

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Homologación de coladas de hornos de inducción en la
producción de aceros inoxidables”

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Examen Complexivo

Previo a la obtención del Título de

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por

Víctor Eduardo Arias Arias

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO 2016

AGRADECIMIENTO

Al Ingeniero Ignacio Wiesner quien fue mi mentor y estuvo siempre dispuesto a guiarme en el desarrollo de este tema con su enseñanza y experiencia.

A las empresas INTRAMET y LEMAT por haber colaborado con el uso de sus instalaciones y prestamos de equipos de análisis químico.

A mis compañeros y personas en general que hicieron posible la realización de este proyecto.

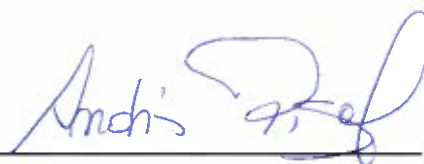
DEDICATORIA

A quienes de una u otra forma motivaron y ayudaron para que se lleve a cabo este proyecto, y en general a todas las personas que se esfuerzan por conseguir los objetivos que se proponen en la vida.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ignacio Wiesner Falconí', written over a horizontal line.

Ing. Ignacio Wiesner Falconí
DIRECTOR DEL TFG

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Andrés Rigail Cedeño', written over a horizontal line.

Ph. D Andrés Rigail Cedeño
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido en la presente propuesta de examen complejo, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



Víctor Eduardo Arias Arias

RESUMEN

Para evaluar la calidad de los procesos de fundición a nivel local, las empresas emplean equipos de análisis químico (espectroscopios) para determinar la composición de elementos presentes en las diversas muestras. El objetivo principal de este trabajo es brindar un método de lectura de análisis químico más seguro y certero para los medianos y pequeños fundidores. Como objetivos específicos están la comparación de los resultados de análisis químico de aceros inoxidable en función del porcentaje de cromo y níquel mediante análisis estadístico y establecer las limitaciones de cada equipo. Se realizó pruebas a 17 muestras de coladas pequeñas de acero refractario, basadas en la norma ASTM A297, las cuales se obtuvieron en un horno de microfundición. Este horno portátil fue diseñado durante el trabajo en curso y simuló el proceso de un horno de inducción mediante arco eléctrico. Luego, se realizaron pruebas de análisis químico a las probetas mediante dos espectroscopios de distinta tecnología. Adicionalmente, se realizaron análisis metalográfico y de dureza para complementar el estudio. Finalmente, se obtuvieron los resultados en función de los ensayos realizados. Con estos resultados, se compararon los equipos y se determinó un grado de confiabilidad de los mismos mediante análisis estadísticos.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	II
ABREVIATURAS.....	IV
SIMBOLOGÍA.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1. Generalidades de los hornos de inducción.....	2
1.2. Especificaciones del acero ASTM A297 HH.....	5
CAPÍTULO 2	
2. TRABAJO DE PLANTA.....	9
2.1. Definición de composición de coladas.....	9
2.2. Obtención de coladas por microfusión.....	14
CAPÍTULO 3	
3. ANÁLISIS DE PROBETAS.....	25
3.1. Análisis espectroscópico de probetas.....	25

3.1.1. Descarga luminiscente.....	25
3.1.2. Fluorescencia de rayos X.....	31
3.2. Análisis estadístico de datos obtenidos.....	32
3.3. Análisis metalográfico y dureza de probetas.....	36
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
BIBLIOGRAFÍA.....	47
APÉNDICES.....	48
APÉNDICE A.....	49
APÉNDICE B.....	55
APÉNDICE C.....	62
APÉNDICE D.....	66
APÉNDICE E.....	81
APÉNDICE F.....	95

ABREVIATURAS

HCl	Ácido clorhídrico
HNO ₃	Ácido nítrico
Al ₂ O ₃	Alúmina
AISI	American Iron and Steel Institute
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing and Materials
S	Azufre
C	Carbono
Cr	Cromo
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
P	Fosforo
GDS	Glow Discharge Spectroscopy
INTRAMET	Industrias de Transformación Metalúrgica
LEMAT	Laboratorio de Ensayos Metrológicos y de Materiales
Mn	Manganeso
Mo	Molibdeno
Ni	Níquel
No.	Número
Ag	Plata
REM	Radiación electromagnética
R	Radio
Si	Silicio
SI	Sistema Internacional
ARM	Tipo de procesador
USB	Universal Serial Bus

SIMBOLOGÍA

A	Amperio
Δm_{Cr}	Adición de masa de cromo
Δm_{Ni}	Adición de masa de níquel
Btu/lb·°F	Btu por libra y por grado Fahrenheit
Btu/ft·h·°F	Btu por pie por hora y grado Fahrenheit
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro al cuadrado
cm ³	Centímetro cúbico
ϕ	Diámetro
°C	Grados Celsius
°C ⁻¹	Grados Celsius a la -1
°F	Grados Fahrenheit
°F ⁻¹	Grados Fahrenheit a la -1
g	Gramo
Hz	Hertz
kg	Kilogramo
kg/m ²	Kilogramo por metro cuadrado
kJ/kg·°C	Kilojoule por kilogramo y por grado Celsius
kV	Kilovoltio
lb/in ²	Libra por pulgada cuadrada
λ	Longitud de onda
m_{HH}	Masa de acero HH presente en una colada
m	Masa de colada
Mb	Megabyte
MHz	Megahertz
MPa	Megapascal
μA	Microamperio
$\mu\Omega \cdot m$	Microhmio por metro
$\mu\Omega \cdot in$	Microhmio por pulgada
μm	Micrómetro
mm	Milímetro

min	Minuto
nm	Nanómetro
$\rho_{Cr,1}$	Porcentaje de cromo de llegada
$\rho_{Cr,0}$	Porcentaje de cromo de partida
$\rho_{Ni,1}$	Porcentaje de níquel de llegada
$\rho_{Ni,0}$	Porcentaje de níquel de partida
psi	Pounds-force per square inch
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundo
torr	Torr
W/m·K	Vatio por metro por Kelvin
V	Voltio

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Funcionamiento de un horno de inducción.....	3
Figura 1.2.	Horno de inducción sin núcleo.....	4
Figura 2.1.	Diagrama de flujo del trabajo de planta.....	9
Figura 2.2.	Elaboración de coladas.....	14
Figura 2.3.	Esquema del proceso de fusión.....	15
Figura 2.4.	Diseño del crisol (sección transversal)	16
Figura 2.5.	Diseño del perno-llave (a) Vista frontal (b) Vista superior...	16
Figura 2.6.	Máquina de soldadura.....	18
Figura 2.7.	Electrodo de grafito.....	18
Figura 2.8.	Diseño de colada (a) Vista superior (b) Vista frontal.....	19
Figura 2.9.	Lingote de acero HH.....	21
Figura 2.10.	Cromo en polvo.....	21
Figura 2.11.	Níquel en esferas.....	21
Figura 2.12.	Fragmentos de acero HH (a) Sin esmerilar (b) Esmerilado	21
Figura 2.13.	Muestra de níquel en (a) Colada (b) Trizas.....	22
Figura 2.14.	Puesta de materiales en crisol.....	23
Figura 2.15.	Proceso de fusión.....	23
Figura 2.16.	Colada 1 (a) Vista superior (b) Vista inferior.....	23
Figura 3.1.	Equipo Leco GDS 500A.....	25
Figura 3.2.	Preparación de coladas para equipo Leco GDS 500A.....	27
Figura 3.3.	Diagrama de coladas (a) Previo al torneado (b) Después del torneado.....	28
Figura 3.4.	Torneado de coladas.....	28
Figura 3.5.	Proceso de rectificado.....	29
Figura 3.6.	Colada apta para análisis químico.....	29
Figura 3.7.	Colada analizada por equipo Leco GDS 500A.....	30
Figura 3.8.	Equipo Thermo Niton XL2.....	31
Figura 3.9.	Comparación de porcentajes de Cr de métodos espectroscópicos.....	33
Figura 3.10.	Comparación de porcentajes de Ni de métodos espectroscópicos.....	33
Figura 3.11.	Comparación de error porcentual entre lecturas de cromo	35
Figura 3.12.	Comparación de error porcentual entre lecturas de níquel	35
Figura 3.13.	Análisis metalográfico de probetas.....	36
Figura 3.14.	Desbaste grueso con lijas.....	37
Figura 3.15.	Coladas (a) 1 y (b) 14 después del desbaste con lijas.....	38
Figura 3.16.	Pulido fino en paño Struers.....	38
Figura 3.17.	Ataque químico con glyceregia.....	38
Figura 3.18.	Muestras calentadas en horno de crisol.....	40

