

TRATAMIENTO TÉRMICO A TUBOS DE HORNO DE REFORMADO IN SITU

Mosqueira, Martin, YPF S.A., martin.mosqueira@ypf.com
Echaniz, Patricio, YPF S.A., patricioechaniz@ypf.com
Bischoff, Alexander Mikhail, YPF S.A., alexander.bischoff@ypf.com

Sinopsis

Durante la operación normal de la unidad de reformado de nafta y transcurridos dos años desde la intervención por mantenimiento, se produjo la falla de un tubo de un horno. A raíz de esta falla, se generó un volumen de fuego que afectó las propiedades del resto de los tubos en su cercanía imposibilitando la operación segura del equipo. Ante la falta de stock de tubos aleados para reemplazar los afectados, se evaluó realizar un tratamiento térmico in situ a todos los tubos del horno para reestablecer las propiedades mecánicas y metalúrgicas. Esta evaluación se llevó a cabo mediante ensayos mecánicos realizados a probetas extraídas de los tubos afectados para determinar qué temperatura y tiempo eran los adecuados para restituir las propiedades mecánicas. Observando que los resultados fueron satisfactorios, se decidió realizar el tratamiento al horno. Posteriormente, se ensayaron tanto tubos in situ como probetas para verificar la condición en la que quedaron obteniéndose, nuevamente, resultados satisfactorios, dejando confiable al equipo para comenzar con la operación segura de la unidad hasta el próximo paro de mantenimiento.

Introducción

El objetivo de este trabajo es dar a conocer una práctica no habitual de tratamiento térmico, la estrategia utilizada por YPF para la toma de decisiones y los resultados obtenidos. Demostrando como las decisiones con sustento técnico y pruebas de pequeña magnitud, pueden ser una herramienta que acorte los plazos y permita tomar decisiones de alto impacto con menos riesgo.

Resultando así en una pronta restitución del servicio de un horno horizontal de reformado, unidad crítica de alto lucro cesante.

Desarrollo

1. Falla del equipo

Operando en condiciones normales y siendo monitoreado por termografías periódicas y la instrumentación propia del horno, repentinamente se observó un incremento en la temperatura de los termometales ubicados en los primeros tubos de uno de sus ramales de la zona radiante, lo que se interpreta como la pérdida de contención de tubos en el interior del hogar.

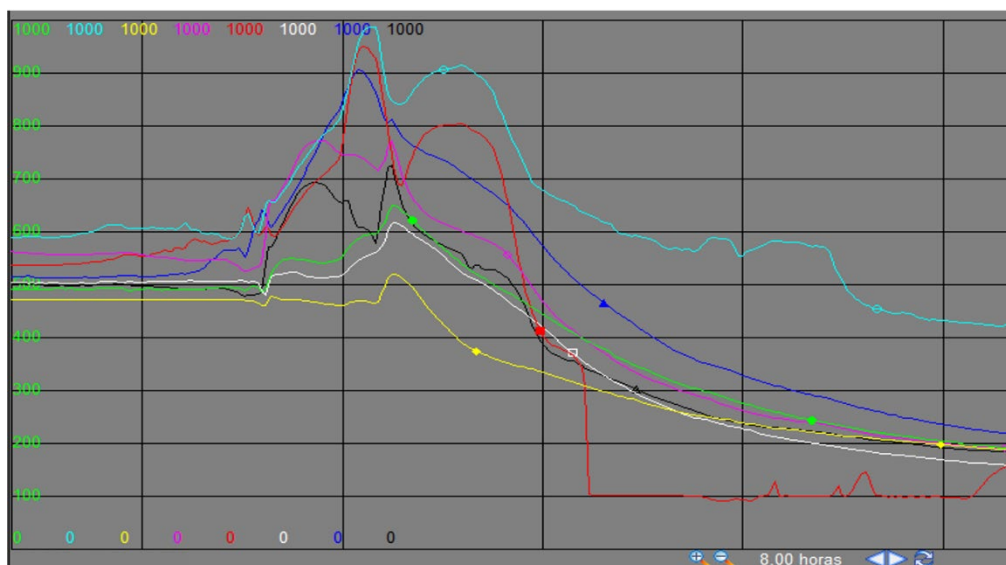


Figura 1. Temperatura de zona radiante

Ante la pérdida de contención del fluido circulante, se produjo la inflamación instantánea del mismo elevando la temperatura de hogar afectando a los tubos cercanos y las primeras filas de tubos del haz convectivo. Instantes después de la falla, los instrumentos del horno revelaron la caída de presión del circuito del haz convectivo que evidenciaron la falla del mismo.

