

## **MODELADO MECANICO DE FALLAS EN PLACAS-BASE PORTA VÁLVULAS LINEALES EN CUCHARAS DE ACERO**

**J.L. Otegui<sup>(1)</sup>, G. Sánchez Sarmiento<sup>(2,3)</sup>, M.J. Mizdrahi<sup>(3)</sup>, M. Pizzi<sup>(3)</sup>,  
R. Topolevsky<sup>(4)</sup> y J. Usart<sup>(4)</sup>**

1) INTEMA, Universidad Nacional de Mar del Plata. Av. Juan B. Justo 4302  
(7600) Mar del Plata, Argentina ([otegui@giemdp.com.ar](mailto:otegui@giemdp.com.ar))

2) KB Engineering S.R.L., Florida 274. (1005) Buenos Aires, Argentina.

3) Laboratorio de Mecánica Computacional, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Av.  
Paseo Colón 850. (163) Buenos Aires, Argentina.

4) SIDERAR S.A.I.C. Planta Gral. Savio, San Nicolás, Prov. de Buenos Aires, Argentina

**Palabras clave:** cucharas de acería, fatiga, análisis de falla, modelado termo-elasto-plástico

**Resumen:** *Se analizaron las causas de la aparición de fisuras en las placas bases de las válvulas lineales de las cucharas de colada de una acería, y se definieron modificaciones para minimizar la recurrencia de las fallas. El análisis fractográfico permitió detectar defectos geométricos originados en modificaciones previas. El material de la placa base no presenta daño microestructural severo por efecto de la alta temperatura. La propagación de las fisuras analizadas está acompañada de grandes deformaciones plásticas, y es típica de un proceso de daño por fatiga de muy bajos ciclos. El modelado numérico termo-elasto-plástico realizado con el programa de elementos finitos ABAQUS permitió identificar el estado tensional de origen térmico y mecánico, identificar los parámetros geométricos y operativos que determinaban las fallas detectadas, y establecer el efecto de posibles métodos de mitigación, incluyendo modificaciones en partes metálicas y refractarios. El sitio de iniciación de las fisuras es la zona más solicitada de la placa base. La causa raíz del problema es que se colocaron tarugos tapando los agujeros donde iban los bulones en el diseño anterior, lo cual redujo la sección resistente a menos de la mitad. Su corrección involucró la extracción de los tarugos y el rellenado por soldadura de los agujeros. Aún en condiciones de diseño las tensiones cíclicas son lo suficientemente elevadas como para posibilitar la iniciación de fisuras por fatiga; se recomienda una frecuencia y una metodología de inspección.*

## 1.- INTRODUCCION

La planta siderúrgica donde operan los repartidores en estudio, SIDERAR Planta San Nicolás, cuenta con 22 cucharas de acería, 17 de ellas en operación. La carga de cada cuchara es de 200 ton. La temperatura exterior varía en la superficie de la cuchara entre 250 °C y 400 °C. Cada 40 coladas se cambia el refractario debajo de la línea de escoria, para lo cual se utiliza refractario aluminoso. Sobre la línea de escoria el refractario se cambia cada 120 coladas (MgC). Se realizan inspecciones periódicas, con intervalos de 2 meses.

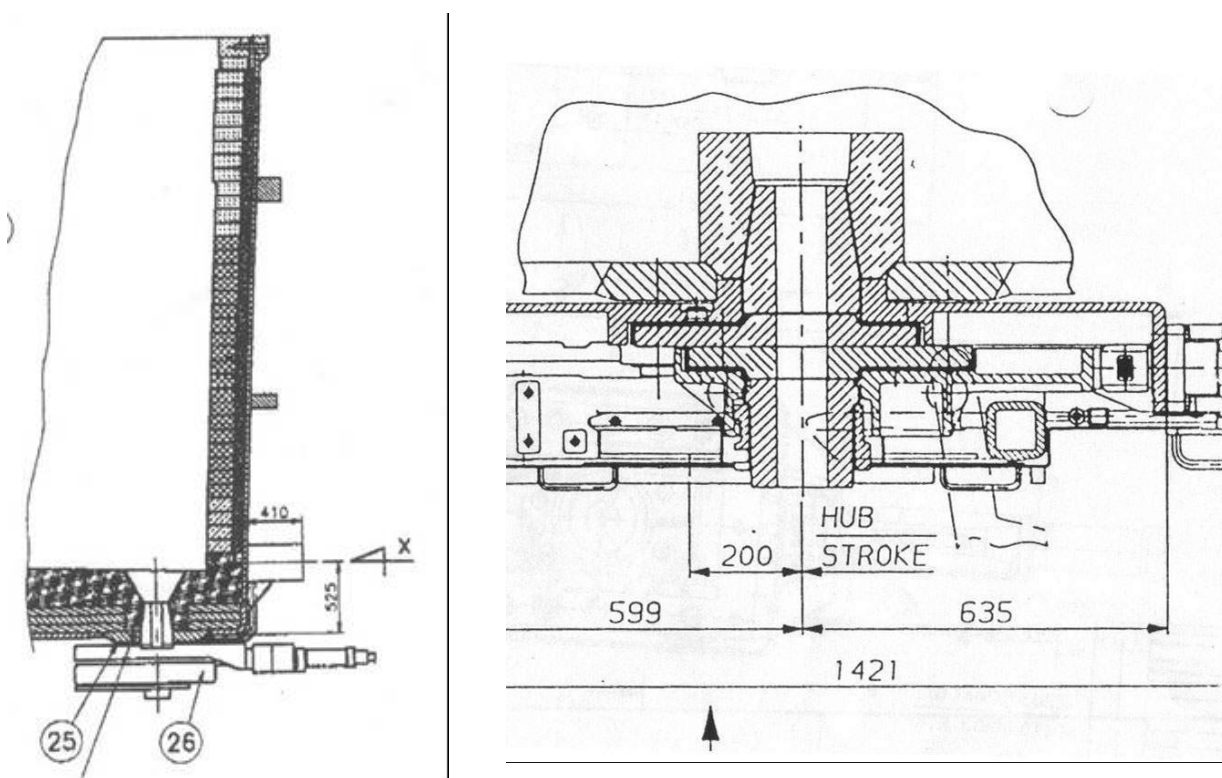


Figura 1 (a,b) : diseño actual de la válvula lineal en el fondo de las cucharas

Las válvulas en el fondo de las cucharas permiten que el acero fundido escurra de la cuchara en forma controlada, ver **Figura 1.a**. Estas válvulas han sufrido en los últimos años varias modificaciones<sup>1</sup>. Las válvulas originales rotativas fueron reemplazadas por otras alternativas, cuyo diseño se muestra en la **Figura 1.b**. El cuerpo de estas válvulas es de menor volumen que las anteriores, y el espesor de las buzas de refractario ha sido reducido respecto del diseño anterior. Consecuentemente la buza nueva es de menor diámetro. Sobre el cuerpo de las válvulas se mecanizan alojamientos para la colocación de los sensores magnéticos de escoria (casetes). Los casetes han presentado problemas de fisuración en cuerpo y soldaduras, por lo que su diseño y forma de colocación han sido modificados.