Figura 3.19. Escala de coloración de acero recocido.....	40
Figura 3.20. Puesta de la probeta en el microscopio.....	40
Figura 3.21. Microscopia 200X usando glyceregia del acero ASTM A297 HI.....	41
Figura 3.22. Microscopia 200X usando glyceregia del acero ASTM A297 HK.....	41
Figura 3.23. Durómetro Leco LR 300 TDL.....	42
Figura 3.24. Probetas (a) 5 y (b) 10 después del ensayo de dureza.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Funcionamiento de un horno de inducción.....	2
Tabla 2	Características de hornos de inducción.....	4
Tabla 3	Ventajas y desventajas de los hornos de inducción.....	5
Tabla 4	Especificaciones de la norma ASTM A297.....	6
Tabla 5	Composición química de aceros según norma ASTM A297.....	7
Tabla 6	Datos técnicos del acero ASTM A297 HH.....	8
Tabla 7	Características del acero ASTM A297 grado HH.....	8
Tabla 8	Obtención de variables para composición de coladas.....	10
Tabla 9	Porcentajes de composición del acero HH.....	11
Tabla 10	Porcentajes de colada de llegada.....	12
Tabla 11	Datos de colada 1.....	12
Tabla 12	Composición de coladas en masa [g].....	13
Tabla 13	Composición de coladas en porcentajes [%].....	14
Tabla 14	Criterios técnicos del diseño del horno de microfusión.....	15
Tabla 15	Construcción del crisol.....	17
Tabla 16	Requerimientos de la colada.....	19
Tabla 17	Obtención de materiales.....	20
Tabla 18	Proceso de fusión.....	22
Tabla 19	Masa real de coladas [g] y su variación [%].....	24
Tabla 20	Especificaciones generales del equipo Leco GDS 500A.....	26
Tabla 21	Condiciones de operación del equipo Leco GDS 500A.....	26
Tabla 22	Condiciones de la muestra para uso de equipo Leco GDS 500A.....	27
Tabla 23	Proceso de torneado.....	28
Tabla 24	Proceso de rectificado.....	29
Tabla 25	Uso del equipo Leco GDS 500A.....	30
Tabla 26	Uso y ventajas del equipo Thermo Niton XL2.....	31
Tabla 27	Porcentajes de Cr y Ni en coladas según equipos de espectroscopia.....	32
Tabla 28	Error porcentual de contenido de Cr y Ni en coladas.....	34
Tabla 29	Preparación de coladas para análisis metalográfico.....	37
Tabla 30	Especificaciones de la glyceragia.....	39
Tabla 31	Tratamiento térmico de recocido a las probetas.....	39
Tabla 32	Resultados de ensayo de dureza de probetas 5 y 10.....	42

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es una investigación de tipo experimental relacionada con la fundición de aceros inoxidables y la determinación de su composición química. El capítulo 1 expone el fundamento teórico de los hornos de inducción y también los lineamientos generales de la norma ASTM A297, la cual contiene a los aceros involucrados en el presente trabajo de investigación (ASTM A297 grado HH, HI y HK).

En el capítulo 2 se describirá como se definieron la composición de las coladas en función de la norma ASTM A297 y como se elaboraron con la ayuda del horno de microfusión, cuyo diseño y construcción también se especifica en el mismo capítulo.

En el capítulo 3 se analizarán las coladas obtenidas previamente en dos espectroscopios de distinta tecnología, además se les aplicará un análisis metalográfico y de dureza con el fin de complementar los estudios. Los resultados obtenidos serán presentados y validados mediante herramientas estadísticas.

Finalmente, el capítulo 4 mostrará las conclusiones y recomendaciones que se generaron dentro de este estudio.

CAPITULO 1

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Generalidades de los hornos de inducción

Un horno de inducción es un horno eléctrico en que el calor es generado por la inducción eléctrica de un medio conductor (metal) en un crisol, alrededor del cual se encuentran enrolladas bobinas magnéticas. Se trata de un método de calentamiento sin contacto ni llama, cuyos pasos se explican en la tabla 1.

TABLA 1
Funcionamiento de un horno de inducción

Paso	Acción
1	Metal es cargado en el horno
2	Campo electromagnético penetra la carga e induce corriente
3	La carga se funde por acción de la corriente inducida
4	El campo y la corriente inducida agitan el metal, según la: Frecuencia suministrada por la unidad de potencia Geometría de la bobina Densidad del metal Permeabilidad magnética del metal Resistencia del metal

Es un proceso donde el metal es fundido en el crisol de un horno por efecto de una corriente alterna, como se muestra en la figura 1.1.

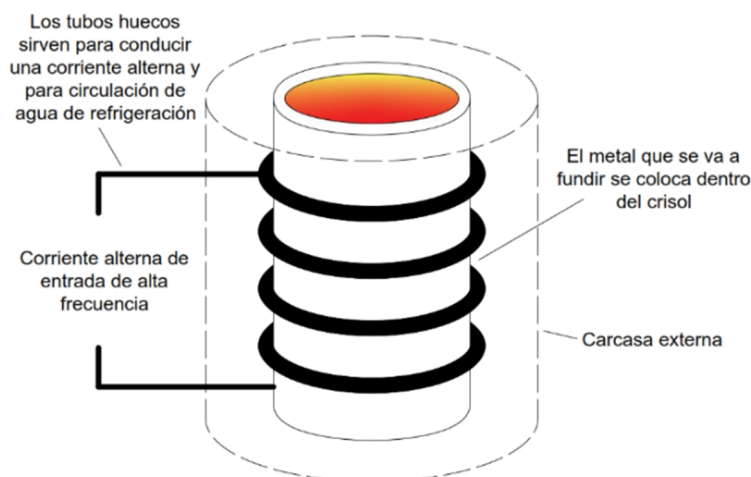


Figura 1.1 Funcionamiento de un horno de inducción

Tipos de horno de inducción

En función del diseño, hay dos tipos:

- **Hornos de inducción con núcleo:** Tienen una bobina que rodea una pequeña porción de unidad, la bobina es un arrollamiento de cobre, dispuesto sobre un núcleo de chapa magnética que hace de primario en un transformador, cuyo secundario es el canal del metal fundido que actúa como una espira en cortocircuito.
- **Hornos de inducción sin núcleo:** Constan de un crisol totalmente rodeado de una bobina de cobre, enfriada por agua, a través de la cual pasa la corriente que genera el campo magnético, lo que calienta el crisol y funde el metal en su interior (ver figura 1.2).

