

27 FEB 1981

621.181
P839

621.181



FUGAS EN LA PLACA TUBULAR

Nº 1 DE LAS CALDERAS

HUMOTUBULARES.

INFORME Nº 1 (PRELIMINAR)

Borrador de trabajo.

Ejemplar Nº - - - - -

302570

INTI

Instituto Nacional de
Tecnología Industrial.

Departamento de Termodinámica.

Buenos Aires, 10 de febrero de 1980.

Indice

1. Objeto del informe e introducción.
2. Antecedentes históricos.
3. Como trabaja la unión placa-tubo
 - 3.1 Descripción del proceso de falla
 - 3.2 Mecanismos de la falla.
 - 3.3 Tensiones térmicas.
 - 3.3.1 Transmisión de calor por convección.
 - 3.3.2 Transmisión de calor por radiación.
 - 3.3.3 Conducción del calor y temperaturas de placa.
 - 3.4 Fatiga.
4. Influencia del tratamiento de agua.
 - 4.1 Un posible modelo de falla por fragilidad caústica.
 - 4.1.1 Fenómenos en el intersticio placa-tubo.
 - 4.1.2 Fenómenos en el lado agua.
5. Reglas de operación.
 - 5.1 Aplicación del tratamiento de agua.
 - 5.1.1 El lavado de caldera.
 - 5.2 Operación de la caldera
6. Inspección y mantenimiento.
7. Ideas para un plan de estudio.
8. Materiales y fabricación.
9. El mandrilado.
10. Configuración propuesta.
11. Conclusiones y recomendaciones.

Apéndice

- A1. Descripción de las calderas horizontales modernas.
A2. Descripción de las calderas de locomotoras modernas.
A3. Cálculos relativos a la convección.
A4. Cálculos relativos a la radiación.
A5. Flujo total de calor en la placa.
A6. Dilatación de los tubos.
A7. Velocidad de calentamiento de la placa tubular.
A8. Tensiones térmicas.
A9. Comentarios a los cálculos numéricos y otros adicionales.
- Fig. 1. Vista de tubos y cielo... antes y después de la aplicación de tratamientos internos.
Fig. 2. Aplicación de tubos chicos sobre placa tubular de cobre.
Fig. 3. Unión placa-tubo en hogar de acero (EEUU, etc.).
Fig. 4. Unión placa-tubo adoptada en Alemania.
Fig. 5. Típica unión placa-tubo de una caldera industrial.
Fig. 6. Placa tubular de las locomotoras del FERT en la zona de los tubos chicos.
Fig. 7. Diseño de placa tubular para la industria química.
Fig. 8. Fisuras que aparecen en el tubo y en la soldadura.
Fig. 9. Mecanismo de la fuga que se da cuando una fisura de tipo longitudinal alcanza la raíz de la soldadura.
Fig. 10. Estayo TROSS sin rosca.
Fig. 11. Forma que asumen las fisuras en las placas laterales de los hogares de locomotoras (S/TROSS(9)).
Fig. 12. Fisuras en las placas laterales de los hogares de locomotora alrededor de los estayos S/TROSS(9).
Fig. 13. La transmisión de calor conforme a la clásica curva de NUKIYAMA para ebullición.
Fig. 14. Deformaciones en una chapa calentada por una de sus caras.

- Fig. 15. Deformaciones de las placas vinculadas con vínculos elásticos empotrados.
- Fig. 16. Estados de carga correspondientes a fuegos apagados y máxima vaporización.
- Fig. 17. Diagrama de fatiga.
- Fig. 18. Transmisión de calor para tubos de borde redondeado, placa no incrustada.
- Fig. 19. Transmisión de calor para tubos de bordes filosos.
- Fig. 20. Transmisión de calor y líneas de corriente alrededor de un cilindro.
- Fig. 21. Transmisión de calor alrededor de un tubo de la primera fila de los tubos de un intercambiador.
- Fig. 22. Relativa a la transmisión de calor por radiación en un hogar de locomotora con combustión a la gasógena.
- Fig. 23. Combustión en fase gaseosa y radiación a lo largo de la llama.
- Fig. 24. Flujo de llamas en un hogar sin bóveda.
- Fig. 25. Damage caused by intercrystalline cracking in a locomotive boiler riveted seam.
- Fig. 26. Relativa al intersticio placa-tubo.
- Fig. 27. Tensiones de flexión al final de la zona mandrilada.
- Fig. 28. Vista del interior de la caldera de una caldera americana 141 R. después de 2 000 000 km.
- Fig. 29. Configuración propuesta para calderas de locomotoras con presiones de hasta 20 kgf/cm².

