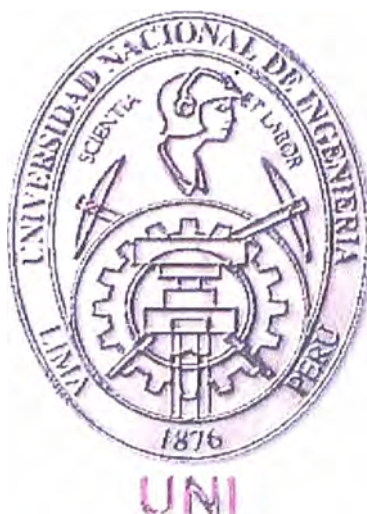


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA Y TEXTIL



**“ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL PROCESO DE CORROSIÓN
EN HORNOS DE UNA REFINERÍA DE PETRÓLEO”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTADO POR:

**DELIA FLOR CHILENO GONZALES
JUAN CARLOS RAMÍREZ VERÁSTEGUI**

**LIMA – PERÚ
2005**

**“A Dios por su luz y protección que constantemente guía mi camino
y a mis padres por su constante apoyo en todo momento
y por sus sabios consejos”**

Delia Flor Chileno Gonzales.

“A Dios y a la memoria de mi querida mamá”

Juan Carlos Ramírez Verástegui.

Agradecimientos

Agradecemos especialmente al Ing. Gilberto Garcia G. por su amistad brindada y por su asesoramiento y valiosos consejos en la elaboración del presente trabajo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

A. CONCEPTOS DE BASE

1. HORNOS DE REFINERÍA

1.1. COMPONENTES ESTRUCTURALES Y EQUIPOS

- 1.1.1. Paredes del Horno
- 1.1.2. Serpentes de Tubos
- 1.1.3. Soportes de Tubos
- 1.1.4. Mirillas y puertas de entrada
- 1.1.5. Chimenea
- 1.1.6. Deshollinadores
- 1.1.7. Quemadores

1.2. TIPOS DE HORNOS

1.3. PROCESO DE COMBUSTIÓN

- 1.3.1. Concepto
- 1.3.2. Combustibles - Características.
- 1.3.3. La llama: algunas características.

2. CORROSIÓN EN HORNOS

2.1. CORROSIÓN A ALTA TEMPERATURA

- a. Oxidación
- b. Sulfidización

2.1.1. CORROSIÓN POR CENIZAS FUNDIDAS

- 2.1.1.1. Comportamiento de las Cenizas del Residual
- 2.1.1.2. Mecanismo de la Corrosión por Cenizas Fundidas
- 2.1.1.3. Condiciones para la Corrosión por Cenizas Fundidas
- 2.1.1.4. Niveles de Temperatura
- 2.1.1.5. Materiales Susceptibles al Ataque por Cenizas Fundidas
- 2.1.1.6. Fenómeno de Creep

2.2. CORROSIÓN POR BAJA TEMPERATURA**2.3. EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN HORNOS POR
TECNICAS NO DESTRUCTIVAS.****2.4. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE
CORROSIÓN A ALTA TEMPERATURA.**

2.4.1. Método Gravimétrico

2.4.2. Los Cupones y su Preparación

2.4.3. Cálculo de Rate de Corrosión

2.5. PRUEBAS DE LABORATORIO**2.6. PRUEBAS DE CAMPO****B. PROBLEMAS DE CORROSIÓN EN LOS HORNOS DE LA
REFINERÍA CONCHÁN****1. DESCRIPCIÓN DE LOS HORNOS DE REFINERÍA CONCHÁN****1.1. TIPOS DE HORNOS****1.2. PRINCIPIO DE SU FUNCIONAMIENTO****1.3. QUEMADORES****1.4. HORNO F-1 DE DESTILACIÓN PRIMARIA****1.5. HORNO F-2 DE DESTILACIÓN AL VACÍO****1.6. COMBUSTIBLE PARA HORNOS**

1.6.1. Movimiento de Productos y Formulación del Combustible

1.6.2. Esquema de Alimentación de Combustible a los Hornos

2. ENFOQUE DEL PROBLEMA.**2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS**

2.1.1. Data Histórica de Espesores de tubo de los Hornos de Refinería
Conchán

2.1.2. Inspecciones Realizadas a los Hornos – Record Fotográfico

2.2.ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS FACTORES INCIDENTES EN LA CORROSIÓN DE LOS HORNOS F-1 Y F-2

2.2.1. Combustible

2.2.2.Perfiles de Temperaturas del Lado del Fuego y Variables
Operativas en los Hornos

2.2.3.Análisis de la Acción Corrosiva-Conceptos Bases

2.2.4.Material de los Tubos

2.2.5.Conclusiones del Análisis de los Factores de Corrosión

C.PROCEDIMIENTOS TÉCNICOS INDUSTRIALES PARA PREVENIR LOS PROCESOS DE CORROSIÓN POR CENIZAS FUNDIDAS

1.PROCESOS EXISTENTES

2.SELECCIÓN DEL PROCEDIMIENTO A EMPLEAR

2.1. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LOS EQUIPOS DEL CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN DEL COMBUSTIBLE PARA HORNOS

2.1.1.BOMBAS P-111A Y P-120

2.1.1.1.Objetivo

2.1.1.2.Generalidades

2.1.1.3.Consideraciones

2.1.1.4.Performance de la Bomba **P-111A**

2.1.1.5.Conclusiones

2.1.2. INTERCAMBIADOR E-23

2.1.2.1.Objetivo

2.1.2.2.Generalidades

2.1.2.3.Consideraciones

2.1.2.4.Performance del Intercambiador **E-23**

2.1.2.5.Calor Entregado por el **E-23** al Combustible Usado en
Hornos a Diferentes Viscosidades

2.1.2.6.Conclusiones

3.DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN LOS HORNOS EN OPERACIÓN DE REFINERÍA CONCHÁN

3.1. TÉCNICAS PARA LA DETERMINACION DE LA CORROSION EN LOS HORNOS

3.2.PROCEDIMIENTO A APLICAR EN LA DÉTERMINACIÓN DE LA CORROSIÓN EN LOS HORNOS F-1 Y F-2

3.3. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE LOS TUBOS EN LOS HORNOS F-1 Y F-2 MEDIANTE EL USO DE CUPONES

3.3.1.Determinación de los Puntos a Instalar

3.3.2. Diseño de Cupones y Tiempos de Exposición

3.3.3. Tratamiento de los Cupones

3.3.4.Conclusiones

4. MUESTREO DE CENIZAS Y DEPÓSITOS DE CORROSIÓN

5.EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE COMBUSTIBLE PARA HORNOS CON ADITIVO A BASE DE OXIDO DE MAGNESIO

5.1.SELECCIÓN DEL DILUYENTE DEL ADITIVO

5.2.ELEMENTO DE MONITOREO EMPLEADO DURANTE LAS CORRIDAS DE PRUEBA

5.2.1.Descripción de la Probeta de Control Manual

5.3.CORRIDAS DE PRUEBA REALIZADAS

5.3.1.CORRIDA DE PRUEBA SIN ADITIVACIÓN

5.3.1.1.Registro de Variables Operativas de los Hornos

5.3.1.2.Monitoreo con Probeta de Control Manual.

5.3.2.CORRIDA DE PRUEBA CON ADITIVACIÓN

5.3.2.1.Selección de la Dosis de Aditivo

5.3.2.2.Registro de Variables Operativas de los Hornos y Sistema de Suministro de Combustible

5.3.2.3. Control y Ajuste de los Parámetros de Aditivación de Combustible

5.3.2.4. Monitoreo con Probeta de Control Manual

5.3.2.5. Análisis de Resultados Obtenidos de la Aditivación

5.3.3. RECORD FOTOGRAFICO DE LAS CORRIDAS DE PRUEBA RELIZADASS

D. ANÁLISIS ECONÓMICO

E. CONCLUSIONES FINALES

F. RECOMENDACIONES

G. ANEXOS

H. BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo resume lo efectuado en el desarrollo del Tema Tesis “Estudio y Análisis del Proceso de Corrosión en Hornos de una Refinería de Petróleo” durante la permanencia en la Refinería Conchán.

En las unidades de calentamiento directo como son los hornos en las que se utiliza como combustible residuales con un alto contenido de contaminantes principalmente vanadio y sodio, se originan problemas de corrosión debido a la acción de compuestos corrosivos que se forman a altas temperaturas y atacan la metalurgia de las partes que se exponen directamente al fuego como son los tubos, soportes y refractarios entre otros, acelerando el proceso de oxidación.

Este trabajo se enfoca al estudio y análisis técnico del comportamiento de los Hornos en función a los factores que influyen en la Corrosión a Alta Temperatura.

Así mismo se anota la evaluación de las acciones tomadas por la empresa para prevenir la corrosión en los hornos así como los trabajos experimentales realizados para evaluar las velocidades de corrosión en los Hornos F-1 y F-2 cuyos resultados nos han conducido a la necesidad de precisar dicha evaluaciones de corrosión y ensuciamiento mediante el uso de elementos de monitoreo.

Además se realiza un programa de evaluación del tratamiento del combustible empleando un aditivo a base de óxido de magnesio proporcionado por la Refinería Conchán.

A. CONCEPTOS DE BASE

1. HORNOS DE REFINERÍA

Los hornos de proceso en una refinería son unidades importantes en las operaciones de refinación del petróleo, pues son los equipos donde el crudo es llevado hasta la temperatura a la cual se realizará la destilación de los diferentes productos en función de sus volatilidades. Es deseable mantener lo más constante posible la temperatura de salida de los hornos a fin de no afectar las condiciones de equilibrio establecidas para el buen funcionamiento de la Unidad de Destilación.

Un horno de refinería tiene una zona radiante, una zona de convección y una chimenea para dispersar los gases de combustión y controlar el tiro. La sección radiante provee el espacio para que el combustible sea completamente mezclado y quemado con el oxígeno del aire, cuyo calor radiante producto de la combustión se transmiten a través de los tubos.

1.1. COMPONENTES Y EQUIPOS

1.1.1. Paredes del Horno

Las paredes del horno deben ser completamente estancas para evitar la entrada de aire del exterior al interior. Por ello la construcción se realiza mediante chapas de acero reforzadas con perfiles normalizados, soldados entre sí, para dar suficiente rigidez y resistencia mecánica.

Como medios de protección de las paredes internas del horno se usan los llamados revestimientos que deben resistir la acción de la llama, escorias y metales fundidos. De un modo amplio se puede citar tres grandes categorías de estos

productos: refractarios, aislantes y como intermedio de estos dos los llamados refractarios aislantes o refractarios ligeros.

1.1.2. Serpentes de Tubos

Los serpentines de los hornos están compuestos por tubos rectos y codos conectados entre si por soldadura. La posición del serpentín, con referencia al eje del tubo, es horizontal o vertical.

La posición horizontal tiene ventajas desde el punto de vista del proceso. Por ejemplo, un fluido de proceso de dos fases se comportará con más estabilidad en tubo horizontal que en un tubo vertical. Sin embargo, un tubo horizontal tiene que ser soportado como una viga y estando expuesto a altas temperaturas, necesita soportes de alta aleación. Un tubo vertical sin embargo, solo necesita un apoyo para soportar su peso, generalmente colocado en la parte superior del tubo y una guía para garantizar la verticalidad del tubo.

Existen dos zonas dentro del Horno con relación a la posición del tubo:

Zona de Radiación

La Zona de Radiación es el lugar con más alto nivel de temperatura y por lo tanto el sitio donde la resistencia mecánica del serpentín es más difícil de garantizar. Por lo tanto es preferible una posición vertical del tubo en esta zona por un comportamiento mecánico más favorable en comparación con el tubo horizontal.

Zona de Convección

En la Zona de Convección existe un nivel de temperatura menor que en la Zona de Radiación generalmente en esta zona los tubos se instalan en posición horizontal por ventajas en la arquitectura del horno, el esfuerzo mecánico de los

soportes del tubo es menor debido a que está sometido a un menor nivel de temperatura.

1.1.3. Soportes de tubos

Estos componentes se utilizan para soportar los tubos internos del horno. Para soportar un tubo vertical solo es necesario dos soportes independientemente de la longitud del tubo. La disposición de tubos verticales es más ventajosa que la de tubos horizontales porque para soportar un tubo horizontal se necesita más de dos soportes y no se puede evitar que al menos los soportes intermedios estén expuestos a la influencia de los gases de combustión, cuando estos contengan óxidos de vanadio en porcentajes que puedan causar daños por corrosión, originada por el V_2O_5 .

1.1.4. Mirillas y puertas de entrada

Las mirillas sirven para poder vigilar las llamas y su incidencia con respecto a los serpentines dentro de las cámaras de radiación. Las puertas de entrada permiten el acceso al interior del horno para su inspección y mantenimiento de los componentes internos durante la parada del equipo.

El diseño de las mirillas y puertas de entrada deben cumplir los requerimientos de estanqueidad de las paredes del horno.

1.1.5. Chimenea

La chimenea tiene por objeto guiar los gases de combustión hacia la atmósfera así como controlar el exceso de aire hacia la cámara de combustión mediante una compuerta llamada Damper la cual regula el tiro.

Hoy en día las exigencias por la contaminación son cada vez más rigurosas por lo que se requieren chimeneas muy altas para permitir una mejor dispersión de los gases de combustión.

1.1.6. Deshollinadores

Son dispositivos que se utilizan para la limpieza de la deposición del carbón (hollín) y del ensuciamiento sobre la superficie exterior de los tubos. Los medios usados para la limpieza son: aire, vapor y agua.

El ensuciamiento es mucho más perjudicial en la Zona de Convección porque aumenta la pérdida de carga además de empeorar la transmisión de calor. Este efecto es más negativo cuando los serpentines de la zona de convección llevan pitones o aletas.

1.1.7. Quemadores

El quemador representa una parte fundamental en el proceso de la combustión industrial de un horno y su diseño en asociación con el horno son factores determinantes para lograr el aprovechamiento racional del potencial calorífico del combustible.

En el caso particular de la utilización de petróleos residuales en un horno de refinería su importancia en el proceso es aún mayor, por tener que soportar condiciones más agresivas y compensar su menor combustibilidad respecto a los destilados y gases combustibles.

El quemador es el creador, vigilante y el que auto-sostiene la llama y tiene dos funciones:

1. Origina la mezcla íntima entre el combustible y el comburente, en las proporciones convenientes y en las cantidades necesarias a la demanda de calor.

2. Provoca la combustión bajo la forma de una llama cuyas características, dimensiones, y propiedades físicas y químicas sean apropiadas a las operaciones industriales que se realice.

1.2. TIPOS DE HORNOS

Es difícil definir de manera concreta la acepción de horno debido a la multiplicidad de fines al que se le destina. En todos los casos su definición está íntimamente ligada al proceso en el que se realiza.

Los hornos se podrían tipificar de la siguiente forma:

Por Uso:

- Solo Calentar (por ejemplo un horno de aceite térmico).
- Calentar y evaporar (por ejemplo un hervidor, horno de crudo).
- Cracking (por ejemplo un horno de etileno).
- Reformado Catalítico (por ejemplo un horno de hidrógeno).
- Incineración.

Por Forma:

- Caja sencilla de radiación (**Figura N°1**).
- Caja doble de radiación (**Figura N°2**).
- Caja sencilla con divisiones hechas por filas de tubos (**Figura N°3**).
- Cilindro sencillo (**Figura N°4**).
- Cilindro doble (**Figura N°5**).

TIPOS DE HORNOS

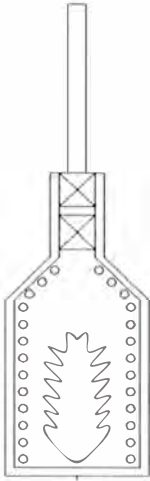


Figura N°1
Caja Sencilla de Radiación

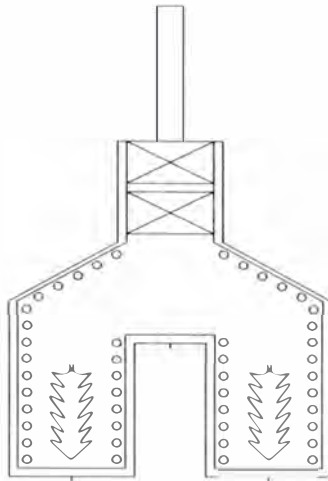


Figura N°2
Caja Doble de Radiación

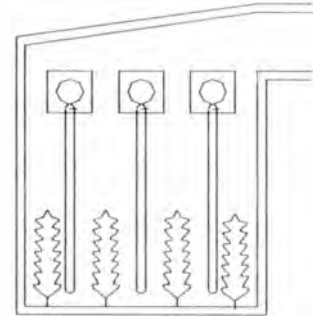


Figura N°3
Caja Sencilla de Radiación con divisiones de tubos

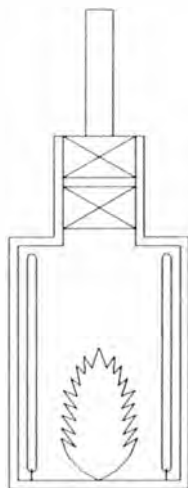


Figura N°4
Cilindro Sencillo

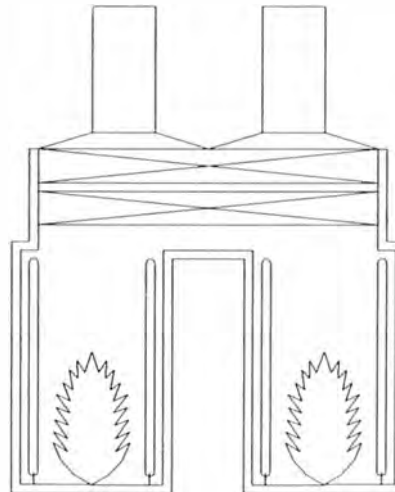


Figura N°5
Cilindro Doble

1.3. PROCESO DE COMBUSTIÓN

1.3.1. Concepto

Se entiende por combustión, a la combinación violenta, con desprendimiento de luz y calor, del Oxígeno del aire con el Carbono, Hidrógeno y Azufre.

La combustión del Oxígeno con el Carbono, Hidrógeno y Azufre, se efectúa en proporciones de peso bien determinadas, así pues por cada átomo de Carbono se necesitan 2 átomos de Oxígeno para llegar a la combustión perfecta formando CO_2 (dióxido de Carbono), el Carbono que se quema con deficiencia de aire forma el gas CO (monóxido de Carbono), que representa solo el 30% de una combustión perfecta, por lo tanto la combustión al formarse CO es incompleta.

El Hidrógeno se combina siempre en proporción de 2 átomos de Hidrógeno con uno de Oxígeno formando vapor de agua H_2O , y el azufre es de proporción 1:2 es decir un átomo de Azufre por 2 de Oxígeno, este gas es perjudicial por que al enfriarse los productos de la combustión, el agua que se forma en la combustión y la que esta presente en la humedad del combustible se condensan y reaccionan con el gas anhídrido H_2 formando ácido sulfúrico H_2SO_4 , sumamente corrosivo.

Los elementos contenidos en los combustibles: Carbono, Azufre, Nitrógeno, Oxígeno, Hidrógeno, se combinan originando una gran variedad de compuestos tales como anhídrido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de carbono, vapor de agua, cenizas, anhídrido sulfuroso e hidrocarburos no quemados, que forman los productos de la combustión.

1.3.2. Combustibles -Características.

Tanto como existen diferentes tipos de quemadores para las distintas aplicaciones industriales, existen diferentes grados de aceites combustibles para cubrir dichas necesidades.

Según Norma Técnica Peruana NTP las mezclas de hidrocarburos utilizados para generar energía por medio de combustión se subdividen en:

- Clase I: cuando tienen punto de inflamación menor de 37.8 °C (100 °F).
- Clase II: cuando tienen punto de inflamación igual o mayor de 37.8 °C (100 °F) pero menor de 60 °C (140 °F).
- Clase III A: cuando tienen punto de inflamación igual o menor de 60 °C (140 °F) pero menor de 93 °C (200 °F).
- Clase III B: Cuando tienen punto de inflamación igual o mayor a 93 °C (200 °F).

Dentro de la Clase I se consideran los combustibles como la Gasolina, en la Clase II se considera al Kerosene, Diesel y al Turbo, dentro de Clase III se encuentran los Residuales y Asfaltos.

La **Tabla N°1** detalla algunas de las especificaciones de los diferentes combustibles industriales.

Tabla N°1: ESPECIFICACIONES DE COMBUSTIBLES INDUSTRIALES

	Gasolina Sin Plomo		Kerosene		Diesel N°2		P.I. N°5		P.I. N°6		P.I. N°500	
<i>CARACTERÍSTICAS</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
INFLAMABILIDAD												
Punto de Inflamación Pensky Martens, °C	n.a.		43	-	52	-	55	-	60	-	65	-
FLUIDEZ												
Viscosidad Cinemática a 40°C, cSt	n.a.		n.a.		1.9	4.1	n.a.		n.a.		n.a.	
Viscosidad Cinemática a 50°C, cSt	n.a.		n.a.		n.a.		40	80	81	640	641	1060
Punto de Escurrimiento, °C	n.a.		n.a.		+4		n.a.		n.a.		n.a.	
COMPOSICIÓN												
Cenizas, % masa	n.a.		n.a.		-	0.01	-	0.1	n.a.		n.a.	
Azufre Total, % masa.	-	0.15	-	0.25		1.0	-	2	-	3.5	-	3.5
CONTAMINANTES												
Agua y Sedimentos, % Vol.	n.a.		n.a.		-	0.05	-	1	-	2	-	2
DESTILACIÓN												
10% recuperado, °C	-	70	-	200	-	-						
50% recuperado, °C	77	121	-	-	-	-						
90% recuperado, °C	-	190	-	-	282	360						
100% recuperado, °C	-	-	-	-	-	-						
Punto Final	-	225	-	300	-	-						
VOLATILIDAD												
Presión de vapor Reid, psi	-	10	n.a.		n.a.							

n.a.: No aplica.

1.3.3. La Llama: algunas características

Conceptos Generales

Teóricamente la llama es el medio gaseoso en el que se desarrollan las reacciones de combustión produciendo radiaciones luminosas de origen tanto térmico como químico, no necesariamente en el espectro visible, que constituyen manifestaciones de las condiciones en que se efectúa la generación de calor. Conjuntamente con la luz la llama constituye es aspecto visible del proceso de combustión.

Para el aprovechamiento racional de la energía contenida en el combustible se debe crear y mantener una llama apropiada, esto significa que debe reunir un conjunto de cualidades y características de naturaleza geométrica, física y química idóneas.

Temperatura de la Llama

A esta temperatura se le denomina también, temperatura teórica de combustión, temperatura adiabática de combustión o temperatura de combustión calorífica, y es la que se obtendría en una combustión estequiométrica, con mezcla perfectamente homogénea y en un tiempo brevísimo que no de tiempo a pérdidas caloríficas con el ambiente.

En el siguiente cuadro se presenta la comparación de algunas temperaturas de llamas. Es importante observar que las llamas más calientes no son las que en teoría corresponden a una mayor liberación de energía sino a aquellas cuyos productos finales de la combustión son más estables.

Cuadro N°1: COMPARACION DE ALGUNAS TEMPERATURAS DE LLAMAS

COMBUSTIBLE	COMBURENTE		INDICE EXCESO DE AIRE	TEORICA °C / °F	REAL °C / °F
	TIPO	TEMP(°C)			
Acetileno	Aire	15	1.0	2630 / 4766	2320 / 4208
Monóxido de Carbono	Aire	15	1.0	2470 / 4478	2100 / 3812
Hidrógeno	O2	15	---	2974 / 5385	---
Hidrógeno	Aire	15	1.0	2210 / 4010	2045 / 3713
Gas Natural	Aire	15	1.0	1961 / 3562	1735 / 3155
Gas Natural	Aire	15	1.0	1961 / 3562	1880 / 3416
Metano	Aire	15	1.0	1915 / 3479	1880 / 3416
Etano	Aire	15	1.0		
Propano	Aire	15	1.0	1980 / 3596	1925 / 3497
Butano	Aire	15	1.0		
Fuel oil pesado	Aire	15	1.0	2015 / 3659	
Fuel oil pesado	Aire	15	1.3	1690 / 3074	
Fuel oil pesado	Aire	300	1.0	2120 / 3848	
Fuel oil pesado	Aire	300	1.3	1845 / 3353	

Para mantener el equilibrio entre la velocidad de los gases y la propagación de la llama resultan de fundamental importancia las tres “T’s” de la combustión, esto es, Tiempo, Turbulencia y Temperatura.

Estos tres factores resultan de gran importancia para mantener en equilibrio la reacción de combustión, y por ende, las características de la llama.

El Tiempo determina la velocidad con la que se efectúa la reacción ; si se eleva la Temperatura de la llama aumentará la velocidad de reacción y con ella la generación de calor; así mismo aumentará el volumen de productos de combustión, incrementándose la Turbulencia en el entorno de la llama.

El aumento de la Turbulencia favorecerá la cinética de la reacción, disminuyendo el Tiempo de reacción; la mayor generación de calor producirá un incremento de Temperatura.

Formación y características de las llamas de petróleos residuales.

En el caso de los residuales, quizás con mayor claridad que con el resto de combustibles, las manifestaciones visibles de la llama representan una buena oportunidad de conocer la forma y eficiencia con que se realiza la combustión y la manera de actuar sobre ella.

Esto se explica porque las reacciones de combustión se realizan con características que se manifiestan en el espectro visible al ojo humano. En otros combustibles limpios (gas natural), la mayor proporción de reacciones y fenómenos de generación y transferencia de calor se producen en la banda del espectro que corresponde al infrarrojo, no visible al ojo humano.

Tanto la forma como la coloración de la llama resultan factores de importante utilidad para controlar el proceso de combustión.

- a) La forma de las llamas de los combustibles residuales se puede definir claramente por involucrar la presencia de manifestaciones visibles.

Desde la punta del inyector se observará la pluma de la llama constituida por el chorro de combustible líquido atomizado en proceso de calentamiento y mezcla con el aire antes de encenderse en el llamado frente de llama donde se inicia la extensión de la misma.

Al encenderse la llama se presenta una coloración que permite observar el propio frente de llama, por encontrarse a partir de ese punto partículas de carbón que al calentarse hasta incandescencia, emiten en el espectro visible la coloración de la llama que identifica los productos intermedios de la combustión de los hidrocarburos, es decir, aldehídos, cetonas, etc.

A lo largo y ancho, la llama quedará enmarcada por la coloración que manifiesta las partículas de carbón y metales incandescentes.

En el extremo final, la coloración se extingue porque la llama termina; sea porque todo el material combustible ya ha reaccionado (improbable) o

porque la temperatura en esa zona ya resulta insuficiente para que siga produciéndose las reacciones de combustión, quedando una parte del combustible (coque) como inquemados que se depositan en el interior del horno o salen por la chimenea constituyendo pérdidas de calor y causas de contaminación ambiental.

Se debe considerar que las llamas deben tener la forma que se ajuste a las dimensiones de la cámara de combustión y/o las características del proceso debiendo desarrollarse en un espacio libre, sin tocar ningún punto de las paredes o cuerpos extraños.

- b) El color, de las llamas de petróleos residuales resulta un criterio útil para conocer la temperatura que se produce en cada punto. En el **Cuadro N°2** se presenta las temperaturas que corresponde a los colores comúnmente observados en los diferentes tipos de llamas. En la **Figura N°6** se presentan diferentes formas y características de llamas en una cámara de combustión.

Cuadro N°2: TEMPERATURAS CORRESPONDIENTES A COLORES OBSERVADOS EN LA LLAMA.

COLOR	°F	°C
Rojo suave	875	475
Rojo suave a rojo oscuro	875-1200	475-650
Rojo oscuro a rojo cereza	1200-1375	650-750
Rojo cereza a rojo cereza brillante	1375-1500	750-825
Rojo cereza brillante a naranja	1500-1650	825-900
Naranja a amarillo	1650-2000	900-1090
Amarillo a amarillo brillante	2000-2400	1090-1320
Amarillo brillante a blanco	2400-2800	1320-1540
Blanco a blanco deslumbrante	más de 2800	más de 1540

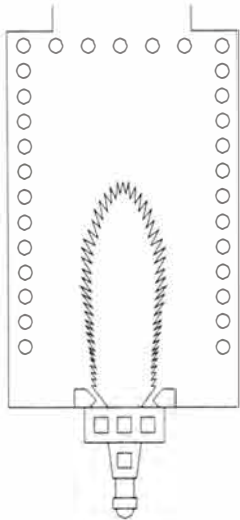
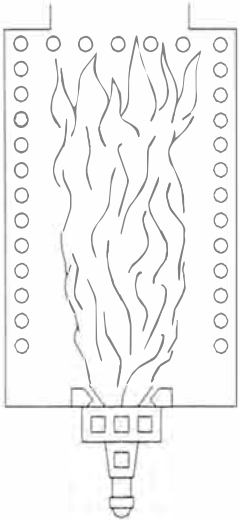
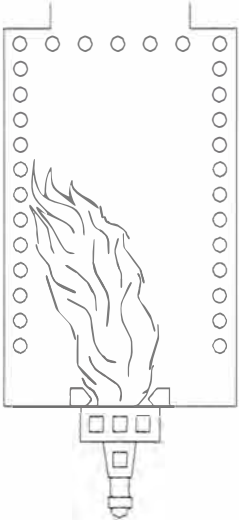
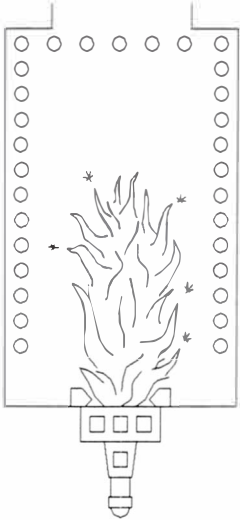
1. Buena llama de aceite combustible.	2. Mala llama de aceite combustible	3. Mala llama de aceite combustible	4. Mala llama de aceite combustible.
			
<p>Quieta, clara, sin humos, llama sostenida, continua y estable. Color: de amarillo brillante a naranja.</p>	<p>Llama larga Llama impacta contra los tubos. Combustión incompleta. Demasiado aceite o muy poco aire, o muy poco vapor de atomización, o cabezal de quemador dañado.</p>	<p>Llama inclinada Llama impacta contra los tubos sobre un lado. La lanza del quemador se encuentra inclinada o debajo de su posición. Atomizado deficiente. Chorro de combustible. Baja Temperatura de combustible. Muy poco vapor de atomización.</p>	<p>Chisporoteo Agua en el combustible. Combustible sucio. Combustible frío. Muy poco vapor de atomización.</p>

FIGURA N°6: Forma de llamas en una cámara de combustión

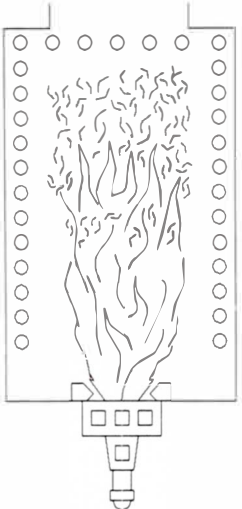
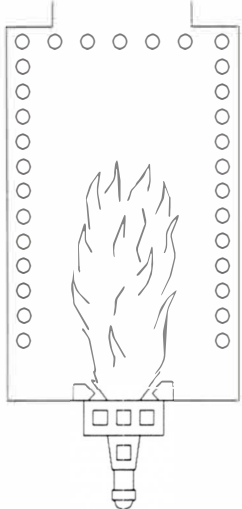
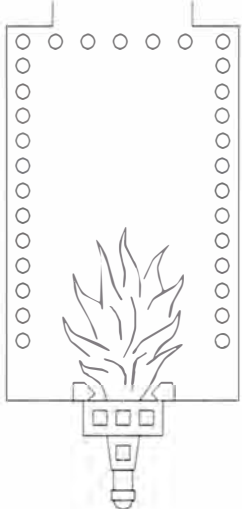
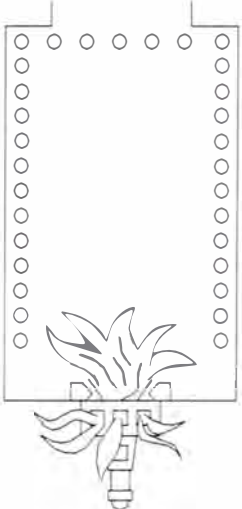
5.Mala llama de aceite combustible.	6.Mala llama de aceite combustible	7.Mala llama de aceite combustible	8.Retroflama de aceite combustible.
			
<p>Llama humeante Muy poco aire de combustión. Boquillas de quemadores dañadas. Combustible frío. Cabezal de quemador ajustado muy debajo de su posición.</p>	<p>Llama deslumbrante Demasiado aire secundario. Demasiado vapor de atomización.</p>	<p>Llama de forma irregular - pobre. Muy poco aire primario. Enladrillado (tazón) muy espaciado.</p>	<p>Muy poco tiro. Muy poco aire primario (combustible). Presión de gas muy baja</p>

FIGURA N°6(cont.): Forma de llamas en una cámara de combustión

2. CORROSIÓN EN HORNOS

La corrosión en equipos de fuego directo procede en escenarios distintos los cuales se producen de acuerdo a las temperaturas de operación y puede distinguirse los siguientes tipos:

1. Corrosión a alta temperatura.
2. Corrosión por cenizas.
3. Corrosión a bajas temperaturas.

2.1. CORROSIÓN A ALTA TEMPERATURA

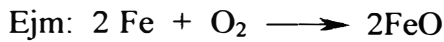
La corrosión a alta temperatura es una forma de corrosión que no requiere la presencia de un electrolito líquido. A veces, este tipo de daño se llama "corrosión seca" o "escoriamiento" (SCALING). En sentido estricto, la oxidación a alta temperatura es solamente un tipo de corrosión. De hecho, la oxidación es la reacción más importante de la corrosión a alta temperatura.

En la mayoría de los ambientes, la oxidación participa a menudo en las reacciones de alta temperatura sin importar el modo predominante de corrosión. A menudo, en la reacción de oxidación las aleaciones desarrollan una escama protectora que resista las distintas formas del ataque por corrosión a alta temperatura tal como sulfidización, carburación y otras formas de ataque. En general, las denominaciones de los mecanismos de la corrosión son determinados por los productos dominantes más abundantes de corrosión, así por ejemplo:

- *Oxidación implica los óxidos
- *Sulfidización implica los sulfuros
- *Sulfidización /oxidación implica los sulfuros más los óxidos,
- *Carburación implica los carburos.

a.Oxidación

Se presenta como una reacción química directa entre el metal y el gas agresivo.



Debe considerarse que el Fe puede formar: Fe O (wustita), Fe₂O₃ (magnetita) y Fe₂O₃ (hematita).

Los índices de oxidación de los metales puros son caracterizados mediante tres leyes cinéticas básicas: parabólica, logarítmica y lineal. Estas leyes son una medida de la velocidad de oxidación, pues relaciona la variación de espesor de la capa de óxido con el tiempo.

Es importante considerar que estas leyes están basadas en modelos relativamente simples de la oxidación. Los problemas prácticos de la oxidación de aleaciones implican mecanismos considerablemente más complicados que superan generalmente a las características consideradas en estos análisis simples.

Estas leyes son las siguientes:

*Leyes Logarítmica y Asintótica de Crecimiento

*Ley Parabólica de Crecimiento

*Ley Lineal de Crecimiento

Leyes Logarítmica y Asintótica de Crecimiento.- Esta ley es principalmente aplicable a las capas finas de óxido formadas a temperaturas relativamente bajas, y no suelen superar los 40-60 Å lo que significa que al cabo de cierto tiempo el crecimiento puede considerarse detenido. Su modelo es el siguiente:

$$x = k_e \log(ct + b)$$

Donde:

- x : Es el espesor de la película del óxido (o el aumento total debido a la oxidación, que es proporcional al espesor de la película del óxido).
- t : Es tiempo.
- k_e : Es la constante de crecimiento.
- C y b : Constantes.

Otra manera de expresar este modelo es la siguiente:

$$x = k_e (1 - \exp(-kt))$$

Donde:

- x : Es el espesor de la película del óxido (o el aumento total debido a la oxidación, que es proporcional al espesor de la película del óxido).
- t : Es tiempo.
- k_a : Es la constante de crecimiento.
- k : Constante.

Ley Parabólica de Crecimiento.- asume que la difusión de los cationes del metal o de los aniones del oxígeno es el paso controlante del crecimiento y está derivado de la primera ley de difusión de Fick.

Las concentraciones de las especie en difusión en las interfases metal-óxido y gas-óxido se asumen constantes. La difusividad de la capa del óxido se asume

invariante. Esta asunción implica que la capa del óxido tiene que ser uniforme, continua y del tipo monofásico. En sentido estricto, incluso para los metales puros, esta asunción es raramente válida. La constante de crecimiento, k_p , cambia con la temperatura según una relación del tipo de Arrhenius:

$$x^2 = k_p t + x_0$$

Donde:

- x : Es el espesor de la película del óxido (o el aumento de masa total debido a la oxidación, que es proporcional al espesor de la película del óxido).
- t : Es tiempo.
- k_p : Es la constante de crecimiento, directamente proporcional a la difusividad de la especie iónica que controla el crecimiento.

Derivando la expresión anterior se obtiene:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{K}{\sqrt{Kpt + X_0}}$$

Lo cual indica una disminución de la velocidad de oxidación (rate de corrosión) con el crecimiento de la película y por ende con el tiempo.

Ley Lineal de Crecimiento.- Es también una relación empírica que es aplicable a la formación y a la acumulación de una capa no-protectora del óxido.

$$x = k_L t$$

Donde:

- x : Es el espesor de la película del óxido (o el aumento de masa total debido a la oxidación, el cual es proporcional al espesor de la película del óxido).
- t : Es tiempo.
- k_L : Es la constante de crecimiento

Los metales expuestos a alta temperatura desarrollan una película de óxido la cual es parcialmente protectora y tiende a retardar la corrosión al incrementarse su espesor.

El Cr es el elemento de aleación más importante para mejorar la resistencia a la oxidación para las diferentes aleaciones comerciales, un mínimo de aproximadamente 18% de Cr es necesario para desarrollar una escoria protectora de Cr_2O_3 para aleaciones de Fe-Cr, así como también pequeñas adiciones de Al y Si a la aleación Fe-Cr pueden mejorar significativamente la resistencia a la oxidación. Por ejemplo un acero con 18%Cr-1%Si-1.8%Al.

El Ni es otro elemento que generalmente mejora la resistencia a la oxidación de las aleaciones, por ejemplo en el sistema Fe-Ni-Cr a mayor incremento de Ni, la aleación se vuelve más resistente a la oxidación.

El Molibdeno y el Tungsteno son otros elementos que fortalecen a las aleaciones haciéndolas más resistentes hasta temperaturas del orden de los 1150°C (2100 °F).

La mayoría de las aleaciones de aceros inoxidable para altas temperaturas dependen de una escoria de óxido de cromo para la protección en contra del ataque de oxidación. La escoria de óxido de cromo empieza a perder su capacidad de protección a temperaturas por encima de los 1000 –1100 °C (1830-2000 °F).

Para aplicaciones a esas altas temperaturas, las escorias de óxido de aluminio proveen significativamente una mejor protección. Un mínimo de aproximadamente 4 % de aluminio es requerido en las aleaciones a base de Ni o Fe para desarrollar una escoria protectora.

Los elementos de tierras raras (por ejemplo Y, La, Ce) y otros elementos reactivos (Zr, Ta, Hf, etc) son también benéficos para la resistencia a la oxidación en las aleaciones. Muchas aleaciones comerciales recientemente desarrolladas usan algunos de estos elementos para mejorar la resistencia a la oxidación.

b. Sulfidización

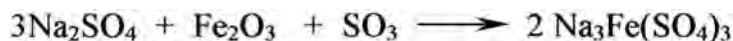
La sulfidización u “oxidación por azufre” es una forma considerablemente más destructiva que la oxidación debido a que las capas de sulfuros tienden a agrietarse y caer más fácilmente que la de los óxidos. El mecanismo básico de sulfidización es casi similar al de oxidación por lo que en un considerable grado, los mismos elementos aleantes que confieren cierta resistencia a la oxidación son útiles para producir la resistencia al ataque por sulfidización.

El azufre en el combustible reacciona con el oxígeno para formar SO_2 y SO_3 , una atmósfera de este tipo es generalmente oxidante. Los ambientes oxidantes son usualmente mucho menos corrosivos que los ambientes reductores donde el azufre está en la forma de H_2S . Sin embargo la sulfidización en ambientes oxidantes (así como también en ambientes reductores) es frecuentemente acelerado por otras impurezas del combustible tales como el Na, K y Cl; los cuales pueden reaccionar entre ellos mismos y / o con azufre durante la combustión para formar vapores de

sales. Estos vapores de sales pueden depositarse a temperatura más bajas sobre las superficies del metal, resultando en un ataque de sulfidización acelerado.

En muchos casos los metales y aleaciones cuentan con una escoria de óxido para resistir al ataque de sulfidización; la mayoría de las aleaciones en alta temperatura cuentan con escorias de óxido de cromo. En ambientes oxidantes, las escorias de óxidos se forman mucho más rápidamente debido a las altas actividades de oxígeno. De este modo la oxidación es probablemente la que domina la reacción de corrosión.

Cuando el ambiente es reductor (potenciales de oxígeno bajos) la reacción de corrosión se convierte en una competencia entre la oxidación y la sulfidización. Así actividades de oxígeno más bajas tienden hacer el medio ambiente más sulfidizante, resultando en el dominio de la sulfidización. A la inversa incrementando la actividad del oxígeno generalmente resulta en ambientes menos sulfidizantes con un dominio de la oxidación. La sulfidización es así controlada por las actividades del azufre y el oxígeno. Cuando la corrosión involucra más de un modo incluyendo la sulfidización, se hace necesaria la selección de materiales. Las reacciones de sulfidización cuando Sodio y Azufre están presentes en el combustible son:



2.1.1. CORROSIÓN POR CENIZAS FUNDIDAS

2.1.1.1. Comportamiento de las Cenizas del Residual

Las cenizas presentes en los combustibles residuales proceden del crudo de origen y se concentran en las fracciones denominadas residuales que salen por el fondo de la columna, en forma de sedimentos e impurezas metálicas en forma de compuestos organometálicos.

El **Cuadro N°3**, presenta los principales constituyentes de las cenizas en cuanto a su rango de concentración en combustibles residuales y su proporción en las propias cenizas; el Vanadio representa el elemento de mayor importancia cuantitativa.

Cuadro N°3: RANGOS DE COMPOSICIÓN DE CENIZAS EN COMBUSTIBLES RESIDUALES

COSTITUYENTE	COMBUSTIBLES RESIDUALES (ppm)	CENIZAS (%)
SiO ₂	6.0 – 86.0	0.6 – 86.0
Al ₂ O ₃	3.0 – 76.0	0.3 – 7.6
Fe ₂ O ₃	0.9 – 57.0	0.1 – 5.7
CaO	1.0 – 1.4	0.1 – 1.0
MgO	1.0 – 1.7	0.1 – 0.2
Na ₂ O	5.0 – 35.0	0.5 – 3.5
K ₂ O	0.2 – 1.2	0.0 – 0.1
V ₂ O ₅	14.0 – 740.0	0.1 – 74.0
NiO	1.3 – 25.0	0.1 – 2.5

Se conoce que el Vanadio está frecuentemente asociado con los asfaltenos en forma de complejos estables, solubles en el combustible.

Los combustibles residuales contienen gran variedad de impurezas pero, en relación con la corrosión que se producen en hornos y calderos, son tres los determinantes: Vanadio, Sodio y Azufre. Los niveles de estos contaminantes en el combustible, en los rangos que originan corrosión y depósitos se muestran en el **Cuadro N°4**.

Cuadro N°4: RANGO TÍPICO DE LOS PRINCIPALES CONSTITUYENTES QUE ORIGINAN CORROSIÓN Y DEPÓSITOS

COSTITUYENTES	EN EL RESIDUAL (ppm)	EN LAS CENIZAS (%)
VANADIO	0 – 500 como V	0.0 - 40 como V ₂ O ₅
SODIO	2 - 300 como Na	0.1 – 30 como Na ₂ O
AZUFRE	1000 - 4000 como S	0.1 – 40 como SO ₃

Los sistemas Na-V-S , generan diferentes vanadatos de sodio que tienen diferentes grados corrosivos y cuya formación depende de la relación molar Na/V en el combustible; al aumentar esta relación debe esperarse compuestos más corrosivos, en razón de formarse compuestos de punto de fusión más bajo, lo cual resulta importante dentro de un rango determinado de temperaturas de operación.

En el **Cuadro N°5** se muestran los compuestos formados más frecuentes luego de la combustión del combustible. Entre ellos se distinguen dos tipos, los formadores de escoria y los compuestos que no forman escoria.

Los compuestos formadores de escoria son los causantes de la corrosión por cenizas fundidas, estos tienen un punto de fusión más bajo y a las elevadas temperaturas de operación en las cámaras de combustión (hornos y calderas) tales compuestos alcanzan un estado cercano a la fusión o se encuentran parcialmente fundidos, por lo cual resulta muy fácil que se adhieran a puntos fríos en la cámara de combustión o zona de reacción.

Los compuestos que no forman escoria se depositan sobre las superficies de los tubos y paredes ocasionando problemas de ensuciamiento. Al cubrir los depósitos parcialmente los tubos de calderos y hornos, disminuyen el área efectiva de transferencia de calor produciendo una disminución gradual de la capacidad y eficiencia (hornos y calderos).

Cuadro N°5: PUNTO DE FUSIÓN DE LOS DEPÓSITOS MÁS FRECUENTES

A)COMPUESTOS FORMADORES DE ESCORIA	FÓRMULA	PUNTO DE FUSIÓN °C / °F
Pentóxido de Vanadio	V_2O_5	674 / 1245
Sulfato de Sodio	Na_2SO_4	879 / 1614
Sulfato de Níquel	Ni_2SO_4	839 / 1542
Metavanadato de Sodio	$Na_2O.V_2O_5$	629 / 1164
Pirovanadato de Sodio	$2Na_2O.V_2O_5$	639 / 1182
Ortovanadato dae Sodio	$3Na_2O.V_2O_5$	849 / 1560
Ortovanadato de Níquel	$3Ni_2O.V_2O_5$	898 / 1648
Vanadil Vanadato de Sodio	$Na_2O.V_2O_4.5V_2O_5$	624 / 1155
Trisulfato de hierro y sodio	$Na_3Fe(SO_4)_3$	538 / 1000
Gamma vanadil vanadato de sodio	$5Na_2O.V_2O_4.11V_2O_5$	577 / 1070
EUTÉCTICO entre: $5Na_2O.V_2O_4.11V_2O_5$ y $Na_2O.V_2O_5$		535 / 995
B)COMPUESTOS QUE NO FORMAN ESCORIA	FÓRMULA	PUNTO DE FUSIÓN °C / °F
Óxido de Magnesio	MgO	2500 / 4532
Óxido de Aluminio	Al_2O_3	2048 / 3718
Óxido de Calcio	CaO	2572 / 4662
Aluminato de Magnesio	$MgAl_2O_4$	2135 / 3875
Óxido de Manganeso	MnO_2	1649 / 3000
Óxido de Níquel	NiO	2090 / 3794
Trióxido de Vanadio	V_2O_3	1970 / 3254
Tetraóxido de Vanadio	V_2O_4	1970 / 3254

Vanadatos de Magnesio	$\text{MgO} \cdot \text{V}_2\text{O}_5$	1074-1243 / 1965 – 2269
Trisulfatos de Magnesio y Sodio	$\text{Na}_2\text{Mg}_4(\text{SO}_4)_3$	1126 / 2059
C) OTROS COMPUESTOS	FÓRMULA	PUNTO DE FUSIÓN °C / °F
Metavanadato Férrico	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{V}_2\text{O}_5$	859 / 1578
Vanadato Férrico	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{V}_2\text{O}_5$	854 / 1569
Sulfato de Calcio	$\text{Ca}(\text{SO}_4)$	1448 / 2638

Algunos combustibles tienen otros componentes metálicos además de sodio y vanadio tales como níquel, cromo y fierro, etc, los cuales podrían estar presentes en cantidades relativamente grandes. Estos metales compiten con el sodio para atrapar el vanadio y al reaccionar con este disminuyen la cantidad de vanadio disponible elevando la relación molar efectiva Na/V favoreciendo la corrosión. Pero por otro lado pasivan la corrosividad al disminuir la concentración de agentes corrosivos en los depósitos de ceniza.

2.1.1.2 Mecanismo de la Corrosión por Cenizas Fundidas

1. Durante la combustión los compuestos de vanadio y los de sodio presentes en el combustible se oxidan en la llama para formar V_2O_5 y Na_2O (Na_2SO_4) en forma de vapor.
2. Estos vapores se depositan en forma de cenizas que se pegan a las superficies metálicas, en donde el Na_2O actúa como agente ligante.
3. El V_2O_5 y el Na_2O (Na_2SO_4) reaccionan sobre las superficies metálicas para formar sales de puntos de fusión más bajos en estado líquido, siempre que estas superficies se encuentren a la temperatura de fusión de dichas sales.

4. Los vanadatos formados como se explicó en el punto anterior atacan el óxido protector de los metales exponiendo al metal subyacente a la oxidación rápida.

Conforme aumenta la temperatura, el rango de composiciones de $\text{Na}_2\text{O} - \text{V}_2\text{O}_5$ que forma líquidos se expande de manera considerable como se muestra en la siguiente figura:

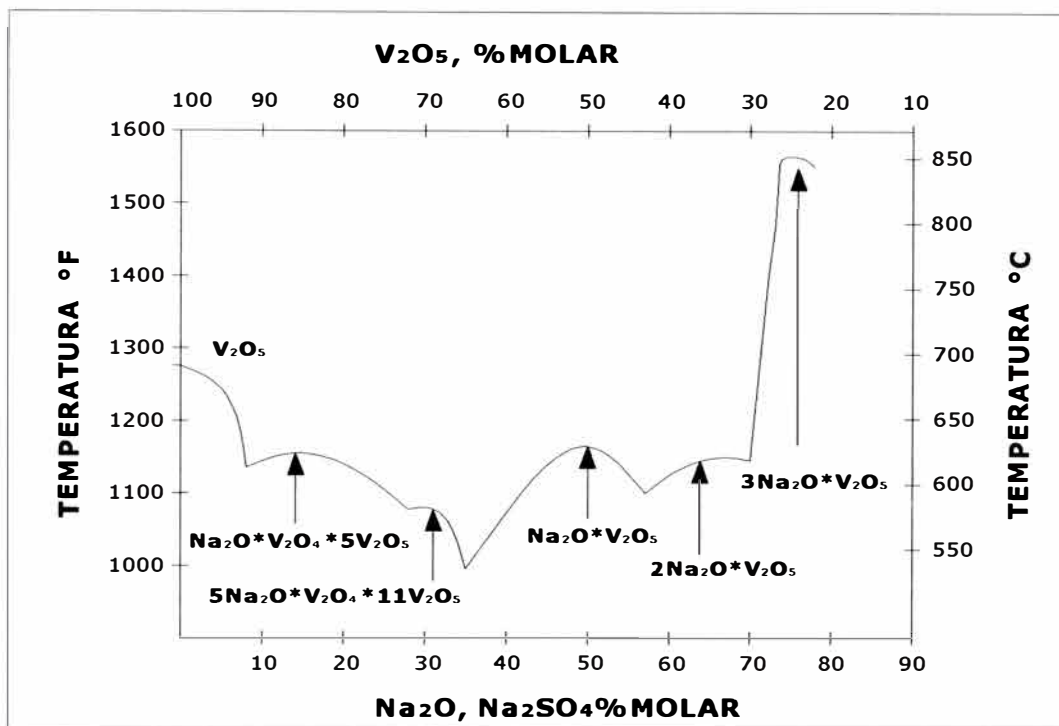


Figura N°7: Vanadatos de Sodio y sus eutécticos

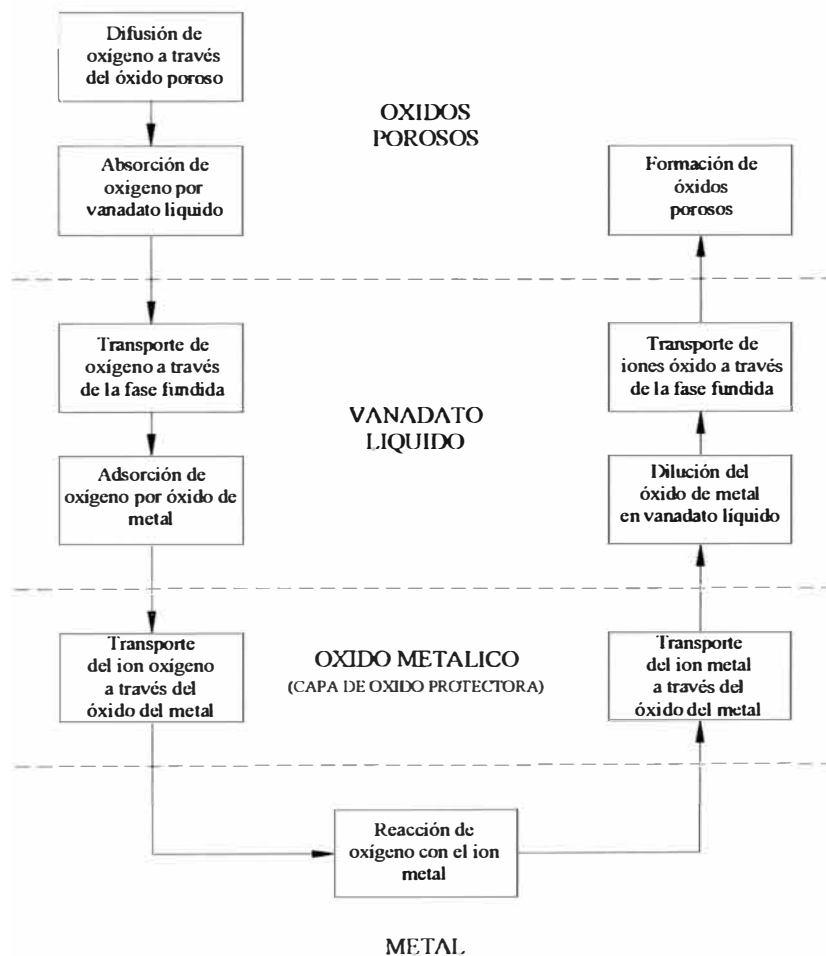
Los productos corrosivos que conforman las cenizas fundidas tienen una facilidad para absorber oxígeno en la interface gas/fase fundida y desorberlo en la interface ceniza fundida/metal; esto es explicable por el fenómeno en el cual las cenizas al pasar del estado líquido al sólido liberan oxígeno y viceversa, produciendo ciclos alternados de oxidación y sulfidización a temperaturas altas.

Para explicar el mecanismo de corrosión por cenizas fundidas será necesario considerar la forma de crecimiento de la capa de óxido y como esta es modificada bajo ciertas condiciones.

Durante la oxidación normal, el óxido crece como una capa coherente, pero en presencia de compuestos fundidos de vanadio, el proceso puede ser bastante diferente.

Los productos de la oxidación son solubles en los compuestos de vanadio y los óxidos sólidos son precipitados de la fase fundida luego que esta es saturada.

El mecanismo de corrosión por cenizas fundidas se puede explicar según el esquema siguiente:



Cuando el óxido crece a partir de la fase fundida, este toma la forma de cristales, en vez de películas continuas. Los cristales creciendo de diferentes puntos entran en contacto resultando en la formación de una capa porosa con la escoria líquida atrapada en la interfase metal/óxido. El grado de porosidad depende de la temperatura, solubilidad, tipo de óxido, etc.

Para que el ataque tenga lugar, es necesario que la fase corrosiva de vanadio permanezca en estado líquido, el grado de ataque es controlado por:

- La cantidad de los compuestos corrosivos de vanadio en la interfase metal/óxido;
- La velocidad de difusión del oxígeno a la interfase metal/óxido.

La corrosión por cenizas implica siempre una fase fundida que ataca al óxido protector y permite la oxidación por el oxígeno que transporta. Las propiedades de transporte de la fase fundida para generar la oxidación son de naturaleza eléctrica, considerándose que el oxígeno es reducido en la ceniza líquida.

En condiciones de equilibrio, la etapa controlante (más lenta) del mecanismo de corrosión resulta ser el transporte a través de la fase fundida. Esta capacidad de transporte está determinada por la viscosidad y propiedades conductoras de las cenizas fundidas (conductividad iónica transportando iones oxígeno o semiconductores que incluye transferencia de electrones). Al respecto es importante hacer notar el buen efecto que tiene la adición de sodio al V_2O_5 para aumentar la conducción iónica y disminuir la viscosidad.

Además el Na_2SO_4 en pequeñas cantidades incrementa la oxidación al controlar la fluidez de la escoria fundida a temperaturas bajas, pero actúa como su diluyente a mayores concentraciones y temperaturas.

El azufre es de gran importancia en la corrosión por cenizas, forma con el sodio los sulfatos alcalinos, los cuales generan los vanadatos por reacción con el pentóxido. Niveles importantes de azufre puede generar una corrosión por cenizas a temperaturas relativamente bajas.

2.1.1.3. Condiciones para la Corrosión por Cenizas Fundidas

La corrosión por cenizas se debe fundamentalmente a la reunión de las siguientes condiciones:

- Niveles de contaminantes suficientes en el combustible que generen ciertos compuestos corrosivos en los depósitos. Los rangos típicos del nivel de contaminantes muestra el **Cuadro N°4**.
- Niveles de temperatura suficientes en el metal o refractario que permitan la existencia de una fase fundida.
- Materiales refractarios y aleaciones susceptibles al ataque por cenizas.

2.1.1.4. Niveles de Temperatura.

Los niveles de temperatura necesarias para la corrosión por cenizas están relacionadas con las temperaturas de fusión de las cenizas. El **Cuadro N°5** muestra las temperaturas de fusión de los principales compuestos de las cenizas.

La temperatura mínima necesaria para la corrosión por cenizas muestran que esta sucede a partir de la formación del compuesto corrosivo de vanadio de menor punto de fusión que es el eutéctico entre el gamma vanadil vanadato de sodio y el meta vanadato de sodio (995°F/535°C).

La corrosividad aumenta a mayores niveles de temperatura y conforme la temperatura de los depósitos se eleva, el radio Na/V no es determinante; el contenido de sodio va perdiendo importancia pues ya no es requerido para

producir una fase fundida, al igual que para disminuir viscosidad y aumentar la conductividad de esta fase, condiciones necesarias para generar la corrosión por cenizas.

2.1.1.5. Materiales Susceptibles al Ataque por Cenizas Fundidas

El ataque por cenizas sucede sobre las superficies metálicas y sobre materiales refractarios.

Las aleaciones de alta temperatura pertenecen en su mayor parte al sistema Fe-Ni-Cr, la capa de óxido protectora fuertemente adherida al metal está conformada por Cr_2O_3 o un complejo $\text{Cr}_2\text{O}_2\cdot\text{FeO}$ (espinel). Esta es la capa que debe ser atacada para formar sulfuros, principalmente, en alguna etapa del proceso corrosivo.

Su permanencia durante el ataque explicará porque un material es más resistente al ataque corrosivo que otros; por ello se considera que las aleaciones con mayor contenido de cromo ofrecen mayor resistencia a este tipo de corrosión.

El níquel sufre ataque por sulfuros. Para altos contenidos de azufre no son recomendables aleaciones de níquel.

Se ha demostrado que aleaciones 50/50 o 60/40 Cr/Ni, no sufren ataque por cenizas, habiéndose superado problemas de resistencia mecánica con la adición de niobio.

Los refractarios adecuados para el servicio con combustible de alto contenido de contaminantes quedan determinados por tres propiedades que resultan fundamentales en su resistencia a la corrosión: Porosidad, Alta densidad y Pureza química.

Los materiales de alta sílice tienen mejor comportamiento que los de alta alúmina debido que la sílice aumenta la viscosidad del depósito fundido, evitando la penetración de este.

2.1.1.6. Fenómeno de Creep

El creep es el fenómeno que acelera la disminución de la máxima tensión admisible (máxima tensión permitida por el material antes de producirse la rotura) al aumentar la temperatura.

Este fenómeno produce un alargamiento continuo y progresivo del material hasta llegar a la rotura debido a una tensión constantemente aplicada, inferior a la carga de rotura (o tensión de rotura) y asociada a una temperatura elevada.

El Molibdeno es el elemento más potente reforzador de la resistencia al “creep” del material base, el siguiente elemento reforzador es el cromo.

El Molibdeno mejora la resistencia a la fluencia en caliente o “creep”, esto es, evita que el acero experimente un alargamiento continuo y progresivo como si se tratase de un material plástico, hecho que sucede al cabo del tiempo cuando se encuentra sometido a temperaturas elevadas aunque la tensión que soporte sea relativamente baja.

El Cromo mejora la resistencia a la oxidación frente a la acción de un buen número de agentes corrosivos a través de la formación de una capa de óxido de cromo adherida a la superficie del metal resistente al fenómeno de “escamación”.

Este hecho y la necesidad de combatir la corrosión dio origen al desarrollo de los aceros aleados al Cr-Mo que ofrecen una buena resistencia al “creep” y soportan mejor la corrosión por azufre y sulfhídrico.

En la **Tabla N°2** se muestran los tipos de aleaciones y sus composiciones empleados como materiales de tubos para hornos.

La **Tabla N°3** muestra los ASTM especificados para las aleaciones de las mas empleadas como materiales en la fabricación de tubos para hornos.

Tabla N°3: ASTM ESPECIFICADOS PARA TUBOS DE HORNOS

TIPO DE ALEACIÓN	ASTM	GRADO
Acero de Bajo Carbono	A-161	
Acero de Medio Carbono	A-106	B
5Cr- ½ Mo	A-213	T5
	A-335	P5
	A-200	T5
9Cr- 1Mo	A-213	T9
	A-335	P9
	A-200	T9

Tabla N°2: Aleaciones empleadas en tubos de hornos (Norma API 530)

Tipo de Aleación	COMPOSICIÓN QUÍMICA						
	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Mo	%P	%S
C- ½ Mo	0.20	0.90	0.15-0.40	-----	0.45-0.60	0.035	0.040
1 ¼ Cr- ½ Mo	0.17	0.40-0.65	0.50-0.80	1.00-1.50	0.45-0.65	0.035	0.040
2 ¼ Cr-1Mo (A387)	0.15	0.30-0.60	0.50	2.00-2.50	0.90-1.10	0.035	0.035
5Cr- ½ Mo	0.15	0.30.60	0.50	4.00-6.00	0.45-0.65	0.040	0.030
9Cr-1Mo	0.15	0.30-0.60	1.0	8.00-10.0	0.90-1.10	0.030	0.030

Tabla N°2(cont.): Aleaciones empleadas en tubos de hornos (Norma API 530)

Tipo de Aleación	COMPOSICIÓN QUÍMICA						
	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Si	%Mn	Otros
18 Cr-8Ni (304 y 304H)	0.08	18-20	8-10.5	-	1	2	
16 Cr-12Ni-2Mo (316 y 316H)	0.08	16-18	10-14	2-3	1	2	
18 Cr-10 Ni-Ti (321 y 321 H)	0.08	17-19	9-12	-	1	2	
18 Cr-10 Ni -Cb (347 y 347H)	0.08	17-19	9-13	-	1	2	
Ni-Fe-Cr (INCOLOY 800 H)	0.05-0.1	19-23	30-35	-	-	-	Al:0.15-0.6 Ti:0.15-0.6
25Cr-20 Ni (HK-40)	0.2-0.6	24-28	18-22	-	2	2	

2.2. CORROSIÓN POR BAJA TEMPERATURA

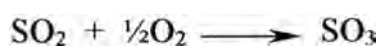
Corrosión en extremo frío o por bajas temperaturas ocurren siempre que la temperatura del metal caiga por debajo del punto de rocío del ácido sulfúrico de los gases de combustión.

En la mayor parte de los sistemas de combustión, las temperaturas de los gases de combustión varían desde 3000 °F (1650°C), en la llama, hasta 250°F (121 °C) o menos en la chimenea. Este cambio en la temperatura puede causar numerosos cambios físicos y químicos en los componentes de los gases de combustión. Entre los cambios que causan más problemas se encuentra la reacción entre el vapor de agua y el trióxido de azufre para formar ácido sulfúrico.

El general, el problema se asocia al hecho de quemar combustible que contenga azufre o compuestos de azufre. El azufre que se encuentra en el combustible se oxida para formar trióxido de azufre según la secuencia siguiente:



Una fracción pequeña (del 1% al 3%) del bióxido de azufre producido se oxida todavía más, para formar trióxido de azufre, por reacción directa con el oxígeno atómico que se encuentra en la llama:



También es posible la oxidación catalítica hacia SO_3 , si se encuentran presentes óxido férrico, pentóxido de vanadio o níquel:

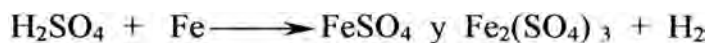


A medida que se enfrían los gases de combustión, se forma ácido sulfúrico en fase vapor. Si el vapor de ácido sulfúrico hace contacto con una superficie relativamente fría, puede condensarse para formar ácido sulfúrico líquido. La temperatura a la cual se condensa el ácido sulfúrico (punto de rocío del ácido sulfúrico) varía de 240 a 330 °F (116-166°C) o más alto, dependiendo de las concentraciones de trióxido de azufre y de vapor de agua en los gases de combustión.



La corrosión que resulta del ácido sulfúrico sobre las superficies metálicas se denomina “corrosión en el extremo frío”, porque suele presentarse en las regiones más frías del sistema de combustión.

La cantidad del trióxido de azufre y de humedad en los gases de combustión influyen sobre la temperatura a la que se alcanza el punto de rocío. Se puede tener corrosión siempre que la temperatura del metal sea menor que el punto de rocío del ácido sulfúrico. Debajo de este punto de rocío se forma ácido sulfúrico sobre las superficies metálicas y corroe ese metal según la reacción siguiente:



Se logra minimizar la corrosión en el extremo frío al obtener control sobre los factores críticos que la rigen. Los factores críticos incluyen la presencia de cantidades corrosivas de trióxido de azufre en los gases de combustión, la presencia de cantidades excesivas de humedad en los mismos y la presencia de metales cuya temperatura superficial está por debajo del punto de rocío del ácido sulfúrico.

Para evitar la presencia de cantidades corrosivas de trióxido de azufre en los gases de combustión es necesario operar con un exceso de aire del 5% o menos hacia

los quemadores, minimizar la infiltración de aire y especificar combustibles con bajo contenido de azufre.

Para eliminar la presencia de cantidades excesivas de humedad en los gases de combustión, es necesario especificar un combustible con bajo contenido de humedad y reducir la magnitud del vapor de agua necesario para el soplado de hollín.

2.3. EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN HORNOS POR TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS.

El monitoreo del avance del deterioro de los materiales internos de un horno se realiza mediante la evaluación por las técnicas no destructivas siguientes:

*Calibración de espesores.

