos.”
- Según NASA-STD-5008B, una calificación de 8 (distancia de fuga > 0.5 mm a 1.0 mm para poliuretano alifático, pinturas solubles en agua, y capas superiores de polisiloxano) o 9 (distancia de fuga > 0,0 mm a 0,05 mm para zinc inorgánico).



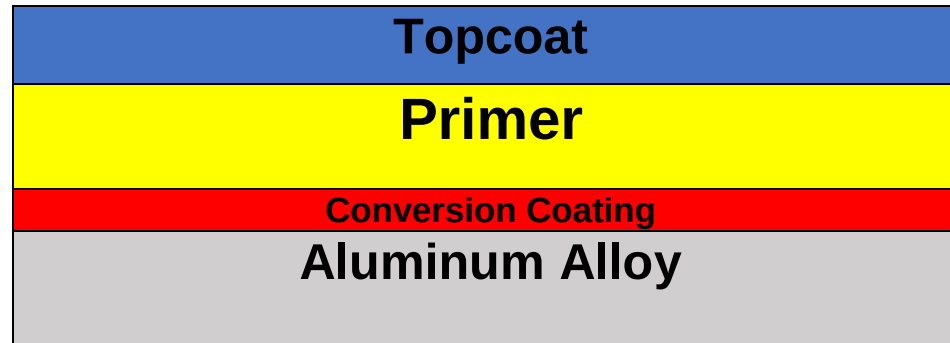
Exposición de y 60 meses – Aprobado para su uso



Exposición de y 60 meses – No aprobado para su uso

- La NASA lleva a cabo sus operaciones de lanzamiento y exploración espacial en ambientes que son únicos en cuanto a la corrosión.
- La metodología utilizada para probar y calificar los recubrimientos para las operaciones terrestres se basan en el estándar NASA-STD-5008B:
 - Adherencia antes y después de calentar (Criterio para pasar o fallar)
 - Brillo (No es un criterios para pasar o fallar)
 - Color después de prueba atmosférica (No es un criterio para pasar o fallar)
 - Ampollamiento (Criterio para pasar o fallar)
 - Corrosión debajo del recubrimiento (Criterio para pasar o fallar)
 - Corrosión desde la rayadura (Criterio para pasar o fallar)
 - Se mostraron ejemplos de fallas y éxitos del recubrimiento de acuerdo con los requisitos

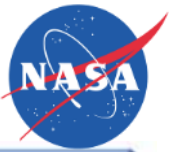




Esquemática de un sistema típico de multi-recubrimiento que se utiliza para proteger el aluminio

- El recubrimiento de conversión (conversión Coating) proporciona la primera capa de protección contra la corrosión y actúa como una base para mejorar la adherencia al imprimante (primer).
- Los recubrimientos de conversión a base de cromato y cromato-fosfato se han utilizado para este propósito durante varias décadas, ya que son eficaces para inhibir la corrosión de las aleaciones de aluminio.
- Sin embargo, el uso de productos químicos que contienen cromo ha sido limitado debido a efectos cancerígenos nocivos, y se están realizando intensos esfuerzos de investigación para encontrar alternativas.