1. Objeto del informe e introducción.

Al presente (Febrero de 1980), el Departamento de Termodinámica de INTI está efectuando un estudio tendiente a solucionar el problema creado por las pérdidas que se dan en las placas tubulares de los hogares de las calderas de locomotora del Ferrocarril de Rio Turbio. Simultáneamente, algunos industriales usuarios de calderas humotubulares han requerido, a INTI, asistencia técnica por el mismo problema. Una summarísima encuesta realizada en el medio industrial ha mostrado que las pérdidas en las placas tubulares (o "pérdidas de tubo") se dan con una extensión y frecuencia que se estaba lejos de sospechar. Por lo que hace a la técnica de las locomotoras de vapor, el problema se daba por resuelto y, con respecto a las calderas humotubulares industriales construidas en su mayoría bajo licencia, también. No es así.

Ello ha determinado el propósito del Departamento de Termodinámica de ampliar el horizonte de la investigación tratando de reunir la información que surge de ambos campos del arte; requerir la colaboración de fabricantes, usuarios y licenciarios; obtener información a nivel internacional, etc. apuntando a los siguientes objetivos fundamentales:

1. Dar orientaciones que permitan con urgencia al menos paliar los inconvenientes que se producen.
2. Dar soluciones de fondo a la cuestión.
3. Conseguir un auténtico avance en la tecnología del país.

Pasando por alto las componentes anecdóticas del problema y que podrían relacionarse con...///

///... en el momento de escribir este informe, un mayor avance en ese dominio, como que el de las calderas industriales ha venido a agregarse sólo recientemente. Ese desbalance, se espera, había de ser corregido a breve plazo, con lo que el tratado ganará en universalidad.

Dado que, al presente, el estudio se halla más avanzado en lo que hace al particular problema de las locomotoras del FC Río Turbio, el tema ha sido tratado con particular acento sobre las mismas. Estas acusaban frecuentes pérdidas con rajaduras de tubos, placas y soldaduras, especialmente en la zona central del área cubierta por los tubos "chicos" (46/51 mm).

Habría también de disculparse, en este primer estadio inicial, una falta de rigor y un cierto abuso de esquemas y explicaciones intuitivas.

///... el decaimiento que, en todos los órdenes, se ha dado en el país según es de dominio público, es evidente que en el trasfondo hay algo de sustancial que obliga a una investigación profunda que explique, en términos cuantitativos, el mecanismo de las fallas.

El presente informe N°1 ha sido preparado a fin de detallar el estado de la cuestión en función de los conocimientos e información que, en la fecha, se disponen en el Departamento de Termodinámica. La intención es que sirva de primera base para reunir a los potenciales interesados conforme a la nota-circular de presentación oportunamente enviada. El adjetivo "preliminar" ha sido agregado para denotar con toda claridad que está lleno de presunciones, datos cuya veracidad ha de ser confirmada, errores, etc. que habrán de ser ratificados y rectificados a medida que el estudio avance sobre más firmes bases. Se prefiere, pues, "hablar demás" en la presente instancia, como que así se desencorajará la inspiración de quienes quieran contribuir con su aporte.

Entre las varias dificultades que se presentan en orden a la comunicación, está la que se deriva de la falta de un lenguaje común a ambos campos (el ferroviario y el industrial) y de la carencia de un recíproco conocimiento de lo que ocurre en el dominio del otro. Ello es consecuencia de que las exigencias que deben satisfacer los tres tipos de calderas (se agregan las calderas marítimas "de hogar interior") son en extremo divergentes, por lo cual se remite al lector a los apéndices A2 y A3.

