

# Falla prematura de un acumulador de energía solar térmica AEST

## Premature failure of an AEST solar thermal storage tank

Presentación: 10/10/2023

### **Julio Miguel Costa**

Departamento de Materiales Centro, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)  
[jcosta@inti.gob.ar](mailto:jcosta@inti.gob.ar)

### **Jorge Baldo**

Departamento de Materiales Centro, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba  
[jbaldo@inti.gob.ar](mailto:jbaldo@inti.gob.ar)

### **Juan Carlos Gozálvez**

Departamento de Materiales Centro, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)  
Departamento de Materiales, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.  
[gozálvez@inti.gob.ar](mailto:gozálvez@inti.gob.ar)

### **Alejandro Domínguez**

Departamento de Mecánica Centro, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)  
Departamento de Materiales, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.  
[aadominguez@inti.gob.ar](mailto:aadominguez@inti.gob.ar)

### **Resumen**

El trabajo realizado es un análisis de falla de un AEST, construido con chapa de acero inoxidable. Luego de observar pérdidas de agua del tanque, se inspeccionó internamente apreciando zonas corroídas con numerosas fisuras en zonas deformadas y uniones soldadas. Se extrajeron muestras que fueron analizadas para caracterizar el acero inoxidable, productos de corrosión y morfología de ataque. Además, se calcularon las tensiones residuales en las zonas deformadas, concluyendo que la falla prematura fue por corrosión bajo tensión, provocando fisuras en zonas más tensionadas, en un medio corrosivo por cloruros, pH ligeramente ácido y temperaturas entre el ambiente y 90°C.

Palabras clave: corrosión, falla prematura, acumulador térmico solar.

### **Abstract**

The work carried out is a failure analysis of an AEST, built with stainless steel sheet. After observing water leaks from the tank, it was inspected internally, observing corroded areas with numerous cracks in deformed areas and welded joints. Samples were extracted and analyzed to characterize the stainless steel, corrosion products and attack morphology. In addition, the residual stresses in the deformed areas were calculated, concluding that the premature failure was due to stress corrosion, causing cracks in more stressed areas, in a corrosive environment due to chlorides, slightly acidic pH and temperatures between ambient and 90°C.

Keywords: corrosion, premature failure, solar thermal accumulator

## Introducción

El equipo sujeto al análisis es un acumulador de energía solar térmica EST de uso domiciliario, de 200 litros de capacidad (Figura 1), el cual estuvo trabajando durante cuatro años en forma continua, quedando fuera de servicio por tratarse de un tipo de deterioro/daño que no tiene reparación, este equipo fue utilizado para calentar agua desde la temperatura ambiente hasta 90 °C máximo, con agua de red provisto por una empresa de la provincia de Córdoba, luego de aprox. dos años se produjo una importante reducción en el rendimiento del equipo, evidenciado por una disminución en la temperatura de salida del acumulador, recién al cuarto año comenzó a presentar pequeñas pérdidas a través del material aislante y luego de un mes manifestó una fuga masiva próximo a uno de los cabezales del tanque.

## Desarrollo

### Inspección visual

Después de detectadas las pérdidas, se removió parcialmente la cobertura metálica exterior y el material aislante térmico, apreciando una gran cantidad de agua que fluía de manera continua desde diversas partes del acumulador. Luego de desmontar el equipo (Figura 2), se observó una importante deformación a lo largo de la soldadura longitudinal del cuerpo cilíndrico apreciando cerca del cordón transversal una fisura pasante de más de 10 cm de longitud (Figura 3) y numerosas fisuras pasantes en varias zonas deformadas del tanque (Figura 4) registradas mediante la técnica de líquidos penetrantes [1].



Figura 1: Acumulador de energía solar térmica AEST de 200 lts



Figura 2: cuerpo del tanque sin la cobertura y material aislante



Figura 3: fisura adyacente a la soldadura longitudinal del cuerpo



Figura 4: fisuras sutiles ramificadas y pasantes

### Caracterización del material

Se realizó un análisis químico, ensayo de tracción y análisis metalográfico para conocer la composición química, las propiedades mecánicas y la microestructura del material, determinando que se trata de una chapa de 0,4 mm. de espesor, deformada en el sentido de laminación, de acero inoxidable austenítico del tipo 304L (Low carbon), con uniones soldadas por arco plasma PAW.