*Durometría.

*Análisis Microestructural.

La evaluación con técnicas no destructivas de los componentes internos de un horno (tuberías, codos, soportes, etc.), cumple con los siguientes objetivos:

- Determinar la variación de espesores por ultrasonido verificando el desgaste por corrosión superficial y/o erosiones en los codos, tubos, cubiertas, etc.
- Verificar las variaciones de dureza, “in situ”, a fin de establecer parcialmente las características mecánicas de los codos, tubos, planchas-cubiertas, etc.
- Verificar el fenómeno “creep“, crecimiento de grano, variación y/o distorsión, aplicando la técnica del Análisis Microestructural por Réplicas Metalográficas, en los tubos de la zonas radiante y convectiva de un horno.

El **Anexo N°1**, detalla el procedimiento empleado para efectuar evaluaciones por técnicas no destructivas de un tubo de Horno.

El modo operativo de estas técnicas y las condiciones de hermeticidad que debe tener la cámara de combustión (zona radiante) y la zona convectiva de un horno, en operación, obligan a que estas pruebas de evaluación sean realizadas únicamente durante la parada del equipo.

No existen técnicas definidas para la evaluación de la corrosión durante la operación de un horno, por ello la evaluación de la velocidad de corrosión de los diferentes componentes estructurales internos de un horno está sujeta a los programas de mantenimiento e inspección definidos por las refinerías.

Calibración de Espesores

La Calibración Ultrasónica emplea una energía vibracional mecánica de alta frecuencia para medir el espesor (medido a partir de un lado) de una gran variedad de materiales. Una pulsación eléctrica es generada en un instrumento de prueba y transmitida a un transductor, que convierte la pulsación eléctrica en vibraciones mecánicas. Estas vibraciones de bajo grado de energía se transmiten a través de un líquido de acoplamiento dentro del objeto que se prueba, en donde la energía ultrasónica se atenúa, se dispersa, se refleja o resuena para indicar condiciones dentro del material. La energía de sonido reflejada, transmitida o resonante, se convierte en energía eléctrica mediante un transductor y se retorna al instrumento de prueba, en donde se amplifica.

Las normas para los procedimientos estandarizados se encuentran en ASTM E797-81 y ASME Sección VIII, Div1, Subsección C.

Durometría

La dureza se ha definido diversamente como:

- Resistencia a la penetración local.
- Resistencia al rayado.
- Resistencia al desgaste, abrasión o al trabajo a máquina.
- Resistencia a la fluencia o cesión del material.

Esta diversidad indica que la dureza no puede ser una propiedad fundamental de la materia, sino mas bien una propiedad compuesta que comprende la resistencia a la fluencia, la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y algunas otras.

La resistencia a la penetración localizada, o dureza de indentación o huella, se usa mucho como una medida de la dureza e indirectamente como un indicador de otras propiedades.

La dureza Brinell se determina forzando a una esfera templada a penetrar en la superficie de un material por medio de una carga conocida y midiendo el diámetro de la huella dejada después de la prueba. El número de dureza Brinell o simplemente número de Brinell se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\text{BHN} = P / \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

Donde P, es la carga aplicada (kg).

D, el diámetro de la esfera templada (mm); y

d, es el diámetro de la impresión o huella (mm).

Los ensayos para la medición de la dureza de los materiales están normados por la ASTM E10-78. En la **Tabla N°4** se muestran los valores permisibles de dureza para los materiales de los tubos de los Hornos empleados en Refinería Conchán.

Tabla N°4: Dureza de materiales del los Hornos.

MATERIAL	ELEMENTOS	DUREZA (BHN) PERMISIBLE
5 Cr – 0.5 Mo ASTM A-200, T5	Tubos de los Hornos F1 y F2 Zona Radiante	131 – 241
Acero al carbono Grado B ANSI A-234 Gr WPB. ASTM B-105	Codos y H-BENDS	187

Análisis Microestructural.

La medida de la dureza del material que constituye los elementos estructurales de un horno indican si el material ha sufrido una alteración en su estructura cristalina como resultado de su exposición a altas temperaturas y ciclos térmicos durante su operación.

Estas alteraciones pueden consistir en la formación de fases de composiciones distintas las cuales disminuyen las características mecánicas de los aceros.

Consiste en el estudio microscópico de las características estructurales de un metal o una aleación. Mediante las técnicas metalográficas es posible determinar el tamaño de grano, forma y distribución de las varias fases e inclusiones que tienen efecto sobre las propiedades mecánicas del metal.

Estos ensayos se encuentran normados por los procedimientos desarrollados en:

- ASTM E3-80 , ASTM E112-80
- ASM, Handbook, Volumen 17, Nondestructive Evaluation and Analyty Control.

El análisis micro-estructural proporciona información acerca de inicio o desarrollo del fenómeno “creep“, crecimiento de grano, variación y/o distorsión.

2.4. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN A ALTA TEMPERATURA.

El método más común, para la determinación de la velocidad de corrosión, es medir el cambio de peso del espécimen como resultado de la corrosión. Este método conocido como **Método Gravimétrico** es usado ampliamente para estudiar la oxidación y otras formas de corrosión a alta temperatura, y relaciona el peso de especímenes (cupones) en función del tiempo.

Este método es aplicable en especímenes obtenidos en pruebas tanto de campo como de laboratorio.

Sin embargo el **Método Gravimétrico** presenta algunos inconvenientes cuando se utiliza para estudiar la corrosión a alta temperatura debido a que es necesario adecuar convenientemente las condiciones de exposición de espécimen de manera que se simule un ambiente corrosivo real presente en un equipo de calentamiento a fuego directo.

2.4.1. Método Gravimétrico

La práctica de este método se sustenta en la aplicación de la norma **ASTM G4 – 84** relacionada con los cupones (especímenes) para prueba en equipos de plantas industriales bajo condiciones de operación.

Los procedimientos de preparación, limpieza y evaluación de los especímenes, se encuentran normados en las **ASTM G1 – 81** y **ASTM G 31 –72**. (**Anexo N°2**).

2.4.2. Los Cupones y su Preparación

El tamaño y la forma de los especímenes de prueba están influenciados por muchos factores y no pueden ser rígidamente definidos.

Los principales factores para el diseño de los especímenes son los siguientes:

- Un espesor suficiente debe ser empleado para minimizar la posibilidad de perforación del espécimen durante el periodo de exposición.
- Los bordes del espécimen deben ser preparados por maquinado o pulido. Usualmente no es necesario un acabado específico y en algunos casos es conveniente el uso de un papel lija N° 120, cuando el espesor del cupón lo permita.
- El pre-tratamiento de la superficie no es siempre necesario, en algunas aplicaciones por ejemplo, los aceros inoxidable pueden ser pre-pasivados por inmersión de **30 minutos** en una solución de **10 a 20 % de ácido nítrico a 60 °C**.
- La masa de cada espécimen debe ser determinada lo más próxima al 0.1 mg sobre una balanza analítica, lo que significa una **precisión de 0.0001 gr.**

2.4.3. Cálculo de Rate de Corrosión.

Durante el dekapado de los especímenes, esta presente la posibilidad de remover el metal sólido, esto resulta en un error en la determinación del rate de corrosión.

El rate de corrosión promedio es obtenido mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Rate de Corrosión} = (K * W) / (A * T * D)$$

Donde :

K = Constante, $(3.45 * 10^6)$ para rate en mpy).

T= Tiempo de exposición en horas, con una aproximación de 0.01 h.

A= Área en cm^2 , con una aproximación de 0.01 cm^2 .

W= Pérdida de peso con una aproximación de 1 mg (0.001 gr)

D= Densidad en gr / cm^3 .

2.5. PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas en laboratorio son importantes para comprender el desempeño de los metales y aleaciones en diversos ambientes corrosivos. Sin embargo existen varios inconvenientes debido a que una prueba en laboratorio no puede simular exactamente el ambiente en operación y las condiciones del proceso, otro inconveniente es la relativamente corta duración de la prueba comparada con el tiempo de vida de diseño del equipo por tal motivo la extrapolación se hace necesaria para la predicción del comportamiento del desempeño de los materiales.

2.6. PRUEBAS DE CAMPO

Estas pruebas de campo permiten la identificación de los principales contaminantes corrosivos así como también el mecanismo principal de corrosión. Estas pruebas se realizan mediante el uso de cupones expuestos al ambiente corrosivo en estudio.

Es importante utilizar un cupón del mismo material al equipo en evaluación. Un soporte es instalado dentro del sistema en operación (Horno) para exponer los cupones al ambiente y condiciones actuales con una duración predeterminada, desde varias semanas a un año ó más. El tiempo de exposición depende de la corrosividad del medio, así como también del programa de operación de la planta.

Es importante exponer los cupones de prueba a una duración adecuada para obtener resultados significativos. La estimación de la duración de una prueba se puede realizar sobre la base a la data teórica del comportamiento y resistencia a la corrosión de los materiales en ambientes específicos.

Algunas veces no es viable instalar un soporte de cupones dentro del sistema en operación, bajo estas circunstancias otros métodos de prueba han sido usados exitosamente para obtener información. Un método consiste en la instalación individual de cupones en vez de un soporte con un grupo de ellos.

B. PROBLEMAS DE CORROSIÓN EN LOS HORNOS DE LA REFINERÍA CONCHÁN

Una breve descripción del esquema productivo de la Refinería Conchán se encuentra en el **Anexo N° 3**.

1. DESCRIPCIÓN DE LOS HORNOS DE REFINERÍA CONCHÁN

1.1. TIPOS DE HORNOS

La Refinería Conchán cuenta con dos Hornos cilíndricos verticales con Zonas Convectivas que son empleados para el calentamiento del crudo y crudo reducido denominados Horno F-1 de Destilación Primaria y Horno F-2 de Destilación al Vacío respectivamente.

1.2. PRINCIPIO DE SU FUNCIONAMIENTO

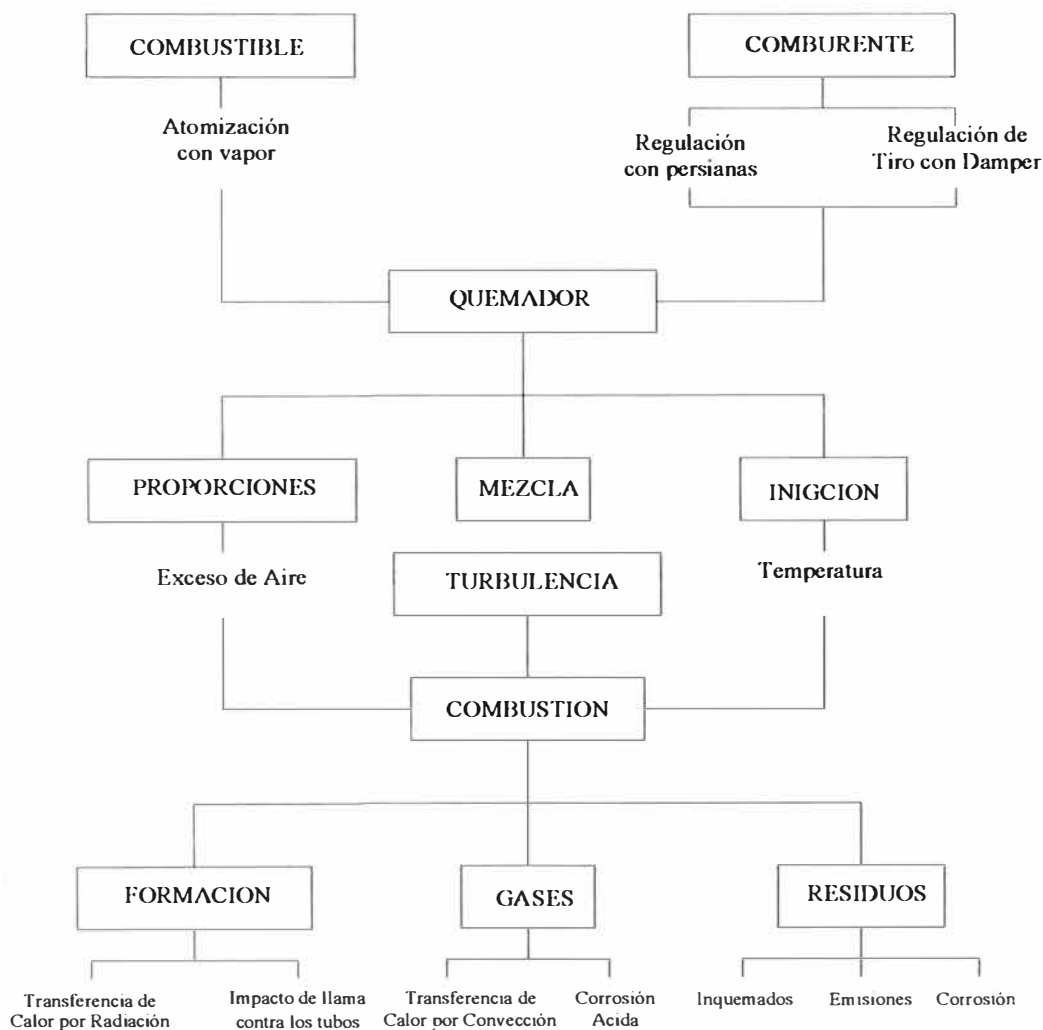
El diseño de los Hornos F-1 y F-2 se basa en la utilización del tiro natural propiciado por la chimenea para cumplir tres funciones específicas

- Suministro del aire de combustión.
- Circulación de los gases producto de la combustión.
- Evacuación de los gases residuales a la atmósfera.

El crudo de petróleo, previamente precalentado en los trenes de intercambio con las fracciones destiladas y el petróleo residual, circula por el interior de los tubos del horno, recibiendo calor en las zonas radiante y convectiva, hasta alcanzar la temperatura de ingreso a la Columna de Destilación (600-650 °C). El diseño de los tubos considera el espaciamiento adecuado en la zona radiante y utiliza tubos aletados en la zona convectiva.

El combustible utilizado es un petróleo residual de consumo interno, equivalente a un residual 6 ASTM liviano.

En el siguiente esquema de los aspectos vinculados al funcionamiento de un horno y los factores que involucran para propósitos de análisis operativo y posibilidades de optimización.



1.3. QUEMADORES

Los quemadores utilizados en este tipo de hornos son muy simples. Consisten de las siguientes partes:

- Atomizador por vapor ubicado en la parte central de un cono de ignición refractario.
- Registro de aire primario con persianas regulables que rodean al atomizador.
- Registro de aire secundario que controlan el ingreso del aire total de combustión.

En los hornos de Refinería Conchán (RFCO) actualmente se utilizan quemadores de la marca NAO (National Air Oil Burner).

1.4. HORNO F-1 DE DESTILACIÓN PRIMARIA

El crudo precalentado en los circuitos de intercambio de calor ingresa a la Zona Convectiva del Horno F-1 a una temperatura y presión aproximadas de 490°F y 200 psig. Intercambia calor con los gases de chimenea del Horno (Zona Convectiva) subiendo su temperatura hasta 545-560 °F. Luego pasa a la zona radiante del Horno F-1 donde continúa incrementando su temperatura hasta 650 °F, para ingresar en la zona de alimentación de la columna de destilación primaria C-1.

El Horno F-1 quema residual atomizado con vapor de 100 psig.

En **Cuadro N°6** se observa sus principales características.

Cuadro N°6: Características del Horno F-1

TIPO	Horno Cilindrico Vertical con Zona Convectiva
DUTY DE DISEÑO TOTAL (MMBTU/hr)	12.26
NÚMERO Y TIPO DE QUEMADORES	4 Quemadores National Air Oil Bumer , modelo CP20, de llama vertical
AGENTE ATOMIZANTE	Vapor Saturado de 100 psig.
MATERIAL REFRACTARIO	Refractario Castable, 5 in espesor
DAMPER	Un Damper de Tiro Natural Instalado en la salida de los gases de la chimenea
SOPLADO DE HOLLÍN	Un soplador de hollín rotatorio, usa vapor de 200 psig. Para limpieza de tubos de la Zona Convectiva.
ACCIONAMIENTO DEL SOPLADOR DE HOLLÍN	Eléctrico y Manual.

ZONA RADIANTE

DUTY (MMBTU/hr)	10.6
NÚMERO DE TUBOS	40
DIÁMETRO Y LONGITUD DE TUBOS	4.5 inch O.D. (Diámetro exterior), 24 ft. Longitud.
MATERIAL DE LOS TUBOS	Aleación 5 Cr- 0.5 Mo (ASTM A-213-T5,A-335-P5) Aleación 9 Cr- 0.5 Mo (ASTM A-213-T9)
CAMBIOS DE FLUJO	H-BENDS Y L-BENDS
MATERIAL DE LOS CAMBIOS DE FLUJO	Aleación 5 Cr- 0.5 Mo
NÚMERO DE PASOS DE FLUJO	2
ESPACIAMIENTO ENTRE TUBOS	8 inch.

Cuadro N°6: Características del Horno F-1 (Continuación)

ZONA CONVECTIVA

DUTY (MMBTU/hr)	1.66
CAMBIOS DE FLUJO	U-BENDS
MATERIAL DE LOS CAMBIOS DE FLUJO	ASTM A234 WP5 Y WPB
NÚMERO DE PASOS DE FLUJO	1
ESPACIAMIENTO ENTRE TUBOS	8 in

Tubos de Zona de Escudo

FILAS	PRIMERA Y SEGUNDA
Número de Tubos	14
Diámetro y Longitud de tubos	4.5 inch O.D. (Diámetro exterior) 9 ft 7 inch. Longitud.
Espesor de pared de tubo	SCH 120
Material de Tubos	Aleación 5 Cr-0.5 Mo (ASTM A-335 P-5)

Tubos de Superficie Extendida

FILAS	TERCERA	CUARTA	QUINTA - SETIMA
Número de Tubos	7	7	21
Diámetro Externo de Tubos	4.5 inch O.D.	4.5 inch O.D.	4.5 inch O.D.
Longitud de Tubos	9 ft 7 inch.	9 ft 7 inch.	9 ft 7 inch.
Espesor de pared de tubo	SCH 120	SCH 120	SCH 80
Material de Tubos	Aleación: 5 Cr-0.5 Mo (ASTM A-335 P-5)	Aleación: 5 Cr-0.5 Mo (ASTM A-335 P-5)	Acero al Carbono (ASTM A-106 Gr.B)
Tipo de Superficie Extendida	STUDS (aletas cilíndricas)	STUDS (aletas cilíndricas)	STUDS (aletas cilíndricas)
Dimensiones de studs	0.5 in x 0.5 in	0.5 in x 1 in	0.5 in x 1 in
Material de studs	Aleación: 5 Cr-0.5 Mo (ASTM A-335 P-5)	Aleación: 5 Cr-0.5 Mo (ASTM A-335 P-5)	Acero al Carbono (ASTM A-106 Gr.B)

1.5. HORNO F-2 DE DESTILACIÓN AL VACÍO

El crudo reducido proveniente de la Unidad de Destilación Primaria ingresa al Horno F-2 para incrementar su temperatura desde los 520°F hasta 660-700 °F dependiendo del tipo de corrida realizada. Adicionalmente dentro del horno existen dos serpentines de sobrecalentamiento del vapor, uno para producir vapor sobrecalentado que se usa en el eyector de vacío, y otro para el vapor que es inyectado en la UDV. El combustible usado es atomizado con vapor de 100 psig suministrado por el área de servicios.

En **Cuadro N°7** se muestra sus principales características.

1.6. COMBUSTIBLE PARA LOS HORNOS

El combustible usado en los Hornos F-1 y F-2 tiene dos orígenes:

*La mezcla de residuales y materiales de corte livianos, denominado Residual de Consumo Interno (RCI).

*Los fondos de la Unidad de Destilación al Vacío denominado Residual de Unidad de Vacío (RUV).

Existen, por tal motivo, dos circuitos de suministro de combustible para los Hornos uno procedente del tanque de preparación del RCI y otro que procede directamente de los fondos de la columna de Destilación al Vacío.

En las condiciones encontradas y durante el presente estudio, se empleó un RCI de una viscosidad comprendida entre 300-450 cSt a 50°C (122°F).

Cuadro N°7: Características del Horno F-2

TIPO	Horno Cilíndrico Vertical con Zona Convectiva
DUTY DE DISEÑO TOTAL (MMBTU/hr)	16.24
NÚMERO Y TIPO DE QUEMADORES	4 Quemadores National Air Oil Burner , modelo CP20, de llama vertical
AGENTE ATOMIZANTE	Vapor Saturado de 100 psig.
MATERIAL REFRACTARIO	Refractario Castable, 5 in espesor
DAMPER	Un Damper de Tiro Natural Instalado en la salida de los gases de la chimenea
SOPLADO DE HOLLÍN	Dos sopladores de hollín rotatorios, usa vapor de 200 psig. Para limpieza de tubos de la Zona Convectiva.
ACCIONAMIENTO DEL SOPLADOR DE HOLLÍN	Eléctrico y Manual.

ZONA RADIANTE.

DUTY (MMBTU/hr)	11.2
NÚMERO DE TUBOS	40
DIÁMETRO Y LONGITUD DE TUBOS	4.5 inch O.D. (Diámetro exterior), 24 ft. Longitud.
MATERIAL DE LOS TUBOS	Aleación 5 Cr- 0.5 Mo (ASTM A-213-T5,A-200-P5) Aleación 9 Cr- 0.5 Mo (ASTM A-200-T9)
CAMBIOS DE FLUJO	H-BENDS Y L-BENDS
MATERIAL DE LOS CAMBIOS DE FLUJO	Aleación 5 Cr- 0.5 Mo
NÚMERO DE PASOS DE FLUJO	1
ESPACIAMIENTO ENTRE TUBOS	8 inch.

Cuadro N°7: Características del Horno F-2 (Continuación)

ZONA CONVECTIVA

DUTY (MMBTU/hr)	5.04
CAMBIOS DE FLUJO	U-BENDS
MATERIAL DE LOS CAMBIOS DE FLUJO	ASTM A234 WP5 Y WPB
NÚMERO DE PASOS DE FLUJO	1
ESPACIAMIENTO ENTRE TUBOS	8 in

Tubos de Zona de Escudo

FILAS	PRIMERA Y SEGUNDA FILA
Número de Tubos	14
Diámetro y Longitud de tubos	4.5 inch O.D. (Diámetro exterior) 9.5 ft Longitud.
Espesor de pared de tubo	SCH 120 AW
Material de Tubos	Aleación 5 Cr-0.5 Mo (SA-335 P-5)

Tubos de Superficie Extendida

FILAS	TERCERA FILA	CUARTA FILA	QUINTA -NOVENA FILA
Número de Tubos	7	7	35
Diámetro Externo de Tubos	4.5 inch O.D.(Diam. Ext.)	4.5 inch O.D.(Diam. Ext.)	4.5 inch O.D.(Diam. Ext.)
Longitud de Tubos	9.5inch. (Longitud)	9.5 inch. (Longitud)	9.5 inch. (Longitud)
Espesor de pared de tubo	SCH 120 AW	SCH 120 AW	SCH 80 AW
Material de Tubos	Aleación 5 Cr-0.5 Mo (SA-335 P-5)	Aleación 5 Cr-0.5 Mo (SA-335 P-5)	Acero al Carbono (SA-106 Gr.B)
Tipo de Superficie Extendida	STUDS (aletas cilíndricas)	STUDS (aletas cilíndricas)	STUDS (aletas cilíndricas)
Dimensiones de studs	0.5 in Diam. x 0.75 in Alt.	0.5 in Diam. x 1 in Alt.	0.5 in Diam. x 1 in Alt.
Material de studs	Aleación 5 Cr-0.5 Mo (ASTM A-335 P-5)	Aleación 5 Cr-0.5 Mo (ASTM A-335 P-5)	Acero al Carbono (ASTM A-106 Gr.B)

1.6.1. Movimiento de Productos y Formulación del Combustible.

La preparación del RCI se realiza en el **Tanque N° 39** de 600 barriles de capacidad (mostrado en esquema de la **Figura N°8**) el cual posee un sistema de recirculación con bomba para homogenizar la mezcla en el tanque. Tiene aislamiento externo térmico y de aluminio, así como un serpentín de vapor en el fondo para mantener caliente y facilitar el flujo del producto por las tuberías.

En la formulación del RCI se emplea Residuales (Residual 6 o Residual 500) y un material de corte para corregir su viscosidad. Las viscosidades a 50°C (122 °F) típicas para los materiales de corte comúnmente usados son:

- Diesel 3.4 cSt a 50°C (122 °F)
- Gasóleo pesado 11-15 cSt a 50 °C (122 °F)

En casos especiales puede emplearse Kerosene por su menor viscosidad (1.34 cSt a 50°C). Con estos valores de viscosidad, la viscosidad del producto a corregir y la viscosidad objetivo se encuentran en las tablas los correspondientes VBN, con los que se calcula la cantidad de material de corte a añadir para alcanzar la viscosidad deseada del combustible.

Existe dos posibilidades para en la transferencia de los componentes a emplearse en la preparación del RCI hacia el **Tanque N°39**:

- Transferencia por separado de la producción de residuales de planta hacia el Tanque 39, para luego transferir gasóleo de la producción de acuerdo a la formulación para una determinada viscosidad.
- Transferencia de Residual 6 ó Residual 500 de tanques de ventas previa fiscalización hacia el **Tanque 39**, para luego adicionar la cuota de material de corte liviano para corregir su viscosidad.

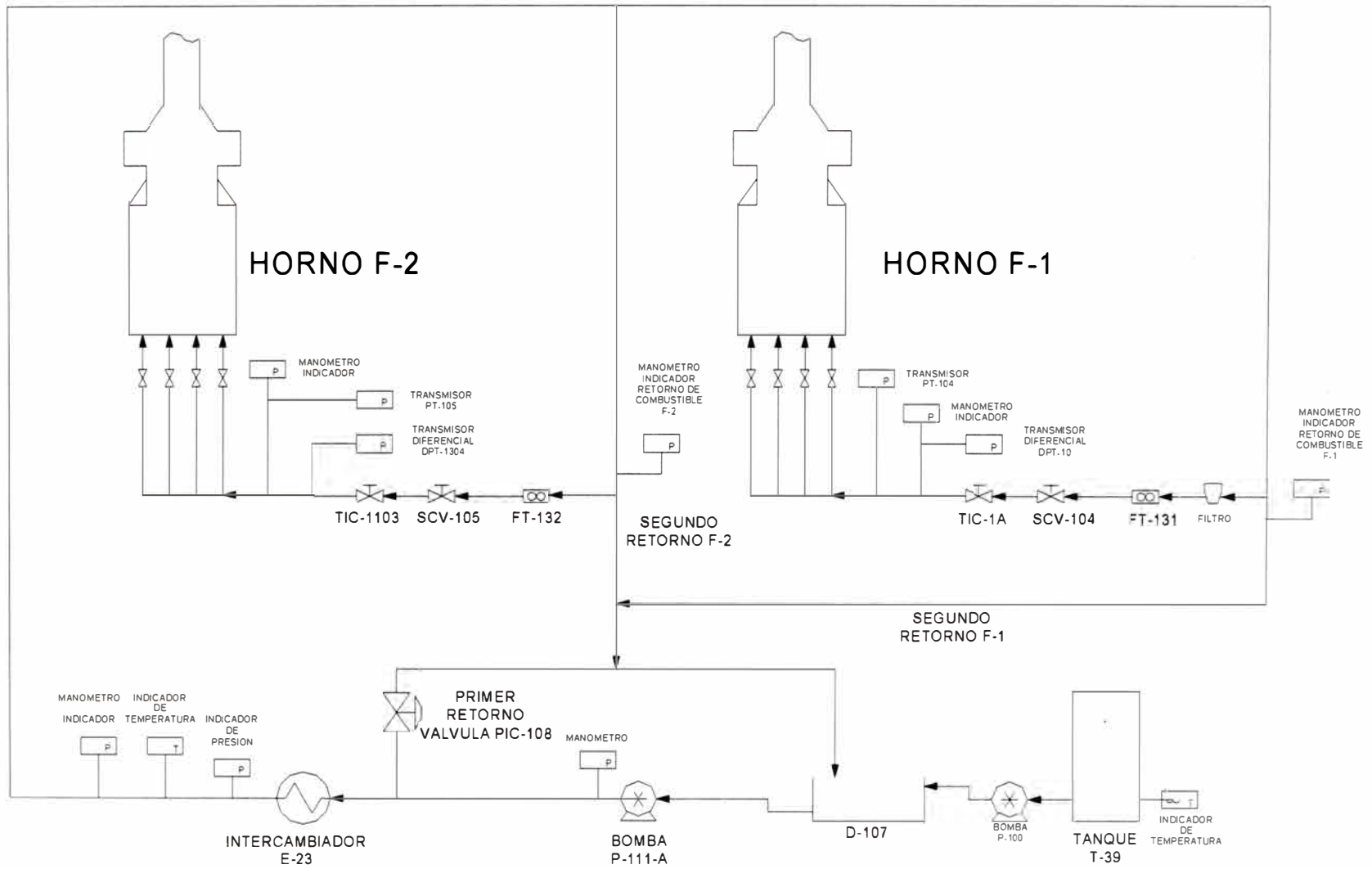


Figura N°8: Circuito de suministro de combustible a Hornos F-1 y F-2

1.6.2. Esquema de Alimentación de Combustible a los Hornos.

La **Figura N°8** muestra el diagrama de flujo del sistema de suministro de combustible (RCI) a los Hornos F-1 y F-2.

El RCI preparado es transferido con la bomba P-113 vía contómetro desde el **Tanque 39** hacia el **Tanque D-107**, que es el tanque abastecedor de combustible hacia hornos y calderos, el cual está provisto de un contómetro para registrar el ingreso de combustible, así como facilidades de aislamiento térmico, y serpentín de fondos que usa vapor de 200 psig.

El residual es enviado desde el **Tanque D-107** hacia los Hornos con la bomba rotatoria **P-111 A** o su suplente P-120, en su trayecto pasa por el intercambiador de doble tubo **E-23** donde es calentado con vapor saturado de 250 psig, y llega a los hornos F-1 y F-2 a una temperatura de 250 °F aproximadamente.

La bomba **P-111 A** tiene una válvula de seguridad que releva de la descarga a la succión, y adicionalmente tiene una válvula de retorno manual al **D-107**, para aliviar cualquier exceso de presión.

Previo al ingreso del combustible al intercambiador **E-23** existe una válvula (**PIC-108**) que controla la presión del combustible en la red retornando combustible al **D-107** para mantener una presión óptima de 280-300 psig. Este sistema de control es manejado desde el panel de control del sistema de instrumentación por computadora.

2. ENFOQUE DEL PROBLEMA

En el presente capítulo se realiza un análisis de la situación de los Hornos de la Refinería Conchán en lo referente a la corrosión a altas temperaturas orientado principalmente a los tubos de los hornos los cuales son los componentes estructurales más importantes en dichas unidades.

En este estudio se abarca aspectos relacionados con la información existente sobre el problema haciéndose una recopilación de los indicios de la corrosión en los tubos de los hornos registrados durante las paradas de los equipos.

Así mismo se realiza un análisis de la información de campo que fue levantada con el fin de determinar la situación en la que se encontraban las unidades respecto al potencial del efecto corrosivo producto de la exposición de los metales a las altas temperaturas y a los gases de combustión. Este análisis se fundamenta en los principios teóricos de los factores incidentes en la corrosión por alta temperatura estudiados en las secciones **A.2.1.** y **A.2.2.** y nos permitirá reconocer si es posible la corrosión por cenizas fundidas sobre los tubos de los hornos así como otros tipos de corrosión asociados al uso de residuales como combustibles tales como la sulfidización y corrosión ácida.

Además se analiza aspectos referidos al material de los tubos de los hornos y su característica más importante referente a su resistencia química a la corrosión por cenizas.

2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

2.1.1. Data histórica de espesores de tubo de los Hornos de Refinería Conchán

El **Anexo N°4** adjunto muestra la información de base recogida de los informes de paradas de planta de Refinería Conchán desde Mayo de 1977 hasta la actualidad, sobre los trabajos de inspección realizados en los Hornos F-1 y F-2 en lo referente a la calibración de espesores de los tubos,

Esta información se encuentra disponible en los Archivos de la Unidad de Mantenimiento de Refinería Conchán y su fiabilidad está sustentada en el prestigio de las empresas que fueron designadas por la Refinería para efectuar dichos trabajos.

A partir de esta información y considerando todos los datos recogidos se procedió a calcular las velocidades de corrosión en MPY de cada tubo.

El cálculo de la velocidad de corrosión de los tubos de los Hornos se basa en la variación del espesor de la pared de los tubos producida en periodos delimitados por las paradas del equipo, durante las que fueron inspeccionados y medidos los espesores de los tubos de los Hornos.

Procedimiento Aplicado

1. Selección de un tubo de acuerdo a su ubicación dentro del serpentín en el horno.

Los tubos de los dos serpentines de la Zona Radiante del Horno F-1 se enumeran en sentido horario (vista superior del horno) de la siguiente manera:

A partir del tubo de ingreso al primer serpentín desde el N°1 al N°20 (20 tubos).

A partir del tubo de salida del segundo serpentín desde el N°21 al N°40 (20 tubos).

Siendo los tubos N°1 y N° 40 los de ingreso de crudo por cada serpentín. Los tubos del serpentín de la Zona Radiante del Horno F-2 se enumeran en sentido horario (vista superior del horno) a partir del tubo de ingreso del crudo reducido desde el N°1 hasta el N°40 (40 tubos).

2. Determinación del inicio del periodo:
 - Fecha de reemplazo del tubo por uno nuevo cuyo espesor corresponde al espesor de un tubo nuevo (7.9 mm).
 - Fecha en la que se realizó la medida del espesor del tubo.
3. Toma del dato de espesor registrado a una determinada altura desde el piso del horno en la fecha del inicio del periodo.
4. Determinación del final del periodo, tomando la fecha de la siguiente medida de espesor del tubo después del inicio del periodo.
5. Toma del dato de espesor registrado a una determinada altura del piso del horno en la fecha del final del periodo.
6. Cálculo del periodo en días comprendido desde del inicio del periodo hasta el final del mismo.
7. Cálculo de la variación del espesor del tubo en el periodo seleccionado.
8. Cálculo del rate mediante el cociente de los valores obtenidos en los puntos 6 y 7. Conversión en las unidades correspondientes para la expresarlo en milésimas de pulgada por año (MPY).

Efectuando el cálculo mediante este procediendo se puede obtener el desgaste en MPY en un punto del tubo (a una altura con respecto al piso del Horno) desde su puesta en servicio hasta el momento en el que se realiza la parada del equipo. Sin embargo, en la mayoría de los casos, no es posible el cálculo del avance de la corrosión en este mismo punto pues los datos registrados en las siguientes paradas se realizan en otros puntos del tubo (a otras alturas con respecto al piso del Horno).

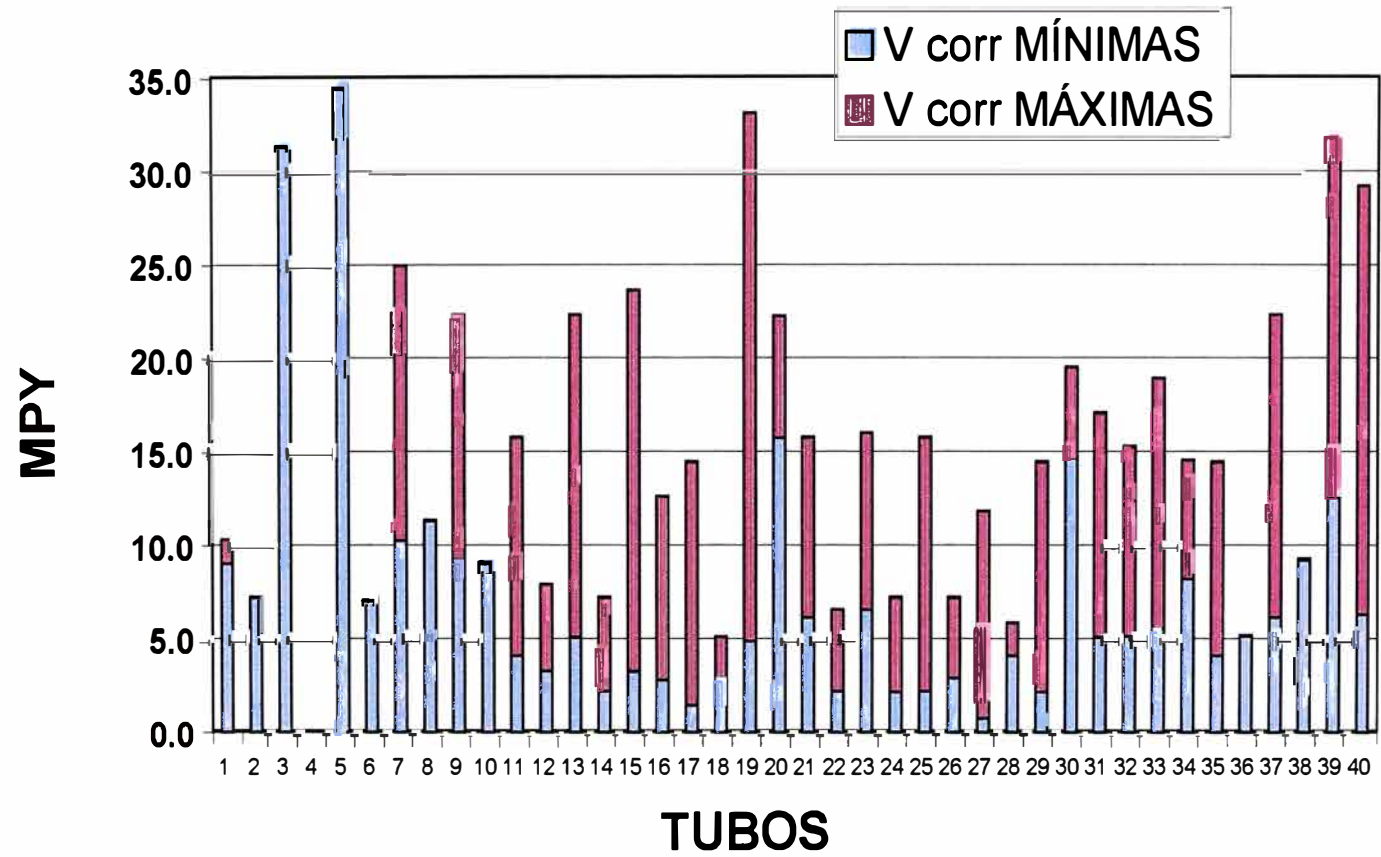
Los valores mínimos y máximos del rate de corrosión calculados en MPY para cada tubo de las Zonas Radiantes de los Hornos se muestran en las **Gráficas N°1** y **N°2**.

Los resultados muestran que la velocidad de corrosión de los tubos de la zona radiante de los Hornos F-1 y F-2 no es uniforme y observándose valores tan altos como 40 MPY y tan bajos como 2 MPY.

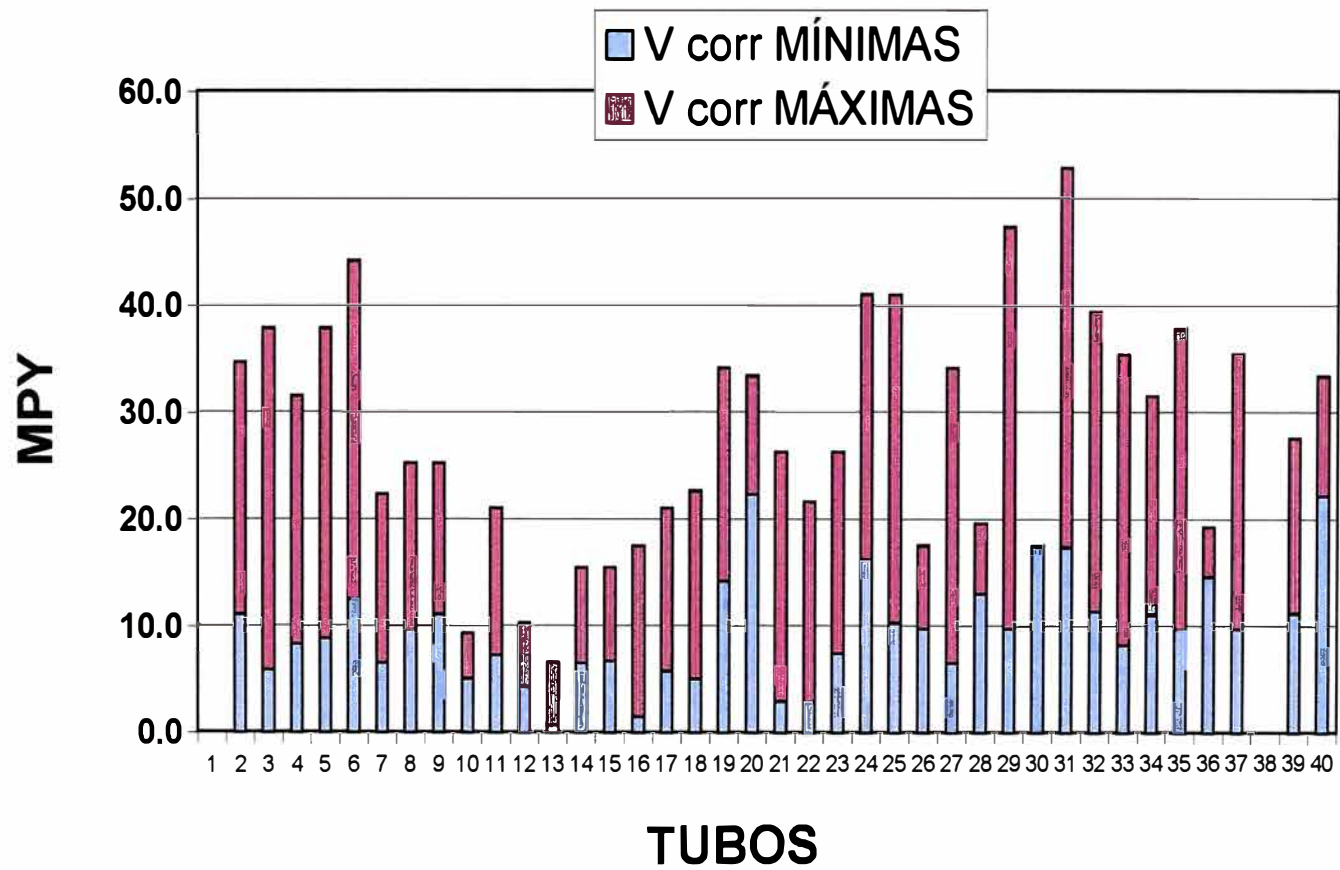
Los valores más altos de velocidad de corrosión en el Horno F-1 se presentan en los tubos 3, 5 19 39 y 40 y en los tubos 6,29 y 31 en el Horno F-2. Este hecho depende de varios factores tales como la cercanía a los quemadores lo cual expone al tubo al impacto de la llama.

El **Cuadro N°8** muestra en resumen los valores máximos y mínimos obtenidos mediante el tratamiento de los datos recogidos para las zonas radiante y convectiva de los hornos. Cabe mencionar que solo se muestran datos de los niveles superior (N-9) e inferior (N-1) del serpentín de tubos de la zona convectiva en razón que son los que son accesibles para la medición de espesores.

**Gráfica N°1: VELOCIDADES DE CORROSIÓN
ZONA RADIANTE - HORNO F-1**



Gráfica N°2: VELOCIDADES DE CORROSIÓN ZONA RADIANTE - HORNO F-2



Cuadro N°8: VALORES MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN LOS HORNOS

	HORNO F-1	HORNO F-2
ZONA RADIANTE	2-30 MPY	2-40 MPY
ZONA CONVECTIVA	NO HAY DATOS DISPONIBLES	3.6-14.5 MPY (NIVEL-9) 24.9 – 29.8 MPY (NIVEL-1)

Puede observarse que la velocidad de corrosión registrada en los tubos de la Zona Radiante del Horno F-2 son mayores a las registradas para los tubos de la zona radiante del Horno F-1 verificándose con ello que el Horno F-2 esta sujeto a mayor exigencia operativa (mayor temperatura de carga y mayor temperatura de piel de tubo) con respecto al Horno F-1.

Se nota un mayor nivel de corrosión en los tubos de nivel N-1 del Horno F-2 pues son los tubos de la denominada zona de escudo que se encuentran directamente expuestos a la llama.

El nivel de corrosión del los niveles superiores de la Zona Convectiva del Horno F-2 a pesar de no encontrarse expuesto a la llama no es despreciable.

2.1.2. Inspecciones Realizadas a los Hornos –Record Fotográfico

El record fotográfico que se muestra a continuación ilustra las evidencias de los efectos de la corrosión a alta temperatura resultado del ensuciamiento de la superficie externa de los tubos en la Zona Convectiva, y en un grado mayor en la Zona Radiante de los Hornos F-1 y F-2, registrados durante inspecciones realizadas en periodos de parada de planta.

5.3.3.RECORD FOTOGRAFICO DE LA
CORRIDAS DE PRUEBAS REALIZADAS
PROBETA DE CONTROL MANUAL



Fotografía N° 1: VISTA EXTERIOR DEL HORNO F-1.



**Fotografía N° 2 : (De abajo hacia arriba)
ZONA RADIANTE, CONVECTIVA Y
CHIMENEA DEL HORNO F-1.**



**Fotografía N°3 : ZONA DE TRANSICION DE RADIANTE A CONVECTIVA
DONDE SE UBICAN LA H-BENDS. HORNO F-1.**



Fotografía N°4 :
VISTA EXTERIOR DEL
HORNO F-2.



Fotografía N°5 : QUEMADOR.



Fotografía N°6 : H-BENDS.



Fotografía N°7 : H-BENDS.



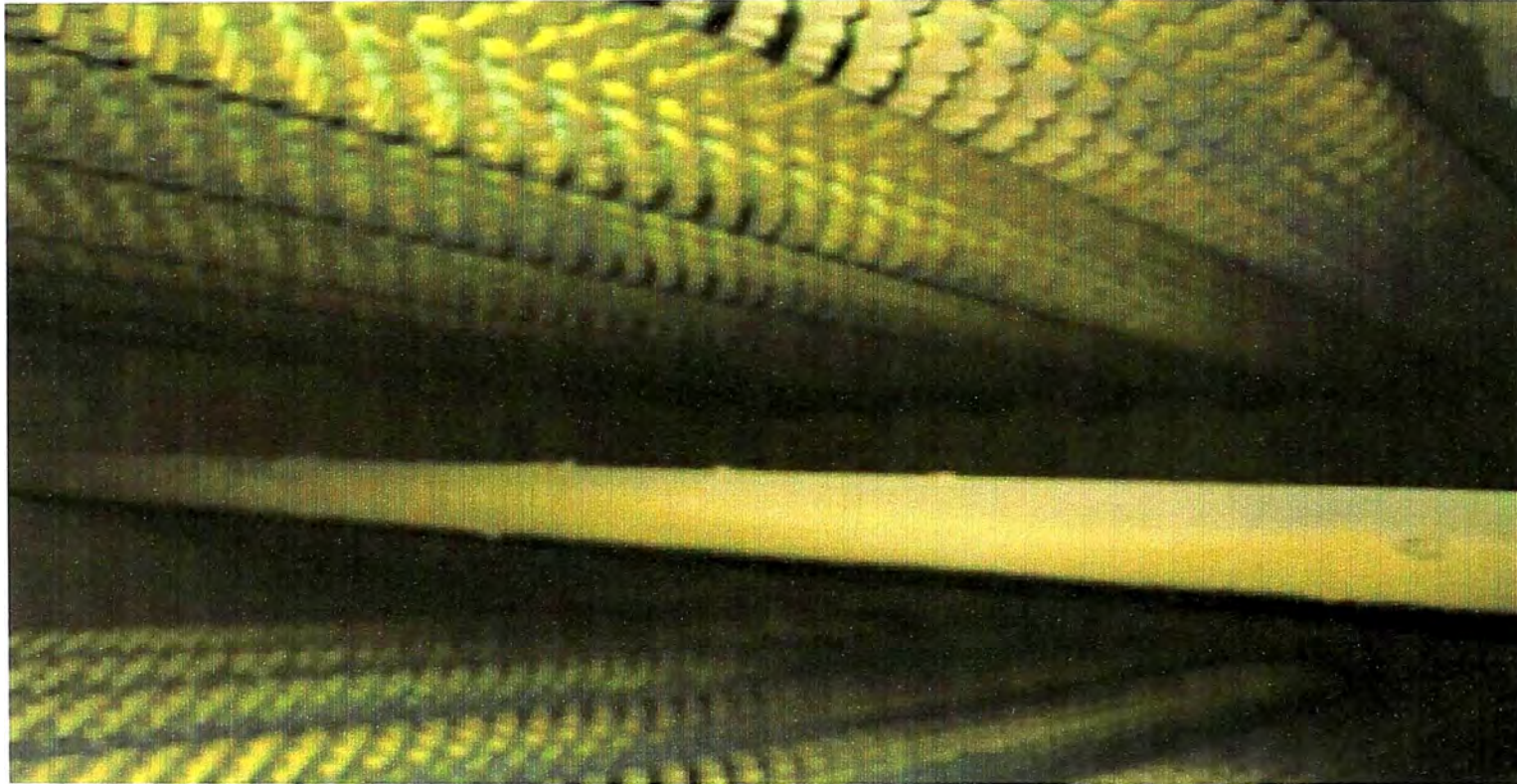
Fotografía N°8: SERPENTÍN DE TUBOS DE LA ZONA RADIANTE DEL HORNO F-1.



Fotografía N°9 : TUBOS DE LA ZONA RADIANTE DEL HORNO F-1.



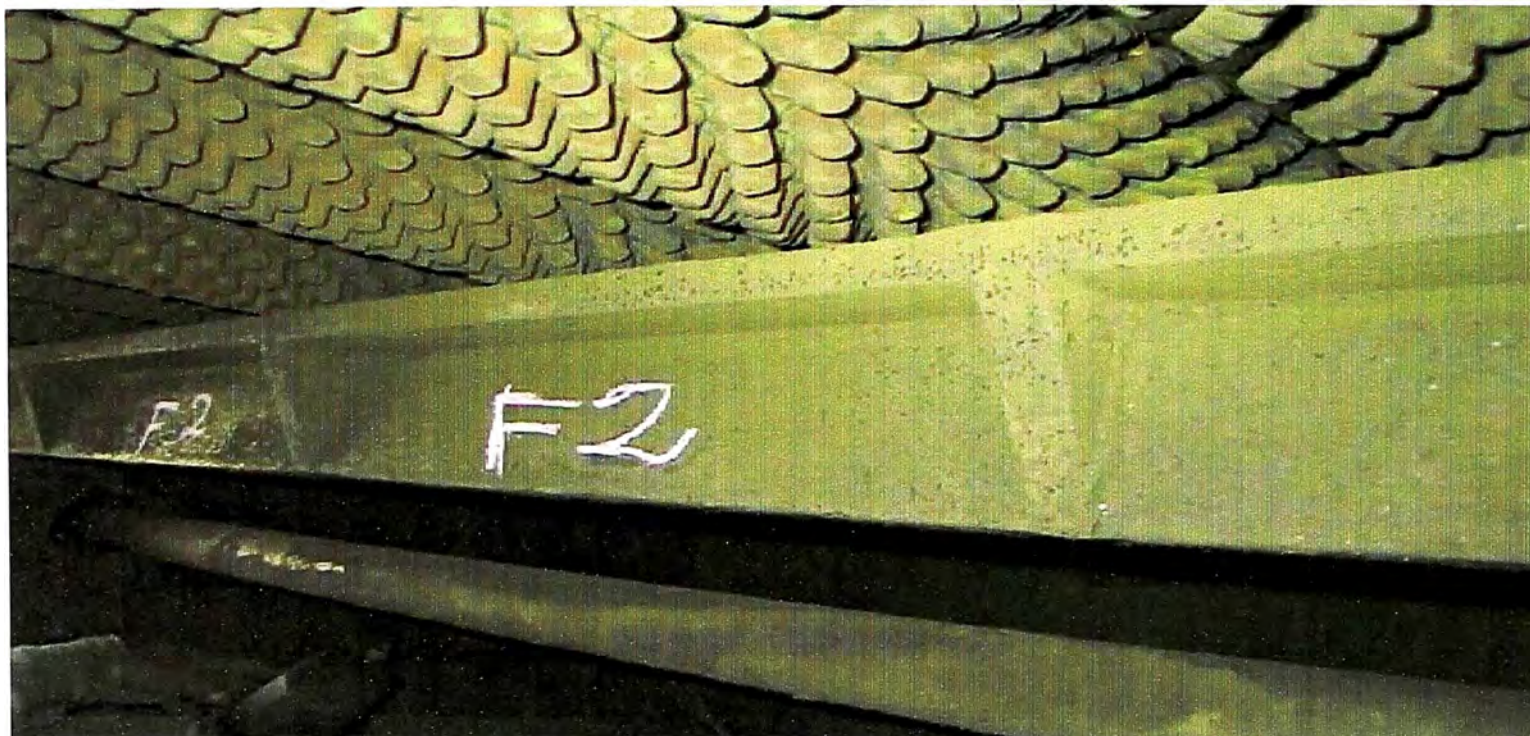
**Fotografía N°10 : TUBOS HORIZONTALES DE LA ZONA
CONVECTIVA DEL HORNO F-1.**



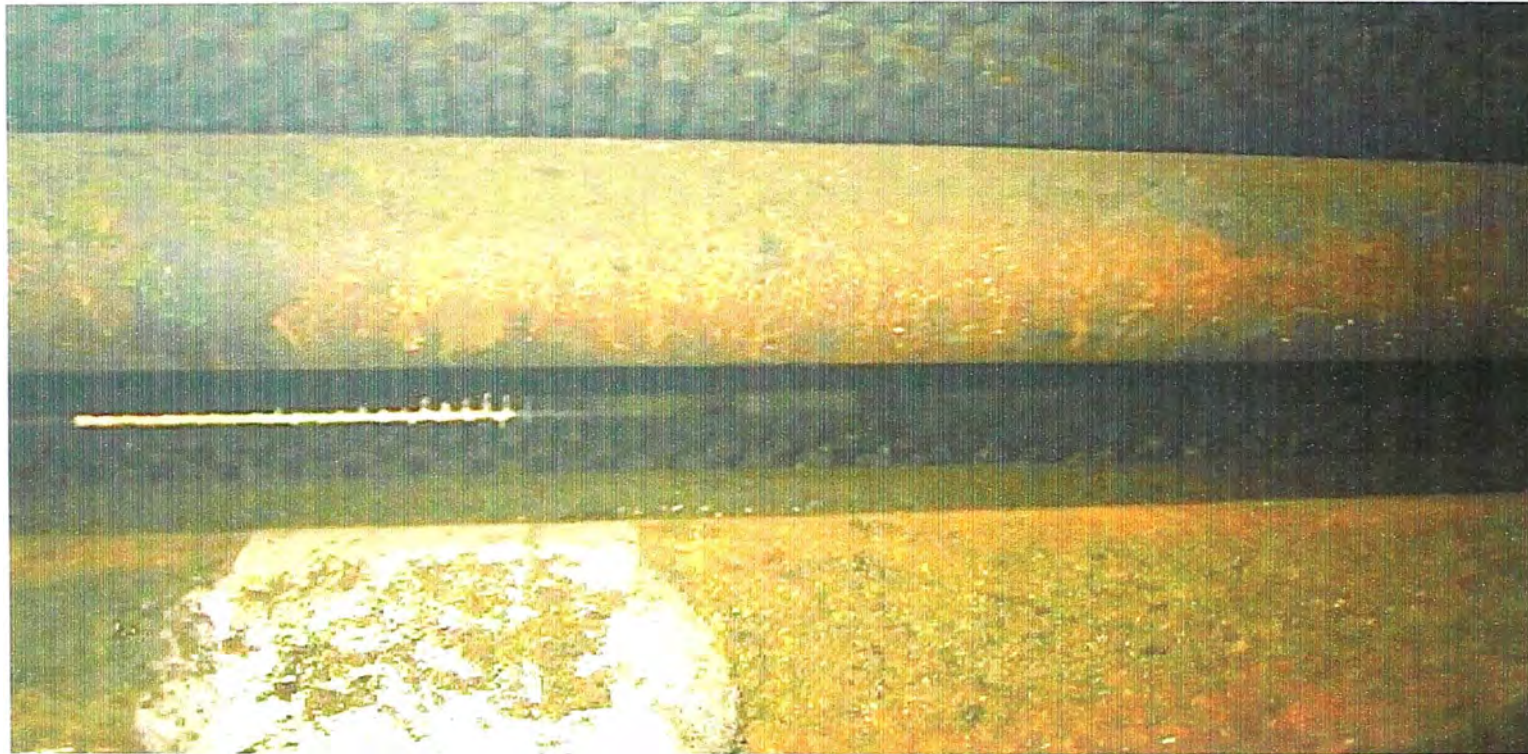
Fotografía N°11 : TUBOS DE ZONA CONVECTIVA DEL HORNO F-1 Y TUBO DESHOLLINADOR.



Fotografía N°12: DETERIORO DE TUBO DE LA ZONA RADIANTE HORNO F-2 POR ACCION DE LAS CENIZAS FUNDIDAS.



**Fotografía N°13 : TUBOS Y SOPORTE AFECTADOS POR CORROSION DE
LAS CENIZA FUNDIDAS.
ZONA CONVECTIVA HORNO F-2.**



Fotografía N°14: TUBOS DE LA ZONA ESCUDO AFECTADOS POR LA ACCION DE LAS CENIZAS FUNDIDAS. ZONA CONVECTIVA HORNO F-2.



Fotografía N°15 : CUPON DE A-335 P5 UBICADO EN LA ZONA CONVECTIVA DEL HORNO F-1 AFECTADO POR ACCION DE LA CORROSION DE CENIZAS FINIDAS.

2.2. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS FACTORES INCIDENTES EN LA CORROSIÓN DE LOS HORNOS F-1 Y F-2

2.2.1. COMBUSTIBLE

Primeramente se procedió a analizar la materia primas (petróleo) a fin determinar los productos contaminantes causantes de los diferentes tipos de corrosión y que por el proceso de destilación se concentran en los residuales que son los productos base para la formulación del combustible empleado en los hornos. Se verificó que la cantidad de azufre en el crudo se encontraba en un nivel entre 0.93%-1.36%, siendo estos niveles de azufre típicos. El **Anexo N°5** anota los resultados obtenidos.

Posteriormente se analizó en laboratorio muestras del Residual de Consumo Interno (RCI) utilizado en hornos con el fin de caracterizarlos, identificar y cuantificar los principales contaminantes. Los resultados del análisis del RCI se muestran en el **Anexo N°5**.

La caracterización del combustible utilizado registraron un alto contenido de metales contaminantes principalmente: Vanadio (155 - 293 ppm), Sodio (3 - 13.95 ppm), Níquel y Azufre, que son los causantes de la corrosión por el mecanismo de cenizas fundidas cómo se explicó en el punto **A.2.1.1.** que atacan principalmente la metalurgia de las partes expuestas directamente al fuego: como los tubos, soportes y refractario, en cuyas superficies e depositan los metales contaminantes.

2.2.2. PERFILES DE TEMPERATURAS DEL LADO DEL FUEGO Y VARIABLES OPERATIVAS EN LOS HORNOS

El análisis de las variables operativas y su incidencia en la temperatura de piel de tubos de los hornos, factor principal de la corrosión altas temperaturas en los tubos, se efectuó teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Las temperaturas de operación y de diseño de los hornos, tomadas de los data sheets de los equipos, nos permitirán comparar bajo que circunstancias fueron operados los equipos respecto a su condiciones nominales.
- La temperatura de coquificación, que es la correspondiente a la temperatura a la cual empieza la formación de coque en la superficie interior de los tubos por donde fluye el crudo (Horno F-1) o el Crudo Reducido (Horno F-2) y que genera puntos calientes debido a que aísla al fluido sobrecalentado la superficie externa del tubo.

En el **Cuadro N°9** se muestran las Condiciones de Operación de Diseño así como las condiciones para evitar la coquificación en los Hornos.

Los valores mostrados han sido tomados de estudios realizados para la determinación de las temperaturas límites de operación bajo las cuales se tiene una operación segura del horno sin el riesgo de propiciar la coquificación dentro de los tubos.

Cabe mencionar que por lo general la temperatura de coquificación es función directa de la temperatura de calentamiento del fluido que circula por el interior del tubo.

Cuadro N°9: Condiciones de Operación de Diseño y Coquificación en los Hornos.

	HORNO F1		HORNO F2	
	ZONA CONVECTIVA	ZONA RADIANTE	ZONA CONVECTIVA	ZONA RADIANTE
CONDICIONES DE OPERACIÓN DE DISEÑO				
Carga (BPD)	6700	6700	8000	8000
Temperatura Entrada CRUDO (°F)	463	530	538	620
Temperatura Salida CRUDO (°F)	530	635	620	
Presión Entrada CRUDO (psig)	175		233	
Presión Salida CRUDO (psig)		38	18.5	
Temperatura piel de tubos (°F)	684	737	<=752	737 (aprox.)
Temperatura Gases (°F)	1447	1447	>=1553	>=1553
Temperatura Gases Chimenea (°F)	<= 699		<=670	

CONDICIONES DE PARA OPERACIÓN SEGURA DEL HORNO SIN RIESGO COQUIFICACIÓN

Carga (BPD)	3800	8900	4100	4700
Máxima Temperatura Salida CRUDO (°F)	550	700	680	705
Temperatura Piel de tubo alcanzable (°F)	1040	937-994	1038	1110
Carga (BDP)	8000	15000	8000	7500
Máxima Temperatura Salida CRUDO (°F)	690	700	700	720
Temperatura Piel de tubo (°F)	1034	897-992	1038	1106

CONDICIONES DE OPERACIÓN TÍPICAS

Temperatura Entrada CRUDO (°F)	460-490		510-545	
Temperatura Salida CRUDO (°F)	525-550	610-650		690-720
Presión Entrada CRUDO (psig)	180		46	
Presión Salida CRUDO (psig)		70		16
Temperatura piel de tubos (°F)		1250		1250
Temperatura Gases Chimenea(°F)	650			

La elaboración de los perfiles de temperatura para los Hornos F-1 y F-2 se efectuó sobre la base de la información de los reportes de la Unidad de Operaciones comprendidos entre los **días 15 de Mayo y 15 de Junio del año 2002** periodo en el cual se procesó una **carga neta entre 6200 y 9700 BPD para el Horno F-1 y una carga entre 3000-5000 BDP para el Horno F-2.**

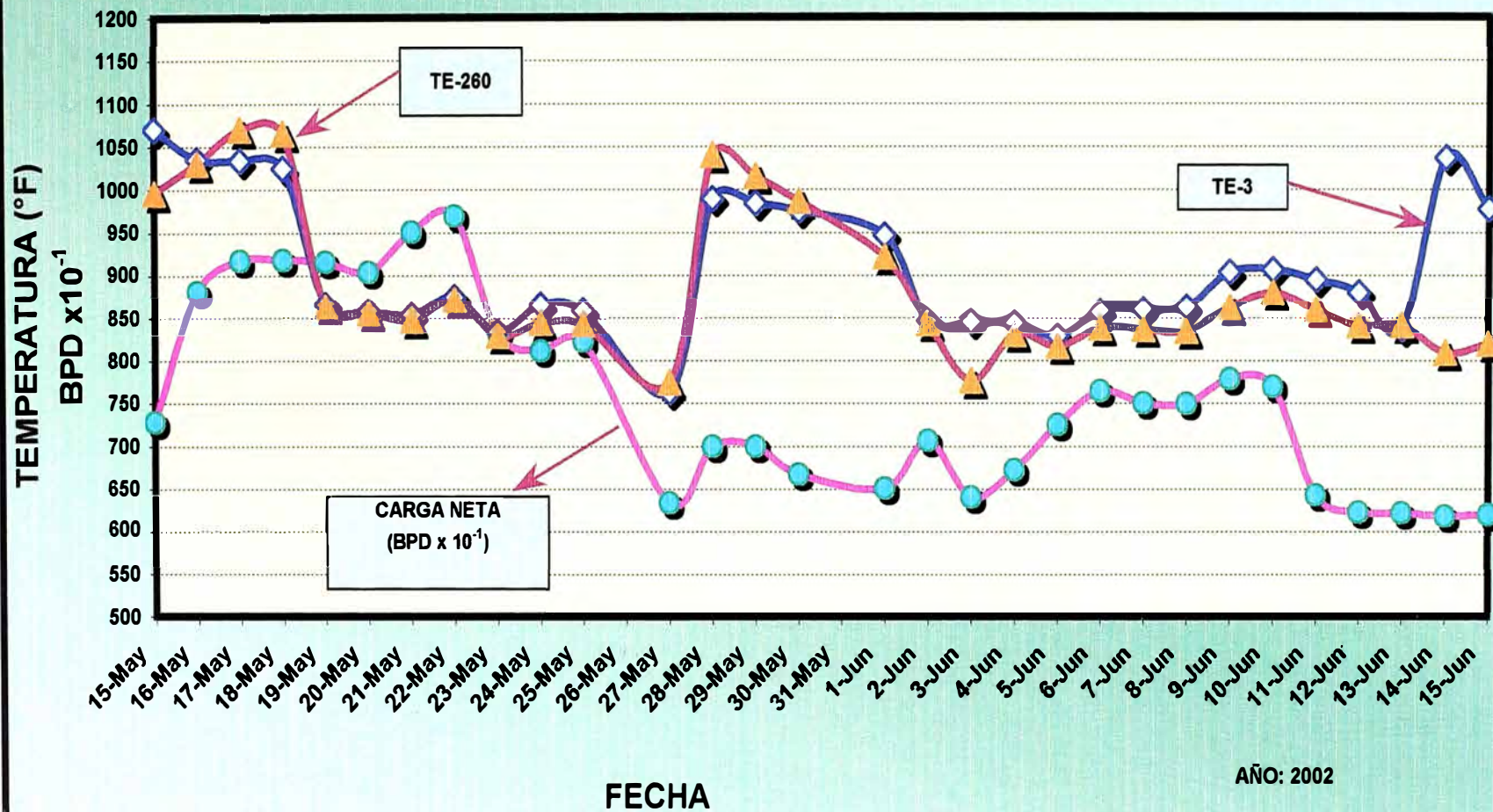
El levantamiento de información de las variables operativas fue continuo durante todo el periodo de estudio observándose que dichos valores se encontraban dentro de los rangos del periodo en mención.

El procesamiento de los datos levantados consistió en tomar los valores máximo y mínimo de las variables en cada turno, obteniéndose un promedio por cada turno y considerando los tres turnos diarios se obtuvo un promedio final para cada día.