Dado que el origen cronológico de esta investigación ha sido un problema ferroviario, existe, ...///

2. Antecedentes históricos.

Las pérdidas en las placas tubulares han sido una tradicional plaga en la operación de las locomotoras de vapor. La aplicación de tratamientos de agua, aún cuando fueran imperfectos, determinó una sensible mejora, siendo quizá su mejor exponente el caso de las locomotoras 141R de los Ferrocarriles Franceses: éstas alcanzaron en 2 000 000 km con sólo 502 horas-hombre de trabajos de reparación de caldera bajo el régimen de aplicación del tratamiento interno carbonático TIA. Durante ese recorrido evaporaron 300 000 m³ de agua (\cong) a una presión de 16 kgf cm² y 380 °C de temperatura, con un régimen medio de ≈ 60 kg m² h⁻¹ (máximo ≈ 110 kg m² h⁻¹) conteniendo el agua de alimentación 60 000 kg de sales incrustantes. Los trabajos de calderería sobre tal kilometraje fueron aproximadamente fueron unas 600 h-Hombre distribuidos como sigue.

- 95 tubos chicos reemplazados ($\approx 50\%$)
- 25 " grandes " " ($\approx 60\%$)
- 25 repasos de unión tubo-placa por soldadura.
- Recarga, por soldadura, de algunas casetas de estay en el hogar.

Esos 2 000 000 km representarían unas 50 000 h de trabajo y 100 000 h bajo presión, cifras que han de juzgarse bajo los patrones de referencia propios de la explotación ferroviaria.

El autor de este informe data el problema por resuelto como resultado de su propia experiencia. Esta, como ha dicho RICHARDSON(1)(*),

--- III

(\cong) La locomotora trabaja con BS a 100% de reparación.

(*) Los números entre paréntesis se refieren a la bibliografía.



III... viene a sumarse a las cifras millonarias que se han dado en Inglaterra, Francia, Alemania, etc. luego de la sustitución de otros tratamientos de agua por tratamientos internos de inspi-ración americana. Sin embargo, el hecho

es que el problema subsiste (como fue la presente investigación lo prueba) sin que sus últimas causas sean - como se verá - conocidas, tanto en orden a dar razón de las fallas cuanto del éxito.

Hasta la llegada de la soldadura, el único medio conocido para fijar los tubos a las placas ha sido el mandrilado. Este proceso, tan anti-guo como el arte de la calderería, se desarrolló empíricamente, al punto que sólo a partir de los años 30 se dan estudios más profundos. (2)(3)(4)(5)(6)

(1) RICHARDSON, W. R. (experto de British Railways en misión en Argentina): "Informe sobre tratamientos de aguas en calderas de locomotora y de industrias en la Argentina". British Railways, 19-11-71.

(2) FISHER, F. F., and COPE, E. T.: "Rolling in of boiler tubes". Trans. ASME 57, paper FSP-57-7 (1935).

(3) THUM & JANTSCHA: "The rolling and pressing in of boiler and superheater tubes made from various metals" (en alemán), Archiv für Wärmewirtschaft, 11, 397-401 (1930)

(4) LIEBERHERR, A.: "The stress in the drum of a water tube boiler". Schweizerische Bauzeitung 102, 397-401, (1933)

No es sin embargo hasta que aparece el fundamental "paper" de NADAI (7) que el modo de trabajo de la unión mandrilada empieza a ser conocido con claridad, poniéndose de manifiesto en forma cuantitativa las elevadas tensiones a las que tanto el tubo como la placa están sometidos.

Esos estudios, sin embargo, se aplican sustancialmente a casos distintos del que aquí interesa: fijación de tubos a los tambores y colectores de las calderas acuotubulares, a economizadores, condensadores, etc. en los que el fuerte impacto de la llama o gases caliente está ausente y, de consiguiente, las tensiones térmicas que de ellos resultan.

Hasta la guerra, la práctica ferroviaria adhirió a los hogares de cobre en Europa y a los de acero en EEUU. En los ferrocarriles de nuestro país el acero se utilizó junto con el cobre, habiendo máquinas con hogares de este último metal todavía en servicio hasta hace pocos años. Se dan, pues, dos desarrollos históricamente paralelos:

(5) SIEBEL, E.: "Rolled joints" (en alemán), Stahl u. Eisen 53, 1205-1215 (1933)

(6a) GRIMISON & LEE (Babcock & Wilcox): "Experimental investigation of tube expanding"

(6b) MAXWELL, C.A.: "Practical aspects of making expanded joints" (Babcock & Wilcox)

(6c) GOODIER & SCHOESSOW (B.P.W.): "The holding power and hydraulic tightness of expanded tube joints".
Trans. ASME 65, 487-522 (1943).

