



SODINOX

ELECTROPULIDO

DOSSIER TÉCNICO

**Reducción de la huella de carbono
y la toxicidad en el tratamiento
de superficies**

DECAPADO Y PASIVADO SOSTENIBLES EN ACEROS INOXIDABLES

01 Introducción y marco regulatorio

Resumen. El tratamiento de superficies en aceros inoxidable ha dependido históricamente de formulaciones agresivas de ácido nítrico (HNO_3) y ácido fluorhídrico (HF). Garantizan la eliminación de la cascarilla y una pasivación adecuada, pero conllevan severas limitaciones en seguridad laboral, gestión de residuos y cumplimiento normativo (REACH).

Este dossier analiza las dos corrientes de sustitución actuales: la eliminación del HF mediante oxidantes alternativos y el paso del pasivado nítrico a sistemas de ácido cítrico bajo ASTM A967.

La integridad de la capa pasiva de óxido de cromo (Cr_2O_3) es el parámetro crítico que determina la resistencia a la corrosión localizada (*pitting* y *crevice*). Los procesos térmicos previos — soldadura, corte por plasma, tratamiento térmico— alteran la superficie y generan cascarilla de óxido de hierro.

Para restaurar las propiedades óptimas del material es imperativo aplicar procesos secuenciales de **decapado** (remoción de la capa desprovista de cromo) y **pasivado** (oxidación química forzada para enriquecer la relación Cr/Fe).

El endurecimiento de los límites de vertido, las restricciones a la emisión de NO_x y el riesgo de necrosis tisular por HF han obligado a rediseñar la química de estos baños.



Corrosión por picadura (*pitting*)



Corrosión por resquicios (*crevice*)

02 El rol del fluoruro y sus riesgos

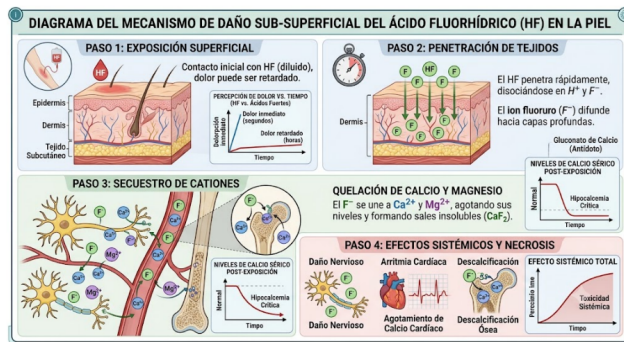
En el decapado tradicional de austeníticos (AISI 304, 316L...), el ácido nítrico actúa como oxidante principal y el ácido fluorhídrico como agente acomplejante esencial.

El HF disuelve los óxidos de hierro y cromo formando complejos fluoro-metálicos altamente estables:



Pese a su eficiencia cinético-química, el ion fluoruro libre (F^-) es una de las mayores amenazas del entorno industrial. Produce quemaduras graves en ojos y piel y, en exposiciones prolongadas, descalcificación ósea. Su mayor peligro es la capacidad de penetrar los tejidos y quelar el calcio y el magnesio de la sangre, provocando paros cardíacos por hipocalcemia.

Ello exige protocolos de seguridad extremadamente costosos: brigadas de dos personas incluso para trabajos menores, antídotos de gluconato cálcico y sistemas de extracción masiva. Además, el tratamiento de efluentes requiere precipitar fluoruro cálcico (CaF_2), generando un volumen ingente de lodos peligrosos.



Mecanismo de daño sub-superficial del ácido fluorhídrico (HF) en la piel

El ácido fluorhídrico también se conoce como fluoruro de hidrógeno, ácido hidrofluórico o ácido de grabado.

03 Alternativas libres de fluoruro

La sustitución viable del HF se ha logrado con formulaciones de ácido sulfúrico (H_2SO_4) combinado con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como oxidante, o mediante ácidos orgánicos activados.