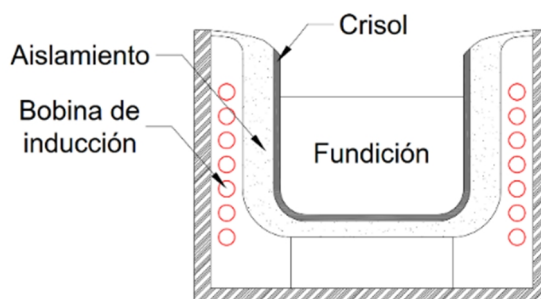


Figura 1.2 Horno de inducción sin núcleo

La tabla 2 presenta algunas características de ambos tipos de hornos:

TABLA 2
Características de hornos de inducción

Sin núcleo	Con núcleo
También llamados hornos de crisol	También llamados hornos de canal
Cuentan con capacidades desde 3.0 onzas hasta 320 toneladas.	Se utiliza comúnmente en fundidoras no ferrosas.
Su temperatura máxima sólo está limitada por el refractario y la eficacia del aislamiento frente a las pérdidas del calor.	Velocidad de calentamiento muy elevada y la temperatura se controla fácilmente.
Se emplean prácticamente con todas las aleaciones ordinarias, siendo más convenientes para la producción de aceros inoxidables.	Particularmente adecuado para sobrecalentar, es decir realizar calentamientos por encima de la temperatura normal de fundición para mejorar la fluidez.
Los sistemas de alta frecuencia facilitan un buen control de la temperatura y la composición de la colada.	Usado para mantenimiento, que lo hace adecuado para aplicaciones de fundición por inyección en matriz.
Tiene excelentes características de mezcla para aleaciones y para agregar nuevas cargas de metal.	Usado para duplexado (uso de dos hornos para, por ejemplo, fundir el metal en uno y transferirlo al otro).

La tabla 3 muestra las ventajas y desventajas del uso de hornos de inducción.

TABLA 3
Ventajas y desventajas de los hornos de inducción

Ventajas	Desventajas
Costos de operación más bajos en materia prima y mano de obra.	Inversión de capital alto en instalación con sistemas más sencillos.
Mayor control de temperatura por medio de sistemas electrónicos.	No es posible agregar oxígeno al proceso.
Tecnología rápida, limpia y uniforme, que omite la fase de purificación necesaria en otros métodos.	Proceso selectivo de chatarra porque el material obtenido conserva normalmente sus características.
Alta tasa de fusión que implica mayor producción y uso del equipo.	Requieren mantenimiento especial porque no se fabrican a nivel nacional.
Cargas electricas estables, por tanto hay menor variación de voltaje.	Necesitan de un banco de capacitores para aumentar el factor de potencia.

1.2 Especificaciones del acero ASTM A297 HH

El acero es una aleación de hierro y carbono, siendo el carbono variable entre 0,03% y el 2,14% en masa de su composición.

Los aceros inoxidables contienen un mínimo de 11% de cromo en su composición y se caracterizan por su alta resistencia a la corrosión y superficie brillante.

Norma ASTM A297

Trata sobre los aceros refractarios, aceros funcionales a altas temperaturas (entre 925 °C y 1300 °C) debido al aumento del porcentaje de cromo y níquel dentro de su composición.

La tabla 4 especifica las consideraciones más importantes.

TABLA 4
Especificaciones de la norma ASTM A297

Título oficial	“Especificaciones estándar para fundiciones de aceros resistentes al calor de hierro-cromo e hierro-cromo-níquel para aplicaciones generales.”
Materiales especificados	Fundiciones de aleación de Fe-Cr, Fe-Cr-Ni para servicios refractarios de uso general.
Procesos de obtención	Arco eléctrico, inducción eléctrica.
Tratamientos térmicos	No es necesario tratamiento térmico.
Reparación por soldadura	La soldadura depositada debe ser de composición similar que la aleación.
Pruebas suplementarias (no obligatorias)	Examen de partículas magnéticas, radiográfico, de líquido penetrante, ultrasónico, de preparación de soldadura y prueba de tensión.

La composición de los aceros refractarios está dada en la tabla 5. Cada acero está identificado por un grado que corresponden a un tipo con los porcentajes de cromo y níquel, los cuales definen un acero refractario. Los porcentajes de los demás elementos son valores máximos.

TABLA 5
Composición química de aceros según norma ASTM A297

Grado	Tipo	Composición química [%]						
		C	Mn	Si	P, S	Cr	Ni	Mo
HF	19 Cr, 9 Ni	0.20-0.40	2	2	0.04	18-23	08-12	0.5
HH	25 Cr, 12 Ni	0.20-0.50	2	2	0.04	24-28	11-14	0.5
HI	28 Cr, 15 Ni	0.20-0.50	2	2	0.04	26-30	14-18	0.5
HK	25 Cr, 20 Ni	0.20-0.60	2	2	0.04	24-28	18-22	0.5
HT	29 Cr, 9 Ni	0.20-0.50	2	2	0.04	26-30	8-11	0.5
HE	15 Cr, 35 Ni	0.35-0.75	2	2.5	0.04	15-19	33-37	0.5
HU	19 Cr, 39 Ni	0.35-0.75	2	2.5	0.04	17-21	37-41	0.5
HW	12 Cr, 60 Ni	0.35-0.75	2	2.5	0.04	10-14	58-62	0.5
HX	17 Cr, 66 Ni	0.35-0.75	2	2.5	0.04	15-19	64-68	0.5
HC	28 Cr	0.5 máx.	1	2	0.04	26-30	4 máx.	0.5
HD	28 Cr, 5 Ni	0.5 máx.	1.5	2	0.04	26-30	4-7	0.5
HL	29 Cr, 20 Ni	0.20-0.60	2	2	0.04	28-32	18-22	0.5
HN	20 Cr, 25 Ni	0.20-0.50	2	2	0.04	19-23	23-27	0.5
HP	26 Cr, 35 Ni	0.35-0.75	2	2.5	0.04	24-28	33-37	0.5

Acero ASTM A297 HH

Es una aleación hierro-cromo-níquel que contiene la proporción mínima requerida de cromo y níquel para suministrar propiedades de servicio a elevadas temperaturas.

Los principales datos técnicos de este acero aparecen en la tabla 6 y las características de su composición, microestructura y aplicaciones se detallan en la tabla 7. Más información técnica sobre este acero se encuentra en el Apéndice D.

TABLA 6
Datos técnicos del acero ASTM A297 HH

Propiedad	SI	Sistema inglés
Densidad	196.15 [kg/m ³]	0.279 [lb/in ³]
Módulo de elasticidad	1.86x10 ⁵ [MPa]	27x10 ⁶ [psi]
Calor específico (a 20°C)	0.502 [KJ/Kg·°C]	0.12 [Btu/lb·°F]
Resistividad eléctrica (a 20°C)	0.75-0.85 [μΩ·m]	29.52 – 33.44 [μΩ·in]
Punto de fusión	1371°C	2500°F
Permeabilidad magnética	Entre 1 y 1.9	

TABLA 7
Características del acero ASTM A297 grado HH

Aporte del Cr	Es lo suficientemente alto para asegurar resistencia hasta los 1093° C.
Aporte del Ni	Mantiene la austenita como fase principal, con la ayuda del C, N y Mn.
Microestructura	Es básicamente austenítica y contiene considerable carbono en solución sólida.
	Pueden aparecer carburos, ferrita (suave, dúctil y magnético) y fase sigma (duro, quebradizo y no magnético).
	Los diversos constituyentes estructurales dependen de la composición química y del historial térmico de la muestra en consideración.
Principales aplicaciones	En la fabricación de elementos que trabajen a altas temperaturas por largos periodos de tiempo, tales como brazos y cuchillas de agitación, barras de la parrilla, hornos de cemento, toberas, boquillas de quemadores del horno, tubos de calor radiante.

CAPITULO 2

2. TRABAJO DE PLANTA

2.1. Definición de composición de coladas

El procedimiento del trabajo de planta se basa en la figura 2.1.

