

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial



**Placas Esmaltadas
para Intercambiadores de Calor
en Centrales Térmicas**

Titulación: Ingeniero Organización Industrial
Intensificación:
Alumno/a: José Luís Meseguer Valdenebro
Director/a/s: D. Francisco Molinos Ortega
D. Isidoro Martínez Mateo

Cartagena 19 de Septiembre de 2007

ÍNDICE.

1. OBJETIVOS.....	Pag. 3 a pag. 5
2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE INTERCAMBIO GAS- GAS Y EMELEMENTOS CONSTRUCCTIVOS.....	Pag. 6 a pag 13
2.1. INTRODUCCIÓN.....	Pag. 7 a pag 8
2.2. GENERALIDADES DEL INTERCAMBIO GAS-GAS.....	Pag. 9 a pag 10
2.3. MANUFACTURA DE LAS PLACAS DE LOS INTERCAMBIADORES.....	Pag. 11 a pag 13
3. SELECCIÓN DEL MATERIAL EN LA MANUFACTURA DE LAS PLACAS.....	Pag. 14 a pag 30
3.1. INTRODUCCIÓN.....	Pag. 15 a pag 16
3.2. TIPOS DE PLACAS.....	Pag. 17 a pag 27
3.3. ENSAYOS DE MICRODUREZAS.....	Pag. 28 a pag 30
4. LA FRITA.....	Pag. 31 a pag 40
4.1. INTRODICCIÓN.....	Pag. 32 a pag 34
4.2. DIFRACTOMETRIA Y MICROSCOPIA ELECTRONICA.....	Pag. 35 a pag 37
4.3. TERMOGRAVIMETRIA Y CALORIMETRIA.....	Pag. 38 a pag 40
5. LIMITE DE UTILIZACION DEL ESMALTADO.....	Pag. 41 a pag 51
5.1. GENERALIDADES.....	Pag. 43 a pag 44
5.2. CONDICIONES EN LAS QUE SE HA REALIZADO EL ENSAYO.....	Pag. 45 a pag 46
5.3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA.....	Pag. 47 a pag 47
5.4. MICROGRAFIAS OBTENIDAS DESPUES DE LOS CICLOS INDICADOS.....	Pag. 48 a pag 51
6.PROBLEMA DE LOS CANTOS QUEMADOS.....	Pag. 52 a pag 70
6.1. INTRODUCCION.....	Pag. 54 a pag 58
6.2. OBRA 1335.....	Pag. 59 a pag 63
6.3. BOBINAS 432, 16 Y 17.....	Pag. 64 a pag 66

6.4. OBRA 1385.....	Pag. 67 a pag 68
6.5. OBRA 03/1405.....	Pag. 69 a pag 70
7. PROBLEMA DEL EMPAQUETADO DE LAS PLACAS.....	Pag. 71 a pag. 99
7.1. INTRODUCCION.....	Pag. 72 a pag. 73
7.2. ANALISIS DE LOS PUNTOS INICIALES DE CONTACTO.....	Pag. 74 a pag. 83
7.3. ANALISIS DE LA DEFORMACION DE LAS PLACAS.....	Pag. 84 a pag. 91
7.4. COMPROBACION DE LA UTILIDAD DE LOS LIQUIDOS PENETRANTES.....	Pag. 92 a pag. 94
7.5. PLACA DE PENSADO CON ESPESOR DE 0.5 MM.....	Pag. 95 a pag. 97
8. PROBLEMA DE HERVIDOS.....	Pag. 99 a pag. 108
8.1. INTRODUCCIÓN.....	Pag 100 a pag. 101
8.2. MICROGRAFIAS REALIZADAS.....	Pag. 102 a pag. 102
8.3. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA DE GRANO.....	Pag. 103 a pag. 108
9. CONCLUSIONES.....	Pag. 109 a pag. 111
10. BIBLIOGRAFIA.....	Pag. 111 a pag. 112

CAPITULO 1: OBJETIVOS

El objetivo que se pretende en este proyecto fin de carrera, es estudiar el comportamiento de intercambiadores de calor de placas esmaltadas empaquetadas al ser sometidas a atmósferas sulfurosas.

La información existente sobre el acero esmaltado, y posterior empaquetado, es bastante escasa. Son muy pocas las empresas que se dedican a dicha manufactura y guardan celosamente las diferentes técnicas que han sido elaboradas a lo largo de los años. No hay un método

constructivo de estos sofisticados procesos de intercambio de calor. Solo la experiencia en la manufactura de estos equipos define y optimiza las variables de diseño.

Debido a la escasa y dispersa información referente a este tipo de construcciones, hemos considerado que sería interesante estudiar toda la información posible, para poder clasificar los tipos de acero a emplear.

La escasa información de que se dispone, obliga a realizar ensayos de laboratorio con los diferentes materiales y estudiar su comportamiento en los múltiples ensayos realizados.

A la hora de la selección, habrá que tener en cuenta, la problemática de nuestro sistema. Las exigencias que tienen los sistemas de intercambio térmico en condiciones corrosivas en atmósferas sulfurosas.

También será de nuestro estudio el tipo de fritada y su comportamiento elástico metal-esmalte a partir de una temperatura determinada.

La finalidad del proyecto, sobre elementos constructivos; es realizar un seguimiento del comportamiento de las placas esmaltadas en diferentes

condiciones sulfurosas, y un plan de mejoras frente a los diferentes defectos que se van presentando.

INDICE DEL CAPÍTULO 2:

CARACTERISTICAS DEL SISTEMA DE INTERCAMBIO GAS-GAS Y ELEMENTOS COSTRUCTIVOS.

1. INTRODUCCIÓN
2. ESTUDIO DEL SISTEMA DE INTERCAMBIO
3. MANUFACTURA DE LOS INTERCAMBIADORES.

CAPITULO 2: CARACTERÍSTICAS DELSISTEMA DE INTERCAMBIO GAS- GAS Y ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS.

1. INTRODUCCIÓN.

El sistema de intercambio térmico entre dos fluidos incomprensibles, es decir gas-gas, provoca el condensado de uno de estos. La causa del fenómeno está fundamentada en la cesión del calor entre dos fluidos con diferentes entalpías.

Proyecto Fin de Carrera:

Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 8 de 112

Los gases que son conducidos por estos equipos no son portadores exclusivos del fluido de trabajo de la planta industrial, además lleva diversas impurezas que se alejan del intercambio térmico ideal.

La temperatura puede variar, afectando esto a la concentración de los gases a emplear, pudiendo aparecer la problemática de la corrosión a la temperatura de condensación de los gases sulfurosos sobre la placa esmaltada.

Existe la posibilidad de los desconches en la placa, debido a la presión de empaquetado. La variable “presión”, es un factor importante a tener en cuenta a la hora de proteger al acero, y por lo tanto evitar la corrosión sulfurosa.

Existe otra posibilidad conocida como “cantos quemados”. Esto se debe al corte efectuado en la manufactura de las placas de acero antes de esmaltar.

2. GENERALIDADES DEL INTERCAMBIADOR GAS-GAS

Los intercambiadores gas/gas estas confeccionados por medio de la unión de dos placas esmaltadas.

Estás placas van unidas entre sí en sentido vertical, de una forma alineada, formando un quesito, como se puede ver en la figura 1:



Figura 1.

Proyecto Fin de Carrera:

Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 10 de 112

Las placas que confeccionan el paquete, poseen dos perfiles, uno corrugado y otro ondulado, como se puede ver el figura 2.

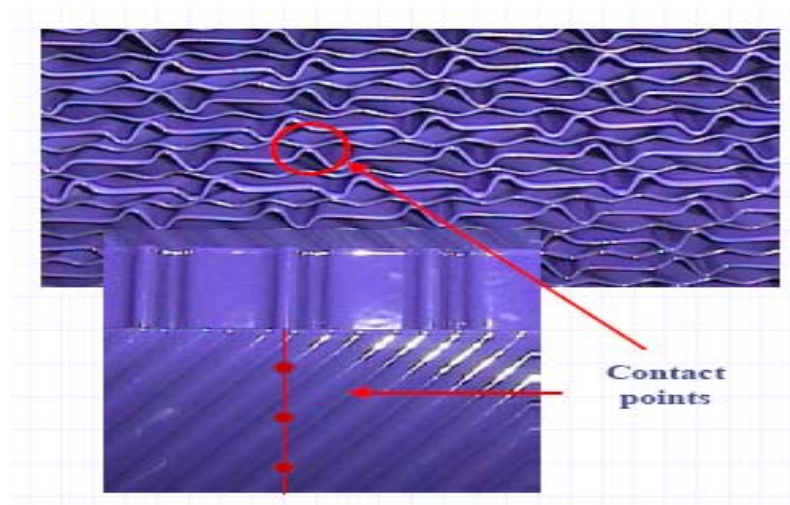


Figura 2

3.MANUFACTURA DE LAS PLACAS DE LOS INTERCAMBIADORES

La confección de las placas, pasa por un tren de mecanizado, descrito a continuación:

El primer paso consiste en introducir la placa en un tren de plegado, dándole la forma, corrugada o ondulada. Ver figura 3.



Figura 3.

A continuación se secciona la bobina en un tren de corte, con una cizalla (figura 4) en diferentes tamaños, de tal forma que pueda rellenarse el quesito de la figura 1.



Figura 4.

Una vez cortada, se esmaltan en un horno de esmaltado. Ver figura 5.

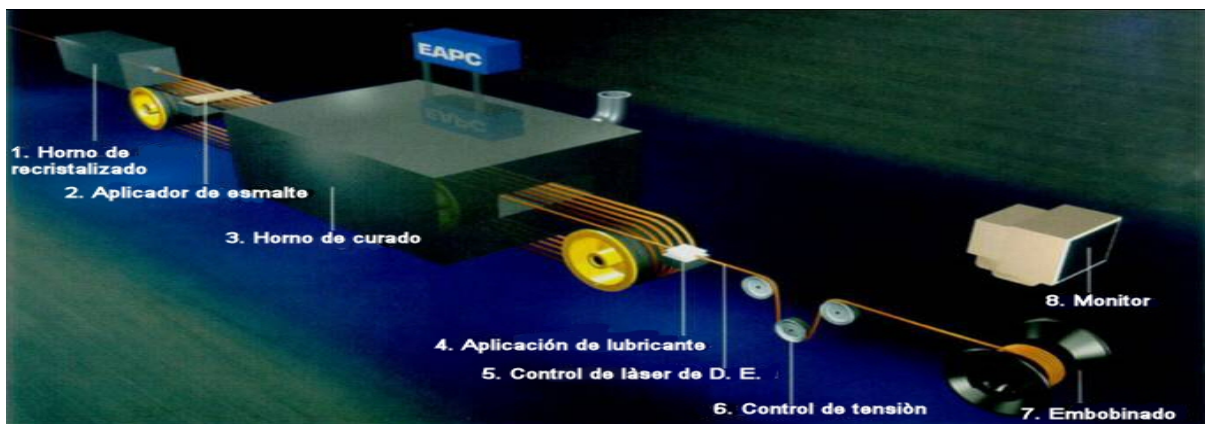


Figura 5

Una vez esmaltada placa , se introducen en el quesito y se empaquetan con la ayuda de una prensa hasta 0.7 kg/cm^2 . Figura N° 6.



Figura N° 6.

INDICE DEL CAPÍTULO 3:

SELECCIÓN DEL MATERIAL EN LA MANUFACTURA DE LAS PLACAS

1. INTRODUCCIÓN
2. TIPOS DE PLACAS
3. ENSAYOS DE MICRODUREZAS

1. INTRODUCCIÓN

Para seleccionar el acero con el que vamos a trabajar, tenemos que tener en cuenta el uso que se le va a dar al material y las condiciones a las que va a estar sometido.

Este procedimiento, lleva a la selección del acero en función de sus propiedades mecánicas.

Se seleccionan dos tipos diferentes de placas, de casas suministradoras diferentes, Sollac y Aceralia y se les somete a un ensayo de rugosidades y microdurezas.

Los ensayos se realizan sobre cuatro placas de acero. Dos de ellas son chapas que pertenecen a la empresa suministradora española Aceralia y las otras dos a la gala Sollac.

Para el análisis de la rugosidad se mide sobre ambas caras de las placas, y en dos direcciones, según el sentido de laminación y según una dirección perpendicular a la anterior. Además, en cada caso se toman medidas sobre

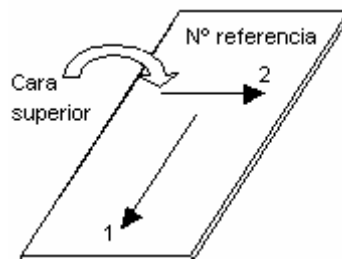
Proyecto Fin de Carrera:

Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 16 de 112

5 puntos distintos, a fin de calcular los valores medios y conseguir un resultado más representativo de la rugosidad real de la placa.

En las medidas de la rugosidad existen muchos parámetros distintos, es decir, hay muchos valores de rugosidad que nos informan sobre el acabado superficial. En este caso elegimos los valores de la rugosidad media y de la rugosidad máxima. Con la medida de la rugosidad media podemos saber si el acero es de tipo normal o rugoso según la norma española UNE-EN 10209, para productos planos laminados en frío, de acero dulce para esmaltado por vitrificación.

Los resultados obtenidos, medidos en micras, son los siguientes:



2. TIPOS DE PLACAS.

PLACA N° 1 DE ACERALIA, REF: 1/3/810/75/42

Cara superior, dirección 1						
Pto. medida	1	2	3	4	5	Media
R_a	0.72	0.59	0.72	0.61	0.92	0.71
R_t	6.46	6.62	8.31	7.14	7.76	7.26
Cara superior, dirección 2						
Pto. Medida	1	2	3	4	5	Media
R_a	0.57	0.66	0.72	0.74	0.74	0.69
R_t	5.71	6.05	7.64	9.67	7.57	7.33

Cara inferior, dirección 1						
Pto. Medida	1	2	3	4	5	Media
R_a	0.61	0.6	0.69	0.7	0.58	0.64
R_t	6.87	7.08	7.39	7.35	7.76	7.29
Cara inferior, dirección 2						
Pto. Medida	1	2	3	4	5	Media
R_a	0.55	0.61	0.52	0.45	0.68	0.56
R_t	6.95	8.56	7.22	4.51	9.63	7.37

PLACA N°2 DE ACERALIA, REF: 1/3/810/75/42

Cara superior, dirección 1						
Pto. medida	1	2	3	4	5	Media
R _a	0.76	0.81	0.92	0.9	0.77	0.83
R _t	8.76	8.86	8.36	8.16	8.55	8.54
Cara superior, dirección 2						
Pto. Medida	1	2	3	4	5	Media
R _a	0.8	0.83	0.81	0.96	0.75	0.83
R _t	9.38	9.12	6.55	8.41	6.77	8.05

Cara inferior, dirección 1						
Pto. Medida	1	2	3	4	5	Media
R _a	0.63	0.7	0.85	0.86	0.85	0.78
R _t	8.37	9.16	8.43	6.9	8.05	8.18
Cara inferior, dirección 2						
Pto. Medida	1	2	3	4	5	Media
R _a	0.71	0.83	0.71	0.81	0.72	0.76
R _t	7.11	10.98	7.22	9.65	5.02	8.00

PLACA N°1 DE SOLLAC, REF: 1/3/690/65/51

Cara superior, dirección 1						
Pto. medida	1	2	3	4	5	Media
R _a	2.49	2.27	1.92	2.24	2.32	2.25
R _t	11.67	11.6	11.59	11.06	11.19	11.42

Cara superior, dirección 2						
Pto. Medida	1	2	3	4	5	Media
R _a	2.4	2.34	2.13	2.27	2.18	2.26
R _t	12.16	12.83	11.54	12.52	11.91	12.19

Cara inferior, dirección 1						
Pto. Medida	1	2	3	4	5	Media
R _a	2.48	1.95	2.13	2.31	2.11	2.20
R _t	12.41	11.75	11.6	13.32	12.58	12.33
Cara inferior, dirección 2						
Pto. Medida	1	2	3	4	5	Media

R_a	2.14	2.4	2.25	1.95	2.08	2.16
R_t	13.71	11.76	12.53	11.23	11.3	12.11

PLACA N°2 DE SOLLAC, REF: 1/3/690/65/51

Cara superior, dirección 1						
Pto. medida	1	2	3	4	5	Media
R_a	1.97	2.23	1.94	2.12	2.08	2.07
R_t	10.78	11.02	10.78	11.56	11.31	11.09

Cara superior, dirección 2						
Pto. Medida	1	2	3	4	5	Media
R _a	2.52	2.11	2.12	2.22	2.18	2.23
R _t	12.03	12.17	11.17	10.45	10.44	11.25
Cara inferior, dirección 1						
Pto. Medida	1	2	3	4	5	Media
R _a	2.22	2.52	2.08	2.19	2.3	2.26

R_t	11.15	12.01	11.44	11.96	12.22	11.76
Cara inferior, dirección 2						
Pto. Medida	1	2	3	4	5	Media
R_a	2.15	2.17	2.52	2.27	2.56	2.33
R_t	10.54	11.3	13.11	13	12.6	12.11

Por su parte los valores de la norma UNE-EN 10209 son los siguientes:

Acabado superficial	Símbolo	Rugosidad
Normal	m	$0,6 \mu\text{m} < R_a < 1,9 \mu\text{m}$
Rugoso	r	$R_a > 1,6 \mu\text{m}$

Queda claro que el acero suministrado por Aceralia pertenece a la categoría de aceros de acabado superficial normal, mientras que el acero de Sollac pertenece a los rugosos.