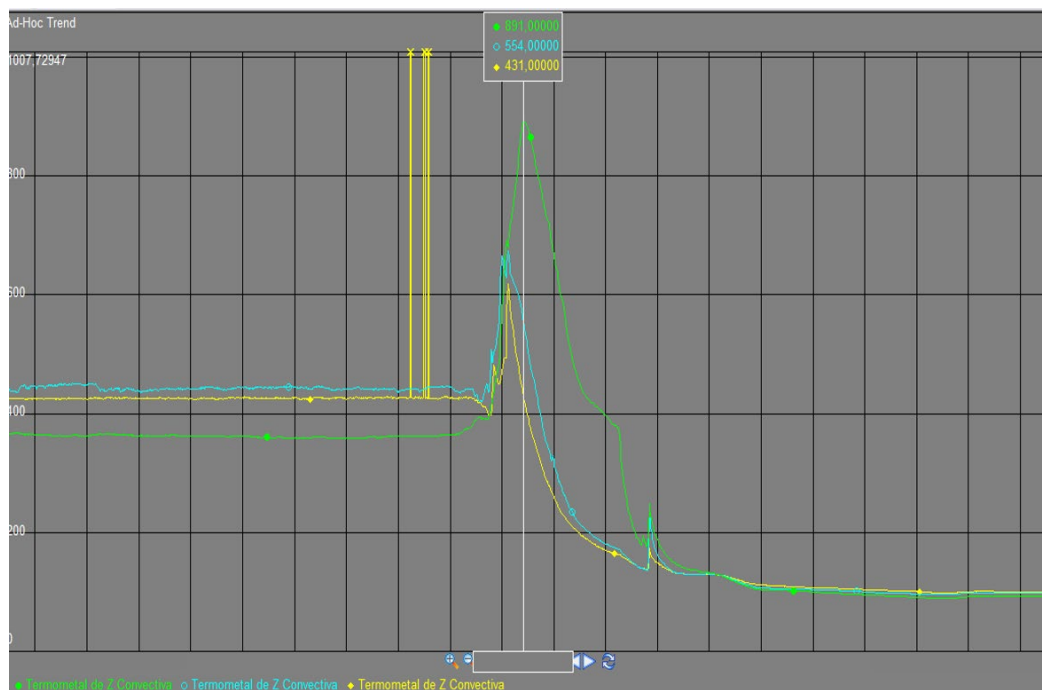


Figura 2 Temperaturas haz convectivo

Una vez interrumpida la operación se logró avistar desde mirillas que la falla tuvo origen entre los primeros tubos del ramal derecho. La falla se produjo en el cuarto tubo, contados en orden ascendente, del hogar derecho del horno.