Las Regulaciones Ambientales Influencian el Desarrollo de Recubrimientos

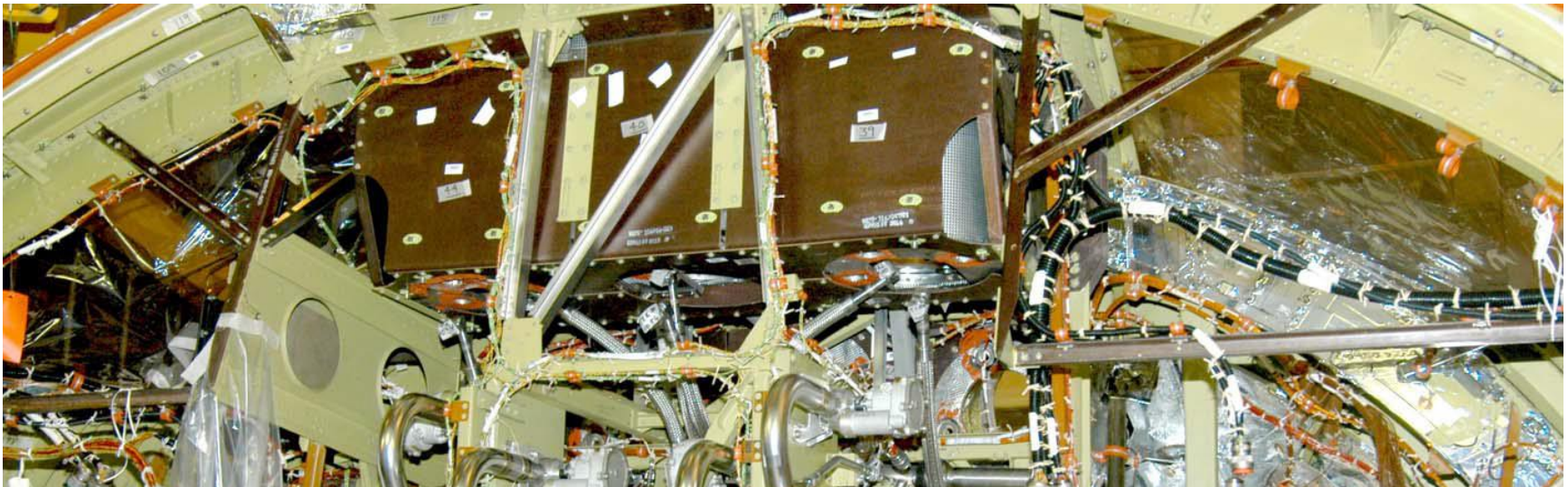


- **Las regulaciones ambientales son progresivamente más estrictas y están motivando a la industria del revestimiento a eliminar muchos recubrimientos protectores contra la corrosión que son perjudiciales para los humanos y para el medio ambiente.**
- **Estas regulaciones también motivan el desarrollo de nuevas tecnologías para la protección de la corrosión.**
- **Ejemplos:**
 - **Recubrimientos inteligentes**
 - **Recubrimientos a base de agua**
 - **Recubrimientos con un contenido reducido de compuestos orgánicos volátiles (VOCs)**

Consideraciones para el Diseño del Orbitador (Materiales)



- La mayor parte de la estructura es de aluminio
- La protección contra la corrosión se basó en no tener fallas debidas a la corrosión durante una vida de 10 años ó 100 misiones (en realidad fueron 135 desde 1981 hasta el 2011)
- La resistencia a la corrosión de los materiales se probó usando métodos disponibles en esa época
- En general, se requería que todo el aluminio utilizado en componentes estructurales estuviera revestido de recubrimiento o anodizado y recubierto con imprimante epoxídico cromado.
- Se evitó el uso de acoplamiento galvánico (metales disímiles en contacto entre sí) a menos que estuvieran adecuadamente protegidos contra la corrosión
- Todos los sujetadores tenían que ser instalados con epoxi húmedo. El epóxido seleccionado fue un imprimante de cromo hexavalente bajo el nombre de marca Super Koropon



Problemas con el Envejecimiento de Super Koropon Primer



- La protección contra la corrosión del Orbitador se basó en gran medida en un imprimante de cromo hexavalente Cr(VI) (Super Koropon)
- El imprimante se utilizó para cubrir la mayor parte de la estructura, como en superficie de unión para el sistema de protección térmica, y para proteger los componentes críticos
- La planificación para el mantenimiento y la inspección de los orbitadores a largo plazo no se dio plena consideración hasta después de que los orbitadores ya estaban construidos
- En el 2004, el Smithsonian dio permiso de utilizar ciertos componentes del Orbitador “Enterprise” de 30 años de edad para llevar a cabo una investigación sobre la efectividad a largo plazo del Koropon*



Estructura recubierta con Koropon en el Orbitador “Enterprise”

*J.K. Lomness and L.M. Calle, “Comparison of the Chromium Distribution in New Super Koropon Primer to 30 Year Old Super Koropon Using Focused Ion Beam/Scanning Electron Microscopy,” <http://corrosion.ksc.nasa.gov/pubs/ChromiumDistribution.pdf>

Eficacia del Koropon en la Protección contra la Corrosión



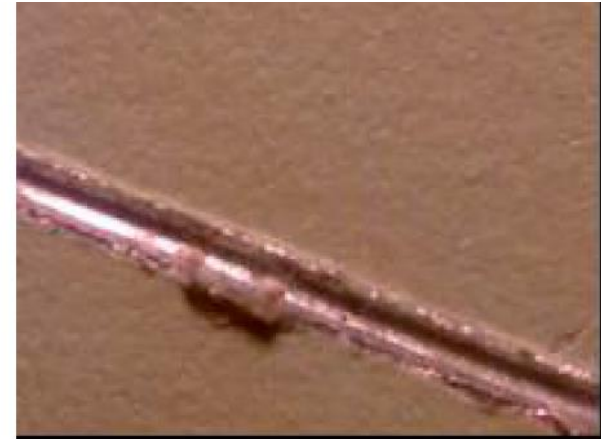
- La eficacia del Koropon de 30 años de edad se comparó con la de una muestra recién recubierta (control)
- Ambos paneles se rayaron y se sometieron a pruebas de corrosión en una cámara de niebla salina durante 1500 horas
- El panel del Enterprise mostró un mal desempeño en comparación con el panel de Koropon fresco
- Productos de corrosión aparecieron alrededor del rayón en la muestra del Enterprise después de 500 horas de prueba
- Ampollas a distancia desde el rayón aparecieron después de 1000 horas de ensayo de niebla salina
- Ninguna corrosión se observó en el panel de control después de 1500 horas de prueba