Composición Química [%]								
C	Mn	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Co
0,07	1,10	0,005	0,30	18,36	7,98	0,28	0,38	0,16

Tabla 1: Composición Química

Sentido de la probeta	Resistencia a la tracción R [MPa]	Límite convencional de fluencia $R_{0,2}$ [MPa]	Alargamiento porcentual de rotura A [%]
0°	562,3	305,7	21,8
45°	711,7	274,3	62,5
90°	741,8	271,2	74,0

Tabla 2: Propiedades mecánicas

Rango de Deformación (%)	Valor del Coeficiente n		Desviación Estándar
	n 0°	n 45°	
5-15	0,2817	0,3170	0,001
	0,3170	0,374	0,002
	0,374		0,001

Deformación (%)	Valor del Coeficiente r		$r_m$	$\Delta r$
	r 0°	r 45°		
15	0,73	1,30	1,07	-0,46
	1,30	0,96		
	0,96			

Tabla 3: Propiedades de conformación plástica

### Análisis de los productos de corrosión

Mediante la sonda de electrones del microscopio electrónico de barrido MEB, figura 5, se efectuó un microanálisis por energía dispersa de rayos X EDAX de los productos de corrosión depositados en las zonas dañadas cercanas a las fisuras, determinando en particular la presencia de cloro Cl, otros componentes de la solución S, Na, K, Ca, Al, Si [2] y los elementos del acero inoxidable Fe-Cr-Ni.

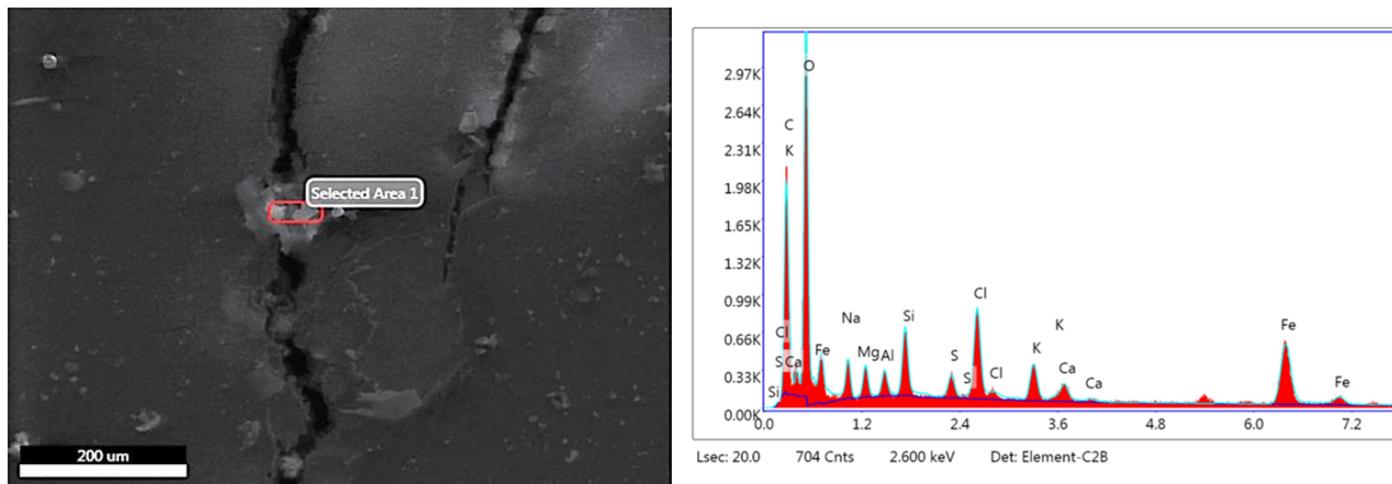


Figura 5: Análisis de productos de corrosión por EDS

### Morfología de ataque

Mediante un análisis metalográfico, figuras 6, 7, 8 y 9, se pudo apreciar la microestructura del acero inoxidable, tratándose de granos austeníticos, equiaxiados y maclados, y determinar el mecanismo de deterioro que afectan a los acumuladores de energía solar térmica [3] corroborando que las fisuras son transgranulares y ramificadas, típicas de los aceros inoxidables austeníticos en medios con presencia de cloruros [4] en soluciones ácidas [5].