Antes de acabar este informe se procederá a un ensayo de microdurezas, que puede ayudar a la obtención de conclusiones.

3. ENSAYO DE MICRODUREZAS.

Para el ensayo de microdurezas se procede en primer lugar a la extracción de dos probetas, una obtenida de una de las placas de Aceralia, y la otra obtenida de una de Sollac.

Los resultados se obtienen midiendo la dureza Vickers en 3 puntos de cada probeta, y son los siguientes:

PLACA DE ACERALIA, REF: 1/3/810/75/42

Pto. Medida	1	2	3	Media
Dureza (HV)	115	110	105	110

PLACA DE SOLLAC, REF: 1/3/690/65/51

Pto. Medida	1	2	3	Media
Dureza (HV)	117	110	110	112

Si las rugosidades de ambos tipos de acero hubiesen dado valores similares, se podría decir que la difícil conformación de uno de ellos no se puede

achacar a su elevada rugosidad superficial, y habría que buscar la explicación del fenómeno en otra propiedad del material.

Pero al ser los valores de la rugosidad distintos en ambos casos, el diferente comportamiento de cada acero puede deberse bien a esa diferencia de rugosidad, bien a una diferencia en la dureza del acero.

El ensayo de microdurezas confirma que ambos aceros estudiados poseen valores muy parecidos.

Por lo tanto, se puede concluir que la hipótesis aportada era cierta, y que **la difícil conformación de los aceros de la empresa francesa Sollac se debe a la mayor rugosidad presentada por estos aceros frente a los de la empresa española Aceralia.**

INDICE DEL CAPÍTULO 4:

LA FRITA

1. INTRODUCCIÓN
2. DIFRACTOMETRÍA Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA
3. TERMOGRAVIMETRÍA Y CALORIMETRÍA

CAPÍTULO 4: LA FRITA

1. INTRODUCCIÓN.

La frita un recubrimiento vítreo químicamente unido al acero, obtenido a temperaturas cercanas a los 850°C.

La capa base es aplicada a inmersión y cocida en un horno de esmaltado para formar una unión permanente con la chapa de acero.

La capa cubierta puede ser aplicada a inmersión o mediante pistola aerográfica para obtener un amplio rango de colores.

Proyecto Fin de Carrera:

Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 33 de 112

Los aspectos distintivos de las propiedades del esmalte de porcelana son durabilidad y variedad. La superficie vitrificada asegura un acabado duradero largo, tanto si es mate como si es brillante, que se caracteriza por su fácil limpieza.

ESTABILIDAD DEL COLOR: EL esmalte de porcelana proporciona un acabado permanente en un extraordinario ancho espectro de colores y tonos. Los pigmentos usados son compuestos principalmente inorgánicos fundidos en la matriz de vidrio y son sumamente resistentes al envejecimiento.

DISPONIBILIDAD DE COLORES: Una serie casi ilimitada de colores permanentes está disponible en esmalte de porcelana. La mayoría de los colores de esmalte de porcelana están disponibles en acabados de alto o bajo brillo.

BRILLO: Una gama amplia de brillo está disponible en esmalte de porcelana. El brillo alto está normalmente deseable para los aparatos domésticos y las superficies mates se especifican a menudo para las aplicaciones arquitectónicas y decorativas donde se busca menos reflexión de imágenes.

Proyecto Fin de Carrera:

Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 34 de 112

TEXTURA: El esmalte está disponible en una amplia variedad de texturas o grados de suavidad para adecuarse a los diferentes usos y requerimientos.

Normalmente, el esmalte tiene una superficie suave, pulida, con ligeros ondulamientos variables.

2. DIFRACTOMETRÍA Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.

Hasta ahora hemos sometido a la fritada a varias pruebas. En primer lugar intentamos estudiarla por medio del difractómetro de rayos X para identificar algunas de sus fases cristalinas. Sin embargo, el esmalte es amorfo y por lo tanto, los resultados que se obtienen en este ensayo no ofrecen mucha información.

Para este estudio se hicieron dos pruebas. Para la primera se colocó en el portamuestras un poco de polvo de fritada. En la segunda se utilizó una pequeña placa esmaltada. Los espectros eran similares para ambos casos pero el segundo ofrecía una mejor resolución, por lo que se repitió el ensayo con la placa esmaltada, pero haciendo una pasada lenta del haz de rayos X con el fin de que el espectro pudiera interpretarse más fácilmente. Para ello se dejó el difractómetro funcionando durante 12 horas.

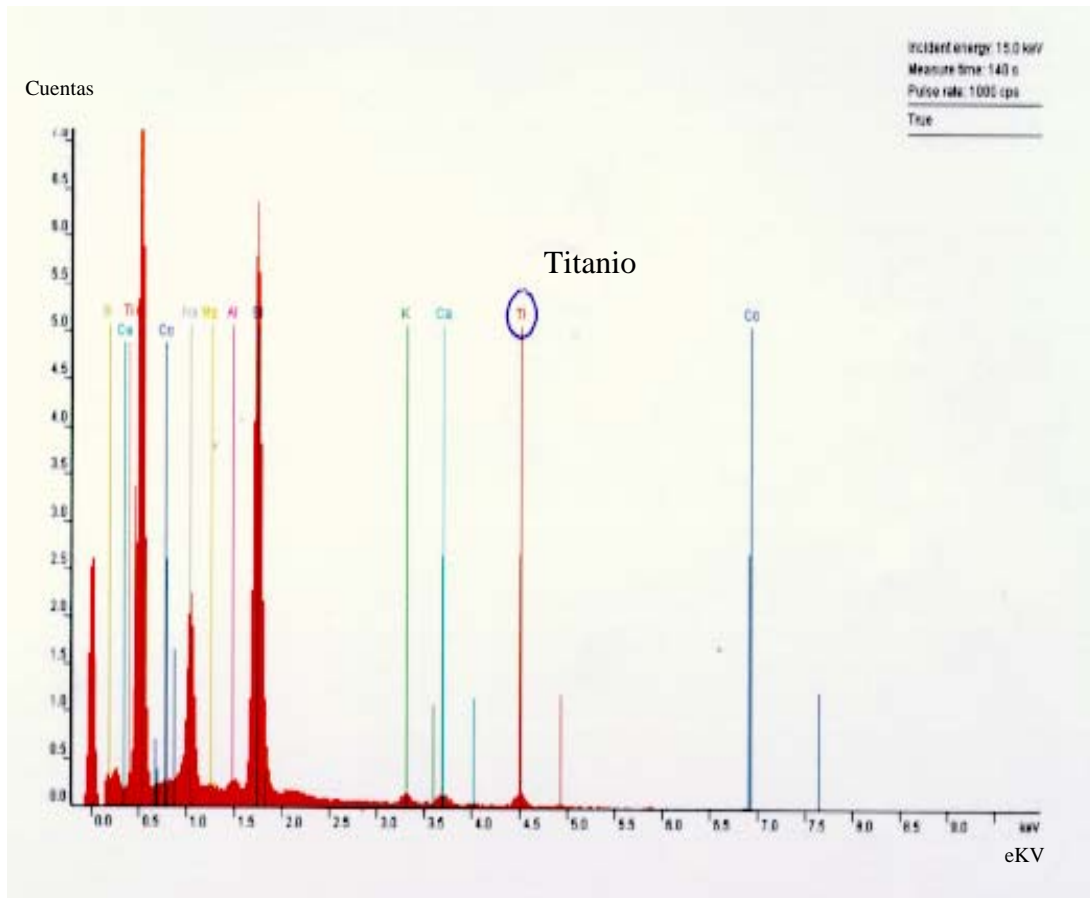
Proyecto Fin de Carrera:

Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 36 de 112

Con ayuda del programa asociado se comprobó la existencia de una fase de cristobalita, una segunda de otro tipo de sílice sin determinar y una tercera de óxido de potasio.

El mismo día que se desarrolló el análisis con el difractor, también se realizó un estudio con la sonda EDX adosada al microscopio electrónico. Con esta sonda se pueden determinar los elementos químicos presentes en una probeta, de manera que el uso de este equipo ayudó a la identificación de fases en el análisis de difracción de rayos X.

Los resultados obtenidos con el microscopio electrónico fueron los esperados para este tipo de esmalte, observándose la presencia de azufre, boro, sodio, potasio, magnesio, calcio y cobalto. No se pudo encontrar níquel pero sí se detectó la presencia de titanio.



Gráfica obtenida con el software asociado al microscopio electrónico

3. TERMOGRAVIMETRÍA Y CALORIMETRÍA.

También se intentó estudiar el comportamiento del esmalte en función de las temperaturas de calentamiento mediante una balanza termogravimétrica. Aunque no se pudieron reproducir exactamente las condiciones de cocción del horno de Vitrogar, a la vista de los resultados obtenidos en la Universidad, éstos no deben diferir mucho de los resultados en condiciones reales. Las condiciones usadas en la Universidad fueron las siguientes:

- Aumento de la temperatura: 40 °C/min.
- Temperatura máxima: 850 °C durante 15 min.
- Disminución de la temperatura: No controlada.

Proyecto Fin de Carrera:

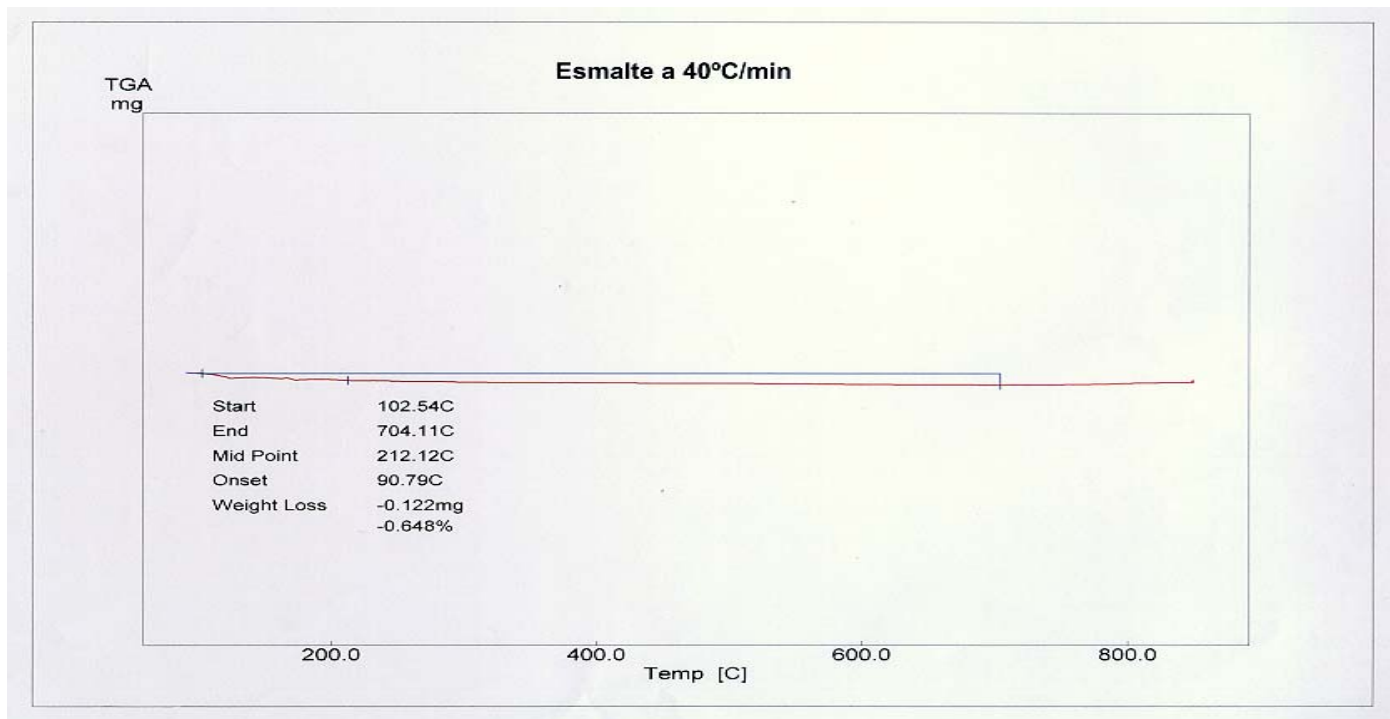
Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 39 de 112

En la gráfica sólo se aprecia una pequeña pérdida de peso entre la temperatura ambiente y los 200 °C, debida al desprendimiento de volátiles.