(7) NADAI, A.: "Theory of the expanding of boiler and condenser tube joints through rolling". T. ASME 65, 865-879 (1943)

(a) Hogares de cobre.

El empleo del cobre arsenical en Europa hasta la II.ª guerra se dio (a pesar de ser más caro) a causa de su mejor comportamiento frente a las incrustaciones y corrosiones propias de los imperfectos tratamientos de agua de la época. El colmo se dio en Alemania, país en el cual, por adherir a las ideas de BUNTE (ver (8)) (quien afirmaba que había de elegirse entre incrustaciones o corrosiones) (Fig. 1) prácticamente no se hacía tratamiento de aguas.

En ese país, la sustitución de cobre por acero durante los años de la 1.ª guerra y los siguientes, resultó en un estrepitoso fracaso, incomprensible frente al uso corriente del acero en América.

Ese fracaso, como lo dice TROSS (9), se debió al mantenimiento de los mismos espesores de los originales hogares de cobre, hecho atribuible a la falta de comprensión del modo de falla según TROSS (9), hombre de ese mismo país, que lo pone de manifiesto muchos años más tarde, hacia 1935.

Los hogares de cobre, con chapas planas de 16 mm de espesor y virutillos espaciados de ≈ 80 mm en malla cuadrada, se emplearon ---!!!

(8) United Nations: "Locomotive boiler water treatment". Report presented to Railway Sub-Committee of the ECAFE, 3rd Session, Tokyo, Oct 1954.

(9) TROSS, A.: "Neue Erkenntnisse und Konstruktions-Richtlinien auf dem Gebiet des Lokomotiv-Hinterkessels". Glasers Annalen 75, Okt-Dez. 1951.



Bild 60
Blick auf die
Deckenstehbolzen
nach Verwendung
von Speisemasser
ohne innere
Aufbereitung

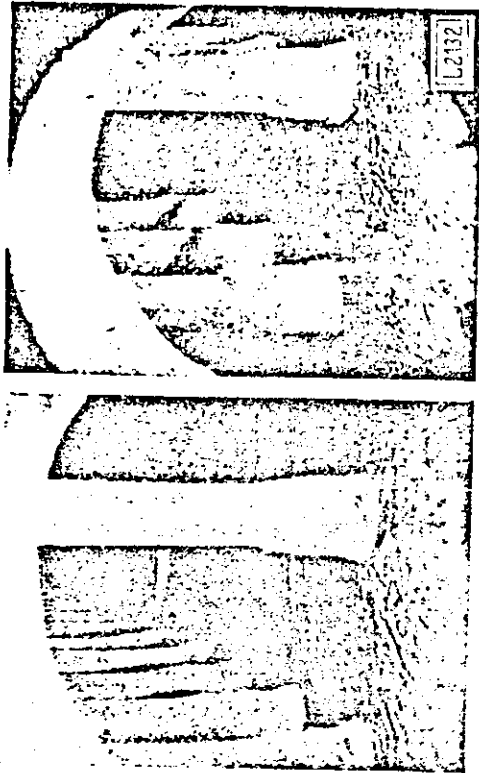


Bild 62 Blick auf den Deckenstehbolzen nach Verwendung von Speisemasser mit innerer Aufbereitung



Bild 61
Blick durch die
Rohrwand
auf Kesselrohre
mit starkem
Kesselstein-
belag

Fig 1. Vistas de tubo y cielo del hogar de
cabecera de locomotoras en
Alemania antes y después de
la aplicación de la hotamieros
internos NALCO, DISKRO ó TIA.
(De Eisenbahn - Lehrbucherei
des Deutschen Bundesbahn,
Band 134, "Dampflok-Konstruktion".
Josef KELLER Verlag Starnberg, 1. Auflg.
(1937))