Enterprise Panel
Scribe Pitting @ 60X mag
After 500 hours



Enterprise Panel
Blister @ 60X mag
After 1000 hours

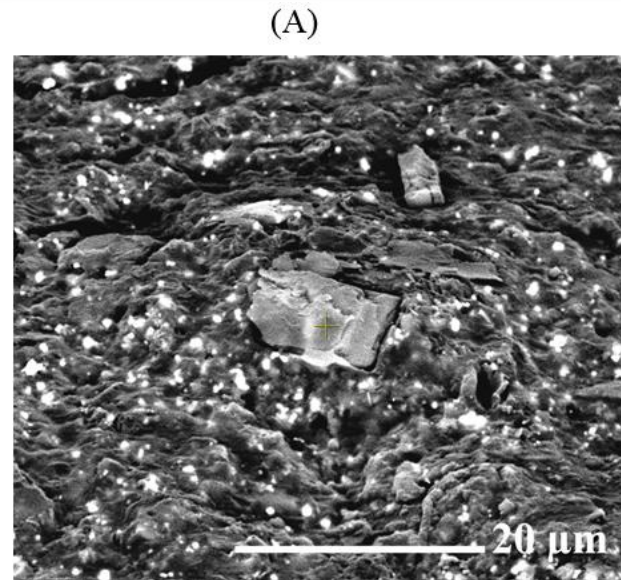
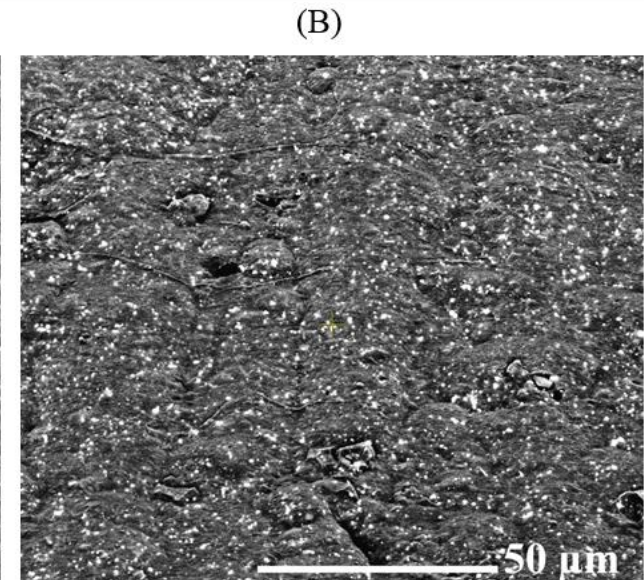


Control Panel
Scribe @ 60X mag
After 1500 hours

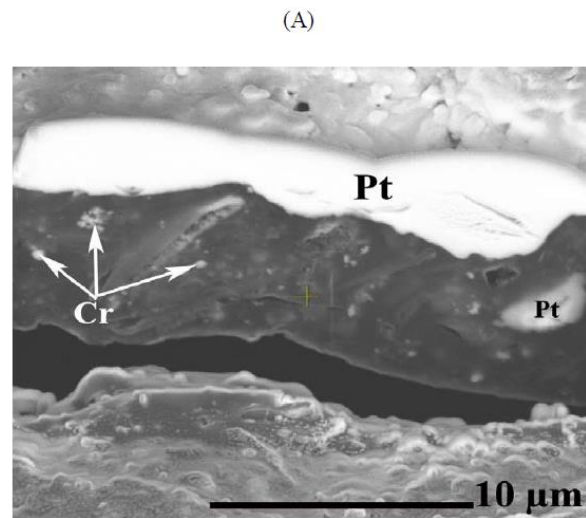
Estudio de la Eficacia de la Protección contra la Corrosión