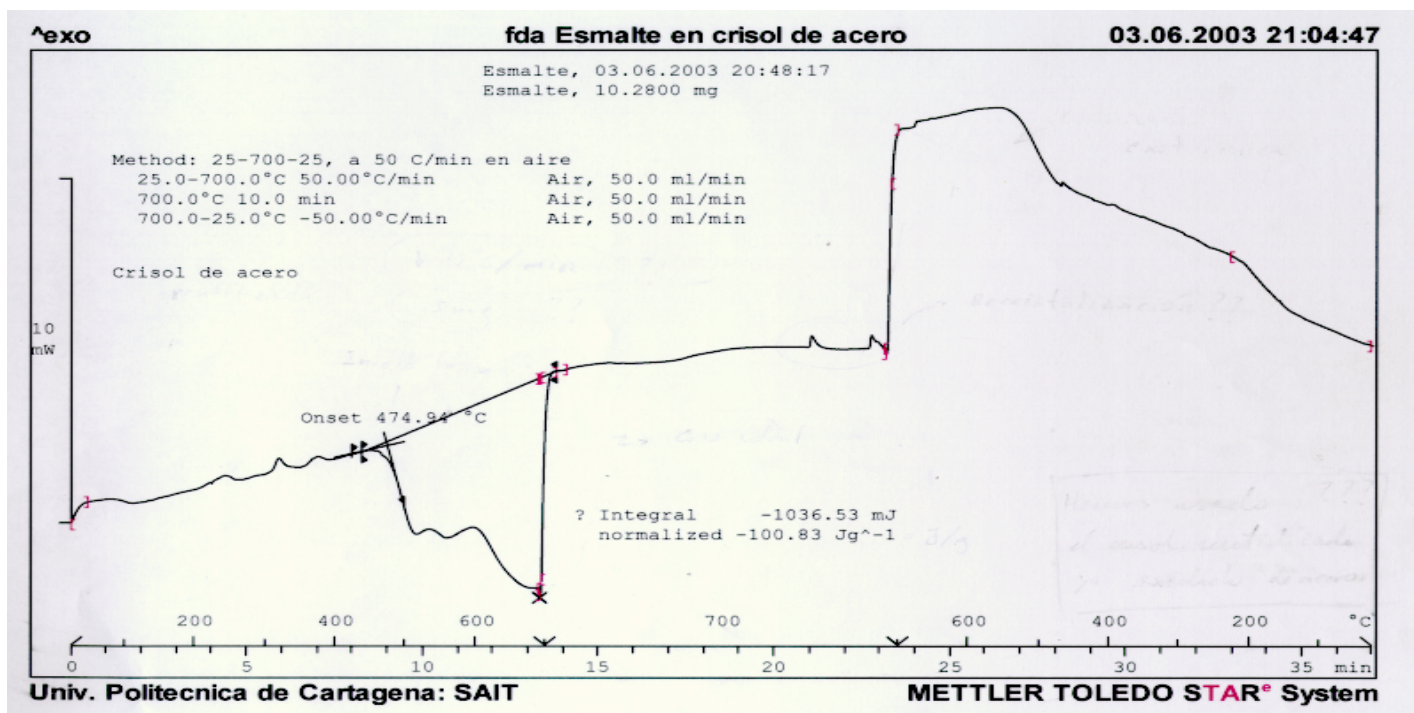
A partir de ese momento el peso se mantiene constante hasta la máxima temperatura alcanzada.

Por su parte, la calorimetría sí ofrece una curva variable en la que se definen reacciones de tipo endotérmico (fusión de la frita) y exotérmico (solidificación). Las condiciones usadas fueron:

- Aumento de la temperatura: 50 °C/min.
- Temperatura máxima: 700 °C durante 10 min.
- Disminución de la temperatura: 10 °C/min.



Resultado del análisis termogravimétrico



Resultado del análisis calorimétrico

INDICE DEL CAPÍTULO 5:

LIMITE DE UTILIZACIÓN DEL ESMALTADO

1. GENERALIDADES
2. CONDICIONES EN LAS QUE SE HA REALIZADO EL ENSAYO
3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA
4. MICROGRAFIAS OBTENIDAS DESPUES DE LOS CICLOS INDICADOS

CAPITULO 5:

LIMITE DE UTILIZACIÓN DEL ESMALTADO

1. GENERALIDADES

Se sabe que el coeficiente de dilatación de la lámina vitrificada, aplicada sobre la superficie metálica obedece a una curva cuya representación de forma general es la que aparece en la figura 7. En esta misma representación y de forma solapada con la primera aparece dibujada la dilatación de la lámina metálica.

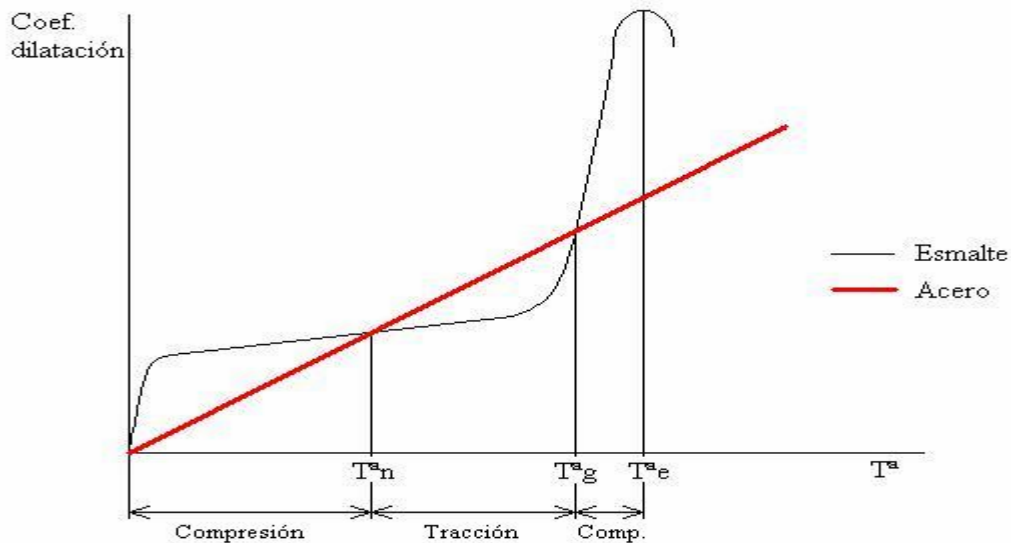


Figura 7.

Como puede observarse en el punto T_n^a se invierten las tensiones a las que está sometida la capa de esmalte pudiendo indicar que hasta llegar a esa “temperatura crítica”, la lámina de esmalte está sometida a tensiones de compresión por ser mayor la dilatación de ella que la lámina metálica

donde se soporta, sin embargo al elevar la temperatura por encima de la que hemos llamado temperatura T_m , se invierte el tipo de tensión pasando a ser tensiones de tracción.

Este tipo de tensiones debido a que la capa esmaltada es una capa cristalina amorfa, no posee elasticidad alguna por lo que al transmitirse el alargamiento de la lámina metálica sobre el recubrimiento de esmalte a través de la adherencia entre ellas provoca su agrietamiento, que en ocasiones son grietas perpendiculares al espesor de la capa vitrificada o bien son agrietamientos situados en la capa vitrificada atravesándola en sentido longitudinal, en este caso la grieta posee una gran longitud y frecuentemente está situada en la capa de adherencia entre la lámina metálica y la capa esmaltada. En ambos casos deja al desnudo en ese punto la superficie metálica y por lo tanto expuesta al ataque ácido, razón por la cual es preciso conocer esa temperatura crítica, T_m como límite de utilización de las placas vitrificadas. Lógicamente esta “temperatura crítica” depende del tipo de fritada utilizada para la fabricación del esmalte. En nuestro caso los ensayos realizados se han hecho sobre muestras standard de producción normalizada, por lo que los resultados obtenidos son válidos para este tipo de esmalte.

2. CONDICIONES EN LAS QUE SE HA REALIZADO EL ENSAYO.

Básicamente se han realizado ensayos sometiendo a las diferentes muestras a unos calentamientos y enfriamientos sucesivos a diversas temperaturas, manteniendo el calentamiento a cada temperatura un tiempo prudencial que hemos cifrado en una hora y provocando el enfriamiento de forma natural al aire y sin acelerar este. Posteriormente después de cada enfriamiento se ha tomado la probeta de acero esmaltado y previa preparación y pulido ha sido observada la muestra por testa realizándose un barrido óptico intentando localizar las posibles grietas que en un sentido u otro deben aparecer en el momento en que se supere la “temperatura crítica” siempre que el número de ensayos sea el suficiente para la aparición del efecto que produce el elevado calentamiento.

La operativa real del ensayo se ha realizado iniciando a 380° C sabiendo que se trata de una temperatura que según toda la información, es bastante más alta que la “temperatura crítica” que se pretende determinar y hemos

Proyecto Fin de Carrera:

Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 46 de 112

iniciado el ensayo de calentamientos - enfriamientos después de colocar el horno a esa temperatura. Hemos mantenido las probetas durante una hora para luego iniciar el enfriamiento hasta la temperatura ambiente, fuera del horno y sin forzar la velocidad.

Después de cada enfriamiento y antes de iniciar el siguiente ciclo, las probetas fueron preparadas y pulidas para su observación microscópica, produciéndose en todos los casos un barrido óptico con la intención de localizar posibles agrietamientos. En la temperatura de 380° C fueron necesarios cinco ciclos para observar las primeras apariciones de las grietas, a la temperatura de 360° C el número de ciclos fue de 7 y a las temperaturas de 340 y 320° C fueron necesarios 11 y 14 ciclos respectivamente. Decidimos finalmente realizar el ensayo a nivel de 310° C donde fueron precisos 18 ciclos.

3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA

Estamos intentando localizar la “temperatura crítica” que no es otra que aquella en la que el número de ciclos sin aparición de grietas sea indeterminado por elevado, lo que nos fija la máxima temperatura de uso en la garantía de la no aparición de grietas por rotura de la lámina del esmalte.

La representación que nos resulta de los datos aportados del laboratorio es la siguiente. (Ver figura 8).

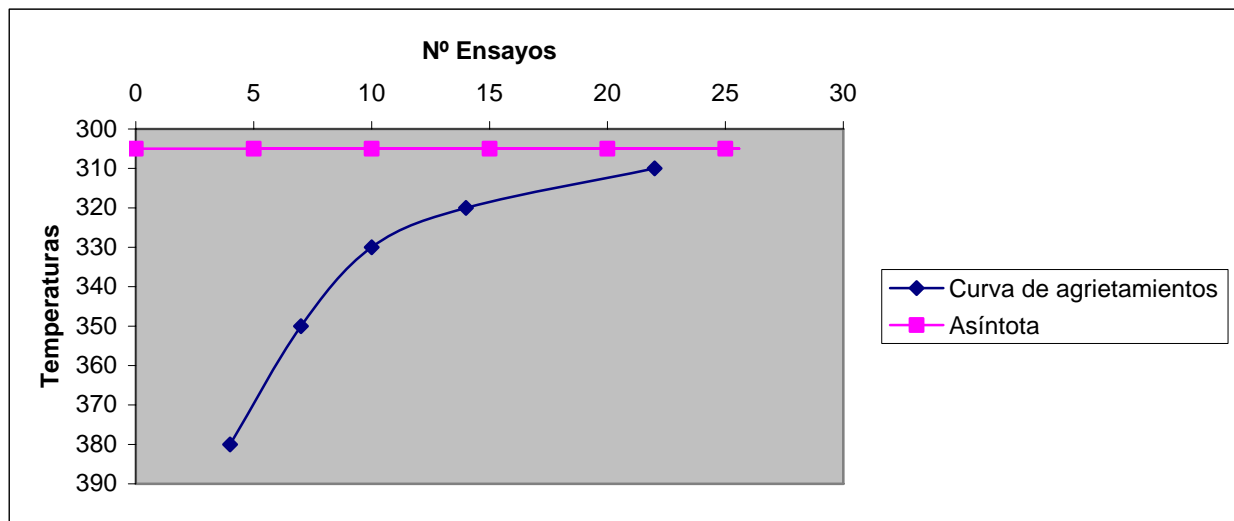


Figura 8.

4. MICROGRAFÍAS OBTENIDAS DESPUES DE LOS CICLOS INDICADOS

Se han realizado del orden de 60 observaciones micrográficas a fin de localizar como antes hemos explicado la “temperatura crítica” que queda determinada por la asíntota de dicha curva.

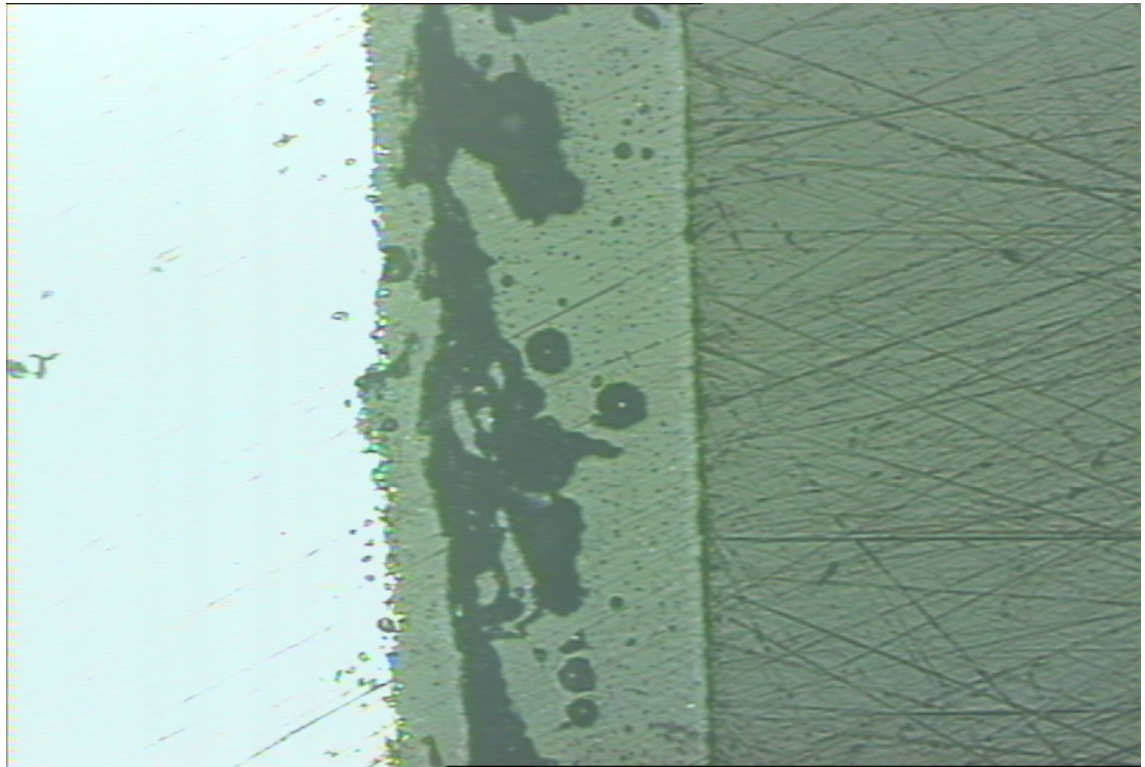
Hemos seleccionado unas micrografías con defecto para más temperaturas que han llegado a aparecer después del número de ciclos críticos que hemos significado anteriormente.

Como podemos observar en las diferentes micrografías seleccionadas, vemos la presencia del agrietamiento longitudinal que en ocasiones ha llegado a desprenderse produciéndose un desconchado en el momento de preparar las probetas con un abrasivo de pulido para su observación.