Los resultados del procesamiento de los datos obtenidos para el periodo mencionado para los Hornos F-1 y F-2 se muestran en los **Anexos N°6a y N°6b** adjuntos, valores que han sido traducidos a curvas según las **Gráficas N°3 al 15.**

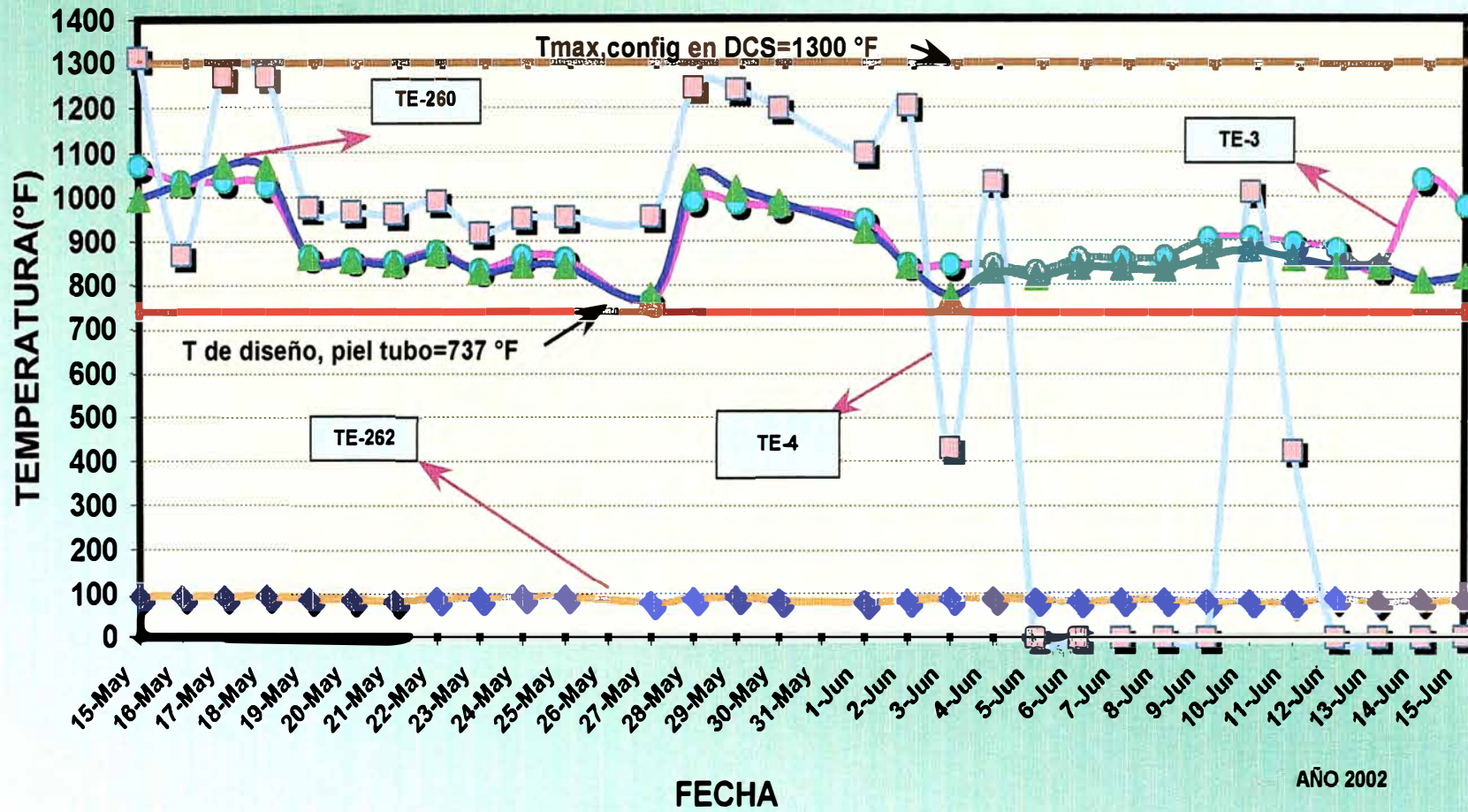
Los comentarios a los perfiles de temperatura en los Hornos se muestran en el **Cuadro N°10**, los cuales han sido realizados para determinar: tendencias de las curvas, datos incoherentes y e información relevante.

Gráfica N°3: HORNO F-1
 CURVAS CARGA NETA Y TEMP. PIEL DE TUBO ZONA RADIANTE

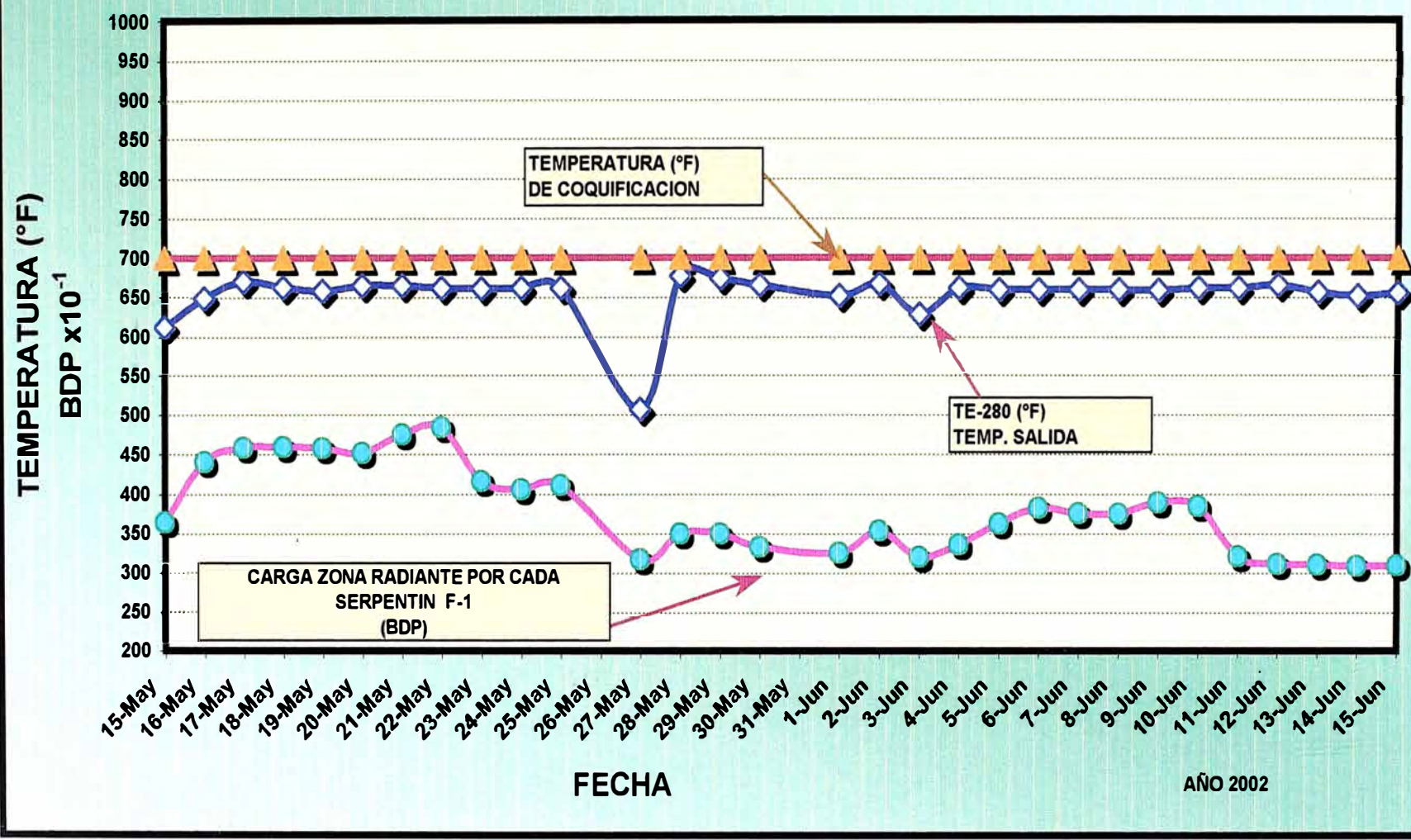


AÑO: 2002

Gráfica N°4: HORNO F-1 - ZONA RADIANTE
 CURVAS DEL TEMPERATURAS DE PIEL DE TUBOS

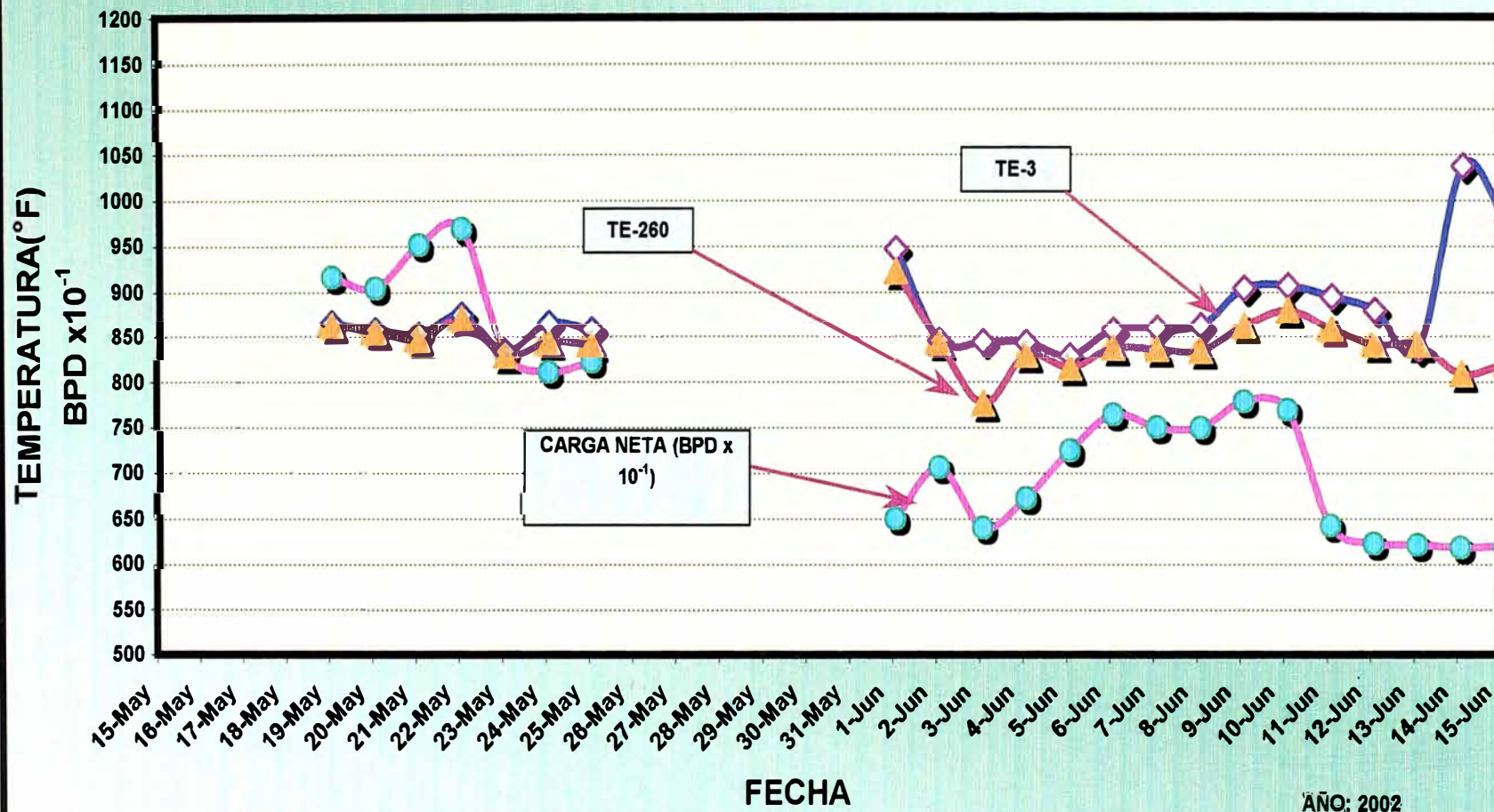


Gráfica N°5 : ZONA RADIANTE F-1
 CURVAS CARGA Y TEMPERATURAS DE SALIDA Y DE COQUIFICACION



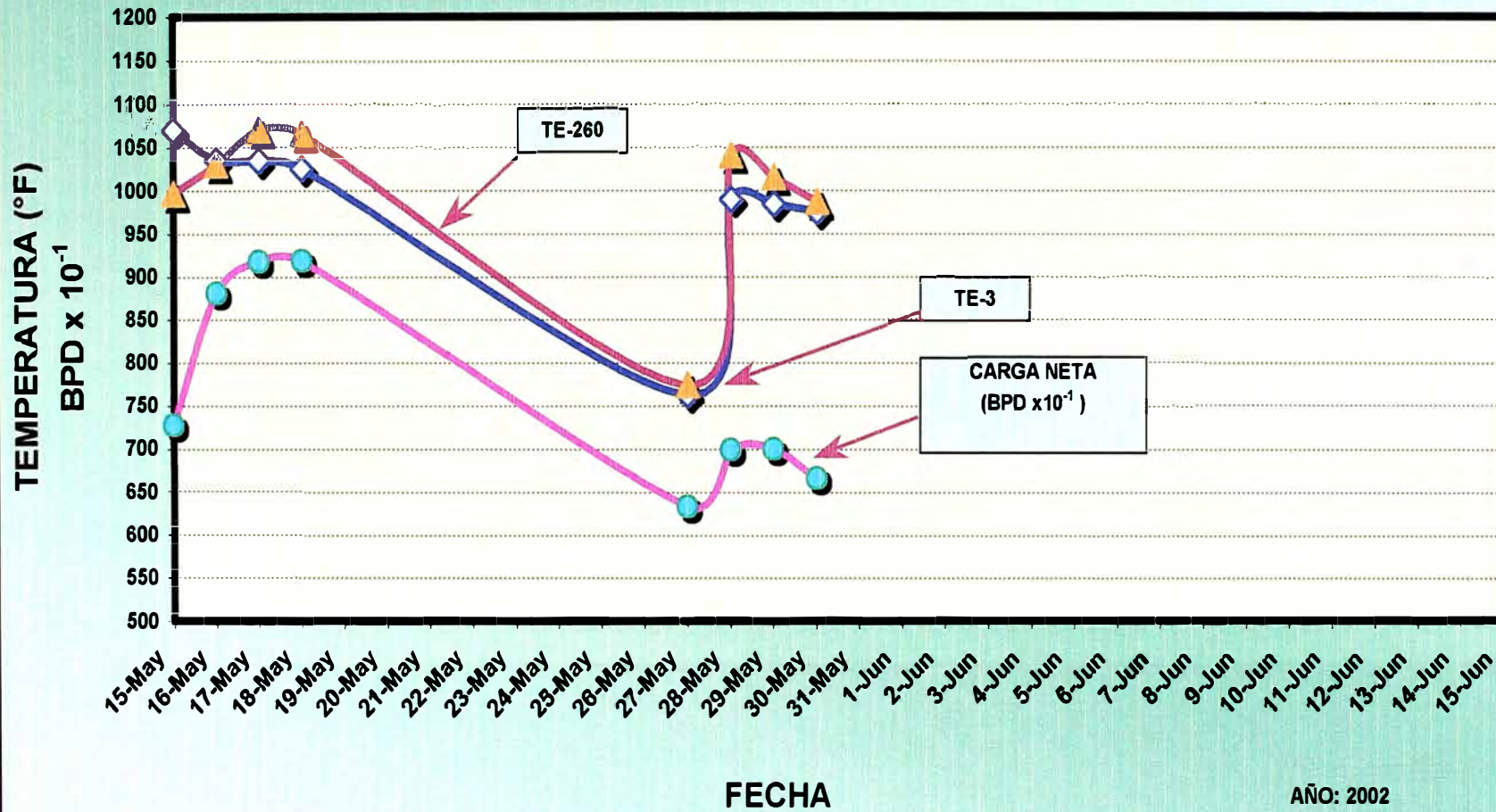
AÑO 2002

Gráfica N°6: HORNO F-1
 CURVAS TEMP. PIEL DE TUBO Y CARGA NETA CRUDO
 ZONAS CONVECTIVAS ALINEADAS



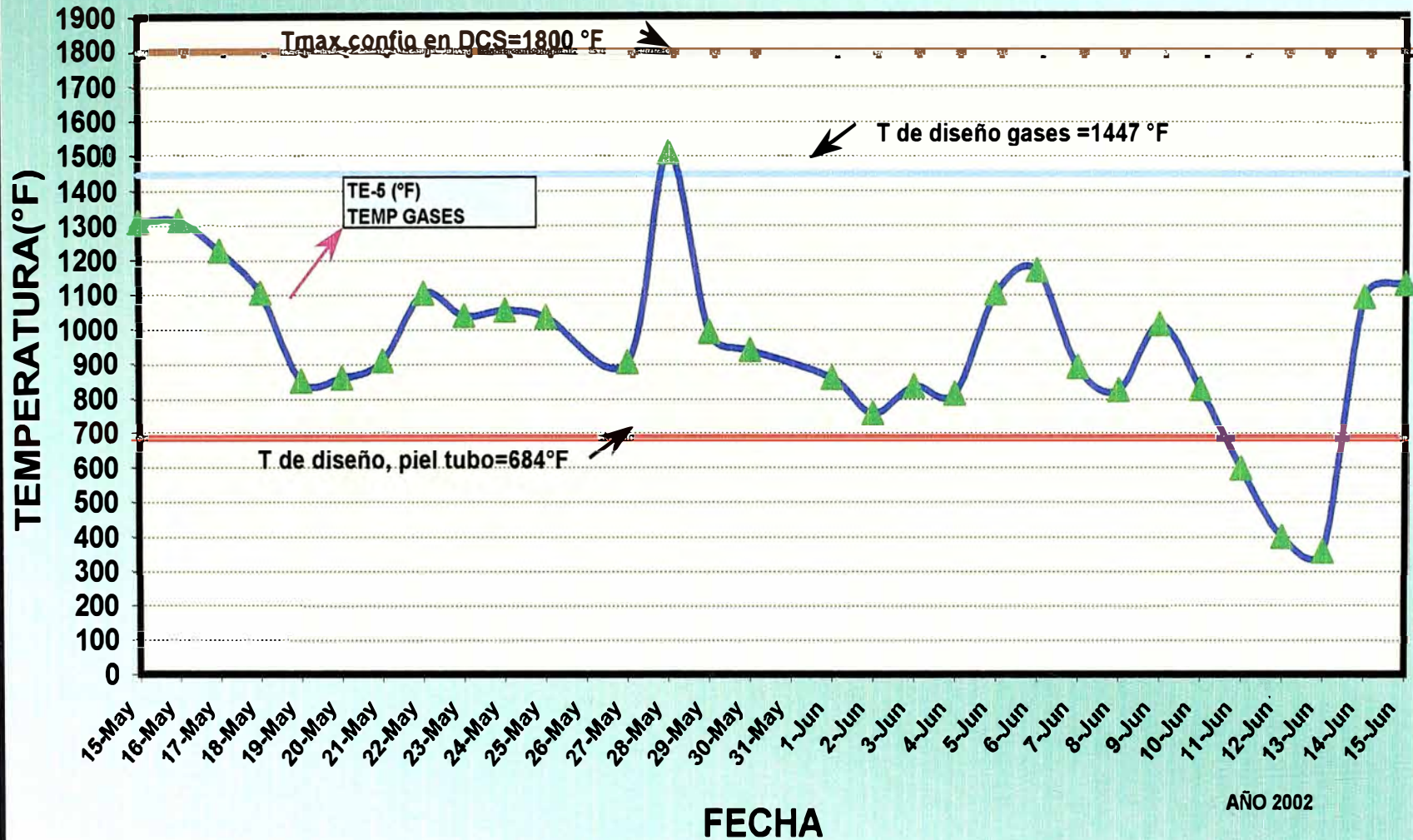
AÑO: 2002

Gráfica N°7: HORNO F-1
 CURVAS TEMP. DE PIEL DE TUBO Y CARGA NETA CRUDO
 ZONAS CONVECTIVAS INDEPENDIENTES

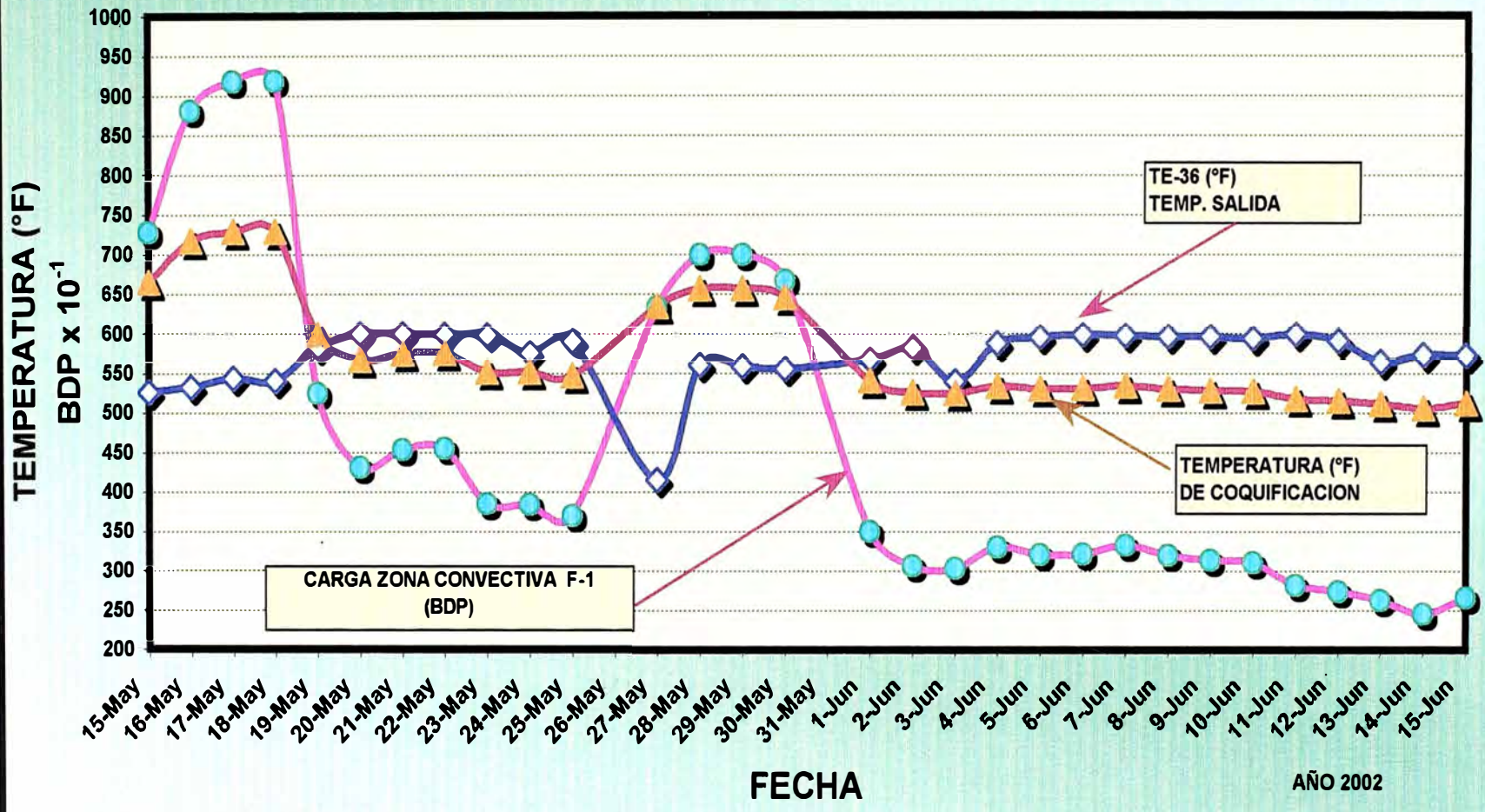


AÑO: 2002

Gráfica N°8: ZONA CONVECTIVA HORNO F-1
CURVA TEMPERATURA PROMEDIO DE GASES

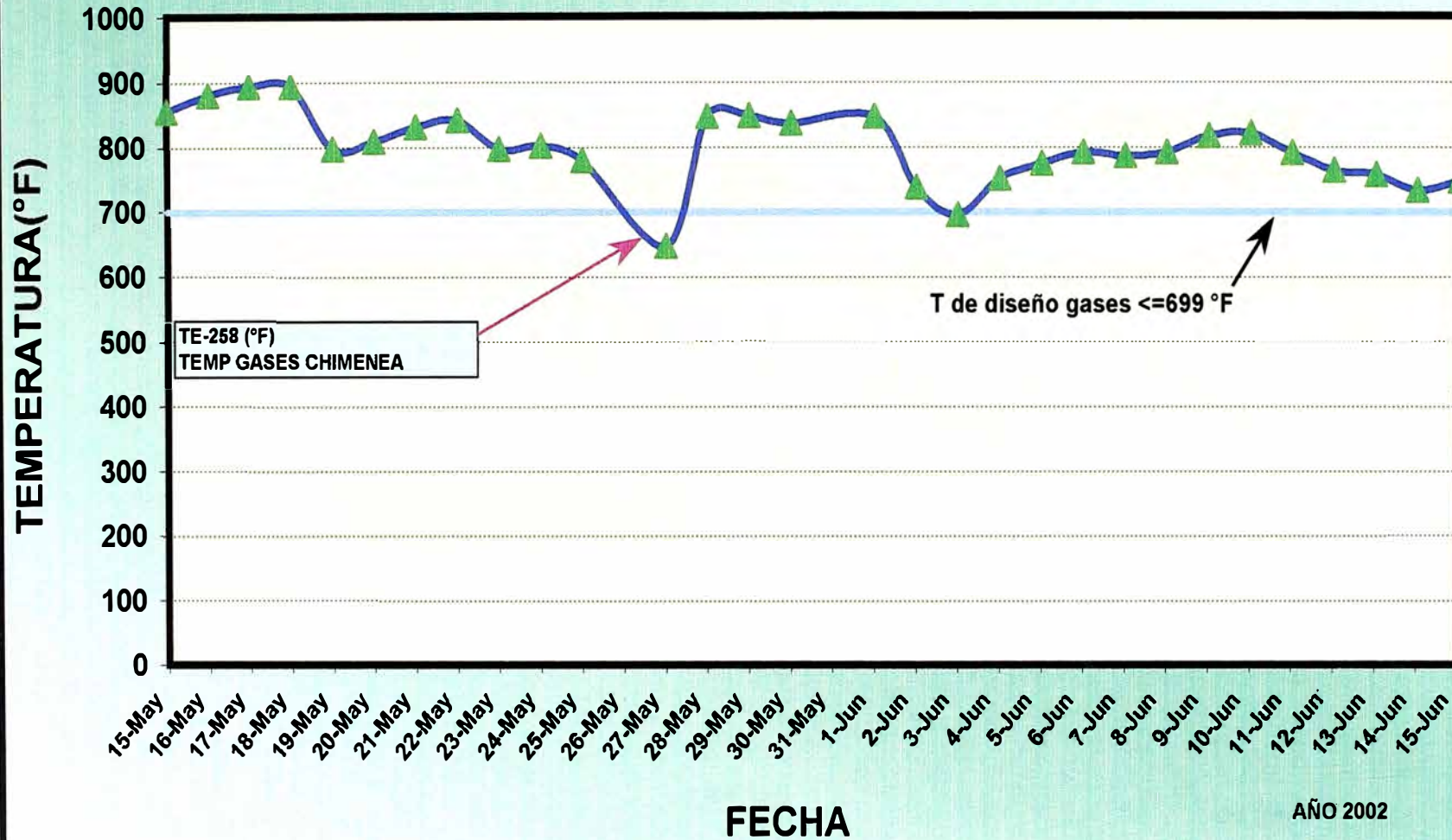


Gráfica N°9 : ZONA CONVECTIVA F-1
CURVAS DE CARGA Y TEMPERATURAS DE SALIDA Y DE COQUIFICACION

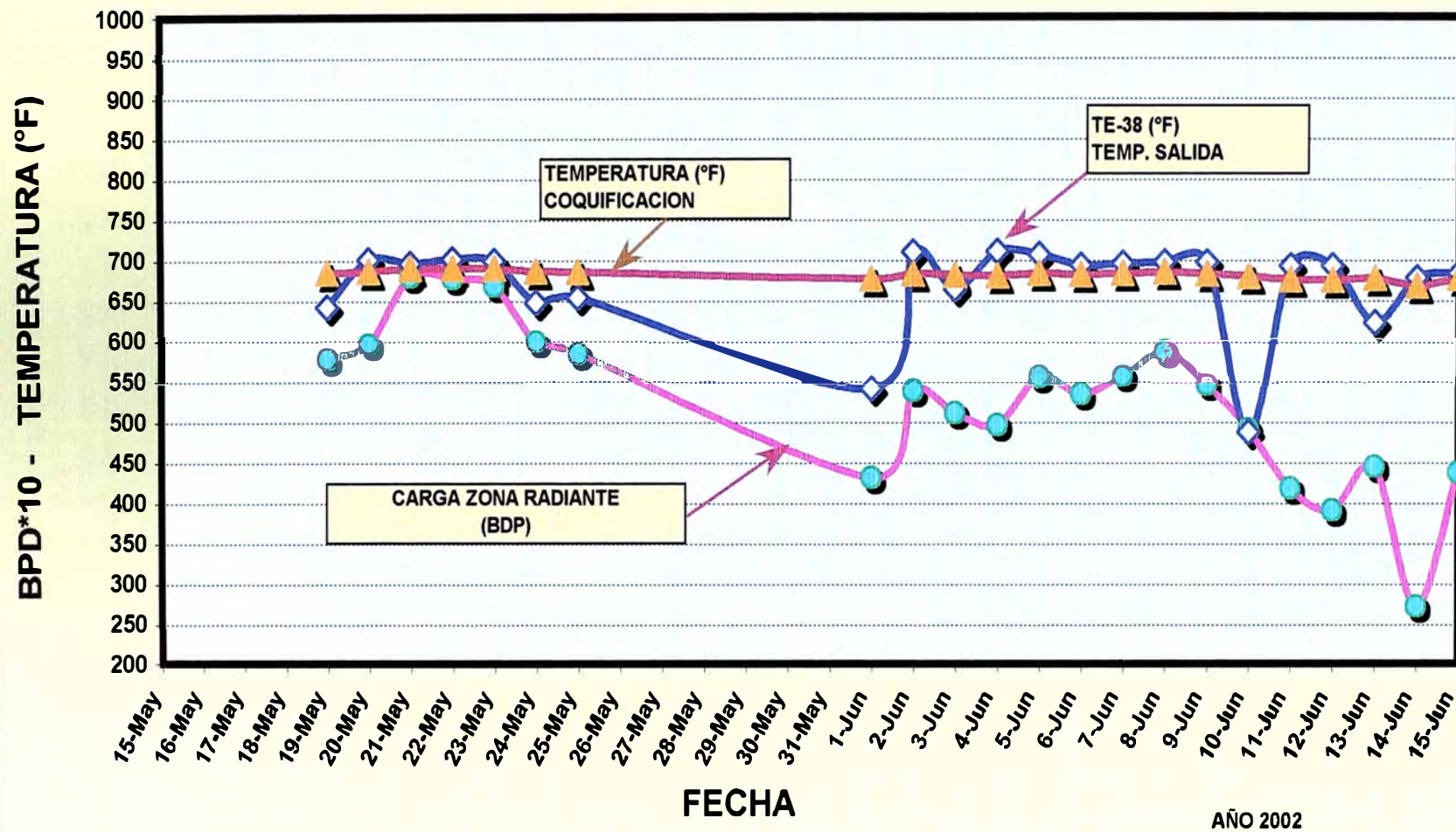


AÑO 2002

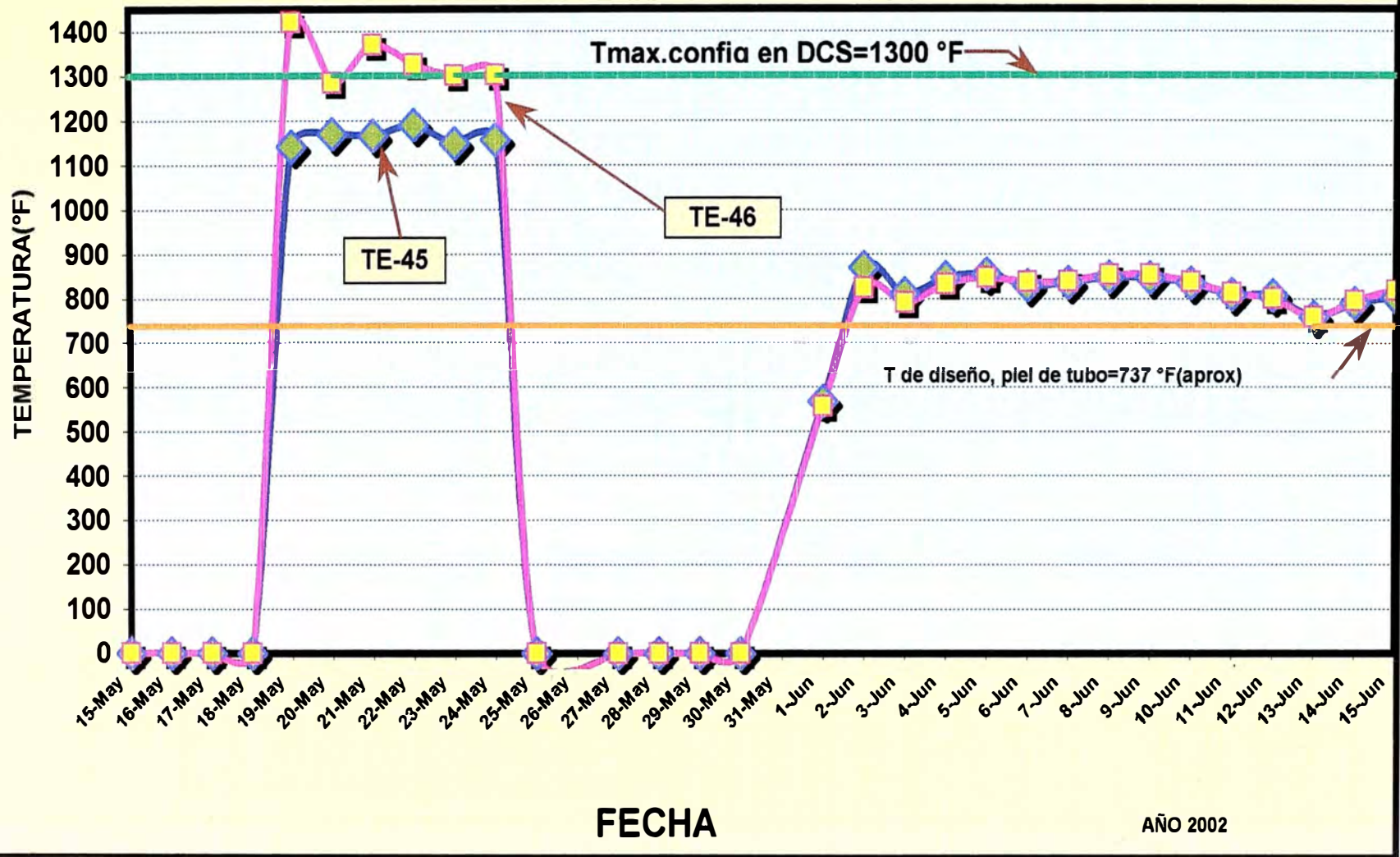
Gráfica N°10: TEMPERATURAS PROMEDIO DE GASES DE CHIMENEA
HORNO F-1



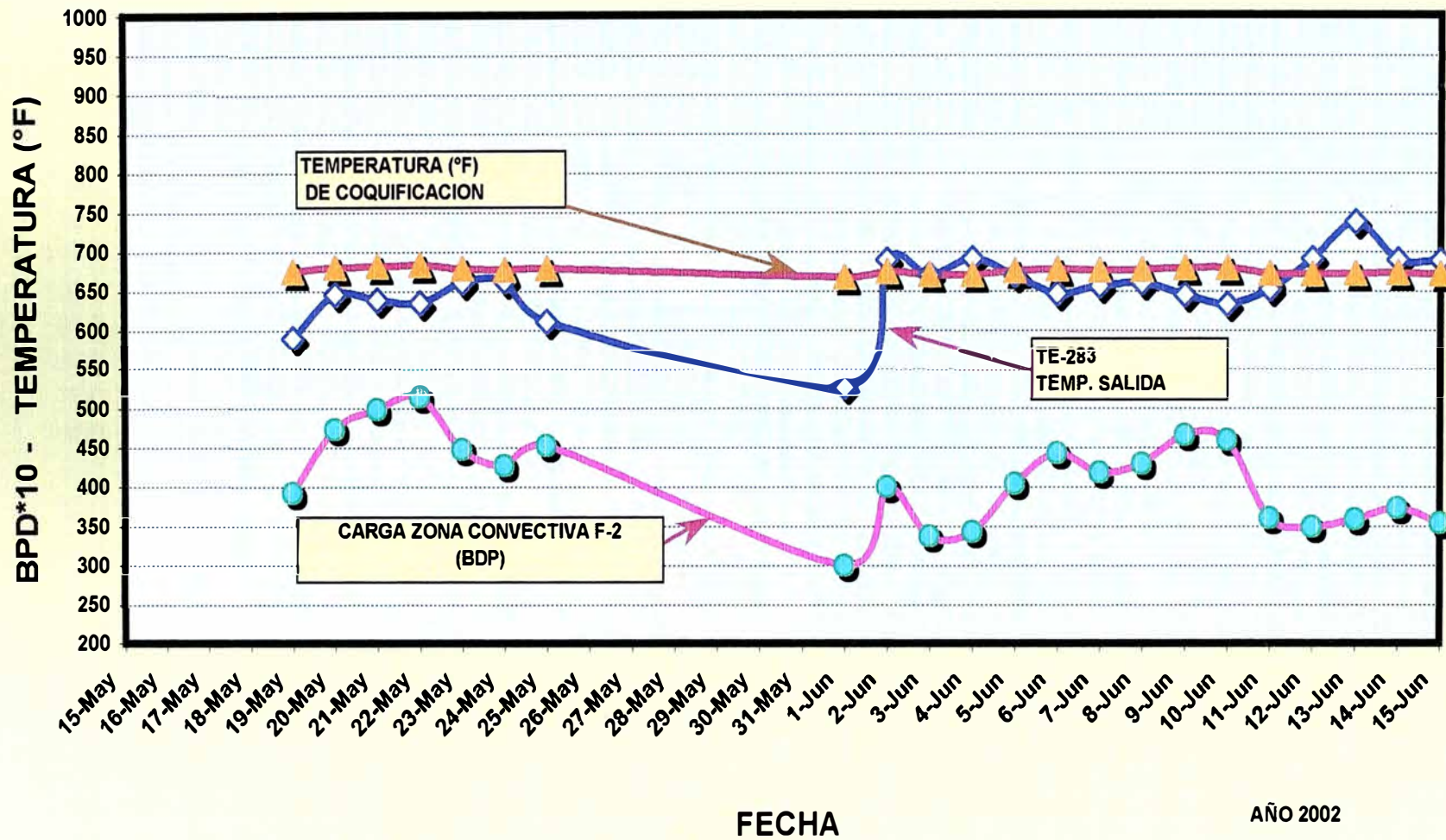
Gráfica N°11: ZONA RADIANTE F-2
 CURVAS DE CARGA Y DE TEMPERATURAS DE SALIDA Y COQUIFICACION



Gráfica N°12: HORNO F-2 ZONA RADIANTE
 CURVAS DE TEMPERATURAS DE PIEL DE TUBOS

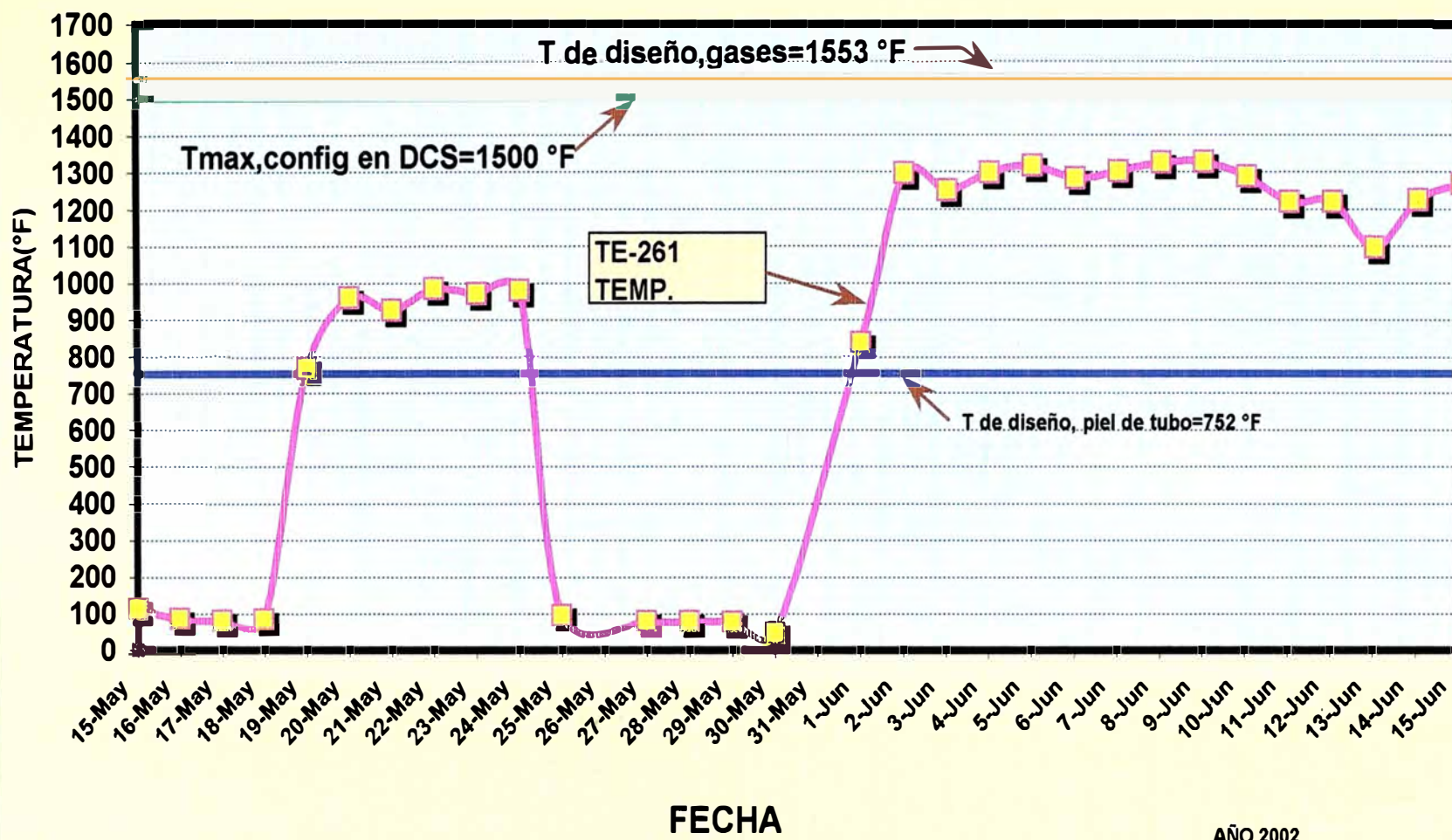


Gráfica N°13: ZONA CONVECTIVA HORNO F-2
 CURVAS DE CARGA Y DE TEMPERATURAS DE SALIDA Y DE COQUIFICACIÓN

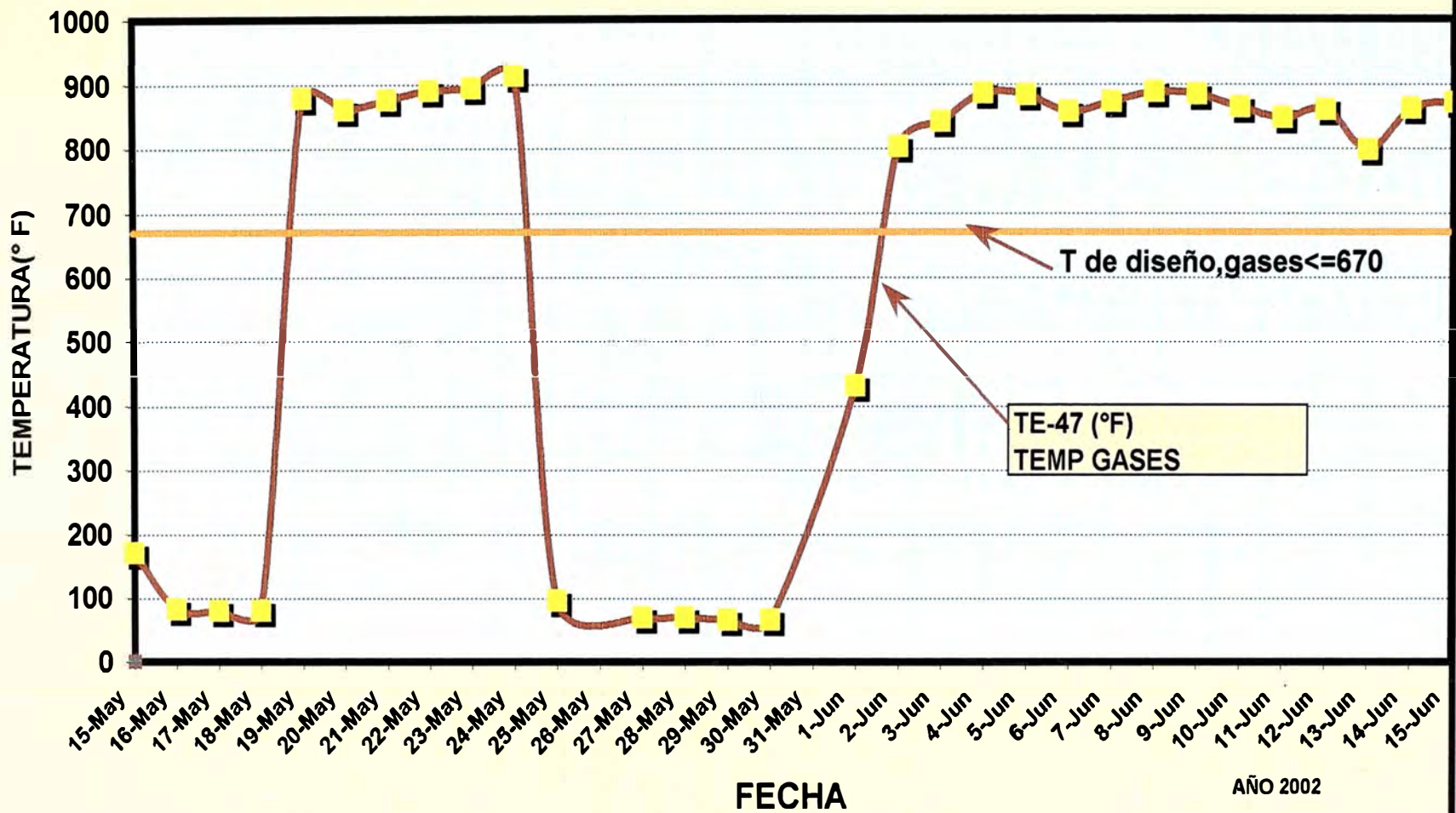


AÑO 2002

Gráfica N°14: ZONA CONVECTIVA HORNO F-2
CURVAS TEMPERATURA PROMEDIO DE GASES



**Gráfica N°15: TEMPERATURAS PROMEDIO DE GASES DE CHIMENEA
HORNO F2**



Cuadro N°10: Comentarios de los Perfiles de Temperatura de los Hornos

ZONA	HORNO F1	HORNO F-2
	15 de Mayo - 15 de Junio 2002	15 de Mayo - 15 de Junio 2002
RADIANTE	<p>1. Durante este periodo se procesó una carga entre 6340 y 9680 BDP de crudo como carga neta (carga de la Zona Radiante del Horno F-1), tal como se observa en la Gráfica N°3.</p> <p>2. La Gráfica N° 4 muestra que en el periodo entre el 15 al 30 de Mayo se han alcanzado temperaturas superiores a los 1000 °F durante un promedio de 72 horas, presentándose por tal motivo una considerable exposición de los tubos a la corrosión por elevadas temperaturas.</p> <p>3. Para todo el periodo la termocupla TE-4 de piel de tubos de la Zona Radiante del horno indicó valores muy variables desde 400 °F hasta 1200 °F y valores de 0°F lo cual lleva a concluir que por su deficiente servicio, tales valores no deben ser considerados en el análisis de la temperatura de piel de tubos. (Ver Gráfica N°4).</p> <p>4. Del mismo modo se deduce que la termocupla TE-262 de piel de tubos de la Zona Radiante no entró en servicio durante todo el periodo. (Ver Gráfica N°4).</p> <p>5. Como resultado de los items anteriores solo se considera para el análisis los valores registrados por las termocuplas TE-260 y TE-3. Para todo el periodo la temperatura de piel de tubos excedió a la temperatura de diseño (737°F), siendo la T min=770°F y Tmax=1070°F. (Ver Gráfica N°4).</p> <p>6. En la Gráfica N°5, la temperatura de salida de crudo registrada por la TE-280 indicó valores inferiores a la temperatura para que se produzca coquificación (700 °F) en el interior de los tubos de esta zona.</p> <p>7. De la Gráfica N°5 se observa que la temperatura de coquificación (700°F) es un valor independiente de la carga que se procesó por cada serpentín de la Zona Radiante.</p>	<p>1. Durante este periodo se procesó una carga entre 2730 y 6810 BDP. (Ver Gráfica N°11).</p> <p>2. En la Gráfica N°12 se observa que entre los días 15 y 18 de Mayo así como para los días 25 al 30 de Mayo se registraron valores de 0°F en la termocuplas TE-45 y TE-46 debido a que la unidad estuvo fuera de servicio.</p> <p>3. Durante los días 19 al 25 de Mayo las termocuplas TE-45 y TE-46 de piel de tubos registraron valores por encima de los 1000 °F, (entre 1140 y 1190 °F) representando esto una exposición de los tubos a la corrosión por cenizas fundidas. (Ver Gráfica N°12).</p> <p>4. Durante el periodo del 1° al 15 de Junio, la temperatura promedio de piel de tubos dada por las termocuplas TE-45 y TE-46 alcanzó valores entre 640 °F y 869 °F, por lo tanto la superficie exterior de los tubos no estuvo expuesta al efecto de la corrosión por cenizas fundidas al no superarse la temperatura mínima para la fusión de las cenizas de vanadio y sodio de 995 °F. (Ver Gráfica N°12).</p> <p>5. En la Gráfica N° 11 la temperatura de salida de crudo registrada por la termocupla TE-38 indicó valores superiores a las temperaturas para que se produzca la coquificación (669 - 691 °F) en el interior de los tubos, en la mayor parte del periodo.</p> <p>6. En la Gráfica N°11 se observa que la temperatura de coquificación en esta zona depende de la carga (BDP) que se procesó y varía entre 669-691 °F.</p>

Cuadro N°10: Comentarios de los Perfiles de Temperatura de los Hornos (Continuación)

<p style="text-align: center;">CONVECTIVA</p>	<p>1. La carga procesada en la Zona Convectiva durante este periodo fué: *Operación de Zonas Convectivas Alineadas: 2450 - 5250 BDP (Ver Gráfica N°6) *Operación de Zonas Convectivas Independientes: 6350 - 9200 BDP (Ver Gráfica N°7).</p> <p>2. En la Gráfica N°8, se muestra que la termocupla TE-5 de gases registra valores inferiores a la temperatura de piel de tubos TE-3 y TE-260 (Ver Gráfica N°4) lo cual es incorrecto debido a que gases de combustión en esta zona deben ser de un valor superior a la de piel de tubos para que se produzca una transferencia de calor entre los gases y la carga que circula por los tubos.</p> <p>3. Teniendo en cuenta que la temperatura de piel de tubos excedió la temperatura de diseño (Ver Gráfica N°4 de la Zona Radiante) puede deducirse que la termocupla TE-5 alcanzó valores superiores a la temperatura de diseño (1447 °F) . Ver Gráfica N°8.</p> <p>4. La inexistencia de una termocupla de piel de tubos en esta zona, hace que no se pueda verificar con exactitud, si ocurre el proceso de corrosión por cenizas fundidas sobre la superficie exterior de los tubos.</p> <p>5. En la Gráfica N° 9 se observan que durante la mayor parte del periodo, la temperatura de salida de crudo registrada por la termocupla TE-36 superó a la temperatura para que se produzca la coquificación (505 - 729 °F) en el interior de los tubos de esta zona, lo cual constituye un factor de elevación de temperatura de piel de tubo .</p> <p>6. En la Gráfica N°9 se observa que la Temperatura de coquificación en esta zona del Horno F-1 depende de la Carga (BDP) que se procesó.</p>	<p>1. Durante este periodo se procesó una carga entre 3000 y 5140 BPD, en operación de Zonas Convectiva Alineadas. (Ver Gráfica N°13).</p> <p>2. En la Gráfica N°14 se observa que la temperatura de gases registrada por la termocupla TE-261 indicó valores entre 750-980°F para el periodo comprendido entre el 19 y 25 de Mayo. Se deduce que estos valores son incorrectos debido a que la temperatura de los gases de combustión en esta zona deben tener un valor superior a la de piel de tubos (termocupla TE-45) para que se produzca la transferencia de calor de los gases de combustión a la carga que circula por los tubos.</p> <p>3. Para el periodo comprendido entre el 2 Junio y 15 de Junio, la termocupla TE-261 registró valores fiables pero todo ellos menores a la temperatura de diseño de gases de entrada a la zona convectiva(1553 °F), siendo la T_{máx} de 1366 °F.</p> <p>4. La inexistencia de una termocupla de piel de tubos en esta zona, hace que no se pueda verificar con exactitud, si ocurre el proceso de corrosión por cenizas fundidas sobre la superficie exterior de los tubos.</p> <p>5. En la Gráfica N° 13 Se observa que para la mayor parte del periodo la temperatura de salida de crudo registrada por la termocupla TE-283 indicó valores inferiores a las temperaturas para que se produzca la coquificación (668 - 683 °F) en el interior de los tubos de esta zona.</p> <p>6. Se observa de la Gráfica N°13 que las temperatura de coquificación están en función de la carga que se procesó en esta zona.</p>
<p style="text-align: center;">CHIMENEA</p>	<p>1. Las relativas altas temperaturas (todas por encima de 300°F) registradas en la sección inferior de la chimenea y mostradas en la Gráfica N°10 nos permite deducir que el fenómeno de corrosión a bajas temperaturas no se producirá en esta zona.</p> <p>2. En los días 15,16,17 ,18 de Mayo y los días 28,29 y 30 de Junio en los cuales el Horno F-1 trabajó independientemente y procesó aproximadamente 6700 BPD, la temperatura de los gases según diseño para esta carga debe ser <=699°F, sin embargo los valores registrados por la termocupla TE-258 indicó valores superiores a este (entre 836-893 °F). Ver Gráfica N°10.</p>	<p>1. Los valores registrados por la termocupla TE-47 excedieron a los de diseño (670 °F), esto ocurre debido a que no hubo una buena transferencia de calor, posiblemente por efecto del ensuciamiento externo de los tubos. Ver Gráfica N°15.</p> <p>2. Los valores registrados por la termocupla TE-47 estuvieron por encima de 300 °F los que permite deducir que el fenómeno de corrosión por bajas temperaturas no se producirá en esta zona.</p>

2.2.3. ANÁLISIS DE LA ACCIÓN CORROSIVA -CONCEPTOS BASES

El análisis de los perfiles de temperatura en los hornos se ha realizado sobre la base de los siguientes conceptos:

1. En todo proceso de combustión confinada en donde el combustible es un hidrocarburo líquido existen muchas posibilidades de deposición de cuerpos sobre la superficie expuestas a la combustión.
2. La coquificación del producto por calentar (en nuestro caso petróleo o residuo atmosférico), favorece la creación de puntos calientes y por lo tanto constituye un factor propiciador en la elevación de la temperatura de la superficie externa del tubo aumentando el riesgo al ataque corrosivo.
3. Las altas temperaturas presentes en una cámara de combustión son el factor predominante para corrosión conocida como oxidación a alta temperatura la cual procede hasta que el metal forma una capa de óxido protectora.
4. Todo metal expuesto a gases de combustión a altas temperaturas tiende a seguir oxidándose una vez que la capa de óxido protectora ha sido destruida.
5. Es necesario alcanzarse una temperatura de metal de 995 °F en las paredes de los tubos para que se produzca el fenómeno de corrosión por Cenizas Fundidas en virtud a que la menor temperatura de fusión de las cenizas de vanadio es de 995°F la cual corresponde al eutéctico formado por los tipos gamma vanadil vanadato de sodio ($5\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_4 \cdot 11\text{V}_2\text{O}_5$) y el meta vanadato de sodio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_5$) el cual se forma durante la combustión bajo las siguientes reacciones.



Este vanadato constituye la ceniza de acción corrosiva más agresiva entre las que pueden formarse producto de la reacción de óxido de vanadio y el sulfato de sodio.

6. La formación de coque producto de un sobrecalentamiento de la carga que circula a través de las zonas convectiva y radiante de los hornos constituyen un factor importante para la existencia de puntos calientes los cuales podrían constituir centros de ataque de corrosión por Cenizas Fundidas.

El **Cuadro N° 11** muestra la síntesis del análisis efectuados sobre los perfiles de temperatura de los Hornos F-1 y F-2 y las variables operativas comprometidas con los factores causantes de la corrosión en los Hornos.

Cuadro N°11: Análisis de los Factores de corrosión y las Variables Operativas involucradas en los Hornos F-1 y F-2

ZONA	HORNO F-1	HORNO F-2
<p>RADIANTE</p>	<p>1. La temperatura de piel de tubo registrada por las termocuplas operativas indican valores variables y muestran la tendencia al incremento en la temperatura de piel de tubo cuando se producen incrementos en la carga procesada. Esto significa que cuando se registren valores cercanos a los 995 °F para una determinada carga, existirá el riesgo de una mayor exposición a la corrosión por cenizas de vanadio si se incrementase la carga de operación.</p> <p>2. La temperatura de piel de tubos supera los 995 °F debido a otros factores como la existencia de puntos calientes por efecto de la presencia de coque en el interior de los tubos o por el impacto de la flama con la superficie expuesta de los tubos (cuando la llama "lame" los tubos).</p> <p>3. Sin embargo durante el periodo de análisis no se superó la temperatura de coquificación de la carga. Esto solo nos indica que durante este periodo fue poco probable la formación de coque al interior de los tubos.</p>	<p>1. La temperatura de piel de tubo registrada muestran la tendencia a aumentar cuando se producen incrementos en la carga procesada. Esto significa que cuando se registren valores cercanos a los 995 °F para una determinada carga, existirá el riesgo de una mayor exposición a la corrosión por cenizas de vanadio si se incrementase la carga debido al incremento de la temperatura por encima de los 995°F.</p> <p>2. La temperatura de piel de tubos puede superar los 995°F debido a otros motivos como la existencia de puntos calientes por efecto de la presencia de coque en el interior de los tubos o por el impacto de la flama con la superficie expuesta de los tubos (cuando la llama "lame" los tubos) y también cuando se realiza una operación orientada a un craking térmico incipiente a la salida del Horno F-2.</p> <p>3. Durante el periodo de análisis se superó la temperatura de crudo a la cual se produce la coquificación de la carga en la superficie interior de los tubos. Esto nos indica que durante este periodo se produjo la formación de coque al interior de los tubos, lo cual constituye un factor de elevación de la temperatura de piel de tubo.</p> <p>4. Sin embargo cuando se realicen operaciones de craking térmico incipiente se obtiene temperaturas de salida de la carga del orden de los 720-750 °F temperatura a las cuales se empieza a producir el fenómeno de coquificación en el interior de los tubos.</p>

Cuadro N°11: (Continuación)

<p>CONVECTIVA</p>	<p>1. Aún sin referencia de una termocupla de piel de tubos para los tubos de niveles superiores de la zona convectiva (de la primera a la séptima fila), puede deducirse que la temperatura de piel de tubos es menor que la registrada en los tubos de la Zona Radiante , debido a que la carga entra a menor temperatura produciendo un mayor efecto de refrigeración sobre la superficie del tubo.</p> <p>2. La temperatura de gases registrada por la temocupla TE-258 no indicó valores fiables para todo el periodo, pues en relación con la temperatura de diseño (1447 °F) fue casi siempre muy inferior, llegando a ser incluso menor a los valores registrados para la piel de tubos.</p> <p>3. Una temperatura de gases de 1447°F advierte que de encontrarse elementos estructurales no refrigerados, tales como soportes; estos estarían expuestos a un ambiente fuertemente oxidante. Así mismo a esta temperatura se produce una ataque corrosivo muy agresivo por la presencia de cenizas de vanadio.</p>	<p>1. Aún sin referencia de una termocupla de piel de tubos para los tubos de niveles superiores de la zona convectiva (de la primera a la novena fila), puede deducirse que la temperatura de piel de tubos es menor que la registrada en los tubos de la Zona Radiante , debido a que la carga entra a menor temperatura produciendo un mayor efecto de refrigeración sobre la superficie del tubo.</p> <p>2. La temperatura de gases de registrada por la TE-261 (entre 1200-1300°F) advierte que los elementos estructurales no refrigerados, soportes de 25Cr-20Ni; estarán expuestos a un ambiente fuertemente oxidante así mismo al ataque corrosivo por la presencia de cenizas de vanadio.</p>
--------------------------	---	--

Cuadro N°11: (Continuación)

<p>CHIMENEA</p>	<p>1. Para el periodo en el que se trabajó con las zonas convectivas independientes se superó la temperatura de diseño de gases ($\leq 670^{\circ}\text{F}$) para la carga de diseño de alrededor de 6700 BDP, esto indica que no hubo una buena transferencia de calor.</p> <p>2. El periodo en que se trabajó con las zonas convectivas alineadas se procesó una carga mayor a la carga de diseño, y en este caso se puede deducir que la temperatura de diseño de gases será $> 670^{\circ}\text{F}$. Considerando este periodo fue intermedio entre los periodos en que se trabajó con las zonas convectivas independientes puede deducirse de que para todo el periodo de análisis no hubo una buena transferencia de calor. (Ver Gráfica N°15).</p> <p>3. Para este periodo, las altas temperaturas nos indican que la corrosión por bajas temperaturas no tiene lugar en esta zona y que los elementos estructurales, tales como el Damper, solo estarán expuestos a la corrosión por oxidación la cual dependerá de la temperatura en esta Zona y del tipo de material que los conforme; así las estructuras metálicas en esta Zona estarán expuestas al ensuciamiento provocado por los contaminantes en el se realizan las operaciones del deshollinado de la Zona Convectiva.</p>	<p>1. La termocupla de los gases de chimenea registró valores mayores a los esperados durante el periodo, esto indica la posibilidad de una deficiente transferencia de calor en la Zona Convectiva. Una causa de esto es el ensuciamiento producido por los depósitos de cenizas y hollín que se forman con la combustión y que interfieren en la transferencia de calor en los tubos de la Zona Convectiva los cuales no son removidos completamente por el deshollinado.</p> <p>2. Las altas temperaturas nos indican además que la corrosión por bajas temperaturas no tiene lugar en esta zona y que los elementos estructurales no refrigerados, solo estarían expuestos a la corrosión por oxidación de los gases de combustión y al ensuciamiento provocado por los contaminantes en el combustible, los cuales son removidos en parte cuando se realizan las operaciones del deshollinado.</p>
------------------------	--	---

2.2.4.MATERIAL DE LOS TUBOS

Son varios los materiales empleados en la fabricación de tubos para hornos de refinería. Los esfuerzos a los que serán expuestos durante su funcionamiento y su temperatura de operación promedio juegan un papel importante en la selección el tipo de material a emplearse.

La norma API 530 para la especificación de los tubos de los hornos sugiere materiales para tubos de hornos cuyas especificaciones se han detallado en la sección **A.2.1.1.6**.

El comportamiento de estas aleaciones frente a la corrosión a altas temperaturas ha sido estudiado en muchos casos históricos mencionados en la bibliografía. A continuación se menciona dos casos de estudio a fin de comprender la dimensión del efecto de las cenizas en la velocidad de corrosión de estas aleaciones.

Caso 1: La **Figura N°9** tomada de la bibliografía revisada muestra la resistencia a la oxidación en aire desde los 1000 °F hasta 1300°F de las aleaciones Cr-Mo recomendadas en la norma API 530, puede apreciarse el mejor performance de las aleaciones 9Cr-1Mo y 5Cr-0.5Mo en comparación con el acero al carbono. Puede observarse también que en aire a 1200°F las aleaciones 5Cr-0.5Mo presentan una velocidad de corrosión cercana a los 30 MPY. Este efecto se ve acelerado por la presencia de las cenizas corrosivas producto de la combustión de residuales con altos contenidos de vanadio y sodio.

Caso 2: La **Figura N°10** tomada de la literatura presenta un caso de aleaciones expuestas durante un prueba de campo de 10,000 horas (1.14 años) de duración a un ambiente corrosivo originado por los gases producto de la combustión de un combustible conteniendo 2.65%S, 49 ppm V y 44 ppm de Na. Entre los materiales de prueba se considera a las aleaciones 9Cr-Mo, 2¼Cr-1Mo, 316, 347 y 321 recomendados en la API 530.

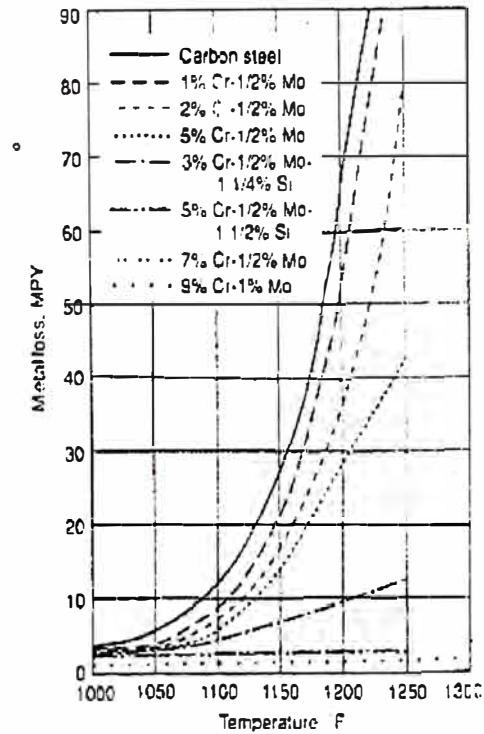


Fig. 3.5 Effects of chromium and/or silicon on the oxidation resistance of steels in air. Source: Ref 8

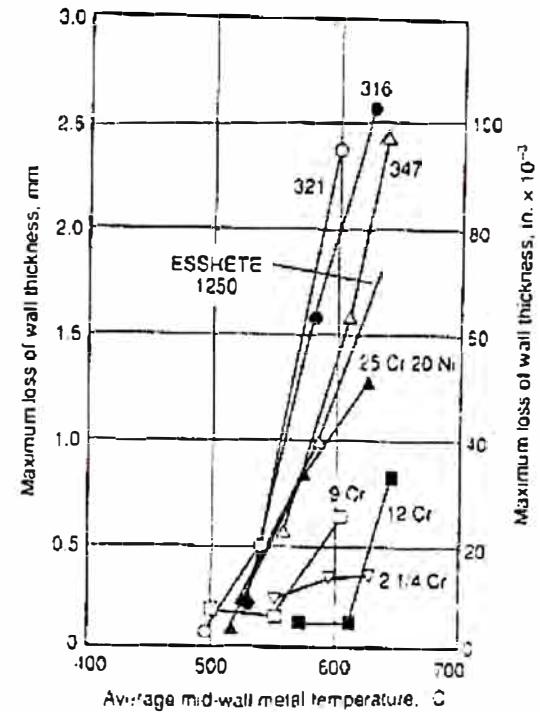


Fig. 8.17 Results of a 10,000-h field test in the superheater inlet zone (horizontal position) in an oil-fired boiler. Source: Ref 46

Figura N°9: Resistencia a la Oxidación en aire de la aleaciones Cr-Mo

Ref.Bibliográfica: 9.