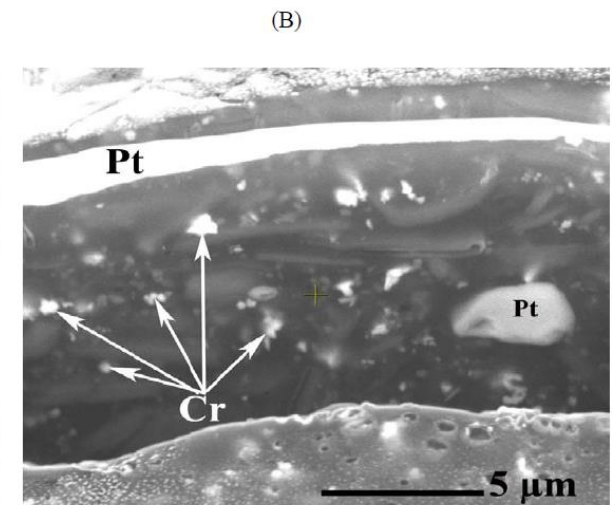
SEM (microscopía electrónica de barrido) reveló una morfología superficial diferente: imprimante Enerprise (A) es más áspero que el control (B)



Las imágenes SEM EDS (espectroscopía de energía dispersiva) indican que hay menos cromo en el imprimante del Enterprise (A) que en el control (B) y que no se distribuye muy bien



Enterprise Cross Section



Control Cross Section

Aproximadamente después de 12 años de funcionamiento, se formó una junta para la revisión de control de la corrosión en los orbitadores espacial.

Los objetivos de esta junta fueron:

- La evaluación de la magnitud y las causas de la corrosión**
- Implementar acciones correctivas tanto a largo como a corto plazo**
- Generación y mantenimiento de una base de datos histórica de la corrosión de los Orbitadores**
- Desarrollo y aplicación de métodos para la detección de la corrosión**
- Desarrollo e implementación de programas de entrenamiento y certificación para el control la corrosión**

Nuevos Materiales y recubrimientos para Satisfacer las Demandas que Cambian

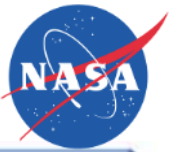


- La evolución de materiales aeroespaciales y automotrices, recubrimientos y procesos de aplicación están motivados por:
 - Regulaciones ambientales
 - Demandas para una mejor eficiencia energética y rendimiento
 - Cadena de suministro sostenible
- Los sistemas futuros requieren recubrimientos inteligentes con protección contra la corrosión bajo demanda, autoreparación y detección de la corrosión
- Las futuras industrias aeroespaciales y automotrices utilizarán materiales compuestos, nuevas aleaciones y recubrimientos con capacidades multifuncionales



Ilustración artística del edificio de ensamblaje de vehículos, el sistema de lanzamiento espacial de la NASA, y el módulo de tripulación Orión en el lanzador móvil, con la Plataforma de Lanzamiento 39B en segundo plano.

Revestimientos sobre la Nave Espacial Orión



Recubrimiento de protección contra la corrosión sobre aleación de aluminio de litio (izquierda) y blindaje térmico (derecha). El escudo térmico protege la nave espacial de temperaturas que llegan a 4000 grados Fahrenheit (2204 °C)

Recubrimiento Protector del Calor en Orión



Un técnico de Textron aplica el material de Avcoat en cada una de las 330.000 células individuales de la estructura del escudo que protege a Orión del calor

Compuestos para la Prevención de la Corrosión de (CPC)



- Compuestos para la prevención de la corrosión (CPCs) son recubrimientos temporales que se pueden aplicar para prevenir nuevos sitios de formación de la corrosión o para suprimir cualquier corrosión que se ha iniciado
- CPCs contienen comúnmente inhibidores de corrosión en suspensión en una mezcla de disolventes y una base de aceite o grasa
- El aceite de base actúa como un fluido portador para los inhibidores y también como una barrera protectora a los elementos ambientales
- Los disolventes actúan como un aceite de base y el dispersante se destina a evaporar después de la aplicación
- CPCs puede ser películas blandas o duras, y pueden estar compuestos principalmente de derivados del petróleo, hidrocarburos, o de fluoropolímeros según la función deseada
- CPCs se han utilizado en los aviones durante muchos años como un método relativamente barato de controlar la corrosión

Compuestos para la Prevención de la Corrosión (Orbitador)



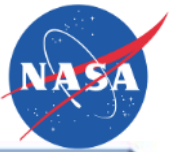
Despues de pruebas de eficacia para controlar la corrosión, tres CPCs fueron seleccionados:

- Film® fluido (grasa a base de lanolina)
- Grasa de calcio (grasa a base de parafina)
- Dinitrol AV-30 (cera a base de hidrocarburos)