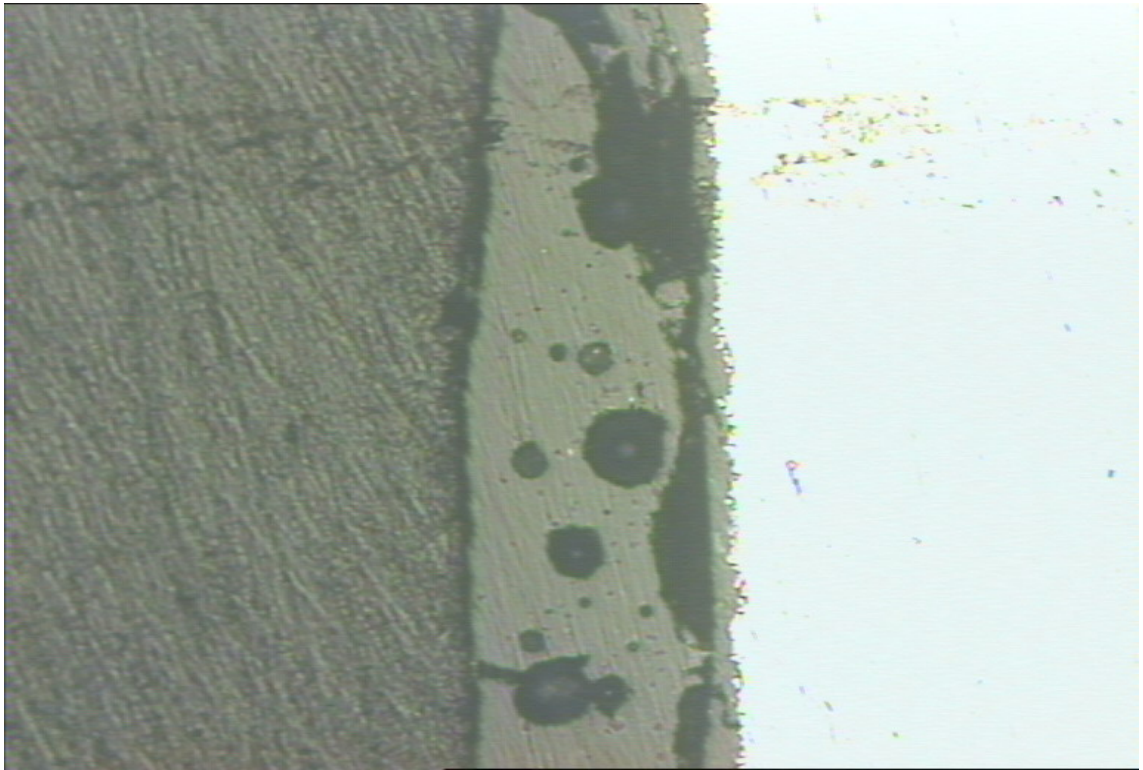
Proyecto Fin de Carrera:

Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 49 de 112

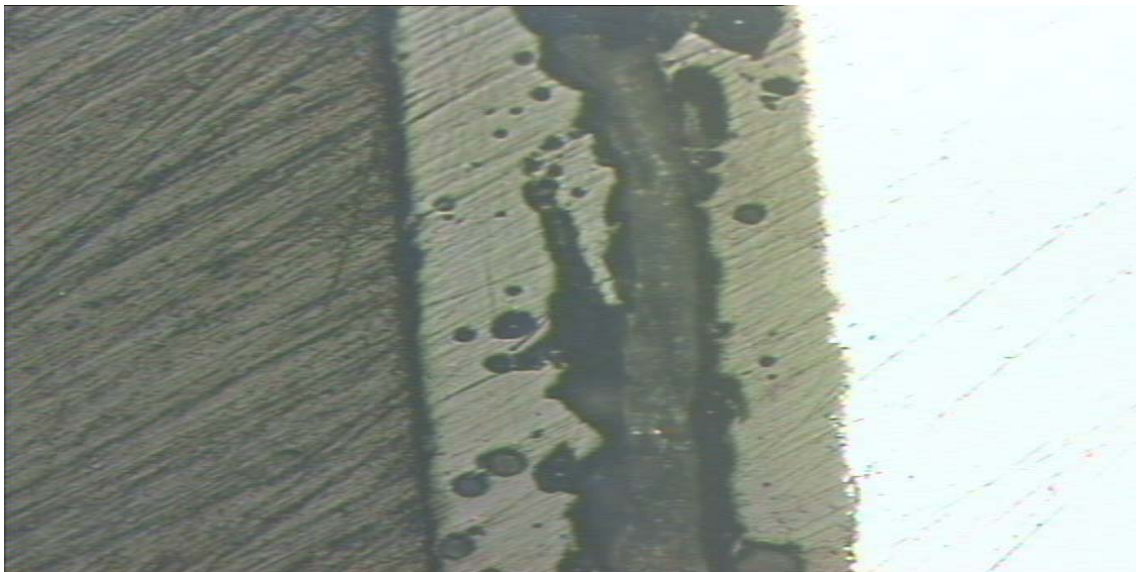
Es de hacer notar como el agrietamiento con independencia de la temperatura su tamaño aumenta al repetir el ensayo de calentamiento. (Ver micrografía 380 comparada con la 360 y 340) con la de la micrografía de 340 pero con 11 ciclos aparece un agrietamiento mas severo.



380 °C



360 °C



340 °C

Nos encontramos ante un proceso de dilatación-contracción térmica de dos materiales solapados entre sí. Este fenómeno mecánico-térmico caracterizado por unos diferentes coeficientes de dilatación es el que

Proyecto Fin de Carrera:

Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 51 de 112

determina la temperatura máxima de uso del esmalte. Al punto de inflexión entre ambos materiales lo hemos denominado “temperatura crítica”, localizando esta a base de sucesivos ensayos de enfriamiento-calentamiento, hasta llegar a una región límite donde gráficamente se perfila un comportamiento asintótico que está definido entre 310 y 300° C, siendo esta la temperatura máxima de uso para esta frita.

Esta temperatura es independiente del tipo de acero utilizado ya que el coeficiente de dilatación del mismo es independiente de la calidad del mismo, sin embargo si depende del tipo de frita utilizada para la aplicación del esmalte, pues su coeficiente depende de las características físico-químicas de su composición.

Razonadamente podríamos decir que tampoco depende del tiempo de residencia a alta temperatura ya que una vez dilatadas ambas láminas se debe llegar a una situación equilibrada y relajada bien con rotura o sin ella.

Suponemos que el factor espesor de la capa de esmalte debe ser determinante y que cuanto más fina sea la capa, más posibilidades tiene la aparición del agrietamiento, este punto no ha sido posible su confirmación.

INDICE DEL CAPÍTULO 6:

PROBLEMA DE LOS CANTOS QUEMADOS

1. INTRODUCCIÓN
2. OBRA 1335
3. BOBINAS 432, 16 Y 17
4. OBRA 1385
5. OBRA 03/1405

CAPITULO 6:

PROBLEMA DE LOS CANTOS QUEMADOS

1. INTRODUCCIÓN

Con respecto a este asunto, el objetivo planteado es encontrar una relación entre la forma del perfil y el resultado del proceso de esmaltado. De esta forma, el control de las bobinas recibidas, con ayuda de la Universidad, permitirá evitar la aparición de este defecto.

Para encontrar la relación comentada es necesario el estudio de muchos cantos “malos”, es decir, cantos con perfil diferente al teórico ideal. Con las imágenes de estos perfiles se deben estudiar los parámetros que se consideren posibles culpables del quemado de los cantos.

En la actualidad, en la Universidad disponemos de menos de una veintena de imágenes de este tipo. Con ellas se ha podido elaborar la tabla de la página siguiente. Los parámetros que se han considerado hasta ahora en el estudio de este problema han sido:

- **Asiento primario.** Longitud de la zona del perfil real que queda en posición vertical.

- **Asiento total.** Distancia, en línea recta, desde el punto donde comienza el asiento primario hasta el punto en que se llega al final de la placa.

- **Radio.** Radio de acuerdo entre la superficie de la placa y el perfil del corte. Se asume, en cada caso, que solo existe un arco de acuerdo con un radio constante.

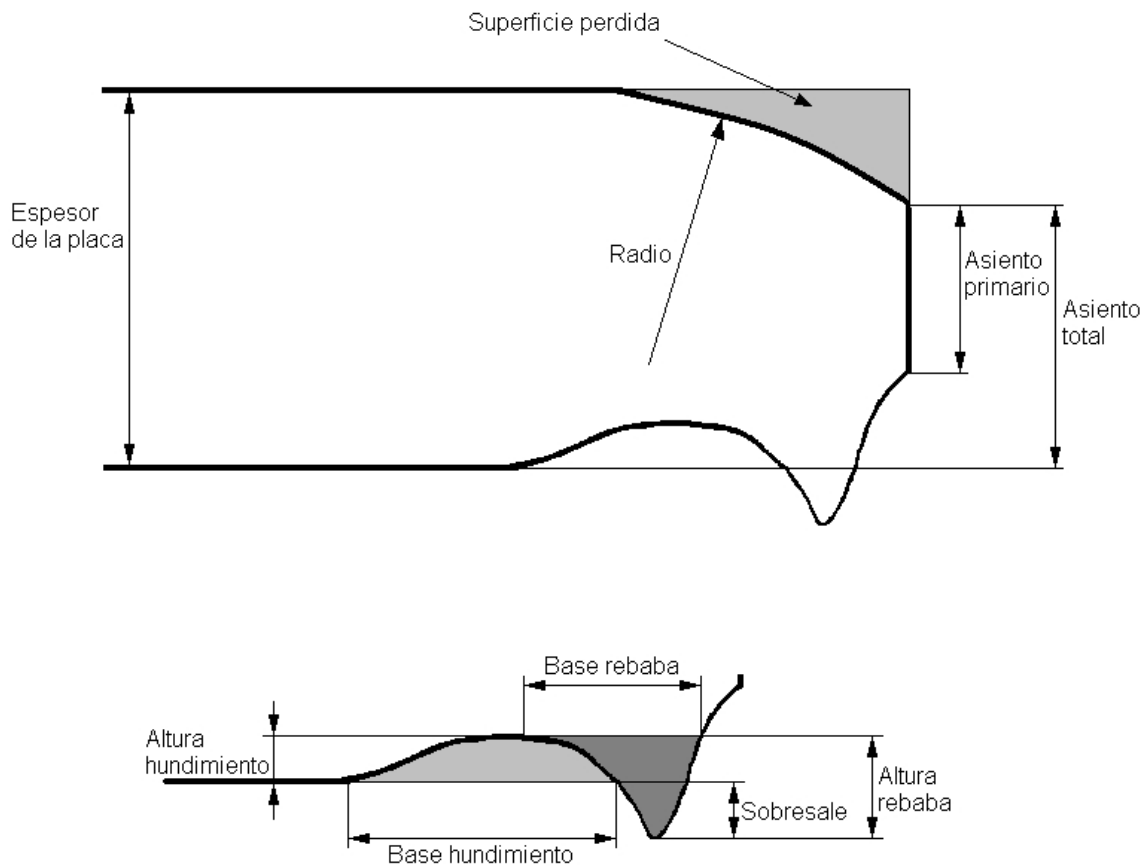
- **Superficie perdida.** Diferencia entre la superficie teórica ideal y la superficie real. Solo se ha considerado como superficie perdida la que queda por encima del arco de acuerdo.

- **Rebaba.** Se mide su base, su altura y la distancia que sobresale desde la superficie de la placa.

- **Hundimiento.** Se mide, si existe, la base y la altura del hundimiento que suele aparecer después de la rebaba del corte.

Proyecto Fin de Carrera:

Para comprender mejor los parámetros que se han definido arriba se adjunta la siguiente imagen, que representa un perfil típico del canto de una placa que ha sufrido un mal corte:



Es necesario recordar una vez más que los parámetros elegidos no tienen por qué ser definitivos, y tal vez sean otros, no considerados hasta ahora, los que puedan explicar el fenómeno de los cantos quemados.

Una vez dadas las explicaciones necesarias para entender la forma en la que se ha abordado el estudio, se muestra a continuación la tabla con las mediciones efectuadas hasta la fecha.

En cada caso se refleja el porcentaje de la magnitud medida con respecto al espesor de la placa. Esto se debe a que un pequeño giro de la probeta usada para la observación microscópica puede variar considerablemente los valores medidos, pero no modifica los valores porcentuales.

Del análisis de esta tabla no se puede extraer ninguna conclusión que nos permita asegurar qué cantos darán un mal esmaltado:

- Asiento primario. Se pueden encontrar problemas de esmaltado en cantos con asientos primarios cuyos valores van desde el 20 al 36 % del espesor de la placa. Mientras que en los cantos buenos van desde el 18 al 36 %.

- Asiento total. Sucede algo similar al caso anterior. En cantos malos su valor oscila entre el 47 y el 72 %, y en cantos buenos entre el 55 y el 81%.

- Radio. Sus valores varían desde 700 a 1000 mm. para cantos malos, y desde 750 a 1200 mm. para cantos buenos.

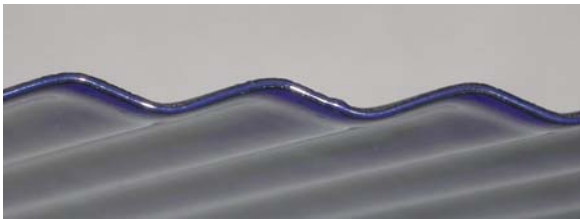
- Superficie perdida. En perfiles malos la pérdida de superficie es de 8 / 15 %, y en perfiles buenos de 6 / 13 %.

- Rebaba y hundimiento. Se puede encontrar todo tipo de casuística, rebabas y hundimientos grandes que dan buen esmaltado y viceversa

Lo único que se puede afirmar, a la vista de los resultados, es la necesidad de seguir realizando ensayos para aumentar el número de muestras representativas que nos permitan continuar el estudio. Hasta que no se disponga de una base de datos considerable no se podrán obtener conclusiones.

2. OBRA 1335

Este problema se ha producido solamente en las bobinas con un ancho de banda de 260 mm. de la obra 1335, y consiste en que uno de los cantos activos de la placa aparece quemado, con un aspecto mate, mientras que el otro lado muestra el aspecto normal brillante.



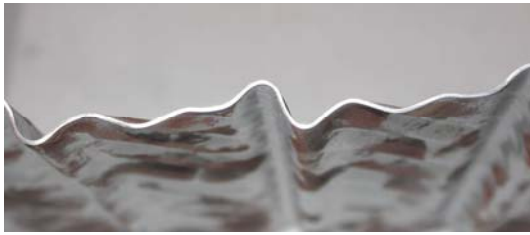
Placa esmaltada - Lado brillante



Placa esmaltada – Lado quemado

Curiosamente, los resultados del test de cubrición de cantos no muestran diferencias entre uno y otro lado, e incluso en algunos caso los resultados para el lado quemado son mejores que para el lado bueno.

Los cantos de las placas después de ser conformadas y antes de ser esmaltadas ya eran distintos. Uno de ellos era más brillante y tenía una décima de mm. más de espesor. Este canto es el que quedaba bien esmaltado.



Placa conformada – Lado brillante

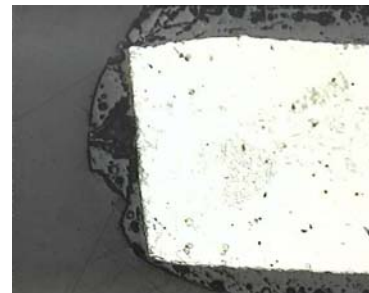


Placa conformada –
Lado mate

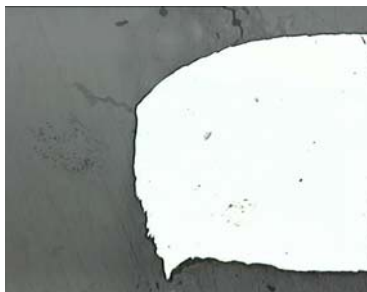
Tras estudiar ambos cantos por medio del microscopio óptico se comprueba que el canto bueno, el más brillante, presenta un corte recto, lo cual quiere decir que la bobina recibió un buen corte en la línea correspondiente. Por su parte el canto malo es de líneas curvas.



Canto bueno antes de esmaltar



Canto bueno
esmaltado



Canto malo antes de esmaltar



Canto malo
esmaltado

Proyecto Fin de Carrera:

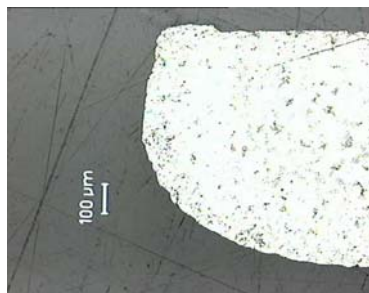
Después de la aparición de este problema se mandó cortar de nuevo en Valencia otra bobina con el mismo ancho de banda para reponer la obra mas esmaltada. Se volvieron a conformar las placas y se mandaron a esmaltar, pero nuevamente apareció el mismo problema en los cantos.



Canto bueno antes de esmaltar



Canto bueno esmaltado



Canto malo antes de esmaltar



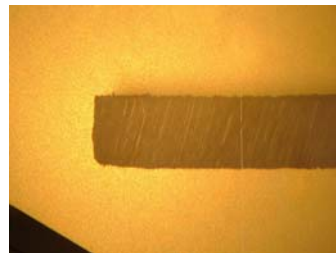
Canto malo esmaltado

El último capítulo hasta ahora, en referencia a la obra 1335, ha sido el envío de muestras de las nuevas bobinas de ancho de banda de 260 mm. para una nueva reposición. En este caso, en lugar de la microscopía, hemos hecho uso del amplificador de perfiles Este equipo permite un análisis mucho más rápido, ya que la única operación previa a la observación es la del corte del material. Luego, se sitúan las probetas en el aparato, y se proyecta una luz hacia las muestras recogiendo en la pantalla la sombra generada.