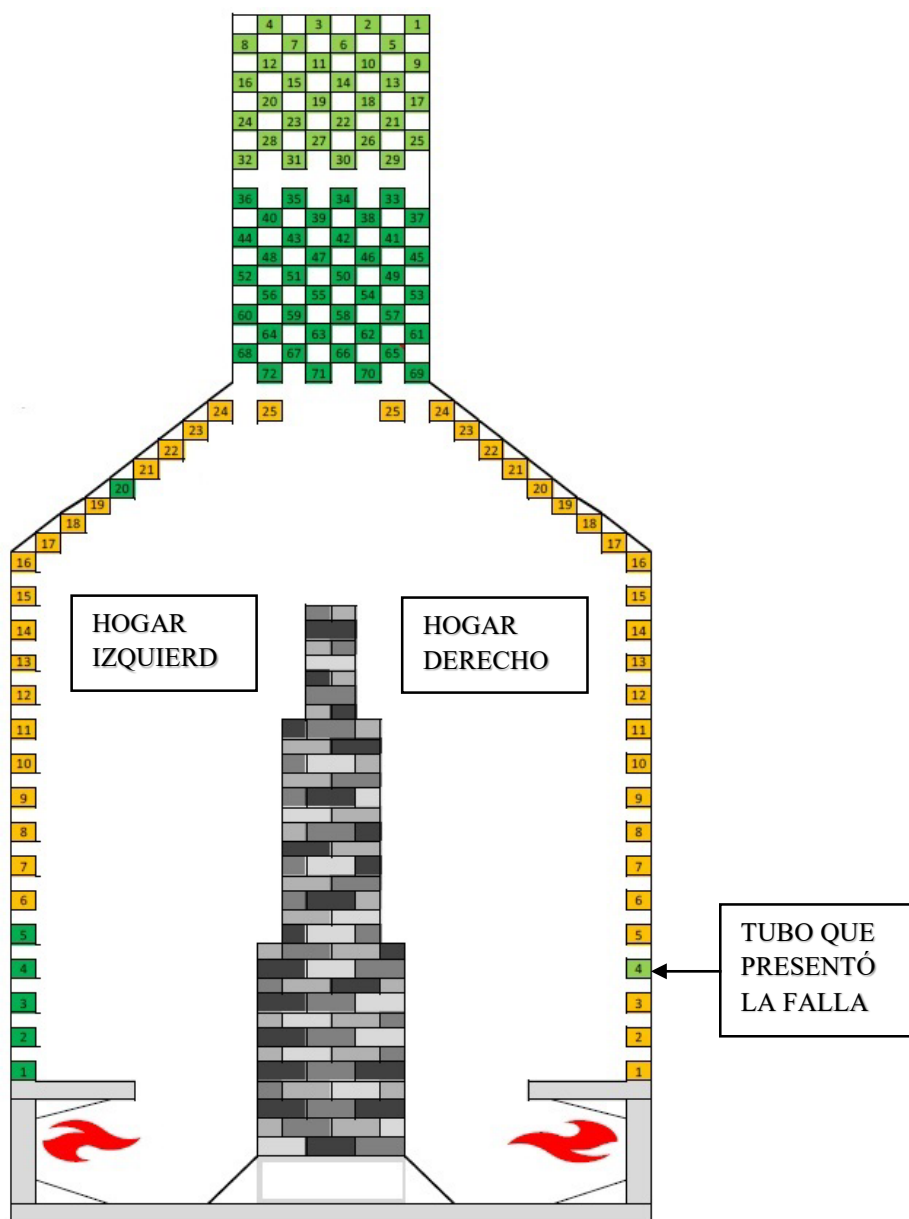


Figura 3. Esquema de la vista frontal de horno.

Cuando se generaron las condiciones adecuadas para el ingreso se corroboró que la falla presentó morfología de deterioro por creep. La falla tenía orientación longitudinal y una extensión de 160 mm; La misma se halló cerca de uno de los codos de retorno del horno en la zona radiante (extremo del horno), y se encontraba accesible desde el piso del horno.



Figura 4. Falla encontrada en el tubo de la zona radiante

Finalmente logrando acceder al haz convectivo se pudo identificar el reventón de los dos tubos centrales de la primera fila coincidentes en ubicación con la falla del tubo de la zona radiante.



Figura 5. Fallas halladas en los tubos de la zona convectiva

2. Evaluación del daño generado por la falla (ensayos en los tubos) y discusión de las acciones a tomar

Como se observó en el punto anterior, las elevadas temperaturas originadas por la falla impusieron la necesidad de realizar una evaluación de daños para trazar la estrategia de reparación más conveniente. Se analizaron las posibles consecuencias de la exposición a las altas temperaturas y los principales métodos para dimensionar el daño, concluyendo que el principal factor a evaluar fueron las alteraciones microestructurales a las que esta metalurgia es susceptible (SA-335 Gr. P9), las cuales se manifestaron a través del aumento de dureza como principal indicador. También se realizaron réplicas metalográficas e inspección visual.