Dos años después de las modificaciones en una inspección de rutina se encontraron fisuras en la placa base de la válvula, que alcanzaron a penetrar todo el espesor de la placa en forma oblicua, y luego se detectó el mismo problema en otras dos cucharas. El análisis de antecedentes reveló que en este mismo orden cronológico fueron reemplazadas las válvulas rotativas originales por las alternativas actuales, por lo cual se sospecha de un mecanismo de daño en servicio dependiente del tiempo<sup>2</sup>.

La **Figura 2** muestra un croquis de las fisuras aparecidas en las placas-base. Se sospecha que la reducción de espesor de la buza y del cuerpo de la válvula pueden haber producido un aumento en la temperatura de la placa-base, debido al flujo de calor desde la cuchara y desde el distribuidor de abajo, respectivamente, durante la colada. Esto pudo haber generado problemas de creep (termofluencia por exposición a alta temperatura)<sup>3</sup>. Las alternativas de reducción de temperatura que han surgido hasta ahora, con las que se podría resolver el problema son:

1. Reducir la transferencia desde arriba, aumentando el espesor del refractario que aísla la placa base del piso de la cuchara.
2. Aislar del calor de abajo (por radiación desde el metal fundido) durante la colada.

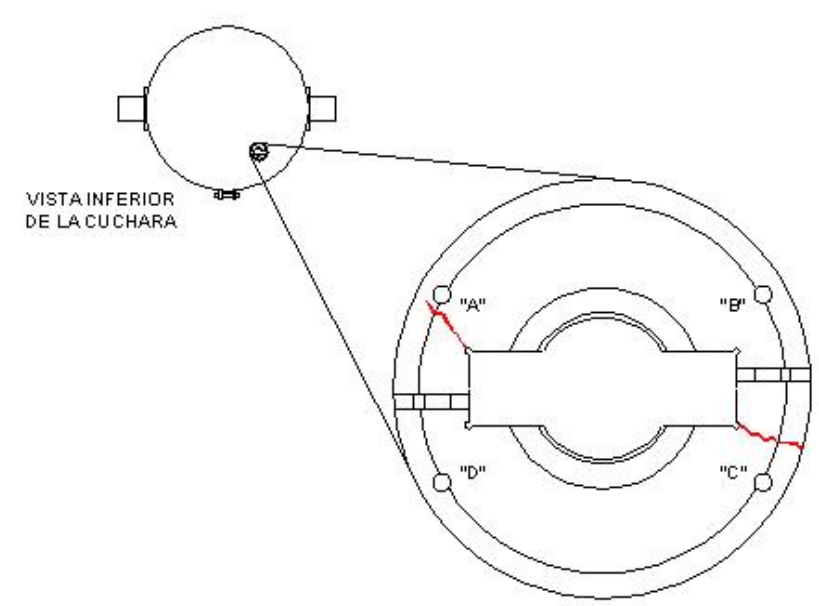


Figura 2: Croquis de las fisuras aparecidas en las placas bases, vistas desde el fondo de las cucharas

## 2.- CARACTERIZACION DE LAS FALLAS

Se realizó un relevamiento visual y fractográfico de una placa fallada, que se muestra en la **Figura 3**. Resulta aparente que las fisuras están iniciadas a partir del acuerdo mecanizado en ambas esquinas del alojamiento cuadrado para los casetes, sobre la superficie superior de la placa, y finalizan antes de llegar a los agujeros con insertos roscados. El punto de finalización en ambos casos está dado por un inserto cilíndrico, según se aprecia en detalle

en el extremo derecho de la **Figura 4**. En el ligamento entre las esquinas fisuradas de los casetes y los insertos en los agujeros roscados hay agujeros provenientes probablemente de la anterior disposición de las válvulas, que no han sido rellenados por soldadura sino que fueron tapados con tarugos pasantes de hierro, aparentemente a presión sin soldar. El ligamento fisurado tiene una sección aproximada de 1/3 de la que surge del plano.



*Figura 3: Fisura a partir del alojamiento del casete en una de las placas bases*

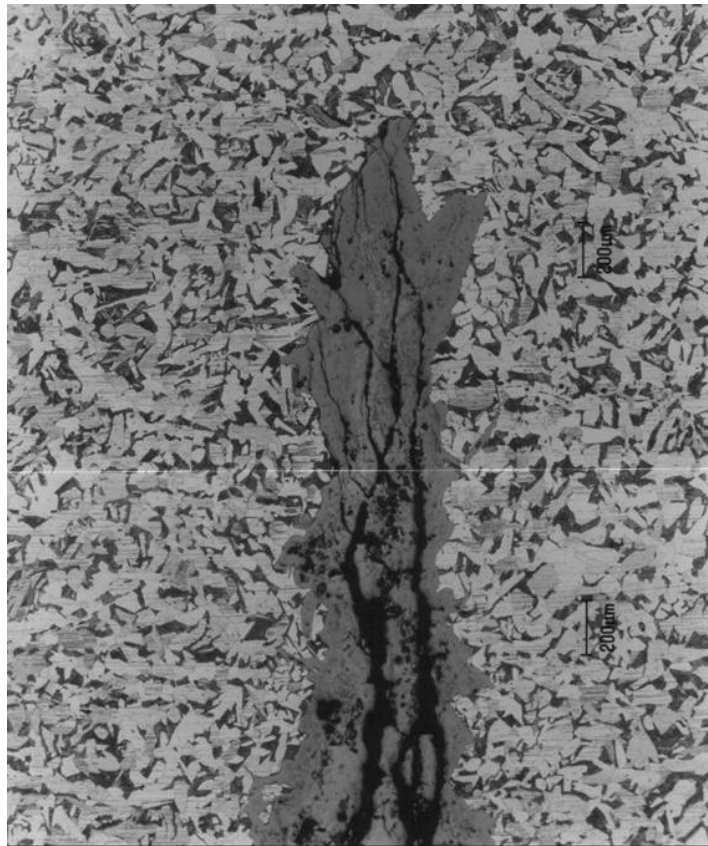
El material de la placa-base es un acero estructural con 0.2 % C y 1.2 % Mn, el nivel de impurezas (S y P) es del orden de 0.02%, con un 0.2 % de Si. No posee otros elementos de aleación. Las durezas medidas están en el orden de 134 RB. Utilizando las correlaciones habituales para aceros ferrítico-perlíticos, esta dureza representa una resistencia a la tracción a temperatura ambiente del orden de 450 MPa.