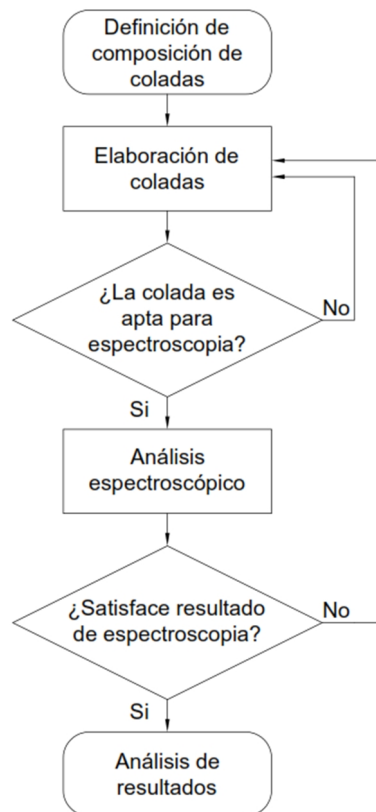
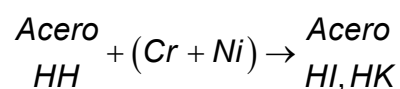


Figura 2.1 Diagrama de flujo del trabajo de planta

Para definir la composición de las coladas, se plantea la reacción que representa el proceso de fusión:



Donde las variables se especifican en la tabla 8:

TABLA 8
Obtención de variables para composición de coladas

Material	Denominación	Obtención
Acero HH	Acero de partida	Equipos de espectroscopia
Acero HI y HK	Acero de llegada	Norma ASTM A297
Cr y Ni	Elementos de adición	Variable a obtener

El fundamento teórico del funcionamiento de los equipos de espectroscopia se detalla en el Apéndice A. La norma ASTM A297 completa se muestra en el Apéndice C.

Fórmulas para cálculos de masa

Las siguientes expresiones definen la adición de masas de cromo Δm_{Cr} , níquel Δm_{Ni} y de acero HH, m_{HH} , necesaria para una composición:

$$\Delta m_{Cr} = \frac{m}{100} (p_{Cr,1} - p_{Cr,0}) \quad [2.1]$$

$$\Delta m_{Ni} = \frac{m}{100} (p_{Ni,1} - p_{Ni,0}) \quad [2.2]$$

$$m_{HH} = m - (\Delta m_{Cr} + \Delta m_{Ni}) \quad [2.3]$$

Donde:

m : Masa de la colada, definida en $m = 80 \text{ g}$.

$\rho_{Cr,0}$: Porcentaje de cromo de partida.

$\rho_{Cr,1}$: Porcentaje de cromo de llegada.

$\rho_{Ni,0}$: Porcentaje de níquel de partida.

$\rho_{Ni,1}$: Porcentaje de níquel de llegada.

Porcentajes de elementos de partida

Los porcentajes de Cr y Ni de partida, son el promedio entre las lecturas de los equipos espectroscópicos usados y se presentan en la tabla 9. Las hojas técnicas de estos espectroscopios se encuentran en el Apéndice B.

TABLA 9
Porcentajes de composición del acero HH

Elemento	Descarga luminiscente	Fluorescencia de rayos X	Promedio
Cr [%]	23.461	23.78	23.62
Ni [%]	16.762	16.3	16.53

Porcentajes de elementos de llegada

Para obtener estos porcentajes (tabla 10) se fijó el porcentaje de un elemento (Cr o Ni) y se varió el porcentaje del otro elemento según las especificaciones de la norma ASTM A297.

TABLA 10
Porcentajes de coladas de llegada

Acero	No. Colada	Cr [fijo]	Ni [variable]	No. Colada	Ni [fijo]	Cr [variable]
Grado HI				3	18	26
				4		27
				5		28
	1	28	17	6		29
	2		18	7		30
	Grado HK	8	25	18		13	20	24
9		19		14	25	
10		20		15	26	
11		21		16	27	
12		22		17	28	

Dado que el porcentaje de níquel del acero de partida fue de 16.53% (tabla 9), para el acero grado HI se realizaron las siguientes modificaciones:

- El porcentaje de níquel fijo de llegada se definió como 18% y no en 15%.
- No se definieron coladas con porcentajes de níquel variable inferior a 17%.

Ejemplo de cálculo:

Los datos para la colada 1 aparecen en la tabla 11:

TABLA 11
Datos de colada 1

Variable	$p_{Cr,0}$	$p_{Cr,1}$	$p_{Ni,0}$	$p_{Ni,1}$
Valor	23.62%	28%	16.53%	17%

Aplicando las expresiones [2.1] y [2.2]:

$$\Delta m_{Cr} = \frac{80 \text{ g}}{100} (28 - 23.62)$$

$$\Delta m_{Cr} = 3.5 \text{ g}$$

$$\Delta m_{Ni} = \frac{80 \text{ g}}{100} (17 - 16.53)$$

$$\Delta m_{Ni} = 0.38 \text{ g}$$

Según la expresión [2.3]:

$$m_{HH} = 80 - (3.50 + 0.38)$$

$$m_{HH} = 76.12 \text{ g}$$

Se muestran las composiciones de las coladas en masa (tabla 12) y en porcentajes (tabla 13).

TABLA 12
Composición de coladas en masa [g]

Acero	No. Colada	HH	Cr [fijo]	Ni [variable]	No. Colada	HH	Ni [fijo]	Cr [variable]
HI					3	76.92	1.18	1.9
					4	76.12		2.7
					5	75.32		3.5
	1	76.12	3.5	0.38	6	74.52		4.3
	2	75.32		1.18	7	73.72		5.1
HK	8	77.72	1.1	1.18	13	74.48	5.22	0.3
	9	76.92		1.98	14	73.68		1.1
	10	76.12		2.78	15	72.88		1.9
	11	75.32		3.58	16	72.08		2.7
	12	74.52		4.38	17	71.28		3.5

TABLA 13
Composición de coladas en porcentajes [%]

Acero	No. Colada	HH	Cr [fijo]	Ni [variable]	No. Colada	HH	Ni [fijo]	Cr [variable]
HI					3	96.15	1.47	2.38
					4	95.15		3.38
					5	94.15		4.38
	1	95.15	4.38	0.47	6	93.15		5.38
	2	94.15		1.47	7	92.15		6.38
HK	8	97.15	1.38	1.47	13	93.10	6.53	0.38
	9	96.15		2.47	14	92.10		1.38
	10	95.15		3.47	15	91.10		2.38
	11	94.15		4.47	16	90.10		3.38
	12	93.15		5.47	17	89.10		4.38

2.2. Obtención de coladas por microfusión¹

El proceso de fusión para elaborar las coladas imita la soldadura de arco eléctrico y se presenta en la figura 2.2.

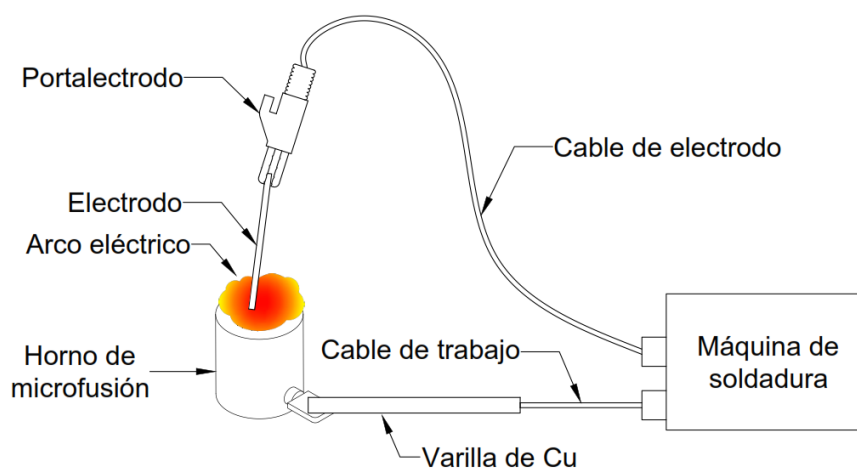


Figura 2.2 Elaboración de coladas

¹ El proceso de obtención de coladas se realizó en las instalaciones de la empresa INTRAMET (ESPOL).

Esquemáticamente, el proceso de fusión se representa según la figura 2.3.