Tabla 1. Cantidad de ensayos realizados

Ensayos realizados			
Dureza In situ	Dureza en banco Lab. Inspección	Metalografía en Lab. Inspección	Replicas metalográficas
482	50	5	126

Los resultados de las durezas rápidamente permitieron delimitar la zona afectada por el siniestro y junto con la inspección visual se delineó el criterio para definir el alcance de los tubos a reemplazar. La extracción de los tubos a reemplazar también permitiría la realización de los ensayos mecánicos destructivos para evaluar las propiedades mecánicas de los tubos extraídos y extrapolar su condición al resto del horno.

Los primeros 5 tubos del ramal que presentó la falla (incluido el que falló) arrojaron valores de dureza del orden de los 300HB en más de una de las 5 ubicaciones donde se realizó la medición en cada tubo.

En los 20 tubos restantes del mismo ramal, se obtuvieron valores de dureza levemente menor, pero con una apariencia visiblemente más favorable, a excepción de uno de ellos que presentó durezas superiores a los 310 HB y curvatura que dificultaría la soportación en servicio.

La distribución de los resultados de dureza fue coincidente, con la ubicación de la falla a la altura del tubo pinchado en la zona radiante y el posterior colapso de los tubos centrales de la primera fila del haz convectivo reflejando elevadas durezas en los tubos cercanos de ambos hogares.

Finalmente, con el resultado claramente desfavorable en los 4 tubos aledaños al tubo pinchado se definió el reemplazo de estos, al igual que otro tubo identificado con una dureza mayor a 310HB.

Como se mencionó antes los tubos extraídos permitieron obtener probetas para distintos ensayos.

Los resultados de estos ensayos son los que se rotulan como “S/TT” (sin tratamiento térmico) en las tablas de las secciones posteriores.

Dado que los resultados de las probetas, tal cual se encontraban en el horno (S/TT) fueron claramente **insatisfactorios** se impone la necesidad de analizar un tratamiento térmico que restituya parcialmente las propiedades mecánicas del material de los tubos que no serían reemplazados y que por presentar durezas semejantes a las de las probetas no estaban en condiciones de operar.

Para el caso del haz convectivo, que por diseño está construido en material de Acero al Carbono, la evaluación se realizaría tomando como principal indicador de integridad, los resultados de las réplicas metalográficas. Definiendo finalmente el reemplazo de 40 de los 72 tubos que componen el haz convectivo.

3. Evaluación de las curvas del tratamiento térmico (TT) para restitución de propiedades

En primer lugar, se extrajeron cuatro tramos de tubos afectados por el calor para realizar metalografías, composición química y ensayos de propiedades mecánicas. El objetivo fue caracterizar al material y, en base -principalmente- a las propiedades mecánicas, determinar si el tubo era apto para continuar en servicio.

El primer ensayo realizado fue dureza (tomados en un durómetro de banco) y, rápidamente, se observaron valores muy altos, correspondiéndose con los valores tomados in situ. Esto nos dejó en una posición muy desfavorable en cuanto a la cantidad de tubos afectados, ya que, no se contaba con los suficientes para reemplazar la totalidad.

Las opciones disponibles fueron dos: esperar la llegada de nuevos tubos o realizar un tratamiento térmico a todos los tubos del horno in situ. La primera opción fue rápidamente descartada cuando se estimó que la cantidad de días de espera podía ser mayor a 40. Con lo cual, se decidió continuar con la segunda.

Para esto se realizaron tratamientos térmicos en laboratorio a los cuatro tramos de tubos a diferentes temperaturas con el fin de analizar cuál era la adecuada para restituir las propiedades.

Las probetas fueron sometidas a 4 tratamientos donde se varió la temperatura máxima alcanzada: 350°C; 500°C; 700°C y 850°C.