Areas de aplicación:

- Film® fluido: Equipos de proceso terrestres
- Grasa de calcio: Los actuadores y el tubo de sello primario Elevon Cove
- Dinitrol AV-30®
 - En spray: cavidades interiores
 - Brocha: Respiradores en puertas, alas principales, superficies de contacto en el borde de las alas

Soluciones para la Corrosión Galvánica

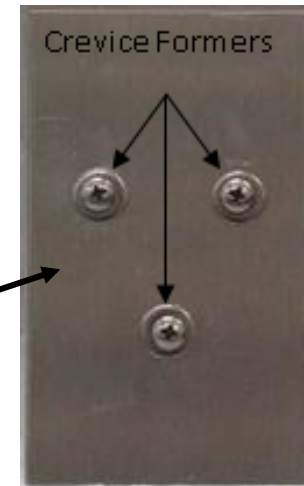


Soluciones para problemas comunes de corrosión galvánica

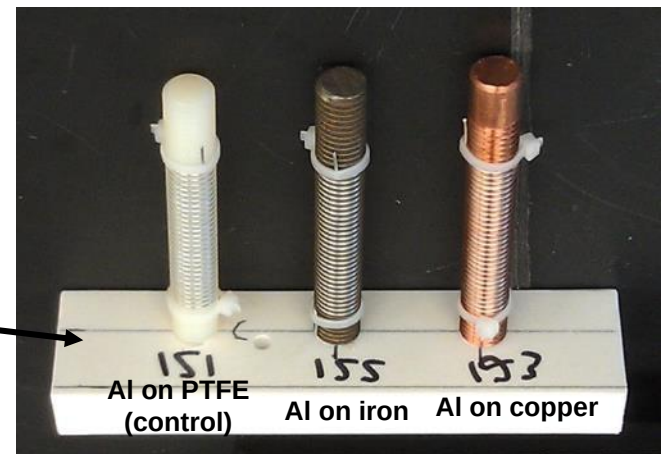
- Utilizar Compuestos Preventivos de Corrosión (CPCs)
- Efectivamente penetrar en grietas, sujetadores, arandelas, alrededor de accesorios para interrumpir las reacciones de corrosión



Arandela SS sobre Al y SS:
corrosión galvánica y de grietas

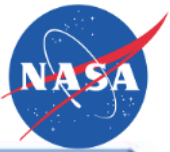
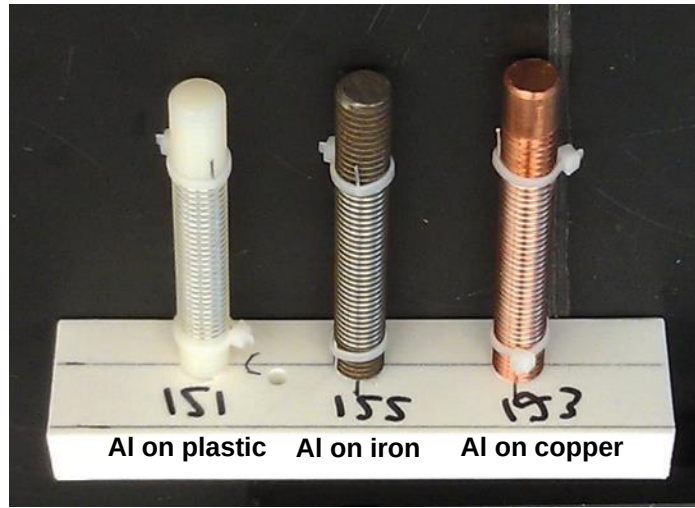


Prueba de alambre en los
tornillos: parejas
galvánicas



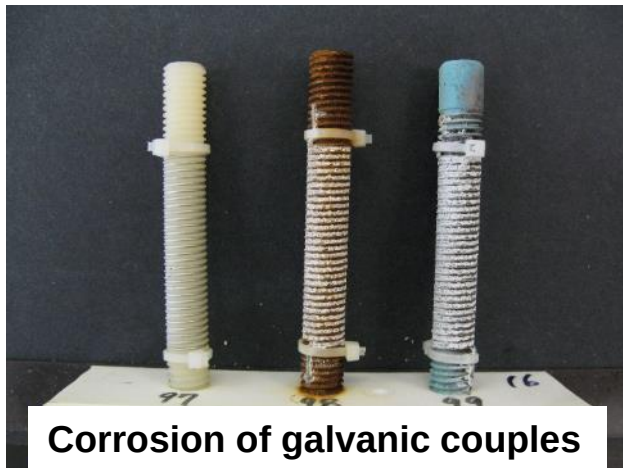
Pruebas de control de la corrosión
galvánica en el Sitio de Pruebas
Atmosféricas al lado de la playa