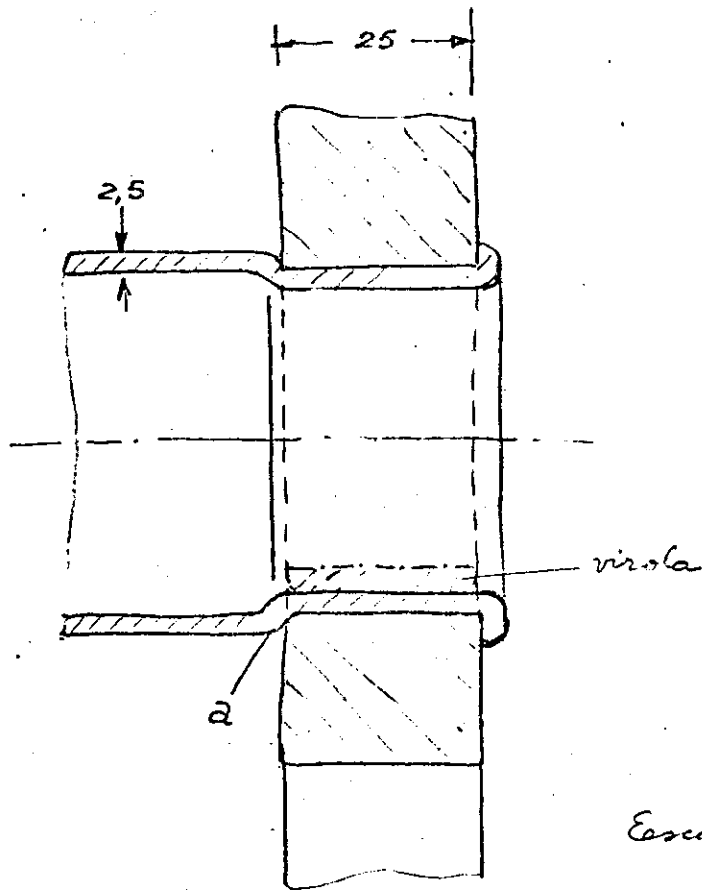


Fig. 2

Aplicación de tubos chicos
sobre placa tubular de cobre.

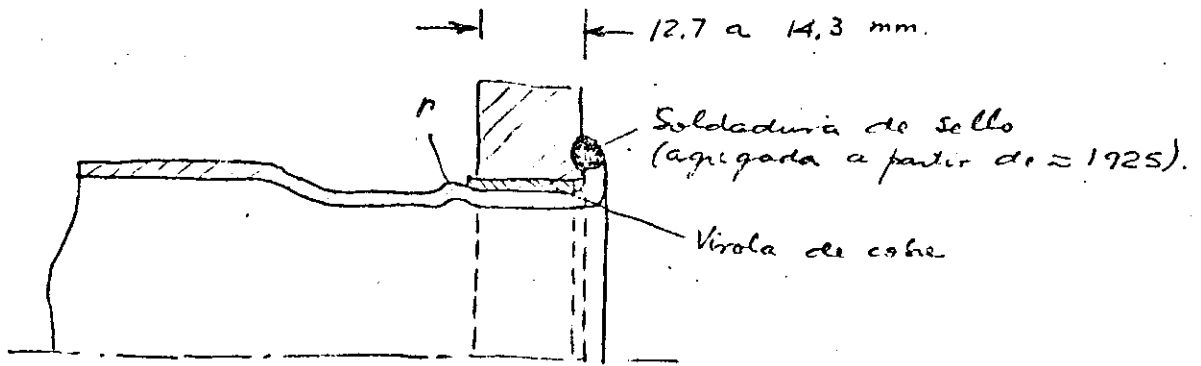
///... en Inglaterra con presiones de hasta 17.5 kgf cm^{-2} y en Francia y Alemania hasta con 20 kgf cm^{-2} . En este último país las series experimentales (04, 44 y 24) con 25 kgf cm^{-2} de presión se hicieron con hogar de acero IZETT resistente al envejecimiento (-hacia 1935), pero, por causa de la falta de un adecuado tratamiento de aguas, no constituyeron un éxito. Esos hogares de cobre se cargaron hasta un límite de $\approx 4 \cdot 10^6 \text{ kcal m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (en Francia $6 \cdot 10^6$ casi simultáneamente con la aplicación del tratamiento TIA).