Los resultados de los ensayos se muestran en las siguientes tablas e imágenes:

- **Composición química**

La composición de las cuatro muestras ensayadas dio dentro del rango establecido según la norma de referencia ASTM A335 Gr. P9.

Tabla 2. Composición química del P9

Elemento [%]	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P
ASTM A335 Gr. P9	0.15 máx.	0.025 - 1.00	0.30 - 0.60	8.00 - 10.00	0.90 - 1.10	0.025 máx.	0.025 máx.

- **Dureza Brinell**

Por cada probeta se tomaron 3 valores de dureza en cada temperatura mencionada y, además, en el estado S/TT.

En la siguiente tabla se muestran los valores promedios de las cuatro probetas.

Tabla 3. Dureza en función del tratamiento

Temperatura del tratamiento	HBN
S/TT	366
350°C	363
500°C	340
700°C	240
850°C	178

- **Ensayo de aplastamiento**

Se realizó un ensayo de aplastamiento por cada probeta a cada temperatura y en el estado S/TT. Los resultados de cada probeta son muy similares entre sí y se resumen a continuación:

Tabla 4. Resultados del ensayo de aplastamiento en función del tratamiento

Temperatura del tratamiento	Resultado	Comentarios
S/TT	No satisfactorio	Frágil total
350°C	No satisfactorio	Frágil total
500°C	No satisfactorio	Frágil
700°C	No satisfactorio	Fisuras al final (lado tracción exterior)
850°C	Satisfactorio	-

- **Ensayo de charpy**

Por cada probeta se realizaron 3 ensayos charpy luego del tratamiento térmico a la temperatura mencionada y, además, en el estado S/TT.

En la siguiente tabla se muestran los valores promedios de las cuatro probetas.

Tabla 5. Energía en función del tratamiento

Temperatura del tratamiento	Joules
S/TT	18
350°C	34
500°C	52
700°C	186
850°C	258

- **Ensayo de tracción**

Por cada probeta se realizaron 3 ensayos de tracción, pero en este caso se realizaron sólo a las temperaturas de 700°C y 850°C, dado que con los resultados de los otros ensayos se consideró que no era necesario realizarlo para las muestras a 300°C y 500°C.

En la siguiente tabla se muestran los valores promedios de las cuatro probetas:

Tabla 6. Resultados del ensayo de tracción en función del tratamiento

Temperatura del tratamiento	$\sigma_{0,2}$ (Mpa)	σ_{max} (Mpa)	δ (%)
S/TT	421	684	4
700°C	357	621	24
850°C	299	569	33
Rango*	205 min	415 min	30 min