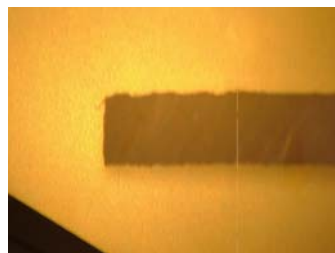
Mediante el empleo del ampliador de perfiles se ha comprobado que, en esta ocasión, el corte ha sido mucho mejor que en los casos anteriores.



Bobina A, lado izquierdo



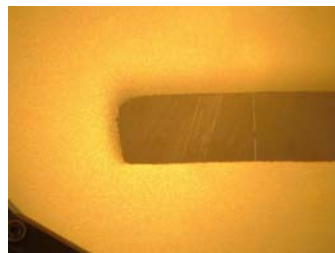
Bobina A, lado derecho



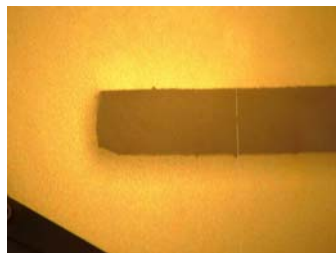
Bobina B, lado izquierdo



Bobina B, lado derecho



Bobina C, lado izquierdo



Bobina C, lado derecho

Observando las imágenes anteriores queda claro que el problema de los cantos es achacable al corte efectuado. Las bobinas que presentan perfiles

Proyecto Fin de Carrera:

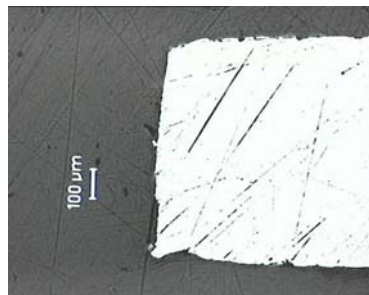
Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 63 de 112

de líneas rectas quedan bien esmaltadas, pero no se puede afirmar nada sobre las que presentan perfiles redondeados.

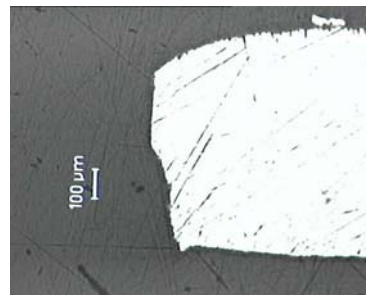
3. BOBINAS 432, 16 Y 17

En una primera entrega recibimos muestras de 3 chapas. La primera era la bobina 432 de ancho de banda de 300 mm. Hasta ahora todos los problemas de cantos quemados se habían producido en bobinas de 260 mm. Por tanto, en esta ocasión se quería comprobar si otras bobinas con anchos de banda diferentes también podían haber sufrido un mal corte. Las otras dos bobinas recibidas, bobinas 16 y 17, debían ser analizadas pues eran chapas que se usarían en la reposición de la obra 1335.

1. Bobina 432, de 300 x 0,75, enviada a la Universidad para estudiar sus cantos porque el suministrador de la misma era el mismo que cortó las bobinas de 260 mm. para la obra 1335.



Bobina 432 – Lado izquierdo



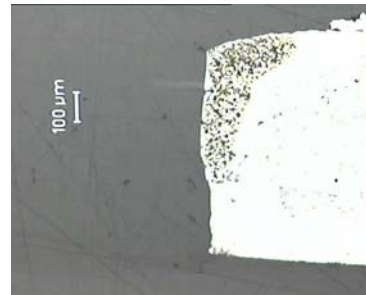
Bobina 432 – Lado derecho

Esta bobina se mandó esmaltar y ambos cantos quedaron bien esmaltados, a pesar de que el canto derecho presenta un pequeño redondeo.

2. Bobina 16, de la obra 1335. Esta bobina sobró de la obra 1335 y se ha mandado a esmaltar ahora usándose para otra obra distinta. Así que estamos a la espera de los resultados para ver si aparecen o no cantos quemados.

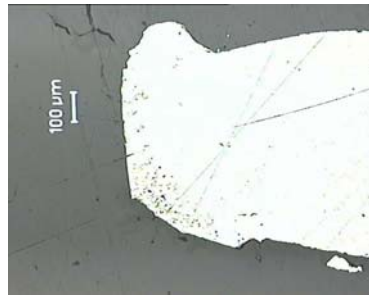


Bobina 16 – Lado izquierdo

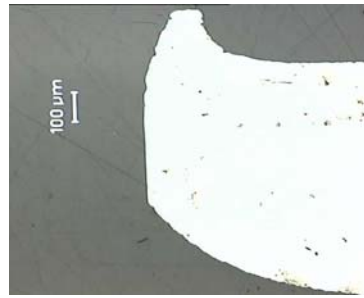


Bobina 16 – Lado derecho

3. Bobina 17, de la obra 1335. Esta bobina se mandó a estudiar a la Universidad y en cuanto se observaron las micrografías se rechazó no llegándose a conformar en producción.



Bobina 17 – Lado izquierdo



Bobina 17 – Lado
derecho

4. OBRA 1385

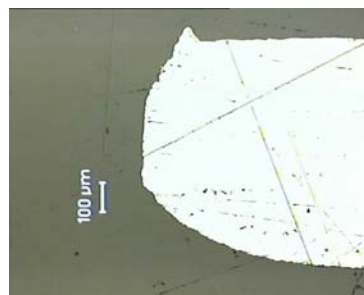
Inmediatamente después de los problemas aparecidos en la obra 1335, el Sr. Peñafiel nos entregó varias muestras, elegidas al azar, de algunas de las últimas bobinas recepcionadas en el almacén, como medida de control para las bobinas procedentes de la línea de corte de Valencia.

Todas estas bobinas son de 303 x 0,75 y se usaron para la obra 1385. Sus cantos quedaron bien esmaltados, pero algunas de ellas dieron alta porosidad en el ensayo de baja tensión. Con un tratamiento de recocido el problema disminuía bastante y, salvo algunas chapas corrugadas que suponían alrededor del 0,05 % del total de chapas de la obra, entraban dentro de las especificaciones, por lo que finalmente fueron aceptadas.

Las bobinas estudiadas fueron la 78, 211, 212, 214 y 215. La que ofrecía peor canto fue la 212, cuyas micrografías presentamos a continuación:



Bobina 212 – Lado izquierdo



Bobina 212 – Lado derecho

Como se ha dicho anteriormente, en todos estos casos se produjo una buena esmaltación. Sin embargo, se pueden ver cantos redondeados en algunas chapas. Esto parece indicar que el esmaltado es correcto cuando, a pesar de la presencia de líneas curvas, el perfil presenta una zona recta suficientemente grande como para que sirva de asiento al esmalte.

5. OBRA 03/1405

Al comenzar con la obra 1405 se recibieron nuevas muestras para el control del corte realizado. Se estudiaron las bobinas 216, 217, 218, 219, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 228, 229, 230, 231, 232 y 233.

Para las bobinas previamente conformadas (bobinas, 217, 218, 229, 231, 232 y 233) el proyector de perfiles ofrece una imagen donde se puede observar:

- En primer término (delimitado en color rojo), la sombra del perfil que queremos estudiar, es decir, el perfil correspondiente a la zona por la que hemos cortado la chapa en la tronadora para obtener estas probetas
- En segundo término y de manera difusa, la sombra de la parte de la chapa que queda por debajo de nuestro perfil, es decir, por debajo del corte efectuado en la tronadora.

Esta última sombra no aparecía en las imágenes anteriores porque en aquellos casos la chapa era plana y quedaba vertical en el proyector.

Las imágenes obtenidas para las chapas planas son similares a las mostradas a continuación, que muestran los cantos de la bobina 219:



Bobina 219. lado izquierdo

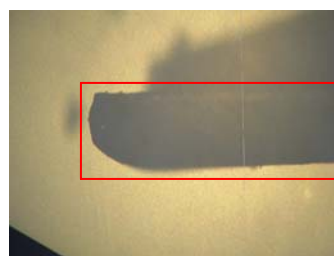


Bobina 219.

Por su parte, para el caso de las chapas conformadas, las fotografías tomadas son muy parecidas a las siguientes, que son las correspondientes a la bobina 233:



Bobina 233. lado izquierdo



Bobina 233. lado derecho

INDICE DEL CAPÍTULO 7:

PROBLEMA DEL EMPAQUETADO DE LAS PLACAS

1. INTRODUCCIÓN
2. ANÁLISIS DE LOS PUNTOS INICIALES DE CONTACTO.
3. ANALISIS DE LA DEFORMACION DE LAS PLACAS
4. COMPROBACION DE LA UTILIDAD DE LOS LIQUIDOS PENETRANTES
5. PLACA DE PRENSADO CON ESPESOR DE 0.5 MM

CAPITULO 7: PROBLEMA DEL EMPAQUETADO DE LAS PLACAS

1. INTRODUCCIÓN

Para determinar los problemas que han surgido con el empaquetado de las placas esmaltadas, ya que estas sufren desconhes a la hora de ser sometidas

Proyecto Fin de Carrera:

Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 73 de 112

a presión en este ensayo se determinará a la presión óptima a la que se puede someter al paquete de placas.

1. Análisis de la secuencia de los puntos de contacto al comprimir.
2. Análisis de la deformación elástica y plástica de las placas en sentido horizontal y vertical.
3. Comparación de la determinación de la porosidad en baja tensión con los líquidos penetrantes.

Estas pruebas iniciales nos permitirán determinar los siguientes pasos a seguir, bien repitiendo algunas de ellas para profundizar en el estudio de determinados aspectos o bien preparando una prueba completa sobre una cesta real.

2. ANÁLISIS DE LOS PUNTOS INICIALES DE CONTACTO.

En un principio se pensó que la manera más sencilla de determinar los puntos de contacto entre dos placas consistía en colocar una lámina de papel entre las chapas y observar las huellas marcadas que aparecen en el papel. Una vez determinados estos puntos de contacto iniciales se podrá comprobar si los desconchados producidos son coincidentes o no con los puntos anteriores.

1. Primera preprueba.

En el mes de Enero se efectuaron las primeras pruebas, utilizando en aquel momento láminas de papel de distintos grosores para comprobar su eficacia: papel de seda; papel normal; y papel grueso. La prueba se efectuó sobre una cesta real de 60 elementos completos de perfil DU 2.8. Las láminas de papel se colocaron entre dos placas de la zona superior, dos de

la intermedia y dos de la inferior. La menor presión de diseño que se permite calcular por la prensa es $0,3 \text{ kg/cm}^2$, por lo tanto, esta fue la presión elegida para determinar los primeros puntos de contacto.

Sólo el papel grueso permitió identificar los puntos iniciales de contacto. Sobre los otros dos tipos de papeles no quedaban marcas. Con los resultados de esta primera prueba se pudieron confeccionar los dibujos de la página 3, en los cuales los puntos rojos representan los primeros puntos de contacto (presión $0,3 \text{ kg/cm}^2$) y los puntos negros señalan las roturas producidas a la presión de $0,7 \text{ kg/cm}^2$. Se aprecian únicamente 5 desconchados, todos ellos en los extremos de la placa superior, y solo dos de ellos coincidentes con los puntos iniciales de contacto. Como resultó muy difícil apreciar las huellas de los contactos sobre este tipo de papel, se decidió repetir los ensayos cambiando el papel utilizado.

2. Segunda y tercera prepruebas.

Para las siguientes pruebas el papel empleado es de tipo copiativo. Este tipo de papel es muy sensible y a la presión mínima de cálculo ($0,3 \text{ kg/cm}^2$) se marcan muchos puntos de contacto, no solo los iniciales. Por este motivo, en los ensayos realizados con este tipo de papel, se hace descender a la

prensa lentamente hasta que roza el paquete de chapas, y en este momento se sacan las placas y se comprueban los puntos de contacto.

En estos dos casos se emplearon cestas de 5 elementos completos de perfil DU 2.8, y se colocaron 5 láminas de papel copiativo entre las placas. La presión inicial fue muy débil, la necesaria para rozar el paquete, y los puntos de contacto iniciales fueron señalados sobre las placas corrugadas. Al presionar el paquete de chapas a 1 kg/cm^2 no aparecieron desconchados, y fue necesario incrementar la presión hasta $1,4 \text{ kg/cm}^2$ para que aparecieran desperfectos.

En ambos casos los resultados fueron similares. Los puntos de contacto iniciales se distribuyen cerca de los extremos y en determinadas zonas concretas del interior de las placas. Sin embargo las roturas se acumulan en el centro y los bordes apenas sufren daños. La gran cantidad de desconchados aparecidos no permite determinar si las primeras roturas se producen en los puntos iniciales de contacto.

4. Cuarta preprueba.

La cuarta y última prueba se estableció para observar los primeros desconchados de las placas. Se utilizaron 3 elementos completos, de perfil

Proyecto Fin de Carrera:

tipo DU 2.8, y se presionó de manera progresiva hasta que aparecieron las primeras roturas. Las placas se comportaron bien hasta $0,7 \text{ kg/cm}^2$, momento en el cual aparecieron 3 desconchados en la placa inferior (en el dibujo en color verde), coincidentes con puntos iniciales de contacto. Posteriormente se siguió presionando hasta $0,8 \text{ kg/cm}^2$ y aparecieron roturas en todas las placas.