Galvanic Corrosion Mitigation with Environmentally Friendly CPCs



No corrosion control

Coated with CPCs



Revestimientos Inteligentes para el Control de la Corrosión



- **El uso de "revestimientos inteligentes" para detectar y controlar la corrosión se basa en los cambios que ocurren cuando un material se degrada como resultado de su interacción con un entorno corrosivo.**
- **Tales transformaciones pueden ser utilizadas para detectar y reparar daños por corrosión.**
- **El Laboratorio de Tecnología de Corrosión de la NASA desarrolló un recubrimiento que puede detectar y reparar la corrosión en una etapa temprana.**
- **Este recubrimiento se desarrolló utilizando micro contenedores sensibles al pH que entregan su contenido cuando la corrosión empieza para:**
 - **Detectar e indicar la ubicación de la corrosión**
 - **Proporcionar inhibidores de corrosión ecológicos**
 - **Entrega de agentes curativos para reparar daños mecánicos en el recubrimiento**

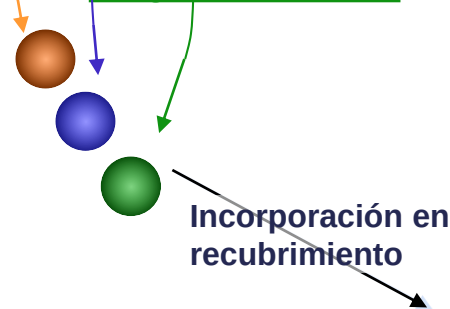
Recubrimientos Inteligentes para la Detección y el Control de la Corrosión



1. Indicadores de corrosión

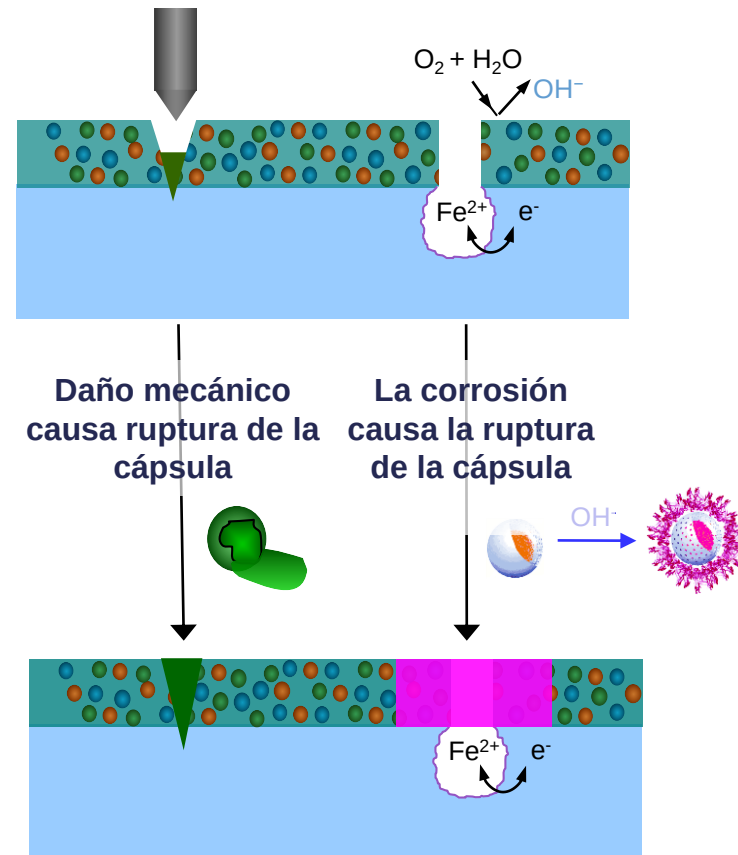
2. Inhibidores de corrosión

3. Agentes curativos



Microcápsula rota:

- Indica la corrosión
- Protege el metal de la corrosión
- Repara el área dañada



- La NASA ha estado luchando contra la corrosión desde el inicio del Programa Espacial en 1962.
- La NASA lanza desde el ambiente más naturalmente corrosivo en Norteamérica.
- La ruta de la tecnología espacial de la NASA incluye el desarrollo de tecnologías de control de la corrosión como una de las áreas necesarias para reducir el costo y mejorar la sostenibilidad y eficiencia de sus misiones de exploración espacial.
- El control de la corrosión en la industria aeroespacial se basa en el diseño, la selección de materiales, y de recubrimientos.
- La industria aeroespacial se ha basado en recubrimientos de cromo hexavalente para el control de la corrosión de las aleaciones de aluminio.
- Se necesitan nuevos recubrimientos para el control de la corrosión que reemplacen los revestimientos de cromo hexavalente debido a su toxicidad e inminente prohibición.
- La NASA está desarrollando recubrimientos inteligentes como sustitutos de recubrimientos de cromo hexavalente para la industria aeroespacial.



