



Tratamiento térmico en tubos de horno de reformado *in situ*

Por **Martín Mosqueira, Patricio Echániz y Alexander Mikhail Bischoff** (YPF)

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 falta de stock de tubos aleados para reemplazar los afectados, se evaluó la posibilidad de realizar un tratamiento térmico *in situ* a todos los tubos del horno para reestablecer las propiedades mecánicas y metalúrgicas.

El objetivo de este trabajo es dar a conocer una práctica que no es habitual de tratamiento térmico, la estrategia utilizada por YPF para la toma de decisiones y los resultados obtenidos. Se demuestra 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.

El resultado fue una pronta restitución del servicio de un horno horizontal de reformado, unidad crítica de alto lucro cesante.

Desarrollo

1. Falla del equipo

Durante una operación en condiciones normales a la que se realizaba monitoreo por termografías periódicas y la instrumentación propia del horno, se observó repentinamente un incremento en la temperatura de los termometales ubicados en los primeros tubos de uno de sus ramales de la zona radiante, lo cual se interpreta como la pérdida de contención de tubos en el interior del hogar (Figura 1).

Debido a la pérdida de contención del fluido circulante, se produjo la inflamación instantánea de este

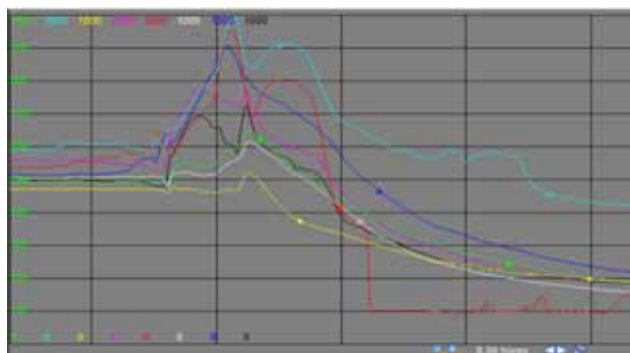


Figura 1. Temperatura de zona radiante.

elevando la temperatura de hogar que afectó 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 (Figura 2).

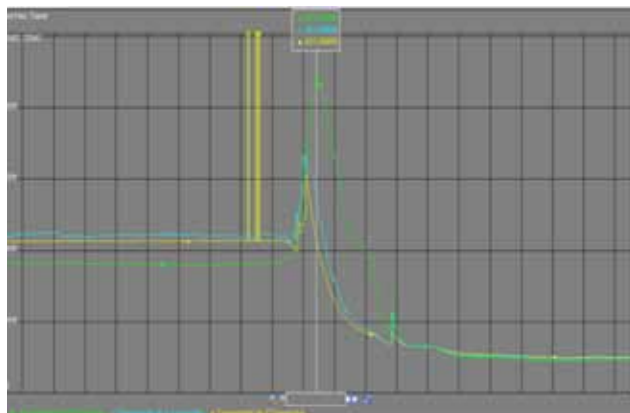


Figura 2. Temperaturas haz convectivo.

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).

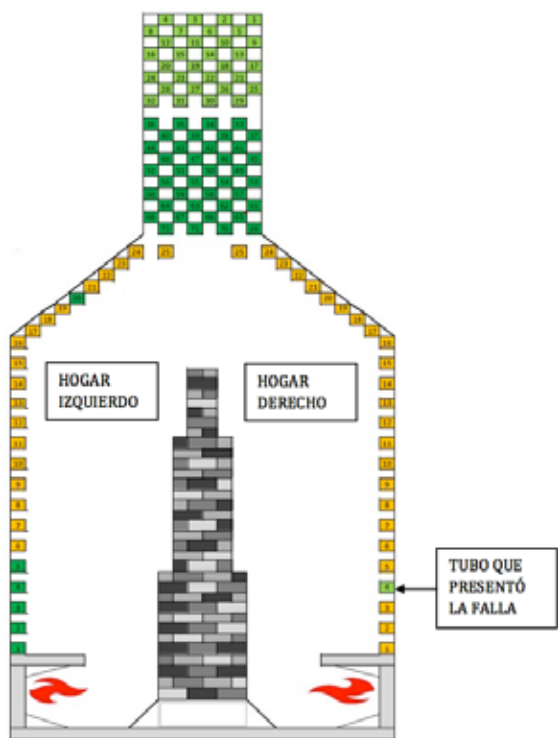


Figura 3. Esquema de la vista frontal de horno.