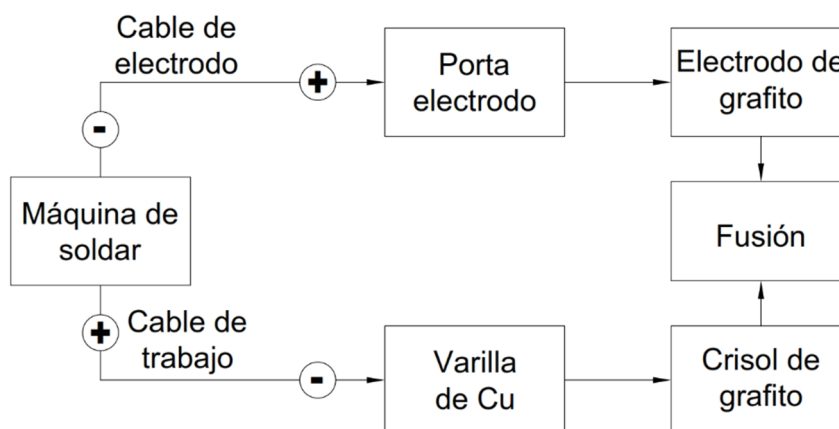


Figura 2.3 Esquema del proceso de fusión

Horno de microfusión

Es un crisol cilíndrico elaborado de grafito cuyas medidas son acordes a la necesidad de volumen a fundir, según los criterios técnicos de la tabla 14:

TABLA 14
Criterios técnicos de diseño del horno de microfusión

Espesor de pared	Disminuye	Menor resistencia, mayor degradación y menor tiempo de vida útil.
	Aumenta	Mayor resistencia, menor degradación y mayor tiempo de vida útil.
Base interna	Plana	Dificulta la extracción de la muestra
	Curva	Facilita la extracción de la muestra

En base a las consideraciones anteriores, se diseñó el horno de microfusión (figura 2.4), al cual se adjuntó un perno-llave de cobre cuya función es conectar la barra de acero con el cable de trabajo.

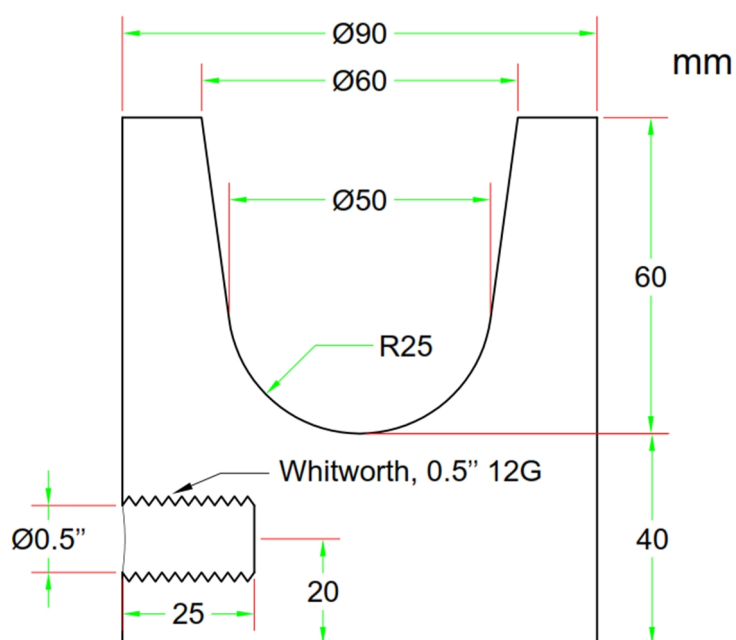


Figura 2.4 Diseño del crisol (sección transversal)

Asimismo, se dimensionó el perno-llave (figura 2.5):

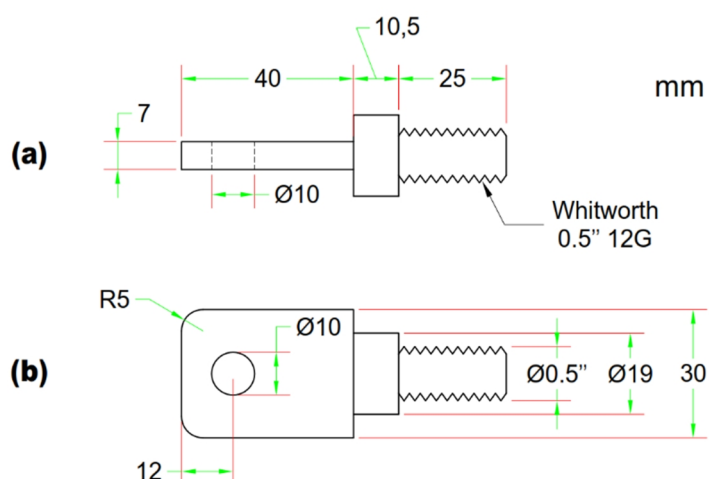


Figura 2.5 Diseño del perno-llave (a) Vista frontal (b) Vista superior

La elaboración del crisol se explica en la tabla 15.

TABLA 15
Construcción del crisol

Descripción	Imagen
<p>Electrodo de grafito usado en acerías, cuyas dimensiones son: Longitud: 1.8 m Diámetro: 480 mm</p>	 A photograph showing a long, cylindrical graphite electrode leaning against a white wall next to a grey metal shutter. The electrode is dark grey and has a slightly tapered shape.
<p>Se extrajo una sección transversal de aproximadamente 12 cm de alto y después se la dividió en 4 partes simétricas iguales.</p>	 A photograph of a square cross-section of a graphite electrode. The material is dark grey and has a rough, slightly irregular surface. It is placed on a light-colored surface.
<p>Se maquinó en el torno para finalmente obtener el horno de microfusión.</p>	 A photograph of a small, cylindrical micro-fusion furnace. It is dark grey and has a handle on the side. The furnace is placed on a light-colored surface.

Máquina de soldar

Se usaron dos máquinas soldadoras de arco eléctrico de corriente directa nominal de 600 A idénticas conectadas en serie (ver figura 2.6).



Figura 2.6 Máquina de soldadura

Electrodo

Se usó un electrodo de grafito recubierto de cobre de 1/4" de diámetro y longitud de 12", cuyo peso es de 50 g, tal como se observa en la figura 2.7.



Figura 2.7 Electrodo de grafito

Colada

Es el vertido del material fundido en el molde. Para el presente trabajo de investigación, los requerimientos de la misma se presentan en la tabla 16:

TABLA 16
Requerimientos de la colada

Variable	Condición
Peso	El teórico debe ser $m = 80 \text{ g}$
	El real no debe variar más del 3% respecto al teórico
Forma y dimensiones	Debe satisfacer las condiciones geométricas de los equipos de análisis espectroscópicos donde se analicen
	Deben facilitar su mecanización
Homogeneidad	Facilita la lectura en los equipos espectroscópicos y se logra con una fusión correcta y uniforme al soldar
Escoria	Dado que su formación es inevitable, debe ser mínima

La figura 2.8 muestra la forma que tendría una colada según la tabla anterior.

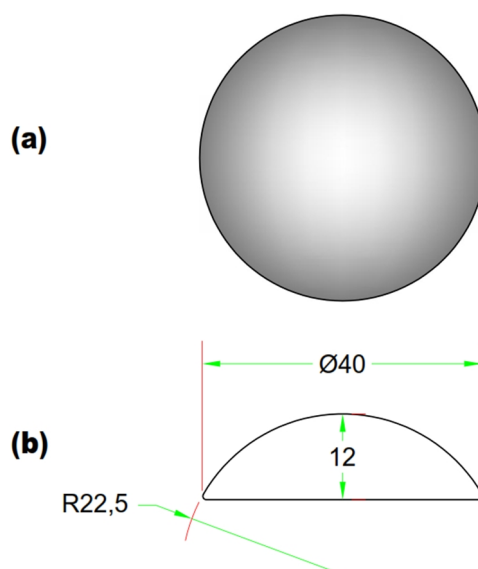


Figura 2.8 Diseño de colada (a) Vista superior (b) Vista frontal

Preparación de los materiales

La disponibilidad y preparación del acero ASTM A297 HH, cromo y níquel para elaborar cada colada se detalla en la tabla 17.