Gracias

Información Adicional

Dónde están los Orbitadores Ahora?



- Después de 135 misiones y 30 años la flota de Orbitadores se retiró en el 2011
- Las lecciones aprendidas durante el programa de el Orbitador han ayudado a la NASA en el diseño y la fabricación de nuevas naves espaciales para que la exploración del espacio pueda continuar
- Los Orbitadores se exhiben orgulloso para que todo el público los vea en Nueva York, Washington D.C., Los Ángeles, y en el centro espacial de Kennedy en la Florida.



El transbordador espacial Discovery en el museo nacional del aire y del espacio de Smithsonian, Washington D.C.

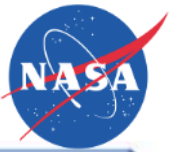


Enterprise, el prototipo de orbitador en el Museo Intrepid Sea, Air y Space en Nueva York



Endeavour en exhibición en California "Science Center" en LA

Atlantis at KSC Visitor Complex



Qué es la Corrosión?



- La corrosión es el deterioro de un material debido a la reacción con su entorno (M.G. Fontana). Literalmente significa “roer.”
- La degradación implica el deterioro de las propiedades del material.
- Los átomos de metal están presentes en la naturaleza en compuestos químicos (es decir, minerales).
- Los metales en su estado no combinado están en un estado de alta energía.
- La tendencia natural es corroerse y volver al estado de baja energía
- La corrosión se puede denominar como metalurgia en sentido inverso.