*Figura 4: Detalle de la fisura desde el casete hasta el tarugo*



La Figura 4 muestra que el sitio de iniciación está asociado a discontinuidades de la superficie de la placa al lado de la tapa inferior del alojamiento del casete, que aparenta haber sido soldada y amolada. La **Figura 5** (X50) muestra el extremo de la fisura sobre una probeta extraída del vértice de esta fisura, pulida y atacada con Nital 2%. Nótese la gran apertura de la fisura, tanto en la boca como en su vértice, y la presencia de fisuras secundarias ramificadas en la zona media de la figura. Su interior se halla relleno de óxidos frágiles, que a su vez se han ido fracturando y muestran fisuras múltiples en dirección mayoritariamente longitudinal a la fisura. El material muestra una microestructura ferrítico-perlítica típica para estos materiales, sin embargo el tamaño de grano es muy grande. El frente de las fisuras tiende a seguir el contorno de los límites de grano. A su vez, los granos presentan una morfología particular; no presentan una geometría equiaxial ni bordes redondeados como ocurre habitualmente. Por el contrario, los granos de perlita alrededor de la fisura presentan un aspecto alargado con caras rectas y quebradas. Estas características son compatibles con fuertes deformaciones plásticas en el material circundante, a medida que la fisura ha ido avanzando.



*Figura 5: (X50) propagación de la fisura en la microestructura de la placa base*

La **Figura 6** (X500) muestra detalles de la morfología de los granos. Se aprecian algunos precipitados en limite de grano, preferentemente en los puntos triples, indicativos de un proceso incipiente de daño por creep. La perlita mantiene su naturaleza laminar, aunque en algunos casos se observa que el espaciado inter laminar es algo mayor que lo habitual. Esto es compatible con el gran tamaño de los granos y procesos difusivos relacionados con una exposición prolongada a alta temperatura, y genera una reducción moderada de las propiedades mecánicas del material respecto de un acero de grano fino.

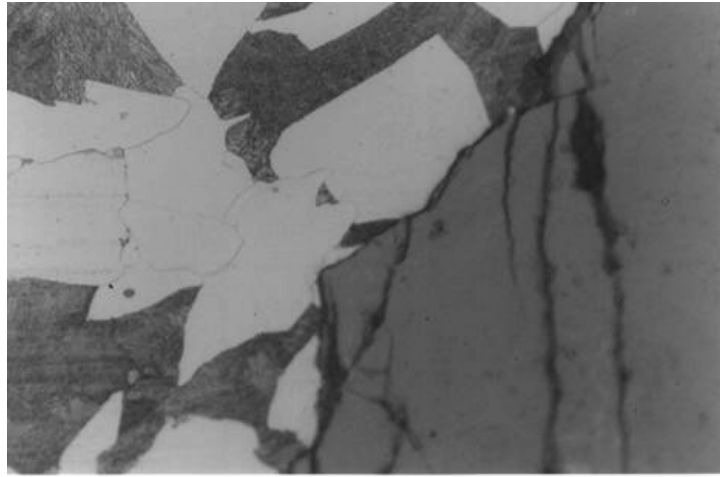


Figura 6: (X500) microestructura de la placa, precipitados en limite de grano y perlita laminar

### 3.- MODELADO TERMO ELASTO PLASTICO POR ELEMENTOS FINITOS

El objetivo del estudio numérico por elementos finitos<sup>4</sup> es comparar las condiciones de transferencia térmica y los esfuerzos en el cuerpo de la válvula en las condiciones de diseño original de la válvula rotativa, la situación actual previa a las fallas, y el diseño mejorado según ha resultado del estudio experimental.

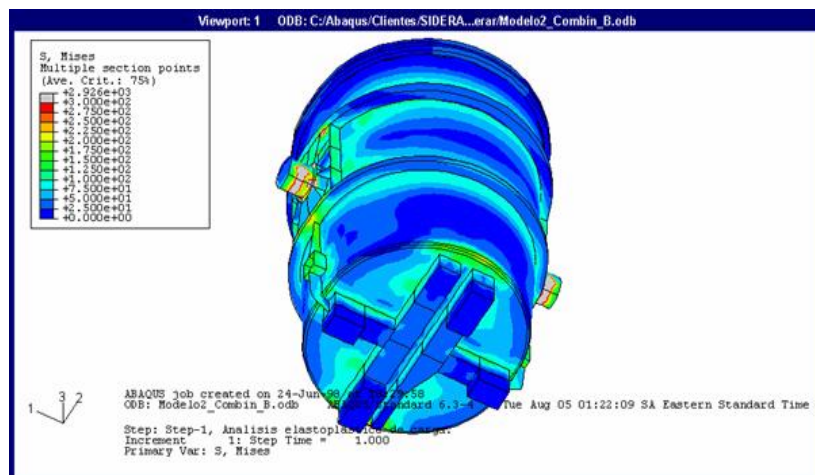


Figura 7. Modelo de la cuchara completa mostrando la distribución de la tensión equivalente de von Mises. El valor máximo (color rojo) corresponde a 200 MPa.

La simulación numérica de la transferencia de calor y del comportamiento termo-elasto-plástico de la válvula ha sido realizado empleando el Sistema General de Elementos Finitos ABAQUS/Standard <sup>5</sup>. La **Figura 7** muestra como ejemplo los resultados del modelo de la cuchara completa para el caso de carga mecánica de mayor sollicitación, que fue desarrollado para estudios anteriores<sup>6 7 8</sup>. La figura muestra la distribución de tensión equivalente de Von Mises cuando la cuchara está suspendida de los muñones La **Figura 8** muestra un detalle del modelo completo de la placa base porta válvula, con indicación de los diferentes materiales. Verde: placa base; rojo: boquilla interna de material cerámico; amarillo: cerámico “Cealcast ASPI”; marrón: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; y azul claro: Pyrotech. La discretización en elementos finitos se muestra en la figura 9. Las propiedades termofísicas de los materiales se detallan en la **Tabla 1**.