*según ASTM A335 Gr. P9

- **Metalografía**

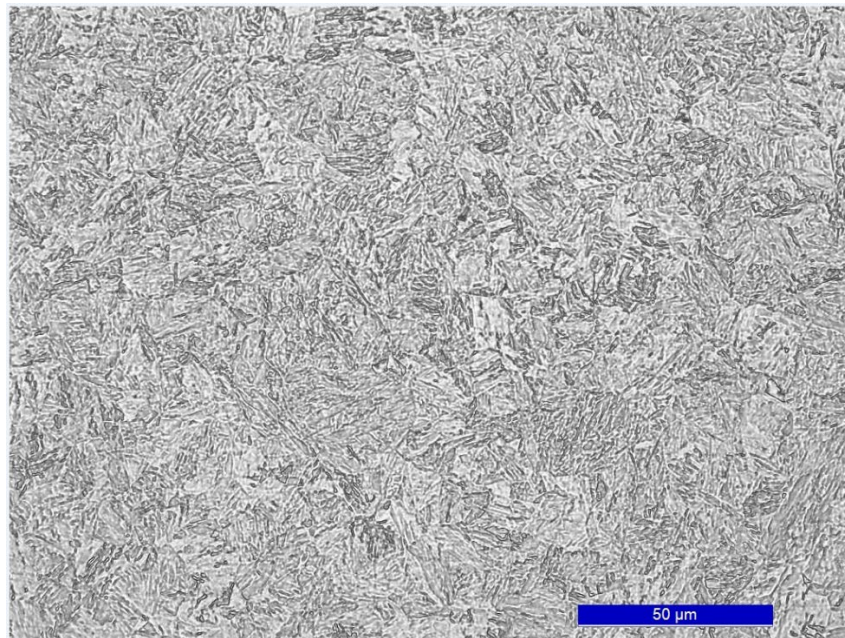


Figura 6. Tubo N°4 afectado por la llama (sin tratamiento térmico). Se observa una microestructura martensítica. Ataque con Vilella, 500X.

4. Plan de monitoreo y control de la temperatura

El horno contaba con 48 termocuplas de monitoreo continuo que estaban en su mayoría distribuidas en los tubos de la zona radiante y unas pocas en la zona convectiva. Junto con estas termocuplas, se tomaron termografías cada 3 horas para controlar que el calentamiento de todos los tubos fuera lo más homogéneo posible.

Por otro lado, fue necesario evaluar cómo controlar la temperatura de la zona convectiva, ya que, los tubos eran de acero al carbono y la temperatura que alcanzarían sería cercana a la del hogar (850°C). Para evitar un deterioro del material de estos tubos, se analizó la opción de hacer circular un fluido que los mantuviera refrigerado (en primera instancia vapor), pero no se contaba con la instalación necesaria para hacer circular este fluido. Con lo cual, se decidió que circulara el fluido de operación normal, es decir, hidrocarburo (nafta).

Esta decisión fue respaldada en base al análisis de las temperaturas normales de operación. Se observó que la temperatura del hogar rondaba entre los 850 y 900°C mientras que, la temperatura de los tubos de la convectiva no superaba los 450°C. Este análisis dio lugar a que se llevara a cabo el tratamiento con la circulación de nafta en los tubos de la zona convectiva.

A continuación, se muestra cómo fue la curva propuesta vs la curva real.