TABLA 17
Obtención de materiales

Material	Disponibilidad	Preparación
Acero ASTM A297 HH	Lingotes de 460x75x20 mm. Ver figura 2.9	Corte aproximado de porciones de 10x10x10 mm, de 20 a 45 g de peso. Ver figura 2.12 (a)
		Esmerilado de porciones para eliminar grietas e impurezas de la superficie Ver figura 2.12 (b)
Cromo	Polvo. Ver figura 2.10	No fue necesaria
Níquel	Esferas de 10±1 mm de diámetro de 5±1 g cada una. Ver figura 2.11	Fundir el níquel en grupos de 4 o 5 esferas y obtener coladas exclusivas de níquel Ver figura 2.13 (a)
		Fraccionar cada colada por impacto, con un combo por ejemplo. Ver figura 2.13 (b)

Se muestran las imágenes del acero ASTM A297 HH, cromo y níquel antes de ser preparados en las figuras 2.9, 2.10 y 2.11, respectivamente.

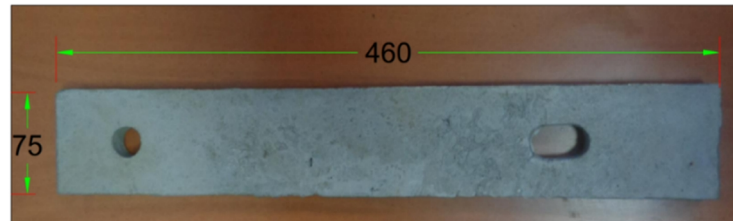


Figura 2.9 Lingote de acero HH

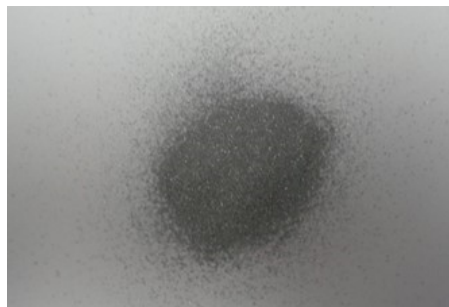


Figura 2.10 Cromo en polvo



Figura 2.11 Níquel en esferas

La figura 2.12 muestra la preparación del acero ASTM A297.

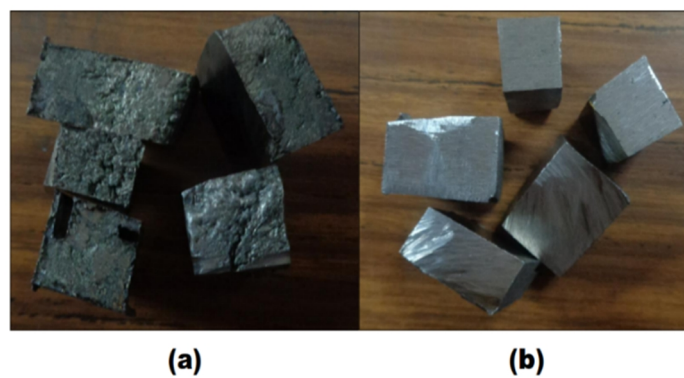


Figura 2.12 Fragmentos de acero HH (a) Sin esmerilar (b) Esmerilado

La figura 2.13 muestra la preparación del níquel.



Figura 2.13 Muestra de níquel en (a) Colada (b) Trizas

Proceso de fusión

La tabla 18 expone el proceso de fusión de las coladas.

TABLA 18
Proceso de fusión

Descripción	Comentario	Imagen
Las composiciones preparadas se ponen en el interior del horno	Colocar el cromo y níquel al fondo del crisol para facilitar la fusión.	Ver figura 2.14
Proceso de fusión	La fotografía fue tomada con un lente de soldador oscuro que permite la visualización de la chispa.	Ver figura 2.15
Coladas obtenidas con un tiempo de fusión entre 15 y 20 segundos	La imagen corresponde a la colada 1 (a) Vista superior (b) Vista inferior.	Ver figura 2.16

En la figura 2.14 se aprecia a los materiales dentro del crisol a previo a la fusión y en la figura 2.15 se observa el proceso de fusión.



Figura 2.14 Puesta de materiales en el crisol



Figura 2.15 Proceso de fusión

Finalizada la fusión, se obtuvieron las 17 coladas. En la figura 2.16 se aprecia a la colada 1.

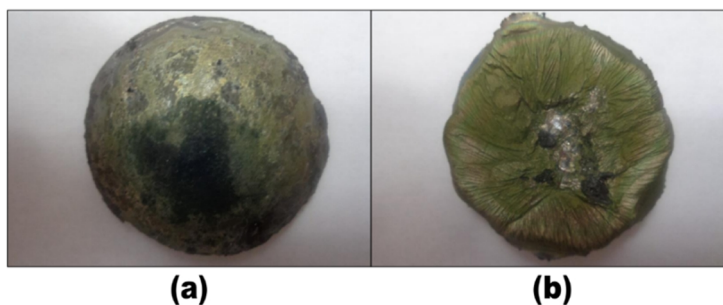


Figura 2.16 Colada 1 (a) Vista superior (b) Vista inferior

Las coladas fueron pesadas para verificar pérdida o ganancia de material durante la fusión. La tabla 19 muestra la masa real y su variación en porcentaje respecto a los 80 g teóricos.

TABLA 19
Masa real de coladas [g] y su variación [%]

Acero	No. Colada	Masa real	Variación [%]
ASTM A297 HI	1	79.14	-1.07
	2	80.67	0.83
	3	79.26	-0.93
	4	78.60	-1.75
	5	80.19	0.23
	6	78.99	-1.26
	7	78.08	-2.4
ASTM A297 HK	8	79.31	-0.86
	9	79.50	-0.62
	10	78.16	-2.3
	11	79.42	-0.72
	12	79.26	-0.92
	13	80.79	0.99
	14	79.77	-0.29
	15	78.68	-1.65
	16	79.96	-0.04
	17	79.11	-1.11

Las coladas 2, 5 y 13 aumentaron de masa, quizás por la presencia de oxígeno en la fusión. Las coladas 7 y 10 fueron las que perdieron más masa, pero en general las masas de todas las coladas estuvieron dentro de lo esperado. Las imágenes de las 17 coladas obtenidas se encuentran en el Apéndice E.1.

CAPITULO 3

3. ANÁLISIS DE PROBETAS

3.1. Análisis espectroscópicos de probetas

Obtenidas las probetas, se aplicaron los métodos de descarga luminiscente y de fluorescencia de rayos X para determinar su composición química.

3.1.1. Descarga luminiscente

Se empleó el equipo denominado Leco GDS 500A¹, mostrado en la figura 3.1.



Figura 3.1 Equipo Leco GDS 500A

¹ La empresa LEMAT (ESPOL) facilitó el uso del equipo Leco GDS 500A y de sus instalaciones.

Las principales especificaciones del equipo se describen en la tabla 20.

TABLA 20
Especificaciones generales del equipo Leco GDS 500A

Variable	Descripción
Dimensiones	118x105x80 cm ³
Peso	239 Kg
Lente óptico	Esfera horizontal-centrada con rejillas convexa
Detector	Matriz de carga acoplada
Rango espectral	165 a 460 nm
Longitud focal de dispersión	2.5 cm
Fuente	4 mm diámetro de descarga luminiscente
Sistema de vacío (dos etapas)	Bomba de vacío de accionamiento directo para el espectrómetro
	Fuente con purga de aire para evitar la vaporización del aceite de la bomba

La tabla 21 muestra las principales condiciones de operación para el correcto funcionamiento del equipo.

TABLA 21
Condiciones de operación del equipo Leco GDS 500A

Variable	Condición
Temperatura	Entre 18° y 30° C
Humedad relativa	Entre 20% y 80%
Presión del aire seco 99.9% puro	40 ± 4 psi (máxima)
Presión del argón 99.9% puro	40 ± 4 psi (máxima)
Energía eléctrica [voltaje/frecuencia/fase]	230 V ± 10% (a carga máxima) / 50-60 Hz / Monofásica

Preparación de las muestras

Para poder usar el equipo, las muestras deben satisfacer las condiciones dadas en la tabla 22:

TABLA 22
Condiciones de la muestra para uso de equipo Leco GDS 500A

Variable	Condición de la muestra
Forma	Preferible cilíndrica
Dimensiones	Área transversal $\approx 3 \text{ cm}^2$
	Altura mínima $\approx 10 \text{ mm}$
Superficie	Sin porosidades
	Lo más limpia posible
	Lo más plana posible, con ayuda de una lija 200 o preferible rectificada

La figura 3.2 esquematiza el proceso de preparación de las coladas para hacerlas aptas para el uso del equipo.