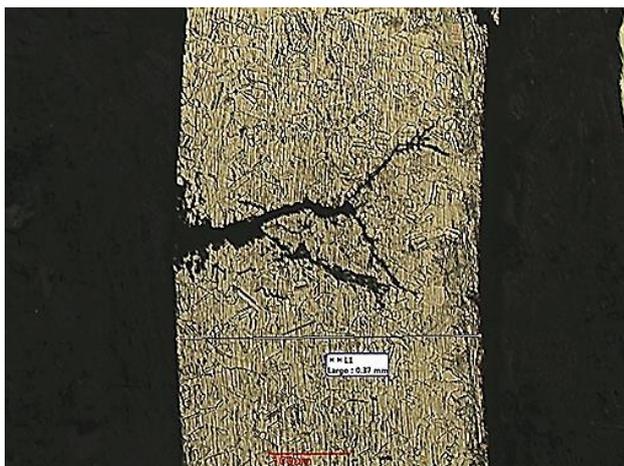


Figura 6: Fisura ramificada 100x

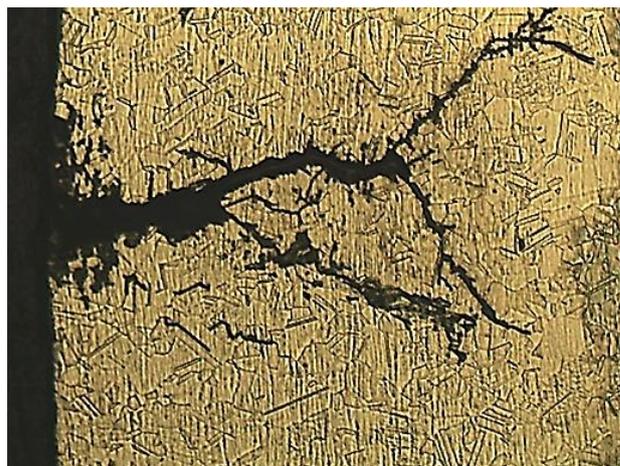


Figura 7: Fisura ramificada 200x

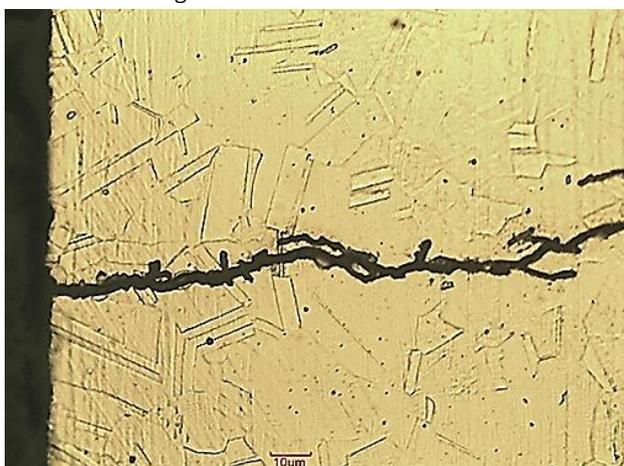


Figura 8: Fisura ramificada 500x

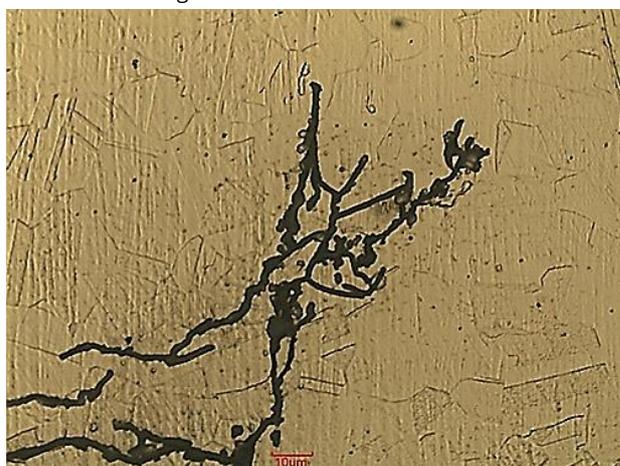


Figura 9: Fisura ramificada 500x

### Determinación de tensiones

Utilizando el método por elementos finitos se calcularon los niveles de tensiones actuantes por presión interior y además se determinaron las tensiones residuales [6] por medio de las ecuaciones indicadas en la tabla 4, en una de las zonas con deformaciones (Figura 10)

$\sigma = \frac{P \cdot r}{e} = \frac{0,02 \cdot 180}{0,4}$ Presión interna	$P_{crit} = \frac{E \cdot e^3}{4 \cdot (1 - \mu^2) \cdot r^3} = \frac{189000 \cdot 0,4^3}{4 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 180^3}$ Presión crítica de pandeo	Módulo de elasticidad E= 189.000 MPa Resistencia a la fluencia $\sigma_{0,2} = 300$ MPa Coeficiente de Poisson = 0,3
--	--	--

Tabla 4: Cálculo de las tensiones y presiones críticas

La tensión actuante, considerando la presión hidrostática causada por 2 metros de altura de columna de agua, resultó de 9,0 MPa y la presión crítica de pandeo del cilindro fue de 0,00057 MPa, apreciando que los niveles de tensiones por presión interior no son significativos y que la presión crítica de pandeo es muy baja, por tal motivo presiones muy pequeñas serían capaces de producir pandeo y posterior deformación plástica en el material del acumulador.

Con la finalidad de determinar los niveles de tensiones residuales en la zona de la soldadura circunferencial del cuerpo cilíndrico, se realizó un modelo de elementos finitos de la chapa de acero inoxidable austenítico tipo 304, a la cual se le produjo una deformación plástica similar a la observada en la zona mencionada, utilizando elementos tipo cáscara y definiendo al material un comportamiento elastoplástico. Como carga, se aplicó una presión sobre la chapa, de manera que esta copie la forma de la superficie rígida, y luego se retiró la presión y se desactivaron los contactos, de manera que la chapa se recupere elásticamente, determinando que las tensiones residuales son de 300 MPa (figura 10).