En estos sistemas —baños estabilizados tipo *Clean-Pickling*— la remoción de la cascarilla no depende de la complejación por fluoruro, sino de un ataque controlado a la interfaz metal-óxido: el peróxido oxida el hierro ferroso (Fe^{2+}) a férrico (Fe^{3+}), manteniendo un potencial redox elevado que favorece el desprendimiento de la cascarilla por socavación subsuperficial.

Parámetro operativo	Baño tradicional (HNO_3/HF)	Sistema sostenible ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$)
Temperatura de operación	20 °C – 45 °C	40 °C – 55 °C
Emisión de gases y vapores	Alta (NOx, vapores de HF)	Muy baja (sin gases tóxicos)
Tratamiento de efluentes	Complejo (precipitación con cal, $\text{Ca}(\text{OH})_2$)	Simple (neutralización estándar con sosa, NaOH)
Generación de lodos	Muy elevada	Reducida (hasta un 60 % menos en peso)

Reto de ingeniería. La inestabilidad térmica del peróxido de hidrógeno, que se descompone exotérmicamente por encima de 50 °C o con altas concentraciones de hierro en disolución (catálisis de Fenton). Las formulaciones modernas incorporan estabilizadores orgánicos — ácidos fosfónicos o alcoholes alifáticos— que secuestran los iones metálicos libres y prolongan la vida útil del oxidante.

04 Pasivado: ácido cítrico vs. nítrico

Mecanismo comparativo

El método convencional emplea ácido nítrico (20 %-50 % v/v, según AMS2700 o la antigua QQ-P-35) y actúa por **oxidación directa**: disuelve el hierro libre y convierte químicamente el cromo metálico residual en óxido de cromo.

El **ácido cítrico** ($C_6H_8O_7$), amparado por la norma **ASTM A967**, opera por **quelación selectiva**: sus grupos carboxilo ligan los átomos de hierro libre de la superficie —procedentes de herramientas de acero al carbono, contaminación atmosférica o mecanizado— formando un citrato de hierro soluble que se elimina en el enjuague.

Al no tener potencial de oxidación suficiente para atacar el cromo ni el níquel, estos permanecen intactos. La exposición posterior al oxígeno permite que el cromo superficial se oxide de forma natural y ultrapura, con ratios Cr/Fe comparables a los del ácido nítrico.

Ventajas técnicas y de planta

- **Seguridad de operarios y ecosistema:** compuesto orgánico catalogado GRAS. No produce quemaduras químicas severas ni emite vapores ácidos nocivos; elimina la necesidad de *scrubbers* en la línea de pasivado.
- **Sin emisiones de NOx:** frente a los óxidos de nitrógeno del baño nítrico, el cítrico genera cero emisiones gaseosas contaminantes.
- **Selectividad del sustrato:** un exceso de tiempo o concentración en baño nítrico puede provocar *etching* y picaduras, arruinando tolerancias críticas. El cítrico no ataca la matriz, independientemente del tiempo de inmersión: el rechazo por sobreexposición se reduce a cero.
- **Biodegradabilidad:** efluentes neutralizables con bases comunes y, en muchas jurisdicciones, vertibles a tratamiento biológico municipal; hasta un 80 % menos de coste en gestión externa de residuos peligrosos.

05

Control de calidad y validación

La capa pasiva óptima tiene un espesor de 1 a 5 nanómetros: su presencia no es constatable por inspección visual simple. La norma ASTM A967 define métodos claros de aceptación y rechazo.