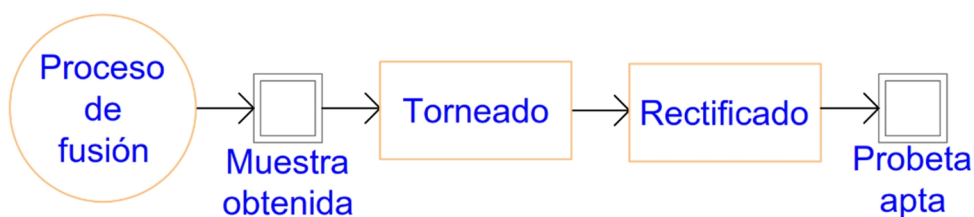


Figura 3.2 Preparación de coladas para equipo Leco GDS 500A

- **Torneado** Se efectuó el torneado con la finalidad de facilitar el rectificado. La tabla 23 contiene las especificaciones de este mecanizado y la figura 3.3 presenta el diagrama del mismo.

TABLA 23
Proceso de torneado

Instrumento	Cuchilla de tungsteno-vidia, que se afiló cada 5 min
Parámetros	4-5 pasadas de 0.5 mm, obteniendo un refrentado de 2-3 mm
Velocidad del torno	560 rpm
Tiempo de mecanización	3 min por colada

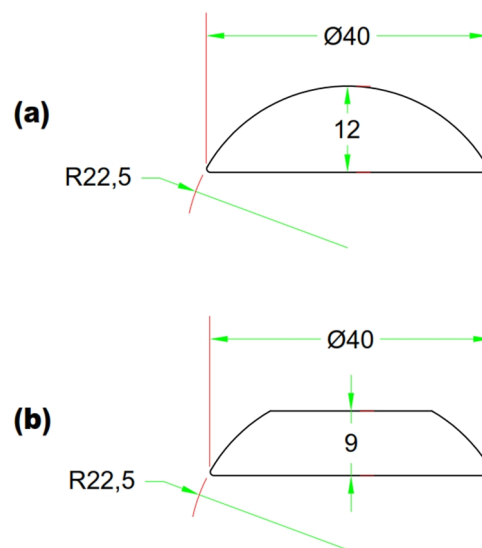


Figura 3.3 Diagrama de coladas
(a) Previo al torneado (b) Después del torneado

La figura 3.4 es una fotografía tomada en el momento del torneado.



Figura 3.4 Torneado de coladas

- **Rectificado:** Se detalla en la tabla 24 y la figura 3.5 muestra una imagen.

TABLA 24
Proceso de rectificado

Instrumento	Muela de rectificado de diamante
Parámetros	15-20 pasadas de 0.01 mm, obteniendo un desbaste de 0.15-0.2 mm
Tiempo de mecanización	15 min por colada



Figura 3.5 Proceso de rectificado

Una vez terminado el proceso (figura 3.6), la colada es apta para ser analizada. Las imágenes de las demás coladas aptas se pueden ver en el Apéndice E.2.



Figura 3.6 Colada apta para análisis químico

Uso del equipo Leco GDS 500A

Se especifican los pasos para el uso del equipo en la tabla 25.

TABLA 25
Uso del equipo Leco GDS 500A

Descripción	Detalle
1. La muestra se introduce en una cámara	
2. Se ajusta con un pin neumático de forma horizontal y se cierra la compuerta	
3. Se realiza la lectura (o 'quemá')	La entrada y salida de datos se realiza mediante un software instalado en una computadora
4. Procedimiento por cada colada	Se realizan 3 quemas (10 s cada una) en un área representativa de la superficie de la muestra. Si hay una lectura aberrante (fuera de contexto) se realiza una lectura adicional
5. Se retira la muestra de la cámara.	

En la figura 3.7 se observa a una colada (la 7) después de haberse realizado las 3 lecturas en el equipo Leco GDS 500A. En el Apéndice E.3 aparecen las demás imágenes de las coladas analizadas por este equipo.



Figura 3.7 Colada analizada por equipo Leco GDS 500A

3.1.2. Fluorescencia de rayos X

Se usó el equipo Thermo Niton XL2 (figura 3.8).



Figura 3.8 Equipo Thermo Niton XL2

El modo de uso y sus ventajas se especifican en la tabla 26.

TABLA 26
Uso y ventajas del equipo Thermo Niton XL2

Modo de uso	1. No se requiere preparación superficial de la muestra a analizar
	2. El equipo se acerca a la muestra y se toma la lectura
	3. Los resultados salen en la pantalla al instante
Ventajas	Portátil, por lo que es muy usado en campo abierto
	Fácil de maniobrar

Más información técnica sobre este equipo se muestra en el Apéndice B.2. En el Apéndice E.4 se encuentran imágenes de las lecturas tomadas del equipo Thermo Niton XL2 a las coladas 4, 7, 8, 12, 13 y 16.

3.2. Análisis estadístico de datos obtenidos

Se presentan en las siguientes tablas las lecturas de composición química obtenidas en los equipos de espectrometría de las 17 coladas del presente estudio. La tabla 27 muestra los porcentajes de cromo y níquel obtenidos de los equipos de espectroscopia.

TABLA 27
Porcentajes de Cr y Ni en coladas según equipos de espectroscopia

Colada	Descarga Luminiscente		Fluorescencia de rayos X	
	[%Cr]	[%Ni]	[%Cr]	[%Ni]
1	28.3	15.8	27.4	16.5
2	30.3	17.6	27.2	17.6
3	23.2	18.4	24.8	17.5
4	25.5	17.3	25.3	16.7
5	25.4	17.7	26.8	17.4
6	25.8	16.8	27.7	17.2
7	28.3	16.8	28.7	16.9
8	22.8	17.8	23.4	17.4
9	23.9	17.6	24.2	18.4
10	22.8	18.6	24.8	18.9
11	22.5	20.2	23.2	19.9
12	23.1	21.4	23.5	20.8
13	22.8	18.7	23.2	18.6
14	22.6	19.2	23.2	19.1
15	24.4	20.3	24.7	19.5
16	25.3	19.1	26.3	18.8
17	26.3	19	25.7	19.2

Los diagramas de barras de las figuras 3.9 y 3.10 son una comparación entre las lecturas de porcentaje de cromo y níquel respectivamente, según los equipos de espectroscopia junto con el porcentaje teórico.