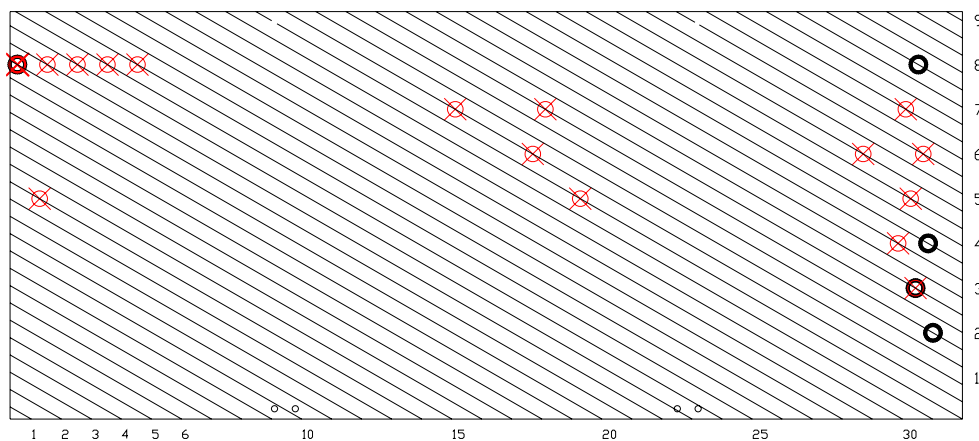
Nuevamente, los puntos de contacto iniciales se acumulan en los extremos de las placas y en algunas zonas concretas del interior. Los desconchados aparecen en una zona pequeña del interior y coinciden aproximadamente en el espacio para las tres placas. Sobre la correspondencia entre los puntos iniciales de contacto y las roturas se puede ver la siguiente tabla:

	Placa inferior	Placa intermedia	Placa superior
Desconchados coincidentes	12	7	9
Desconchados no coincidentes	5	3	9
Desconchados totales	17	10	18

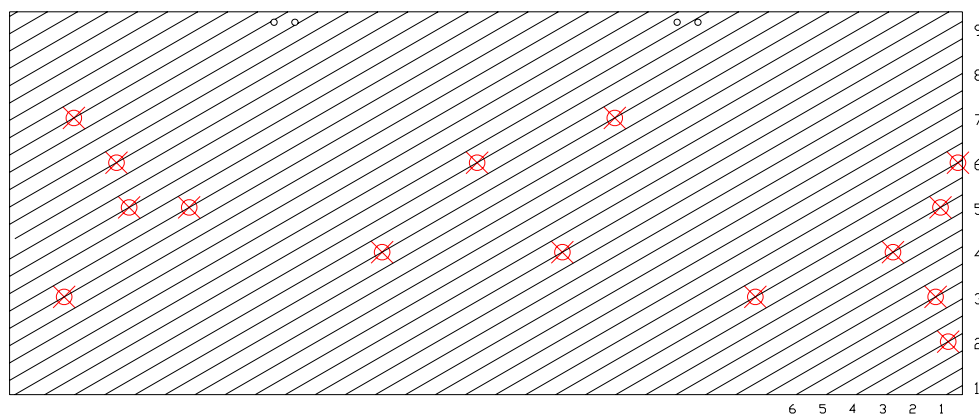
1º PREPRUEBA DE ANÁLISIS DE LOS PUNTOS DE CONTACTO

- ⊗ Puntos de contacto a 0,3 kg/cm²
- Desconchados a 0,7 kg/cm²

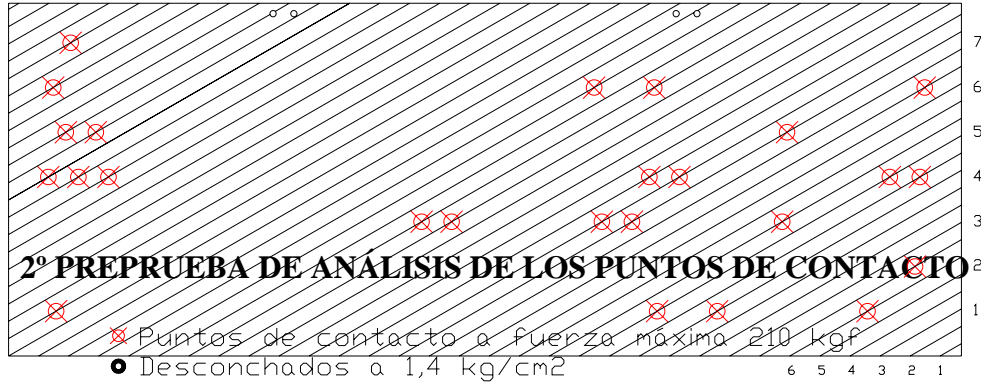
PLACA ONDULADA SUPERIOR



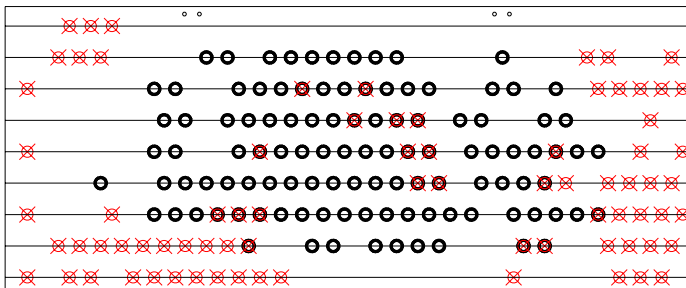
PLACA ONDULADA INTERMEDIA



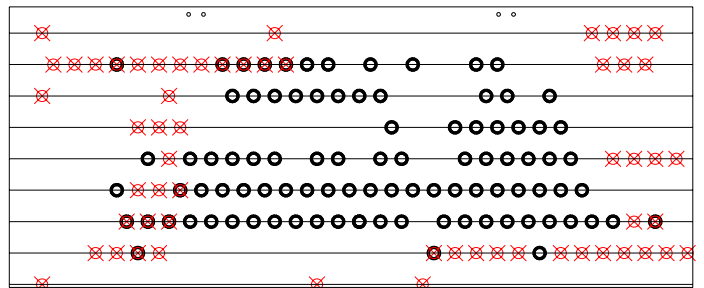
PLACA ONDULADA INFERIOR



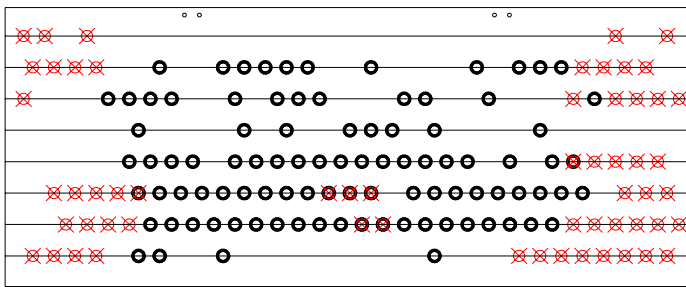
1° PLACA CORRUGADA



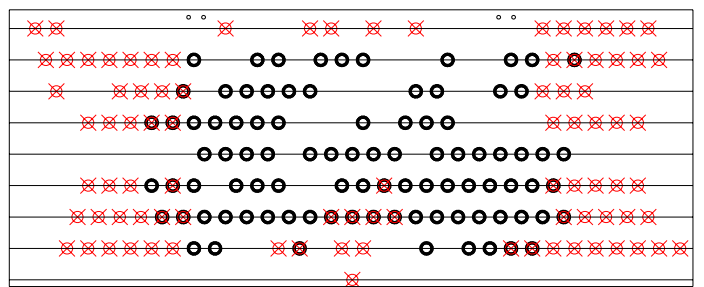
2° PLACA CORRUGADA



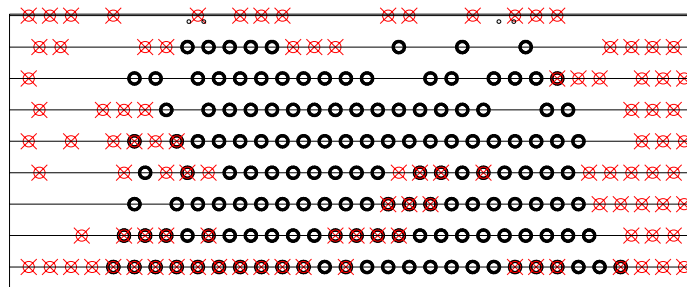
3° PLACA CORRUGADA



4° PLACA CORRUGADA



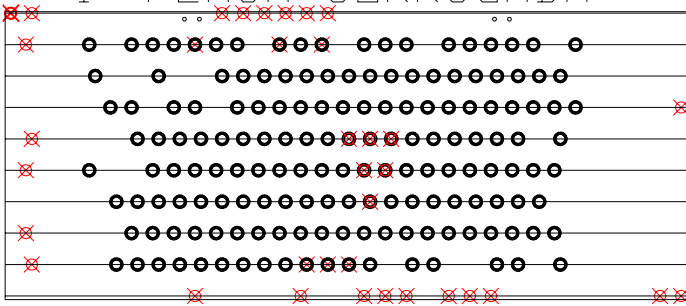
5° PLACA CORRUGADA



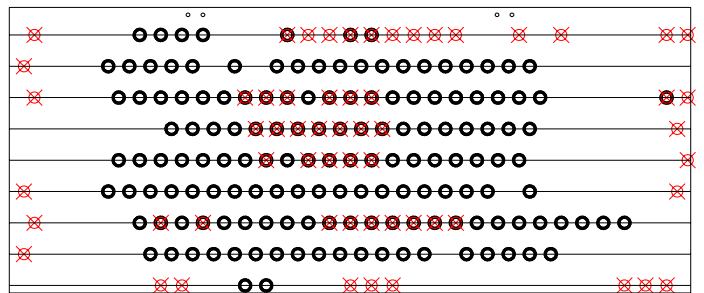
3º PREPRUEBA DE ANÁLISIS DE LOS PUNTOS DE CONTACTO

- ✘ Puntos de contacto a fuerza máxima 210 kgf
- Desconchados a 1,4 kg/cm²

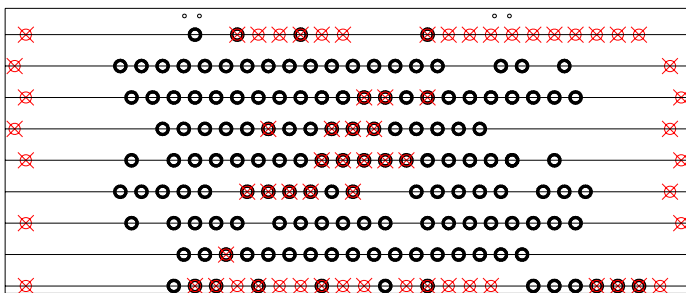
1º PLACA CORRUGADA



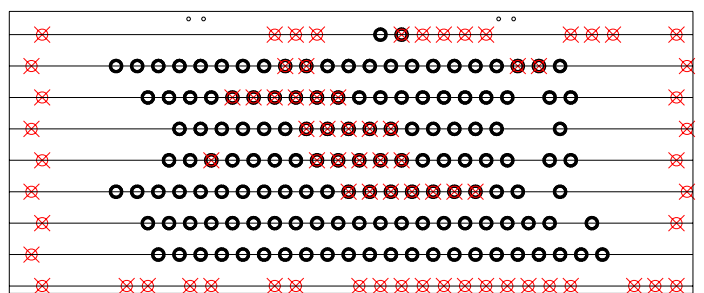
2º PLACA CORRUGADA



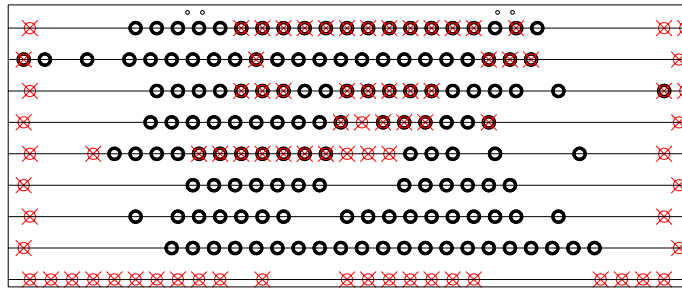
3º PLACA CORRUGADA



4º PLACA CORRUGADA



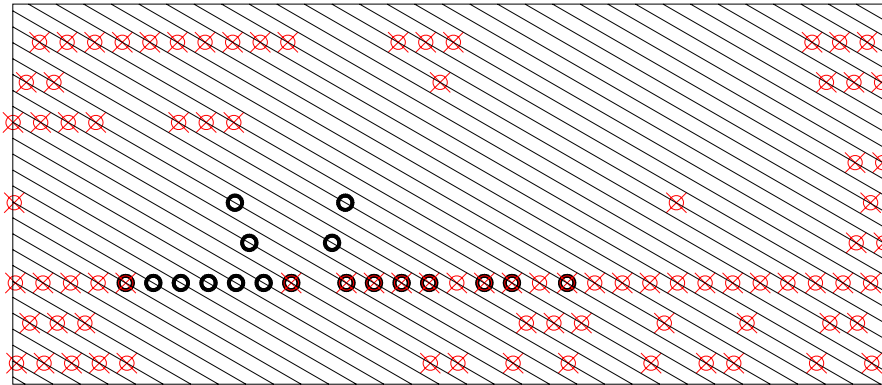
5° PLACA CORRUGADA



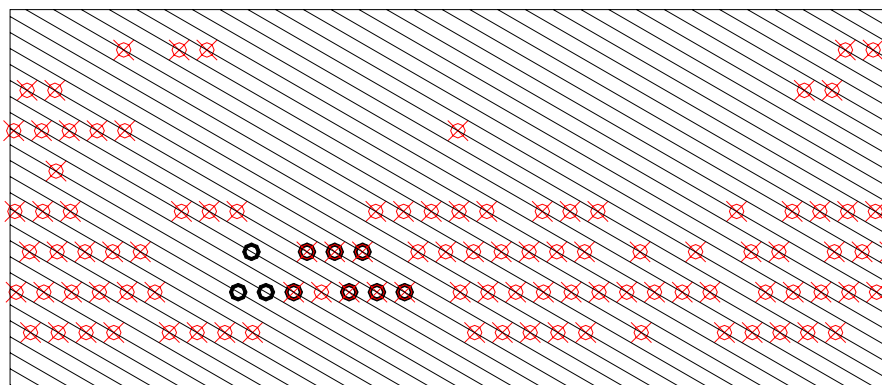
4° PREPRUEBA DE ANÁLISIS DE LOS PUNTOS DE CONTACTO

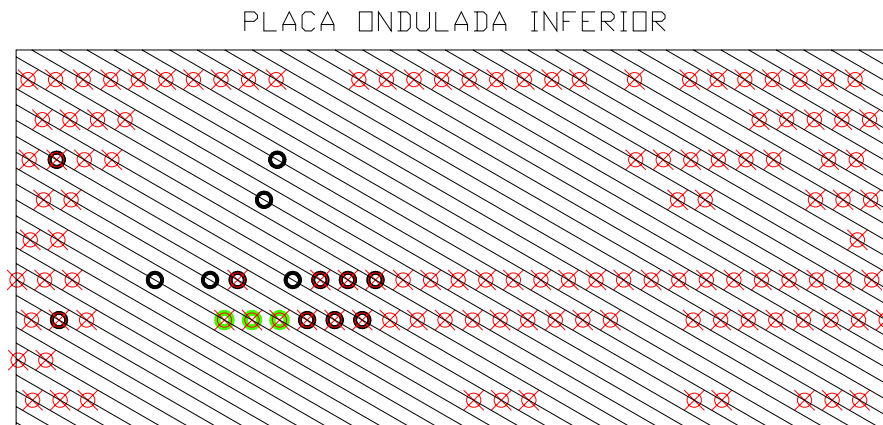
- ⊗ Puntos de contacto a fuerza máxima 210 kgf
- Desconchados a 0,7 kg/cm²
- Desconchados a 0,8 kg/cm²

PLACA ONDULADA SUPERIOR



PLACA ONDULADA INTERMEDIA





Del análisis de todas las pruebas anteriores se puede concluir que una fracción importante de los desconchados totales coincide con puntos iniciales de contacto, y que aquellos no coincidentes son cercanos a los anteriores. Estos primeros puntos de contacto se deben a que alguna onda tiene mayor altura que el resto por las deficiencias existentes en el proceso de conformado o en el esmaltado.

A pesar de este problema, la presión estándar de $0,7 \text{ kg/cm}^2$ se muestra como un límite apropiado hasta el cual apenas se producen roturas del esmalte. La prueba de esto es que durante la realización de estas prepruebas fueron analizadas un total de 16 placas por una cara (6 onduladas y 10 corrugadas) y 10 por ambas caras (5 onduladas y 5 corrugadas) y del total

Proyecto Fin de Carrera:

Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 83 de 112

de 36 caras, solo en 11 superficies se encontraron roturas producidas por el empaquetado.

Si se consiguiera mejorar el proceso para que las alturas de las ondas fuesen homogéneas entonces se podría aumentar la presión estándar actual sin llegar al desconchado.

3. ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN DE LAS PLACAS.

Cuando la prensa ejerce sobre la placa superior una presión, ésta es transmitida por las placas intermedias hasta la inferior, pero una pequeña parte de la energía transmitida se pierde al convertirse en energía potencial elástica que se acumula en cada una de las placas cuando éstas se deforman. Esta prueba tiene como objetivo determinar las deformaciones sufridas por las placas en el proceso de empaquetado.

Para la medida de la deformación horizontal se utilizaron dos relojes comparadores, uno en cada extremo de la placa, permitiendo el movimiento libre de la misma, evitando los rozamientos laterales que habrían aparecido colocando un tope.

- En primer lugar se tomó una placa de perfil DU 2.8 de 0,75 mm de espesor, y se le fueron aplicando presiones cada vez mayores, pero al final de cada presionado se subía el chapón de apriete, presionando nuevamente una vez que la placa había recobrado sus dimensiones originales (Prueba 1).