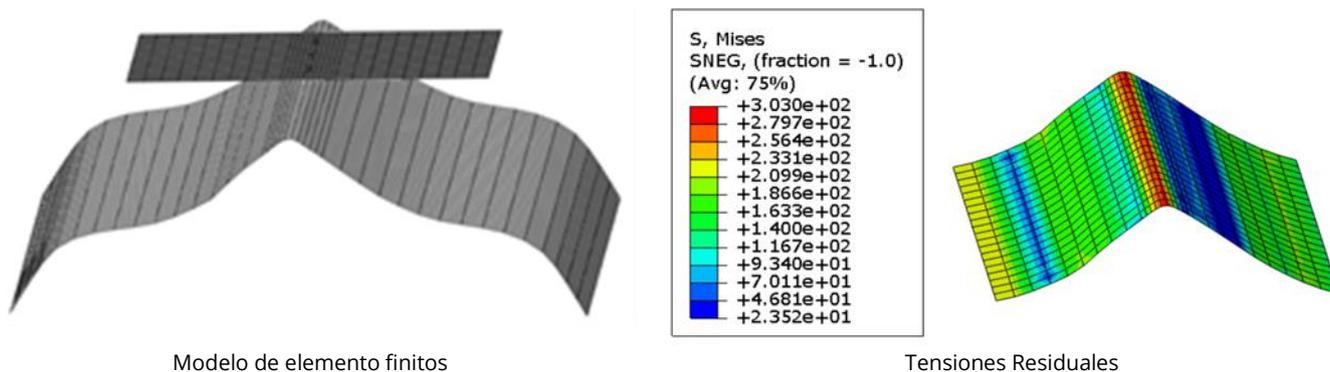


Figura 10. Tensiones residuales

## Conclusiones

Según lo indicado en API 571 (Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry), los componentes sometidos a niveles altos de tensiones, o trabajados (deformados) en frío, son muy susceptibles a la aparición de fisuras por corrosión bajo tensión. Este sería el caso para las deformaciones observadas en el acumulador.

Si bien el espesor del material resultaría apto para soportar las presiones internas con bajos niveles de tensiones, dicho espesor no provee suficiente rigidez para evitar la creación de deformaciones plásticas debidas a inestabilidad elástica y posterior colapso plástico. Luego, estas deformaciones proporcionarían niveles de tensiones de tracción suficiente para favorecer, simultáneamente en un medio agresivo [6], la aparición de fisuras por corrosión bajo tensión SCC en los aceros inoxidables austeníticos del tipo 304L, en presencia de cloruros Cl<sup>-</sup>, a temperaturas entre 90°C y la ambiente, en soluciones ácidas.

### Agradecimientos

Los autores quieren agradecer y expresar su reconocimiento a las siguientes personas del INTI Córdoba: ing. Leda Lirio, Lic. Melina Angelelli y Tec. Pablo Escalante del Laboratorio Químico, Tec. Germán Maurigh de Ensayos Mecánicos, Tec. Ciro Vazquez, Tec. Luis Arreguy y tec. Fernando Almada del Taller y al becario Sergio Farías alumno de ingeniería Metalúrgica

### Referencias

- [1] J. Gozalvez, Módulo “Inspección con ensayos no destructivos del Código NBIC” del Curso de Inspección de Calderas y Recipientes a Presión desarrollado por el INTI del Programa de la Junta Nacional de Calderas y Recipientes a Presión, 2017.
- [2] J. Baldo, Módulos “Mecanismo de Deterioro” y “Tratamiento de agua en calderas” del Curso de Inspección de Calderas y Recipientes a Presión organizado por el INTI del Programa de la Junta Nacional de Calderas y Recipientes a Presión, 2017.
- [3] A. Domínguez y J. Baldo, “Mecanismos de deterioro en acumuladores de Energía Térmica Solar EST”, Seminarios INTI organizado con la Cámara Argentina de Fabricantes de Equipos de Energía Solar Térmica CAFEEST y con CADIEC, Córdoba, 2020.
- [4] J. Baldo, “Evaluación a la susceptibilidad de los materiales a la corrosión bajo tensión”, III Jornadas AAC-SAM, Santa Fe, 1986.
- [5] N. Platts, R. Adams, “Review of SCC in low chloride environments relevant to HAST”, Research Report RR902, 2011.
- [6] R. Nishimura, “SCC Failure Prediction of Austenitic Stainless Steels in Acid Solutions”, Corrosion Vol.46, No4, 311-318, 1990, NACE