Cuando se generaron las condiciones adecuadas para el ingreso, se corroboró que la falla presentó morfología de deterioro por creep. La falla, que tenía orientación longitudinal y una extensión de 160 mm, 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).

Finalmente, se logró acceder al haz convectivo y se pudo identificar el reventón de los dos tubos centrales de



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

la primera fila coincidentes en ubicación con la falla del tubo de la zona radiante (Figura 5).

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

Como se observó en el punto anterior, las elevadas temperaturas originadas por la falla impusieron la necesidad de realizar una evaluación de daños, con el objeti-



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

Ensayos realizados

Dureza <i>in situ</i>	Dureza en banco Lab. inspección	Metalografía en Lab. inspección	Replicas metalográficas
482	50	5	126

Tabla 1. Cantidad de ensayos realizados.

vo de 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 y se concluyó que el principal factor por evaluar fueron las alteraciones microestructurales a las que es susceptible esta metalurgia (SA-335 Gr. P9). Esta alteraciones se manifestaron a través del aumento de dureza como principal indicador. También se realizaron réplicas metalográficas e inspección visual (Tabla 1).

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 por reemplazar. La extracción de los tubos por 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 cinco tubos del ramal que presentó la falla (incluido el que falló) dieron valores de dureza del orden de los 300 HB en más de una de las cinco 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, excepto en uno de ellos que presentó durezas superiores a los 310 HB y una 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, que reflejaron elevadas durezas en los tubos cercanos de ambos hogares.

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

Como se mencionó 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 como 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. Finalmente, se definió 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, que se correspondieron 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 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. Por lo tanto, se decidió continuar con la segunda.

Para llevar adelante al segunda opción, 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 cuatro 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 tablas e imágenes que se muestran a continuación.

• 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).

• Dureza Brinell

Por cada probeta se tomaron tres valores de dureza en cada temperatura mencionada y, además, en el estado S/TT. En la tabla 3 se muestran los valores promedios de las cuatro probetas.

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

Tabla 3. Dureza en función del tratamiento.

• Ensayo de aplastamiento

Se realizó un ensayo de aplastamiento por cada probeta a cada temperatura y en el estado S/TT. Los resul-

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.

Tabla 2. Composición química del P9.

tados de cada probeta son muy similares entre sí y se resumen en la tabla 4.

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	-

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

• **Ensayo de charpy**

Por cada probeta se realizaron tres ensayos charpy luego del tratamiento térmico a la temperatura mencionada y, además, en el estado S/TT. En la tabla 5 se muestran los valores promedios de las cuatro probetas.

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

Tabla 5. Energía en función del tratamiento.

• **Ensayo de tracción**

Por cada probeta se realizaron tres ensayos de tracción, pero en este caso se realizaron solo 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 tabla 6 se muestran los valores promedios de las cuatro probetas.

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

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

• **Metalografía** (Figura 6)

4. Plan de monitoreo y control de la temperatura

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

Además, 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 el 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

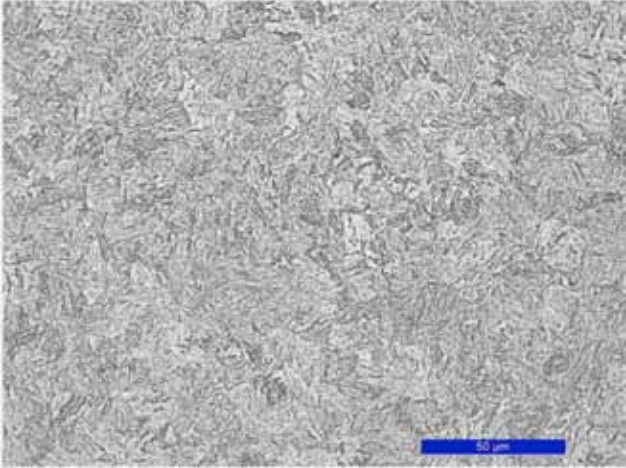


Figura 6. Tubo N° 4 afectado por la llama (sin tratamiento térmico). Se observa una microestructura martensítica. Ataque con Vilella, 500X.

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 °C 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.

En las figuras 7 y 8 se muestra cómo fue la curva propuesta *versus* la curva real.