- Posteriormente se hicieron varios ensayos con placas de perfil DU 2.8 de 0,75 mm de espesor, pero aumentando la presión escalonadamente sin retirar la mesa superior (Pruebas 2, 3 y 5).
- Más tarde se realizó un ensayo con una placa de tipo DU 2.8 de 0,5 mm de espesor para observar las diferencias en la deformación de placas de distinto espesor (Prueba 4).
- Finalmente se ensayó una placa de tipo NF con un perfil que tenía aproximadamente el doble de altura que las placas DU usadas anteriormente (Prueba 6).

Los resultados obtenidos se pueden observar a continuación:

MEDIDA DE LA DEFORMACIÓN HORIZONTAL						
Prueba 1						
Presión de diseño (kg/cm ²)	Reloj comparador 1 (micras)	Reloj comparador 2 (micras)	Deformación total (micras)	Presión máxima (kgf)	Presión de empaquetado (kgf)	Perfil DU 2.8 Espesor 0,75 mm Retirando la prensa
0,4	-10	120	110	2102	1923	
0,5	-30	210	180	2619	2410	
0,6	-30	180	150	3185	2858	
0,7	-10	280	270	3603	3374	
0,8	-20	310	290	4189	3861	
Prueba 2						
Presión de diseño (kg/cm ²)	Reloj comparador 1 (micras)	Reloj comparador 2 (micras)	Deformación total (micras)	Presión máxima (kgf)	Presión de empaquetado (kgf)	Perfil DU 2.8 Espesor 0,75 mm Sin retirar la prensa
0,5	-20	130	110	2301	2251	
1	-50	280	230	4577	4517	
Prueba 3						

Proyecto Fin de Carrera:

Presión de diseño (kg/cm ²)	Reloj comparador 1 (micras)	Reloj comparador 2 (micras)	Deformación total (micras)	Presión máxima (kgf)	Presión de empaquetado (kgf)	Perfil DU 2.8 Espesor 0,75 mm Sin retirar la prensa
0,4	45	70	115	1963	1884	
0,6	120	105	225	2858	2808	
0,8	150	140	290	3812	3752	
1	200	180	380	4756	4696	
1,2	230	230	460	5710	5620	
Prueba 4						
Presión de diseño (kg/cm ²)	Reloj comparador 1 (micras)	Reloj comparador 2 (micras)	Deformación total (micras)	Presión máxima (kgf)	Presión de empaquetado (kgf)	Perfil DU 2.8 Espesor 0,5 mm Sin retirar la prensa
0,4	197	-11	186	1336	1256	
0,5	250	-15	235	1674	1594	
0,6	313	-20	293	1982	1932	
0,7	390	-25	365	2310	2260	
0,8	446	-30	416	2618	2469	
0,9	520	-36	484	2985	2896	

Proyecto Fin de Carrera:

1	581	-43	538	3293	3284	
1,1	646	-51	595	3611	3512	
1,2	707	-60	647	3880	3810	

Prueba 5						
Presión de diseño (kg/cm ²)	Reloj comparador 1 (micras)	Reloj comparador 2 (micras)	Deformación total (micras)	Presión máxima (kgf)	Presión de empaquetado (kgf)	
0,4	127	-8	119	1336	1296	Perfil DU 2.8
0,6	185	-8	177	2012	1902	Espesor 0,75 mm
0,7	216	-8	208	2330	2280	
0,8	239	-8	231	2697	2588	Sin retirar la prensa
0,9	364	-10	354	3065	2897	
1	379	-11	368	3134	3115	
1,1	395	-11	384	3462	3423	
			404			
1,2	416	-12		3770	3732	

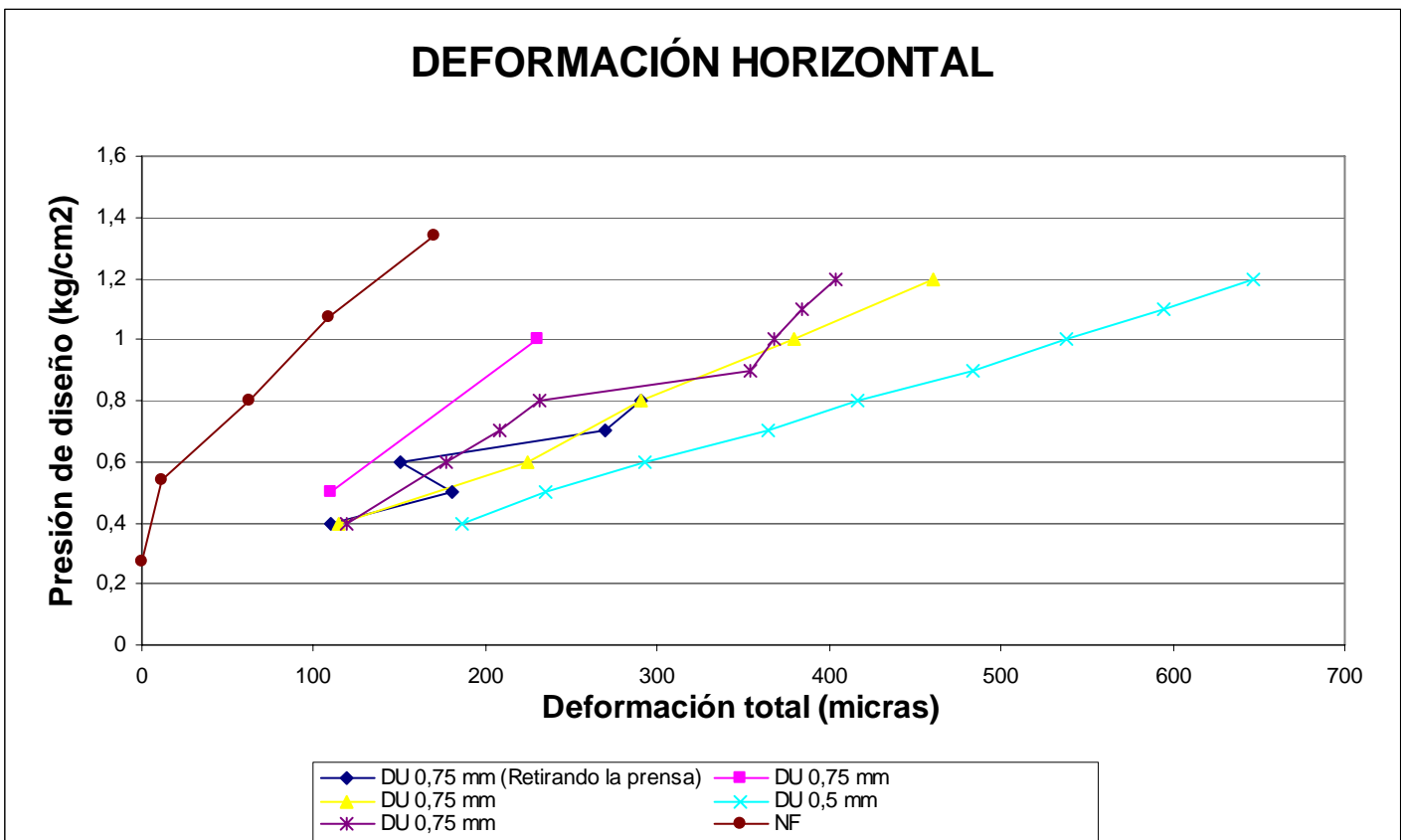
Prueba 6						
Presión de diseño (kg/cm ²)	Reloj comparador 1 (micras)	Reloj comparador 2 (micras)	Deformación total (micras)	Presión máxima (kgf)	Presión de empaquetado (kgf)	Perfil NF Sin retirar la prensa
0,27	0	0	0	325	315	
0,54	0	11	11	640	620	
0,8	29	33	62	968	950	
1,07	51	58	109	1276	1266	
1,34	78	92	170	1614	1574	

Para una más fácil interpretación de los resultados se puede observar la gráfica de la página siguiente. Las conclusiones que se desprenden de la realización de estas pruebas son las siguientes:

- Las deformaciones correspondientes a las placas DU de 0,75 mm de espesor coinciden en la misma región del espacio, independientemente de que el chapón de prensado se haya retirado o no antes de incrementar la presión.

- La curva de la placa de 0,5 mm se encuentra desplazada hacia la derecha indicando que esta placa sufre mayores deformaciones con la misma presión, es decir, es más flexible.
- La placa con perfil NF y doble de altura es más rígida que las anteriores ya que tiene un momento de inercia mayor, y por este motivo sufre menos deformación.
- Todas las curvas ofrecen un comportamiento prácticamente lineal, aunque en algunas de ellas se observa una presión crítica en torno a la cual la deformación producida es mayor. Esto se debe a que una vez alcanzada dicha presión se vencen los rozamientos existentes que impiden el desplazamiento libre de la placa. Si el ensayo se hubiese llevado a cabo dejando mayor tiempo entre los incrementos de presión entonces la curva sí habría sido lineal.
- En la mayoría de los casos los dos relojes comparadores ofrecen resultados muy diferentes, incluso mostrando valores de signo contrario. Esto indica que cada tipo de perfil tiene una

tendencia natural a desplazarse en un sentido u otro debido a la deformación diferenciada de las distintas partes del perfil.



4. COMPROBACIÓN DE LA UTILIDAD DE LOS LÍQUIDOS PENETRANTES.

La tercera prueba tiene como misión localizar grietas en el esmalte que no lleguen a profundizar hasta el metal base. Para ello se tomaron 2 elementos completos de perfil DU 2.8 y se cuantificaron los poros en todas sus caras mediante el ensayo de porosidad en baja tensión. Posteriormente, estos elementos fueron comprimidos a la presión estándar de $0,7 \text{ kg/cm}^2$ y se comprobó el incremento de porosidad. Finalmente se realizaron ensayos con líquidos penetrantes para detectar grietas superficiales sin contacto con el acero.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

		ANTES DE PRESIONAR	DESPUÉS DE PRESIONAR				
			Poros	Nuevos poros		Grietas	Desconchados
				Número	Porcentaje		
Ondulada superior	Cara superior	15	+28	187	0	3	
	Cara inferior	7	+28	400	0	10	
Corrugada superior	Cara superior	14	+14	100	0	14	
	Cara inferior	13	+12	92	-	14	
Ondulada inferior	Cara superior	5	+7	140	-	6	
	Cara inferior	9	+14	156	-	8	
Corrugada inferior	Cara superior	14	+13	93	-	17	
	Cara inferior	15	+15	100	-	12	

La prueba demuestra que el prensado de las chapas induce la aparición de nuevos poros que no existían antes del empaquetado, sin embargo no se puede generalizar en cuanto al porcentaje de los nuevos poros generados.

En cuanto a los líquidos penetrantes, estos solo fueron capaces de detectar los poros que previamente habían sido revelados mediante el ensayo de porosidad en baja tensión. Se aplicaron únicamente sobre 3 superficies porque se comprendió que no era necesario seguir con los ensayos. La prueba demuestra que el esmalte, al comportarse como un vidrio, rompe cuando se le aplica una presión y la grieta producida profundiza hasta el metal base independientemente del espesor de la capa de esmalte.

5. PRUEBA DE PRENSADO CON PLACAS DE 0,5 MM DE ESPESOR.

La última prueba efectuada consistió en comparar el número de roturas aparecidas en las placas en función del espesor de las mismas. Para esta prueba se presionaron 4 paquetes de placas distintos:

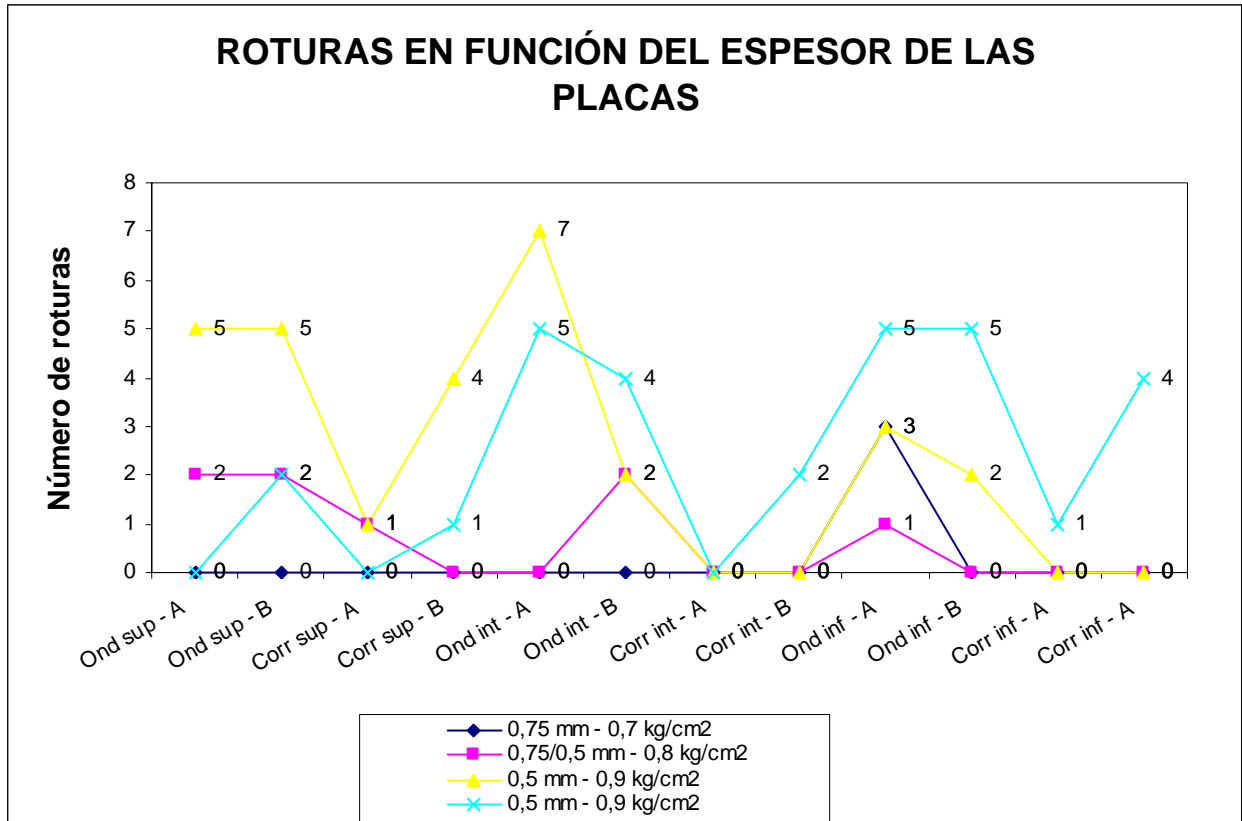
1. Un paquete de 3 elementos completos de perfil DU 2.8 de espesor 0,75 mm sometido a la presión de $0,7 \text{ kg/cm}^2$.
2. Un paquete de 3 elementos completos de perfil DU 2.8. de espesores 0,5 mm la placa corrugada y 0,75 mm la ondulada, sometido a una presión de $0,8 \text{ kg/cm}^2$.
3. Un paquete de 3 elementos completos de perfil DU 2.8. de espesor 0,5 mm, sometido a la presión de $0,9 \text{ kg/cm}^2$.
4. Igual que el apartado 3.