Figura N°10: Aleaciones expuestas a corrosión por vanadio

Puede observarse en estos casos en mejor desempeño de la aleaciones: 9Cr-1 Mo y 2 ¼ Cr-1 Mo frente a las aleaciones austeníticas 316,347, y 321.

Comparando los resultados obtenidos de estos dos casos, puede verificarse el efecto de la cenizas en la aleación 9Cr-1Mo, aleación más resistente a la oxidación, la cual en la **Figura N°9** presenta una corrosión en aire a 1100 °F (600 °C) de solo 2 MPY , presentando a la misma temperatura en un ambiente corrosivo originado por los gases producto de la combustión con presencia de vanadio y sodio de 21.9 MPY (25 milésimas de in en 1.14años), como lo muestra la **Figura N° 10**; es decir, de hasta 10 veces más.

Materiales de los tubos de Refinería Conchán

Conforme a lo descrito en las secciones **B.1.4.** y **B.1.5.** referente a los materiales empleados en los tubos de los hornos de Refinería Conchán, estos son básicamente cinco y están resumidos en el siguiente cuadro:

ZONA	Tipo de Material	ESPECIFICACIÓN
RADIANTE	Aleación 5Cr-1/2Mo	ASTM A-213-T5 ASTM A-200-P5
	Aleación 9Cr-1Mo	ASTM A-213- P9
CONVECTIVA	Aleación 5Cr-1/2Mo	ASTM A-335-P5
	Acero al Carbono	ASTM A-106 Gr B

Y por lo tanto cumplen con las Norma API 530 para la especificación de materiales de tubos de hornos.

Sin embargo, si bien el requerimiento de resistencia mecánica del tubo se cumple, la resistencia química a la corrosión a altas temperaturas de estos materiales dependerá el tipo de ambiente al que se encuentran expuestos tal como lo demuestra las referencia bibliográficas mostradas en las **Figuras N°9 y N°10**.

En el presente estudio se determina la velocidad de corrosión de la Aleación Tipo 5Cr-0.5Mo empleado en los tubos de la Zona Radiante y Convectiva de los Hornos F-1 y F-2 a fin de verificar el efecto corrosivo del ambiente de estudio el cual es originado por la combustión de un residual de alto contenido de contaminantes metálicos principalmente sodio y vanadio que generan cenizas corrosivas.

2.2.5. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE LOS FACTORES DE CORROSIÓN

Como resultado del análisis de los factores en los hornos F-1 y F-2, podemos concluir lo siguiente:

Con respecto Combustible:

1. El combustible empleado en los hornos contiene un alto tenor de contaminantes en el combustible que producen cenizas y depósitos corrosivos que originan además un efecto perjudicial de menor grado pero importante que es el ensuciamiento de los tubos de los hornos lo cual produce una deficiente transferencia de calor con el consecuente incremento del consumo de combustible.
2. Aunque existe presencia de azufre en el combustible el ataque corrosivo por sulfidización no se produce debido a que los puntos de fusión de las sales formadas por el azufre son mucho más altos que las temperaturas de la piel de tubos registrados. Como se puede observar en el **Cuadro N°5** los sulfatos que producen corrosión (Na_2SO_4 y Ni_2SO_4) tienen puntos de fusión que en el caso de los Hornos F-1 y F-2 no se alcanzan, por lo tanto estas cenizas formarán depósitos cuyo efecto solo es ensuciamiento.

Con respecto al Perfil de Temperaturas en los Hornos:

1. Se alcanzaron temperaturas de piel de tubos mayores a 995 °F cuando :
 - Se incrementó la carga procesada.
 - Se registraron temperaturas de salida de crudo suficientemente altas para la formación de coque en el interior de los tubos que originaron puntos calientes.

Estando por lo tanto, los tubos de los hornos expuestos al ataque corrosivo por la acción de la cenizas fundidas de vanadio. Este ataque es altamente agresivo y afecta grandemente el periodo de vida de los tubos.

2. Los tubos de la Zonas Convectivas se encuentran menos expuestos a la corrosión por cenizas fundidas debido a que soportan menores niveles de temperatura en comparación a los tubos de la Zona Radiante debido a que la carga circula a menor temperatura por la Zonas Convectivas que por la Zona Radiante.
3. Los elementos no refrigerados (soportes) expuestos directamente a la llama en las Zona Radiante y los elementos no refrigerados de la Zonas Convectivas se encuentran expuestos a un ambiente fuertemente oxidante así como a un ataque corrosivo por la presencia de cenizas de vanadio, debido a las altas temperaturas que se alcanzan dentro del Horno (aprox. 1447°F).

Con respecto a los materiales

1. Se están cumpliendo las especificaciones recomendadas para el caso sin embargo es evidente la presencia del efecto corrosivo causado por las temperaturas y promovido por la acción de las cenizas provenientes del combustible al observarse velocidades de corrosión históricamente de hasta 40 MPY.

Como resultado final podemos concluir que es conveniente el tratamiento del combustible a fin de prevenir los efectos causados por la cenizas de vanadio cuando estas alcancen su punto de fusión y del mismo modo para evitar el excesivo ensuciamiento producido por los depósitos y residuos de combustión sobre las superficies de los tubos de los hornos.

C.PROCEDIMIENTOS TÉCNICOS INDUSTRIALES PARA PREVENIR PROCESOS DE CORROSIÓN POR CENIZAS FUNDIDAS:

1. PROCESOS EXISTENTES

Para prevenir los problemas de post-combustión como la corrosión por originados por los metales contaminantes del combustible existen los siguientes procedimientos:

1. El uso de aditivos a base de magnesio, que constituye la solución más común por su bajo costo y fácil aplicación.
2. La eliminación de los metales contaminantes como el vanadio por medio del uso de técnicas de aplicación del ultrasonido y las microondas. El ultrasonido puede emplearse para eliminar moléculas no deseadas en el petróleo y combustibles (como las de azufre y metales), pues a través de energía mecánica de vibración provoca condiciones de alta presión y temperatura para romper las uniones moleculares. A su vez, las microondas, una energía electromagnética de onda corta, permite concentrar energía en sitios particulares de un sistema para lograr esa descomposición molecular. Sin embargo estos procedimientos en etapa de investigación son de elevado costo y aun no aplicables a escala industrial.
3. Una nueva opción basada en la catálisis electromagnética del combustible para eliminar los inquemados denominada Tecnología de Celdas Catalíticas ilustrada en el **Anexo N°9** pero que en la actualidad no tiene ejemplos aplicativos concretos conocidos.

2. SELECCIÓN DEL PROCEDIMIENTO A EMPLEAR

El procedimiento aplicado en el presente estudio, sugerido por la Refinería Conchán fue el uso de un aditivo a base de magnesio, por lo que se efectuó como parte del desarrollo del presente estudio las evaluaciones preliminares para la ejecución de las corridas de prueba con dicho aditivo.

Tal como se ha descrito en la **sección B.2.2.1.** el combustible empleado en los hornos varió en su especificación de viscosidad entre 200-400 cst a 50°C (122°F), por razones externas al desarrollo del presente estudio.

Por tal motivo, previo al inicio de las corridas de prueba fue necesario la evaluación del sistema de pre-calentamiento de combustible de consumo interno a fin de determinar las limitaciones en cuanto a la viscosidad del combustible preparado y al performance de los equipos del circuito de precalentamiento del combustible lo que permitirá:

- Conocer hasta que punto puede ser elevada la viscosidad del RCI sin alterar las condiciones requeridas por los hornos en cuanto a la viscosidad de especificación en la boquilla del quemador y al mismo tiempo reconocer los puntos o cuellos de botella.
- Evaluar la factibilidad de quemar un combustible residual pesado (de viscosidad mayores a 800 cSt a 50°C) o tipo Residual N°5 empleando el circuito de calentamiento de combustible existente, con lo cual se lograría un ahorro económico sobre el consumo de material de corte (diesel, kerosene o Gasóleos) de mayor costo y valor agregado, los cuales son empleados en la preparación del combustible para reducir la viscosidad.

2.1. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LOS EQUIPOS DEL CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN DEL COMBUSTIBLE PARA HORNOS

2.1.1. BOMBAS P-111A Y P-120

2.1.1.1. Objetivo

Evaluar la performance de las bombas **P-111A** y **P-120** (bomba de reemplazo), determinar los requerimientos de temperatura en el **Tanque 39** para el funcionamiento en especificación de la bomba **P111A** e identificar si esta constituye un factor limitante para uso de un combustible residual pesado (entre 400 y 1000 cSt a 50°C).

2.1.1.2. Generalidades

Las bombas **P-111A** y **P-120** son del mismo modelo (**A3FD137**) y operan con un motor eléctrico de **3 HP** a **1800 RPM**, 400 V, 3 fases y a 60 ciclos; cada una. Por diseño este modelo puede trabajar en un rango de temperatura de **0 – 230°F** y en un rango de **100 - 1000 SSU (20 – 216 cSt)**.

2.1.1.3. Consideraciones

1. El **Tanque 39** se mantiene una a temperatura entre **77-90°C**, siendo constantemente agitado y calentado con vapor de 100 psi. El combustible pasa inmediatamente al tanque **D-107** el cual también cuenta con calefacción de vapor de 100 psi.
2. La bombas **P-111 A** y **P-120** operan a una presión de descarga entre **200 - 300 psi** como una condición de operación. Teniendo como restricción el uso del motor de **1800 RPM** y **3 HP** para su funcionamiento, su **TABLA DE PERFORMANCE** es la siguiente:

Tabla N°5: TABLA DE PERFORMANCE**BOMBA MODELO: A3FD –137**

VELOCIDAD 1750 RPM - NPSH REQ = 11 ft				
VISCOSIDAD		PRESIÓN – PSI		
		150	200	350
SSU	cSt	GPM		
100	20-21	12.6	11.7	9.8
150	33	13.4	12.7	11.2
200	44	14.0	13.4	12.0
500	108	15.3	14.9	14.1
1000	216	16.0	15.7	15.1
VISCOSIDAD		PRESIÓN – PSI		
		150	200	350
SSU	cSt	BHP		
200	44	1.8	2.3	3.2
500	108	2.0	2.5	4.0
1000	216	2.2	2.7	4.3
2000	432	2.5	3.1	4.6

- De la **Tabla N°5** podemos determinar que, para una velocidad de **1750 RPM** y una presión de **200 psi**, la **máxima viscosidad recomendada es de 1000 SSU (216 cSt)** obteniéndose un caudal máximo de **15.7 GPM**. Trabajando en tales condiciones el **BHP sería de 2.7 (aprox. 3)** con lo que se estaría llegando al límite del funcionamiento del motor.
- En la **Tabla N°6** se muestra la temperatura a la cual deberá estar un residual pesado de **400 cSt a 1000 cSt (50°C, 122 °F)** para llegar a la viscosidad de especificación de la bomba **P-111A**. Se observa que aún cuando el combustible sea preparado con una viscosidad de 1000 cSt a 50°C (122°F), este llegará a la viscosidad de especificación de la bomba sin sobrepasar el límite de temperatura de diseño de la bomba (**110°C, 230°F**).

Tabla N°6: Temperatura de Residuales a Viscosidades de Especificación

COMBUSTIBLE PARA HORNOS	TEMPERATURA PARA LLEGAR A 216 cSt (BOMBA)	TEMPERATURA DE DISEÑO DE LA BOMBA
RESIDUAL DE 400-500 cSt a 50°C	158 °F (70°C)	MAX 230°F (110°C)
RESIDUAL DE 500-600 cSt a 50°C	162 °F (72°C)	MAX 230°F (110°C)
RESIDUAL DE 600-700 cSt a 50°C	166°F (74°C)	MAX 230°F (110°C)
RESIDUAL DE 700-800 cSt a 50°C	169°F (76°C)	MAX 230°F (110°C)
RESIDUAL DE 800-900 cSt a 50°C	173°F (78°C)	MAX 230°F (110°C)
RESIDUAL DE 848 cSt	171°F (77°C)	MAX 230°F (110°C)
RESIDUAL DE 900-1000 cSt a 50°C	174°F (79°C)	MAX 230°F (110°C)
RESIDUAL DE 2700 cSt a 50°C	194°F (90°C)	MAX 230°F (110°C)

2.1.1.4. Performance de la Bomba P-111A

En la **Tabla N°7** se muestra el cálculo del **NPSH disponible** en el tramo del tanque **D-107** hasta la bomba **P-111A** (Ver **Figura N°11**) para un residual de **848 cSt a 50°C de 13.4 °API**, considerando el rango de temperatura de operación que se mantiene en el **Tanque 39** (entre 70-90°C) y asumiendo que existe una caída de temperatura entre el **Tanque 39** y la bomba **P-111A** despreciable.

$$\text{FORMULA : } \underline{NPSH = h_a - h_{vpa} - h_{st} - \Sigma h_f}$$

Donde: $h_{vpa} = 0$

$$\text{Caudal (Q)} = 15.7 \text{ GPM} = 0.0349 \text{ ft}^3/\text{seg.}$$

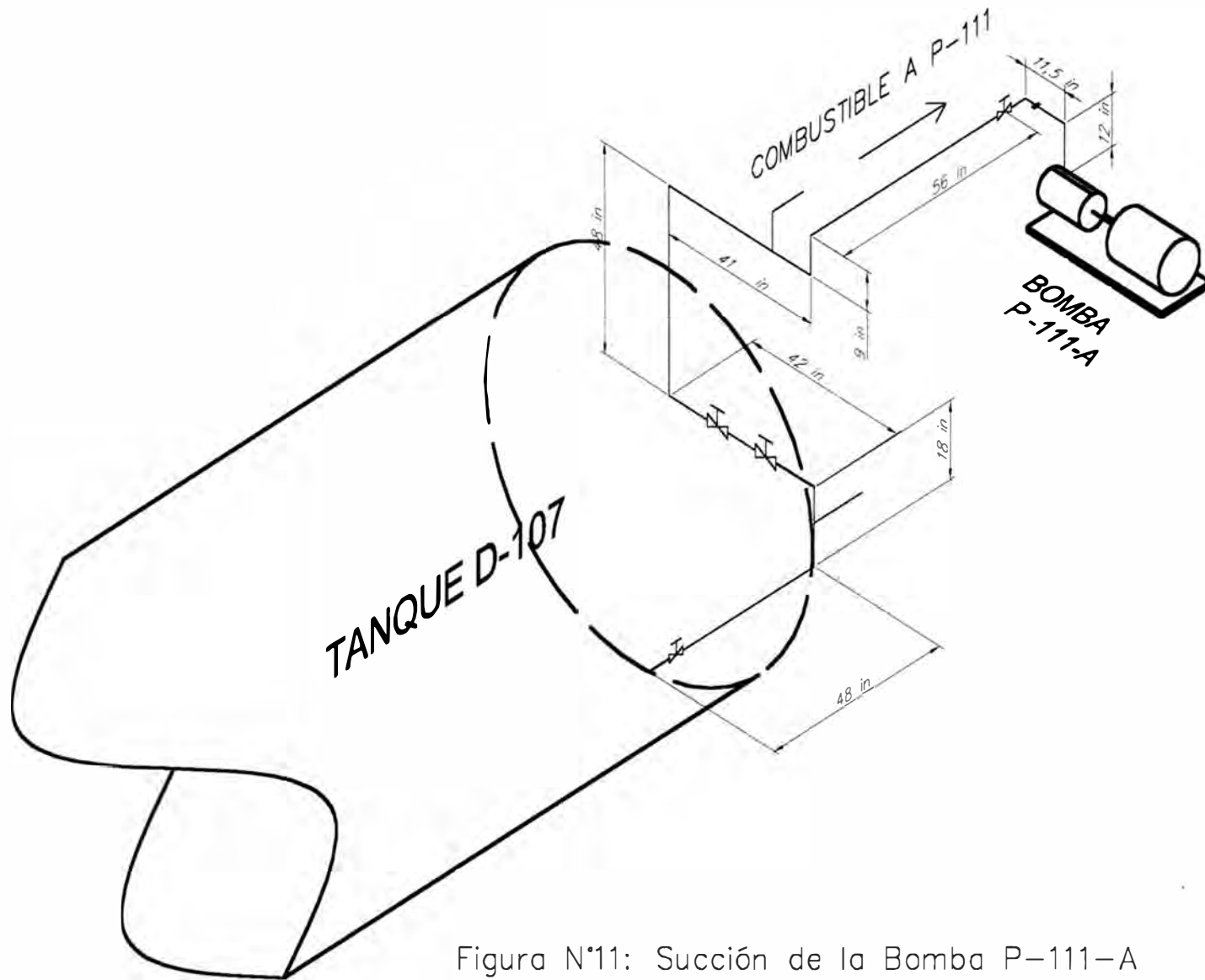


Figura N°11: Succión de la Bomba P-111-A

Tabla N°7: CÁLCULO DE NPSH DISPONIBLE EN BOMBA P-111A CON RESIDUAL DE 848 cSt a 50°C Y 13.4 °API

CONDICIONES OPERATIVAS T-39 y D-107	TEMPERATURA	77 °C	90°C
	VISCOSIDAD	216 cSt	75 cSt
CONDICIONES OPERATIVAS P-111 A	TEMPERATURA	77°C	90°C
	VISCOSIDAD	216 cSt	75 cSt
Tramo 1	Nre	111	320
	F	0.5756	0.1998
	Ktotal	14.911	6.186
	hf (ft)	0.52	0.20
Tramo 2	Nre	73.9	201
	F	0.8656	0.3200
	Ktotal	43.860	22.27
	hf (ft)	0.31	0.16
Tramo 3	Nre	111	320
	F	0.5756	0.1998
	Ktotal	15.920	11.1
	hf (ft)	0.56	0.39
PERDIDA DE CARGA TOTAL Σ hf		1.39	0.75
Ha (ft)		36.09	36.2
Hst (ft)		2.00	2.00
NPSH DISPONIBLE (ft)		32.70	33.58

2.1.1.5. Conclusiones

- Se observa que el **NPSH disponible es mayor que el NPSH requerido (11 ft)** para un combustible de **848 cSt a 50°C** con una temperatura de calentamiento entre **77°C y 90 °C**.
- Para un combustible de **2700 cSt a 50°C**, a una temperatura en el **Tanque 39 (T-39) de 90 °C**, el **NPSH disponible** será menor que el calculado en la **Tabla N°7** para un combustible de **848 cSt a 50°C**, a 90°C, en razón a que la pérdida de carga aumentará debido a la viscosidad del fluido (**216 cSt a 90°C**); sin embargo tal variación no hará que el **NPSH disponible** sea

menor que el **NPSH requerido**, ya que esta temperatura (**90°C**) se **asegura condiciones óptimas de funcionamiento de la bomba P-111A**.

- Considerando el caso en el que el **Tanque 39** sea operado manteniendo una temperatura mínima de 77°C, es posible emplear combustibles hasta de 800 cSt a 50°C, requiriéndose controlar la temperatura del **Tanque 39** para poder emplear combustibles tan pesados como uno de 2700 cSt a 50°C.
- Por lo tanto, la bomba **P-111A** puede operar con combustibles tan pesados como uno de 2700 cSt a 50°C (122°F), siempre que se mantenga el **Tanque 39** a una temperatura adecuada, de la forma como viene siendo operado (con temperatura desde 77° hasta 90 °F).

2.1.2. INTERCAMBIADOR E-23

2.1.2.1. Objetivo

Evaluar la performance del intercambiador **E-23** con el fin de llevar la viscosidad del combustible usado en los hornos, a su valor de especificación en las boquillas del quemador (150 SSU – 33 cSt).

2.1.2.2. Generalidades

1. El calentador de combustible **E-23** es un intercambiador de calor de doble tubo cuyo duty de diseño es de 70,000 BTU/HR. Las características más importantes de su diseño (Según Hoja Técnica de Especificación) se muestran en la Tabla siguiente:

Tabla N°8: Características de Diseño del Intercambiador E-23

	LADO DE LA CORAZA	LADO DE TUBO
FLUIDO	COMBUSTIBLE (RCI)	VAPOR SATURADO
PRESIÓN (psi)	300	250
CAIDA DE PRESION PERMITIDA (psi)	2	20
TEMPERATURA (°F)	650	650
	TUBOS	
DIÁMETRO (in)	3 ½ (NOMINAL)	1.9 (NOMINAL)
LONGITUD (FT)	21.5	20.0
CÉDULA	40	40
MATERIAL	ACERO AL CARBONO	ACERO AL CARBONO

2. El fluido empleado para el calentamiento es vapor saturado de 200 psi. Actualmente el intercambiador **E-23** trabaja a su máxima capacidad debido a que aún no se cuenta con una válvula de control que regule el caudal de vapor entregado al equipo.
3. Durante la parada de planta de Julio del 2002 se realizó la reubicación del **E-23** en las inmediaciones de la planta de procesos, lográndose reducir la caída de temperatura del combustible que se producía desde su salida del **E-23** hasta su entrada a los quemadores.

2.1.2.3. Consideraciones

1. Para asegurar que un residual pesado de una viscosidad comprendida entre **400 cSt y 1000 cSt a 50°C (122 °F)** llegue a las boquillas de los quemadores de los Hornos a la viscosidad de diseño de estas (33-43 cSt)

debe alcanzarse, al final del calentamiento en el intercambiador **E-23**, los Rangos de Temperaturas mostrados en la **Tabla N°9**. La estimación de la Viscosidad de los residuales pesados a tales niveles de temperatura a partir de su viscosidad a 50°C se realizó mediante el Método de Puttagunta y Signh cuyo software de aplicación es empleado en Refinería Conchán.

Tabla N°9: Rango de Temperatura Óptimo para alcanzar viscosidad de Diseño de la Boquilla del Quemador

COMBUSTIBLE PARA HORNOS	RANGO DE TEMPERATURA ÓPTIMO PARA LLEGAR A UNA VISCOSIDAD ENTRE 150-200 SSU	VISCOSIDAD DE DISEÑO DE LA BOQUILLA DEL QUEMADOR EN LOS HORNOS
RESIDUAL DE 400-500 cSt @50°C	104-111°C(219-232°F)	150-200 SSU (33 – 43 cSt)
RESIDUAL DE 500-600 cSt @50°C	107-114°C(225-237°F)	150-200 SSU (33 – 43 cSt)
RESIDUAL DE 600-700 cSt @50°C	109-116°C(228-241°F)	150-200 SSU (33 – 43 cSt)
RESIDUAL DE 700-800 cSt @50°C	111-117°C(232-243°F)	150-200 SSU (33 – 43 cSt)
RESIDUAL DE 800-900 cSt @50°C	112-119°C(234-247°F)	150-200 SSU (33 – 43 cSt)
RESIDUAL DE 848 cSt	11°C(2°F)	150-200 SSU (33 – 43 cSt)
RESIDUAL DE 900-1000 cSt @50°C	113-120°C(235-248°F)	150-200 SSU (33 – 43 cSt)

2. La temperatura de la línea de combustible a los hornos en su trayecto desde el **Tanque 39** (tanque de preparación del RCI) hasta la salida del Intercambiador **E-23**, fue medida sobre la superficie exterior de los tubos obteniéndose el siguiente registro.

Tabla N°10: Mediciones de Temperatura - Línea de Combustible

PUNTO DE MEDICIÓN		INSTRUMENTO	LECTURA
ELEMENTO	UBICACIÓN		
COMBUSTIBLE	TANQUE T-39	TERMÓMETRO BIMETÁLICO	183 °F(84°C)
PIEL DE TUBO	COPELE DE SALIDA DE DESCARGA DE BOMBA P-111A	PIRÓMETRO	147 °F(64°C)
PIEL DE TUBO	COPELE DE ENTRADA A MANIFOLD – LÍNEA DE COMBUSTIBLE	PIRÓMETRO	121 °F(46°C)
COMBUSTIBLE	SALIDA DEL E-23	TERMÓMETRO BIMETÁLICO	233 °F(112°C)

Cabe mencionar que no se cuenta con un medidor de temperatura para el combustible a la entrada del intercambiador **E-23**.

- De la **Tabla N°10** se observa que la diferencia entre la temperatura de la superficie externa del tubo de la descarga de la bomba **P-111A** (147 °F) y la temperatura externa del cople de ingreso al manifold (121 °F) es de 26 °F (18°C). Puede asumirse entonces que para el combustible la caída de temperatura para el mismo tramo es de 26 °F (18°C) aproximadamente.. (Ver Diagrama de Circuito de Combustible **Figura N°8**).
- Por lo expuesto en los items anteriores y para efectuar el cálculo del performance del intercambiador **E-23**, es necesario la estimación de la temperatura del combustible a la entrada del intercambiador, en base a la temperatura de salida de la bomba **P-111A** y la caída de tempertura entre el tramo de la bomba a la entrada del intercambiador (estimada en 26 °F).

2.1.2.4. Performance del Intercambiador E-23

Evaluación del Duty de Diseño a Máxima Capacidad

Considerando que el **E-23** trabaja en condiciones de máxima capacidad de intercambio debido a que no existe actualmente restricción en el flujo de vapor que ingresa al mismo, es posible evaluar el Duty de intercambio calórico en las condiciones actuales de funcionamiento.

Se ha tomado como referencia los siguientes datos recogidos durante la operación del día 26 de Setiembre del 2002.

Datos del Combustible

Día de preparación: 26 de Setiembre del 2002
Gravedad API: 16.5
Gravedad específica: 0.9561
Viscosidad a 50°C : 384 cSt.
Temperatura T-39: 155 °F (68.3°C).
K, Factor de Caracterización : 11.6 (según UOP Method 375-59, Fig 4)
K tomado: 11.8.

Datos de Operación: Presión de descarga P-111A: 310 psi.
Presión Ingreso a E-23: 266 psi
Presión de Salida de E-23: 265 psi.
Temperatura de combustible a Salida de E-23: 232 °F.
Flujo de combustible Horno F-1(DCS): 1.91 GPM.
Flujo de combustible Horno F-2(DCS): 1.05 GPM.

*DCS: Digital Control System, es el sistema de control automático donde se registran las variables operativas de las diferentes unidades de la Refinería.

Temperatura mínima de Bombeo

Considerando las condiciones expuestas y la Evaluación del Performance de la bomba **P-111 A** anteriormente analizado, la temperatura mínima de bombeo será la temperatura a la cual el combustible alcanzará la viscosidad de 216 cSt.

$$^{\circ}\text{T}_{\text{mínima de bombeo}} = ^{\circ}\text{T} (216 \text{ cSt})$$

$$^{\circ}\text{T}_{\text{mínima de bombeo}} = 65.7 \text{ }^{\circ}\text{C} = 150 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Comparando este valor de 150 °F para la temperatura mínima de bombeo con la temperatura registrada en el **T-39** que fue de 155 °F, puede concluirse que la bomba **P-111A** estuvo trabajando bajo especificación.

Caída de temperatura estimado para el tramo desde la descarga de la bomba P-111A hasta el ingreso del combustible al E-23

Teniendo en consideración que la caída de temperatura registrada fue de 26 °F aproximadamente, puede asumirse valores para la caída de temperatura del tramo comprendido entre la descarga de la **P-111A** y la entrada al **E-23**, a fin de realizar los cálculos del duty de operación.

Tabla N°11: Caidas de Temperatura

Temperatura Salida P-111A	Caída de Temperatura Asumida	Temperatura Entrada E-23
150°F	20°F	130 °F
	25°F	125°F
	30°F	120°F
	40°F	110°F

Temperatura mínima de salida del Intercambiador E-23

Considerando que el combustible debe llegar a la viscosidad de diseño de la boquilla de 150 SSU (33cSt). La temperatura mínima de salida del intercambiador **E-23** no deberá ser menor que la temperatura a la cual el combustible llega a una viscosidad de 33 cSt.

$$^{\circ}\text{T}_{\text{mínima de salida E-23}} = \text{T}(33\text{cSt})$$

Para el caso específico que se está evaluando la temperatura mínima de salida de **E-23** deberá ser de 107 °C (225 °F), la cual difiere en 7°F de la lectura tomada, siendo esta diferencia aceptable, pero no asegura que esto mismo ocurra cuando se utilice combustibles de mayor viscosidad.

Cálculo de Entalpías

Según gráficas de Hydrocarbon Processing, March 1976, para $K=11.8$ (16.5°API,384cSt a 50°C)

Tabla N°12: Cálculo de Entalpías

Temperatura (°F)	Entalpía (BTU/HR)
130 °F	120
125 °F	118
120 °F	117
110 °F	110
225 °F	165

Cálculo del Duty

Tabla N°13: Cálculo del Calor Entregado por el Intercambiador E-23

Viscosidad @50°C (cSt)	API Sp-gr 60°F	T _{bombeo} (°F)	Caída de Temperatura ΔT (°F)	°Tentr. E-23 (°F)	°Tsal. E-23 (°F)	Flujo Másico (Lb/HR)	Calor entregado (BTU/HR)
384	16.5 0.956	150	20	130	225	1342.08	60393.6
			25	125			63077.8
			30	120			64419.8
			40	110			73814.4

Como el duty de diseño del intercambiador **E-23** es 70000 BTU/HR, de la tabla se verifica que en estas condiciones el **E-23** esta utilizando casi toda la máxima capacidad de calentamiento.

2.1.2.5. Calor Entregado por el E-23 al Combustible Usado en Hornos a Diferentes Viscosidades

Para el Cálculo del Calor entregado por el intercambiador **E-23** se ha seguido el mismo procedimiento empleado para el cálculo del duty de operación del intercambiador descrito en detalle en el item anterior (2.1.2.4.).

Los resultados presentados en la **Tabla N°14** en base al balance de energía en el intercambiador han sido calculados para un consumo promedio de combustible de 228.6 GPH (3.81 GPM).

En la **Tabla N°14**, se observa que a medida que se incrementen la viscosidad del combustible a valores superiores de 583 cSt, el calor requerido en el **E-23**, para llevar el combustible a la viscosidad de diseño de la boquilla en el quemador de los Hornos F-1 y F-2 (33 cSt) es mayor que el duty de diseño del **E-23**.

Tabla N°14: CALOR ENTREGADO POR EL E-23 A DIFERENTES VISCOSIDADES

VISCOSIDAD (cSt)	API	Sp-gr @ 60°F	T _{bombeo} en P111	Caida de Temp. Δ T (° F)	T entrada E-23(° F)	Tsalida E-23(°F)	ENTALPIA @T entrada E-23 (BTU/LB)	ENTALPIA @Tsalida E-23 (BTU/LB)	Sp-gr @ Tsalida E-23	FLUJO MASICO (LB/HR)	CALOR REQUERIDO E-23 (BTU/HR)	CALOR DE DISEÑO E-23
583	15.2	0.9646	72°C(161 °F)	20	141	235	124	161	0.9046	1722	63712	70 000
				25	136		123				65434	70 000
				30	131		119				72322	70 000
				40	121		116				77488	70 000
848	13.4	0.9765	77°C(170°F)	20	150	244.4	126	170	0.9145	1741	76595	70 000
				25	145		125				78336	70 000
				30	140		124				80077	70 000
				40	130		120				87040	70 000
1483	13.9	0.9732	84°C(183°F)	20	162	256.1	134	180	0.9062	1725	79350	70 000
				25	157		132				82800	70 000
				30	152		130				86250	70 000
				40	142		125				94875	70 000

2.1.2.6. Conclusiones

- En la condiciones actuales, el intercambiador **E-23** proporcionará el calentamiento requerido para que el combustible empleado en los hornos llegue en especificación a la boquilla de los quemadores siempre que la viscosidad del RCI no exceda los 600 cSt @50°C (15 °API).
- Como consecuencia del item anterior, la capacidad de calentamiento del intercambiador **E-23** constituye un limitante, en las condiciones actuales, para el uso de un RCI de alta viscosidad (de 600 cSt a más), con el circuito de calentamiento de combustible existente.

3. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN LOS HORNOS EN OPERACIÓN DE REFÍNERIA CONCHÁN

La determinación de la velocidad de corrosión en los Hornos se realiza con el fin de:

- Verificar el efecto del tratamiento del combustible empleado en los hornos mediante el uso del aditivo a base de magnesio con los resultados de la disminución de la velocidad de corrosión.
- Verificar el efecto que tienen las cenizas procedentes del combustible en el ambiente corrosivo en estudio (Hornos de Refinería) sobre los tubos de los hornos. Esto nos permitirá dar a conocer la dimensión del efecto corrosivo el que solo se puede observar en periodos largos debido a que no se supera ampliamente las temperaturas de fusión de las cenizas corrosivas.

- Verificar el efecto corrosivo en circunstancias críticas, cuando la temperatura supera ampliamente la temperatura de fusión de las cenizas.

La evaluación y el monitoreo de la corrosión en los Hornos de Refinería Conchán fue una operación compleja debido a:

1. La existencia de superficies con diferentes niveles de temperatura de metal como la superficie de piel de tubos de las zonas convectiva y radiante de los Hornos F-1 y F-2, así como de elementos estructurales (soportes, lanza deshollinador, damper, etc).
2. La existencia de diferentes materiales presentes que conforman los distintos componentes internos de los Hornos.
3. La inaccesibilidad debida a la hermeticidad de los Hornos así como el alto riesgo que presupone la manipulación de materiales o instrumentos en un ambiente de elevada temperatura (cámara de combustión).
4. El alto riesgo que significa los trabajos en “caliente” (es decir en plena operación de la unidad) con tuberías presurizadas conteniendo fluidos altamente inflamables como lo son el crudo y el crudo reducido.
5. La dificultad de adquirir materiales de los distintos componentes de los Hornos, cuyas características especiales los hacen inaccesibles en el mercado común y son de costos elevados.

3.1. TÉCNICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CORROSIÓN EN LOS HORNOS

No existen técnicas definidas para la determinación de la velocidad de corrosión de los diferentes componentes internos de un horno durante a operación de dicho equipo. Además tal determinación deberá estar orientada a un tipo de material específico el cual deberá estar sometido a la misma temperatura y condiciones del

medio a las que se encuentra tal material dentro de los hornos ya sea cámara de combustión o zonas radiante y convectiva.

Sin embargo, es posible realizar una determinación empleando cupones los cuales podrán estar convenientemente acondicionados (refrigerados o no refrigerados) para simular la temperatura a la cual se encuentran en el interior del horno.

Luego, la medición de la velocidad de corrosión de dichos cupones (especímenes) podrá realizarse empleando el Método Gravimétrico explicado en la sección **A.2.4.1.**

3.2.PROCEDIMIENTO A APLICAR EN LA DETERMINACIÓN DE LA CORROSIÓN EN LOS HORNOS F-1 Y F-2

Considerando que el principal problema que afrontan estas unidades son el ensuciamiento producido por los depósitos de estos contaminantes sobre los tubos de la zonas radiante y convectiva, así como la predisposición a la corrosión por cenizas fundidas cuando se alcanzan las condiciones para que se produzca este tipo de corrosión las cuales ya han sido descritas en capítulos anteriores; los trabajos de evaluación de la de corrosión en estas unidades se han enfocado en los tubos de los hornos.

Se emplearon las técnicas basadas en el uso de cupones para la determinación de la corrosión de los tubos de los hornos:

- Una primera determinación se realizó empleando cupones no refrigerados del mismo material de los tubos, lo cual permitió conocer en las condiciones más críticas, el efecto de la corrosión sobre dicho material. Tales condiciones se producirán cuando la superficie del tubo del horno llegue a alcanzar la máxima temperatura al estar expuesta directamente a los gases de combustión sin una circulación efectiva del

fluido (crudo o crudo reducido) por su interior o al efecto del impacto de las llama sobre los tubos.

El material empleado en esta determinación fue el ASTM A-335 Gr.P5 debido a que fue factible adquirir una porción de tubería (4 in. DN, SCH 40) a partir de la cual fueron fabricados los cupones que se emplearon.

- Una segunda determinación se efectuó mediante un cupón refrigerado hasta una temperatura similar a la de los tubos de la zona radiante, por medio de una probeta con control manual de temperatura que era refrigerada con aire comprimido. El material empleado en este caso fue AISI 316 debido a la facilidad de su adquisición y del maquinado al que debían de ser sometidas las diferentes piezas de la probeta de control manual. Los resultados de esta determinación se muestran en el capítulo correspondiente al tratamiento del combustible (Ver sección C.5).

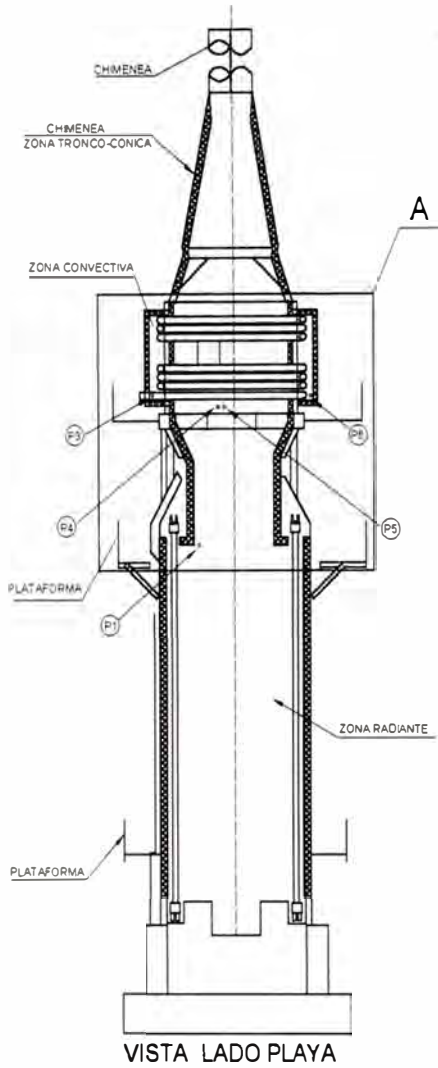
3.3. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE LOS TUBOS EN LOS HORNOS F-1 Y F-2 MEDIANTE EL USO DE CUPONES

3.3.1. Determinación de los Puntos a Instalar:

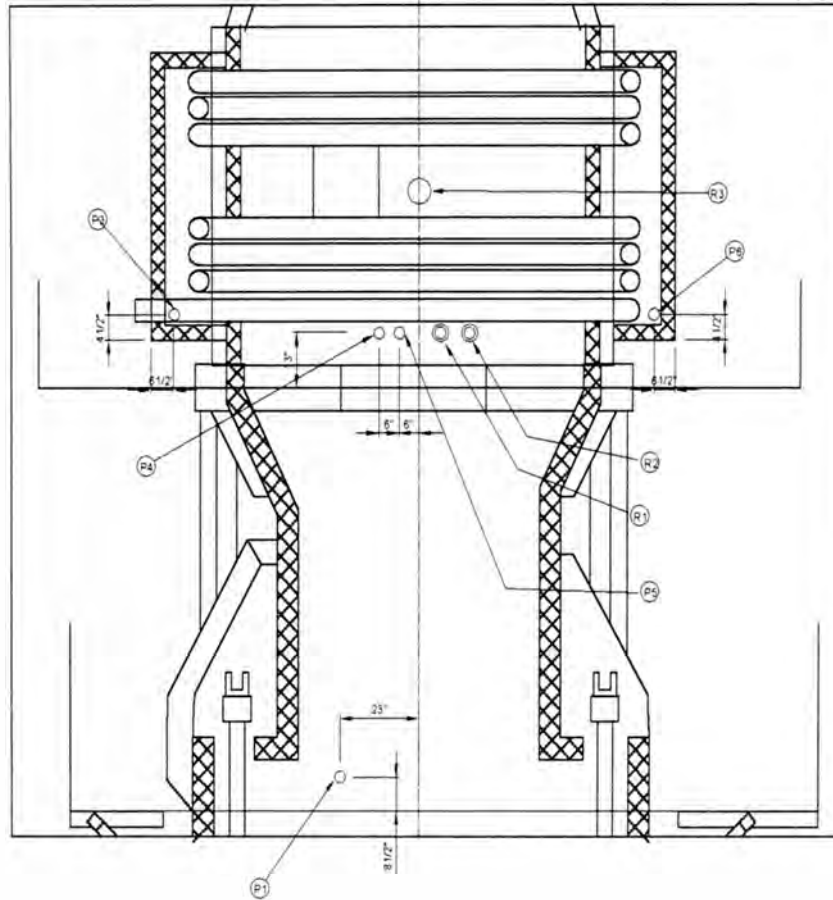
Considerando las dificultades mencionadas en la sección anterior se realizaron inspecciones visuales en los Hornos F-1 y F-2 y se verificó la inexistencia de accesos destinados a la colocación de medios de monitoreo de corrosión. Sin embargo se ubicó puntos habilitados para la instalación de termocuplas y para conexiones de vapor de ahogamiento en desuso los cuales fueron usados para ubicar en ellos cupones a fin de evaluar la corrosión en estas unidades.

Los **Planos N°1, N°2 y N°3** indican la ubicación de los cupones en la zonas Radiante y Convectiva de los Hornos.

HORNO F-1



DETALLE - A



PUNTOS DE MONITOREO - CUPONES

MARCA	DESCRIPCION	UBICACION
P1	TAPON 1 1/2" Ø	ZONA RADIANTE SUPERIOR
P3	TAPON 1 1/2" Ø	ZONA CONVECTIVA- VAPOR DE AHOGAMIENTO
P4	TAPON 2" Ø	ZONA CONVECTIVA
P5	TAPON 2" Ø	ZONA CONVECTIVA
P6	TAPON 1 1/2" Ø	ZONA CONVECTIVA

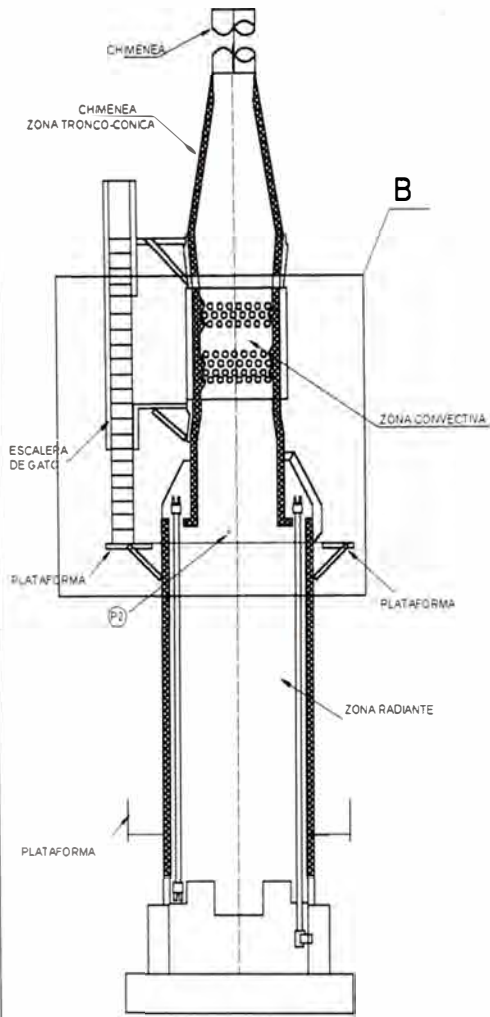
PUNTOS DE REFERENCIA

MARCA	DESCRIPCION	UBICACION
R1	BRIDA 1 1/2" Ø	ZONA CONVECTIVA
R2	BRIDA 1 1/2" Ø	ZONA CONVECTIVA
R3	DESHOLLINADOR	ZONA CONVECTIVA

PLANO N°1: UBICACION DE CUPONES PARA
MONITOREO DE CORROSION
HORNO F-1 - REFINERIA CONCHAN

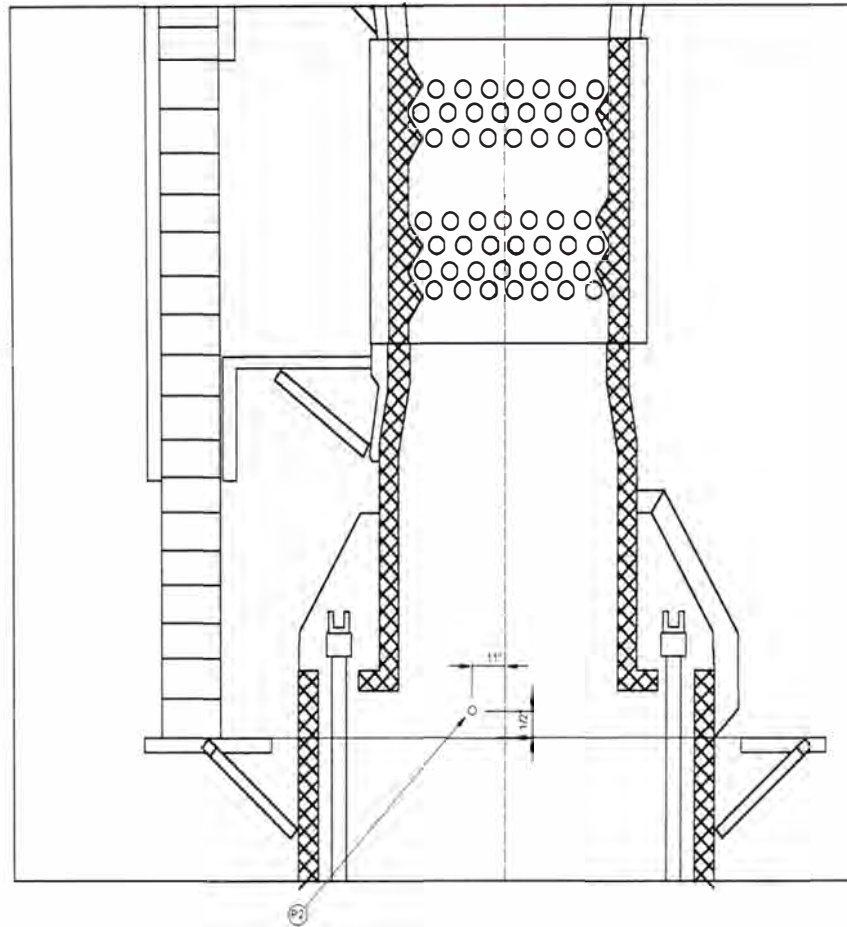
PREPARADO POR: DELIA FLOR CHILENO GONZALES
JUAN C. RAMIREZ VERASTEGUI

HORNO F-1



VISTA LADO LURIN

DETALLE - B

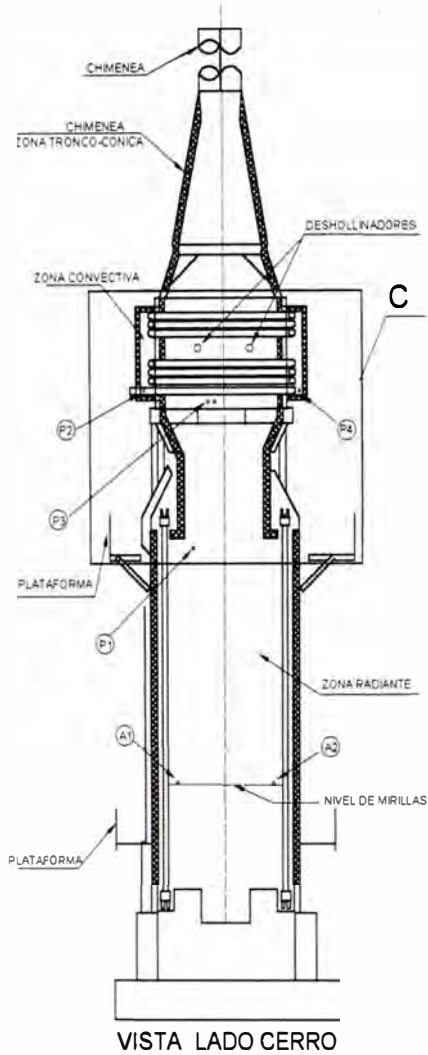


PUNTOS DE MONITOREO - CUPONES		
MARCA	DESCRIPCIÓN	UBICACIÓN
P2	TAPON 1 1/2" Ø	ZONA RADIANTE SUPERIOR

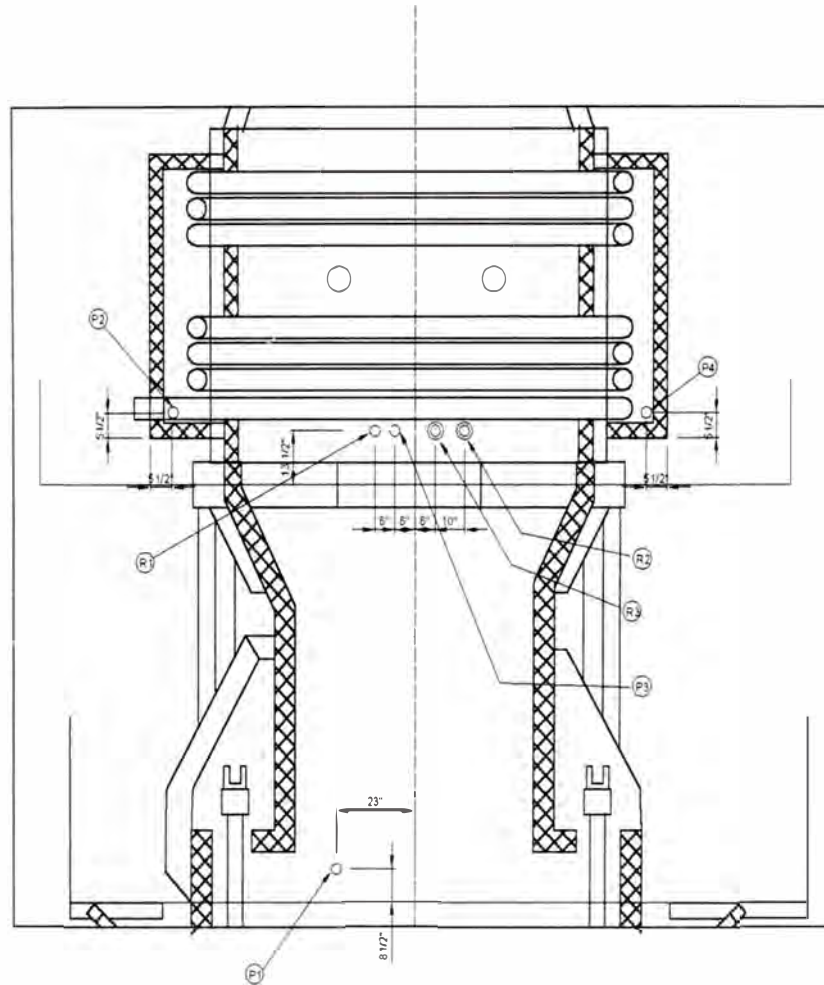
PLANO N°2: UBICACION DE CUPONES PARA MONITOREO DE CORROSION HORNO F-1 - REFINERIA CONCHAN

PREPARADO POR: DELIA FLOR CHILENO GONZALES
JUAN C. RAMIREZ VERASTEGUI

HORNO F-2



DETALLE - C



PUNTOS DE MONITOREO - CUPONES

MARCA	DESCRIPCION	UBICACION
P1	TAPON 1 1/2" Ø	ZONA RADIANTE SUPERIOR LADO PLAYA
P2	TAPON 1 1/2" Ø	ZONA CONVECTIVA- VAPOR DE AMOGAMIENTO
P3	TAPON 1 1/2" Ø	ZONA CONVECTIVA
P4	TAPON 1 1/2" Ø	ZONA CONVECTIVA
A1	TAPON 1" Ø	ZONA RADIANTE INFERIOR (OPCIONAL)
A2	TAPON 1" Ø	ZONA RADIANTE INFERIOR (OPCIONAL)

PUNTOS DE REFERENCIA

MARCA	DESCRIPCION	UBICACION
R1	TAPON 1 1/2" Ø	ZONA CONVECTIVA TE-252
R2	BRIDA C/PLATO CIEGO	ZONA CONVECTIVA
R3	BRIDA C/PLATO CIEGO Y TAPON DE 1 1/2"	ZONA CONVECTIVA

PLANO N°3: UBICACION DE CUPONES PARA MONITOREO DE CORROSION HORNO F-2 - REFINERIA CONCHAN

PREPARADO POR: DELIA FLOR CHILENO GONZALES
JUAN C. RAMIREZ VERASTEGUI

3.3.2. Diseño de Cupones y Tiempos de Exposición

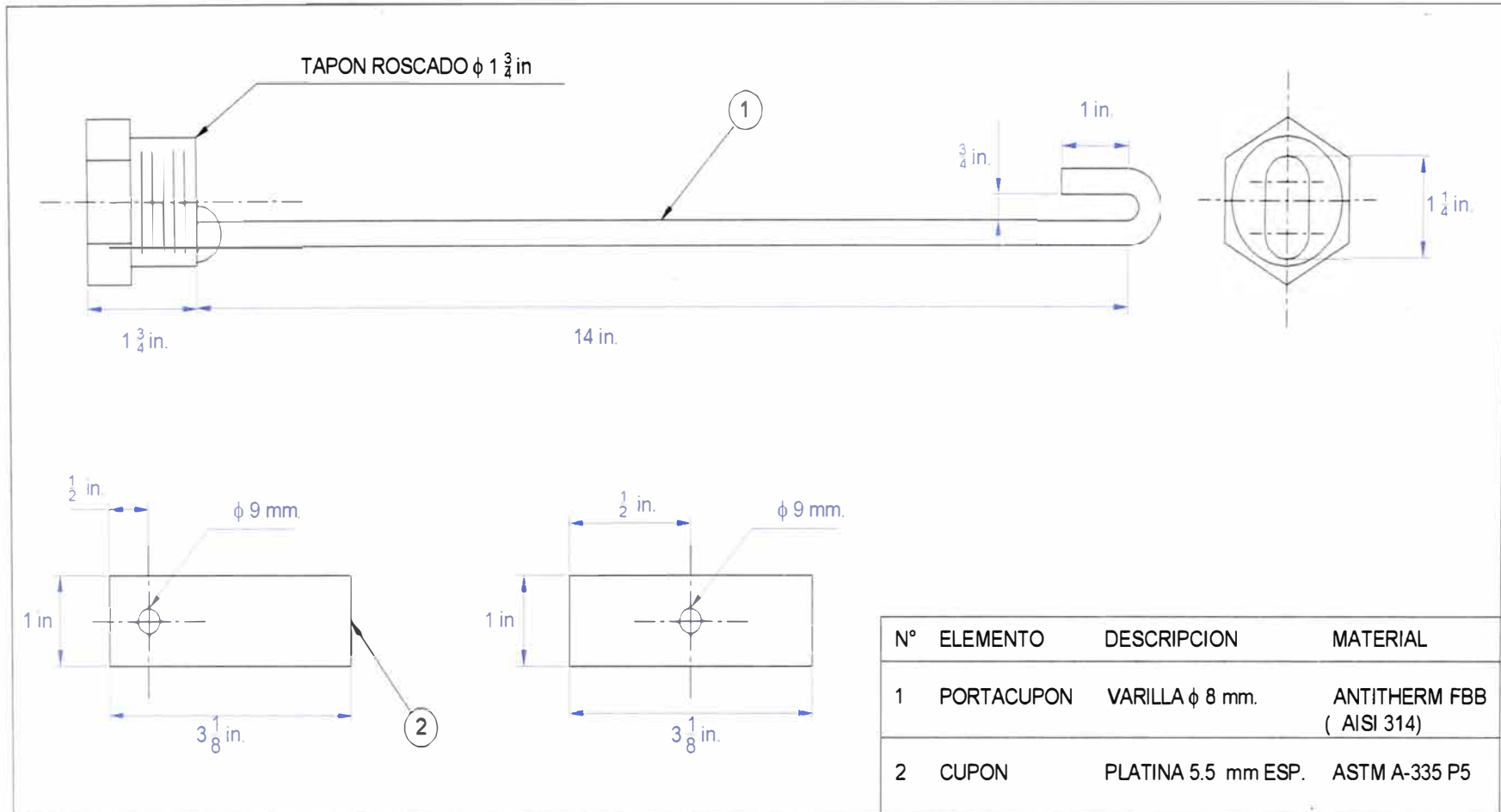
Con la finalidad de evaluar la velocidad de corrosión en condiciones críticas, cuando se alcanzan niveles de temperatura elevados y próximos a la de los gases de combustión, fueron colocados cupones de 5Cr-1/2Mo (Material de los Tubos), cuyo diseño estuvo limitado por:

- La disposición de los puntos de acceso que fueron empleados para la colocación de estos elementos de monitoreo (tapones roscados de 1 ½ pulg. diámetro). Por este motivo el ancho de los cupones estuvo limitado a **25.4mm (1 in)**.
- El espesor del material encontrado para la fabricación de los cupones (tubería 4" DN SCH 40). Por tal motivo el espesor de los cupones quedo limitado a **5.5 mm**.

Considerando una velocidad de corrosión de moderada a severa **40–60 MPY** esperada, una pérdida de peso de **10 gr** aproximadamente, se tomó como variables la longitud del cupón y el tiempo de exposición quedando estos fijados en **3 1/8 "** y **80 días** (3 meses) de exposición respectivamente.

La **Figura N°12** muestra el porta-cupón y los cupones que fue necesario diseñar y fabricar de manera tal que puedan ser instalados en los hornos, en la figura se indica las dimensiones de estos elementos y los materiales empleados. Para dicha evaluación se ha considerado el material de los tubos de horno: ASTM A-335 Gr.P5.

Figura N° 12 : DISEÑO DE CUPÓN Y PORTACUPÓN – ZONA RADIANTE Y CONVECTIVA HORNOS F-1 Y F-2



3.3.3. Tratamiento de los Cupones

Luego del retiro de cupones en los Hornos F-1 y F-2 se realizó la determinación de la velocidad de corrosión empleando el Método Gravimétrico y una solución de decapado de Ácido Nítrico al 10%.

En el **Anexo N°7** adjunto se muestran los resultados detallados de la aplicación del Método Gravimétrico para el tratamiento de los cupones obtenidos empleando los métodos ASTM G4-84, ASTM G1-81 y ASTM G31-72.

En el siguiente cuadro se resumen los resultados obtenidos:

Cuadro N°12. Velocidad de Corrosión en Hornos Mediante Cupones

ZONA	HORNO F-1			HORNO F-2		
	EXPOSICIÓN		RATE CORROS. MPY	EXPOSICIÓN		RATE CORROS. MPY
	TEMP.	TIEMPO		TEMP.	TIEMPO	
CONVECTIVA	1317-1355 °F	81 días 84 días	226.3 188.7	1355-1383 °F	84 días	108.1
CAJAS DE RETORNOS U-BENDS	NO HAY INDICADOR	81 días	3.7	NO HAY INDICADOR	84 días	1.41

Además se tienen los siguientes datos teóricos.

Cuadro N°13: Velocidades de Corrosión Teóricas.

CORROSIÓN POR OXIDACIÓN (AIRE)		
TEMP. EXPOSICIÓN	TIEMPO EXPOSICIÓN	RATE CORROSIÓN MPY
1330-1400 °F	1000 horas (42 días)	28.5-38.1

3.3.4. Conclusiones

1. La presencia de cromo y molibdeno en la composición del material ASTM A-335 Gr P5 forma una película de óxido protectora como se ha descrito en la sección 2.5.1.1. y de acuerdo a dicho comportamiento obedece teóricamente a la Ley Parabólica de crecimiento cuya expresión para la velocidad de oxidación a alta temperatura (en presencia de aire) es la siguiente:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{K}{\sqrt{Kpt + X_0}}$$

Esto nos indica que para la oxidación de dicho material la velocidad de corrosión irá disminuyendo con el transcurso del tiempo. Por lo que se puede deducir que para un tiempo de exposición de 84 días (2000 horas) la velocidad de oxidación registrada para el ASTM A-335 Gr P5 será un valor inferior al rango entre 28.5-38.1 MPY correspondiente a 1000 horas (24 días).

En consecuencia el margen de diferencia entre la velocidad de corrosión para el caso de estudio obtenido de 108.1-226.3 MPY y el valor teórico de

la velocidad de corrosión por oxidación (inferior al rango de 28.5-38.1 MPY) corresponderá a la corrosión producida por cenizas fundidas provenientes de los contaminantes (principalmente V y Na) contenidos en el combustible empleado en los hornos.

2. Estos resultados ponen en manifiesto el amplio margen dado por la corrosión por cenizas fundidas, verificándose con ello la importante participación de las cenizas en el proceso corrosivo de los materiales de los hornos.
3. En las cajas laterales de las Zonas Convectivas de los Hornos se obtuvieron valores de velocidad de corrosión del orden de 1.4-3.7 MPY para un material ASTM A-335 Gr P5, estos bajos valores indican que el efecto corrosivo de los gases producto de la combustión es mínimo para estas zonas, verificándose que las placas-soportes en esta zonas no permiten el paso de estos gases de combustión; por lo que la corrosión en las U-BENDS se debe principalmente al efecto erosivo (corrosión por erosión) producido por el cambio de flujo de la carga que circula a través de ellas.

4. MUESTREO DE CENIZAS Y DEPÓSITOS DE CORROSIÓN

El muestro de cenizas y depósitos de corrosión al igual que el monitoreo de la velocidad de corrosión de los tubos de los hornos dependen del programa de paradas de planta definidos por la refinería.

El análisis de cenizas muestreadas proporciona información adicional sobre los productos de corrosión y la cuantificación de ellos permite conocer el avance de la corrosión.

En la **Cuadro N°14** se muestran los análisis químicos que proporcionan información sobre la agresividad de las cenizas y su efecto en la corrosión de los metales.

Cuadro N°14: Análisis Químicos de Cenizas más comunes

ELEMENTOS	OSERVACIONES
%V y %Na	Si el Na está presente podría indicar la presencia de un depósito corrosivo sobre superficies a temperaturas mayores a 995 °F, los cuales se caracterizan por su adherencia.
%S	Para verificar la presencia de sulfatos corrosivos.
PH	Debe ser mayor que 3.5, para garantizar que un ataque por ácido sulfúrico no se produzca. Indica también la presencia de Magnesio si el pH es básico.

% Mg	<p>Se realiza en casos de tratamiento del combustible con un aditivo en base a magnesio.</p> <p>Se debe mantener la relación molar de $Mg/V = 3/1$ con el fin de neutralizar el efecto corrosivo de los depósitos de sodio y vanadio.</p>
-------------	--

Entre los análisis que se consideran más importantes para el estudio según la bibliografía son: %V y %Na.

Y en caso de un tratamiento del combustible con un aditivo en base de magnesio es muy importante el % Mg.

Se ha realizado la recopilación de información referente a los análisis de cenizas recogidos de las zonas radiante y convectiva, las que se resumen en los siguientes cuadros.

Cuadro N°15: ANÁLISIS DE CENIZAS – ZONA RADIANTE

FECHA	21/12/2000	03/01/2001	20/07/2002
UNIDAD	HORNO F-2	HORNO F-1 H-BENDS	HORNO F-2
%S	22.20	47.3	NI
%V	6.29	2.60	9.60
%Na	NI	4.30	8.40
%Fe	26.70	5.20	3.40
C%	37.40	35.90	NI

Cuadro N°16 ANÁLISIS DE CENIZAS ZONA -CONVECTIVA

FECHA	19/05/2000	21/12/2000	03/01/2001	20/07/2002
UNIDAD	HORNO F-2	HORNO F-2	HORNO F-1 (TUBOS)	HORNO F-2
%S	8.68	15.3	29.1	NI
%V	3.75	5.10	11.90	11.2
%Na	N.I	NI	11.40	9.80
%Fe	NI	NI	4.60	5.6
C%	NI	6.60	5.10	NI

Al respecto podemos realizar los siguientes comentarios:

1. Estos análisis verifican la presencia de óxidos de vanadio y de sodio los cuales son causantes de la formación de depósitos sobre la superficie de los tubos de los hornos.
2. La presencia de contaminantes (vanadio, sodio, azufre) y de fierro en la cenizas como lo muestran los análisis realizados en las zonas radiante y convectiva de los hornos, realizadas entre los años 2000 y 2001, confirman el antecedente registrado que se tiene (ver sección 2.1) como evidencia de la acción corrosiva por oxidación a alta temperatura y cenizas fundidas.
3. En el periodo de estudio, año 2002, se realizó el análisis de las cenizas para las zonas radiante y convectiva, como se muestran en los Cuadros N°15 y N°16. Estos análisis demuestran la presencia de contaminantes, principalmente vanadio en cantidades considerables, y con el perfil de temperaturas para este periodo, mostradas anteriormente en la sección 2.2.2., que fueron frecuentemente menores a las temperaturas de fusión de los compuestos formadores de escorias y depósitos (Ver Cuadro N°5), se puede deducir que principalmente contribuyó al ensuciamiento sobre la superficie de los tubos.

5.EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE COMBUSTIBLE PARA HORNOS CON ADITIVO A BASE DE ÓXIDO DE MAGNESIO

Para prevenir y minimizar los problemas ocasionados por la presencia de contaminantes en el combustible como el ensuciamiento y la corrosión por cenizas fundidas, se realizaron corridas de prueba de aditivación del combustible con un aditivo a base de óxido de magnesio durante un periodo de 2 meses.

Las características de este aditivo son:

Tipo	: Suspensión de Oxido de Magnesio, en medio acuoso.
Magnesio	: 24.66% como Mg, 59.6% como MgO en medio acuoso (Mg(OH) ₂).
Forma física	: Líquida.
Color	: Blanco.
Densidad	: 11.5-12.5 lb/gal.
Viscosidad a 60°F	: 500-3000 cps.
PH	: 9.2-9.6
Punto flash	: Ninguno.

5.1. SELECCIÓN DEL DILUYENTE DEL ADITIVO

Se observó que el aditivo como producto concentrado mostraba ser una suspensión poco estable. Este efecto unido a su alta viscosidad y las bajas velocidades lineales del mismo a través de las líneas de aditivación (bajo consumo), propiciaban la obstrucción en el tramo de descarga de la bomba de aditivo y en las tuberías de inyección a la línea de combustible hacia los hornos.

Así mismo debido a su alta concentración y al bajo consumo de combustible en los hornos (2.0-0.9 GPM) para lo que se requería niveles de flujo de aditivo muy bajos, fue necesario la dilución de tal aditivo en un medio adecuado.

Sobre la base de la composición del RCI (mezcla de diesel y residual) se eligió DIESEL como diluyente a fin de superar los inconvenientes observados en la aplicación del aditivo. Luego se realizaron diluciones en las proporciones de 1:1, 1:2 y 1:3 (ADITIVO:DIESEL), observándose una mayor estabilidad de la dilución 1:2 la cual se mantenía en suspensión durante más tiempo en comparación a las otras diluciones.