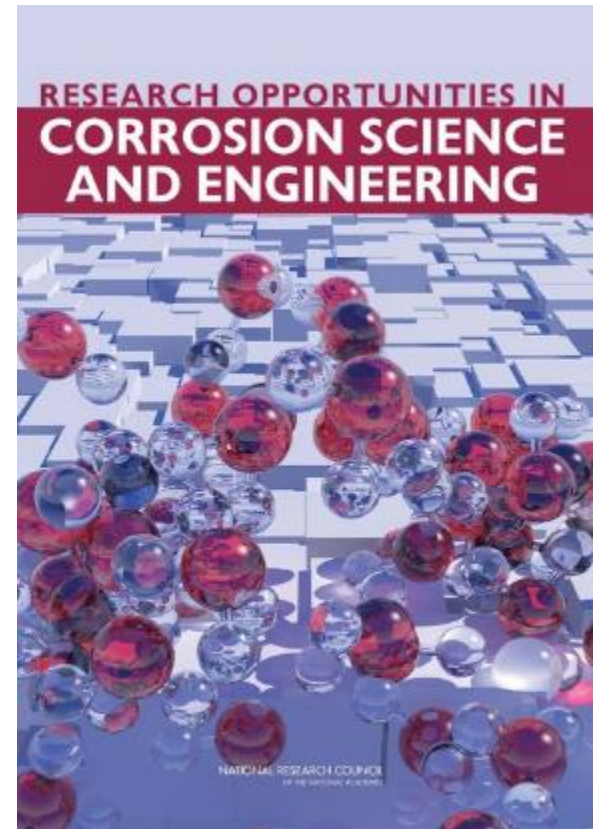


Corrosión en un tractor/transportador de acero estructural

Grandes Desafíos de la Corrosión

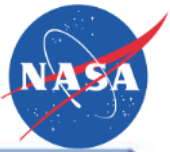
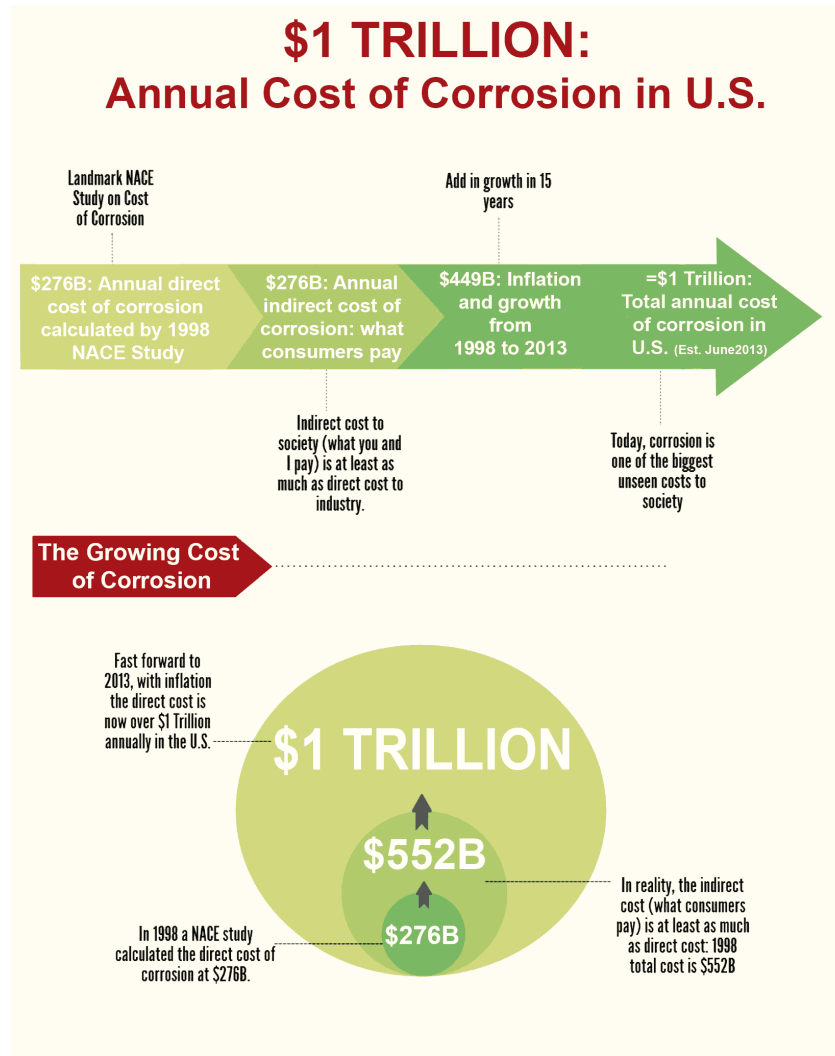


- Desarrollo de materiales y recubrimientos resistentes a la corrosión, efectivos, no muy costosos, y de bajo impacto ambiental.
- Modelado de alta confiabilidad para la predicción de la degradación por corrosión en ambientes reales en servicio.
- Pruebas de corrosión aceleradas bajo condiciones de laboratorio controladas. Estas pruebas se correlacionarían cuantitativamente con el comportamiento a largo plazo observado en entornos de servicio.
- Una predicción precisa del tiempo de servicio restante hasta que se requieran grandes reparaciones, reemplazos o revisiones. Es decir, pronóstico acertado de la corrosión.



National Research Council,
2011. *Research Opportunities in
Corrosion Science and Engineering*.
Washington, DC: The National
Academies Press.

Costo de la Corrosión



- El costo directo anual de la corrosión en todo el mundo supera el 3 - 4% del producto interno bruto (PIB) mundial (2013), con un costo de US \$ 2,5 trillones/año (2017).
- Los costos directos no incluyen los daños ambientales, el desperdicio de recursos, la pérdida de producción o las lesiones personales.

- La industria aeroespacial emplea aleaciones de aluminio de alta resistencia como materiales estructurales para aviones debido a una combinación de propiedades mecánicas valiosas, relación de resistencia a peso, buena resistencia a la corrosión, fácil reciclabilidad y formabilidad.
- El aluminio debe alearse con otros elementos para mejorar su resistencia mecánica.
- Esta aleación de aluminio con otros elementos metálicos perjudica sus propiedades de resistencia a la corrosión.
- La reducción de la resistencia a la corrosión se produce como resultado de la microestructura heterogénea atribuida a la segunda fase de partículas intermetálicas de diversos tamaños y composiciones en la matriz de aleación de aluminio.
- La presencia de estas partículas intermetálicas en la microestructura de la aleación de aluminio es a menudo responsable por la corrosión localizada en forma de picaduras, corrosión intergranular, corrosión por exfoliación, etc., dependiendo del tipo de aleación.
- Las superficies de las aleaciones de aluminio hay que recubrirlas para mejorar su resistencia a la corrosión.





Chapter 9: Corrosion control in space launch vehicles
Corrosion Control in the Aerospace Industry, Edited by
S. Benavides, Woodhead Publishing Series in Metals
and Surface Engineering, 2009.

Orión 37 días antes del Primer Vuelo de Prueba