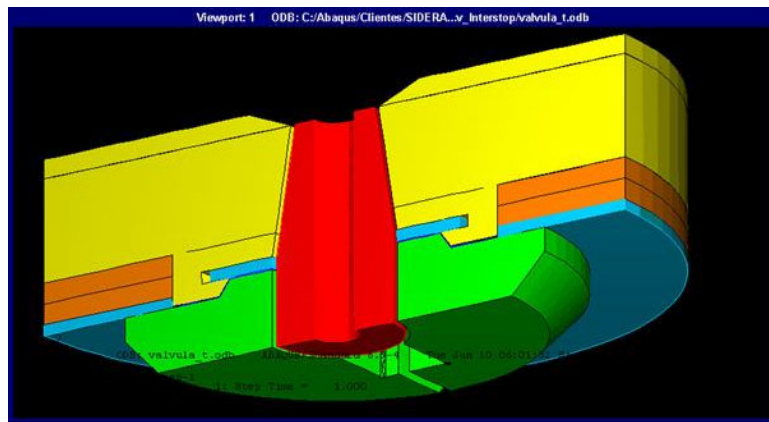


Figura 8. Modelo de la placa base. Se indican los diferentes materiales.

Material	Temperatura [°C]	Conductividad [w/m.K]	Calor espec. [J/kg-K]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Coef. de dilatación térmica [1/K]	Módulo de Young [MPa]	Coeficiente de Poisson [-----]
Cealcast ASPI	400	3.60	1135.	2700.			
	800	3.20					
	1200	2.80					
Boquilla interna ("Inner nozzle") SANIT 065/4	400	3.00	1000.	2700.			
	800	2.90					
	1200	3.00					
Pyrotech	-----	0.23	1500.	2500.			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 45 %	-----	1.50	2200.	1135.			
Ceramic paper	-----	3.00	1000.	2200.			
Acero	200/500	55.0	800.	7800.	22×10 <sup>-6</sup>	210000.	0.30

Tabla 1. Propiedades de los materiales de la placa base.

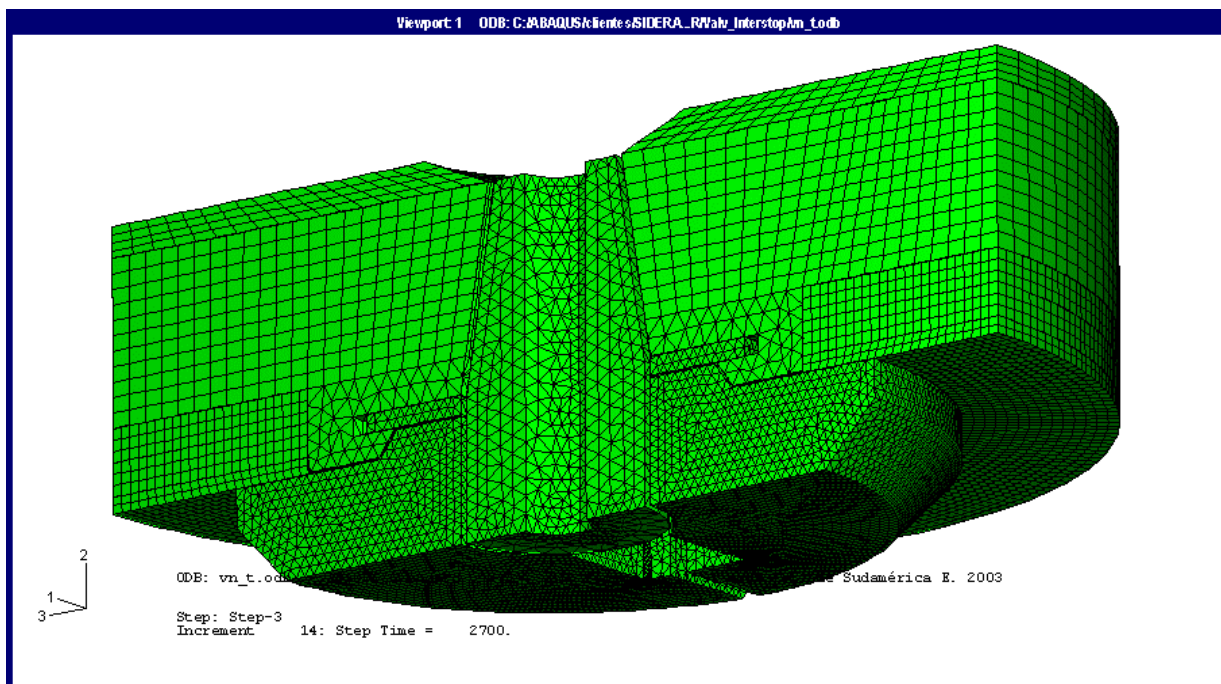


Figura 9. Modelo completo de la válvula mostrando la discretización en elementos finitos.

Se calcularon los estados de tensiones en la cuchara original con alternativas de aumento de capacidad, ante distintas condiciones de sustentación y bajo la acción de las siguientes cargas:

- Peso propio de la cuchara y los refractarios sobre el piso de la cuchara.
- Distribución espacial de temperatura, previamente calculada con el mismo sistema.
- Presión ferrostática correspondiente a 200 Tm de acero líquido.
- Presión sobre la carcasa ejercida por la dilatación térmica de los refractarios, de 1.05 MPa

El cálculo de la distribución espacial y temporal de la temperatura en el modelo de válvula con los materiales refractarios adyacentes se ha realizado considerando tres etapas sucesivas de operación de la cuchara:

- Etapa 1: Operación de llenado de acero en la cuchara y transporte de la misma llena de acero líquido (90 minutos).
- Etapa 2: Operación de vaciado de la cuchara a través de la buza (30 minutos).
- Etapa 3: Enfriamiento de la cuchara en aire (45 minutos).