De este modo empleando la relación de dilución 1:2 se logró trabajar con un bajo % de apertura en la carrera de la bomba en comparación al producto concentrado, obteniéndose un mejor control de la dosificación y evitándose problemas de obstrucción.

5.2. ELEMENTO DE MONITOREO EMPLEADO DURANTE LAS CORRIDAS DE PRUEBA

Para realizar el monitoreo del efecto corrosivo en los hornos durante las corridas de prueba se diseñó y fabricó una probeta cuyas características se detallan a continuación:

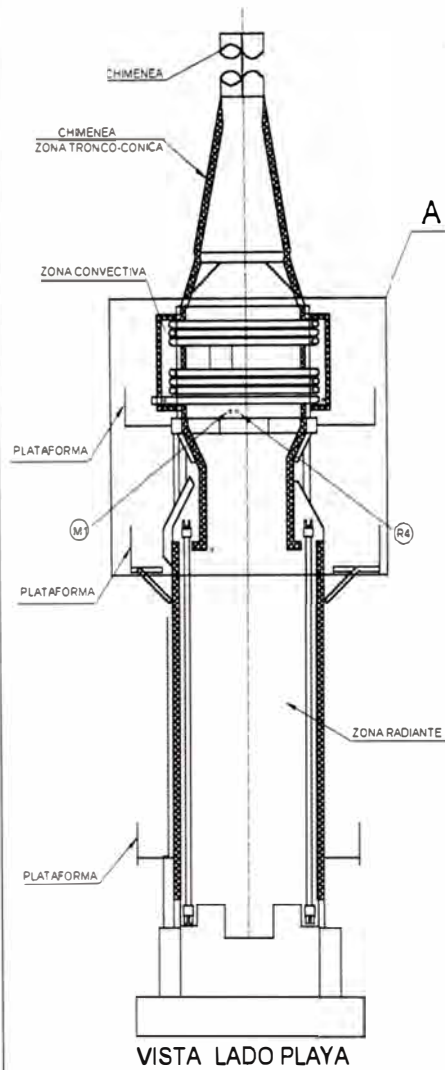
5.2.1. Descripción de la Probeta de Control Manual

La Probeta de Control Manual fue diseñada para ser usada en los Hornos a fin de efectuar el monitoreo del efecto corrosivo en estas unidades mediante la medición del rate de corrosión de un cupón refrigerado y el análisis de los depósitos recogidos de su superficie.

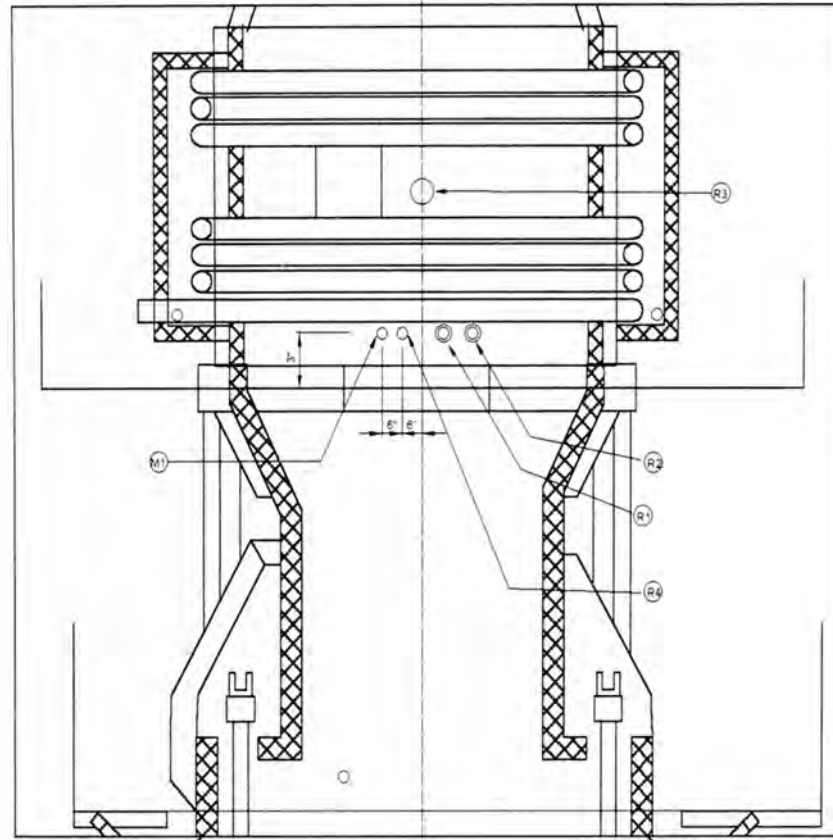
La ubicación para su instalación en los hornos así como los componentes que la conforman se muestran en los **Planos N°4 y N°5**.

Para el control y medición de la temperatura de la superficie interna de la probeta, esta cuenta con una termocupla tipo K, y puede ser refrigerada con aire comprimido para alcanzar la temperatura deseada.

HORNO F-1



DETALLE - A



PUNTO DE UBICACION DE PROBETA

MARCA	DESCRIPCION	UBICACION
M1	TAPON 2" Ø	ZONA CONVECTIVA - HORNO F-1

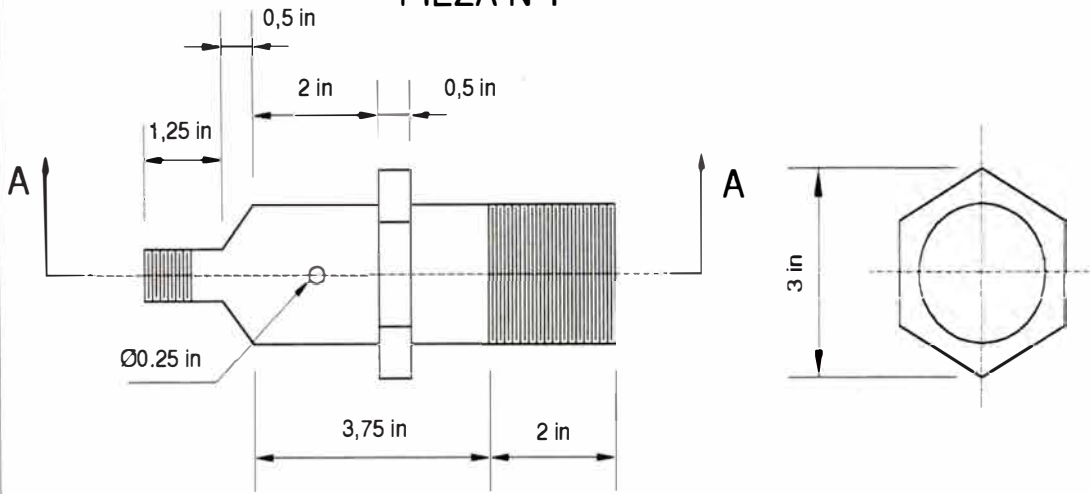
PUNTOS DE REFERENCIA

MARCA	DESCRIPCION	UBICACION
R1	BRIDA 1 1/2" Ø	ZONA CONVECTIVA - HORNO F-1
R2	BRIDA 1 1/2" Ø	ZONA CONVECTIVA - HORNO F-1
R3	DESHOLLINADOR	ZONA CONVECTIVA - HORNO F-1
R4	TAPON 2" Ø	ZONA CONVECTIVA - HORNO F-1

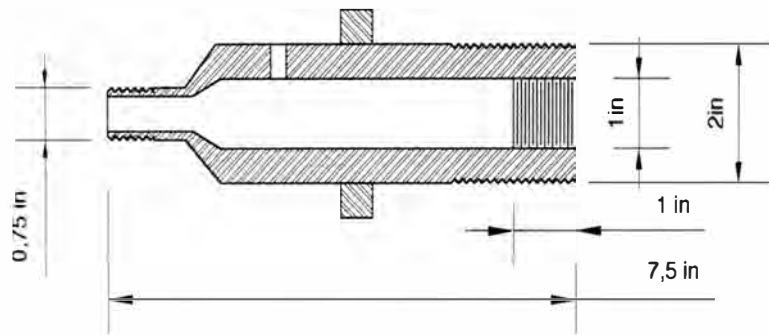
PLANO N°4: UBICACION DE PROBETA DE
CONTROL MANUAL
HORNO F-1 - REFINERIA CONCHAN

PREPARADO POR: DELIA FLOR CHILENO GONZALES
JUAN C. RAMIREZ VERASTEGUI

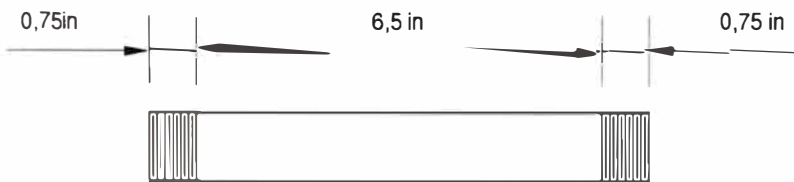
PIEZA N°1



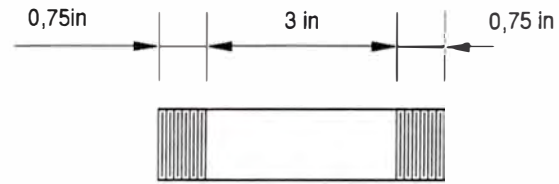
CORTE A-A



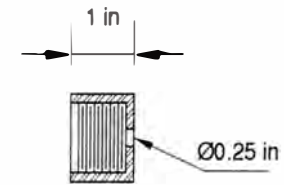
PIEZA N°2



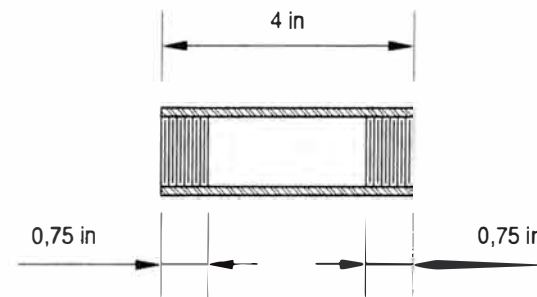
PIEZA N°4



PIEZA N°5



PIEZA N°3



VISTA SECCION LONGITUDINAL

PLANO N°5: PROBETA DE CONTROL MANUAL
DETALLE DE PIEZAS

PREPARADO POR: DELIA FLOR CHILENO GONZALES
JUAN CARLOS RAMÍREZ VERÁSTEGUI

La temperatura de la superficie interna de la probeta fue registrada con un calibrador tipo **FLUKE** y fijada a un valor similar a la temperatura de piel de tubos del horno lo cual se obtuvo regulando el flujo de aire comprimido a una presión entre 10-20 psi.

5.3. CORRIDAS DE PRUEBA REALIZADAS

La duración y desarrollo de las corridas de prueba realizadas estuvieron supeditados a trabajos de mantenimiento en los Hornos y a la corrección de fallas de los sistemas de aditivación, obteniéndose un periodo de 1 mes para la Corrida de Prueba Sin Aditivación y dos Corridas de Prueba Con Aditivación con una duración de un mes cada una.

5.3.1. CORRIDA DE PRUEBA SIN ADITIVACIÓN

Esta corrida de prueba incluyó las siguientes actividades:

1. Registro de Variables Operativas de los Hornos.
2. Monitoreo con Probeta de Control Manual.

5.3.1.1.-Registro de Variables Operativas de los Hornos

Durante esta primera etapa se efectuó una verificación de las condiciones operativas del Horno F-1 en el cual fue instalada la Probeta de Control Manual. En el siguiente cuadro se resumen las condiciones operativas en esta etapa.

VARIABLE OPERATIVA	HORNO F-1	HORNO F-2
VISCOSIDAD DE COMBUSTIBLE (CST 50°C)	300-465	300-465
FLUJO DE COMBUSTIBLE (GPM)	1.5-2.5	1.14-1.57
PRESIÓN DE COMBUSTIBLE (PSI)	55-90	43-70
TEMPERATURA DE PIEL DE TUBOS (°F)	700-971	814-1127
TEMPERATURA DE GASES (°F)	990-1080	
CARGA TOTAL (BPD)	6800-9430	

5.3.1.2.-Monitoreo con Probeta de Control Manual

El objetivo del monitoreo con la Probeta de Control Manual en esta primera etapa fue la recolección de depósitos formados sobre la superficie de esta con el fin de compararlos con los depósitos formados cuando se realiza el tratamiento del combustible con el aditivo, para verificar la capacidad del aditivo de cumplir con la función de formar compuestos de alto punto de fusión no corrosivos y de textura sumamente friable, facilitando la limpieza de la superficie externa de los tubos del horno durante la operación de deshollinado. Asimismo definir los parámetros operativos de aditivación.

Se definió inicialmente un periodo de 15 días exposición de la probeta antes de realizar la toma de muestra de los depósitos. Culminado este periodo se efectuó la inspección de la probeta encontrándose necesario ampliar este periodo por 15 días más a fin de recolectar una cantidad suficiente de depósitos de corrosión sobre la superficie de la probeta.

Los depósitos formados sobre la Probeta de Control Manual en esta etapa fueron de naturaleza compacta y muy adherente como se puede observar en el Record Fotográfico mostrado en la Sección 5.3.3. (Pagina N°180).

5.3.2. CORRIDA DE PRUEBA CON ADITIVACIÓN

Esta corrida de prueba incluyó las siguientes actividades:

1. Selección de la Dosis Inicial de Aditivo.
2. Registro de Variables Operativas de los Hornos.
3. Control y Ajuste de los Parámetros.
4. Monitoreo con Probeta de Control Manual.
5. Análisis de los Resultados Obtenidos.

5.3.2.1. Selección de la Dosis de Aditivo

La dosis de aditivo se fijó sobre la base del nivel promedio de contaminantes de Vanadio y Sodio presentes en el combustible usado en los hornos cuyo valor fue de 250 ppm. El cálculo se determinó de la siguiente forma:

Reacción:	3MgO	+	V ₂ O ₅	→	3MgO*V ₂ O ₅
	3 MOLES		1 MOL		PIROVANADATO
Átomos	3 átomos Mg		2 átomos V		
# de átomos	3		2		
Peso atómico	24		51		
Pesos (gr)	72		102		
Combustible:			Aditivo:		
Ppm (Vanadio+Sodio) =	250		Concentración:	59.6 %	MgO, en medio acuoso (Mg(OH) ₂)
				24.66 %	Mg
1ppm=3.785 mg/gal			100 gr de Aditivo contiene:		
1ppm=3785 mg/1000gal			59.6 gr		Mg(OH) ₂
mg V /1000 gal combust.=	946250		24.66 gr		Mg
g V/1000gal combust.=	946.25				
			Densidad=	1.38	gr Aditivo/mL MINIMO
gr Mg/1000 gal combust. NECESARIOS	667.9			1.5	gr Aditivo/mL MAXIMO
				1.44	gr Aditivo/mL PROMEDIO
			Densidad Promedio=	681.3	gr Aditivo/PTS
					gr Mg ATOM./PTS
				168.0	ADITIVO
Para los 1000 gal de combustible con 250 ppm de V					
Necesario Mg (gr)=	667.9				
PTS=	4.00				

Donde 1PTS equivale a 1/8 de Galón.

5.3.2.2.Registro de variables operativas Hornos y Sistema de Suministro de Combustible

Para el levantamiento de información de la las variables operativas de los Hornos se han considerado las variables mostradas en el siguiente cuadro:

VARIABLE	COMENTARIO
Presión de Combustible	Permite verificar la presión de descarga de la bomba de aditivo. Ambas presiones deberán ser iguales o muy cercanas. Permite verificar si existe obstrucción en la línea de combustible durante la corrida de prueba.
Flujo de Combustible	Permite calcular la dosificación real del aditivo.
Presión de las boquillas de los quemadores	Permite verificar si existe obstrucción en la línea de combustible independiente de cada quemador.
Diferencial de Presión	Permite verificar la correcta atomización durante la corrida.
Temperatura de piel de tubos	Para ajustar la temperatura de la Probeta de Control Manual la cual deberá ser cercana a la temperatura de piel de tubos durante la corrida de prueba.
Temperatura de Gases en la Zona Convectiva y de Gases de Chimenea	Para verificar que el perfil de temperatura dentro del horno se mantiene dentro de los rangos típicos.
Temperatura en el Tanque 39, Presión de descarga de la bomba de suministro de combustible y Temperatura de salida del intercambiador E-23.	Verificar el correcto desempeño de los equipos del circuito de precalentamiento de combustible durante las corridas de pruebas.

Se realizó el levantamiento de datos de las variables operativas de los hornos como se muestra en los **Cuadros N°17 y N°18 (Horno F-1), Cuadros N°19 y N°20 (Horno F-2)**, así como del sistema de suministro de combustible y del volumen de carga procesada las cuales se detallan en el **Anexo N°8**.

5.3.2.3. Control y Ajuste de los Parámetros de Aditivación de Combustible

Para el control de la dosificación se procedió al registro el nivel del tanque de aditivo cada (4) horas en un medidor de nivel de columna graduada registrándose así mismo otras variables operativas necesarias. Como se muestra en los **Cuadros N°17 y 18** (Horno F-1) y **Cuadros N°19 y N°20** (Horno F-2).

Para la dosificación del aditivo se usó unidades de PTS (1/8 de Galón) sobre una base de 1000 Galones de combustible.

Un ejemplo de cálculo de los PTS de ADITIVO por cada 1000 GAL del combustible suministrados se muestra en el **Cuadro N°21**.

Los resultados de control de los parámetros de aditivación se muestran en los **Cuadros N°22** (Horno F-1) y **N°23** (Horno F-2), al respecto en el **Cuadro N°24** de realizan algunos comentarios acerca de los resultados más relevantes.

Cuadro N°17: DATOS DE ADITIVACION EN F-1 CON QUEMA DE RCI

FECHA	HORA	CAMPO : ADITIVO HORNO F-1			CAMPO : HORNO F-1								
		CARRERA	PRESION DESCARGA (PSI)	ALTURA TANQUE ADITIVO (cm)	PRESION RETORNO F-1 (PSI)	PRESION COMBUSTIBLE MANOMETRO (PSI)	PRESION COMBUSTIBLE PT-104 (PSI)	DIFERENCIAL PRESION DPT-10	FLUJO COMBUSTIBLE FT-131 (GPM)	QUEMADOR 1 LADO PLANTA	QUEMADOR 2 LADO MANTENIM.	QUEMADOR 3 LADO PISTA NORTE	QUEMADOR 4 LADO PISTA SUR
PRIMERA CORRIDA DE PRUEBA													
12/02/03	7 22 PM	12	45	30.5		46	39.8		1.55	50 - 75 6.00 PM	30 - 65 6.00 PM	45-100 6.00 PM	40 - 100 6.00 PM
13/02/03	9 00 AM	12	50	22.3		40	35.7		1.62	"	"	"	"
13/02/03	12.00 AM	12	50	20.3		50	43.8		1.82	50-78	28-65	50-100	44-75
13/02/03	5 25 PM	12	60	17.2		60	51.3		2.01	"	"	"	"
14/02/03	9 45 AM	12	85	8.1		86	77.4		2.27	2 - 0 (F/S)	55 - 94	82 - 120	55 - 80
14/02/03	4 53 PM	12	70	4.7		70	66.0		2.18	46 - 0 (F/S)	60 - 94	70 - 120	49 - 90
14/02/03	8 00 PM	12	70	36.1		70	67.8	24.60	2.22	50 - 0 (F/S)	55 - 94	72 - 120	50 - 90
15/02/03	10 13 AM	12	70	28.2	230	70	61.1	31.28	2.24	46 - 0 (F/S)	65 - 94	65 - 120	58 - 90
15/02/03	4 19 PM	12	70	25.4	230	70	62.9	30.60	2.18	52 - 0 (F/S)	65 - 96	66 - 120	60 - 90
16/02/03	11 15 AM	12	70	14.2	230	68	61.1	29.80	2.02	0 - 0 (F/S)	60 - 92	64 - 116	45 - 90
17/02/03	8 50 AM	12	60	2.4	210	60	56.9	32.42	1.83	0 - 0	60 100	60 - 120	45 - 90
17/02/03	10 13 AM	12	50	34.9	215	60	55.9	33.30	1.83	0 - 0	60 - 90	60 - 118	43 - 90
17/02/03	5 12 PM	12	60	31.2	230	60	55.6	33.90	1.75	0 - 0	55 - 92	59 - 118	49 - 90
18/02/03	9 00 AM	12	60	22.2	230	60	55.7	26.00	1.75	0 - 0	50 - 85	60 - 115	40 - 80
18/02/03	4 27 PM	12	70	19.1	250	74	68.5	27.00	2.45	0 - 0	55 - 96	72 - 120	44 - 90
19/02/03	3 54 PM	12	90	7.5	260	85	78.2	24.40	2.35	0 - 90	55-100	80-128	48-100
19/02/03	6 10 PM	12	90	38.6	255	82	76	23.00	2.3	0 - 90	55-100	80-124	46-100
20/02/03	10 30 A.M	12	70	35	250	70	62.2	26.75	2.07	0 - 70	50-90	65-117	37-85
20/02/03	3 03 PM	12	80	38	250	75	68.6	24.84	2.18	0 - 80	50-94	72-120	40-90
21/02/03	10 00 A.M	12	65	26	245	62	56.7	25.03	1.92	0 - 70	50-82	48-113	30-80
21/02/03	10 40 A.M	12	70	20.1	240	75	67.6	25.22	2.21				
21/02/03	6 39 PM	12	85	16	240	86	81	20.00	2.37	0 - 85	60 - 100	62 - 124	42 - 100
22/02/03	10 11 AM	12	90	44	235	88	80.2	15.18	2.31	0 - 80	50 - 96	58 - 119	43 - 90
22/02/03	4 37 PM	12	85	41.1	230	82	79.2	14.96	2.32	0 - 80	55 - 94	48 - 118	54 - 90
24/02/03	8 40 A.M	12	80	21	265	77.6	85	17.1	2.5	0 - 80	55 - 100	55 - 117	50 - 90
24/02/03	7 00 PM	12	80	56.8	265	82	76	18.6	2.34	0 - 80	55 - 100	50 - 120	55 - 90
25/02/03	9 25 AM	12	75	48.2	260	72	66.2	27.98	2.32	0 - 80	55 - 100	54 - 118	49 - 90
25/02/03	6 15 PM	12	75	43.2	265	76	70.2	24.25	2.25	0-80	50 - 94	56 - 118	52 - 90
26/02/03	10 15 AM	12	75	34.5	265	74	68.7	25.07	2.2	0 - 80	50 - 92	50 - 118	50 - 90
26/02/03	6 03 PM	12	70	31.6	265	70	65	29.28	2.05	0 - 80	50 - 94	50 - 118	48 - 90
00 01 00	10 00 AM	12	80	22.2	270	78	70.3	23.9	2.37	0 - 80	50 - 94	58 - 119	46 - 90

Cuadro N°17:(Continuación)

SEGUNDA CORRIDA DE PRUEBA													
10/03/03	11:00 A.M	12	70	46.1	250	78	63.4	23.5	2.5	50-80	50-72	54-117	42-90
10/03/03	5:03 P.M	12	70	45.3	245	70	65.2	21.8	2.53	50-80	45-72	55-117	42-90
11/03/03	2:00 P.M	12	70	35.5	248	70	63.7	23.86	2.59	50-80	50-75	55-117	45-90
12/03/03	9:15 A.M	12	70	24.4	250	70	63.2	24.56	2.58	80-50	50-75	55-118	45-90
12/03/03	4:26 P.M	12	70	21.5	260	70	60.1	25.87	2.47	50-80	50-75	60-118	42-90
13/03/03	9:32 A.M	12	70	27.5	260	70	57.1	28.90	2.16	50-80	50-70	50-118	40-90
13/03/03	5:02 P.M	12	70	23.8	260	70	58.4	28.10	2.19	50-75	45-75	50-117	42-90
14/03/03	6:00 P.M	12	60	46	240	64	59.7	25.20	2.2	50-80	40-72	54-114	46-90
15/03/03	9:15 A.M	12	70	46	240	68	61	25.10	2.23	45-74	51-118	45-90	50-75
15/03/03	3:00 P.M	12	80	43.4	240	75	60	25.00	2.3	60-85	40-80	55-120	54-100
16/03/03	9:10 A.M	12	80	33.7	250	78	71.7	24.00	2.15	60-85	40-80	55-120	52-100
17/03/03	2:40 P.M	12	90	18.9	250	80	74.7	21.60	2.11	60-85	45-80	54-124	54-100
18/03/03	9:00 A.M	12	90	26	250	90	83	13.23	2.32	50-90	40-80	57-120	56-100
18/03/03	5:20 P.M	12	90	22.0	240	88	78	20	2.12	50-90	40-80	55-120	55-100
22/03/03	1:38 P.M	12	70	38.5	220	64	58.5	20.1	2.39	50-70	40-68	48-108	36-80
23/03/03	9:03 A.M	12	70	28.4	280	70	65	12.8	2.34	50-70	40-68	48-108	40-80
24/03/03	6:07 P.M	12	80	12.4	255	78	72.5	22.9	2.33	50-85	45-82	60-122	50-95
25/03/03	6:15 P.M	12	70	33.4	230	72	67.5	26.2	2.10	48-85	45-82	56-120	46-95
26/03/03	5:10 P.M	12	80	21.8	280	82	76.8	18	2.67	50-85	50-82	60-122	50-95
27/03/03	5:00 P.M	12	80	11.3	285	78	71.7	22.7	2.28	50-55	40-80	60-124	48-95
27/03/03	5:20 P.M	12	75	44.8	280	74	69.5	24.9	2.26	50-85	40-80	60-124	50-95
28/03/03	7:20 P.M	12	85	30.5	255	82	77.7	16.9	2.56	52-85	40-80	64-124	55-95
29/03/03	11 A.M	12	80	24.5	245	80	74.9	18.36	2.55	52-85	40-80	62-122	52-95

Cuadro N°18 : Datos de DCS - Horno F1

DATOS DCS: HORNO F1										
FECHA	HORA	TE-260 PIELTUBO	TE 262 PIEL TUBO	TE 3 PIELTUBO	TE 4 PIEL TUBO	TE 5 GASES CONVECT.	TE 258 GASES CHIM	% PIC-108	% TIC-1A	CONTOMETRO GAL
PRIMERA CORRIDA DE PRUEBA										
12/02/03										
13/02/03										
13/02/03										
13/02/03										
14/02/03	10.22 PM	1836	775	890	1836	1836	1000			
14/02/03										
14/02/03	8.00 PM	1836	765	876	1836	1836	1006			
15/02/03	10.25 AM	1836	772	890	1836	1836	1001	33	78	
15/02/03	4.30 PM	1836	777	898	1836	1836	1015	39	79	****
16/02/03	11.30 AM	1836	753	848	1836	1836	963	24	54	253128
17/02/03	9.00 AM	1836	716	806	1836	1836	941	30	58	255494
17/02/03	5.18 PM	1836	720	808	1836	1836	938	36	49	256451
18/02/03	9.15 AM	1836	707	796	1836	1836	930	20	50	258151
18/02/03	4.27 PM	1836	792	915	1836	1836	1055	17	65	259215
19/02/03	4.21 P.M	1836	798	901	1836	1836	1039	31	63	262737
19/02/03	6.20 P.M	1836	793	897	1836	1836	1040	25	65	263009
20/02/03	10.37 A.M	1836	784	869	1836	1836	998	21	54	265204
20/02/03	3.14 PM	1836	793	886	1836	1836	1018	19	59	265790
21/02/03	10.00 AM	1836	770	872	1836	1836	1000	31	58	268111
21/02/03	6.55 PM	1836	813	938	1836	1836	1060	28	71	269331
22/02/03	10.26 AM	1836	782	914	1836	1836	1022	32	66	271547
22/02/03	4.45 PM	1836	785	914	1836	1836	1031	30	70	272434
24/02/03	8.55 A.M	1230	775	898	1836	1836	1062	17	63	277999
24/02/03	7.12 PM	1224	700	913	1836	1853	1053	30	63	279551
25/02/03	9.46 AM	1836	771	886	1836	1836	1046	23	59	281551
25/02/03	6.20 PM	1836	773	899	1836	1836	1035	25	57	282742
26/02/03	10.15 AM	1836	753	861	1836	1836	1022	21	56	284818
26/02/03	6.03 PM	1836	746	848	1836	1836	1012	25	51	285839
27/02/03	10.19 AM	1836	778	886	1836	1836	1054	35	54	287977
SEGUNDA CORRIDA DE PRUEBA										
10/03/03	11.11 A.M	1836	821	951	951	1036	1066	26	53	323210
10/03/03	5.20 P.M	1836	819	950	1836	1836	1062	32	53	324128
11/03/03	2.00 P.M	1836	829	971	1836	1836	1069	39	55	327325
12/03/03	9.15 AM	1836	827	965	1836	1836	1080	24	54	330323
12/03/03	4.47 P.M	1812	824	961	1836	1836	1067	33	51	331426
13/03/03	9.53 A.M	1836	797	911	1836	1836	1029	35	47	333705
13/03/03	5.02 P.M	1836	801	922	1836	1836	1034	21	47	334665
14/03/03	6.20 P.M	1836	786	915	1836	1836	1046	17	49	337967
15/03/03	9.15 A.M	1836	779	903	1836	1836	1048	17	49	339941
15/03/03	2.59 P.M	1836	788	919	1836	1836	1064	28	52	340727
16/03/03	9.10 A.M	1836	781	905	1836	1836	1060	32	49	343099
17/03/03	2.52 P.M	1836	790	938	1836	1836	997	45	50	347096
18/03/03	8.59 A.M	1836	790	933	1836	1836	1022	100	51	349514
18/03/03	5.30 P.M	1836	790	933	1836	1836	1033	41	51	350628
22/03/03	1.38 PM	1836	776	913	1836	1836	979	75	54	361846
23/03/03	9.03 AM	1836	788	907	1836	1836	1025	50	49	364279
24/03/03	6.07 PM	1836	774	891	1836	1836	1026	40	53	368977
25/03/03	6.15 P.M	1836	792	915	1836	1836	979	30	53	371943
26/03/03	5.10 PM	1836	820	959	1836	1836	1069	18	53	374836
27/03/03	5.05 P.M	1836	985	905	1836	1836	1055	24	51	378314
28/03/03	7.15 P.M	1836	812	994	1836	1836	1104	55	58	381910
29/03/03	11.00 A.M	1836	803	941	1836	1836	1108	40	58	384390

Cuadro N°19: DATOS DE ADITIVACION EN F-2 CON QUEMA DE RCI

CAMPO: ADITIVO HORNO F-2													
FECHA	HORA	CARRERA	PRESION DESCARGA (PSI)	ALTURA TANQUE ADITIVO (cm)	PRESION RETORNO F-2 (PSI)	PRESION COMBUSTIBLE MANOMETRO (PSI)	PRESION COMBUSTIBLE PT-105 (PSI)	DIFERENCIAL PRESION DPT-10	FLUJO COMBUSTIBLE FT-131 (GPM)	QUEMADOR 1 PISTA SUR COMB - VAP	QUEMADOR 2 LADO CERRO	QUEMADOR 3 LADO PISTA PLANTA	QUEMADOR 4 LADO PISTA NORTE
PRIMERA CORRIDA DE PRUEBA													
12/02/03	7.32 PM	11	50	16.0		52	48.7		1.28	0 - 70 (F/S)	50-50	40 - 70	45 - 70
13/02/03	8.54 AM	11	50	15.2		30	45.0		1.28	*	*	*	*
13/02/03	12.20 PM	11	30	15.0		34	29.2		1.16	0 - 55 (F/S)	35 - 50	30 - 60	30 - 55
13/02/03	5.23 AM	11	50	13.8		50	39.0		1.13	*	*	*	*
14/02/03	9.46 AM	11	40	9.8		44	30.7		1.12	0 - 50 (F/S)	35 - 50	25 - 60	30 - 60
14/02/03	4.55 PM	11	55	7.9		34	30.7		1.13	0 - 60 (F/S)	35 - 50	30 - 60	30-60
14/02/03	7.48 PM	11	40	39.7		38	33.4	26.1	1.15	0 - 60 (F/S)	40 - 50	30 - 60	30 - 60
15/02/03	10.15 AM	11	40	34.4	240	40	34.6	23.6	1.13	15 - 60 (F/S)	40 - 60	30 - 60	30 - 80
15/02/03	4.25 PM	11, 10	50	32.3	240	48-50	41.3	20.9	1.13	25 - 50	20 - 60	30 - 60	30 - 80
16/02/03	11.15 AM	10	70	31.0	240	68	64.0	20.1	1.47	40 - 75	70 - 60	50 - 80	40 - 80
17/02/03	8.45 AM	10	50	30.0	215	50	44.0	33.6	1.27	40 - 60	50 - 60	40 - 80	28 - 75
17/02/03	5.10 PM	10	50	29.1	240	50	49.5	25.5	1.06	35-70	55-60	40-75	30-70
18/02/03	8.40 AM	10	55	27.9	240	55	52.0	24.0	1.07	40 - 60	55 - 50	45 - 75	85 - 70
18/02/03	10.50 AM	11	70	27.8	250	72	68.7	19.3	1.27	70 - 95	60 - 85	50 - 90	50 - 85
18/02/03	4.25 PM	11	60	27.4	260	70	63.1	23.1	1.14	65 - 100	55 - 80	45 - 90	45 - 85
19/02/03	3.55 P.M	11	80	24.4	270	80	74.0	13.0	1.22	75-100	60-90	50-90	45-85
20/02/03	3.00 P.M	12	80	16.0	260	70	69.2	13.3	1.38	70-90	70-90	40-85	50-80
21/02/03	10.00 A.M	12	45	9.5	260	42	38.0	27.6	1.12	45-70	45-70	38-65	40-85
21/02/03	10.38 A.M	11	50	15.4	246.0	44	40.5	27.0	1.13				
21/02/03	6.40 PM	11	50	12.4	250.0	50	48.8	27.7	1.15	50 - 80	50 - 80	40 - 75	45 - 70
22/02/03	10.14 PM	11	60	42.8	250.0	60	54.8	27.1	1.16	50 - 90	50-80	45 - 85	40 - 80
24/02/03	FUERA DE SERVICIO. SE COMPROBÓ OBSTRUCCION EN LA LINEA. SE INTENTO LIMPIEZA CON DIESEL , SIN ÉXITO. SE COLOCO ORDEN DE TRABAJO PARA LIMPIEZA , OBSTRUCCION DEBIDA POSIBLEMENTE A LA FALTA DE AGITACION, SE COORDINA INSTALACION REEMPLAZO DE RELAY												
26/02/03	5.50 PM	12	60	31.5	275.0	60	55.0	26.2	0.99	35 - 90	50 - 90	45 - 85	45 - 80
27/02/03	10.00 A.M	12	70	24.8	280.0	64	70.0	18.0	1.15	40-90	50-80	50-80	45-80

Cuadro N°19: (Continuación)

SEGUNDA CORRIDA DE PRUEBA													
10/03/03	11:00 A.M	12	60	45.3	250.0	65	56.4	26.4	1.3	40-85	60-80	50-85	40-80
10/03/03	5:00 P.M	12	60	41.0	250.0	65	58.0	23.7	1.37	45-90	65-80	50-85	40-80
11/03/03	2:00 P.M	11	60	30.6	250.0	52	50.0	30.7	1.27	40-90	60-90	45-85	40-80
12/03/03	9:13 A.M	11	60	22.5	250.0	53	55.0	30.9	1.22	40-90	60-80	45-85	40-80
12/03/03	4:38 P.M	11	65	21.4	220.0	60	59.0	22.6	1.34	40-90	65-90	50-85	40-80
13/03/03	9:40 A.M	11	60	35.7	270.0	55	49.0	32.3	1.16	40-90	50-90	45-85	40-80
13/03/03	4:50 P.M	11	60	34.0	260.0	55.0	51	31.30	1.18	40-90	50-90	45-85	40-80
14/03/03	6:00 P.M	11	50	40.2	250.0	64	47.3	36.18	1.1	40-80	50-70	40-79	40-80
15/03/03	9:15 A.M	11	50	34.5	250.0	64	51.2	32.60	1.11	40-85	55-70	40-85	40-80
15/03/03	2:50 P.M	11	60	32.5	250.0	55	55.4	28.40	1.14	40-90	55-80	40-85	40-80
16/03/03	9:10 A.M	11	60	25.0	260.0	66	61.5	21.50	1.2	40-80	50-70	40-80	40-80
17/03/03	2:40 P.M	11	60	16.0	250.0	55	52.0	29.00	1.08	40-90	50-80	40-80	40-80
18/03/03	8:50 A.M	11	55	23.5	260.0	50	48.0	18.90	1.06	30-60	35-60	30-60	30-60
18/03/03	5:21 P.M	11	50	20.8	250.0	50	41	19.40	1.03	30-60	35-60	30-60	30-60
22/03/03	1:38 P.M	11	70	34.0	240.0	65	60	26.68	0.96	40-90	60-80	40-90	20-85
23/03/03	9:00 A.M	11	70	27.9	286.0	68	63	23.10	1.16	40-90	60-80	40-90	20-85
24/03/03	6:07 P.M	11	60	24.0	260.0	60	58	26.60	1.12	35-90	50-80	40-85	50-85
25/03/03	6:10 P.M	11	55	23.5	240.0	56	51.8	32.60	1.10	40-85	50-80	40-85	45-85
26/03/03	5:05 P.M	11	70	19.5	272.0	72	69.1	16.40	1.22	50-90	75-70	50-85	50-85
27/03/03	6:03 P.M	11	80	14.7	300.0	80	73	19.00	1.86	55-100	60-100	65-90	60-80
27/03/03	6:15 P.M	11	70	46.3	300.0	70	66.8	25.40	1.95	60-90	60-90	70-100	55-100
28/03/03	7:20 P.M	11	50	41.9	266.0	54	50.5	40.20	1.25	50-100	45-100	50-90	50-80
29/03/03	11:0 A.M	11	50	37.0	250.0	50	44	23.00	1.2	50-80	35-80	40-75	40-75

Cuadro N°20: Datos de DCS - Horno F-2

DATOS DCS: HORNO F-2								
FECHA	HORA	TE-45 PIEL TUBO	TE-46 PIEL TUBO	TE-261 GASES CONVECT.	TE-47 GASES CHIM.	% PIC-108	% TIC-1103	CONTOMETRO GAL
PRIMERA CORRIDA DE PRUEBA								
12/02/03						*	*	
13/02/03						*	*	
13/02/03						*	*	
13/02/03						*	*	
14/02/03	10.24 PM	1836	835	1038	687	*	*	
14/02/03						*	*	
14/02/03	8.00 PM	48.6	864	1087	697	*	*	
15/02/03	10.25 AM	276	864	1083	694	*	*	
15/02/03	4.30 PM	-36	833	1055	689	*	*	
16/02/03	11.20 AM	-36	1025	1387	857	23	53	
17/02/03	9.00 AM	-36	809	1068	764	30	28	149186
17/02/03	5.10 PM	-36	819	1050	744	36	15	149805
18/02/03	8.56 AM	-36	857	1119	764	25	22	150966
18/02/03	10.50 AM	-36	993	1302	830	21	35	*****
18/02/03	4.34 PM	-36	959	1256	831	18	32	151538
19/02/03	4.06 P.M	-36	1004	1320	862	31	37	153292
19/02/03	6.10 P.M	-36	1021	1340	869	26	39	153456
20/02/03	3.11 P.M	999	1082	1428	903	19	44	155055
21/02/03	10.19 P.M	1836	934	1221	828	33	25	156581
21/02/03	10.19 P.M	1836	934	1221	828	33	25	156581
21/02/03	6.57 PM	1754	986	1292	835	28	30	157187
22/02/03	10.23 AM	1311	972	1299	832	32	33	158243
26/02/03	6.03 AM	972	953	1263	827	27	22	165408
27/02/03	10.00 AM	1018	992	1319	855	27	31	166430
SEGUNDA CORRIDA DE PRUEBA								
10/03/03	11.08 A.M	1085	1039	1392	908	25	45	184276
10/03/03	5.17 P.M	1122	1058	1401	911	32	44	184760
11/03/03	2.23 P.M	1017	988	1314	882	39	39	186361
12/03/03	9.32 A.M	1041	996	1330	887	23	39	187766
12/03/03	4.49 P.M	1127	1061	1406	919	33	41	188309
13/03/03	9.51 A.M	1008	976	1286	877	34	30	189556
13/03/03	5.01 P.M	1020	987	1297	877	21	30	190058
14/03/03	6.20 P.M	992	944	1229	855	30	32	191787
15/03/03	9.05 A.M	994	956	1246	858	20	36	192769
15/03/03	2.58 P.M	1038	984	1294	880	29	32	193173
16/03/03	9.10 A.M	1061	1026	1331	892	31	34	194469
17/03/03	2.50 P.M	995	994	1292	838	46	21	196421
18/03/03	8.58 A.M	987	968	1261	833	100	18	197609
18/03/03	5.28 P.M	954	960	1265	591	42	14	198145
22/03/03	1.38 P.M	917	897	1156	794	75	26	
23/03/03	9.00 A.M	965	1039	1355	887	0	29	205366
24/03/03	6.22 PM	1021	994	1296	861	40	31	207637
25/03/03	6.10 P.M	941	1018	1299	865	30	30	209223
26/03/03	5.05 PM	1056	1085	1424	913	20	38	210756
27/03/03	5.08 P.M	1234	1246	1627	1023	22	69	213128
28/03/03	7.20 P.M	960	937	1222	917	55	42	216081
29/03/03	11.0 A.M	943	917	1199	903	40	42	

Cuadro N°21 :EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA DOSIFICACIÓN REAL DEL ADITIVO

FECHA	CARRERA	INICIO DE CORRIDA				FINAL DE CORRIDA				PTS ADITIVO/1000 GAL COMBUST
		HORA DE INICIO	PRESION (psig)	H INICIAL (cm)	GPM. COMBUST.	HORA FINAL	PRESION (psig)	H FINAL	GPM. COMBUST.	
04/05/03	12	10:40:00 a.m.	70	20.1	2.21	6.39 p.m.	85	16	2.37	4.0

<p>1. Diferencia de altura = 20.1 - 16.0 = 4.1 cm. Mililitros de Aditivo diluido consumidos= 6363.2 mL. Tiempo = 479 min.</p>	<p>3. $[GPH_{(Aditivo\ diluido)}/GPM_{(Combustible)PROMEDIO}] * 133.33 = 12.22$ PTS_{ADITIVO DILUIDO} / 1000 GAL COMBUSTIBLE</p>
<p>2. mL/min (Aditivo diluido) = 13.28 GPH (Aditivo diluido) = 0.21 GPH. GPM_{(COMBUSTIBLE)PROMEDIO}=(2.21+2.37)/2=2.29 GPM.}</p>	<p>4. DILUCION: 2:1 , FACTOR DE DIVISIÓN =3 DILUCION: 1:1 , FACTOR DE DIVISIÓN =2 En este caso se trabaja con una dilución 2:1, entonces el factor de divisón es igual a dos. PTS_{ADITIVO} / 1000 GAL COMBUSTIBLE = 12.22 / 3 =4.0</p>

CUADRO N°22: RESULTADOS ADITIVACION EN HORNO F-1

DIMENSIONES TANQUE:		IV	CM
	DIAMETRO	17.5	44.45
	ALTURA	28	71.12

FECHA	HORA INICIO	HORA FINAL	CARRERA	DILUCION	VOLUMEN mL	TIEMPO min	mL/min	GPH	RESULTADOS ADITIVACION			
									GPM PROM. COMBUSTIBLE	Gal ADITIVO DIL.U./1000 GAL COMB.	Gal ADITIVO CONC./1000 GAL COMB.	PTS ADITIVO CONC./1000 GAL COMB.
12-13/02/03	7.22 PM	9.00 AM	12	1-2	12725	818	15.556	0.247	1.585	2.59	0.86	6.9
13/02/03	9.00 AM	12.00 AM	12	1-2	3104	180	17.242	0.273	1.720	2.65	0.88	7.1
13/02/03	12.00 AM	5.25 PM	12	1-2	4811	325	14.802	0.235	1.915	2.04	0.68	5.4
13-14/02/03	5.25 PM	9.45 AM	12	1-2	14121	980	14.409	0.228	2.140	1.78	0.59	4.7
14/02/03	9.45 AM	4.53 PM	12	1-2	5276	428	12.327	0.195	2.225	1.46	0.49	3.9
14-15/02/03	8.00 PM	10.13 AM	12	1-2	12259	853	14.372	0.228	2.230	1.70	0.57	4.5
15/02/03	10.13 AM	4.19 PM	12	1-2	4345	366	11.872	0.188	2.210	1.42	0.47	3.8
15-16/02/03	4.19 PM	11.15 AM	12	1-2	17380	1136	15.299	0.242	2.100	1.92	0.64	5.1
16-17/02/03	11.15 AM	8.50 AM	12	1-2	18311	1235	14.827	0.235	1.925	2.03	0.68	5.4
17/02/03	10.13 AM	5.12 PM	12	1-2	5742	419	13.703	0.217	1.790	2.02	0.67	5.4
17-18/02/03	5.12 PM	9.00 AM	12	1-2	13966	948	14.732	0.234	1.750	2.22	0.74	5.9
18/02/03	9.00 AM	4.27 PM	12	1-2	4811	447	10.762	0.171	2.100	1.35	0.45	3.6
18-19/02/03	4.27 PM	3.54 PM	12	1-2	18001	1407	12.794	0.203	2.400	1.41	0.47	3.8
19-20/02/03	6.10 PM	10.30 AM	12	1-2	5586	980	5.700	0.090	2.185	0.69	0.23	1.8
20-21/02/03	3.03 PM	10.00 AM	12	1-2	18621	1137	16.378	0.260	2.050	2.11	0.70	5.6
21/02/03	10.40 AM	6.39 PM	12	1-2	6362	479	13.283	0.211	2.290	1.53	0.51	4.1
22/02/03	10.11 AM	4.37 PM	12	1-2	4500	386	11.659	0.185	2.315	1.33	0.44	3.5
22-24/02/03	4.37 PM	8.40 AM	12	1-2	31191	2403	12.980	0.206	2.410	1.42	0.47	3.8
24-25/02/03	7.00 PM	9.25 AM	12	1-2	13345	865	15.428	0.245	2.330	1.75	0.58	4.7
25/02/03	9.25 AM	6.15 PM	12	1-2	7759	530	14.640	0.232	2.285	1.69	0.56	4.5
25-26/02/03	6.15 PM	10.15 AM	12	1-2	13501	960	14.063	0.223	2.225	1.67	0.56	4.5
26/02/03	10.15 AM	6.03 PM	12	1-2	4500	468	9.616	0.152	2.125	1.20	0.40	3.2
26-27/02/03	10.15 AM	10.00 AM	12	1-2	19087	1425	13.394	0.212	2.285	1.55	0.52	4.1
10/03/03	11.00 AM	5.03 P.M	12	1-2	1241	363	3.420	0.054	2.515	0.36	0.12	1.0
10-11/03/2003	5.03 P.M	2.00 P.M	12	1-2	15208	1257	12.098	0.192	2.560	1.25	0.42	3.3
11-12/03/03	2.00 P.M	9.15 AM	12	1-2	17225	1155	14.913	0.236	2.585	1.52	0.51	4.1
12/03/03	9.15 AM	4.26 P.M	12	1-2	4500	431	10.441	0.165	2.525	1.09	0.36	2.9
13/03/03	9.32 A.M	5.02 P.M	12	1-2	5742	450	12.759	0.202	2.175	1.55	0.52	4.1
14-15/03/2003	6.00 P.M	9.15 A.M	12	1-2	0	915	0.000	0.000	2.215	0.00	0.00	0.0
15/03/03	9.15 AM	3.00 P.M	12	1-2	4035	345	11.695	0.185	2.265	1.36	0.45	3.6
15-16/03/2003	3.00 P.M	9.10 A.M	12	1-2	15052	1090	13.810	0.219	2.225	1.64	0.55	4.4
16-17/03/03	9.10 A.M	2.40 P.M	12	1-2	22967	1050	21.873	0.347	2.130	2.71	0.90	7.2
18/03/03	9.00 A.M	5.20 P.M	12	1-2	6207	500	12.414	0.197	2.220	1.48	0.49	3.9
22-23/03/03	1.38 PM	9.03 AM	12	1-2	15673	1165	13.453	0.213	2.365	1.50	0.50	4.0
23-24/03/03	9.03 AM	6.07 PM	12	1-2	24829	1984	12.514	0.198	2.335	1.42	0.47	3.8
25-26/03/03	6.15 P.M	5.10 PM	12	1-2	18001	1375	13.091	0.207	2.385	1.45	0.48	3.9
26-27/03/03	5.10 PM	5.00 P.M	12	1-2	16294	1430	11.394	0.181	2.475	1.22	0.41	3.2
27-28/03/03	5.20 P.M	7.20 P.M	12	1-2	22191	1560	14.225	0.225	2.410	1.56	0.52	4.2
28-29/03/03	7.20 P.M	11 A.M	12	1-2	9311	940	9.905	0.157	2.555	1.02	0.34	2.7

CUADRO N°23: RESULTADOS DE ADITIVACION EN HORNO F-2

DIMENSIONES TANQUE:

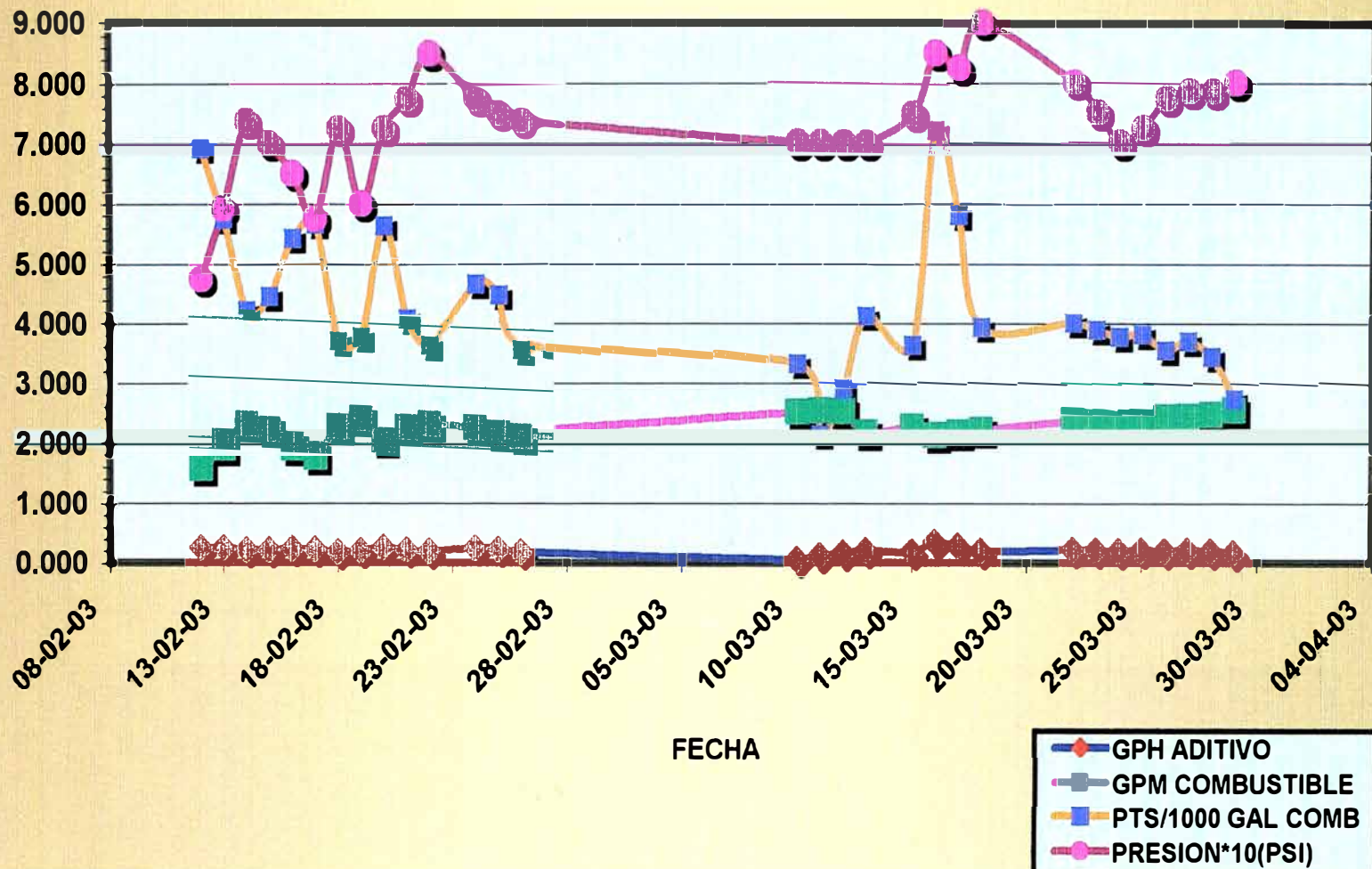
	IN	CM
DIAMETRO	17.5	44.45
ALTURA	28	71.12

FECHA	HORA INICIO	HORA FINAL	CARRERA	DILUCION	RESULTADOS ADITIVO				RESULTADOS ADITIVACION			
					VOLUMEN mL	TIEMPO min	mL/min	GPH	GPM PROM. COMBUSTIBLE	Gal ADITIVO DILU/1000 GAL COMB.	Gal ADITIVO CONC/1000 GAL COMB.	PTS ADITIVO CONC/1000 GAL. COMB.
12-13/02/03	7 32 PM	8 54 AM	11	1-1	1241	744	1 669	0.0264	1 280	0.34	0.2	1.4
13/02/03	8.54 AM	12.20 PM	11	1-1	310	206	1 507	0.0239	1 220	0.33	0.2	1.3
13/02/03	12 20 PM	5 23 AM	11	1-1	1862	303	6.146	0.0974	1.145	1.42	0.7	5.7
13-14/003	5 23 AM	9.46 AM	11	1-1	6207	983	6.315	0.1001	1.125	1.48	0.7	5.9
14/02/03	9 46 AM	4 55 PM	11	1-1	2948	429	6 873	0.1089	1.125	1.61	0.8	6.5
14-15/02/03	7 48 PM	10.15 AM	11	1-2	8224	867	9.486	0.1504	1.140	2.20	0.7	5.9
15/02/03	10.15 AM	4 25 PM	11	1-2	3259	380	8.576	0.1359	1.130	2.00	0.7	5.3
15-16/02/03	4 25 PM	11 15 AM	10	1-2	2017	1130	1 785	0.0283	1.300	0.36	0.1	1.0
15-16/02/03	4 25 PM	8 45 AM	10	1-2	3569	1265	2.821	0.0447	1.200	0.62	0.2	1.7
16-17/02/03	11 15 AM	8 45 AM	10	1-2	1552	1290	1 203	0.0191	1.370	0.23	0.1	0.6
17/02/04	8 45 AM	5.10 PM	10	1-2	1397	505	2.766	0.0438	1.165	0.63	0.2	1.7
17-18/02/03	5 10 PM	8 40 AM	10	1-2	1862	930	2.002	0.0317	1.065	0.50	0.2	1.3
18/02/03	10.50 AM	4 25 PM	11	1-2	621	215	2.887	0.0458	1.205	0.63	0.2	1.7
18-19/02/2003	4 25 PM	3 55 P.M	11	1-2	4655	1410	3.302	0.0523	1.180	0.74	0.2	2.0
20-21/02/03	3 00 P.M	10 00 A.M	12	1-2	10087	1140	8.848	0.1402	1.250	1.87	0.6	5.0
21/02/03	10 38 A.M	6.40 PM	11	1-2	4655	482	9.658	0.1531	1.140	2.24	0.7	6.0
21-26/02/03	FUERA DE SERVICIO - NO SE REGISTRARON DATOS											
26-27/ 02/03	5 50 PM	10.00 A.M	12	1-2	10397	970	10.719	0.1699	1.070	2.65	0.9	7.1
10/03/03	11.00 A.M	5.00 P.M	12	1-2	6673	360	18.535	0.2938	1.335	3.67	1.2	9.8
10-11/03/03	5 00 P.M	2 00 P.M	12	1-2	16139	1260	12.808	0.2030	1.320	2.56	0.9	6.8
11-12/03/03	2 00 P.M	9 13 A.M	11	1-2	12570	1153	10.902	0.1728	1.245	2.31	0.8	6.2
12/03/03	9.13 A.M	4.38 P.M	11	1-2	1707	445	3.836	0.0608	1.280	0.79	0.3	2.1
13/03/03	9 40 A.M	4 50 P.M	11	1-2	2638	430	6.135	0.0972	1.170	1.39	0.5	3.7
14-15/03/2003	6 00 P.M	9 15 A.M	11	1-2	8845	915	9.667	0.1532	1.105	2.31	0.8	6.2
15/03/03	9 15 A.M	2 50 P.M	11	1-2	3104	335	9.264	0.1468	1.125	2.18	0.7	5.8
15-16/03/03	2 50 P.M	9 10 A.M	11	1-2	11638	1100	10.580	0.1677	1.170	2.39	0.8	6.4
16-17/03/03	9 10 A.M	2 40 P.M	11	1-2	13966	1050	13.301	0.2108	1.140	3.08	1.0	8.2
18/03/03	8 50 A.M	5 21 P.M	11	1-2	4190	571	7.338	0.1163	1.045	1.85	0.6	4.9
22-23/03/03	1 38 P.M	9 00 A.M	11	1-2	9466	1162	8.146	0.1291	1.060	2.03	0.7	5.4
23-24/03/03	9 00 A.M	6 07 P.M	11	1-2	6052	1267	4.777	0.0757	1.140	1.11	0.4	3.0
24-25/03/03	6 07 P.M	6 10 P.M	11	1-2	776	1443	0.538	0.0085	1.110	0.13	0.04	0.3
25-26/03/03	6 10 P.M	5 05 PM	11	1-2	6207	1375	4.514	0.0716	1.160	1.03	0.34	2.7
26-27/03/03	5 05 PM	6 03 P.M	11	1-2	7449	1498	4.972	0.0788	1.540	0.85	0.28	2.3
27-28/03/03	6 15 P.M	7 20 P.M	11	1-2	6828	1505	4.537	0.0719	1.600	0.75	0.25	2.0
28-29/03/03	7 20 P.M	11 0 A.M	11	1-2	7604	940	8.089	0.1282	1.225	1.74	0.58	4.7

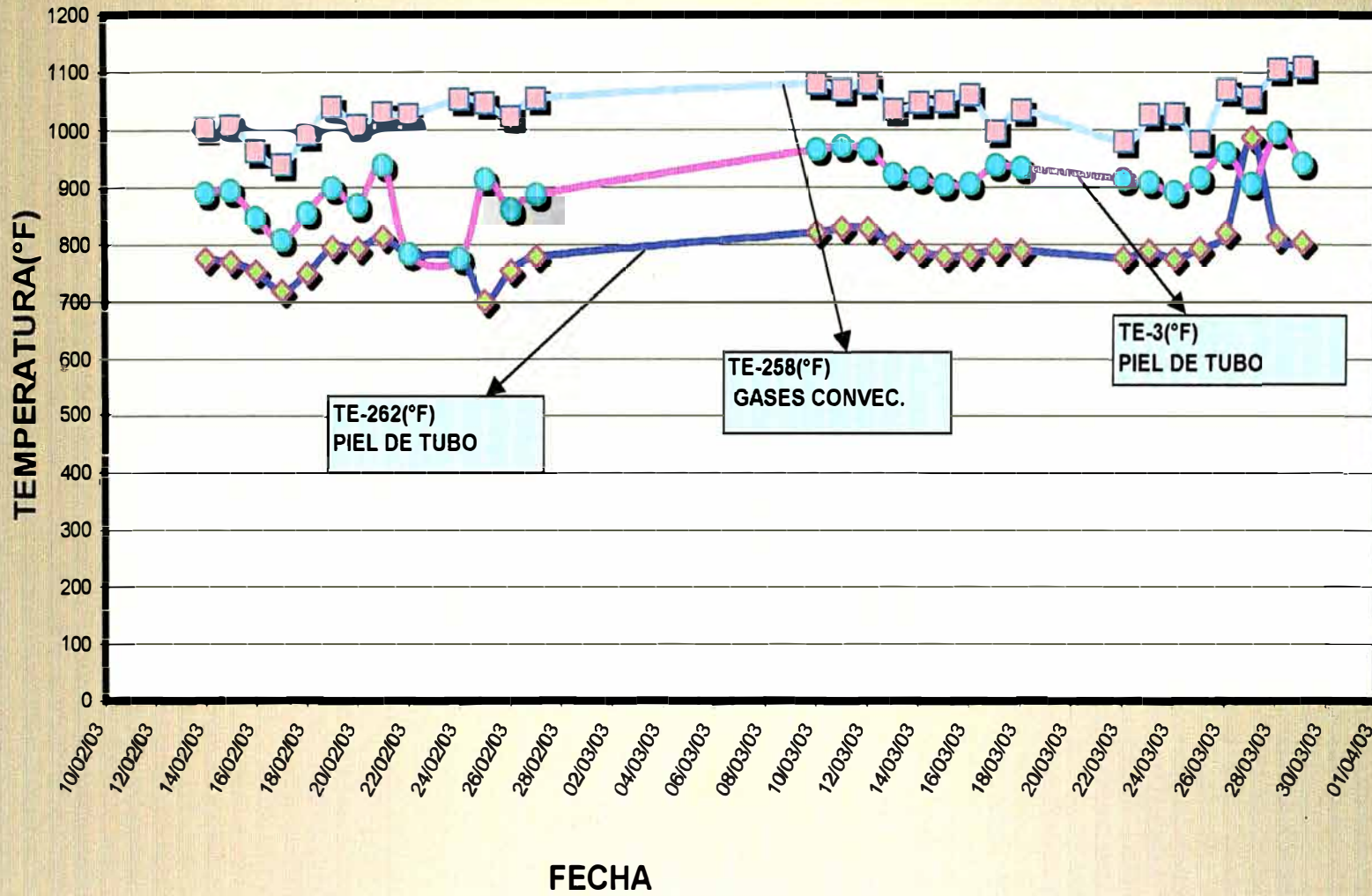
Cuadro N°24: COMENTARIOS DE RESULTADOS DE ADITIVACIÓN EN LOS HORNOS

ZONA	HORNO F-1	HORNO F-2
<p>DOSIFICACIÓN DEL ADITIVO</p>	<p>1.En la Gráfica N°16, se observa la variación de los PTS/1000 gal combustible dosificados al Horno F-1. Esta tendencia guarda relación con la presión del combustible en la línea, y aumenta a medida que la presión en la línea disminuye.</p> <p>2.La dosificación en el Horno F-1 varió entre 2.14 - 7.2 PTS/1000 galones de combustible, mayormente entre 3 - 5 PTS/1000 galones de combustible para la carrera de bomba de 12%.</p>	<p>1.La variación de la dosificación en el Horno F-2 se muestra en la Gráfica N° 18. Se observa que la dosificación fue irregular, esto debido a problemas mecánicos en el sistema de aditivación. Sin embargo esto se logró superar en un periodo posterior entre el 18 y 29 de Marzo 2003.</p> <p>2.La dosificación para este periodo varió entre 1.5 - 8.2 PTS/1000 Gal combustible.</p>
<p>PERFIL DE TEMPERATURAS</p>	<p>1.Como se muestra en la Gráfica N°17 el perfil de temperaturas en el Horno F-1 no sufrió alteraciones y se mantuvo dentro de rangos normales en comparación a la operación sin aditivación.</p>	<p>1.El perfil de temperatura no sufrió alteraciones durante el periodo de aditivación como se muestra en la Gráfica N°19.</p> <p>2.La temperatura de piel de tubos registrada por la termocupla TE-46, varió entre 814-1127 °F, rango normal de operación sin aditivación.</p>
<p>VISCOSIDAD DE COMBUSTIBLE</p>	<p>1.Durante el periodo de aditivación se trabajó con un residual cuya viscosidad fue de 400 cSt @50°F en promedio como se muestra en la Gráfica N° 20. Esta es la viscosidad de referencia para los cálculos de dosificación.</p>	

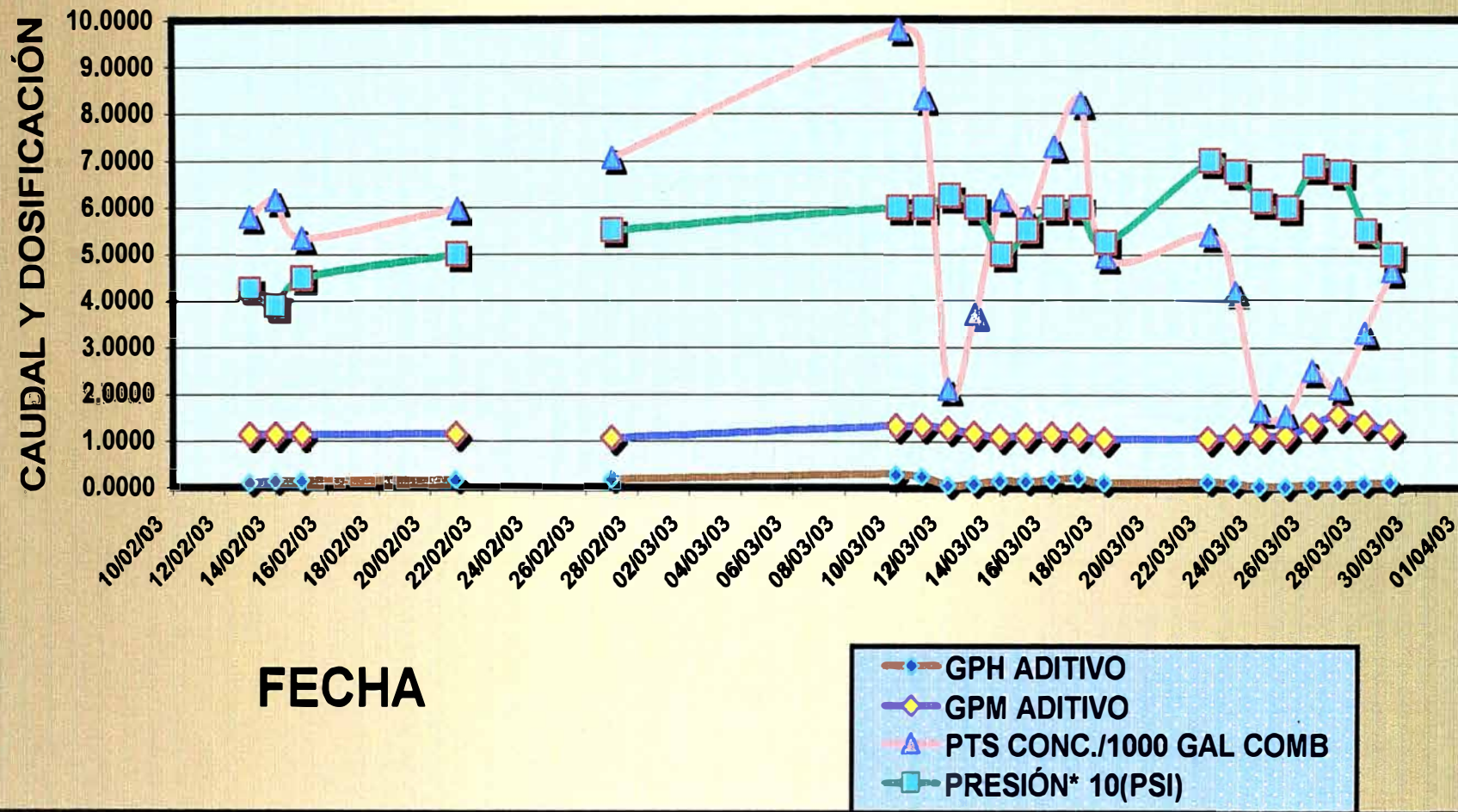
**Gráfica N°16: ADITIVACIÓN EN HORNO F-1
CARRERA DE BOMBA ADITIVO: 12%**



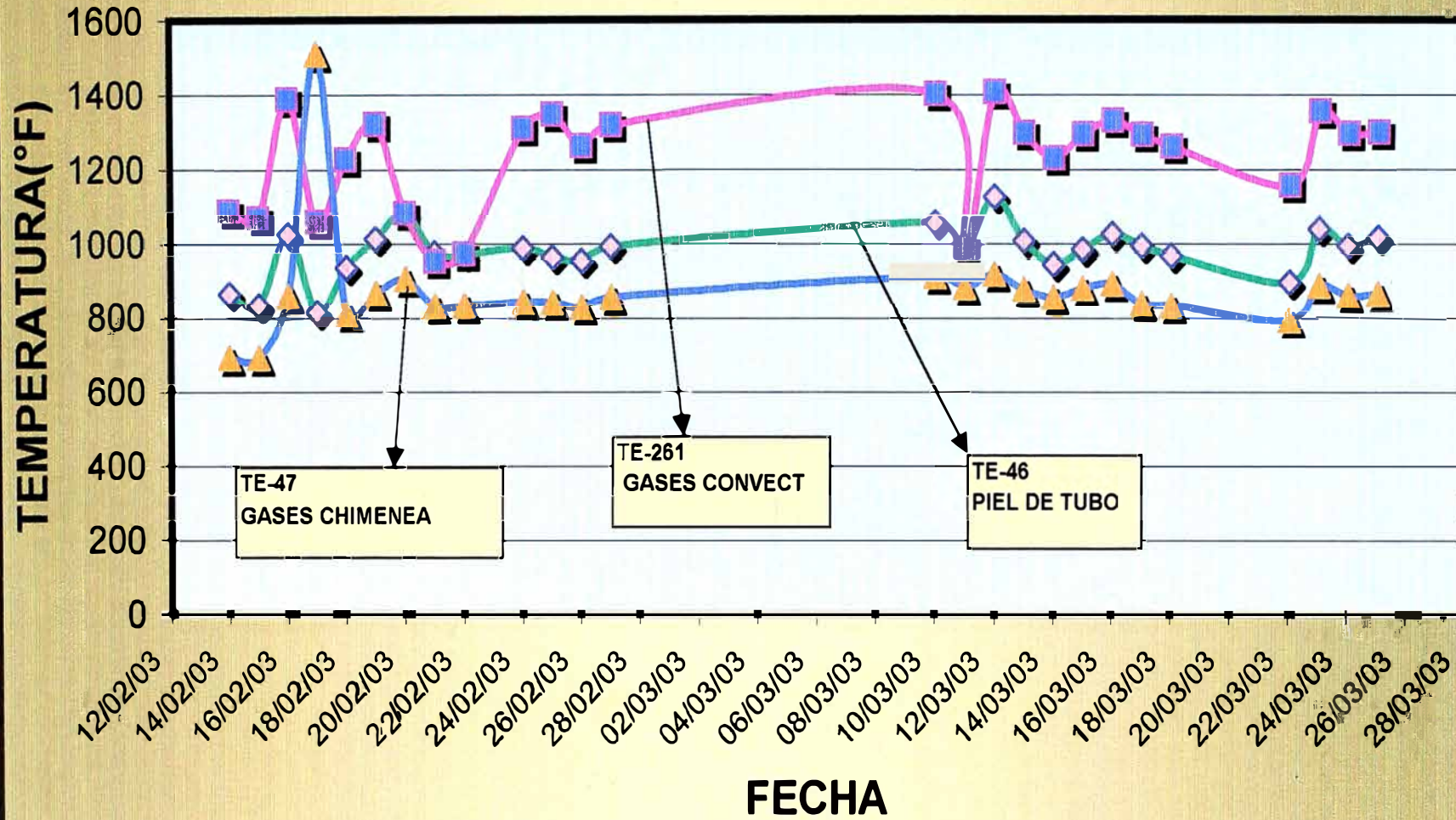
Gráfica N°17: PERFIL DE TEMPERATURA HORNO F-1



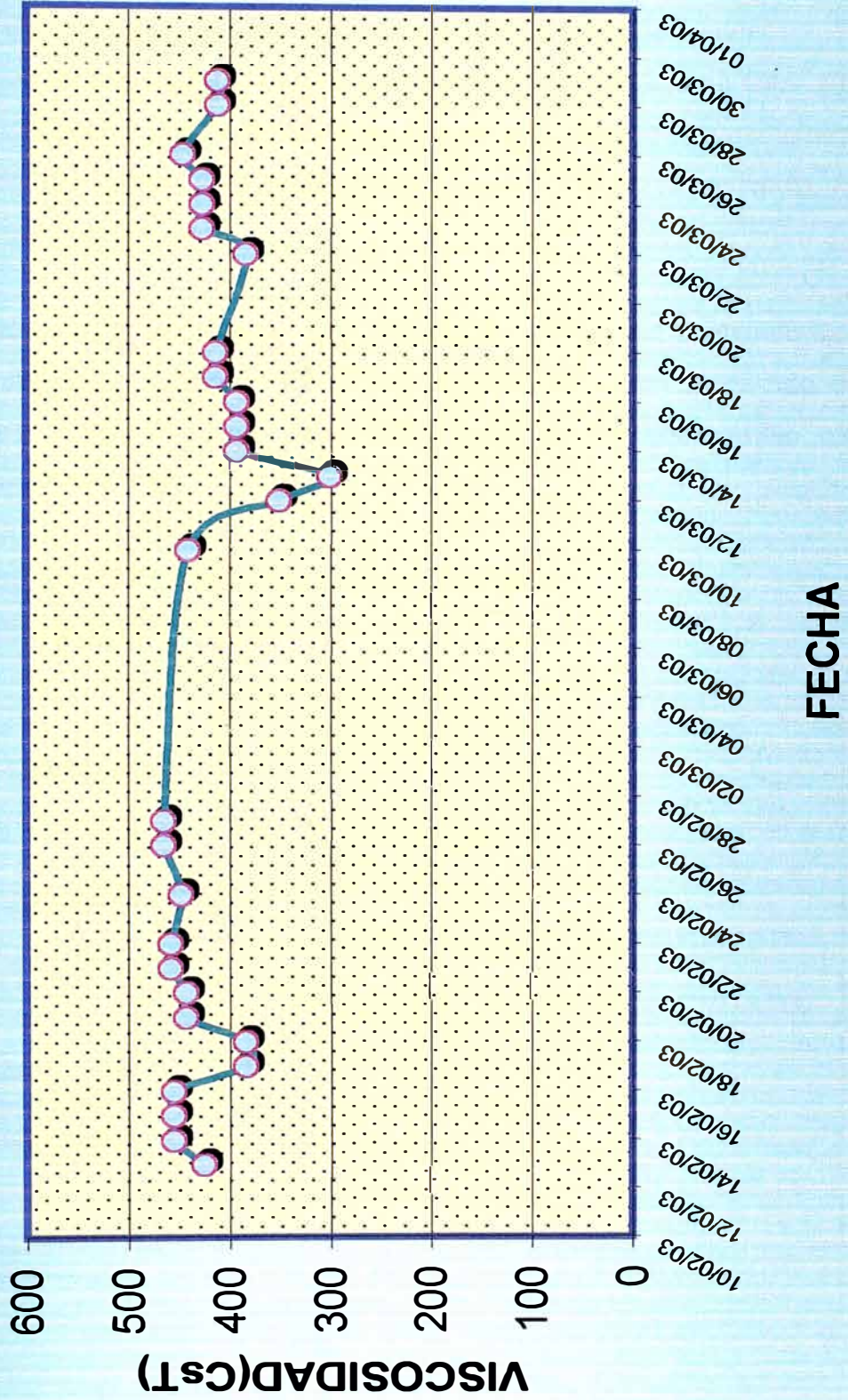
**Gráfica N°18: BOMBA DE DOSIFICACIÓN HORNO F-2
CARRERA 11%**



Gráfica N°19: PERFIL DE TEMPERATURAS HORNO F-2



Gráfica N° 20: VISCOSIDAD RCI (50°C)



5.3.2.4. Monitoreo con Probeta de Control Manual

Para la verificación de la dosis de aditivo empleado en el tratamiento se realizó un muestreo de las cenizas depositadas haciendo uso de este dispositivo.