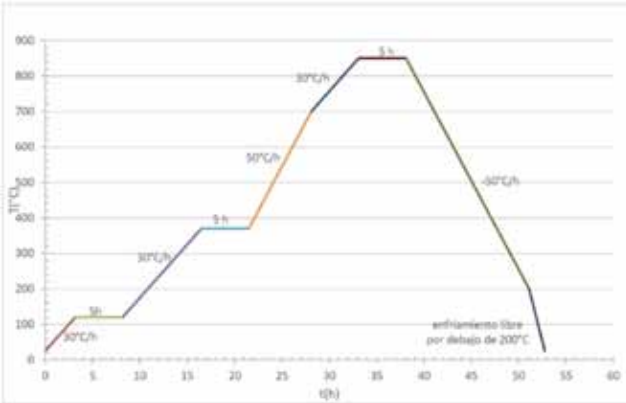


Figura 7. Curva propuesta para el tratamiento térmico. Se tiene en cuenta al principio una meseta para el secado del refractario.

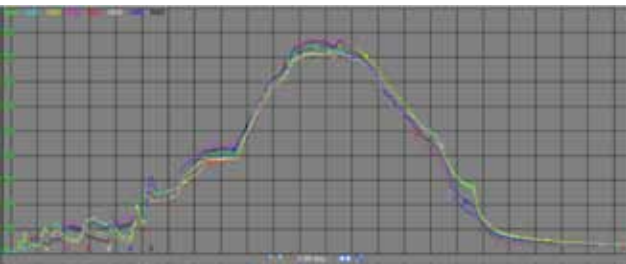


Figura 8. Curva real tomada de los instrumentos instalados.

5. Evaluación de las propiedades pos TT

Con el fin de evaluar las propiedades mecánicas de los tubos posterior al tratamiento térmico *in situ*, se in-



rodujo un tramo de tubo que luego fue utilizado para realizar los ensayos. Para fines prácticos, llamamos a este tramo de tubo “probeta pos TT”.

Los resultados se muestran en la tabla 7.

Probeta pos TT	Dureza (HBN)	Charpy (Joules)	Aplastamiento
	170	258	Satisfactorio
Tracción			
	σ 0,2 (Mpa)	σ max (Mpa)	σ (%)
	313	574	31
Rango*	205 min	415 min	30 min

*según ASTM A335 Gr. P9

Tabla 7. Resultados de los ensayos postratamiento del horno.

6. Metalografía (Figura 9)

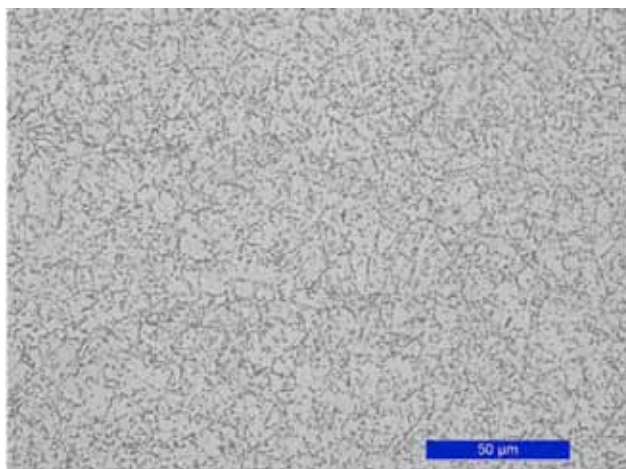


Figura 9. Tubo N °4 afectado por la llama (postratamiento térmico a 850 °C). Se observa una matriz ferrítica con carburos globulizados. Ataque con Vilella, 500X.

Conclusiones

En este estudio se vislumbraron dos aristas como principales pilares para la factibilidad de proceso de re-constitución 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 estuvieron involucrados colaboradores de distintos sectores y todos los niveles jerárquicos de la Gerencia de Inspección. Asimismo, la posibilidad de contar con laboratorio propio y un gran grupo de ensayos y servicios, tanto externos como interno, que se integraron con el compromiso que la situación requiere, permitió disminuir el tiempo de recopilación de datos y alcanzar la toma de decisiones con anticipación y certeza.

Por otro lado, es de destacar 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.

Finalmente, todo el proceso, tanto de investigación como de ejecución, no insumió ensayos o estudios complejos. La complejidad la aportó el volumen de datos 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 y se minimizaron las pérdidas.

Bibliografía

API 571.

ASTM A335 Gr. P9.

Phase transformation and mechanism on enhanced creep-life in P9 Cr-Mo heat-resistant steel.