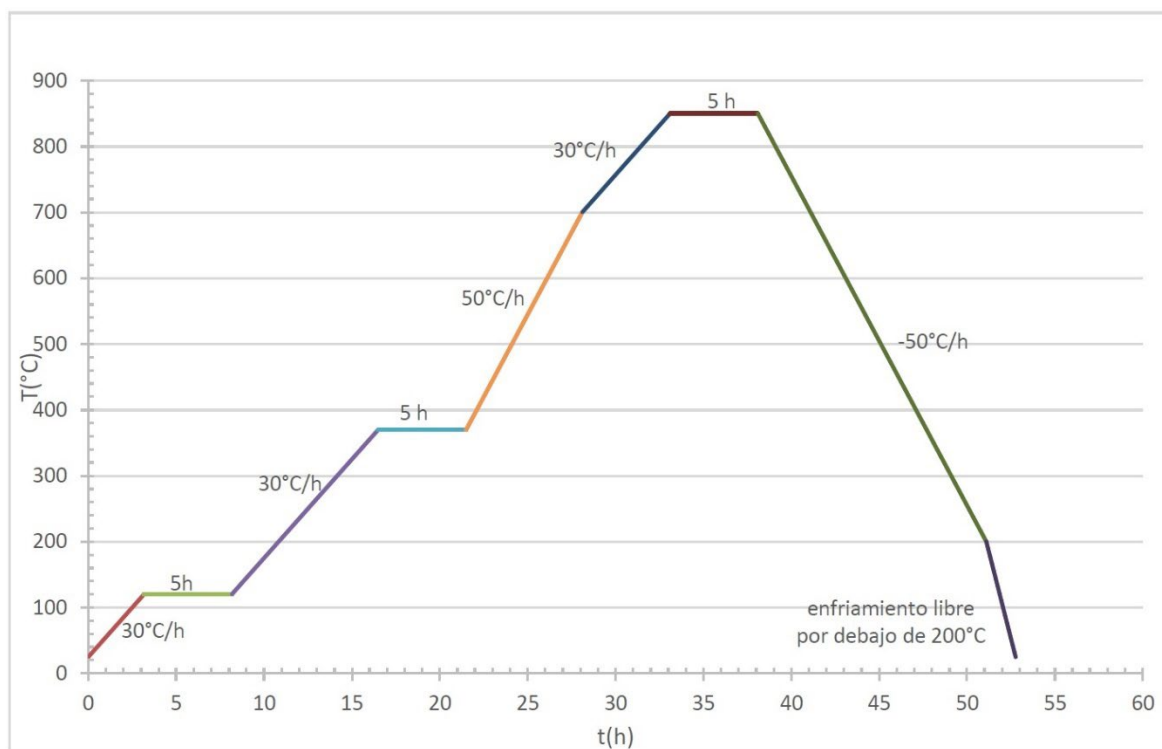


Figura 7. Curva propuesta para el tratamiento térmico. Se tiene en cuenta al principio una meseta para el secado del refractario.

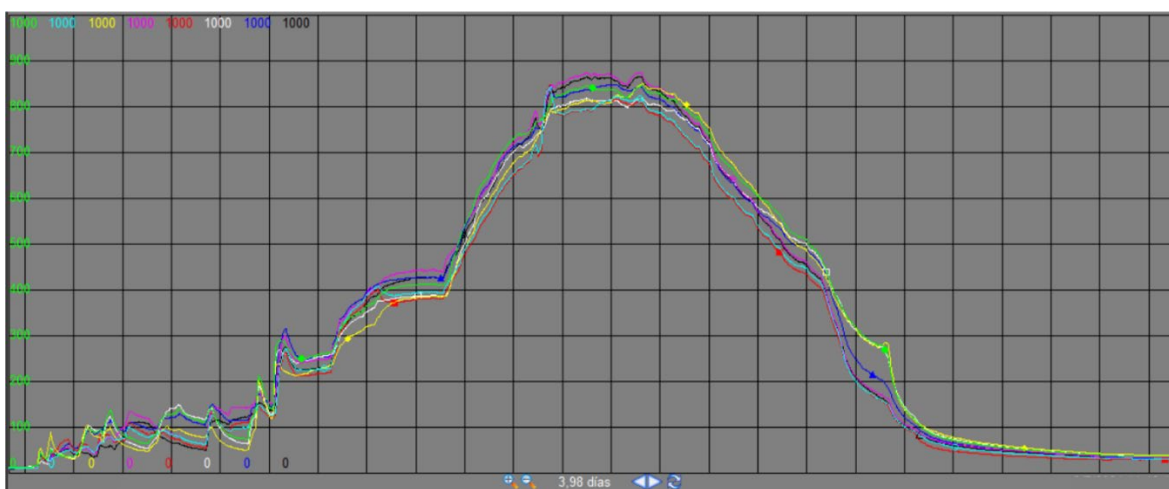


Figura 8. Curva real tomada de los instrumentos instalados.

5. Evaluación de las propiedades post TT

Con el fin de evaluar las propiedades mecánicas de los tubos posterior al tratamiento térmico in situ, se introdujo un tramo de tubo que fue, luego, utilizado para realizar los ensayos. Para fines prácticos, llamamos a este tramo de tubo “probeta post TT”.

Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 7. Resultados de los ensayos post tratamiento del horno

Probeta post TT	Dureza (HBN)	Charpy (Joules)	Aplastamiento
	170	258	Satisfactorio
	Tracción		
	$\sigma_{0,2}$ (Mpa)	σ_{max} (Mpa)	δ (%)
	313	574	31
Rango*	205 min	415 min	30 min