La temperatura de piel de tubo en este dispositivo fue regulada a un valor similar al de la temperatura de piel de tubos de los hornos para simular las condiciones de exposición de los tubos a la temperatura y las cenizas procedentes de la combustión del combustible.

En el siguiente cuadro se muestra los resultados del análisis del contenido de V y Mg en los depósitos recogidos sobre esta probeta así como el cálculo de la relación Mg/V (masa) efectiva, luego del tratamiento del combustible con el aditivo a base de magnesio.

Cuadro N°25: RESULTADOS DE LABORATORIO

COMPONENTE		
MAGNESIO	Mg ELEMENTAL (%PESO)	MgO (%PESO)
	2.80	4.67
VANADIO	V ELEMENTAL (%PESO)	V ₂ O ₅ (%PESO)
	5.65	10.08
	OBTENIDA	RECOMENDADA
RELACIÓN MOLAR (MgO/V₂O₅)	2.1 : 1	3:1
RELACIÓN MASA (MgO/V₂O₅)	0.463	0.659

Luego de retirar la probeta de control manual en la Zona Convectiva del Horno F-1 expuesta a los gases de combustión durante un periodo de 28 días, se observó depósitos mucho más friables que los encontrados cuando la probeta estuvo expuesta a los gases de combustión sin realizarse la aditivación.

Se realizó una medición de velocidad de corrosión antes y durante este periodo de aditivación con la probeta instalada en la zona Convectiva en el Horno F-1 se encontraron los siguientes valores:

Cuadro N°26: Resultado de la velocidades de corrosión en Probeta de Control Manual.

	ANTES	DESPUÉS
Tiempo de exposición(días)	24	28
Velocidad de corrosión(mpy)	135.6	54.2
Variación de espesor(mm)	Min: 0.025 Max: 0.145	Min : 0.02 Max: 0.04
Temperatura de gases(°F)	990-1080	990-1080
Temperatura de piel de tubo (°F)	700-971	700-971
Temperatura de probeta (°F)	890	850
Presión de aire comprimido(PSI)	15-20	20

5.3.2.5. Análisis de Resultados Obtenidos de la Aditivación

1. Los valores mostrados en el **Cuadro N°25** indicaron la necesidad de aumentar la dosis de aditivo, la cual debe ser mayor a 4 PTS (aditivo sin diluir)/1000 GAL combustible calculada, a fin de alcanzar la relación en masa de $Mg/V = 0.7/1$ (o su equivalente en molar de $Mg/V = 3/1$) con la cual se logra neutralizar el efecto corrosivo de pentóxido de vanadio (V_2O_5) formado durante la combustión. Para reajustar la dosis calculada teóricamente sobre la base de los resultados reportados en el análisis de cenizas, se hace modificando la carrera de la bomba de modo tal que se cumpla esta relación.
2. La dosis teórica de 4PTS/1000 Gal Combustible fue calculada para el nivel de contaminantes mostrados en la siguiente Tabla y es válida para la condiciones de operación mostradas:

Tabla N°15: Condiciones de operación en hornos válidas para la dosis teórica propuesta.

VARIABLE OPERATIVA	HORNO F-1	HORNO F-2
VISCOSIDAD DE COMBUSTIBLE CST a 50°C	300-465	300-465
FLUJO DE COMBUSTIBLE (GPM)	1.5-2.5	1.14-1.57
PRESIÓN DE COMBUSTIBLE (PSI)	55-90	43-70
TEMPERATURA DE PIEL DE TUBOS (°F)	700-994	814-1127
CARGA TOTAL (BPD)	6800-9430	
CARRERA DE BOMBA FIJADA %	12	11
NIVEL DE CONTAMINANTES EN EL COMBUSTIBLE		
Ppm (V+Na)	250-300	

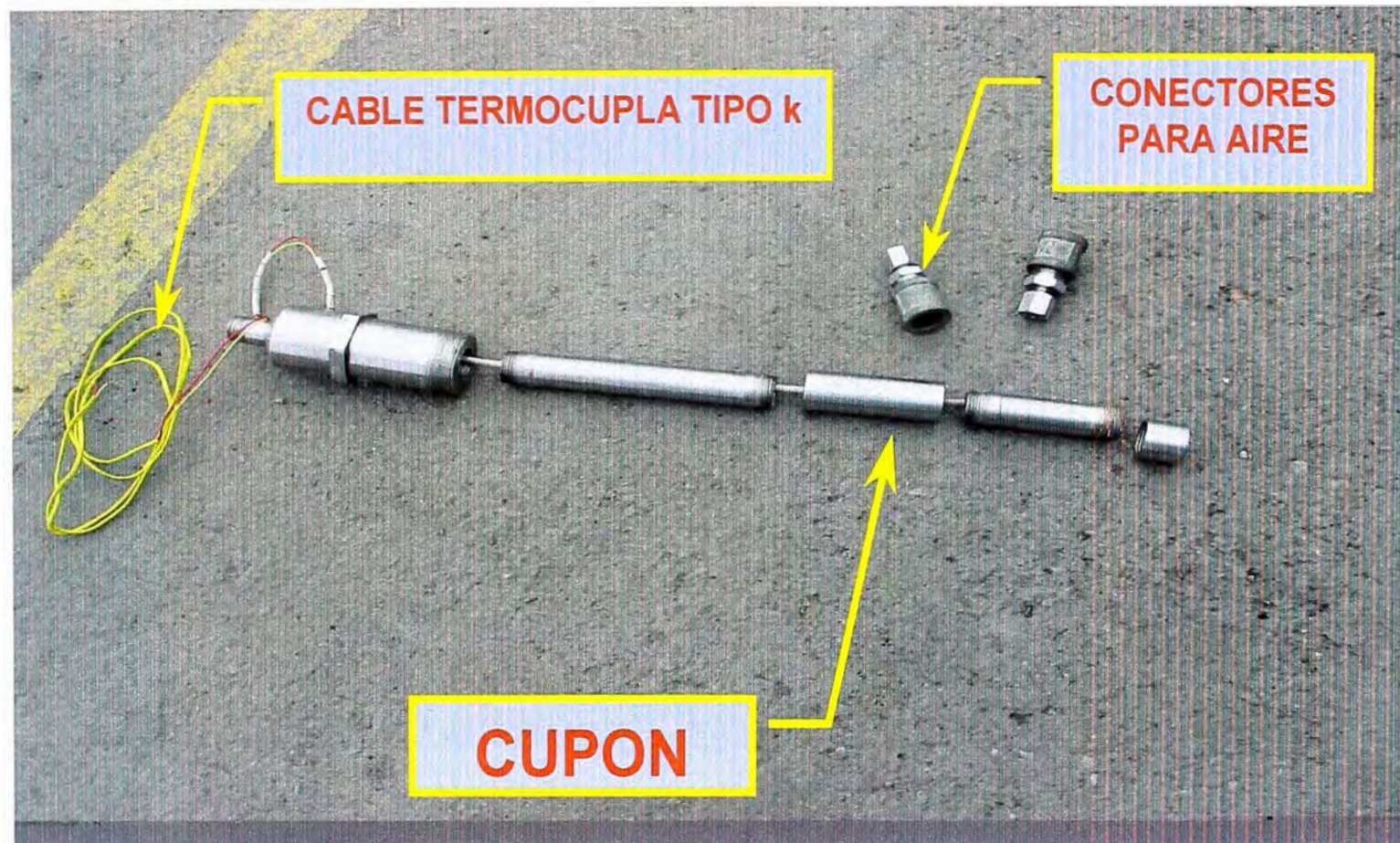
Un nuevo cálculo debe ser realizado siempre que el nivel de contaminantes en el combustible se modifique y deberá ser reajustada si alguna de las variables operativas se encuentra fuera del rango.

3. La función del aditivo referente a la modificación de la textura de los depósitos de cenizas sobre los tubos de los hornos se demostró cuando se retiró la probeta de control manual, como se muestra en el Record Fotográfico de la sección **C.5.3.3**.
4. La función del aditivo de minimizar la corrosión se demostró cuando se retiró la probeta de control manual y se determinó la velocidad de corrosión en un periodo antes y después de la aditivación, cuyo valor disminuyó de 135.6 a 54.2 mpy representando una disminución del 60%, como se muestra en el **Cuadro N°26**.

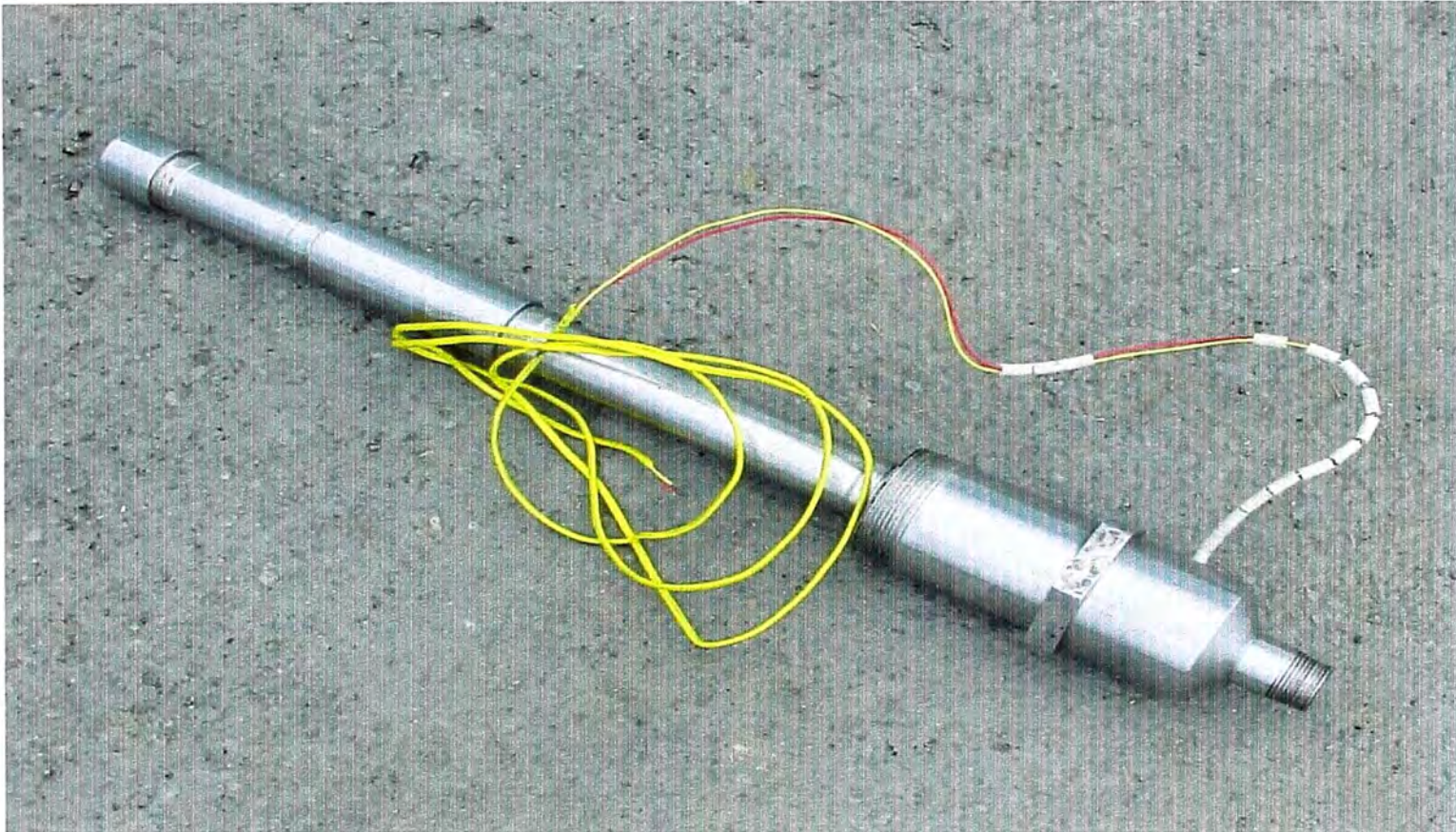
5.4. CONCLUSIONES

1. Es necesario realizar la dilución del aditivo a fin de evitar problemas operativos en los sistemas de dosificación, para este efecto el Diesel es un medio adecuado.
2. La Probeta de control manual puede ser empleada a fin de recoger muestras de los depósitos que se depositan de igual manera sobre la superficie de los tubos de los hornos, sin necesidad de esperar la parada de la unidad.
3. Con la disminución del rate de corrosión como resultado del tratamiento del combustible se verificó la función del aditivo de minimizar los efectos corrosivos de las cenizas fundidas sobre el material empleado en las pruebas (Acero Tipo 316), esta función serán más ventajosa con el ASTM A-335 P5, al ser este más resistente a este tipo de corrosión. Así mismo se verificó la acción del aditivo sobre la textura de los depósitos al volverlos friables.

RECORD FOTOGRAFICO:
INSPECCIONES REALIZADAS A LOS
HORNOS F-1 Y F-2



Fotografía N°16: PARTES DE LA PROBETA DE CONTROL MANUAL.



Fotografía N°17: PROBETA DE CONTROL MANUAL ENSAMBLADA.



Fotografía N°18: RED DE SUMINISTRO DE AIRE PARA CONTROL DE PROBETA MANUAL EN ZONA CONVECTIVA HORNO F-1.



Fotografía N°19: RETIRO DE LA PROBETA DE CONTROL MANUAL DE ZONA CONVECTIVA HORNO F-1.



Fotografía N°20 : DEPÓSITOS ACUMULADOS SOBRE PROBETA DE CONTROL MANUAL EN HORNO F-1 - ETAPA SIN ADITIVO



Fotografía N°21: PROBETA DE CONTROL MANUAL RETIRADA DURANTE ETAPA DE ADITIVACIÓN- HORNO F1



MAR 12 2003

**Fotografía N°22 : VISTA A: DEPÓSITOS FORMADOS DE TEXTURA
FRIABLE SOBRE PROBETA HORNO F-1 - ETAPA CON ADITIVO**



DEPÓSITOS DE TEXTURA FRIABLE

**Fotografía N°23: VISTA B: DEPOSITÓS FORMADOS SOBRE PROBETA
HORNO F-1 – ETAPA CON ADITIVO**

D. ANÁLISIS ECONÓMICO

A continuación se procede a efectuar un análisis económico de los gastos que ese incurren para los casos estudiados, a fin de apreciar el efecto económico del tratamiento del combustible con un aditivo en base a Oxido de Magnesio (MgO), en el cuadro siguiente se muestran los aspectos considerados para dicha evaluación:

GASTOS SIN TRATAMIENTO	GASTOS CON TRATAMIENTO
<p>Reemplazo de Tubos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Frecuencia con la que se reemplaza • Precio de los tubos ASTM A-335, P5 (5Cr-0.5 Mo) y ASTM A-219, P9 (9Cr-1Mo). • Mano de Obra. <p>Ver Cuadro N°27.</p>	<p>Tratamiento de Combustible</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cuando se quema Residual 6 (636 cSt a 50°C) • Consumo de combustible • Dosificación • Consumo de Aditivo <p>Ver Cuadro N°29.</p>
<p>Limpieza Química del Horno</p> <ul style="list-style-type: none"> • Frecuencia de limpieza: Dos veces por año para cada horno. • Costo de limpieza y grafitado. <p>Ver Cuadro N°28.</p>	

1.COMBUSTIÓN CON ADITIVACIÓN Y SIN ADITIVACIÓN

1.1.CASO SIN ADITIVACIÓN

Para efectuar este análisis económico se ha identificado los rubros que no ha sido posible cuantificar para el periodo de un año y que se muestran en los Cuadros N°27 y N°28.

1.2.CASO CON ADITIVACIÓN

El análisis económico realizado se ha efectuado sobre la base de gastos que se incurren para aditivar el combustible para el periodo de un año lo que se muestra en el Cuadro N°29.

2.COMENTARIOS

No es posible realizar una comparación directa entre los gastos sin tratamiento y los gastos que se incurren al tratar el combustible mostrados debido a que los gastos de mantenimiento se efectúan durante un amplio horizonte de tiempo (mayor a un año) y así mismo, es necesario realizar el tratamiento por un periodo adecuado que permita evaluar entre paradas de planta los efectos de dicho tratamiento y su eficacia.

Por otro lado no se dispone de datos de en cuanto disminuiría la frecuencia de limpieza ni cuanto disminuiría la frecuencia de reemplazo de tubos como resultado del tratamiento del combustible con ese aditivo, debido a que ello implica un prolongado tiempo de servicio de la unidad.

Para evaluar los beneficios que otorgue el proceso de aditivación sería necesario superar tiempos de mantenimiento que demandan los gastos anotados. Este último implicaría efectuar el seguimiento del proceso de aditivación hasta detectar el deterioro por corrosión de los tubos del horno, proceso que sale de marco del tiempo asignado a la beca.

Sin embargo es posible realizar una comparación entre el ahorro conseguido por quemar un combustible tan pesado como un RUV en reemplazo de un RCI de baja viscosidad (300-600 cSt a 50°C), de esta forma tal ahorro compensaría el costo de tratamiento que deberá incurrirse para evitar los problemas causados por la corrosión debida a las cenizas de vanadio del RUV. El Costo del combustible de las diferentes especificaciones así como el ahorro en quemar combustibles mas pesados se muestra en el **Cuadro N°30**.

3.CONCLUSIONES

1. Desde el punto de vista económico el uso de un combustible más pesado de 465 cSt a 50°C con referencia a uno de 300 cSt a 50°C permite un ahorro por consumo de 68.80 MUS/AÑO, este ahorro aumenta hasta 615.25 MUS/AÑO cuando se quema un residual tan pesado como representa el RUV (Residual de Unidad de Vacío).
2. Del **Cuadro N°30** se observa que el Costo de los Combustibles de Diferentes Especificaciones, quemado en los hornos es mayor a la sumatoria de los Costos de Mantenimiento (**Cuadro N°27 y N°28**) y de Tratamiento del Combustible (**Cuadro N°29**). En tal sentido se debe apuntar hacia el consumo de combustibles más pesados cuyo ahorro por consumo de combustible justificará los costos del tratamiento al que deben ser sometido este tipo de combustibles.
3. Se observa que el tratamiento del combustible implica un costo adicional de 42.92 MUS/AÑO (**Cuadro N °29**) que se compensa con el ahorro que se consigue al poder quemar un combustible tan pesado como un RUV (**Cuadro N°30**) previniendo los problemas que ocasiona la quema de este tipo de residuales.

Cuadro N° 27: COSTO DE REEMPLAZO DE TUBOS

		SIN ADITIVACION	
		HORNO F-1	HORNO F-2
FRECUENCIA DE REEMPLAZO	TUBOS /AÑO	3	4
PRECIO DE TUBO	US\$/TUBO	600	600
COSTO DE MANO DE OBRA	US\$/TUBO	500	500
FRECUENCIA DE PRUEBA HIDROSTÁTICA	VECES /AÑO	3	3
COSTO DE PRUEBA HIDROSTÁTICAS	US\$/AÑO	200	200
COSTO DE REEMPLAZO	US\$/AÑO	3900	5000
COSTO TOTAL POR REEMPLAZO HORNOS (MUS\$/AÑO)		8.9	

Cuadro N°28: COSTO DE LIMPIEZA QUÍMICA Y GRAFITADO

		SIN ADITIVACION	
		HORNO F-1	HORNO F-2
COSTO DE LIMPIEZA QUÍMICA			
FRECUENCIA DE LIMPIEZA QUÍMICA	LIMPIEZAS/AÑO	2	2
COSTO POR LIMPIEZA QUÍMICA	US\$/LIMPIEZA	1200	1200
COSTO TOTAL DE LIMPIEZA	US\$/AÑO	2400	2400
COSTO TOTAL HORNOS (US\$/AÑO)		4800	

		HORNO F-1	HORNO F-2
COSTO DE GRAFITADO			
FRECUENCIA DE LIMPIEZA GRAFITADO	GRAFITADO/AÑO	2	2
COSTO POR GRAFITADO	US\$/GRAFITADO	1000	1000
COSTO TOTAL DE GRAFITADO	US\$/AÑO	2000	2000
COSTO TOTAL HORNOS (US\$/AÑO)		4000	

COSTO TOTAL LIMPIEZA Y GRAFITADO (MUS\$/AÑO)		8.80
---	--	-------------

COSTO TOTAL SIN TRATAMIENTO (MUS\$/AÑO)	17.70
--	--------------

CuadroN° 29: COSTO DE TRATAMIENTO DE COMBUSTIBLE

CUANDO SE QUEMA RCI (300-465 CST @50°C)

CONTAMINANTES (Na+V)=290 ppm

		HORNO F-1	HORNO F-2
CONSUMO DE COMBUSTIBLE	GPM	2.20	1.37
	GAL/DIA	3168	1973
	GAL/AÑO	1140480	710208
	B/AÑO	27154	16910
DOSIFICACIÓN	PTS 1000 GAL COMBUST	6	6
	PTS GAL COMBUST	0.006	0.006
CONSUMO DE ADITIVO	PTS/DIA	19.0	11.8
	GAL/DIA	2.4	1.5
	GAL/AÑO	867	540
	CILINDROS/MES	1.72	1.07
	CILINDROS/AÑO	21	13
PRECIO DE ADITIVO	(US\$/CILINDRO)	1121.46	1121.46
COSTO DE ADITIVO	(US\$/AÑO)	23156.46	14420.16
CONSUMO DILUYENTE	(GAL/AÑO)	1734	1080
PRECIO DE DILUYENTE (DIESEL)	NS/GAL	6.65	6.65
	(US\$/GAL)	1.90	1.90
COSTO DE DILUYENTE	(US\$/AÑO)	3295.51	2052.21
COSTO DE ADITIVACIÓN (US\$/AÑO)		26452	16472
TOTAL COSTO DE TRATAMIENTO HORNO (MUS\$/AÑO)		42.92	

Cuadro N°30: Costo de Combustible de diferentes especificaciones y Ahorro en quemar combustibles más pesados

VISCOSIDAD	CST@50°C	300		465		636		R-500		RUV	
		HORNO F-1	HORNO F-2	HORNO F-1	HORNO F-2	HORNO F-1	HORNO F-2	HORNO F-1	HORNO F-2	HORNO F-1	HORNO F-2
CONSUMO DE COMBUSTIBLE	GPM	2.20	1.37	2.20	1.37	2.20	1.37	2.20	1.37	2.20	1.37
	B/AÑO	27531	17145	27531	17145	27531	17145	27531	17145	27531	17145

COMPOSICIÓN COMBUSTIBLE

RESIDUAL N°6	%	92.2	92.2	96.8	96.8	100	100	No emplea Residual N°6	No emplea Residual N°6
	B/AÑO	25384	15807	26650	16596	27531	17145		
	NS/GAL	3.860	3.860	3.860	3.860	3.860	3.860		
	US\$/B	46.32	46.32	46.32	46.32	46.32	46.32		
COSTO DE RESIDUAL N°6	MU\$/AÑO	1175.79	732.19	1234.45	768.72	1275.26	794.14		

DIESEL	%	7.8	7.8	3.2	3.2	0	0	No emplea diesel.	No emplea diesel.
	B/AÑO	2147	1337	881	549	0	0		
	NS/GAL	6.650	6.650	6.650	6.650	6.650	6.650		
	US\$/B	79.80	79.80	79.80	79.80	79.80	79.80		
COSTO DE DIESEL	MU\$/AÑO	171.37	106.71	70.30	43.78	0.00	0.00		

COSTO COMBUSTIBLE	NS/GAL	4.078	4.078	3.949	3.949	3.86	3.86	3.64	3.64	2.93	2.93
	US\$/B	48.93	48.93	47.39	47.39	46.32	46.32	43.68	43.68	35.16	35.16
	MU\$/AÑO	1347.15	838.91	1304.75	812.50	1275.26	794.14	1202.57	748.87	968.01	602.80

VISCOSIDAD CST@50°C	300	465	636	R-500	RUV
COSTO TOTAL POR QUEMA DE COMBUSTIBLE HORNO F-1 Y F-2 (MU\$/AÑO)	2186.06	2117.26	2069.39	1951.45	1570.81
AHORRO (MU\$/AÑO)	REFERENCIA	68.80	116.67	234.61	615.25

Notas:

1 Precios de Combustibles Fuente : M.E.M 05/09/2005

2 El precio del RUV esta estimado sobre la base de una composición de un R-500=20%Kerosene + 80% de RUV . RUV de 5000 cSt a 50°C

E. CONCLUSIONES FINALES

1. El alto tenor de contaminantes en el combustible produce cenizas y depósitos que originan dos efectos perjudiciales sobre los tubos de los hornos. Promueven la corrosión en los tubos acelerando el proceso de oxidación de los mismos e interfieren en la transferencia de calor al formar una capa de ensuciamiento compacta y adherente de difícil remoción.
2. El efecto corrosivo de las cenizas de vanadio tiene mayor impacto en los tubos de la Zona Radiante de los hornos en virtud a que están expuestos a una mayor temperatura de piel de tubos en comparación a los tubos de la Zona Convectiva.
3. El principal problema de los tubos de la Zona Convectiva es el ensuciamiento producido por las cenizas de vanadio la cual incide de manera negativa en la transferencia de calor mientras que la temperatura de piel de tubos no es lo suficientemente alta para que se produzca un ataque corrosivo por cenizas fundidas.
4. El tratamiento del combustible con un aditivo a base de Oxido de Magnesio, el único proporcionado por la Refinería Conchán representa una solución técnica para prevenir y minimizar los efectos de la corrosión y ensuciamiento debidos a la acción de las cenizas fundidas provenientes de los contaminantes presentes en combustible.
5. El monitoreo del proceso de corrosión de los tubos de los Hornos debe realizarse empleando dispositivos que simulen las condiciones a las cuales están expuestos los tubos dentro del horno.

6. La Probeta de Control Manual constituye un elemento de monitoreo adecuado para la evaluación del programa de tratamiento del combustible al permitir un muestreo de depósitos independientemente de las paradas de las unidades.
7. Se debe apuntar hacia el uso de combustibles más pesados cuyo ahorro por consumo de material de corte justificará los costos del tratamiento al que deben ser sometido este tipo de combustibles debido a su alto contenido de contaminantes. Por lo tanto la aditivación constituye una respuesta técnica y económica a los problemas que puede ocasionar la quema residuales pesados en los hornos.
8. Luego de la evaluación del circuito de alimentación de combustible a los hornos se concluye que:
 - El T-39 y la bomba P-111A no constituyen una limitante par el uso de un combustible de mayor viscosidad a la que se viene usando en los hornos (300 a 400 cSt a 50 °C).
 - El intercambiador E-23 existente en planta no es adecuado para el calentamiento de un residual de viscosidad mayor a 600 cSt a 50°F. Por lo tanto para la quema de un Residual N°6 o Residual 500 se debería adecuar este circuito a fin de incrementar su capacidad de calentamiento y garantizar que el combustible llegue con las especificaciones de viscosidad a la boquilla de los quemadores en los hornos.

F. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que el tratamiento con el aditivo probado se realice durante un periodo no menor de 2 meses a fin de optimizar los resultados de la dosificación inicial y ajustar los parámetros operativos de dosificación comparando los resultados con los obtenidos por el presente estudio.
2. Realizar evaluaciones periódicas del tratamiento cada mes mediante el análisis químico de las muestras de depósitos utilizando la probeta de control manual.
3. Realizar los ajustes de los parámetros operativos de dosificación :
 - a. Cuando después del periodo de monitoreo, la relación Mg/V de los depósitos recolectados difiera del valor recomendado (3/1) y sea necesario un ajuste, básicamente la carrera de la bomba para permitir un mayor o menor flujo.
 - b. Cuando se modifique las condiciones de operación de la unidad, es decir cuando se incremente la carga a la unidad lo cual conlleva a un mayor consumo de combustible, que conduce a un incremento en el consumo de aditivo.
 - c. Cuando varíe el nivel de contaminantes en el combustible.
4. Repotenciar el tren de precalentamiento de combustible a los hornos a fin de poder quemar un combustible más pesado, lo cual permitirá disminuir el consumo de materiales de corte en la preparación del RCI. En las condiciones actuales el intercambiador trabaja en su máxima capacidad.

G.ANEXOS

**Anexo N°1: PROCEDIMIENTO PARA EFETUAR
EVALUACIONES POR TECNICAS NO
DESTRUCTIVAS A TUBOS DE UN HORNO**

Anexo N°1: PROCEDIMIENTO PARA EFECTUAR EVALUACIONES POR TECNICAS NO DESTRUCTIVAS A TUBOS DE HORNOS

1.OBJETIVO:

La evaluación con técnicas no destructivas de las tuberías del los Hornos cumple los siguientes objetivos:

- Determinar la variación de espesores por Ultrasonido verificando el desgaste por corrosión y/o erosiones en los codos, tubo y cubiertas de las zonas radiantes y convectivas de un Horno.
- Verificar las variaciones de dureza, “in situ”, a fin de establecer parcialmete las características mecánicas de los codos, tubos y planchas-cubierta y otro accesorios.
- Verificar el fenómeno “creep “ crecimiento de grano, variación y/o distorsión, aplicando la técnica del Análisis Microestructural por Réplicas Metalográficas, en los tubos de los Hornos.

2.PROCEDIMIENTOS

Calibración de espesores y Durometría

La preparación de la superficie de los “puntos” elegidos se inicia con el esmerilado y finaliza con el pulido con lija #100.

La calibración de espesores se realiza por la parte exterior, aplicando por contacto directo sobre la superficie a calibrarse, el transductor de un equipo de Ultrasonido de lectura digital. Se utiliza grasa para mantener un acoplamiento óptimo entre el transductor y la superficie a calibrarse.

Se hacen tres (3) mediciones en cada punto elegido con el durómetro en posición horizontal y/o vertical, perpendicular a la superficie a verificarse.

Análisis Microestructural.

Los tubos elegidos para el análisis microestructural “In situ”, por Réplicas Metalográficas corresponde a aquellos que presentan “pandeo” evidente y/o quemado superficial. Los puntos establecidos en cada tubo, corresponde a zonas que se presume con indicios del fenómeno “creep” y/o distorsión de microestructura. La preparación de las superficies, se inicia con el esmerilado hasta obtener una superficie plana; luego se continúa con el pulido mediante lijas de diferentes granulometrias; finalizando esta etapa con el micropulido de alúmina con paño. Concluida esta fase, se continúa con un ataque químico de la superficie mediante la aplicación de Nital al 5% con la finalidad de revelar la microestructura del material y ejecutar el impregnado de la “Réplica Metalográfica; finalizando esta fase con la observación de la réplica en el microscopio y la toma de las respectivas micrografías.

3.EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO:

- Calibrador de espesor por Ultrasonido de lectura digital marca INCO VERITAS con transductor emisor-receptor, para medir espesores de metales por contacto directo.
- Microscopio de campo para análisis microestructural “in-situ”, réplicas marca STRUERS, material para desbaste, pulido, reactivos para el ataque metalográfico de las superficies analizadas y películas KODAK para toma de micrografías.

- Un durómetro de lectura digital, marca TIME, para medición de dureza “IN – SITU” en superficies metálicas.
- Un grupo electrógeno para suministrar energía eléctrica 220 v a nuestros equipos e instrumentos.

4.NORMAS APLICADAS Y/O REFERENCIAS

Calibración: ASTM E797-81,
ASME Sección VIII, Div1, Subsección C.

Durometría: ASTM E10-78.

Metalografía:

- ASTM E3-80 , ASTM E112-80.
- ASTM Handbook, Volumen 17, Nondestructive Evaluation and Analytical Control.
- Boletín Struers, Metallography

Anexo N°2: NORMAS ASTM: G4-84, G1-81 y G31-72

T = absolute temperature, and
 ΔS = entropy change for whole cell reaction

X1.3.1.2 Therefore, an increase in the electrode potential with increasing temperature results in a positive temperature coefficient and signifies an increase in the entropy of the overall reaction including the reference half cell.

X1.3.2 The thermal temperature coefficient is defined by a metal-metal ion half cell at test temperature connected to an identical half cell at a reference temperature. These cells are complicated by the effect of thermal diffusion (Soret effect) and are not truly reversible. In general, if thermal diffusion is prevented, the thermal temperature coefficient is related to the isothermal temperature coefficient by a constant value which represents the entropy change in the reference electrode. Thus, for a standard hydrogen electrode:

$$(dE/dT)_{\text{th}} = (dE/dT)_{\text{is}} - 0.871 \quad (11)$$

where:

$(dE/dT)_{\text{th}}$ = thermal temperature coefficient of electrode potential,

when the temperature coefficients are expressed in mV/deg C. (7).

X1.3.3 The second temperature coefficient is given by the second temperature derivative and is related to ΔCp , the sum of the heat capacities of the products minus the heat capacities of the reactants by the expression:

$$dE^2/dT^2 = \Delta Cp/nFT^2 \quad (12)$$

Thus, the second temperature coefficient is positive when the corresponding first temperature coefficient increases with increasing temperature. See Ref 7 for a more complete discussion.

X2. STANDARD REFERENCE POTENTIALS AND CONVERSION TABLE (7, 8)

TABLE X2.1 Reference Potentials and Conversion Factors

Electrode	Potential (V) at 25°C		Thermal Temperature Coefficient ^A (mV/°C)
	E^B	E^C	
(Pt)/H ₂ (a = 1)/H ⁺ + (n = 1)(SHE)	0.000		+0.87
Ag/AgCl/1 M KCl	+0.235		+0.25
Hg/Hg ₂ Cl ₂ /sat KCl (SCE)	+0.241	+0.244	+0.22
Hg/Hg ₂ Cl ₂ /1 M KCl	+0.280	+0.283	+0.59
Hg/Hg ₂ Cl ₂ /0.1 M KCl	+0.334	+0.336	+0.79
Cu/CuSO ₄ /sat	+0.30		+0.90

^A To convert from thermal to isothermal temperature coefficients, subtract 0.87 mV/°C. Thus the isothermal temperature coefficient for Ag-AgCl is -0.62 mV/°C.

^B E^B is the standard potential for the half cell corrected for the concentration of the ions.

^C E^C also includes the liquid junction potentials for a saturated KCl salt bridge.

To convert from one scale to another, add the value indicated.

From (E^B)	To SHE Scale	
	To SCE Scale (E^C)	To SHE Scale (E^B)
H ₂ /H ⁺		-0.241
Ag/AgCl	+0.235	-0.006
Hg/Hg ₂ Cl ₂ , sat	+0.241	
Hg/Hg ₂ Cl ₂ , 1 M	+0.280	+0.039
Hg/Hg ₂ Cl ₂ , 0.01 M	+0.334	+0.093
Cu/CuSO ₄	+0.30	+0.06

Example:

An electrode potential of +1.000 V versus SCE would be (1.000 + 0.241) E: +1.241 V versus SHE. An electrode potential of -1.000 V versus SCE would give (-1.000 + 0.241) E: -0.759 V versus SHE.

REFERENCES

- Christiansen, J. A., and Pourbaix, M., *Comptes rend 17th Conf. IUPAC*, Stockholm, 1953, pp. 82-84.
- Stern, M., *Corrosion*, CORRA, Vol 15, 1958, p. 440.
- Oldham, K. B., and Mansfeld, F., *Corrosion*, CORRA, Vol 27, 1971, p. 434.
- "The Reproducibility of Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements," Report of Task Group 2 to ASTM G-1 Subcommittee XI, June 29, 1967.
- Ketchum, S. J., and Haynie, F. H., *Corrosion*, CORRA, Vol 19, 1963, p. 242t.
- Hodgman, C. D., Editor, *Handbook of Chemistry and Physics*, Thirty-fourth Ed., Chemical Rubber Publishing Co., Cleveland, 1952, pp. 1554-1556, 1575.
- de Bethune, A. J., *The Encyclopedia of Electrochemistry*, Hampel, C. A., Editor, Reinhold Publishing Co., 1964, New York, pp. 432-4.
- Janz, G. J., and Kelly, F. J., *The Encyclopedia of Electrochemistry*, Hampel, C. A., Editor, Reinhold Publishing Co., New York, 1964, p. 1013.

Standard Method for CONDUCTING CORROSION COUPON TESTS IN PLANT EQUIPMENT¹

This standard is issued under the fixed designation G 4; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This method outlines procedures for conducting corrosion coupon tests in plant equipment under operating conditions to evaluate the corrosive attack upon engineering materials. It is not intended for atmospheric or underground corrosion tests, nor does this method cover electrochemical or electrical resistance methods for determining corrosion rates.

1.2 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of whoever uses this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* (For more specific safety precautionary information see 5.4.4.)

2. Applicable Documents

2.1 ASTM Standards:

- D 2776 Test Methods for Corrosivity of Water in the Absence of Heat Transfer (Electrical Methods)²
- E 3 Methods of Preparation of Metallographic Specimens³
- G 1 Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens²
- G 16 Practice for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data²
- G 46 Practice for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion²
- G 78 Guide for Crevice Corrosion Testing of Iron-Base and Nickel-Base Stainless Alloys in Seawater and Other Chloride-Containing Aqueous Environments²

3. Significance and Use

3.1 This method may be used to evaluate the corrosive attack upon engineering materials under the varying conditions present in actual service. The condition of the coupons at the end of the exposure period can be used to determine the degree of attack over the exposure interval. This information can be used within the limitations described below to determine an average rate of attack.

3.2 The primary application of the data from this method is to evaluate materials of construction for use in similar service or as replacement materials or in modifications to existing plants.

3.3 The data developed from this method may also be used as a guide to behavior of existing plant materials for the purpose of scheduling maintenance and repairs.

4. Interferences

4.1 Metal specimens immersed in a specific hot liquid may not corrode at the same rate or in the same manner as in equipment where the metal acts as a heat transfer medium in heating or cooling the liquid. In certain services, the corrosion of heat-exchanger tubes may be quite different than that of the shell or heads. This restriction also applies to specimens exposed in gas streams from which water or other corrosives

¹ This method is under the jurisdiction of ASTM Committee G-1 on Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G01.12 on In-Plant Corrosion Tests.

Current edition approved Dec. 28, 1984. Published June 1985. Originally issued as A 274 - 79. Last previous edition G 4 - 68.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.02.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.03.

condense on cool surfaces. Such factors must be considered in both design and interpretation of slant tests.

4.2 Effects caused by high velocity, abrasive ingredients, etc. (which may be emphasized in pipe elbows, pumps, etc.) may not be easily reproduced in coupon tests.

4.3 The behavior of certain metals and alloys may be profoundly influenced by the presence of dissolved oxygen. It is essential that the test coupons be placed in locations representative of the degree of aeration normally encountered in process.

4.4 Corrosion products may have undesirable effects on the results. This possibility is frequently recognized in advance. The extent of possible contamination can be estimated from the loss in mass of the specimen, with proper application of the expected relationships among the following: (1) the area of corroding surface, (2) the mass of the product handled, and (3) the duration of contact of a unit of mass of the product with the corroding surface.

4.5 Corrosion products from the plant equipment used in the test may influence the corrosion of one or more of the test metals. For example, when aluminum specimens are exposed in copper equipment, corroding copper will exert an adverse effect on the corrosion of the aluminum. Contrariwise, stainless steel specimens can have their corrosion resistance enhanced by the presence of the oxidizing cupric ions.

4.6 The accumulation of corrosion products sometimes can have harmful effects. For example, copper corroding in intermediate strengths of sulfuric acid will have its corrosion rate increased as the cupric ion accumulates.

4.7 Coupon corrosion testing is predominantly designed to investigate general corrosion; however, other forms of corrosion may be evaluated with coupons.

4.7.1 Galvanic corrosion may be investigated by special devices that couple one coupon to another in electrical contact. It should be observed, however, that galvanic corrosion can be greatly affected by the area ratios of the respective metals.

4.7.2 Crevice or concentration cell corrosion may occur where the metal surface is partially blocked from the corroding liquid, as under a spacer. An accumulation of debris or corrosion products between the coupons can produce mis-

leading results in either accelerating corrosion or protecting the coupons from corrosion.

4.7.3 Selective corrosion at the grain boundaries (for example, intergranular corrosion of sensitized austenitic stainless steels) will not be readily observable in mass loss measurements and often requires microscopical examination of the coupons after exposure.

4.7.4 Parting or dealloying is a condition in which one constituent is selectively removed from an alloy, as in the dezincification of brass or the graphitization of cast iron. Close attention and a more sophisticated evaluation than a simple mass loss measurement is required to detect this phenomenon.

4.7.5 Pitting corrosion cannot be evaluated by mass loss. It is possible to miss the phenomenon altogether when using small test specimens since the occurrence of pitting is often a statistical phenomenon and its incidence can be directly related to the area of metal exposed.

4.7.6 Stress-corrosion cracking may occur under conditions of tensile stress and it may or may not be visible to the naked eye or upon casual inspection. A metallographic examination (Methods E.3) will confirm this mechanism of attack. This usually occurs with no significant loss in mass of the test coupon, except in some refractory metals.

4.7.7 A number of reactive metals, most notably titanium and zirconium, corrode with strongly adherent films that produce mass gains in some cases rather than mass losses.

5. Apparatus for Mounting Specimens

5.1 In general the method of support should be such as to satisfy the following requirements:

5.1.1 Prevent loss of specimens from causes other than corrosion,

5.1.2 Eliminate the possibility of galvanic effects resulting from metal-to-metal contact between specimens or between the vessel and the specimen exposed therein,

5.1.3 Hold specimens firmly in place,

5.1.4 Provide for protection of specimens against mechanical damage,

5.1.5 Prevent fragments of failed specimens from interfering with the operation of equipment. For example, fragments should not block an orifice, or lodge in a valve.

5.2 The specimen should be supported by a mounting hole so that it cannot be lost from the

holder unless the specimen is destroyed by corrosion. Clamping devices should not be used to support specimens.

5.3 The choice of insulator material should be dependent on the ability of the material to not lose its shape (that is, mechanical properties) and to not degrade in the environment. The hole in the specimen should be made large enough so that the specimen will slide over the insulator. The short tube spacers should be large enough in outside diameter to provide firm support for the specimens without covering more than a small percentage of the total surface. More than one specimen may be exposed on the same holder by insulating or separating the specimens from each other. This may be accomplished by either of the following: (1) cutting tubing to slide over rods as insulators, and cutting larger tubing to slide over the insulator as spacers, or (2) using the spacer designs shown in Fig. 1. The first type of spacer in Fig. 1 is designed to minimize concentration cell effects on the face of the specimen. The second type has a sharp shoulder that will tend to lead to crevice corrosion adjacent to the hole in the coupon. The choice of spacers will lie with the corrosion engineer, based on the type of information required.

5.4 Although there are many ways of supporting corrosion coupons in plant apparatus, the following basic types of field corrosion racks are described in some detail as a guide:

5.4.1 A typical spool rack, shown in Fig. 2, is useful in open vessels such as reactors and tanks for which access to the spool is readily achieved. All materials used in the assembly should be sufficiently corrosion resistant to ensure the assembly remaining intact for the duration of the test.

5.4.2 The typical insert rack shown in Fig. 3 is desirable for use in pipes or other units that have flanged connections which allow access to the system.

5.4.3 For large diameter pipes or nozzles, and for long lengths of horizontal or vertical pipe, a "dutchman" type rack may be employed. This rack is useful in cases where a flange connection exists in a pipeline and does not require axial access to the pipes. Such a rack will consist of a suitable spool piece with the specimens mounted crosswise on a bar as shown in Fig. 4. Both insert and dutchman corrosion racks require that the equipment be out of service, but they may be

installed and removed without extraordinary precautions in gas freeing the equipment.

5.4.4 The "slip-in" corrosion rack, shown in Fig. 5, is ideally suited for effecting the entry and removal of corrosion coupons from operating equipment that is in active service. The slip-in rack requires an unused nozzle of suitable size (usually nominal 38 mm (1½ in.) pipe size or greater) and a gate valve. Caution—In using such a system on-line with hot, pressurized or hazardous fluids, or both, the possibility of a serious leak (or blow-out) at the packing gland must be considered and appropriate precautions taken. Provisions should be made to purge and dispose of the process fluid from the cavity where the specimens are held before they are removed from the system. In the "out" position, the specimens are mounted on the rod and drawn into the recessed area provided by the pipe or tube section. When this is bolted to the gate valve and the valve is opened, the assembly of corrosion coupons may be slid into the operating equipment for exposure. When it is desired to remove the specimens, they are withdrawn into the recessed area, the gate valve is closed, and the entire assembly is then physically removed from the operating equipment.

5.4.5 It is possible to convert thermowells into corrosion racks by welding a short extension rod on them. Similarly, racks may be designed to clamp onto agitators, thermowells, or other parts of operating equipment.

5.4.6 When the choice of materials of construction has been narrowed to one or two, it may be desirable to investigate heat-transfer effects with a simple bayonet heater of the design shown in Fig. 6. Either a heating or cooling medium is circulated through the tube side of this testing apparatus, and the effect of the hot or cold wall upon corrosion is observed by visual observation, pit-depth measurements, micrometer measurements, linear polarization technique (Test Methods D 2776), etc.

5.4.7 Other apparatus for mounting specimens are illustrated in the Appendix.

6. Test Specimens

6.1 The size and shape of test specimens is influenced by several factors and cannot be rigidly defined. Sufficient thickness should be employed to minimize the possibility of perforation of the specimen during the test exposure. The

size of the specimen should be as large as can be conveniently handled, the limitation being imposed by the capacity of the available analytical balance, and by the problem of effecting entry into operating equipment.

6.2 A convenient size for a standard corrosion coupon is 38 mm (1.5 in.) in diameter and 3 mm (0.125 in.) in thickness with an 11-mm (0.438-in.) hole in the center of the round coupon. This size was arrived at as being the maximum size that could easily effect entry through a normal 38-mm (1.5-in.) nozzle. However, it is also convenient for larger size nozzle entries as well as for laboratory corrosion testing. A convenient standard coupon for spool-type racks is the 25 by 50 by 3 mm (1 by 2 by 1/4 in.) or 50 by 50 by 3 mm (2 by 2 by 1/4 in.). A round coupon of 53 by 3 mm (2 by 0.125 in.) or 55 by 1.5 mm (2 by 0.062 in.) is sometimes employed. These last measure 0.500 dm² in area.

6.3 Other sizes, shapes, and thicknesses of specimens can be used for special purposes or to comply with the design of a special type of corrosion rack. When the choice of material has been reduced to a few in number in preliminary tests, special coupons should be employed to consider the effect of such factors of equipment construction and assembly as heat treatment, welding, soldering, and cold working or other mechanical stressing.

7. Preparation of Test Specimens

7.1 The edges of test specimens should be prepared by machining or polishing in order to eliminate cold-worked metal unless the effects of cold working are being studied or unless the data will not be adversely affected.

7.2 Usually no specific finish is necessary except in the sense that uniformity is desirable when comparing data from different tests. Furthermore, it may be necessary to remove dirt or heat-treating scale from the metal surface. It has sometimes been found convenient to utilize a 120-grit surface. However, a grit finish may be difficult to apply to thin coupons.

7.3 After the test specimens are cut to size, they should be freed from water breaks by suitable cleaning. In isolated cases, it is desirable to expose specimens with a special surface treatment. For example, in some applications, stainless steels may be prepassivated by a 30-min immersion in 10 to 20 % nitric acid at 60°C. In

most cases, however, special pretreatments are unnecessary and undesirable.

7.4 The mass of each specimen should be determined to the nearest 0.1 mg on an analytical balance.

8. Number of Test Specimens

8.1 In general, duplicate specimens should be tested. If possible, in cases where confidence limits are required for corrosion rate measurement, then somewhere between 5 and 10 replicates should be run, depending on the scope of the program. The confidence level can be established by the procedures shown in Practice G 16.

9. Identification of Test Specimens

9.1 For purposes of identification, a record should always be made of the relative positions of the test specimens on the holder.

9.2 Although it may be necessary in special instances to notch the edge of the specimens for identification, it is preferable that they be stamped with a code number. The stamped number has an additional advantage in that, should a specimen show a preferential attack at the stamped area, a warning is given that the material is susceptible to corrosion when cold worked. It is also possible in some instances to detect stress-corrosion cracking emanating from the stamped areas. Note, however, that although the presence of such localized attack is a positive indication, absence of attack is not a guarantee of immunity from attack in operating equipment.

10. Installation of Specimen Holder

10.1 The location of the test specimens in the operating equipment will be governed by the information that is desired. This may require tests at more than one location in the same piece of equipment, such as below the level of the test liquid, at the level of the liquid, or in the vapor phase.

10.2 It is desirable to have the specimen holder securely fixed in place. The preferred position of the holder is with the long axis horizontal so as to prevent drippage of corrosion products from one specimen to another. Preferably, the holder should be so placed that any flow of liquid will be against the edges of the specimens. The same condition of agitation of the liquid should then be encountered by all specimens.

11. Duration of Exposure

11.1 The duration of exposure may be based on known rates of deterioration of the materials in use. More often, it is governed by the convenience with which plant operations may be interrupted to introduce and remove test specimens. In many tests, some materials may show little or no attack while other materials may be completely destroyed. In general, the duration of the test should be as long as possible, commensurate with the resistance of the materials under test. In special cases, the duration may be established in regard to some specific phase of the operation, for example, to study corrosion in one step of a batch process. Possible changes in the rate of corrosion may be studied either by successive exposures or by the installation of several sets of specimens at the same time, which can be removed one set at a time at different intervals. The minimum duration of the test in hours is approximately 50 divided by the expected corrosion rate expressed in millimetres per year, or 2000 divided by the expected corrosion rate expressed in millilitres per year.

12. Removal of Specimens from Test

12.1 The condition and appearance of the holder and specimens after removal from equipment should be noted and recorded. Specimens should then be carefully washed, either in distilled water or in a suitable solvent, to remove soluble materials from the surface of the specimens, and hot air dried. In removing the specimens from the holder, care should be taken to keep them in proper sequence relative to each other so that any specimen may be identified from the original record of its position on the holder. This is important if corrosion has been so severe that identification marks have been removed.

12.2 A record should be made of the appearance and adhesion of any coatings or films on the surface of the specimens after washing. It may be desirable to photograph the specimens. Color photographs may be of value. Samples of any products or films resulting from corrosion may be preserved for future study.

13. Cleaning and Weighing Test Specimens

13.1 Specimens should be cleaned as soon as possible after removal from test.

13.2 The procedures for cleaning and weigh-

ing specimens are adequately described in Practice G 1.

14. Examination of Specimen Surface

14.1 The specimen should be carefully examined for type and uniformity of surface attack such as etching, pitting, dealloying or partial tarnish, film, scale, etc. If pitting is observed, the number, size and distribution, as well as the general shape and uniformity of the pits should be noted (refer to Recommended Practice G 4). The maximum and minimum depth of the pits can be measured with a calibrated microscope or by the use of a depth gage. Photographs of the cleaned specimens will serve as an excellent record of the surface appearance.

14.2 A distinction should be made between localized corrosion occurring under the insulating spacers and occurring on the boldly exposed surface. As previously noted, corrosion at the crevice under the insulating spacers is an indication of the susceptibility of the material to crevice corrosion (refer to Guide G 78) whereas pitting on the surface is indicative of the intrinsic pitting tendency of the environment.

14.3 In the case of pitting of the specimen, the mass loss is of little value and the study of the number, size, and distribution of the pits will be of much more importance. Sometimes pitting is initiated but is self-healing and stops. (Additional information is provided in Recommended Practice G 46.)

14.4 If an alloy is known to be susceptible to localized corrosion on a microscale, such as the phenomenon of intergranular corrosion in stainless steel, dezincification in brass, or stress-corrosion cracking of any kind, the specimen should be bent after the previously outlined examination is completed, and any cracks which develop on the surface noted. The results should be compared with those obtained on similar bend tests on unexposed specimens from the same lot of material. Metallographic examination (Methods E 3) is also a useful means of characterizing these phenomena.

14.5 A low power shop-type binocular microscope is ideal for many microscopic examinations, although a metallographic examination may be needed.

14.6 The behavior of the metals in galvanic coupons can be compared with that of insulated specimens exposed at the same time, and any

Galvanic effects, including cathodic protection, can be observed. As mentioned earlier, such tests are only qualitative as the magnitude of the galvanic effect will be influenced by the relative areas of the two metals comprising the couple. The results will apply directly only to assemblies where the ratio of areas used in making the tests is similar to the ratio of areas anticipated in the fabricated assembly.

15. Report

15.1 In reporting results of corrosion tests, the conditions of the test should be described in complete detail with special attention being given to the following:

- 15.1.1 Corrosive media and concentration,
- 15.1.2 Type of equipment in which the test was made,
- 15.1.3 Process carried out in the operating equipment,
- 15.1.4 Location of specimens in the operating equipment,
- 15.1.5 Temperature of corrosive media (maximum, minimum, and average),
- 15.1.6 Oxidizing or reducing nature of corrosive media,
- 15.1.7 Amount and nature of aeration and agitation of corrosive media,
- 15.1.8 Duration and type of test (if equipment was operated intermittently during the tests, the actual hours of operation should be stated as well as the total time of the test),
- 15.1.9 Surface condition of specimen (mill finish, polished, machined, pickled, 120 grit, etc.).

15.2 The form of corrosion which is documented should be reported, together with any observations on corrosion products or scales. The extent of each corrosive form should be quantified as described in Section 14.

15.2.1 The unit for expressing penetration damage should be millimetres. In cases where the corrosion has been substantially uniform in distribution over the surface of the specimens, an evaluation based on mass loss is appropriate. In

this case, the results should be reported in grams per square metre. Conversion to penetration units may be carried out according to Practice G1. Corrosion rates may be calculated from penetration or mass loss measurements. The unit for expressing rate of corrosion penetration is millimetres per year, while the unit for mass loss is grams per metre² day. The use of mass loss data to estimate corrosion penetration will be subject to error to the extent which nonuniform distribution of corrosion and changes of corrosion rate with time occur. It is desirable to run tests to produce penetration or mass loss data for various time intervals so that the changes in corrosion rate with exposure time can be evaluated.

15.2.2 The depth of pitting or crevice corrosion should be reported to the nearest 0.02 mm (0.001 in.) for the test period and not interpolated or extrapolated to thousandths of an inch per year or any other arbitrary period. The size, shape, and distribution of the pits should be noted. The surface area of the specimen and the area of the crevices should be recorded if crevice corrosion occurs.

16. Precision and Bias

16.1 The reproducibility of plant corrosion test is dependent on a number of factors, including the alloys tested, the variability of the environment, and the nature of the corrosion process. Accordingly, it is impossible to provide a general statement which will apply to all circumstances. In general, however, a variation of $\pm 20\%$ from the mean would be considered normal, while a variation of $\pm 50\%$ might be expected in some circumstances.

16.2 The ability of coupons to simulate the performance of the materials of construction of a process plant is largely dependent on the design of the program and the understanding of the corrosive processes involved. A well designed coupon program should give results which correlate to the existing materials of construction within the limits mentioned in 16.1.