Los resultados fueron los siguientes:

		Espesor 0,75 mm Presión 0,7 kg/cm ²	Espesor 0,75/0,5 mm Presión 0,8 kg/cm ²	Espesor 0,5 mm Presión 0,9 kg/cm ²	Espesor 0,5 mm Presión 0,9 kg/cm ²
Ondulada superior	Cara A	0	2	5	0
	Cara B	0	2	5	2
Corrugada superior	Cara A	0	1	1	0
	Cara B	0	0	4	1
Ondulada intermedia	Cara A	0	0	7	5
	Cara B	0	2	2	4
Corrugada intermedia	Cara A	0	0	0	0
	Cara B	0	0	0	2
Ondulada inferior	Cara A	3	1	3	5
	Cara B	0	0	2	5
Corrugada inferior	Cara A	0	0	0	1
	Cara B	0	0	0	4

A priori, se pensó que los defectos en las placas de 0,5 mm de espesor serían menos numerosos a pesar de ser sometidas a una mayor presión, porque la mayor flexibilidad de estas chapas con respecto a las de 0,75 mm de espesor, actuaría permitiendo una mejor distribución de las

presiones. Sin embargo, los resultados demuestran que las roturas crecen al incrementar la presión. Esto se puede apreciar mejor en la siguiente gráfica:



El incremento del número de roturas en las placas de menor espesor puede ser debido a que las mayores deformaciones producidas en éstas implican la aparición de mayores esfuerzos de tracción en el esmalte, por lo que éste acaba rompiendo.

Proyecto Fin de Carrera:

Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 98 de 112

En cualquier caso, es necesario realizar más pruebas en este sentido, comparando los resultados obtenidos al ensayar placas de distintos espesores sometidas a las mismas presiones.

INDICE DEL CAPÍTULO 8:

PROBLEMAS DE HERVIDOS

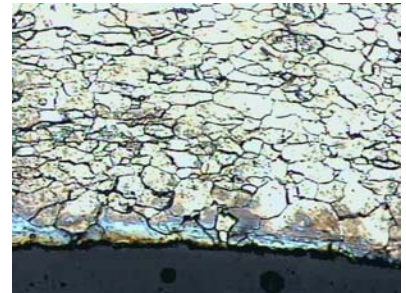
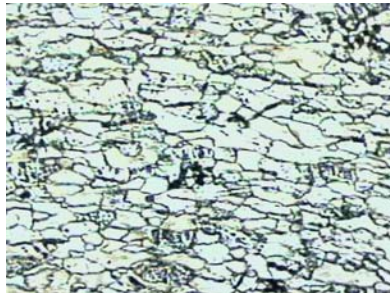
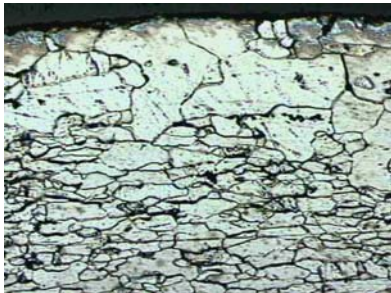
1. INTRODUCCIÓN
2. MICROGRAFÍAS REALIZADAS
3. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA DE GRANO

CAPITULO 8: PROBLEMAS DE HERVIDOS

1. INTRODUCCION

Este problema aparece por primera vez en la obra 03/1375, tanto en chapas onduladas como en corrugadas. Pero tras un proceso de recocido la porosidad detectada con el ensayo de baja tensión disminuye, y solo un 0,05 % del total de las chapas de esta obra quedan con valores por encima de los contemplados en las especificaciones. Este caso se repite en la obra 1385.

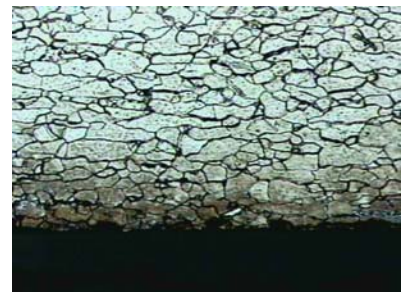
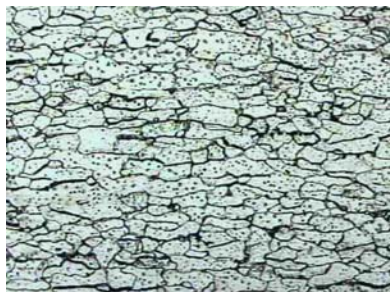
En la Universidad se estudia una de las chapas corrugadas de esta obra, antes de ser recocida, para ver si existen diferencias, a escala micrográfica, entre la cara con hervidos y la cara sin defectos. Las micros obtenidas son las siguientes:



Zona cóncava de una corruga

Zona interior de una corruga

Zona convexa de una corruga



Zona plana, cara sin hervidos

Zona plana, interior de la chapa

Zona plana, cara con hervidos

2. MICROGRAFÍAS REALIZADAS

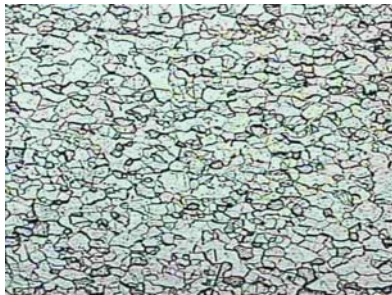
En nuestras microfotografías no se aprecian diferencias claras entre una y otra cara. Solo es destacar, como era de suponer, la presencia de grano más grueso en la zona cóncava o traccionada de la corruga.

Posteriormente el se mandaron unas micrografías en las que se mostraba la presencia de perlita en el acero, en algunos casos cerca de la superficie de la chapa. Según él, la aparición de perlita y el escaso crecimiento de grano son los causantes de los hervidos que dan lugar a porosidad elevada:

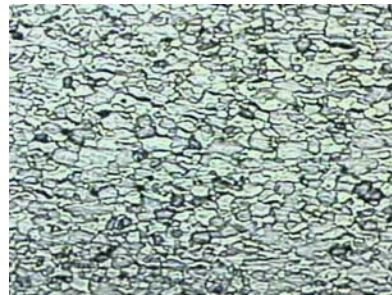


3. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA DE GRANO.

1. Bobina 17, de 260 x 0,75.



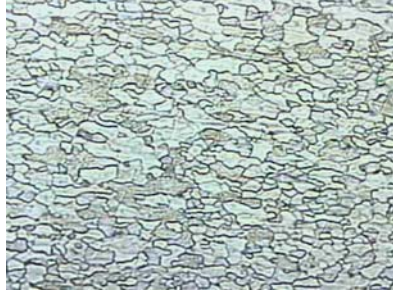
Bobina 17, probeta 1



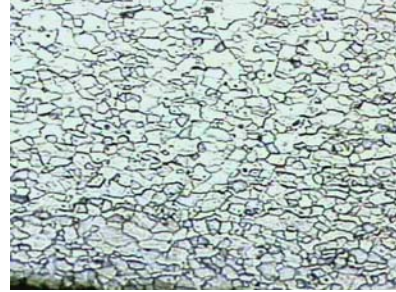
Bobina 17, probeta 2

Estructura de un acero que no dio problemas de hervidos.

2. Bobina 67, de 915 x 0,75 (Sollac).



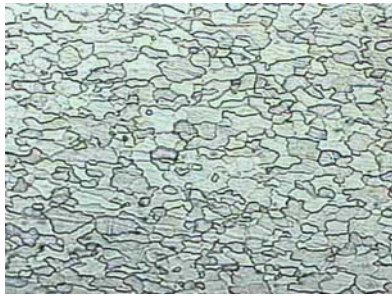
Bobina 67, probeta 1



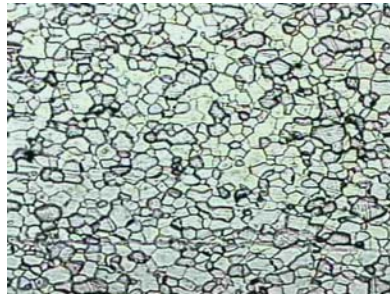
Bobina 67, probeta 2

La bobina 67 es una de las primeras suministradas por Sollac después de que esta empresa solucionara los problemas de rugosidad que había tenido en sus últimas partidas de material. Sin embargo, una vez solucionado este problema de acabado superficial que impedía el correcto conformado de las placas, aparece un nuevo problema, ya que las placas esmaltadas fabricadas con acero de Sollac presentan hervidos que conducen a la aparición de elevada porosidad.

3. Bobina 1899540, ondulada de 447 x 0,75.

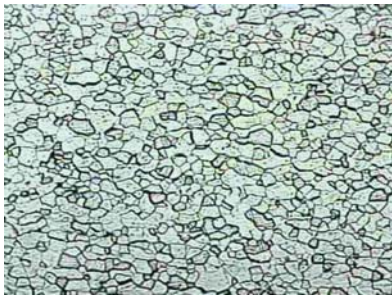


Bobina 1899540, probeta 1

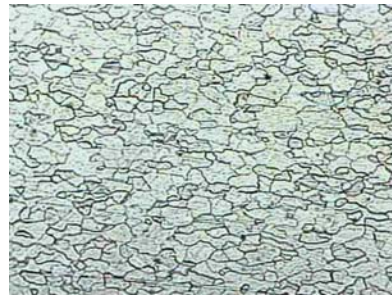


Bobina 1899540,
probeta 2

4. Bobina 1899541, de 447 x 0,75.



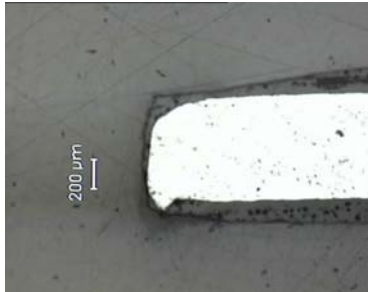
Bobina 1899541, probeta 2



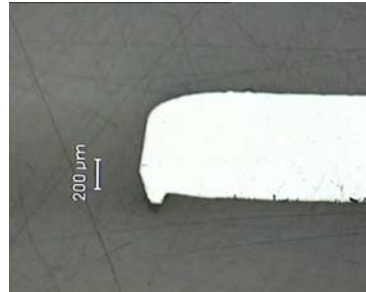
Bobina 1899541, probeta 1

Las bobinas 1899540 y 1899541 se esmaltaron correctamente.

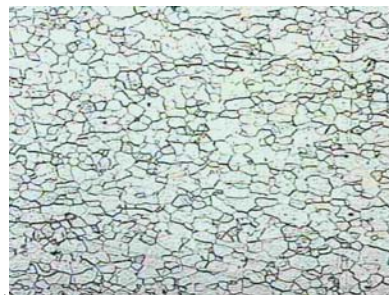
5. Bobina de acero esmaltable DC04EK usado en la embutición de hornos de Teka.



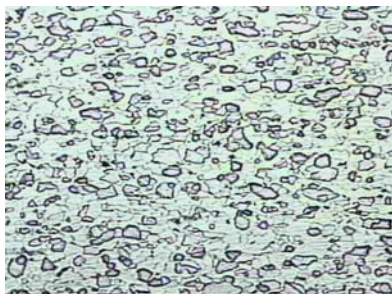
Canto de la chapa esmaltada



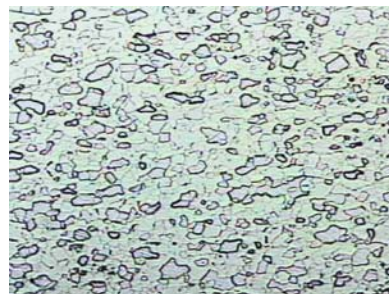
Canto de la chapa



6. Bobina 68, ondulada de 915 x 0,75 (Sollac), obra 13/4.

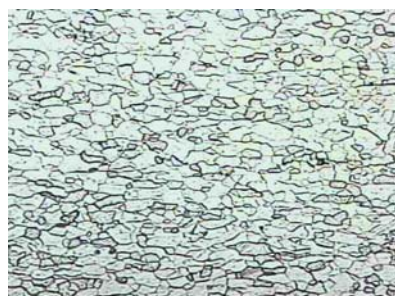


Bobina 68, probeta 1

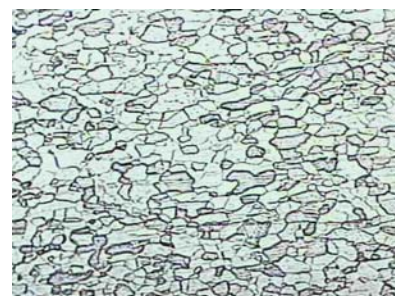


Bobina 68, probeta 2

7. Bobina 69, corrugada de 915 x 0,75 (Aceralia), obra 1374.



Bobina 69, probeta 1



Bobina 69, probeta 2

Estas dos últimas bobinas, que muestran una estructura de grano similar, muestran sin embargo un comportamiento diferente en la esmaltería, pues la de Sollac da hervidos mientras que la de Aceralia queda bien esmaltada. Un vistazo a los certificados de calidad de ambos aceros demuestra que el análisis químico es similar, y también son iguales las condiciones de aplicación del esmalte y de cocción, pues se intercalaron las chapas de ambos tipos en la línea de esmaltación. En las instalaciones de Vitrogar se ha intentado solucionar el problema de distintas maneras:

- Desengrasando las chapas de Sollac antes de la aplicación del esmalte.
- Desengrasando y decapando las chapas.
- Aplicando una capa de esmalte de mayor grosor.

Pero todas estas soluciones fueron inútiles y las placas de Sollac siguieron ofreciendo altos valores de porosidad.

Incluso se planteó la posibilidad de que, durante la pasada de skin-pass, el producto de limpieza utilizado pudiera contaminar las superficies de las

Proyecto Fin de Carrera:

Placas Esmaltadas para Intercambiadores de Calor en Centrales Térmicas. Página 108 de 112

placas de manera que se desprendieran gases en la cocción provocando los hervidos. Pero el producto usado para este fin, que también puede actuar como lubricante, es eliminado después del paso de la lámina por los rodillos y no puede contaminar la superficie del acero.

9. Conclusiones.

Este proyecto fin de carrera, tiene como finalidad optimizar el proceso productivo de las placas esmaltadas para intercambiadores de calor en centrales térmicas.

Este proyecto se desarrolla en 8 puntos, los cuales desglosan la problemática de a la hora de fabricar un cambiador gas-gas.

Las conclusiones más significativas que tenemos de la elaboración de este trabajo, son las siguientes:

1. Corte de las chapas: Es el primer paso en la manufactura de las placas de intercambio gas-gas. Se debe de tener especial cuidado, debido a la rebaba que se queda en el canto de la placa antes de esmaltar. Una vez que esta es esmaltada el canto no queda cubierto por el esmalte, siendo un punto sensible a la corrosión en la puesta en servicio de la placa.

2. Esmaltado de las placas: Las placas son esmaltadas con un esmalte a elevadas temperaturas, llegando a tener que consideras los coeficientes de dilatación térmica tanto del acero como des esmalte. Esta diferencia ha sido estudiada, obteniendo como conclusión que esta diferencia puede afectar a la continuidad del conjunto esmalte-acero.
3. Empaquetado de las placas: El empaquetado de las placas se realiza por medio de una prensa. Dicho empaquetado al estar condicionado por una presión afecta ligeramente al agrietamiento del esmalte que recubre la placa de acero, produciendo desconches. El estudio llevado a cabo lleva a la conclusión de que el menor número de desconches se localiza a una presión de 0,7 Kg/cm².
4. Problema de los hervidos: Este problema indica la aparición de porosidad en las placas esmaltadas. Esto se debe a las elevadas temperaturas a las que se produce el esmaltado provocando la evaporación de elementos existentes en la superficie de la placa.

10. Bibliografía:

1. **Fundamentos de la Ciencia de los Materiales.** 4º edición.
Autor: Smith, William F. Editorial: Mc Graw Hill, 1992
2. **Introducción a la Ciencia de los Materiales.** 3º edición. Autor:
Callister William. Editorial Reverté, 1996
3. **Metalurgia Química.** 3º edición. Autor Moore J.J. Editorial:
Alambra, 1987
4. **Corrosión y Control de la Corrosión.** Autor: Uhlig, Helbert H.
Editorial: Urmo, 1979
5. **HAdbook of Metal Forming.** Autor: Lager, Kart. Editorial: Mc
Graw Hill, 1985.