La placa tubular de cobre es usualmente de 25 mm de espesor (Fig. 2) y algo menos de la mitad de la superficie opacada es cubierta con tubos "chicos" cuyo diámetro va de 40 a 55 mm, (espesor de 2.5 mm). Estos tubos son de acero muy dulce (ya no se emplean más tubos de latón); inicialmente tienen un reborde α de apoyo axial, siendo mandrilados y rebordados. El resto de la superficie de la placa está ocupado en su parte superior por tubos de $133 \times 4 \text{ mm}$ que se reducen a $\approx 110 \times 4$ cerca del hogar y en los cuales se alojan los elementos sobrecalentadores. En Inglaterra la práctica era de rosacar, mandricular y rebordar los tubos "grandes" en la placa.

Es importante hacer notar que, dado que la sección de pasaje de gas del haz tubular es el mayor condicionante del diseño de la caldera, la placa tubular lleva el máximo posible de tubos colocados al trebolillo y a la mínima distancia posible. Esta última conforme a una larga experiencia, debe permitir todavía un ancho mínimo de malla de 20 mm entre agujeros ...///

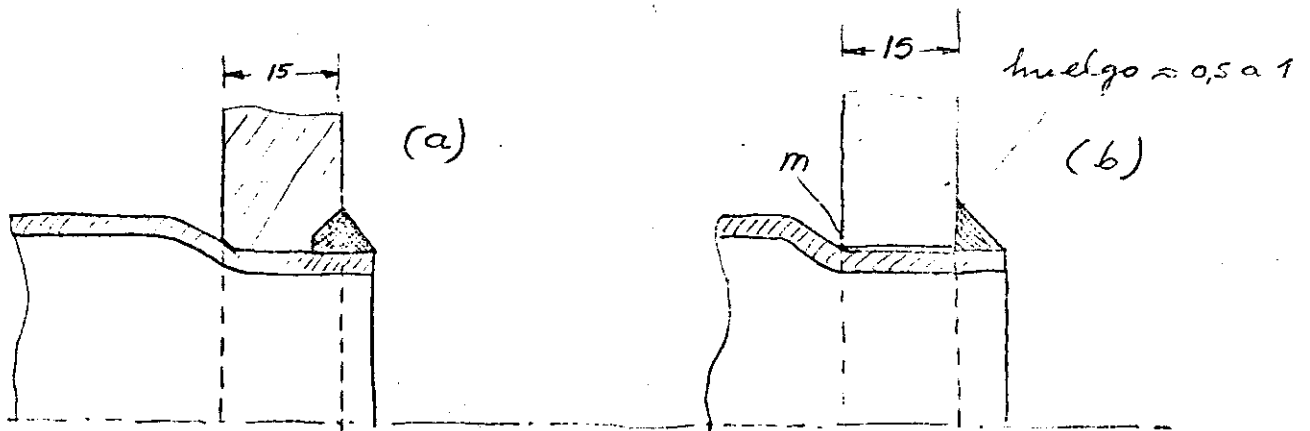
III-- a fin de asegurar un mandilado eficaz, todo, por supuesto medido con la vara relativa de la razonabilidad de la explotacion ferroviaria tradicional.

El cobre tiene la ventaja de una conductibilidad siete veces mayor que el acero (lo que sin embargo tiene influencia despreciable sobre el rendimiento de caldera), un módulo de elasticidad mitad y un coeficiente de la dilatación algo mayor, lo que da por resultados tensiones térmicas de sólo $\frac{1}{10}$ de las que, para igual flujo calorífico, se dan con el segundo. El tubo de acero, al estar, en principio, más caliente que la placa tendería a asegurar la estanqueidad durante las cargas máximas. Esta acción a veces se ha complementado con una virola superpuesta (Fig. 2), la que sin embargo tiene un grave peccio en forma de tiraje incrementado y propiende a la formación de depósitos de cenizas que, en estados pastoso, se pegan (nidos de golondrina).



Escala ≈ 1:1

Fig. 3. Unión tubo-placa en lugar de acero.
 (EE.UU, hasta 1925 y también usual en Argentina).



Escala ≈ 1:1

Fig. 4. Unión tubo-placa adoptada en Alemania.