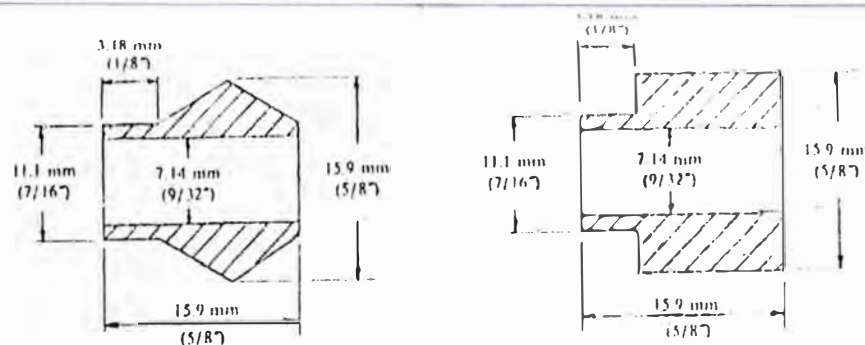


FIG. 1 Tubular Plastic Spacers

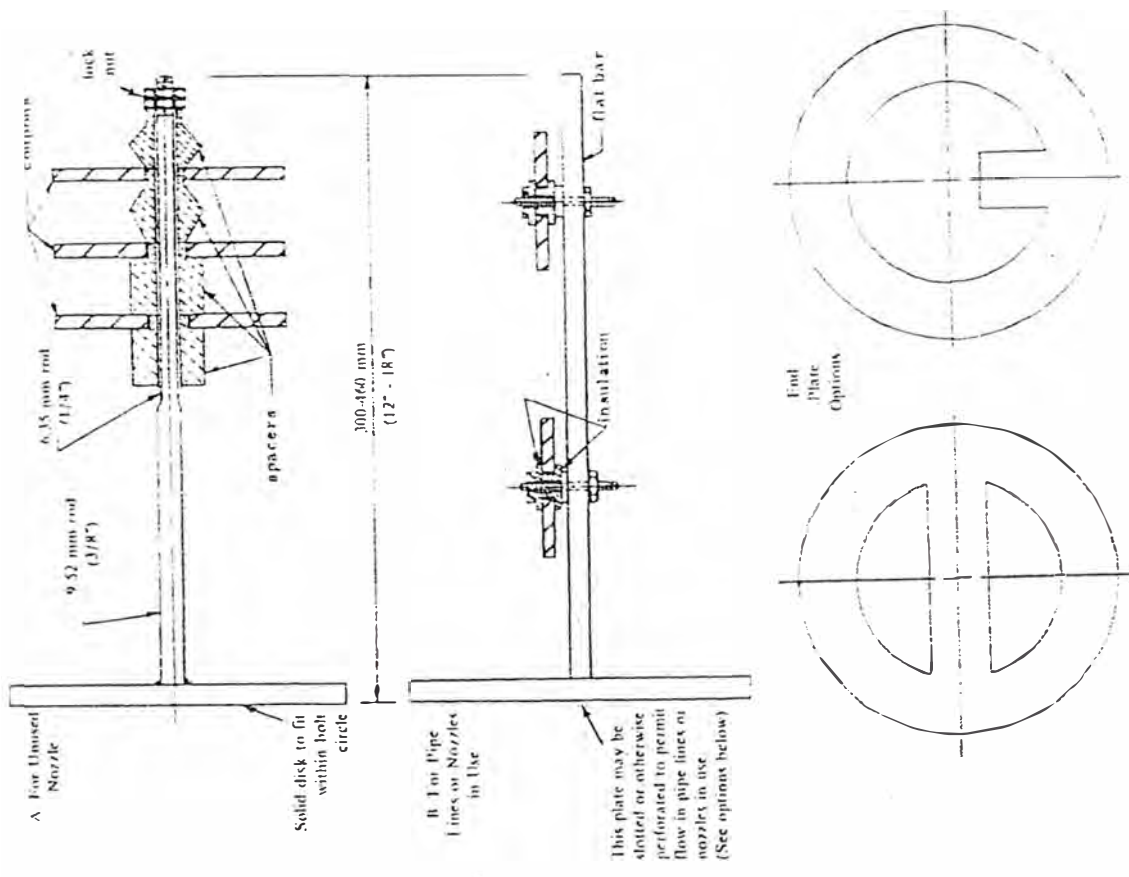


FIG. 3 Insert Racks

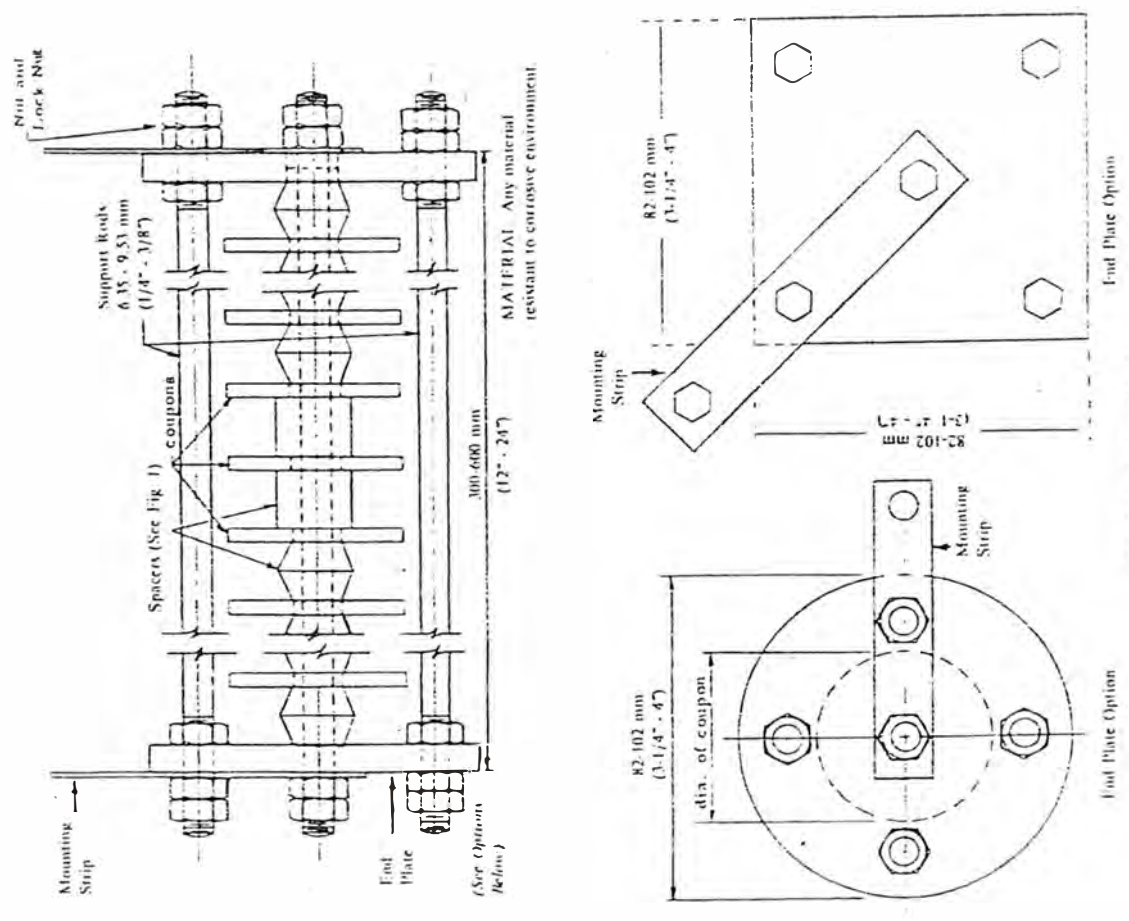


FIG. 2 Typical Spool Rack

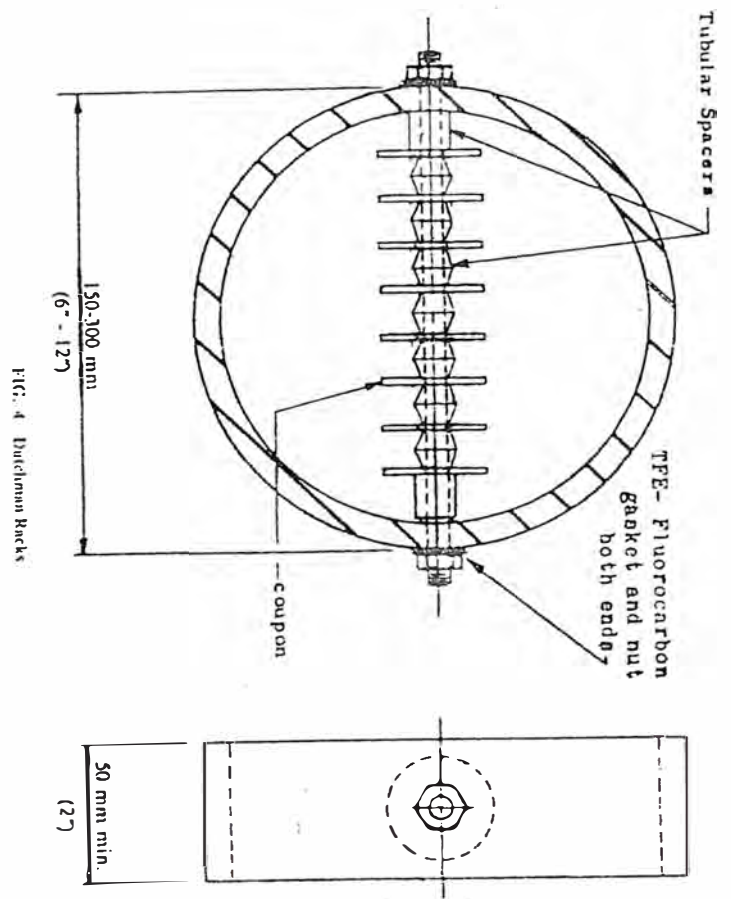


FIG. 4 Buckman Racks

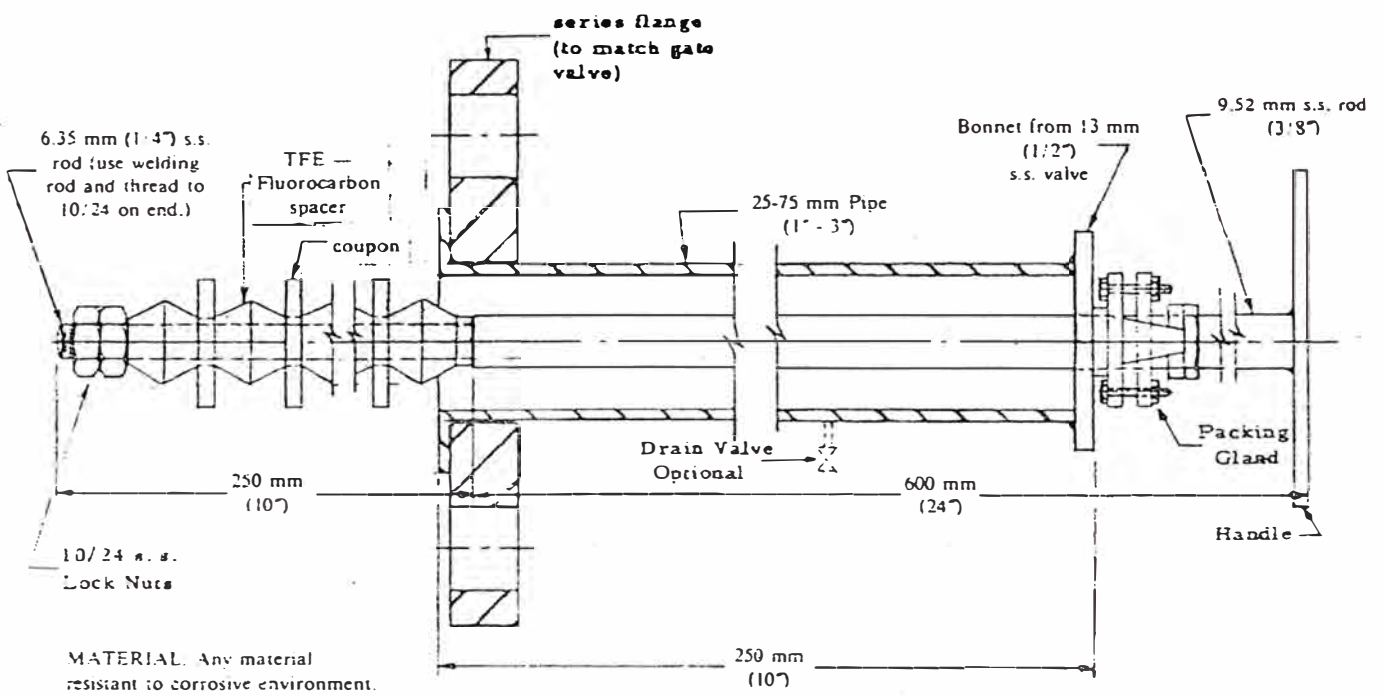


FIG. 5 Slip-In Corrosion Test Rack

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

XI. OPTIONAL APPARATUS FOR MOUNTING SPECIMENS



FIG. XI.1 Flat Bar Rack



FIG. XI.2 Angle Bar Rack

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration in a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

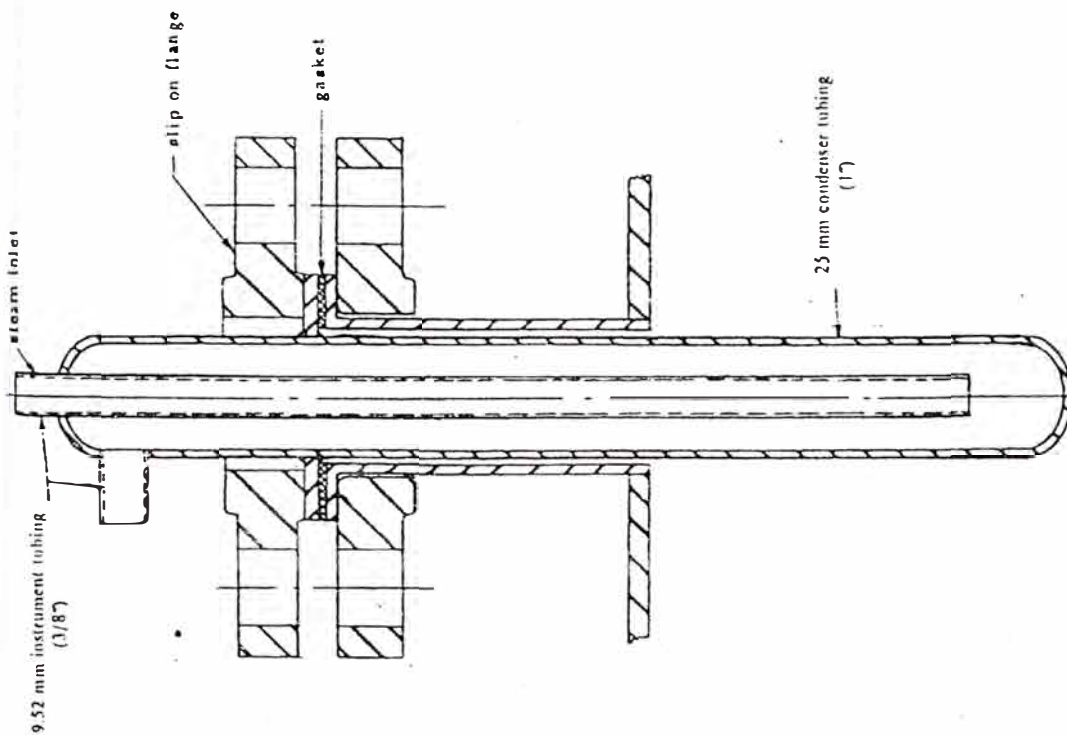


FIG. 6 Hot-Wall Tester

initial inaccuracies in the interpretation of the results are avoided by eliminating the effects of incubation time for localized corrosion. A modified version of the method² is utilized in which the potential is first set at +0.800 V measured with reference saturated calomel electrode (SCE). At this very overvoltage, localized breakdown and corrosion occurs immediately in many alloys. After this corrosion stimulation step, the overvoltage is dropped immediately to lower values to determine if the alloy repairs itself (repassivates) under these less severe conditions.

1.6 Finally, it must be emphasized that even

though this present document represents the results of combined efforts of both ASTM Committees F 4 and G-1, plus extensive round-robin testing with current implant metals, it is not intended as the sole technique for evaluation of implant materials. It tests primarily for resistance to certain forms of localized corrosion. It does not test for mechanical stability (ability of the metal and the protective surface oxide to withstand mechanical forces) nor for biocompatibility per se. There are currently active task forces that are formulating additional corrosion tests in such areas as corrosion fatigue, fretting corrosion, and biocompatibility.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing, you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, Pa. 19103.

Standard Practice for PREPARING, CLEANING, AND EVALUATING CORROSION TEST SPECIMENS¹

This standard is issued under the fixed designation G 1; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This practice gives suggested procedures for preparing bare, solid metal specimens for laboratory corrosion tests, for removing corrosion products after the test has been completed, and for evaluating the corrosion damage that has occurred. Emphasis is placed on procedures related to the evaluation of corrosion by mass-loss and pitting measurements.

NOTE 1: Caution--In many cases the corrosion product on the reactive metals titanium and zirconium is a hard and tightly bonded oxide that defies removal by chemical or ordinary mechanical means. In many such cases, corrosion rates are established by weight gain rather than weight loss.

2. Applicable Documents

2.1 ASTM Standards:

A 262 Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels²

D 1384 Method for Corrosion Test for Engine Coolants in Glassware³

G 31 Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals⁴

G 46 Practice for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion⁴

3. Significance and Use

3.1 A significance and use statement is not applicable to this practice.

4. Sampling

4.1 The bulk sampling of products is outside the scope of this practice.

5. Methods for Preparing Specimens for Test

5.1 Surface Condition:

5.1.1 For laboratory corrosion tests that simulate exposure to service environments, a commercial surface, closely resembling the one that would be used in service, will yield the most significant results.

5.1.2 For more searching tests of either the metal or the environment, standard surface finishes may be preferred. A suitable procedure might be:

5.1.2.1 Degrease in an organic solvent or hot alkaline cleaner.

NOTE 2--Hot alkalis and chlorinated solvents may attack some metals.

NOTE 3--Ultrasonic cleaning may be beneficial in both pre-test and post-test cleaning procedures.

5.1.2.2 Pickle in an appropriate solution (in some cases the chemical cleaners described in Section 7 will suffice) if oxides or tarnish are present.

5.1.2.3 Abrade with a slurry of an appropriate abrasive or with an abrasive paper (see Practices A 262, D 1384, and G 31). The edges as well as the faces of the specimens should be abraded to remove burrs.

5.1.2.4 Rinse thoroughly and dry.

5.2 *Metallurgical Condition*--When speci-

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G-1 on Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G01.05 on Laboratory Corrosion Tests.

Current edition approved April 23, 1981. Published July 1981. Originally published as G 1 - 67. Last previous edition G 1 - 72 (1979).

² Annual Book of ASTM Standards, Vols 01.03 and 03.02.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.05.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.02.

1 preparation changes the metallurgical condition of the metal, other methods should be used or the metallurgical condition must be corrected by subsequent treatment. For example, shearing a specimen to size will cold work and may possibly fracture the edges. Edges should be machined or the specimen annealed. 3 The clean, dry specimens should be stored and weighed. Dimensions determined to the third significant figure and mass determined to the fifth significant figure are tested.

Method for Electrolytic Cleaning After Testing

Electrolytic cleaning is a satisfactory method for many common metals.

7.1 The following method is typical; after dipping to remove loosely attached corrosion products, electrolyze the specimen as follows:

Chromic acid (H ₂ CrO ₄ , 1.84)	28 ml
Inhibitor	2 ml (see Note 4)
Water to make	1 litre
Temperature	75°C (167°F)
Time	3 min
Carbon or lead (see Note 5)	test specimen
Density	20 A/dm ²

4—Instead of using 0.2 volume percent of proprietary inhibitor, about 0.5 g/litre of such dyes as diorthotolyl thiourea, quinoline ethinobenzothiazol quinoline may be used.

5—If lead anodes are used, lead may deposit on the specimen and cause an error in the mass. If the specimen is resistant to nitric acid, the lead may be removed by a flash dip in 1 + 1 nitric acid (except for this possible source of error, lead is used as an anode as it gives more efficient corrosion product removal).

It should be noted that this electrolytic treatment may result in the redeposition of such as copper, from reducible corrosion products and, thus, lower the apparent mass.

Methods for Chemical Cleaning After Test-

6: Caution—These methods may be hazardous to personnel. They should not be carried out initiated or without professional supervision.

Copper and Nickel Alloys—Dip in:

Hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.19)	500 ml
Water to make	1 litre
Temperature	room
Time	1 to 3 min

7—To avoid metal loss during cleaning,

degenerate solution with purified nitrogen before cleaning specimens.

7.2 Aluminum Alloys—The following methods are suitable:

7.2.1 Dip in:

Chromic acid (CrO ₃)	20 g
Phosphoric acid (H ₃ PO ₄ , sp gr 1.69)	50 ml
Water to make	1 litre
Temperature	80°C (176°F)
Time	5 to 10 min, or until clean

7.2.1.1 If a film remains, dip in:

Nitric acid (HNO ₃ , sp gr 1.42)	room
Temperature	1 min
Time	

7.2.2 Dip in:

Nitric acid (HNO ₃ , sp gr 1.42)	room
Temperature	15 min, or until clean
Time	

NOTE 8: Caution—Remove extraneous deposits as well as bulky corrosion products before the HNO₃ treatment to avoid violent reactions that may result in attack of the aluminum alloy (see 7.9).

7.3 Tin Alloys—Dip in:

Trisodium phosphate (Na ₃ PO ₄)	150 g
Water to make	1 litre
Temperature	boiling
Time	10 min

7.4 Lead Alloys—Suitable methods include:

7.4.1 Preferably, use the electrolytic cleaning procedure of Section 6.

7.4.2 Dip in:

Acetic acid (99.5 percent)	10 ml
Water to make	1 litre
Temperature	boiling
Time	5 min

7.4.3 Alternatively dip in:

Ammonium acetate	50 g
Water to make	1 litre
Temperature	hot
Time	5 min

7.4.3.1 This removes lead oxide (PbO) and lead sulfate (PbSO₄).

7.5 Zinc—The following methods are suitable:

7.5.1 Dip in:

Ammonium hydroxide (NH ₄ OH, sp gr 0.90)	150 ml
Water to make	1 litre
Temperature	room
Time	several minutes

7.5.2 Then dip in:

Chromic acid (CrO ₃)	50 g
Silver nitrate (AgNO ₃)	10 g
Water to make	1 litre
Temperature	boiling
Time	15 to 20 s

NOTE 9—In making up the chromic acid solution, it is advisable to dissolve the silver nitrate separately and add it to the boiling chromic acid to prevent excessive crystallization of the silver chromate. The chromic acid must be free from sulfate to avoid attack on the zinc.

7.5.2 Dip in:

Hydroiodic acid (HI, sp gr 1.5)	85 ml
Water to make	1 litre
Temperature	room
Time	15 s

7.5.2.1 This procedure dissolves a little zinc and corrections must be made as noted in 8.1.

7.5.6 Magnesium Alloys—Dip in:

Chromic acid (CrO ₃)	150 g
Silver chromate (Ag ₂ CrO ₄)	10 g
Water to make	1 litre
Temperature	boiling
Time	1 min

7.7 Iron and Steel—The following methods are suitable:

7.7.1 The hot sodium hydride method is excellent for cleaning iron and steel both from the point of view of ease of removal of corrosion products and minimum attack on the metal.⁶ Because of the hazard involved and the somewhat more sophisticated equipment required, other methods may be preferred. An alternative choice is electrolytic cleaning (see Section 6).

7.7.2 Dip in Clarke's solution:

Hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.19)	1 litre
Antimony trioxide (Sb ₂ O ₃)	20 g
Stannous chloride (SnCl ₂)	50 g
Temperature	room
Time	up to 25 min

7.7.2.1 Solution should be vigorously stirred or the specimen should be rubbed with a non-abrasive implement of wood or rubber.

7.7.3 Dip in:

Sulfuric acid (H ₂ SO ₄ , sp gr 1.84)	100 ml
Organic inhibitor	1.5 ml
Water to make	1 litre
Temperature	50°C (120°F)

7.8 Stainless Steels:

7.8.1 Methods in 7.7.1 are also applicable.

7.8.2 Dip in:

Nitric acid (HNO ₃ , sp gr 1.42)	100 ml
Water to make	1 litre
Temperature	60°C (140°F)
Time	20 min

7.8.3 Alternatively dip in:

Ammonium citrate	150 g
Water to make	1 litre

Temperature	70°C (158°F)
Time	10 to 60 min

7.9 Mechanical cleaning in some cases may be used in place of, or as supplement to, chemical treatments to remove bulky adherent deposits. A relatively soft scraper or stiff fiber bristle brush should be used to avoid scratching or removal of metal from the surface of the specimen. However, this method may not remove all the products from pits.

NOTE 10—Such vigorous mechanical cleaning is applicable when mass losses are large and hence errors in mass loss will produce only small errors in corrosion rates. Blank corrections will be difficult to apply.

7.10 In all the foregoing methods, specimens should be rinsed following cleaning and scrubbed lightly with a bristle brush under running water. The cleaning dip may be repeated as necessary. After the final rinse, specimens should be dried and weighed.

8. Calculation of Corrosion Rate

8.1 Whatever cleaning method is used, the possibility of removal of solid metal is present; this results in error in the determination of the corrosion rate. To check this, one or more cleaned and weighed specimens may be recleaned by the same method and reweighed. Loss due to this second weighing may be used as an approximate correction to the first one (see Appendix X2 for a more exact method).

8.2 The initial total surface area of the specimen (making allowances for the change in area due to mounting holes) and the mass lost during the test are determined. The average corrosion rate may then be obtained as follows:

$$\text{Corrosion rate} = (K \times W) / (A \times T \times D)$$

where:

K = a constant (see 8.2.1).

T = time of exposure in hours, to the nearest 0.01 h,

A = area in cm² to the nearest 0.01 cm²,

W = mass loss in g, to nearest 1 mg, and

D = density in g/cm³ (see Appendix X1).

8.2.1 Many different units are used to express corrosion rates. Using the above units for T , A , W , and D the corrosion rate can be

⁶ Technical Information Bulletin SP29-370 "DuPont Sodium Hydride Descaling Process Operating Instructions," available from E. I. duPont de Nemours & Co. (Inc.), Electrochemicals Dept., Wilmington, Del. 19898

calculated in a variety of units with the following appropriate value of *K*:

Corrosion Rate Units Desired	Constant (<i>K</i>) in Corrosion Rate Equation
mils per year (mpy)	3.45×10^6
inches per year (ipy)	3.45×10^4
inches per month (ipm)	2.87×10^6
millimetres per year (mm/y)	8.76×10^4
micrometres per year ($\mu\text{m}/\text{y}$)	8.76×10^2
micrometres per second ($\mu\text{m}/\text{s}$)	2.78×10^6
grams per square metre per hour ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	$1.00 \times 10^4 \times D^4$
milligrams per square decimetre per day (mdd)	$2.40 \times 10^6 \times D^4$
micrograms per square metre per second ($\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	$2.78 \times 10^6 \times D^4$

⁴ Density is not needed to calculate the corrosion rate in these units; the density in the constant *K* cancels out the density in the corrosion rate equation.

NOTE 11—If desired, these constants may also be used to convert corrosion rates from one set of units to another. To convert a corrosion rate in units *X* to a rate in units *Y*, multiply by K_Y/K_X for example:

$$15 \text{ mpy} = 15 \times (2.78 \times 10^6) / (3.45 \times 10^6) \text{ pm/s}$$

8.3 Corrosion rates calculated from mass losses can be misleading when deterioration is highly localized, as in pitting or crevice corrosion. If corrosion is in the form of pitting, it may be measured with a depth gage or micrometer calipers with pointed anvils (see Recommended Practice G 46). Microscopical methods will determine pit depth by focusing from top to bottom of the pit, when it is viewed from above (using a calibrated focusing knob) or by examining a section that has been mounted and metallographically polished. The pitting factor is the ratio of the deepest metal penetration to

the average metal penetration (as measured by mass loss).

8.4 Other methods of assessing corrosion damage are:

8.4.1 *Appearance*—The degradation of appearance by rusting, tarnishing, or oxidation.

8.4.2 *Mechanical Properties*—An apparent loss in tensile strength will result if the cross-sectional area of the specimen (measured before exposure to the corrosive environment) is reduced by corrosion. Loss in tensile strength will result if a metasomatic change, such as parting has taken place. Loss in tensile strength and elongation will result from localized attack, such as cracking.

8.4.3 *Electrical Properties*—Loss in apparent conductivity will result from cracking or pitting.

8.4.4 *Microscopical Examination*—Parting, exfoliation, cracking, or intergranular attack may be measured by metallographic examination of suitably prepared sections.

9. Report

9.1 The report should include the compositions and sizes of specimens, their metallurgical conditions, surface preparations, and post-corrosion cleaning methods, as well as measures of corrosion damage such as corrosion rates (calculated from mass losses), maximum depths of pitting, or losses in mechanical properties.

10. Precision and Accuracy

10.1 A precision and accuracy statement cannot be made for this practice.

APPENDIXES

XI. DENSITIES FOR A VARIETY OF METALS AND ALLOYS

Aluminum Alloys	Density g/cm ³	Copper Alloys	Density g/cm ³
1100, 3004	2.72	Copper	8.94
1199, 5005, 5357, 6061, 6062, 6070, 6101	2.70	Brasses:	
2024	2.77	Commercial bronze 220	8.80
2219, 7178	2.81	Red brass 230	8.75
3003, 7079	2.74	Cartridge brass 260	8.52
5050	2.69	Muntz metal 280	8.39
5052, 5454	2.68	Admiralty 442, 443, 444, 445	8.52
5083, 5086, 5154, 5456	2.66	Aluminum brass 687	8.33
7075	2.80		

Aluminum Alloys	Density g/cm ³	Aluminum Alloys	Density g/cm ³
Bronzes:		Carpenter Stainless No. 20 Ch 3	8.05
Aluminum bronze, 5 percent 608	8.16	Lead	
Aluminum bronze, 8 percent 612	7.78	Antimonial	10.80
Composition M	8.45	Chemical	11.33
Composition G	8.77	Nickel Alloys	
Phosphor bronze, 5 percent 510	8.86	Nickel 200	8.89
Phosphor bronze, 10 percent 524	8.77	Monel Alloy 400	8.84
85-5-5-5	8.80	Inconel Alloy 600	8.51
Silicon bronze 655	8.52	Incoloy Alloy 825	8.14
Copper nickels 706, 710, 715	8.94	Illium G	8.31
Nickel silver 752	8.75	Hastelloy B	9.24
Ferrous Metals		Hastelloy C	8.93
Gray cast iron	7.20	Hastelloy G	8.27
Carbon steel	7.86	Other Metals	
Silicon iron	7.00	Magnesium	1.74
Low alloy steels	7.85	Molybdenum	10.22
Stainless steels:		Platinum	21.45
Types 201, 202, 302, 304, 304L, 321	7.94	Silver	10.49
Types 309, 310, 311, 316, 316L, 317, 329, 330	7.98	Tantalum	16.60
Type 347	8.03	Tin	7.30
Type 410	7.70	Titanium	4.54
Type 430	7.72	Zinc	7.13
Type 446	7.65	Zirconium	6.53
Type 502	7.82		
Durimet 20	8.02		

X2. METHOD FOR DETERMINING MASS LOSS WHERE CLEANING MAY ATTACK THE BASE METAL OF THE SPECIMEN

X2.1 Repeat the cleaning procedure a number of times. Weigh after each cleaning and plot the mass loss against the total time of cleaning or the number of cleanings, see Fig. X2.1. The ordinate at the inter-

section of the two lines is the mass loss caused by removal of corrosion products alone. The method is particularly applicable to electrolytic cleaning, see Section 6.

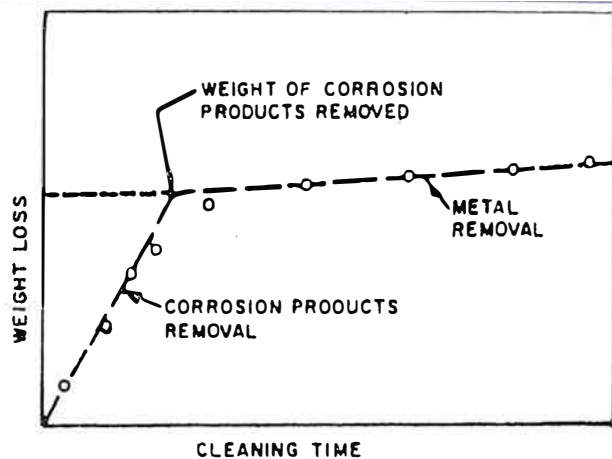


FIG. X2.1 Mass Loss Versus Exposure Time for Specimens During Cleaning

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, Pa. 19103.

Standard Practice for AQUEOUS CORROSION TESTING OF SAMPLES OF ZIRCONIUM AND ZIRCONIUM ALLOYS¹

This standard is issued under the fixed designation G 2; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

NOTE—Sections 4, 7, 9, 11, and 13 were editorially corrected, and the designation date was changed Dec. 18, 1981.

1. Scope

1.1 This practice covers the testing of samples of zirconium alloys in water or steam at elevated temperatures and pressures. This practice includes a description of specimen preparation techniques, autoclave operation, and specified parameters when the test is used as an acceptance test in conjunction with specifications for zirconium alloy products.

1.2 This practice may be applied to wrought products, castings, powder metallurgy products, and weld metal.

2. Summary of Practice

2.1 Specimens of metal are exposed to high-pressure water or steam at elevated temperatures to determine the oxidation rate. Corrosion is measured by the gain in weight of the samples and by the appearance of the oxide film.

3. Significance and Use

3.1 This practice is primarily used as an acceptance test for zirconium alloy products. Typically specimens are exposed to steam at 750°F (399°C) and 1500 psi (10.3 MPa) for 3 days. This practice has also been widely used in development of new alloys, heat treating practices, and for evaluation of welding techniques.

3.2 The specified parameters that must be met when the test is used as a quality control acceptance test are set forth in Section 9. Tolerances given elsewhere are guides to usual laboratory practices.

3.3 Specimens are normally tested after careful pickling and rinsing as described in this practice. Samples with as-manufactured sur-

faces may also be tested without further surface treatment.

4. Definitions

4.1 *pickling (also etching)*—a process for removal of surface metal by action of acids (see 6.1 and Section 13).

4.2 *Grade A water*—purified water having a pH of 6 to 8 and a resistivity of not less than 1.0 M Ω ·cm.

5. Interferences

5.1 Autoclave loads that have one or more coupons showing gross corrosion may affect results on other coupons in the autoclave by contamination of the environment.

6. Apparatus

6.1 The apparatus consists of equipment for (1) chemical removal of metal from the surfaces of specimens (pickling), (2) weighing and measuring the surface areas of the specimens, and (3) performing the aqueous corrosion tests at elevated temperature and pressure.

6.1.1 *For Pickling*—An acid bath, a flowing rinse, and a deionized water rinse are needed for proper metal removal and stain-free rinsing. Polyethylene or polypropylene tanks are commonly used with a bottom feed for flowing rinses. Devices to measure temperature and water resistivity are needed. Specimen hangers

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G-1 on Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G 01.08 on Corrosion of Nuclear Materials.

Current edition approved Dec. 18, 1981. Published February 1982. Originally published as G 2 - 67. Last previous edition G 2 - 80.

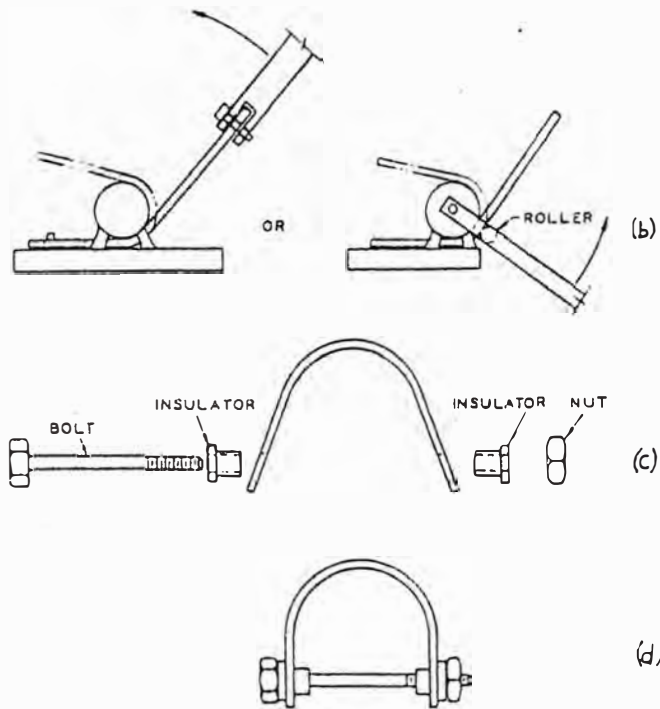


FIG. 5 Method of Stressing U-Bend—Two-Stage Method

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

Standard Practice for LABORATORY IMMERSION CORROSION TESTING OF METALS¹

This standard is issued under the fixed designation G 31; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

¹ NOTE—Editorial changes were made throughout in May 1985.

1. Scope

1.1 This practice² describes accepted procedures for and factors that influence laboratory immersion corrosion tests, particularly mass loss tests. These factors include specimen preparation, apparatus, test conditions, methods of cleaning specimens, evaluation of results, and calculation and reporting of corrosion rates. This practice also emphasizes the importance of recording all pertinent data and provides a checklist for reporting test data. Other ASTM procedures for laboratory corrosion tests are tabulated in the Appendix.

NOTE 1: Caution—In many cases the corrosion product on the reactive metals titanium and zirconium is a hard and tightly bonded oxide that defies removal by chemical or ordinary mechanical means. In many such cases, corrosion rates are established by weight gain rather than weight loss.

1.2 This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of whoever uses this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Applicable Documents

2.1 ASTM Standards:

- A 262 Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels^{3,4}
- E 8 Methods for Tension Testing of Metallic Materials⁵
- G 1 Practice for Preparing, Cleaning, and Eval-

- uating Corrosion Test Specimens⁴
- G 4 Method for Conducting Corrosion Coupon Tests in Plant Equipment⁴
- G 16 Practice for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data⁴
- G 46 Practice for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion⁴

3. Significance and Use

3.1 Corrosion testing by its very nature precludes complete standardization. This practice, rather than a standardized procedure, is presented as a guide so that some of the pitfalls of such testing may be avoided.

3.2 Experience has shown that all metals and alloys do not respond alike to the many factors that affect corrosion and that "accelerated" corrosion tests give indicative results only, or may even be entirely misleading. It is impractical to propose an inflexible standard laboratory corrosion testing procedure for general use, except for material qualification tests where standardization is obviously required.

3.3 In designing any corrosion test, consideration must be given to the various factors di-

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G-1 on Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G01.05 on Laboratory Corrosion Tests.

Current edition approved May 30, 1972. Published February 1972.

² This practice is based upon NACE Standard TM-01-77 "Test Method—Laboratory Corrosion Testing of Metals for Process Industries", with modifications to relate more directly to Practices G 1 and G 31 and Method G 4.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.03.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.02.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

cussed in this practice, because these factors have been found to affect greatly the results obtained.

4. Interferences

4.1 The methods and procedures described herein represent the best current practices for conducting laboratory corrosion tests as developed by corrosion specialists in the process industries. For proper interpretation of the results obtained, the specific influence of certain variables must be considered. These include:

4.1.1 Metal specimens immersed in a specific hot liquid may not corrode at the same rate or in the same manner as in equipment where the metal acts as a heat transfer medium in heating or cooling the liquid. If the influence of heat transfer effects is specifically of interest, specialized procedures (in which the corrosion specimen serves as a heat transfer agent) must be employed (1).⁶

4.1.2 In laboratory tests, the velocity of the environment relative to the specimens will normally be determined by convection currents or the effects induced by aeration or boiling or both. If the specific effects of high velocity are to be studied, special techniques must be employed to transfer the environment through tubular specimens or to move it rapidly past the plane face of a corrosion coupon (2). Alternatively, the coupon may be rotated through the environment, although it is then difficult to evaluate the velocity quantitatively because of the stirring effects incurred.

4.1.3 The behavior of certain metals and alloys may be profoundly influenced by the presence of dissolved oxygen. If this is a factor to be considered in a specific test, the solution should be completely aerated or deaerated in accordance with 8.7.

4.1.4 In some cases, the rate of corrosion may be governed by other minor constituents in the solution, in which case they will have to be continually or intermittently replenished by changing the solution in the test.

4.1.5 Corrosion products may have undesirable effects on a chemical product. The amount of possible contamination can be estimated from the loss in mass of the specimen, with proper application of the expected relationships among (1) the area of corroding surface, (2) the mass of the chemical product handled, and (3) the duration of contact of a unit of mass of the chemical

product with the corroding surface.

4.1.6 Corrosion products from the coupon may influence the corrosion rate of the metal itself or of different metals exposed at the same time. For example, the accumulation of cupric ions in the testing of copper alloys in intermediate strengths of sulfuric acid will accelerate the corrosion of copper alloys, as compared to the rates that would be obtained if the corrosion products were continually removed. Cupric ions may also exhibit a passivating effect upon stainless steel coupons exposed at the same time. In practice, only alloys of the same general type should be exposed in the testing apparatus.

4.1.7 Coupon corrosion testing is predominantly designed to investigate general corrosion. There are a number of other special types of phenomena of which one must be aware in the design and interpretation of corrosion tests.

4.1.7.1 Galvanic corrosion may be investigated by special devices which couple one coupon to another in electrical contact. The behavior of the specimens in this galvanic couple are compared with that of insulated specimens exposed on the same holder and the galvanic effects noted. It should be observed, however, that galvanic corrosion can be greatly affected by the area ratios of the respective metals, the distance between the metals and the resistivity of the electrolyte. The coupling of corrosion coupons then yields only qualitative results, as a particular coupon reflects only the relationship between these two metals at the particular area ratio involved.

4.1.7.2 Crevice corrosion or concentration cell corrosion may occur where the metal surface is partially blocked from the corroding liquid as under a spacer or supporting hook. It is necessary to evaluate this localized corrosion separately from the overall mass loss.

4.1.7.3 Selective corrosion at the grain boundaries (for example, intergranular corrosion of sensitized austenitic stainless steels) will not be readily observable in mass loss measurements unless the attack is severe enough to cause grain dropping, and often requires microscopic examination of the coupons after exposure.

4.1.7.4 Dealloying or "parting" corrosion is a condition in which one constituent is selectively removed from an alloy, as in the dezincification

⁶The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this practice.

of brass or the graphitization of cast iron. Close attention and a more sophisticated evaluation than a simple mass loss measurement is required to detect this phenomenon.

4.1.7.5 Certain metals and alloys are subject to a highly localized type of attack called pitting corrosion. This cannot be evaluated by mass loss alone. The reporting of nonuniform corrosion is discussed below. It should be appreciated that pitting is a statistical phenomenon and that the incidence of pitting may be directly related to the area of metal exposed. For example, a small coupon is not as prone to exhibit pitting as a large one and it is possible to miss the phenomenon altogether in the corrosion testing of certain alloys, such as the AISI Type 300 series stainless steels in chloride contaminated environments.

4.1.7.6 All metals and alloys are subject to stress-corrosion cracking under some circumstances. This cracking occurs under conditions of applied or residual tensile stress, and it may or may not be visible to the unaided eye or upon casual inspection. A metallographic examination may confirm the presence of stress-corrosion cracking. It is imperative to note that this usually occurs with no significant loss in mass of the test coupon, although certain refractory metals are an exception to these observations. Generally, if cracking is observed on the coupon, it can be taken as positive indication of susceptibility, whereas failure to effect this phenomenon simply means that it did not occur under the duration and specific conditions of the test. Separate and special techniques are employed for the specific evaluation of the susceptibility of metals and alloys to stress corrosion cracking (see Ref. (3)).

5. Apparatus

5.1 A versatile and convenient apparatus should be used, consisting of a kettle or flask of suitable size (usually 500 to 5000 mL), a reflux condenser with atmospheric seal, a sparger for controlling atmosphere or aeration, a thermowell and temperature-regulating device, a heating device (mantle, hot plate, or bath), and a specimen support system. If agitation is required, the apparatus can be modified to accept a suitable stirring mechanism, such as a magnetic stirrer. A typical resin flask setup for this type test is shown in Fig. 1.

5.2 The suggested components can be modified, simplified, or made more sophisticated to

fit the needs of a particular investigation. The suggested apparatus is basic and the apparatus is limited only by the judgment and ingenuity of the investigator.

5.2.1 A glass reaction kettle can be used where the configuration and size of the specimen will permit entry through the narrow kettle neck (for example, 45/50 ground-glass joint). For solutions corrosive to glass, suitable metallic or plastic kettles may be employed.

5.2.2 In some cases a wide-mouth jar with a suitable closure is sufficient when simple immersion tests at ambient temperatures are to be investigated.

5.2.3 Open-beaker tests should not be used because of evaporation and contamination.

5.2.4 In more complex tests, provisions might be needed for continuous flow or replenishment of the corrosive liquid, while simultaneously maintaining a controlled atmosphere.

6. Sampling

6.1 The bulk sampling of products is outside the scope of this practice.

7. Test Specimen

7.1 In laboratory tests, uniform corrosion rates of duplicate specimens are usually within $\pm 10\%$ under the same test conditions. Occasional exceptions, in which a large difference is observed, can occur under conditions of borderline passivity of metals or alloys that depend on a passive film for their resistance to corrosion. Therefore, at least duplicate specimens should normally be exposed in each test.

7.2 If the effects of corrosion are to be determined by changes in mechanical properties, untested duplicate specimens should be preserved in a noncorrosive environment at the same temperature as the test environment for comparison with the corroded specimens. The mechanical property commonly used for comparison is tensile strength. Measurement of percent elongation is a useful index of embrittlement. The procedures for determining these values are shown in detail in Methods E 8.

7.3 The size and shape of specimens will vary with the purpose of the test, nature of the materials, and apparatus used. A large surface-to-mass ratio and a small ratio of edge area to total area are desirable. These ratios can be achieved through the use of square or circular specimen

of minimum thickness. Masking may also be used to achieve the desired area ratios but may cause crevice corrosion problems. Circular specimens should preferably be cut from sheet and not bar stock, to minimize the exposed end grain. Special coupons (for example, sections of welded tubing) may be employed for specific purposes.

7.3.1 A circular specimen of about 38-mm (1.5-in.) diameter is a convenient shape for laboratory corrosion tests. With a thickness of approximately 3 mm (0.125-in.) and an 8-mm ($\frac{5}{16}$ -in.) or 11-mm ($\frac{7}{16}$ -in.) diameter hole for mounting, these specimens will readily pass through a 45/50 ground-glass joint of a distillation kettle. The total surface area of a circular specimen is given by the following equation:

$$A = \pi/2(D^2 - d^2) + \pi rD + \pi d^2$$

where:

t = thickness,

D = diameter of the specimen, and

d = diameter of the mounting hole.

7.3.1.2 If the hole is completely covered by the mounting support, the last term ($\pi r d$) in the equation is omitted.

7.3.2 Strip coupons 50 by 25 by 1.6 or 3 mm (2 by 1 by $\frac{1}{16}$ or $\frac{1}{8}$ in.) may be preferred as corrosion specimens, particularly if interface or liquid line effects are to be studied by the laboratory tests (see Fig. 1), but the evaluation of such specific effects are beyond the scope of this practice.

7.3.3 All specimens should be measured carefully to permit accurate calculation of the exposed areas. A geometric area calculation accurate to $\pm 1\%$ is usually adequate.

7.4 More uniform results may be expected if a substantial layer of metal is removed from the specimens to eliminate variations in condition of the original metallic surface. This can be done by chemical treatment (pickling), electrolytic removal, or by grinding with a coarse abrasive paper or cloth such as No. 50, using care not to work harden the surface (see 5.7). At least 0.0025 mm (0.0001 in.) or 1.55 to 2.33 mg/cm² (10 to 15 mg/in.²) should be removed. (If clad alloy specimens are to be used, special attention must be given to ensure that excessive metal is not removed.) After final preparation of the specimen surface, the specimens should be stored in a desiccator until exposure, if they are not used immediately. In special cases (for example, for aluminum and certain copper alloys), a mini-

mum of 24-h storage in a desiccator is recommended. The choice of a specific treatment must be considered on the basis of the alloy to be tested and the reasons for testing. A commercial surface may sometimes yield the most significant results. Too much surface preparation may remove segregated elements, surface contamination, etc., and therefore not be representative.

7.5 Exposure of sheared edges should be avoided unless the purpose of the test is to study effects of the shearing operation. It may be desirable to test a surface representative of the material and metallurgical conditions used in practice.

7.6 The specimen can be stamped with an appropriate identifying mark. If metallic contamination of the stamped area may influence the corrosion behavior, chemical cleaning must be employed to remove any traces of foreign particles from the surface of the coupon (for example, by immersion of stainless steel coupons in dilute nitric acid following stamping with steel dies).

7.6.1 The stamp, besides identifying the specimen, introduces stresses and cold work in the specimen that could be responsible for localized corrosion or stress-corrosion cracking, or both.

7.6.2 Stress-corrosion cracking at the identifying mark is a positive indication of susceptibility to such corrosion. However, the absence of cracking should not be interpreted as indicating resistance (see 4.1.7.6).

7.7 Final surface treatment of the specimens should include finishing with No. 120 abrasive paper or cloth or the equivalent, unless the surface is to be used in the mill finished condition. This resurfacing may cause some surface work hardening, to an extent which will be determined by the vigor of the surfacing operation, but is not ordinarily significant. The surface finish to be encountered in service may be more appropriate for some testing.

7.7.1 Coupons of different alloy compositions should never be ground on the same cloth.

7.7.2 Wet grinding should be used on alloys which work harden quickly, such as the austenitic stainless steels.

7.8 The specimens should be finally degreased by scrubbing with bleach-free scouring powder, followed by thorough rinsing in water and in a suitable solvent (such as acetone, methanol, or a mixture of 50% methanol and 50% ether), and air dried. For relatively soft metals (such as aluminum, magnesium, and copper), scrubbing with abrasive powder is not always needed and

can mar the surface of the specimen. Proper ultrasonic procedures are an acceptable alternate. The use of towels for drying may introduce an error through contamination of the specimens with grease or lint.

7.9 The dried specimens should be weighed on an analytical balance to an accuracy of at least ± 0.5 mg. If cleaning deposits (for example, scouring powder) remain or lack of complete dryness is suspected, then recleaning and drying is performed until a constant mass is attained.

7.10 The method of specimen preparation should be described when reporting test results, to facilitate interpretation of data by other persons.

7.11 The use of welded specimens is sometimes desirable, because some welds may be cathodic or anodic to the parent metal and may affect the corrosion rate.

7.11.1 The heat-affected zone is also of importance but should be studied separately, because welds on coupons do not faithfully reproduce heat input or size effects of full-size weldments.

7.11.2 Corrosion of a welded coupon is best reported by description and thickness measurements rather than a mils per year rate, because the attack is normally localized and not representative of the entire surface.

7.11.3 A complete discussion of corrosion testing of welded coupons or the effect of heat treatment on the corrosion resistance of a metal is not within the scope of this practice.

8. Test Conditions

8.1 Selection of the conditions for a laboratory corrosion test will be determined by the purpose of the test.

8.1.1 If the test is to be a guide for the selection of a material for a particular purpose, the limits of the controlling factors in service must be determined. These factors include oxygen concentration, temperature, rate of flow, pH value, composition, and other important characteristics of the solution.

8.2 An effort should be made to duplicate all pertinent service conditions in the corrosion test.

8.3 It is important that test conditions be controlled throughout the test in order to ensure reproducible results.

8.4 The spread in corrosion rate values for duplicate specimens in a given test probably

should not exceed $\pm 10\%$ of the average when the attack is uniform.

8.5 Composition of Solution:

8.5.1 Test solutions should be prepared accurately from chemicals conforming to the Specifications of the Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society⁷ or distilled water, except in those cases where naturally occurring solutions or those taken directly from some plant process are used.

8.5.2 The composition of the test solution should be controlled to the fullest extent possible and should be described as completely and accurately as possible when the results are reported.

8.5.2.1 Minor constituents should not be overlooked because they often affect corrosion rates.

8.5.2.2 Chemical content should be reported as percentage by weight of the solutions. Molarity and normality are also helpful in defining the concentration of chemicals in some test solutions.

8.5.3 If problems are suspected, the composition of the test solutions should be checked at the end of the test to determine the extent of change in composition, such as might result from evaporation or depletion.

8.5.4 Evaporation losses may be controlled by a constant level device or by frequent addition of appropriate solution to maintain the original volume within $\pm 1\%$. Preferably, the use of reflux condenser ordinarily precludes the necessity of adding to the original kettle charge.

8.5.5 In some cases, composition of the test solution may change as a result of catalytic decomposition or by reaction with the test coupon. These changes should be determined if possible. Where required, the exhausted constituent should be added or a fresh solution provided during the course of the test.

8.5.6 When possible, only one type of metal should be exposed in a given test (see 4.1.6).

8.6 Temperature of Solution:

8.6.1 Temperature of the corroding solution should be controlled within $\pm 1^\circ\text{C}$ ($\pm 1.8^\circ\text{F}$) at

⁷"Reagent Chemicals, American Chemical Society Specifications," Am. Chem. Soc., Washington, DC. For suggestions on the testing of reagents not listed by the American Chemical Society, see "Reagent Chemicals and Standards," by Jose Rosin, D. Van Nostrand Co., Inc., New York, NY, and the "United States Pharmacopoeia."

must be stated in the report of test results.

8.6.2 If no specific temperature, such as boiling point, is required or if a temperature range is to be investigated, the selected temperatures used in the test, and their respective duration, must be reported.

8.6.3 For tests at ambient temperature, the tests should be conducted at the highest temperature anticipated for stagnant storage in summer months. This temperature may be as high as from 40 to 45°C (104 to 113°F) in some areas. The variation in temperature should be reported also (for example, 40 ± 2°C).

8.7 Aeration of Solution:

8.7.1 Unless specified, the solution should not be aerated. Most tests related to process equipment should be run with the natural atmosphere inherent in the process, such as the vapors of the boiling liquid.

8.7.2 If aeration is employed, the specimen should not be located in the direct air stream from the sparger. Extraneous effects can be encountered if the air stream impinges on the specimens.

8.7.3 If exclusion of dissolved oxygen is necessary, specific techniques are required, such as prior heating of the solution and sparging with an inert gas (usually nitrogen). A liquid atmospheric seal is required on the test vessel to prevent further contamination.

8.7.4 If oxygen saturation of the test solution is desired, this can best be achieved by sparging with oxygen. For other degrees of aeration, the solution should be sparged with air or synthetic mixtures of air or oxygen with an inert gas. Oxygen saturation is a function of the partial pressure of oxygen in the gas.

8.8 Solution Velocity:

8.8.1 The effect of velocity is not usually determined in normal laboratory tests, although specific tests have been designed for this purpose.

8.8.2 Tests at the boiling point should be conducted with the minimum possible heat input, and boiling chips should be used to avoid excessive turbulence and bubble impingement.

8.8.3 In tests below the boiling point, thermal convection generally is the only source of liquid velocity.

8.8.4 In test solutions with high viscosity, supplemental controlled stirring with a magnetic stirrer is recommended.

8.9 Volume of Test Solution:

8.9.1 The volume of the test solution should be large enough to avoid any appreciable change in its corrosivity during the test, either through exhaustion of corrosive constituents or by accumulation of corrosion products that might affect further corrosion.

8.9.2 Two examples of a minimum "solution volume-to-specimen area" ratio are 20 mL/cm² (125 mL/in.²) of specimen surface (Practice A 262), and 40 mL/cm² (250 mL/in.²).

8.9.3 When the test objective is to determine the effect of a metal or alloy on the characteristics of the test solution (for example, to determine the effects of metals on dyes), it is desirable to reproduce the ratio of solution volume to exposed metal surface that exists in practice. The actual time of contact of the metal with the solution must also be taken into account. Any necessary distortion of the test conditions must be considered when interpreting the results.

8.10 Method of Supporting Specimens:

8.10.1 The supporting device and container should not be affected by or cause contamination of the test solution.

8.10.2 The method of supporting specimens will vary with the apparatus used for conducting the test, but should be designed to insulate the specimens from each other physically and electrically and to insulate the specimens from any metallic container or supporting device used within the apparatus.

8.10.3 Shape and form of the specimen support should assure free contact of the specimen with the corroding solution, the liquid line, or the vapor phase as shown in Fig. 1. If clad alloys are exposed, special procedures will be required to ensure that only the cladding is exposed, unless the purpose is to test the ability of the cladding to protect cut edges in the test solution.

8.10.4 Some common supports are glass or ceramic rods, glass saddles, glass hooks, fluorocarbon plastic strings, and various insulated or coated metallic supports.

8.11 Duration of Test:

8.11.1 Although duration of any test will be determined by the nature and purpose of the test, an excellent procedure for evaluating the effect of time on corrosion of the metal and also on the corrosiveness of the environment in laboratory tests has been presented by Wachter and Treseder (4). This technique is called the "planned interval test," and the procedure and evaluation of results

are given in Table 1. Short tests may require the removal of solid corrosion products between exposure periods will not measure accurately the normal changes of corrosion with time.

8.11.2 Materials that experience severe corrosion generally do not ordinarily need lengthy tests to obtain accurate corrosion rates. However, there are cases where this assumption is not valid. For example, lead exposed to sulfuric acid corrodes at an extremely high rate at first, while building a protective film; then the rates decrease considerably so that further corrosion is negligible. The phenomenon of forming a protective film is observed with many corrosion-resistant materials. Therefore, short tests on such materials would indicate a high corrosion rate and be completely misleading.

8.11.3 Short-time tests also can give misleading results on alloys that form passive films, such as stainless steels. With borderline conditions, a prolonged test may be needed to permit breakdown of the passive film and subsequent more rapid attack. Consequently, tests run for long periods are considerably more realistic than those conducted for short durations. This statement must be qualified by stating that corrosion should not proceed to the point where the original specimen size or the exposed area is drastically reduced or where the metal is perforated.

8.11.4 If anticipated corrosion rates are moderate or low, the following equation gives the suggested test duration:

$$\text{Hours} = 2000 / (\text{corrosion rate in mpy})$$

where mpy = mils per year (see 11.2.1 and Note 2 for conversion to other units).

8.11.4.1 *Example*—Where the corrosion rate is 10 mpy, the test should run for at least 200 h.

8.11.4.2 This method of estimating test duration is useful only as an aid in deciding, after a test has been made, whether or not it is desirable to repeat the test for a longer period. The most common testing periods are 48 to 168 h (2 to 7 days).

8.11.5 In some cases, it may be necessary to know the degree of contamination caused by the products of corrosion. This can be accomplished by analysis of the solution after corrosion has occurred. The corrosion rate can be calculated from the concentration of the matrix metal found in the solution and it can be compared to that determined from the mass loss of the specimens.

adhere to the specimen as a scale and the corrosion rate calculated from the metal content in the solution is not always correct.

8.12 The design of corrosion testing programs is further discussed in Practice G 16.

9. Methods of Cleaning Specimens after Test

9.1 Before specimens are cleaned, their appearance should be observed and recorded. Location of deposits, variations in types of deposits, or variations in corrosion products are extremely important in evaluating localized corrosion, such as pitting and concentration cell attack.

9.2 Cleaning specimens after the test is a vital step in the corrosion test procedure and if not done properly, can cause misleading results.

9.2.1 Generally, the cleaning procedure should remove all corrosion products from specimens with a minimum removal of sound metal.

9.2.2 Set rules cannot be applied to specimen cleaning, because procedures will vary, depending on the type of metal being cleaned and on the degree of adherence of corrosion products.

9.3 Cleaning methods can be divided into three general categories: mechanical, chemical, and electrolytic.

9.3.1 Mechanical cleaning includes scrubbing, scraping, brushing, mechanical shocking, and ultrasonic procedures. Scrubbing with a bristle brush and mild abrasive is the most popular of these methods. The others are used principally as a supplement to remove heavily encrusted corrosion products before scrubbing. Care should be used to avoid the removal of sound metal.

9.3.2 Chemical cleaning implies the removal of material from the surface of the specimen by dissolution in an appropriate chemical solution. Solvents such as acetone, carbon tetrachloride, and alcohol are used to remove oil, grease, or resin and are usually applied prior to other methods of cleaning. Chemicals are chosen for application to a specific material. Methods for chemical cleaning after testing of specific metals and alloys are described in Practice G 1.

9.3.3 Electrolytic cleaning should be preceded by scrubbing to remove loosely adhering corrosion products. A method of electrolytic cleaning is described in Practice G 1.

9.3.3.1 Precautions must be taken to ensure good electrical contact with the specimen, to avoid contamination of the solution with cast

reducible metal ions, and to ensure that inhibitor decomposition has not occurred.

9.4 Whatever treatment is used to clean specimens after a corrosion test, its effect in removing metal should be determined and the mass loss should be corrected accordingly. A "blank" specimen should be weighed before and after exposure to the cleaning procedure to establish this mass loss (see also Practice G 1). Careful observation is needed to ensure that pitting does not occur during cleaning.

9.4.1 Following removal of all scale, the specimen should be treated as discussed in 5.8.

9.4.2 The description of the cleaning method should be included with the data reported.

10. Interpretation of Results

10.1 After corroded specimens have been cleaned, they should be reweighed with an accuracy corresponding to that of the original weighing. The mass loss during the test period can be used as the principal measure of corrosion.

10.2 After the specimens have been reweighed, they should be examined carefully for the presence of any pits. If there are any pits, the average and maximum depths of pits are determined with a pit gage or a calibrated microscope which can be focused first on the edges and then on the bottoms of the pits. The degree of lateral spreading of pits may also be noted.

10.2.1 Pit depths should be reported in millimeters or thousandths of an inch for the test period and not interpolated or extrapolated to millimeters per year, thousandths of an inch per year, or any other arbitrary period because rarely, if ever, is the rate of initiation or propagation of pits uniform.

10.2.2 The size, shape, and distribution of pits should be noted. A distinction should be made between those occurring underneath the supporting devices (concentration cells) and those on the surfaces that were freely exposed to the test solution (see Recommended Practice G 46).

10.3 If the material being tested is suspected of being subject to dealloying forms of corrosion such as dezincification or to intergranular attack, a cross section of the specimen should be microscopically examined for evidence of such attack.

10.4 The specimen may be subjected to simple bending tests to determine whether any embrittlement attack has occurred.

10.5 It may be desirable to make quantitative

mechanical tests, comparing the exposed specimens with uncorroded specimens reserved for the purpose, as described in 7.2.

11. Calculating Corrosion Rates

11.1 Calculating corrosion rates requires several pieces of information and several assumptions:

11.1.1 The use of corrosion rates implies that all mass loss has been due to general corrosion and not to localized corrosion, such as pitting or intergranular corrosion of sensitized areas on welded coupons. Localized corrosion is reported separately.

11.1.2 The use of corrosion rates also implies that the material has not been internally attacked as by dezincification or intergranular corrosion.

11.1.3 Internal attack can be expressed as a corrosion rate if desired. However, the calculations must not be based on weight loss (except in qualification tests such as Practice A 262), which is usually small but on microsections which show depth of attack.

11.2 Assuming that localized or internal corrosion is not present or is recorded separately in the report, the average corrosion rate can be calculated by the following equation:

$$\text{Corrosion rate} = (K \times W) / (A \times T \times D)$$

where:

K = a constant (see below)

T = time of exposure in hours to the nearest 0.01 h.

A = area in cm^2 to the nearest 0.01 cm^2 .

W = mass loss in g, to nearest 1 mg (corrected for any loss during cleaning (see 9.4)), and

D = density in g/cm^3 , (see Appendix X1 of Practice G 1).

11.2.1 Many different units are used to express corrosion rates. Using the above units for T , A , W , and D , the corrosion rate can be calculated in a variety of units with the following appropriate value of K :

Corrosion Rate Units Desired	Constant (K) in Corrosion Rate Equation
mils per year (mpy)	3.45×10^6
inches per year (ipy)	3.45×10^7
inches per month (ipm)	2.87×10^6
millimetres per year (mm/y)	8.76×10^4
micrometres per year ($\mu\text{m}/\text{y}$)	8.76×10^7
picometres per second (pm/s)	2.78×10^6

Corrosion Rate Units Desired	Constant (K) in Corrosion Rate Equation
grams per square metre per hour ($\text{g}/\text{m}^2 \text{ h}$)	$1.00 \times 10^4 \times D^3$
milligrams per square decimetre per day (mdd)	$2.40 \times 10^6 \times D^3$
micrograms per square metre per second ($\mu\text{g}/\text{m}^2 \text{ s}$)	$2.78 \times 10^6 \times D^3$

* Density is not needed to calculate the corrosion rate in these units. The density in the constant K cancels out the density in the corrosion rate equation.

NOTE 2—If desired, these constants may also be used to convert corrosion rates from one set of units to another. To convert a corrosion rate in units X to a rate of units Y , multiply by K_Y/K_X for example:

$$15 \text{ mpy} = 15 \times [(2.78 \times 10^6)/(3.45 \times 10^6)] \text{ pm/s} \\ = 12.1 \text{ pm/s}$$

12. Reporting the Data

12.1 The importance of reporting all data as completely as possible cannot be overemphasized.

12.2 Expansion of the testing program in the future or correlating the results with tests of other investigators will be possible only if all pertinent information is properly recorded.

12.3 The following checklist is a recommended guide for reporting all important information and data.

12.3.1 Corrosive media and concentration (any changes during test).

12.3.2 Volume of test solution.

12.3.3 Temperature (maximum, minimum, average).

12.3.4 Aeration (describe conditions or technique).

12.3.5

Agitation (describe conditions or technique).

12.3.6 Type of apparatus used for test.

12.3.7 Duration of each test.

12.3.8 Chemical composition or trade name of metals tested.

12.3.9 Form and metallurgical conditions of specimens.

12.3.10 Exact size, shape, and area of specimens.

12.3.11 Treatment used to prepare specimens for test.

12.3.12 Number of specimens of each material tested, and whether specimens were tested separately or which specimens tested in the same container.

12.3.13 Method used to clean specimens after exposure and the extent of any error expected by this treatment.

12.3.14 Initial and final masses and actual mass losses for each specimen.

12.3.15 Evaluation of attack if other than general, such as crevice corrosion under support rod, pit depth and distribution, and results of microscopical examination or bend tests.

12.3.16 Corrosion rates for each specimen.

12.4 Minor occurrences or deviations from the proposed test program often can have significant effects and should be reported if known.

12.5 Statistics can be a valuable tool for analyzing the results from test programs designed to generate adequate data. Excellent references for the use of statistics in corrosion studies include Ref. (5) through (7) and in Practice G 16.

REFERENCES

- (1) Fisher, A. O. and Whitney, Jr., F. L., "Laboratory Methods for Determining Corrosion Rates Under Heat Flux Conditions," *Corrosion*, Vol. 15, No. 5, May 1959, p. 257t.
- (2) U.S. Patent 3,228,236, 1969.
- (3) "Stress Corrosion Test Environments and Test Durations," *Symposium on Stress Corrosion Testing*, ASTM STP 425, ASTM, 1967.
- (4) Wachter, A. and Treseder, R. S., "Corrosion Testing Evaluation of Metals for Process Equipment," *Chemical Engineering Progress*, Vol. 43, June 1947, pp. 315-326.
- (5) Mickley, H. S., Sherwood, F. K., and Reed, C. E., editors, *Applied Mathematics in Chemical Engineering*, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Co., New York, NY 1957.
- (6) Youden, W. J., *Experimentation and Measurement*, National Science Teachers Assn., Washington, DC, 1962.
- (7) Booth, F. F. and Tucker, G. E. G., "Statistical Distribution of Endurance in Electrochemical Stress-Corrosion Tests," *Corrosion*, Vol. 21, No. 5, May 1965, pp. 173-177.
- (8) Champion, F. A., *Corrosion Testing Procedures*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1965.

TABLE 1 Planned Interval Corrosion Test

(Reprinted by permission from *Chemical Engineering Progress*, June 1947.)

Identical specimens all placed in the same corrosive fluid. Imposed conditions of the test kept constant for entire time $t + 1$. Letters, A_1, A_2, A_{n+1}, B , represent corrosion damage experienced by each test specimen. A_2 is calculated by subtracting A_1 from A_{n+1} .

Occurrences During Corrosion Test		Criteria
Liquid corrosiveness	unchanged	$A_1 = B$
	decreased	$B < A_1$
	increased	$A_1 < B$
Metal corrodibility	unchanged	$A_2 = B$
	decreased	$A_2 < B$
	increased	$B < A_2$

Combinations of Situations

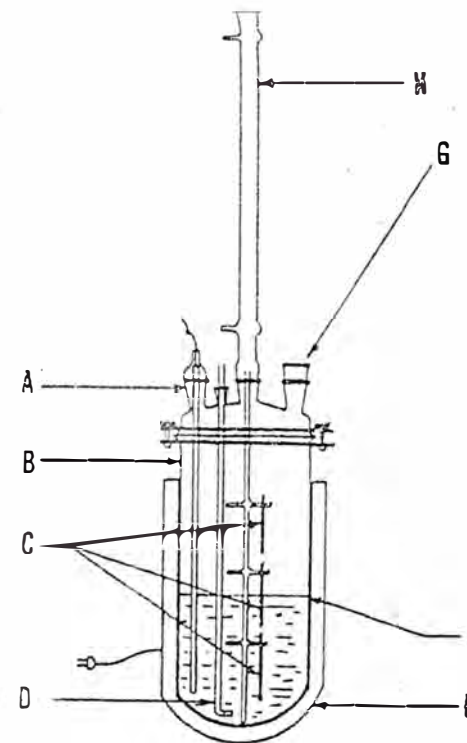
Liquid corrosiveness	Metal corrodibility	Criteria
1. unchanged	unchanged	$A_1 = A_2 = B$
2. unchanged	decreased	$A_2 < A_1 = B$
3. unchanged	increased	$A_1 = B < A_2$
4. decreased	unchanged	$A_2 = B < A_1$
5. decreased	decreased	$A_2 < B < A_1$
6. decreased	increased	$A_1 > B < A_2$
7. increased	unchanged	$A_1 < A_2 = B$
8. increased	decreased	$A_1 < B > A_2$
9. increased	increased	$A_1 < B < A_2$

Example: Conditions: Duplicate strips of low-carbon steel, each 1/4 by 3 in., immersed in 200 mL of 10% $AlCl_3$ -90% $SbCl_5$ mixture through which dried HCl gas was slowly bubbled at atmospheric pressure. Temperature 90°C.