Para las tres etapas se calculó la distribución espacial y temporal de la temperatura desde el inicio de la misma. La **Figura 10** muestra como ejemplo las isotermas al final de la primera etapa. Por su parte, en la **Figura 11** se hace lo propio para los 1800 segundos de iniciada la segunda etapa.

El procedimiento experimental ha mostrado que las fallas están relacionadas a un error en el procedimiento de modificación de las válvulas, relacionado con la incorrecta reparación de los agujeros mediante entarugado. Por otro lado, este problema resulta de corrección razonablemente sencilla mediante rellenado por soldadura de los agujeros. Por ende, el



modelado se concentra en verificar las condiciones de integridad futura de las placas base, una vez que los agujeros hayan sido reparados correctamente.

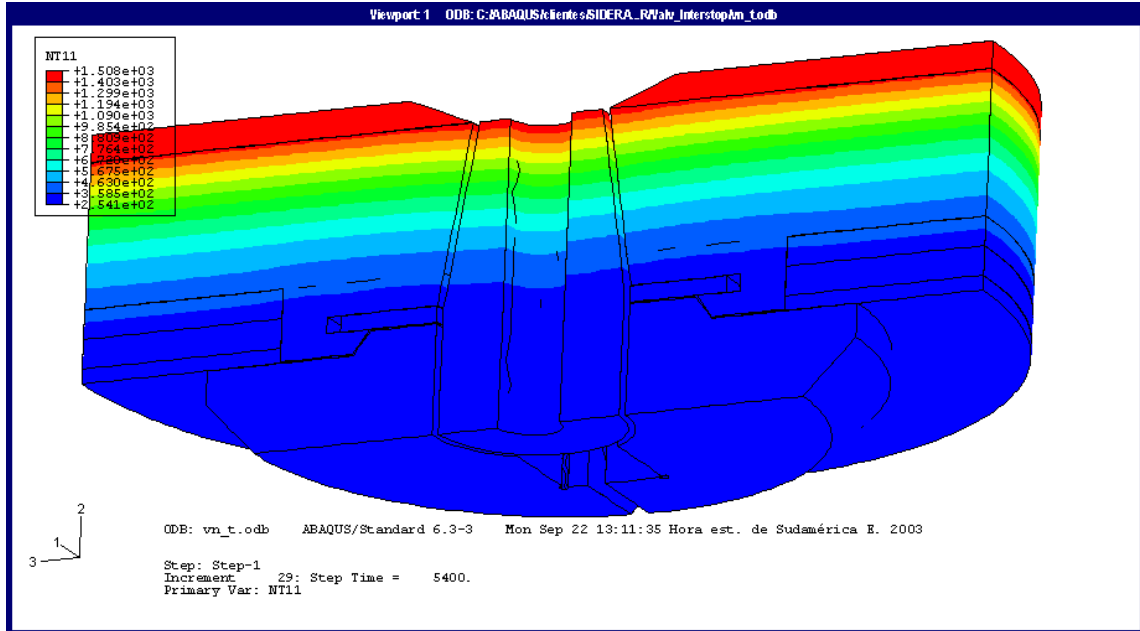


Figura 10. Temperatura a los 5400 s de comenzada la operación de llenado de acero en la cuchara

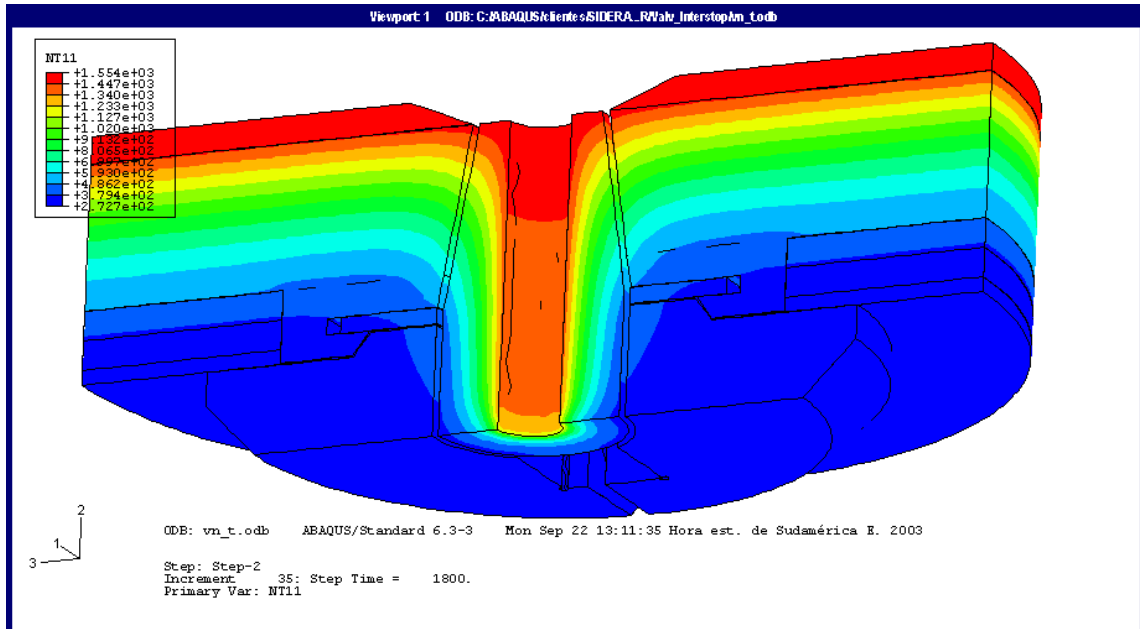


Figura 11. Distribución de temperatura a los 1800 s de comenzada la operación de vaciado de la cuchara a través de la buza.

De acuerdo a los datos obtenidos de bibliografía, a las tensiones en la curva tensión-deformación verdadera determinada experimentalmente a temperatura ambiente se les aplicó un factor 0.6 para tener en cuenta la disminución de la tensión de fluencia con la temperatura. En la **Figura 12** se observa la curva de tensión-deformación verdadera medida. La correspondiente curva de tensión-deformación plástica que resulta de descontar la deformación elástica se aplicó en el modelo realizado con el programa ABAQUS para el análisis de tensiones elasto-plásticas en el cuerpo de la válvula.