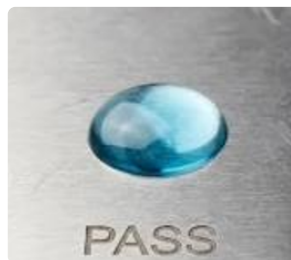
Ensayos rápidos de taller

- **Inmersión en agua:** ciclos alternos en agua destilada y aire. La aparición de puntos de óxido indica hierro libre residual y fallo del pasivado.
- **Alta humedad:** 95–100 % HR a 38 ± 2 °C durante 24 h como mínimo. Excelente para evaluar la homogeneidad de la capa.
- **Sulfato de cobre (CuSO_4):** para austeníticos de la serie 300. Si hay hierro libre se deposita cobre metálico visible como mancha rojiza. Exige eliminar después los restos de sulfato.

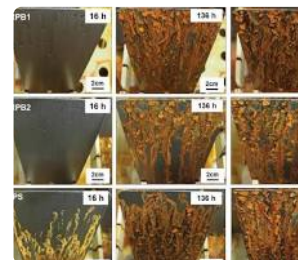
Caracterización avanzada

Para aplicaciones críticas —instrumental quirúrgico, semiconductores— se recurre a XPS o AES, midiendo el perfil de concentración elemental en profundidad. El proceso se certifica cuando el perfil demuestra:

- ratio **Cr/Fe superior a 1,5** (preferiblemente $> 2,0$ en la zona más externa);
- ausencia total de óxidos de hierro en los primeros 2 nm.



Verificación con sulfato de cobre



Test de niebla salina



Test de pasivación por conductividad



Test de ferroxil

06 Viabilidad económica e impacto operativo

El coste de adquisición de las formulaciones eco-amigables puede ser algo superior por kilogramo, pero el análisis del coste total de propiedad (TCO) demuestra un retorno de la inversión favorable a medio plazo.

Reducción de costes de energía

Muchas formulaciones cítricas modernas operan eficazmente a temperatura ambiente o moderada (20 °C – 40 °C), disminuyendo el consumo eléctrico o de vapor necesario para calentar grandes tanques de inmersión frente a las variantes nítricas térmicas.

Menor frecuencia de renovación de baños

Con sistemas de lazo cerrado —separación por membranas o retardación de ácido— los baños cítricos y de sulfúrico-peróxido no

se saturan tan rápido de lodos insolubles, ampliando los intervalos de parada de planta para limpieza de tanques.

Menores costes de EPP y seguros

Al reducir drásticamente el riesgo de accidente grave por HF o vapores nitrosos, bajan las primas de seguros industriales y el gasto corriente en equipos de protección especializados y sistemas de ventilación forzada.

“Los ahorros estructurales compensan ampliamente el mayor coste unitario de la química sostenible”

07 Conclusiones y Línea Verde SDINOX

La transición hacia decapados libres de ácido fluorhídrico y pasivados basados en ácido cítrico no es ya una declaración de intenciones medioambientales, sino una **evolución técnica madura y obligada** para la ingeniería de superficies contemporánea.

Los datos cinéticos y termodinámicos demuestran que la quelación selectiva del ácido cítrico permite igualar o superar la resistencia a la corrosión de los métodos tradicionales, con perfiles nanométricos de ratio Cr/Fe sobresalientes.

Adoptar estas tecnologías bajo estándares consolidados como ASTM A967 permite asegurar la calidad de los componentes, mitigar los pasivos ambientales, garantizar entornos de trabajo seguros y blindar las operaciones ante normativas de vertido cada vez más exigentes.

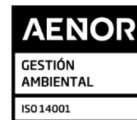
Línea Verde SDINOX

- **Desengrasante:** completamente biodegradable.
- **Pasivante:** completamente biodegradable.
- **Decapante de proyección:** exento de HF, no irritante, bajo en nitratos y flúor, bajísimo contenido de humos y poco gas nitroso; no tóxico por contacto con la piel ni por inhalación.

Trabajando en el futuro, el inoxidable se trabaja en verde



Compromiso y responsabilidad con el medio ambiente





WWW.SDINOX.COM

918 956 833
info@sdinox.com

Avda. Yeseros 9. Valdemoro
Madrid — 28340

Dpto. Técnico SDINOX — consúltenos en info@sdinox.com