La práctica ferroviaria es de soldar, previo mandrilado, con la caldera llena de agua a 50°C (Francia) ó 90°C en la SR de Inglaterra, donde BULLOID introdujo los hogares de acero. En nuestro país se ha adherido a la práctica americana (Fig. 3), pero se suelda sin calentar ni siquiera a 50°C . En Tafi Viejo (FCGB) se emplea electrodos básicos de bajo hidrógeno AWS E 6018 ó E 7018. En talleres Santa Fe (FCGB) se utilizaba, desde 1950, y por consejo del autor, el sistema alemán de la Fig. 4b, sólo que "arrimando" el tubo a la placa con un mandrilado muy liviano y sin poner énfasis en el apoyo axial m.

Es usual, en la práctica ferroviaria, reducir el diámetro de los tubos en los últimos 200 a 100 mm cerca de la placa a fin de incrementar el espesor de la malla cizjonista para asegurar el mandrilado, conservando siempre un discreto espesor mínimo de la lamina de agua entre tubos ($\approx 13\text{ mm}$). La experiencia, confirmando la teoría de la transmisión del calor por ebullición, confirma largamente que este espesor es más que suficiente pese a las altísimas intensidades de evaporación que se han anclado más arriba.

Las calderas de locomotoras tienen placas tubulares para las cuales no se cuenta apoyo alguno en los costados como se da en algunos tipos de intercambiadores de calor: por eso su espesor no está condicionado por razones de resistencia. Tampoco comportan tubos-estay (stay-tubes, anker-rodre) como las calderas marinas, tubos que son de mayor espesor, aún de tener anclajes especiales en forma de arandelas roscaadas, etc. Esta...///

(b) Hogares de acero.

Las calderas americanas siempre tuvieron placas laterales de acero de 7,6 a 10,5 mm de espesor, atornilladas con estays remachados y distribuidos sobre una cuadrícula de 100 mm; esto aún con presiones de hasta 22 kgf cm^2 . La placa tubular era, hacia 1920, de entre 12,7 y 14,3 mm, sobre la cual los tubos en esa época eran simplemente mandrilados y rebordados con interposición de una virola de cobre destinada, se decía, a mejorar el mantenimiento de la estanqueidad (Fig. 3). A veces se incorporaba un reborde especial que hecho con un mandril especial (Prossering).

Evidentemente la hermeticidad dejaba que desear, dado que en la década del 20 se introduce la soldadura como un complemento de sello, situación que se conserva todavía en India (3000 locomotoras, hoy en servicio), Sud Africa (2000), China, etc. Gracias a esa soldadura de sello, CHAPELON declara que sus calderas pudieron alcanzar sin problemas vaporizaciones de hasta 120 $\text{kg m}^2 \text{h}^{-1}$; el autor, por su parte, la asocia a su record mundial de 140 $\text{kg m}^2 \text{h}^{-1}$ (locomotora N° 3477 del FCGR). Nuevamente, es de recordar que estas performances deben ser medidas con los cartabones ferroviarios.

Después de la guerra, Alemania adoptó el hogar de acero con placa tubular de acero y unión conforme se muestra en la Fig. 4a. Puede observarse el fuerte cordón de soldadura, la mandriladura y el apoyo axial. También se ha utilizado la unión indicada en la Fig. 4b, con un sello entre tubo y placa como se da para los muy exitosos estays TROSS(9) soldados sin rosca.

III... última exigencia parecida derivada de la poca confiabilidad atribuible a las uniones simplemente mandriladas sin rebordar y que otrora estaban en boga. En realidad, en tanto que el viejo régimen de explotación ferroviaria se contentaba con un uso muy intermitente de sus unidades, ello no puede darse en el mar: allí no hay posibilidad de desenganchar una locomotora cuyos tubos pierden y sustituirla por otra: el viejo barco cargado con trigo debía llegar en una singladura desde Buenos Aires a Hamburgo; quien haya visto como, en tales circunstancias, las pérdidas crecen día a día, se dará cuenta del porqué de los "ankersahre".

En las locomotoras, la placa N° 2 (delantera) es usualmente más gruesa (22 mm); los tubos van simplemente mandrilados y el espesor de malla es muy pequeño (≈ 13 mm), a pesar de lo cual jamás se dan pérdidas.