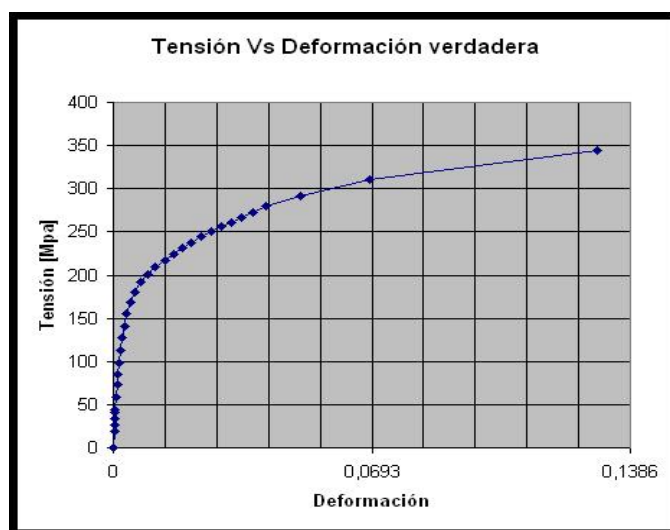


Figura 12: Curva tensión-deformación verdadera del material de la placa base a temperatura ambiente.

Al cuerpo de la válvula se lo consideró sometido a dos sollicitaciones superpuestas: una tensión de tracción uniforme que resulta del modelo global de la cuchara, y la sollicitación térmica que resulta de considerar la distribución de temperatura dependiente del tiempo calculada en el punto anterior y aplicada solo a dicha parte. Para la tensión de tracción uniforme en el borde del cuerpo de la válvula se tomó conservativamente un valor de 30 MPa, según resulta del análisis. La distribución espacial y temporal de la temperatura particularizada para el cuerpo de la válvula fue aplicada como carga térmica sobre la parte del modelo de la placa-base sin el casete.

Los máximos valores combinados de tensión equivalente de von Mises en el cuerpo de la válvula se registran a los 2700 segundos de comenzada la etapa de enfriamiento de la cuchara. La distribución de tensiones equivalentes en la zona del alojamiento del casete se muestra en la **Figura 13**. Las máximas tensiones equivalentes son del orden de 200 MPa para los puntos más sollicitados de la placa. En la **Figura 14** se grafica la evolución de la tensión equivalente de von Mises combinada en algunos puntos típicos, durante el ciclo térmico de la cuchara. La máxima amplitud del ciclo entre tensiones máxima y mínima es del orden de 160 MPa para los puntos más sollicitados de la placa.

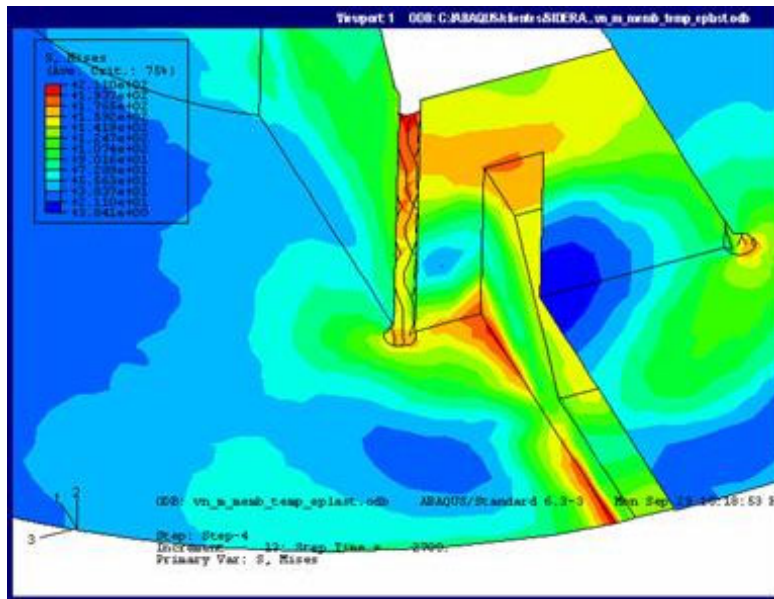


Figura 13: tensiones equivalentes en la zona del alojamiento del casete

Los máximos valores de tensión principal máxima combinada (responsable de la apertura y propagación inestable de las fisuras) se registran al comienzo del ciclo térmico (antes de comenzar el colado). La distribución de la máxima tensión principal combinada se muestra en la **Figura 15**. Las máximas tensiones principales son del orden de 190 MPa para los puntos más solicitados de la placa.

En la **Figura 16** se grafican las evoluciones de la tensión principal máxima (responsable de la propagación por fatiga de las fisuras) en los puntos típicos de la placa base durante el ciclo térmico de la cuchara.

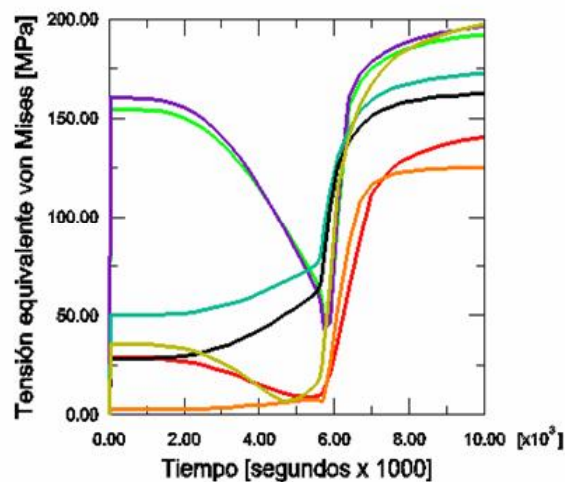


Figura 14: Evolución de la tensión equivalente en algunos puntos críticos de la válvula durante el ciclo térmico de la cuchara