	Interval, days	Mass Loss, mg	Penetration, mils	Apparent Corrosion Rate, mpy
A_1	0-1	1080	1.69	620
A_2	0-3	1430	2.24	270
A_{n+1}	0-4	1460	2.29	210
B	3-4	70	0.11	40
A_2	calc. 3-4	30	0.05	18

Example: $A_2 < B < A_1$
 $0.05 < 0.11 < 1.69$

Therefore, liquid markedly decreased in corrosiveness during test, and formation of partially protective scale on the steel was indicated.



NOTE.—The flask can be used as a versatile and convenient apparatus to conduct simple immersion tests. Configuration of top to flask is such that more sophisticated apparatus can be added as required by the specific test being conducted. A = thermowell, B = resin flask, C = specimens hung on supporting device, D = air inlet, E = heating mantle, F = liquid interface, G = opening in flask for additional apparatus that may be required, and H = reflux condenser.

FIG. 1 Typical Resin Flask

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

**Anexo N°3: ESQUEMA PRODUCTIVO DE
REFINERÍA CONCHÁN**

Anexo N°3 : ESQUEMA PRODUCTIVO DE REFINERÍA CONCHÁN

La Refinería Conchán está ubicada en el distrito de Lurín a aproximadamente 26.5 Km. Al sur de Lima y a unos 10m sobre el nivel del mar.

1.CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO

La Refinería fue inaugurada en 1961 con una Unidad de Destilación Primaria de 8.0 MBD. Hasta el año 1994 la capacidad de procesamiento de la Unidad de Destilación Primaria era máximo de 6.7 MBD de crudo mezcla y la de Destilación al Vacío de 4.4MBD de crudo reducido. Luego de la implementación de proyectos como cambio de bombas , líneas de procesos, instalación de Zona Convectiva en el Horno F-1, Zona Convectiva en el Horno F-2, proyecto de modernización de la instrumentación de Refinería Conchán, repotenciación del tren de intercambio de calor, etc. A partir de 1997 se ha ido logrando incrementar la carga desde niveles de 6700 hasta 12000 BPD que se procesan en la Unidad en forma sostenida.

La Refinería tiene dos modalidades de operación: Operación Asfalto y Operación Aceite Combustible.

Las instalaciones actuales de la Refinería permiten la producción de gasolina de octanos, kerosene, diesel 2, residuales 5/6 y Bases/Cementos Asfálticos de diferentes rangos de penetración.

2.DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DESTILACIÓN PRIMARIA.

El crudo proveniente de los tanques se divide en dos circuitos los mismos que intercambian calor con los productos calientes provenientes de las columnas de destilación primaria y de vacío.

Luego las dos corrientes se unen y se calientan en el Horno F-1 a 640°F, vaporizándose la mezcla a esta temperatura.

El crudo ingresa a la columna de destilación C-1 y se fracciona en los siguientes cortes:

Gases incondensables de tope: descargan a la atmósfera.

Producto de Tope: constituido por gasolina y solvente N°1 . Los vapores de tope se enfrían con intercambio de calor con crudo y posteriormente con aerorefrigerantes, para luego ser retornados una parte como reflujo externo a la torre y otra enviada al tanque de almacenamiento para la preparación de gasolinas.

Solvente 3 /Solvente RC: Se extrae del plato 26 de la columna y pasa por el despojador C-5. En este despojador se inyecta vapor de 100 psig a fin de controlar su punto de inflamación. Luego de enfriarse en aerorefrigerante se almacena en su tanque, o es enviado a los tanque de kerosene o diesel.

Kerosene: Se extrae del plato 20 y en forma similar al Solvente 3, vía despojador C-2 es bombeado a través del intercambiador E-2 y enfriador E-7, luego es almacenado en su respectivo tanque.

Diesel: Se extrae del plato 12. Parte de esta corriente es retornada a la columna como reflujo a fin de mantener el balance térmico de la torre y la otra es enviada a su tanque previo enfriamiento e intercambio de calor con el crudo.

Crudo Reducido: Se extrae del fondo de la columna con la bomba P-9 A/B y vía intercambiador con crudo se puede enviar como carga a la Unidad de Vacío.

3.DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DESTILACIÓN AL VACÍO

La Unidad de Vacío de puede operar bajo dos modalidades: Operación Asfalto , y Operación residual.

3.1.Operación Asfalto.

El crudo reducido del fondo de la Columna de Destilación Primaria es enviado por la bomba de fondos al Horno F-2 donde se calienta hasta la temperatura de 700°F y pasa luego a la Columna de Vacío.

Esta columna opera a una presión de vacío de 29 in de Hg. , generada por un sistema de inyectores. Los productos (cortes) que se obtienen son los siguientes:

Gases Incondensables de Tope: descarga a la atmósfera.

Productos de Tope: constituido por Nafta, este producto es condensado en el enfriador de aire E-32 y es acumulado en el drum V-4, para ser enviado al pool de diesel.

Gasóleo Ligero: es extraído del plato 18 y es bombeado a través del intercambiador E-33A (crudo vs. gasóleo liviano), luego es enfriado en el E-34A y enviado a su respectivo tanque.

Gasóleo Pesado: Usado para la formación de Residuales Asfaltos es extraído del plato 9 y es bombeado a través del intercambiador E-33B (crudo vs. gasóleo pesado), luego es enfriado en el E-34A y enviado a su respectivo tanque.

Asfalto: es extraído del fondo de la torre y bombeado a los tanques una vez que intercambia calor con el crudo.

Es factible obtener dos tipos de asfaltos, solidos y líquidos.

Dentro de los sólidos se tiene diversos grados de penetración: Asfalto 40/50 , 60/70, 85/100, 120/150.

Asimismo la **Base Asfáltica usada para la formulación de asfaltos líquidos** con inyección de solvente, bajo este esquema se prepara el asfalto RC-70 y RC-250, en el caso de la formulación de RC-70 se usa la base mezclada con kerosene.

Además **Base Asfáltica para la formulación de RONAX** 250, 500, 800 mezclando la base asfáltica con aceite lubricante DL-8000.

3.2.Operación Residual.

En este caso las condiciones de la zona flash de la torre son reguladas hasta 670°F, a fin de obtener por los fondos de la columna un producto con una viscosidad tal que con la mezcla con gasóleo se obtenga un producto de viscosidad de 638 cSt a 122°F correspondiente a un Residual 6 (petróleo industrial N°6). Es posible obtener también residual pesado (R-500) con menor proporción de material de corte. Durante la Operación Residual el corte de gasóleo es enviado al pool de diesel.

**Anexo N°4: DATOS HISTÓRICOS DE INSPECCIONES
DE PARADAS DE PLANTA
CALIBRACIÓN DE ESPESORES DE TUBOS
HORNOS F-1 Y F-2**

Anexo N°4 a: INSPECCIONES DE PARADAS DE PLANTA - HORNO F-1

TUBO N°	24 DE MAYO 1989		DEL 26 NOVIEMBRE 1991 AL: 20 DICIEMBRE 1991		17 MAYO 1994		DEL: 21 NOVIEMBRE 1994 AL: 12 DICIEMBRE 1994			DEL: 23 - 30 JULIO 1997		DEL: 6 -16 DICIEMBRE 1997		
	Ø NOM=8.89 MM		Ø NOM=7.9 MM		Ø NOM=7.9 MM		Ø NOM=7.9 MM			Ø NOM=7.9 MM				
	H=única	R	H1=5.8 MT		R	H=	R	H=1.0 MT	H= 2.0 MT	R	R	H= SUPERIOR	H= INFERIOR	R
1	7.2		7.2			R						8.9	7.0	
2	8.9		7.5				7.0	8.8	R					
3	7.1		7.5				8.5	8.7	R		R	8.8	8.9	
4	7.0		7.5											
5	7.0		7.8						R		R	8.7	8.9	
6	7.3		7.3						R					
7	7.2		8.8				7.1	8.9	R			8.8	8.0	
8	7.2		7.3				7.0	8.8	R			8.8	8.2	
9	7.3		7.5			R			R					
10	7.2		7.4				7.3	7.2	R					
11	7.2		7.3			R			R			8.9	8.7	
12	7.3		7.2			R								
13	7.0		7.2				8.9	7.2	R			8.2	8.8	
14	8.8		7.3				8.5	8.9	R					
15	7.1		7.2				8.9	8.8	R			8.4	8.1	R
16	8.8		7.1				7.0	7.1	R		R	8.8	8.9	
17	8.7		7.5						R					
18	8.8		7.0						R					
19	8.7		7.0				7.0	7.2	R			5.9	5.7	R
20	8.8		7.1				7.5	7	R		R			
21	8.8		7.3				7.4	7.4	R			8.7	8.9	
22	7.1		7.3				7.0	8.7	R					
23	8.9		8.2				8.8	8.4	R			7.2	7.4	
24	7.1		8.2						R			8.8	8.7	
25	7.0		7.0						R			7.0	7.0	
26	8.9		7.1						R					
27	8.9		7.4						R					
28	8.9		7.4						R					
29	8.8		7.0						R					
30	8.8		8.8						R					
31	7.0		7.1				7.1	7.5	R			8.8	8.7	
32	7.0		7.3						R					
33	7.1		7.2						R		R	8.8	8.5	
34	8.8		8.8						R					
35	8.8		8.8						R			7.2	8.8	
36	8.8		7.0						R					
37	7.0		8.7						R			8.2	8.8	
38	7.0		7				8.8	7.7	R					
39	7.2		8.8						R		R	8.4	8.8	
40	7.5		8.8						R		R			

Indica que se tomaron 8 puntos de medida de espesores en cada tubo:
0.8 , 2.0 , 3.2 , 4.4 , 5.6 , 6.8 , 8.0 , 9.2 MT con relación al "piso "

NO INFORMA - CALIBRACION DE ESPESORES
NO HAY REGISTRO DE CALIBRACION DE ESPESORES

NO HAY REGISTRO DE CALIBRACION DE ESPESORES
NO SE REALIZO CALIBRACION DE ESPESORES

SE HACE REFERENCIA A QUE LA ULTIMA CALIBRACION DE ESPESORES DE TUBOS FUE REALIZADA EN DICIEMBRE DE 1996
PERO SEGUN LA DATA HISTORICA LE VANTAJADA SE TIENE DA LOS DICIEMBRE DE 1994

NI: NO INDICA
R: CAMBIADO

Anexo N° 4 a: INSPECCIONES DE PARADAS DE PLANTA - HORNO F-1 (CONTINUACION)

TUBO N°	DEL: 23 OCTUBRE 1998 AL: 1 NOVIEMBRE 1998		DE: MAYO DEL 2000							DE: DICIEMBRE 2000
	e NOM=7.9 MM		e NOM=7.9 MM				e NOM=10.1 MM			
	H=UNICA	R	H1=1.0 MT	H2=3.5 MT	H3=5.5 MT	R	H1=1.0 MT	H2=3.5 MT	H3=5.5 MT	R
1	8.8						9.8	9.8	9.5	
2	7.2						10.1	10.1	10.0	
3	8.9						9.9	10.0	9.7	
4	7.3						10.0	9.9	9.8	
5	8.8						9.8	9.9	9.9	
8	7.2						9.9	10.0	10.1	
7	8.9						10.1	10.1	10.0	
8	8.8						9.8	10.1	9.8	
9	7.0						10.0	9.9	9.9	
10	7.0						10.1	10.1	9.9	
11	7.5		8.8	8.9	8.8					
12	7.5		8.8	8.9	8.7					
13	8.9		7.0	7.0	7.2					
14	7.2		7.5	7.6	7.2					
15	7.8		7.7	7.5	7.2					
16	7.5		7.7	7.7	7.7					
17	7.4		7.7	7.7	7.5					
18	7.8		7.4	7.5	7.2					
19	7.2		7.6	7.6	7.0					
20	7.4		8.3	8.3	8.4					
21	7.3		8.2	8.2	8.2					
22	7.3		7.1	7.0	7.6					
23	8.9		5.7	5.6	5.7					
24	7.2		7.8	7.9	7.8					
25	8.8		7.1	7.2	7.6					
26	7.2		7.2	7.4	7.5					
27	7.1		7.6	7.6	7.8					
28	7.5		7.1	7.1	7.1					
29	8.9		7.8	7.9	7.9					
30	8.9		8.7	8.7	7.0					
31	7.1		7.2	7.1	8.8					
32	7.4		5.9	8.0	5.8					
33	7.3		7.5	7.5	7.2					
34	7.1		8.1	5.9	5.9					
35	7.5						9.8	9.9	9.9	
36	7.4						9.7	9.8	10.1	
37	7.3						9.8	9.7	9.7	
38	7.0						9.9	9.7	10.1	
39	7.5		5.8	5.6	5.9					
40	7.7		5.8	8.0	8.2					

SOLO SE REALIZARON TRABAJOS SOBRE F-2
(ZONA CONVECTIVA)

N: NO INDICA
R: CAMBIADO

Anexo N° 4 b: INSPECCIONES DE PARADAS DE PLANTA - HORNO F-2

PRIMEROS REEMPLAZOS REGISTRADOS

TUBO N°	24 DE MAYO 1989		DEL: 26 DE NOVIEMBRE 1991 AL: 20 DICIEMBRE 1991				TUBO N°	DEL 24 AL 30 DE ABRIL DE 1993			DEL: 21 NOVIEMBRE 1994 AL: 12 DICIEMBRE 1994			TUBO N°	DEL: 23 - 30 JULIO 1997		TUBO N°	DEL: 6 AL 16 DE DICIEMBRE DE 1997			
	eNON=8.89mm		e NOM = 7.9 mm					eNOM= 7.9mm			eNOM=7.9 MM				R			eNOM=7.9 MM			
	H1=única	R	H1=0,8 MT	H2=5,8 MT	H3=6,8 MT	R		H=0 8 MT	H=2.0 MT	R	H1=1.0 MT	H2= 2.0 MT	R		R	R		H=SUPERIOR	H=INFERIOR	R	
1	6.5		6.9	7.8	7.5		1						1			1	6.9	6.7			
2	6.5		5.0	5.2	5.2		2					R	2	R		2					
3	7.2		5.2	5.2	5.2		3					R	3	R		3	6.6	6.6			
4	6.3		4.8	5.1	5.1		4	5.1					4	R		4					
5	7.2		5.8	5.1	5.2		5						5	R		5	6.9	6.7			
6	6.4		5.2	5.7	5.5		6						6	R		6					
7	7.2		5.4	5.7	5.3		7					R	7			7	6.4	6.2			
8	6.4			5.1			8					R	8			8					
9	7.4			5.5			9					R	9			9	6.5	6.6			
10	6.5			6.0			10					R	10			10					
11	6.5			5.8			11					R	11			11	6.3	6.7			
12	6.8			5.4			12					R	12			12					
13	6.7			5.1			13			5.3	5.0	R	13			13	7.6	7.4			
14	6.7			5.2			14			5.3	5.4	R	14			14					
15	7.0			5.8			15					R	15			15	7.1	7			
16	7.0			5.4			16					R	16			16					
17	6.9			5.8			17			5.5	5.5	R	17			17	6.5	6.3			
18	6.5			5.8			18					R	18			18					
19	6.5			5.6			19					R	19			19	5.3	5.4			
20	6.8			5.6			20					R	20			20					
21	6.7			5.8			21					R	21			21	6.1	5.9			
22	6.7			6.1			22					R	22			22					
23	6.5			5.4			23					R	23			23	5.9	5.9			
24	6.4			7.4(cambiado antes?)			24					R	24			24					
25	6.5			7.0			25					R	25			25	6.7	6.7			
26	6.5			8.0			26					R	26			26					
27	6.4			5.8			27					R	27			27	5.3	5.4		R/5Cr	
28	6.6			5.5			28			5.7	5.1	R	28			28					
29	6.6			5.8			29					R/8Cr	29			29	4.8	4.3		R/5Cr	
30	6.4			6.3			30					R/8Cr	30			30				R/5Cr	
31	6.8			5.7			31					R/8Cr	31			31	5.5	5.5		R/5Cr	
32	6.6			7.5			32					R/8Cr	32			32	5.7	4.9			
33	6.4			5.3			33					R/8Cr	33			33	5.2	5.7			
34	6.4		8.1	7.2	8.9		34					R/8Cr	34			34					
35	6.8		7.1	6.4	7.0		35					R/8Cr	35			35	6.4	7.1			
36	6.6		5.5	7.2	4.9		36	7.6				R/8Cr	36			36				R/5Cr	
37	6.4		7.5	5.2	7.1		37					R/8Cr	37			37	5.2	5.8		R/5Cr	
38	6.4		5.8	7.6	5.9		38						38			38					
39	6.8		6.1	5.2	8.0		39					R/8Cr	39			39	5.8	5.9			
40	7.1		5.8	5.8	5.4		40					R/8Cr	40			40					

NO HAY REGISTRO DE CALIBRACION DE ESPESORES
NO SE REALIZO CALIBRACION DE ESPESORES

SE HACE REFERENCIA A QUE LA ÚLTIMA CALIBRACION DE ESPESORES DE TUBOS FUE REALIZADA EN DICIEMBRE DE 1986
PERO SEGUN LA DATA HISTORICA LEVANTADA SE TIENE DATOS DE DICIEMBRE DE 1994

NI: NO INDICA
R: CAMBIADO

Anexo 4 b: INSPECCIONES DE PARADAS DE PLANTA - HORNO F-2 (CONTINUACION)

TUBO N°	DEL: 23 OCTUBRE 1998 AL: 1 NOVIEMBRE 1998		DE: MARZO 2000				TUBO N°	DE: MAYO DEL 2000					TUBO N°	DE: DICIEMBRE 2000
	e NOM=7.9 MM		e NOM=7.9 MM					e NOM=7.9 MM						
	H=UNICA	R	H=0.6 MT	H= 1.1 MT	H=1.6 MT	R		H1=1,0 MT	H2=3,5 MT	H3=5,5 MT	R	e		
1	7.2		8.9	7.1	7.0		1	7.2	8.0	8.8			1	
2	8.6		8.7	7.0	8.9		2	8.2	7.1	8.8			2	
3	8.7		7.0	8.8	7.5		3	7.2	7.4	8.8			3	
4	8.8		8.9	7.1	7.1		4	7.3	7.3	8.9			4	
5	8.7		7.3	8.8	8.8		5	8.9	7.1	8.8			5	
6	8.5		8.8	8.7	8.7		6	7.0	8.8	8.7			6	
7	8.3		8.8	8.8	8.7		7	8.8	7.0	8.7			7	
8	7.1		8.7	8.7	8.8		8	8.8	7.2	8.8			8	
9	7.1		8.8	8.8	7.0		9	8.9	7.1	8.7			9	
10	7.0		8.8	8.8	8.8		10	7.0	7.2	8.8			10	
11	8.4		8.8	8.8	8.7		11	8.9	8.6	8.7			11	
12	8.9		8.8	8.9	7.2		12	8.9	7.3	8.8			12	
13	7.7		7.3	7.7	7.7		13	7.5	7.8	7.3			13	
14	8.4		8.8	8.9	8.9		14	8.4	7.0	8.7			14	
15	8.4		8.7	8.8	7.0		15	NO	NO	NO	R	10.1 MM	15	
16	8.2		7.5	7.7	7.6		16	7.2	7.1	7.1			16	
17	8.2		8.9	7.0	7.1		17	7.1	7.1	8.8			17	
18	5.7		8.9	7.1	8.8		18	7.2	7.1	8.8			18	
19	5.4		8.0	8.0	8.0		19	NO	NO	NO	R	10.1 MM	19	
20	5.1	R	8.8	8.7	8.8		20	8.9	7.0	8.7			20	
21	5.8		7.3	7.4	7.5		21	7.0	7.2	7.1			21	
22	5.8		7.3	7.4	7.2		22	7.5	7.5	7.2			22	
23	5.4		8.7	8.9	8.5		23	NO	NO	NO	R	10.1 MM	23	
24	8.6		8.7	8.7	8.8		24	NO	NO	NO	R	10.1 MM	24	
25	8.6		8.3	8.5	7.2		25	NO	NO	NO	R	10.1 MM	25	
26	8.9		8.9	7.2	7.0		26	7.3	7.3	8.9			26	
27	8.6		8.8	8.8	8.7		27	7.0	8.8	8.7			27	
28	8.8		7.0	8.9	8.8		28	7.0	7.1	8.7			28	
29	8.7		8.8	8.9	7.2		29	7.3	7.1	8.8			29	
30	8.9		8.9	8.9	8.9		30	NO	NO	NO	R	10.1 MM	30	
31	5.5	R	8.0	7.1	8.8		31	7.2	7.0	8.8			31	
32	8.6		8.9	7.0	8.8		32	7.2	7.2	8.8			32	
33	5.5		8.5	8.7	8.8		33	NO	NO	NO	R	10.1 MM	33	
34	8.9		7.1	8.8	7.1		34	7.1	7.0	8.7			34	
35	8.7		8.8	8.8	7.0		35	7.1	7.2	8.8			35	
36	8.8		8.8	7.0	8.9		36	8.9	7.0	8.8			36	
37	8.8		7.1	7.1	7.1		37	7.3	7.3	7.1			37	
38	8.8		8.5	8.8	8.4		38	NO	NO	NO	R	10.1 MM	38	
39	5.8		8.1	8.4	8.4		39	NO	NO	NO	R	10.1 MM	39	
40	5.1	R	8.9	7.1	8.7		40	NO	NO	NO	R	10.1 MM	40	

SOLO SE REALIZARON TRABAJOS SOBRE F-2
(ZONA CONECTIVA)

NI: NO INDICA
R: CAMBIADO

**Anexo N°5: ANÁLISIS DE CARGA NETA A UDP Y
DEL RCI**

Anexo N°5 a: ANÁLISIS DE CARGA NETA A UNIDAD DE DESTILACION PRIMARIA (UDP)

DESCRIPCIÓN	18/06/02	10/07/02	31/07/02	15/08/02	25/08/02
GRAVEDAD API (60°F)	21.2	18.5	24	15.4	23.7
GRAVEDAD ESPECÍFICA	0.9267	0.9433	0.9100	0.9632	0.9117
VISCOSIDAD a 37.8°C (100°F)	82.1	181	33.8	346	
VANADIO, ppm					113.2
AZUFRE, %MASA	1.061	1.221	0.93	1.35	0.73

Anexo N°5 b : ANÁLISIS DE RESIDUAL DE CONSUMO INTERNO (RCI)

T-39

DESCRIPCIÓN	11/06/02	17/06/02	10/07/02	31/07/02	15/08/02	25/08/02
GRAVEDAD API (60°F)	17.9	17.8	15.4	15.4	16.2	16.5
GRAVEDAD ESPECÍFICA	0.9471	0.9478	0.9632	0.9632	0.9580	0.9561
VISCOSIDAD (cSt) a 50°C(122°F)	191	216	346	309	319	420
PUNTO DE INFLAMACIÓN, °C	62	-	-	-	70	
VANADIO, ppm	155.33			293.08	265	198
SODIO, ppm	2.62			9.29	13.95	12.6
NIQUEL, ppm	38.62					
ASFALTENOS, %MASA	10.04	-	-	-	-	
CENIZAS, %MASA	0.02	-	-	0.07	0.07	0.05
RESIDUO DE CARBÓN CONRADSON, % MASA	11.61	-	-	-	-	
%SALES	9.0	-	-	-	-	
AZUFRE, %MASA	1.04	0.93	1.35	1.36	1.25	1.02
PODER CALORÍFICO BRUTO BTU/Lb	18598	-	-	-	-	

**Anexo N°6: DATOS PROMEDIO DE LAS VARIABLES
OPERATIVAS DE HORNOS F-1 Y F-2
PERIODO DE ANÁLISIS: 15-05-2002 AL 15-06-2002**

Anexo N°6a: DATOS DEL PERIODO DE ANALISIS HORNO F-1

FECHA	VARIABLES OPERATIVAS DE CARGA								VARIABLES OPERATIVAS DE COMBUSTIBLE				VARIABLES DE OPEBACIÓN CAMARA DE COMBUSTION					
	ZONA CONVECTIVA				ZONA RADIANTE				FLUJO COMBUST. FT-131 (GPM)	CONSUMO DIARIO COMB. GAL	PRES. COMB. FT-104 (PSI)	DIFER. PRESION DFT-10 (PSI)	ZONA RADIANTE				Z.CONVECTIVA	CHIMENEA
	FLUJO ENTR. FT-101 (GPM)	PRES. ENTR. FT-143 (PSI)	TEMP. ENTR. TE-259 (°F)	TEMP. SAL. TE-36 (°F)	FLUJO ENTR. FT-101 (GPM)	TEMP. ENTR. TE-279 (°F)	TEMP. SAL. SERPENT 1 TE-380 (°F)	TEMP. SAL. SERPENT 2 TE-381 (°F)					TE-260 PIEL TUBO (°F)	TE-262 PIEL TUBO (°F)	TE-3 PIEL TUBO (°F)	TE-4 PIEL TUBO (°F)	TE-5 GASES CONVECT. (°F)	TE-258 GASES CHIM. (°F)
15/05/02	212.28	164.83	449	526	232.53	519	613	626	2.89	4132.90	105.40	5.17	996	93	1070	1313	1310	855
16/05/02	256.97	193.00	453	532	259.63	532	649	645	3.11	4532.96	72.57	23.03	1030	92	1035	868	1315	880
17/05/02	267.60	215.33	462	543	270.2	544	670	649	2.97	4267.83	82.97	19.10	1069	93	1034	1269	1227	893
18/05/02	267.83	212.00	460	540	270.43	540	663	643	2.91	4198.70	85.67	18.53	1065	94	1025	1268	1106	893
19/05/02	152.82	151.33	498	582	268.85	633	658	652	1.86	2735.92	64.10	14.88	863	86	866	975	832	797
20/05/02	125.56	135.33	508	600	266.13	615	665	652	1.77	2501.46	77.07	20.87	855	85	858	966	861	808.0
21/05/02	132.03	139.00	506	600	279.33	614	665	652	1.89	2728.89	78.17	23.90	847	81	853	961	909	830
22/05/02	132.56	143.67	505	599	285.12	614	662	652	1.96	2789.02	74.00	26.87	871	86	875	990	1104	841
23/05/02	112.10	124.33	526	598	244.7	622	661	654	1.56	2152.31	64.53	28.57	829	88	834	918	1039	797
24/05/02	111.97	123.33	510	575	239.51	620	662	657	1.71	2047.03	63.30	24.35	844	93	866	951	1056	802
25/05/02	107.93	125.67	514	590	242.59	622	662	655	1.54	1902.84	47.83	24.35	842	93	859	934	1036	779
27/05/02	184.84	114.67	335	415	187.34	421	307	307	2.07	3500.00	96.02	16.00	774	78	763	955	906	647
28/05/02	204.10	126.67	483	560	206.8	560	677	643	2.38	1640.11	78.25	18.75	1040	87	989	1246	1509	847
29/05/02	204.12	134.33	484	558	206.82	558	674	642	2.41	3329.41	72.73	20.35	1015	89	984	1239	992	848
30/05/02	194.44	144.33	482	555	197.14	555	666	641	2.38	3500.00	58.95	24.22	986	83	975	1198	940	836
01/06/02	102.10	114.33	461	567	193.93	552	652	626	2.19	1948.25	68.40	17.83	922	78	947	1097	860	847
02/06/02	89.40	110.00	515	582	209.94	622	667	644	1.4	2124.96	34.07	24.67	843	83	846	1203	758	738
03/06/02	88.31	95.33	482	539	190.55	603	629	617	1.59	2235.52	56.73	30.00	776	86	845	429	836	696
04/06/02	96.24	101.67	516	587	198.9	625	662	645	1.46	2124.96	55.00	25.93	830	86	844	1032	816	751
05/06/02	93.48	113.33	518	595	213.65	625	660	648	1.55	2235.52	56.80	26.13	816	84	829	F.S.	1103	775
06/06/02	93.73	120.33	517	598	225.47	617	660	647	1.65	2413.63	61.73	21.77	838	80	858	F.S.	1170	792
07/06/02	96.95	122.67	517	597	221.61	633	660	646	1.62	2337.42	59.67	23.03	826	83	860	F.S.	891	786
08/06/02	93.23	113.00	515	596	221.2	620	660	647	1.64	2262.22	64.63	23.03	834	82	863	F.S.	825	792
09/06/02	91.32	137.33	506	596	228.92	614	659	647	1.82	2510.20	71.88	17.20	862	78	904	F.S.	1016	817
10/06/02	90.45	148.33	502	593	227.15	608	662	645	1.91	2588.43	66.97	21.23	879	78	907	1009	830	821
11/06/02	82.19	115.67	505	599	189.96	614	662	652	1.64	2282.65	42.30	27.80	859	76	895	423	597	791
12/06/02	79.83	112.67	510	590	184.19	619	666	652	1.49	2092.73	39.78	30.40	841	85	880	F.S.	400	764
13/06/02	76.54	113.00	482	564	183.88	594	657	644	1.58	2039.65	53.17	19.90	841	76	836	F.S.	358	757
14/06/02	71.50	114.67	502	573	183.07	609	652	646	1.34	1253.84	35.27	0.00	809	80	1037	F.S.	1093	733
15/06/02	77.56	113.00	499	572	183.33	610	656	644	1.44	1424.53	50.43	14.77	819	79	977	F.S.	1131	748

Anexo N°6b: DATOS DEL PERIODO DE ANALISIS HORNO F-2

FECHA	VARIABLES OPERATIVAS DE CARGA						VARIABLES OPERATIVAS DE COMBUSTIBLE				VARIABLES DE OPERACIÓN CÁMARA DE COMBUSTIÓN			
	ZONA CONVECTIVA		ZONA RADIANTE				FLUJO COMBUST. FT-132 (GPM)	CONSUMO DIARIO COMB. GAL	PRES. COMB. FT-105 (PSI)	DIFER. PRESION DPI-1304 (PSI)	ZONA RADIANTE		Z. CONVECTIVA	COMMENEIA
	TEMP. ENTR. TE-282 (°F)	TEMP. SAL. TE-283 (°F)	FLUJO ENTR. FI-1204 (GPM)	PRES. ENTR. FT-118 (PSI)	TEMP. ENTR. TE-37 (°F)	TEMP. SAL. TE-38 (°F)					TE-45 PIEL TUBO (°F)	TE-46 PIEL TUBO (°F)	TE-261 GASES CONVECT. (°F)	TE-47 GASES CHIM. (°F)
15/05/02	346	205	54.30	81.0	91	105	1	2.00	F.S	28.70	F.S	F.S	111	171
16/05/02	80	102	53.10	89.8	73	75	1	2.00	F.S	28.70	F.S	F.S	85	83
17/05/02	73	79	86.10	83.2	70	70	1	2.00	F.S	28.70	F.S	F.S	81	81
18/05/02	73	74	140.40	79.1	70	69	1	2.00	F.S	28.70	F.S	F.S	84	81
19/05/02	499	590	168.30	49.1	535	643	1.2	1449.36	68.60	20.00	1141	1421	765	879
20/05/02	530	646	173.90	42.4	560	702	1.1	1859.47	62.60	27.60	1170	1285	960	860.0
21/05/02	530	639	198.50	46.2	563	697	1.1	1876.87	70.30	20.10	1166	1370	926	876
22/05/02	530	635	197.80	50.5	563	703	1.1	1910.15	73.50	20.90	1190	1326	984	890
23/05/02	536	661	195.10	40.3	559	700	1.1	1709.56	67.40	22.90	1148	1301	971	894
24/05/02	533	663	175.00	39.6	561	649	1.2	1570.38	76.00	24.70	1156	1302	979	913
25/05/02	497	611	170.40	37.0	520	655	1.3	F.S	F.S	20.50	F.S	F.S	96	97
27/05/02	73	69	46.90	41.0	178	170	F.S	F.S	F.S	21.50	F.S	F.S	78	71
28/05/02	71	70	89.40	68.1	70	69	F.S	F.S	F.S	21.50	F.S	F.S	78	71
29/05/02	69	70	97.70	66.8	67	65	F.S	F.S	F.S	30.20	F.S	F.S	77	67
30/05/02	69	67	88.50	58.2	65	65	F.S	F.S	F.S	30.20	F.S	F.S	46	67
01/06/02	479	527	126.00	25.2	511	542	0.9	575.49	41.04	26.60	566	555	838	431
02/06/02	538	690	157.10	34.0	588	711	1.5	2090.48	73.30	22.20	869	824	1295	803
03/06/02	520	671	149.20	31.2	528	665	1.5	1818.75	69.30	25.20	811	791	1249	842
04/06/02	541	691	144.90	31.3	557	712	1.9	1964.04	66.50	26.70	846	832	1296	886
05/06/02	542	670	162.20	36.1	558	708	1.9	2080.42	64.40	24.40	854	847	1315	883
06/06/02	528	647	155.90	23.9	560	695	1.9	1933.18	58.60	24.60	829	837	1281	858
07/06/02	546	656	162.50	34.7	561	697	1.9	1938.56	60.40	24.80	836	839	1301	873
08/06/02	539	660	171.60	37.0	565	699	1.1	1972.19	63.80	24.50	848	853	1324	888
09/06/02	530	645	159.50	38.7	559	699	1.9	1967.93	63.50	24.30	847	853	1325	884
10/06/02	524	633	143.20	37.1	559	488	1.9	1804.42	58.20	25.30	834	837	1286	864
11/06/02	527	652	122.10	28.8	559	694	1.9	1635.76	63.80	22.20	809	812	1219	848
12/06/02	531	691	114.00	24.8	537	694	1.9	1620.48	66.20	25.60	806	800	1219	860
13/06/02	503	738	129.80	25.3	542	624	1.2	1570.22	67.70	39.50	759	759	1096	798
14/06/02	524	690	79.50	23.4	545	679	0.9	1609.26	66.50	20.20	789	794	1224	862
15/06/02	521	689	127.80	26.3	548	685	0.9	1687.30	73.30	17.00	802	818	1266	872

**Anexo N°7: APLICACIÓN DEL MÉTODO
GRAVIMÉTRICO A CUPONES ASTM A-335 Gr.P5**

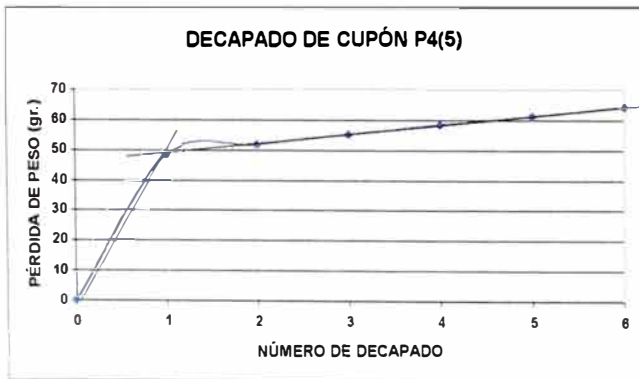
Anexo N°7 : Aplicación del Método Gravimétrico en Tratamiento de Cupones

DECAPADO DE CUPONES

UNIDAD: HORNO F-1
 UBICACIÓN: P4 (#5)
 CONVECTIVA CENTRAL IZQUIERDA
 FECHA DE COLOCACIÓN: 27 de Julio del 2002
 FECHA DE RETIRO: 15 de Octubre del 2002
 TIEMPO DE EXPOSICIÓN: 81 DIAS 1944.00 HORAS
 MATERIAL: ASTM 335- P5
 DENSIDAD (gr/cm³): AREA (cm²): 54.09
 CONSTANTE: 3.45E+06 Unidades: MPY

	PESO	⇒ PESO Consecutiva	⇒ PESO Acumulativa	Vcorr (mpy)
INICIAL	86.5246	0.0000	0.0000	
RETIRO	41.9419	44.5827	44.5827	201.8
DECAPADO				
0			0	
1	38.1599	3.7820	48.3647	218.9
2	34.7232	3.4367	51.8014	234.4
3	31.2324	3.4908	55.2922	250.2
4	28.2552	2.9772	58.2694	263.7
5	25.4470	2.8082	61.0776	276.4
6	22.3190	3.1280	64.2056	290.6
VALOR FINAL DE LA GRÁFICA		50	226.3	

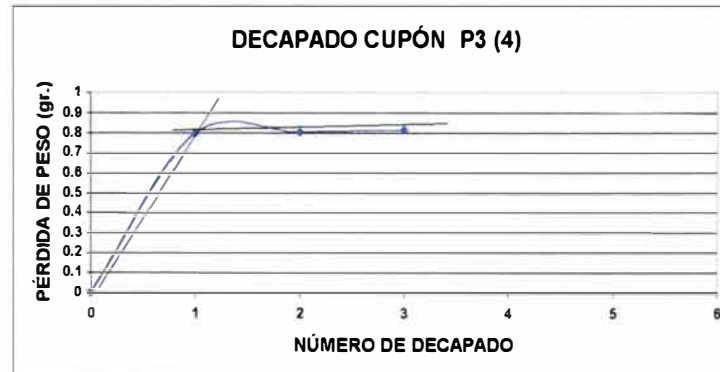
Observaciones:



UNIDAD: HORNO F-1
 UBICACIÓN: P3 (#4)
 CONVECTIVA LATERAL IZQUIERDA
 FECHA DE COLOCACIÓN: 27 de Julio del 2002
 FECHA DE RETIRO: 15 de Octubre del 2002
 TIEMPO DE EXPOSICIÓN: 81 DIAS 1944.00 HORAS
 MATERIAL: ASTM 335- P5
 DENSIDAD (gr/cm³): 7.25 AREA (cm²): 53.56
 CONSTANTE: 3.45E+06 Unidades: MPY

	PESO	⇒ PESO Consecutiva	⇒ PESO Acumulativa	Vcorr (mpy)
INICIAL	87.7133	0.0000	0.0000	
RETIRO	87.0449	0.6684	0.6684	3.1
DECAPADO				
17/10/02	87.0728			
0			0	
1	86.9169	0.1280	0.7964	3.6
2	86.9097	0.0072	0.8036	3.7
3	86.9012	0.0085	0.8121	3.7
4				
5				
6				
VALOR FINAL DE LA GRÁFICA		0.8	3.7	

Observaciones: en este caso la solución ácida practicamente no se coloreó



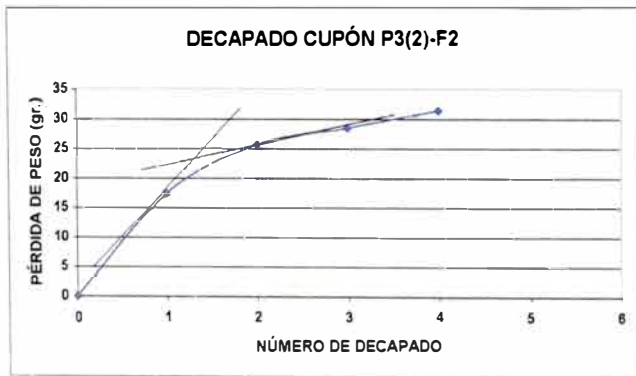
Anexo N° 7: Aplicación del Método Gravimétrico en Tratamiento de Cupones(Continuación)

DECAPADO DE CUPONES

UNIDAD:
 UBICACIÓN:
 CONVECTIVA CENTRAL
 FECHA DE COLOCACIÓN:
 FECHA DE RETIRO:
 TIEMPO DE EXPOSICIÓN:
 MATERIAL:
 DENSIDAD (gr/cm³): AREA (cm²):
 CONSTANTE: Unidades:

	PESO	D PESO Consecutiva	D PESO Acumulativa	Vcorr (mpy)
INICIAL	80.8115	0.0000	0.0000	
RETIRO	63.6917	17.1198	17.1198	77.1
DECAPADO				
0			0	
1	63.3182	0.3735	17.4933	78.8
2	55.1493	8.1689	25.6622	115.6
3	52.3503	2.7990	28.4612	128.2
4	49.4040	2.9463	31.4075	141.5
5				
6				
VALOR FINAL DE LA GRÁFICAS			24	108.1

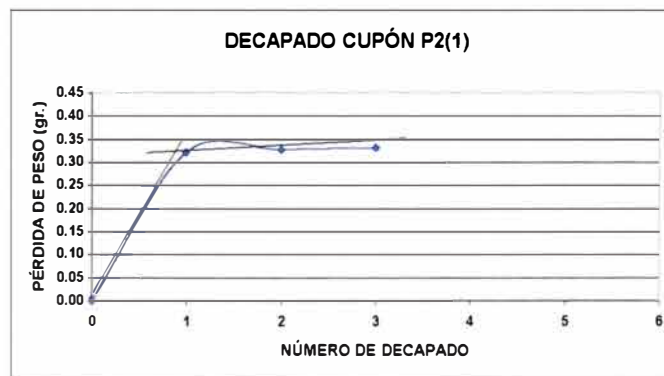
Observaciones:



UNIDAD:
 UBICACIÓN:
 CONVECTIVA LATERAL IZQUIERDA
 FECHA DE COLOCACIÓN:
 FECHA DE RETIRO:
 TIEMPO DE EXPOSICIÓN:
 MATERIAL:
 DENSIDAD (gr/cm³): AREA (cm²):
 CONSTANTE: Unidades:

	PESO	D PESO Consecutiva	D PESO Acumulativa	Vcorr (mpy)
INICIAL	88.2638	0.0000	0.0000	
RETIRO	88.1258	0.1380	0.1380	0.6
DECAPADO				
0			0	
1	87.9434	0.1824	0.3204	1.39
2	87.9375	0.0059	0.3263	1.42
3	87.9319	0.0056	0.3319	1.44
4				
5				
VALOR FINAL DE LA GRÁFICAS			0.325	1.4

Observaciones: en este caso la solución ácida practicamente no se coloreó



**Anexo N°8: DATOS GENERALES DURANTE
ADITIVACIÓN CON QUEMA DE RCI**

Anexo N°8a: DATOS GENERALES - OPERACIÓN EN PLANTA

FECHA	HORA	CARGA BPD	TIPO CRUDO	TIPO OPERACION
PRIMERA CORRIDA DE PRUEBA				
12/02/03	07:22 p.m.			
13/02/03	09:00 a.m.			
13/02/03	12.00 AM			
13/02/03	5.25 PM			
14/02/03	9.45 AM	6800	COE	RESIDUAL
14/02/03	4.53 PM			
14/02/03	8.00 PM	6800	OXI	RESIDUAL
15/02/03	10.13 AM	6800	OXI+GASOLINA	RESIDUAL
15/02/03	4.20 PM	*	*	*
16/02/03	11.15 AM	6800-7500	C.RED+GASOLINA	
17/02/03	9.00 AM	6800	C.RED+GASOLINA	RESIDUAL / S-1
17/02/03	5.10 PM	6800	C.RED+GASOLINA	RESIDUAL/ S-1
18/02/03	9.00 AM	6800	C.RED+GASOLINA	RESIDUAL/S-1
18/02/03	10.50 AM	7500	COE+GASOLINA	RESIDUAL/S-1
18/02/03	4.37 PM	7800	COE + GASOLINA	RESIDUAL /S-1
19/02/03	4.21 P.M	8700	C.RED. + BASE	ASFALTO 60/70
20/02/03	10.37 A.M	8400	COE+C.RED	ASFALTO 60/70
20/02/03	3.14 P.M	8400	COE+C.RED	ASFALTO 60/71
21/02/03	10.00 A.M	7500		RESIDUAL
21/02/03	6.55 PM	8800		RESIDUAL
22/02/03	10.26 AM	9000		RESIDUAL
22/02/03	4.45 PM	9000		RESIDUAL
24/02/03	8.55 AM	9430	C.RED+GASOLINA	RESIDUAL /S-1
24/02/03	7.12 PM	9400	C.RED+GASOLINA	RESIDUAL /S-1
25/02/03	9.46 AM	8900	C.RED+GASOLINA	RESIDUAL/S-1
26/02/03	10.15 AM	8900	COE+GASOLINA	RESIDUAL/S-1
26/02/03	6.03 PM	8800		RESIDUAL
27/02/03	10.00 AM	8800		RESIDUAL
SEGUNDA CORRIDA DE PRUEBA				
10/03/03	11.11 A.M	8600		
10/03/03	5.17 A.M	8969	COE	RES/SOLV 1
11/03/03	2.21 P.M	8916		RES/SOLV 1
12/03/03	9.41 A.M	8700		RES/SOLV.1
12/03/03	4.47 P.M	8776	COE	RES/SOLV1
13/03/03	9.53 A.M	7526	COE/RED.	RES/SOLV 1
13/03/03	5.02 P.M	7472		RES/SOLV 1
14/03/03	6.20 P.M	7600		RES/SOLV 1
15/03/03	9.15 A.M	7700		RES/SOLV 1
15/03/03	3.00 P.M	7800		RES/SOLV 1
17/03/03	2.50 P.M	7600		RES/SOLV 1
18/08/03	5.20 P.M	7700		RES/SOLV 1
24/03/03	6.20 P.M	7500		RES/SOLV 1
25/03/03	6.15 P.M	7600		RES/SOLV 1
26/03/03	5.15 PM	8500		RES/SOL.V3(VISBREAKING)
27/03/03	5.05 P.M	6900		SOL.V 3 (VISBREAKING)
28/03/03	7.15 P.M	8000		
29/03/03	11.0 A.M	8045		RES/SOL.V 3

Anexo N°8b : DATOS GENERALES - CIRCUITO DE SUMINISTRO DE COBUSTIBLE

FECHA	HORA	FECHA PREP.	LABORATORIO O MPA				CAMPO: CALDEROS		CAMPO: INTERCAMBIADOR E-23			
			API	VISCOSIDAD 50°C	V + Na PPM	%S	TEMPERATURA T-39 °F	PRESION DESCARGA P-111A	PRESION ENTRADA	PRESION SALIDA PT- 108	TEMPERATURA SALIDA °F	PRESION SALIDA MANOMETRO
PRIMERA CORRIDA DE PRUEBA												
12/02/03	7.22 PM		-	-			-	-	-	-	-	
13/02/03	9.00 AM		-	-			-	-	-	-	-	
13/02/03	12.00 AM		16.4	425			185	250	210	215	260 220	
13/02/03	5.30 PM		16.4	425			-	-	220	221.7	260 220	
14/02/03	9.45 PM		16.1	455			175	260	210	219	258 220	
14/02/03	4.42 PM		16.1	455			180	260	215	219.7	256 220	
14/02/03	8.00 PM		16.1	455			180	260	215	221	256 220	
15/02/03	10.15 PM		16.1	455			185	275	240	246	260 250	
15/02/03	4.20 AM		16.1	455			190	270	240	241	260 300	
16/02/03	11.15 AM		16.1	455			200	290	235	239.2	242 240	
17/02/03	8.50 AM	16/02 (3T)	16.4	384			165	260	210	221.4	250 225	
17/02/03	5.10 PM		16.4	384			170	280	240	243.6	250 250	
18/02/03	8.50 AM		16.4	384			175	280	240	241	250 250	
18/02/03	11.00 AM		16.4	384			175	280	255	259	247 260	
18/02/03	4.34 AM		16.4	384			185	300	260	266	240 260	
19/02/03	4.10 PM	19/02 (1T)	15.8	443			170	310	260	273	250 280	
19/02/03	6.10 P.M		15.8	443			170	310	265	268	240 260	
20/02/02	10.30 AM		15.8	443			-	-	-	-	-	
20/02/03	3.10 PM		15.8	443			185	310	265	267	242 270	
21/02/03	9.50 AM	21/02 (1T)	16.4	458			180	290	250	255	250 200	
21/02/03	6.50 PM		16.4	458			180	290	250	250	240 200	
22/02/03	10.20 AM		16.4	458			190	285				
22/02/03	4.40 PM		16.4	458			195	285				
24/02/03	5.25 A.M	24/02 (1 T)	16.4	448			185	315	275	281	240 200	
25/02/03	9.40 AM						195	315	270	275	248 270	
25/02/03	6.15 PM		16.4				200	315	275	280.5	242 280	
25/02/03		(3T) PREP										
26/02/03	10.15 AM	26/02 (1T)	16.5	465			175	320	275	280.3	250 280	
26/02/03	6.03 PM		16.5	465			180	315	270	277	245 225	
27/02/03	10.00 AM		16.5	465			185	330	280	287	240 200	
SEGUNDA CORRIDA DE PRUEBA												
10/03/03	11.05 A.M		16.2	441			180	300	250	257	230 255	
10/03/03	5.17 P.M						185	300	250	258	230 250	
11/03/03	2.23 P.M						200	310	250	258	230 250	
12/03/03	9.13 A.M	12/02(1 T)		351			190	300	250	256	235 250	
12/03/03	4.49 P.M			351			185	320	270	274	235 260	
13/03/03	9.53 A.M			301			195	315	270	273	290 260	
13/03/03	5.00 P.M			301			190	315	265	270	230 260	
14/03/03	6.05 P.M	14/03(1 T)		393			200	295	250	253	246 252	
15/03/03	9.15 A.M	15/03(1 T)		393			185	290	250	253	246 252	
16/03/03	9.10 A.M			393			200	310	260	266	242 270	
17/03/03	2.50 P.M		16.5	414			170	300	259	255	240 260	
18/03/03	5.20 P.M		16.5	414			185	295	250	251	240 250	
22/03/03	1.38 PM		16.8	384			185	280	230	232	240 250	
23/03/03	9.15 AM	23/03(1T)	17.8	427			165	340	290	291.5	232 295	
24/03/03	6.20 P.M			427			180	310	260	268	240 245	
25/03/03	6.20 P.M			427			195	280	237	237	240 245	
26/03/03	5.15 PM	26/06(1T)	16.1	446			165	340	300	298.2	240 300	
27/03/03	5.10 P.M						180	340	300	298	230 300	
28/03/03	7.15 P.M	1 T	15.6	412			170	320	260	264.7	226 270	
29/03/03	11 A.M		15.6	412			175	305	250	256	230 250	

**Anexo N°9: TECNOLOGÍA DE CELDAS
CATALÍTICAS**

Anexo °18 : TECNOLOGÍA DE CELDAS CATALÍTICAS

La tecnología de las **Celdas Catalíticas** fue desarrollada en 1991, y consiste en la activación catalítica del combustible y del oxígeno del aire de combustión. Las Celdas Catalíticas proporcionan al combustible y al oxígeno del aire de combustión una energía de activación que los excita y los vuelve más reactivos.

La energía de activación es de carácter físico, pero en la flama su acción se convierte en un efecto químico con el cual el 99% del combustible reacciona con el oxígeno del aire para formar directamente dióxido de carbono y agua. La combustión del 99% del combustible elimina de manera inmediata la emisión de los humos, los hidrocarburos gaseosos y las partículas sólidas sin quemar se reducen drásticamente; por la chimenea sale con los gases de combustión, y en pequeñas cantidades las compuestas por cenizas y los óxidos de los metales contenidos en el combustible. La energía que proporcionan las Celdas Catalíticas activa al combustible y al oxígeno del aire de combustión, como todos los procesos de catálisis no se puede cuantificar, con medios científicos y económicos el alcance de todas las variables, pero su acción se mide por los resultados conseguidos.

Esta tecnología quema los hidrocarburos de alto peso molecular contenidos en las fracciones asfálticas y resinosas del combustible por lo que se elimina sustancialmente la contaminación por humos y por partículas sólidas y la emisión de hidrocarburos sin quemar disminuye considerablemente. No se forma residuo carbonoso y por lo tanto los tubos de los hornos y generadores de vapor no se ensucian. La combustión eficiente del 99% y el control de los excesos de aire, eleva la temperatura del interior del horno incrementando la transferencia de calor por radiación, situación que se refleja en la disminución de la temperatura de los gases de combustión en la chimenea.

La Tecnología de las Celdas Catalíticas sirve para mejorar la combustión de todos los combustibles, sin embargo, los beneficios son mayores cuando se utilizan combustibles residuales de vacío.

En la Refinería de Tula (México) se ha quemado con esta tecnología residuo de vacío con una viscosidad de 550 Segundos Seybolt a 50° C. (1100 cSt) en forma exitosa.

Cuando se quema residuo de vacío es recomendable agregar un 5% de diluyente (gasóleo ligero o pesado) al combustible para reducir la viscosidad y evitar el escurrimiento o taponamiento en quemadores.

El vanadio con el oxígeno del aire de combustión forma el pentóxido de vanadio que es el causante de la corrosión en caliente al fundirse por la acción del sodio que disminuye el punto de fusión del pentóxido de vanadio.

Con la acción de las Celdas el vanadio reacciona con el oxígeno a trióxido de vanadio que es un sólido amarillo no corrosivo.

El azufre contenido en el combustible reacciona con el oxígeno para formar el dióxido de azufre y con la acción de las Celdas se reduce la formación del trióxido de azufre.

DESCRIPCION DEL EQUIPO

El equipo está constituido por un tubo de acero de 2.4 metros de largo con ductos de 1.5 pulgadas en su interior por donde circula el combustible.

El espesor entre el tubo exterior y los interiores contiene el catalizador que es de gran actividad química que cataliza el combustible para su óptima combustión. Los equipos compactos catalíticos para activar el combustible se instalan en la línea de alimentación de los tanques.

El oxígeno del aire de combustión se activa con las celdas catalíticas que se instalan en las entradas de aire de los quemadores.

En las **FIGURAS A y B** se muestran una vista frontal y transversal de las Celdas Catalíticas.

Además se muestra una **tabla de composición de gases de combustión del combustible (FIGURA C)** sobre la que se puede comentar lo siguiente, como los **hidrocarburos gaseosos** pasan desapercibidos debido a que se mezclan con los gases producto de la combustión, su existencia solo se confirma con una cromatografía de gases. Si se compara la composición de los gases de combustión con diferentes cantidades de combustibles sin quemar, se observará que el porcentaje de CO₂ detectado por los analizadores de gases es prácticamente igual y por lo tanto la eficiencia que se reporta es siempre la misma dando un valor falso debido a que **estos instrumentos no consideran el porcentaje de hidrocarburos gaseosos que no se queman** y por consiguiente las **reales eficiencias son menores** a las registradas en estos reportes.

El problema principal que se produce en los hornos es el severo ensuciamiento por depósitos duros y adherentes que no son fácilmente removidos por el soplador. Este problema es debido a que el **Carbón Conradson** de los combustibles elaborados a partir de residuo de vacío con las tecnologías convencionales de combustión no se quema y produce un residuo carbonoso en forma de amalgama resinosa que se adhiere a los tubos del horno ensuciándolos.

Con la acción de las **Celdas** el **Carbón Conradson** se quema y el residuo carbonoso no se forma razón por la cual los equipos no se ensucian ya que las cenizas y los óxidos de los metales son fácilmente removibles por los sopladores de hollín.

FIGURA A: CORTE TRASVERSAL DE LAS CELDAS CATALÍTICAS

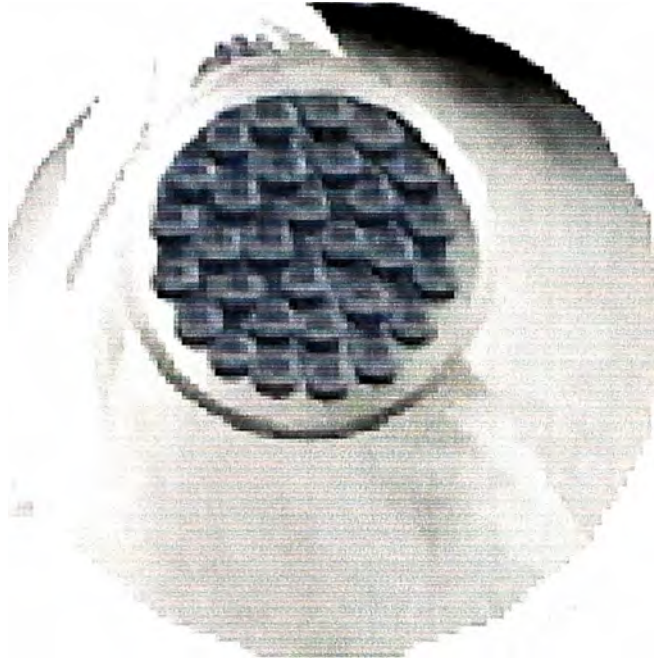


FIGURA B: CORTE LONGITUDINAL DE LAS CELDAS CATALÍTICAS

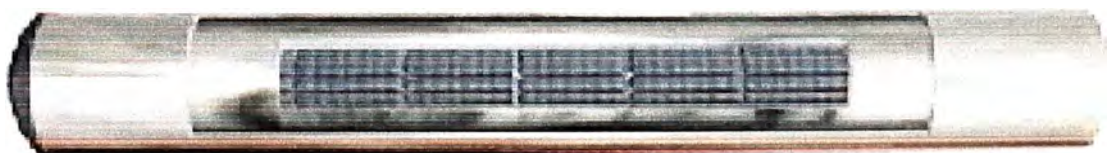


Figura C: COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

CARACTERÍSTICAS DE LA REACCIÓN				GASES DE COMBUSTIÓN				
EXCESO DE OXÍGENO %	COMB. SIN QUEMAR %	MOLES DE AIRE	Kg AIRE POR Kg COMB.	DIÓXIDO DE CARBONO %	MONÓXIDO DE CARBONO ppm	HIDRO CARBUROS ppm	ÓXIDOS DE AZUFRE ppm	OXIDOS DE NITRÓGENO ppm
0	0	62.94	13.63	15.91	125	0	2,403	249
5.0	0	81.47	17.64	12.12	95	0	1,831	190
5.0	5.0	77.15	16.71	12.13	100	1,600	1,930	200
5.0	10.0	72.83	15.77	12.14	106	3,381	2,038	212
5.0	15.0	68.51	14.84	12.16	112	5,377	2,161	225
5.0	20.0	64.19	13.90	12.17	119	7,628	2,299	239

IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE CELDAS CATALÍTICAS

ACTIVACIÓN DEL COMBUSTIBLE

Para implementar esta tecnología se emplean **equipos compactos catalíticos** para tratar el combustible, estos equipos son tubos de acero al carbón cédula 40 de 12" de diámetro y 2.5 metros de largo con campanas reductoras en sus extremos para adaptarlos al diámetro de la línea de combustible. El tubo de 12 pulgadas contiene en su interior varios tubos de acero inoxidable 304 de 1.5 pulgadas de diámetro.

Los equipos se instalan **a la llegada del tanque** de día (o de un tanque de almacenamiento general) para que el combustible después de ser tratado tenga un **tiempo de residencia en tanque mínimo de 20 horas**, para activar todo el combustible antes de ser quemado en los hornos.

Para la activación del combustible se usa un catalizador cuyo tiempo de vida medio es de 5 años y transcurrido éste tiempo no es posible regenerarlo debido a que se degrada.

Este equipo puede catalizar un máximo de 10,000 barriles de combustible por día, siendo el consumo promedio de combustible de 130.6 barriles por día.

QUEMADORES Y ACTIVACIÓN DEL AIRE

Los quemadores de los hornos son de tiro natural y están diseñados para permitir la entrada de aire de combustión. El aire entra por el vacío que produce el tiro de la chimenea.

Para activar el aire de combustión se diseñaría un portaceldas con **Celdas Catalíticas** en su interior para cada uno de los quemadores de cada horno y pasar el aire de combustión a través de las Celdas. El portaceldas se adaptará al diseño

de los quemadores instalados en los hornos para no alterar ni interferir su operación.

En los casos en los que los quemadores no tienen caja de aire, los portaceldas (lámina de fierro calibre 18) encapsulan el quemador para que el aire antes de entrar al horno este en contacto con las **Celdas Catalíticas**. Para no obstruir las labores de mantenimiento los portaceldas se construyen contemplando un fácil acceso al quemador.

Las **Celdas Catalíticas** que se emplearán para activar el aire de combustión son tubos de cupro-níquel de 5/8" de diámetro y 30 cm. de largo y se adecuarán en el interior de los portaceldas para no obstruir la entrada del aire. La caída de presión del aire a través del portaceldas será de 0.1 mm de columna de agua.

Cuando se utilizan combustibles elaborados a partir de aceites residuales de vacío, si se cataliza exclusivamente el combustible se quema mejor el combustible y se disminuye la emisión contaminante de hidrocarburos gaseosos, humo y partículas, obteniéndose una disminución mínima en el consumo de combustible del 4%, pero si se cataliza el combustible y el aire además de la optimización de la combustión, el consumo de combustible se reduce en promedio un 10% y disminuye sustancialmente el ensuciamiento de los equipos por la incrustación de residuos de tipo carbonoso.

Con el tratamiento integral el ahorro de combustible se consigue por quemar el combustible que no se quema con el uso de tecnologías convencionales y por la limpieza del equipo que permite incrementar la transferencia de calor y tener un mejor control sobre los excesos de aire en los hornos de tiro natural.

VARIABLES OPERATIVAS Y CONTROL

El combustible al pasar a través de los **equipos compactos catalíticos** es sometido a la acción de un micro campo magnético que no afecta la densidad del combustible pero si existe una pequeña disminución de la viscosidad del mismo. El combustible no esta en contacto con el catalizador y no se vuelve más corrosivo.

La temperatura del combustible al pasar por los **equipos compactos catalíticos** puede ser de 50 a 120° C como máximo. Es recomendable que la viscosidad del combustible no rebase los 550 Segundos Seybolt (1100 cSt) a 50° C.

Los equipos están diseñados para que la caída de presión a través de ellos sea la misma caída de presión que existe a través del tramo de tubo original y no requieren mantenimiento.

El vapor de atomización sirve para que el tamaño de la partícula de combustible al salir del quemador sea lo más pequeña posible y se pueda quemar mejor el combustible. Cuando se usa la Tecnología de las Celdas Catalíticas es recomendable continuar con el empleo del vapor de atomización conservando un diferencial de presión entre el vapor y el combustible de 2 Kg/cm².

Las Celdas Catalíticas optimizan el proceso de la combustión y se quema bien el 99% del combustible y para tener óptimos resultados no se puede prescindir de ninguna de las variables y parámetros de performance y eficiencia del horno (combustión, % exceso de aire, temperatura del combustible, tiro, presión diferencial y atomización) ya que es necesario mantener todas y cada una de las condiciones de operación dentro de los valores establecidos en el diseño del horno.

La eficiencia del horno mejorará al quemarse bien el combustible y mantenerse limpios los tubos y la limpieza permitirá el control del tiro disminuyendo los excesos de aire.

Una vez instalados los equipos compactos para catalizar el combustible y las **Celdas Catalíticas** para activar el aire de combustión, los equipos operan con autonomía ya que no requieren de ninguna fuente de poder externa ni de condiciones particulares de operación, no se requiere personal ni efectuar maniobras para que funcionen. Solamente para efecto de un mejor funcionamiento **es necesario limpiar cada seis meses las Celdas Catalíticas®** que están en contacto con el aire para quitarles el polvo que se les adhiere.

ASPECTOS DE SEGURIDAD

Los requisitos de seguridad para instalar los **equipos compactos catalíticos** en la línea de combustible son los establecidos para efectuar trabajo riesgoso en líneas de combustible.

Tomando en consideración que las instalaciones de la Refinería Conchán son estratégicas, la instalación de los equipos compactos catalíticos deberá ser realizada por personal de la refinería.

Para instalar los equipos se necesita cortar a la llegada del Tanque, un tramo de 2.50 metros de largo de la línea de alimentación de combustible y en cada extremo del tramo cortado soldar una brida para colocar el **equipo compacto catalítico** y atornillarlo a la línea.

Los requisitos de seguridad para instalar los portaceldas con **Celdas Catalíticas** son los correspondientes a los trabajos cerca de fuentes de calor y para llevarlos a cabo el personal que trabaje instalando los portaceldas en quemadores deberá contar con **careta reflejante, pantalón y chamarra aluminizadas y guantes aluminizados.**

Los equipos catalíticos no contienen en su interior productos inflamables o explosivos y los **equipos compactos catalíticos** están fabricados con materiales que cumplen las especificaciones del código ASME y los trabajos de soldadura están de acuerdo con los estándares del American Welding Society.

Los equipos se someten a prueba hidrostática, y radiografiado que garantizan su fabricación.

ASPECTOS ECONÓMICOS

Para implementar la tecnología en la Refinería Conchán se haría un “traje a la medida”, por lo tanto es necesario realizar un estudio para determinar la cantidad de equipos y Celdas que se requieren para tener un buen resultado.

Sin embargo, la Tecnología de las **Celdas Catalíticas** representa aprovechar un combustible que actualmente se está desperdiciando y que se pierde por la chimenea. Al reducirse el consumo de combustible la optimización de la combustión se convierte en un proyecto rentable y autofinanciable.

BIBLIOGRAFIA

1. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Inspection of Fired Boilers and Heaters, API Recommended Practice 573., API. First Edition October 1991.
2. ANTON DE S. BRASUNAS, Alloy Behaviour At High Temperature, NACE Basic Corrosion Course, sixth printing , June 1975. Huston, Texas, USA.
3. BOER DE GRUIJTER, Hornos de Procesos, Madrid , España ., Agosto 1986.
4. Combustión y Quemadores., PETROPERU. Refinería la Pampilla . Unidad de Capacitación. 1986.
5. Curso de Optimización del Diseño y Control Operativo de Hornos para calentamiento de Crudo en Refinería Conchán, PETROPERU - Departamento Técnico., Diciembre 2002.
6. C. J. SLUNDER., The Residual Oil Ash Corrosion Problem, NACE Publication 5B160.
7. CHAMPION CHA., Ensayos de Corrosion, Urmo S.A. ediciones España, 1976.
8. DENIS CLORY AND FRANK BUSCHABER, Fired Heaters for Process Engineering Tomo III, 1995.
9. GEORGE Y. LAI, PH D. High-Temperature Corrosion of Engineering Alloys, ASM International U.S.A., 1990.
10. JOHN J. MORAN, Corrosion at high Temperatures NACE Basic Corrosion Course, Sixth Printing, June 1975. Huston, Texas, USA.
11. ROBERT D. PORT, HARVEY M. HERRO, Guia Nalco para el Análisis de Fallas en Calderas y Hornos., MacGraw- Hill., U.S.A., 1997.
12. STEPHEN H. ESTOLDT, ROBERT P. BENNETT AND DAVID C. MAYER. Chemical control of Heavy Fuel Oil Ash in a Utility Boiler, National Association Engineers.
13. W.D. NIELDS and H.R. SANDERS. Reactions of Magnesium with Inorganic Constituents of Heavy Fuel Oil and Characteristics of Compounds Formed, ASME Publication 60-WA-278.