*según ASTM A335 Gr. P9

- **Metalografía**

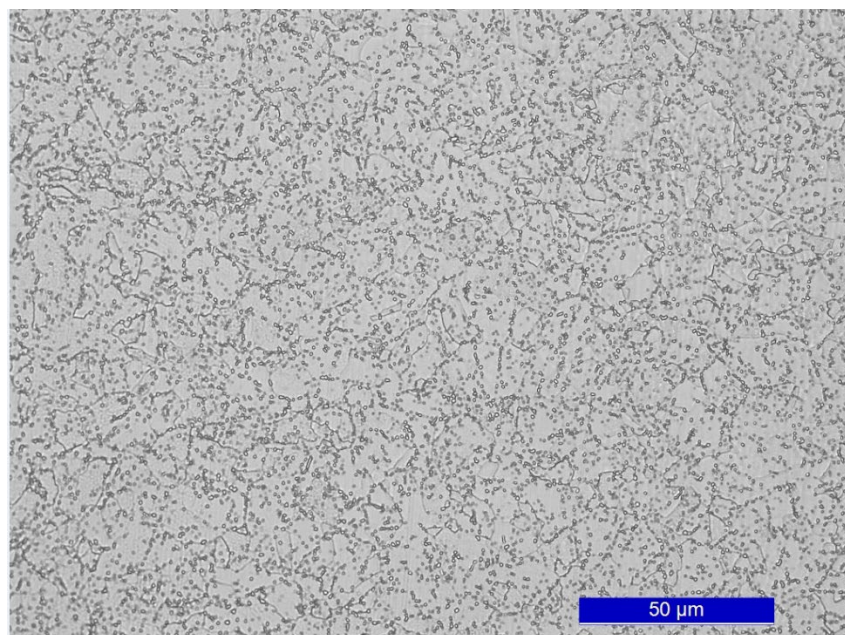


Figura 9. Tubo N°4 afectado por la llama (post tratamiento térmico a 850°C). Se observa una matriz ferrítica con carburos globulizados. Ataque con Vilella, 500X

Conclusiones

En el presente estudio se vislumbraron dos aristas como principales pilares para la factibilidad de proceso de reconstitución de la integridad del horno:

Por un lado, la capacidad de recopilación de datos de ensayos, análisis y toma de decisiones; fruto del trabajo en equipo en el que se vieron involucrados colaboradores de distintos sectores y todos los niveles jerárquicos de la Gerencia de Inspección. La posibilidad de contar con laboratorio propio y un gran grupo de ensayos y servicios tanto externos como propios integrándose al equipo con el compromiso que la situación requiere, permitieron disminuir el tiempo de recopilación de datos y alcanzar la toma de decisiones con anticipación y certeza.

El otro aspecto a destacar fue la capacidad de operación demostrada por el personal del área operativa que con la asistencia de inspección mantuvo el compromiso permanente con la integridad para lograr una ejecución del tratamiento térmico que fue corroborada una vez finalizado a través de ensayos y el seguimiento de las temperaturas en línea y con termografías.

Por último, y a modo de resumen, se quiso destacar el hecho que todo el proceso tanto de investigación como de ejecución no insumió ensayos o estudios complejos, la complejidad la aportó el volumen de datos a analizar y la diversidad de situaciones de los distintos sectores del horno, pero con la capacidad del equipo de trabajo y la pericia operativa se logró revertir una situación desfavorable, minimizando las pérdidas.

Bibliografía

- API 571
- ASTM A335 Gr. P9
- Phase transformation and mechanism on enhanced creep-life in P9 Cr–Mo heat-resistant steel

Breve Cv

Echaniz, Patricio Martín

Título y lugar de estudio: Ingeniero mecánico, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata (UTN-FRLP).

Cargo actual en la empresa: Ingeniero de Inspección, YPF S.A.

Trayectoria: T&T S.A., P.S.A., Dibutec S.A., YPF S.A.

Mosqueira, Martin

Título y lugar de estudio: Ingeniero en materiales, Universidad Nacional de la Plata (UNLP).

Cargo actual en la empresa: Ingeniero en Corrosión, YPF S.A.

Trayectoria: Item's S.A., YPF S.A.

Bischoff, Alexander Mikhail

Título y lugar de estudio: Ingeniero mecánico, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata (UTN-FRLP).

Cargo actual en la empresa: Ingeniero en Corrosión, YPF S.A.

Trayectoria: Dibutec S.A., YPF S.A.