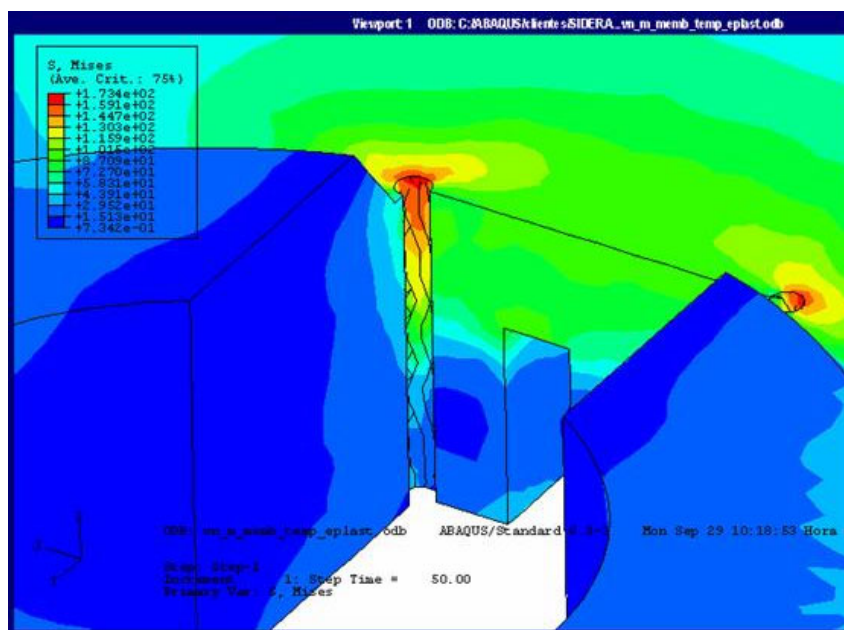


Figura 15: tensiones principales máximas en la zona del alojamiento del casete.

Se observa que los puntos correspondientes a las curvas azul y verde en la figura 16 sufren ciclos de tensión de una amplitud máxima del orden de los 240 MPa, con valores mínimos compresivos de hasta -50 MPa. . Estas curvas corresponden a los puntos ubicados en la intersección del agujero en la esquina del alojamiento de los casetes y la cara superior de la placa base, que se definen por lo tanto como puntos críticos para la iniciación de fisuras por fatiga.

#### 4.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de los análisis mecánicos y microestructurales muestran que el material de la placa base de las válvulas lineales en el fondo de las cucharas no está sometido a un mecanismo severo de daño por creep por efecto de la alta temperatura. Se observa un daño microestructural incipiente, precipitación de carburos en borde de grano, indicativo que la placa-base ha trabajado a temperaturas dentro del rango donde es posible degradación por creep o fluencia a alta temperatura del material.

No se observa propagación de fisuras por creep; estas fisuras serían de tipo intergranular y ramificado, con vértices agudos. Tampoco se observa propagación de fisuras por fatiga de altos ciclos, producto de las tensiones cíclicas originadas en los gradientes térmicos u otras cargas mecánicas. Estas fisuras tendrían un vértice muy agudo y serían de tipo transgranular. La evidencia experimental muestra que la propagación de las fisuras está acompañada de grandes deformaciones plásticas en el material que las rodea. Este tipo de propagación es típica de un proceso de daño por fatiga de muy bajos ciclos.

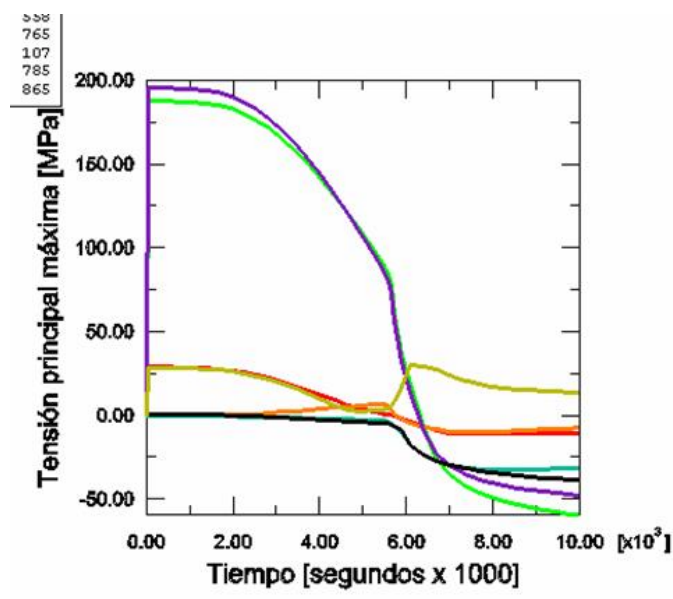


Figura 16: Evolución de la tensión principal máxima en algunos puntos críticos de la válvula durante el ciclo térmico de la cuchara

La naturaleza cíclica del proceso de descarga del metal fundido ha generado tensiones mecánicas y térmicas cíclicas superiores a la tensión de fluencia del material, que provocaron la propagación de fisuras por fatiga de bajos ciclos en las zonas más solicitadas de la placa, esto es, a partir del concentrador en la esquina de los casetes (Figura 2). La velocidad con que el daño se está produciendo es alta.

Los criterios fractomecánicos más usados asocian la velocidad de propagación de las fisuras con el valor de la fuerza impulsora de propagación de fisura. Este valor no está disponible actualmente. Sin embargo, existe otro criterio basado en el concepto de COD. Esta manera de estimar la tasa de propagación se basa en considerar que cada instancia de propagación está gobernada por la deformación plástica irreversible del extremo de la fisura. Este modelo asocia la longitud de cada propagación con la mitad de la apertura de la fisura (“crack opening displacement”). La formación de óxidos de alta temperatura en las superficies de la fractura ha evitado que la fisura volviera a cerrarse completamente durante cada ciclo de descarga, fenómeno conocido como “oxide induced closure”.

Del análisis de las figuras 5 y 6 se obtiene un ancho promedio en la punta de la fisura de unos 150 micrones. De acuerdo al modelo de amochamiento de fisura, el ancho en el vértice es aproximadamente la mitad de la propagación aparente por deformación plástica. El modelo de propagación por fatiga de bajos ciclos (con grandes deformaciones plásticas en el material del vértice de la fisura) permite definir un límite máximo a la tasa neta de propagación en cada ciclo aproximadamente igual a la propagación aparente por deformación plástica. Esto permite estimar una tasa máxima de propagación de la fisura del orden de 0.07 mm por ciclo. Esta velocidad corresponde a una fisura prácticamente pasante en el ligamento, por lo que debe ser considerada como la máxima posible en el proceso total de degradación.



Se ha determinado que la longitud total del ligamento remanente entre la esquina del casete y la superficie del tarugo es de 25 mm. Considerando una velocidad de avance promedio de 0.05 mm / ciclo, esto representa una vida total estimada para la propagación de las fisuras del orden de 500 ciclos. Esta estimación está sujeta a errores importantes; las estimaciones de vida a la fatiga están habitualmente asociados a una dispersión de un orden de magnitud. Sin embargo, este resultado permite justificar la detección del daño en las cucharas que llevan más tiempo en uso desde el reemplazo de las válvulas rotativas por las lineales.