El desarrollo, como se ve, ha sido completamente empírico. De la unión simplemente

mandrilada y rebordada con virola de cobre, se pasó al progreso aportado por el sello de soldadura suprimiéndose luego el mandrilado para quedar finalmente en una unión con huelgo de la Fig. 4b. Este es todo de cosas ha sido, en algunos casos, altamente satisfactorio, pero no así en otros: en Sud Africa las placas se cambian sistemáticamente cada reparación general ($\approx 150\,000$ a $300\,000$ km); en los EE UU tenemos noticias de que una cosa parecida ocurría, bien que ello pueda ser atribuible al brutal maltrato de que hasta COX(10).

(10) COX, E.S.: "Locomotive Panorama", Ian Allan London 1965.

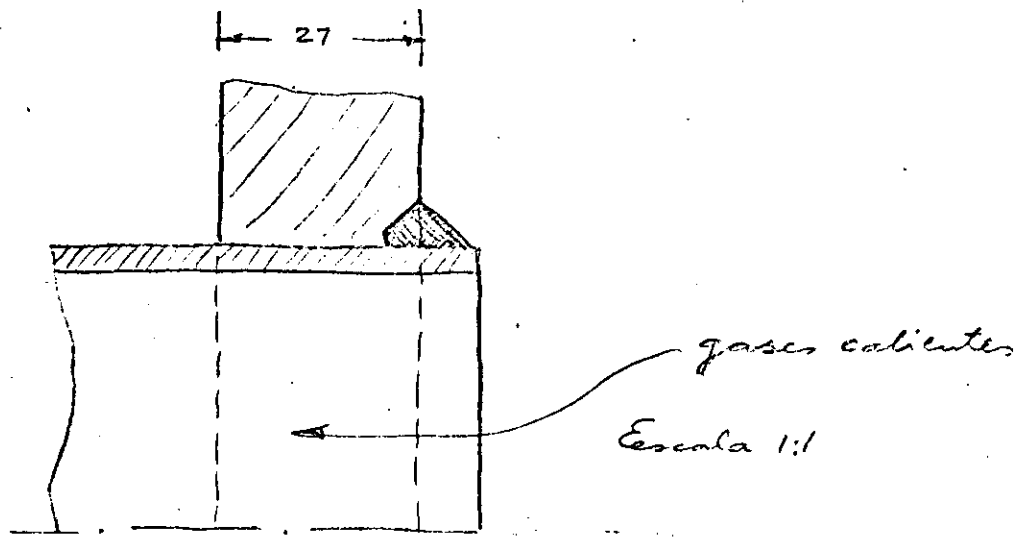


Fig. 5. Típica unión placa-tubo de una caldera
hormotubular industrial.

Las calderas humotubulares industriales tienen un diseño de placas tubulares cuyo espesor (. 22 a 28 mm) se presume más conservativo. La superficie ofrecida para implantar tubos no está tan utilizada como en el caso de las locomotoras y los tubos no son reducidos en su diámetro cerca de la placa, ni tampoco suelen presentar su extremo "frio" agrandado en 1 mm para facilitar el desmontaje. Las variaciones de carga son infinitamente más atenuadas e impercuentes que las que se dan en las locomotoras. En tanto, por ejemplo, que una máquina del servicio subterráneo del FCBR sufre 100 ciclos de carga por día (20000 por año), en los que la carga va desde 10% al máximo en 15 segundos y cesa en un segundo, una caldera industrial típica tiene a lo sumo 20, lo que explica que las dificultades aparezcan en un tiempo mayor, conforme al esquema que se verá.

Una típica unión placa-tubo es la que muestra la Fig. 5. Se observa una gruesa placa tubular y una fuerte soldadura que no puede considerarse como simple cordón de sello. Los tubos son mandrilados soldándoseles sin agua, lo que explica las pérdidas de contacto con introducción de productos que resultan de la evaporación. Como este huelgo no es buscado de intento, se va fuera de control con los resultados que, se presume, están descritos más adelante.

Por lo menos en la práctica ferroviaria, las calderas no son recocidas dado que, salvo raras excepciones, son remachadas. Por lo tanto la placa tubular siempre es asiento de fuertes tensiones residuales. Esta situación también se da cuando se cambian tubos.