Los resultados de los estudios realizados permiten concluir que el factor que más ha influido para el crecimiento de defectos sobre las válvulas ha sido la escasa resistencia mecánica de la placa en la zona aledaña a los alojamientos de los casetes. Esto se produjo como consecuencia de un error de diseño o construcción de las modificaciones realizadas en la placa. El sitio de iniciación de las fisuras, en la esquina del acuerdo del alojamiento del casete y la superficie superior de la placa base, coincide con la zona más solicitada de la placa-base, según surge del análisis tensional termo-elasto-plástico por elementos finitos realizado (figura 15).

El problema fundamental que dio origen al daño es que en oportunidad de la modificación de la válvula se colocaron unos tarugos pasantes tapando los agujeros donde iban los bulones antes, e hicieron agujeros nuevos. Esto redujo la sección resistente a menos de la mitad. El ligamento fisurado tiene una sección aproximada del 40 % de la que surge del plano. Si las tensiones en la zona de iniciación son inversamente proporcionales a la sección resistente, esto es una razón suficiente para justificar la fisuración observada, pues las tensiones cíclicas elásticas serían del orden de 2.5 veces superiores a lo previsto. Como las tensiones en los puntos más solicitados del material no pueden superar la tensión de colapso plástico del material, en estos puntos se producen grandes deformaciones plásticas en cada ciclo de operación de la cuchara.

## **5.- MÉTODOS DE REPARACIÓN Y MITIGACIÓN**

El procedimiento experimental ha mostrado que las fallas están relacionadas con un error en el procedimiento de modificación de las válvulas, relacionado con la incorrecta reparación de los agujeros mediante entarugado. Este problema tiene una corrección razonablemente sencilla, que involucra la extracción de los tarugos y el rellenado por soldadura de los agujeros, a medida que las cucharas van saliendo de servicio para su reparación, o el reemplazo de las bases por nuevas. Durante esta operación se recomienda también verificar la presencia de fisuras a partir de la esquina del alojamiento de los casetes, y su eventual eliminación por amolado y soldadura. El material de la placa analizada no muestra signos de degradación microestructural, por lo que una vez realizadas las soldaduras el material volverá aceptablemente a sus condiciones de resistencia de diseño.

Una vez realizadas las verificaciones y reparaciones, las placas base volverán a su condición de diseño. Los estados de tensiones y deformaciones en estas condiciones son mayoritariamente originados por dilataciones y contracciones diferenciales de origen térmico. En estas condiciones los máximos valores combinados de tensión equivalente de von Mises fueron estimados mediante análisis por elementos finitos en el orden de 200 MPa para los

puntos más solicitados de la placa. La mínima resistencia a la fluencia del material de la placa base a temperatura de funcionamiento, estimada a partir de los ensayos de tracción a temperatura ambiente realizados, es también de 200 MPa. Se concluye que en ausencia de fisuras u otros defectos las placas no presentarían problemas de fallas por plastificación generalizada.

Los máximos valores de tensión principal (responsable de la apertura y propagación inestable de las fisuras) son del orden de 190 MPa para los puntos más solicitados de la placa. Estos puntos se ubican en la intersección del agujero en la esquina del alojamiento de los casetes y la cara superior de la placa base, sitio donde iniciaron las fisuras analizadas en las placas base falladas. La amplitud máxima de los ciclos de tensión durante la operación de la cuchara alcanza los 240 MPa, con valores mínimos compresivos de -50 MPa y máximos tractivos de 190 MPa. Se observa que aún en condiciones de diseño, las estimaciones realizadas para las máximas tensiones cíclicas son del orden de la tensión de fluencia estimada para el material a la temperatura de trabajo. Por lo tanto, no puede asegurarse que no se van a volver a iniciar fisuras por fatiga de bajo número de ciclos en la zona del acuerdo cilíndrico, en las esquinas del alojamiento de los casetes. Se recomienda por lo tanto establecer una frecuencia y metodología de inspección no destructiva de esta zona.

## 6.- CONCLUSIONES

Se analizaron las causas de la aparición de fisuras en las placas-base de las válvulas lineales de las cucharas de colada de una acería, y se definieron modificaciones para minimizar la recurrencia de las fallas. El análisis fractográfico permitió detectar defectos geométricos originados en modificaciones previas. El modelado numérico termo-elasto-plástico realizado con el programa de elementos finitos ABAQUS permitió identificar el estado tensional de origen térmico y mecánico, identificar los parámetros geométricos y operativos que determinaban las fallas detectadas, y establecer el efecto de posibles métodos de mitigación, incluyendo modificaciones en partes metálicas y refractarios.

## 7.- REFERENCIAS

1. J. Usart et al.: *Changes in Steel Ladles*, 14 th. IAS Steelmaking Conference, San Nicolas, 2003.
2. J.L. Otegui: "Análisis de falla en placas base porta válvulas lineales en cucharas de acero". Informe GIE 2102-02/03, 2003.
3. G.Venkataraman, *Assessing residual life of thermal power plant components*. Welding Research Institute, BHEL, Tiruchi, India, 2001.
4. G. Sánchez Sarmiento et al: *Análisis termico y de tensiones por elementos finitos de las válvulas Lineales Interstop de cucharas de acero liquido* . Informe KB Engng. N° 0011-2003.
5. ABAQUS, Inc.: Users Manual ABAQUS/Standard Version 6.3. 2003.

6. G. Sánchez Sarmiento, A. Gastón, R. Topolevsky, J. Madías y S. Sylvestre Begnis: “Estudios de la evolución de la temperatura y de las tensiones térmicas en los refractarios y carcaza de cucharas de acería de SIDERAR S.A.I.C.”. Informe Técnico de KB Engng N° 001/99.
  7. G. Sánchez Sarmiento, R. Topolevsky, M. Mizdrahi, M. Pizzi, M.J.A. Solari, W. Agnese y J. Usart: “*Análisis estructural adicional de las cucharas de acería de SIDERAR con diseños alternativos de refuerzos superiores*”. Informe Técnico de KB Engng N° 011-2000.
  8. G. Sánchez Sarmiento, J.L. Otegui, R. Topolevsky, M. Mizdrahi, M. Pizzi, M. Solari, W. Agnese y J. Usart: “*Análisis estructural de las cucharas de acería de Siderar con diseños alternativos de refuerzos superiores. Cálculos adicionales y conclusiones*”. Informe Técnico de KB Engng N° 001-2001.
-