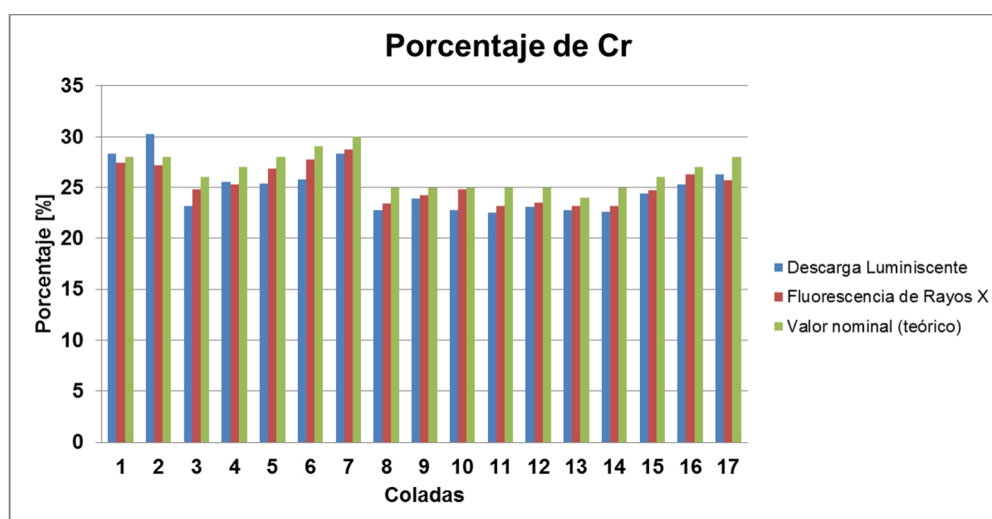


Figura 3.9 Comparación de porcentajes de Cr de métodos espectroscópicos

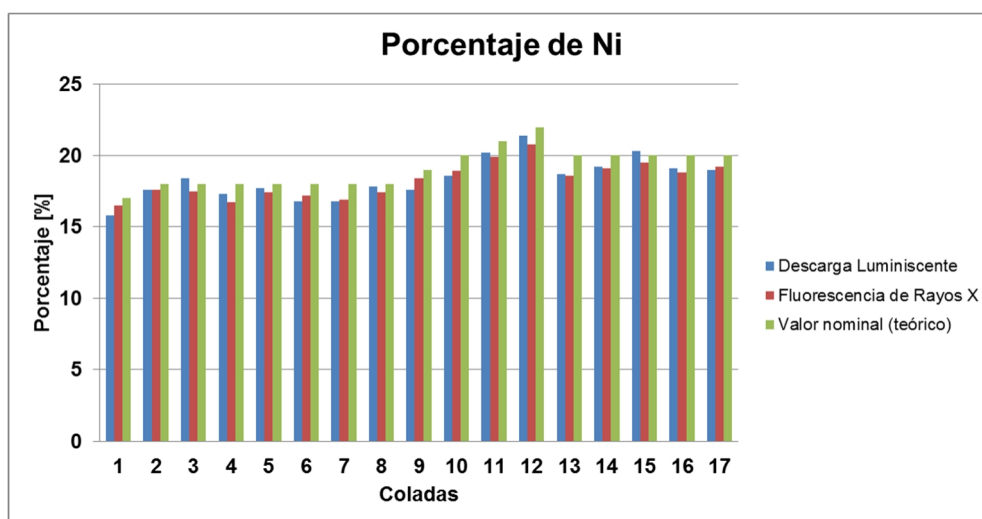


Figura 3.10 Comparación de porcentajes de Ni de métodos espectroscópicos

La tabla 28 muestra el error porcentual de cada porcentaje según el tipo de espectroscopia en comparación al porcentaje teórico de la tabla 10.

TABLA 28
Error porcentual de contenido de Cr y Ni en coladas

Colada	Descarga Luminiscente		Fluorescencia de rayos X	
	[%Cr]	[%Ni]	[%Cr]	[%Ni]
1	1.07	7.06	2.14	2.94
2	8.21	2.22	2.86	2.22
3	10.77	2.22	4.62	2.78
4	5.56	3.89	6.3	7.22
5	9.29	1.67	4.29	3.33
6	11.03	6.67	4.48	4.44
7	5.67	6.67	4.33	6.11
8	8.8	1.11	6.4	3.33
9	4.4	7.37	3.2	3.16
10	8.8	7	0.8	5.5
11	10	3.81	7.2	5.24
12	7.6	2.73	6	5.45
13	5	6.5	3.33	7
14	9.6	4	7.2	4.5
15	6.15	1.5	5	2.5
16	6.3	4.5	2.59	6
17	6.07	5	8.21	4

En la figura 3.11 se comparan los errores porcentuales de las lecturas de cromo entre los métodos espectroscópicos. Se aprecia que la mayoría tiene errores porcentuales inferiores al 10%. El grafico también refleja que en pocas coladas los equipos tienen errores similares (por ejemplo, la colada 9).

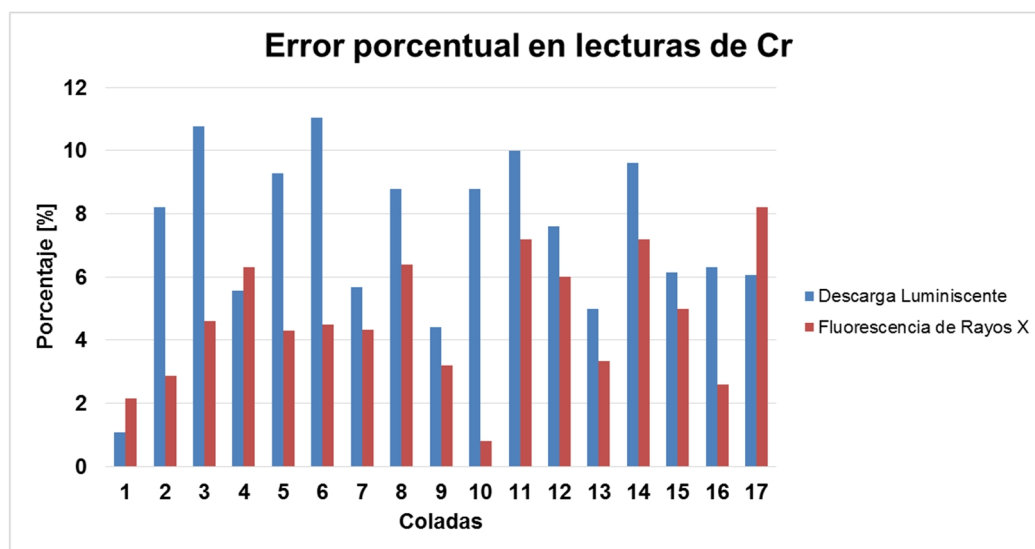


Figura 3.11 Comparación de error porcentual entre lecturas de cromo

La figura 3.12 es un diagrama de barras de los errores porcentuales de las lecturas de níquel, donde existe mayor variabilidad de resultados entre lecturas de equipos respecto a las lecturas del cromo. Esto no se cumple en la colada 16, cuyas lecturas de níquel de ambos equipos son coincidentes.

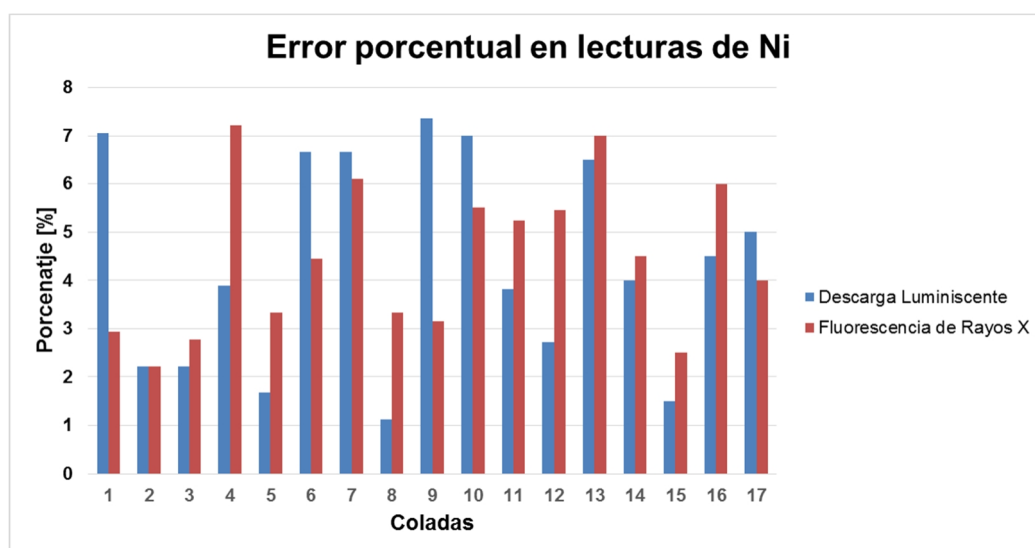


Figura 3.12 Comparación de error porcentual entre lecturas de níquel

El Apéndice F complementa el análisis estadístico con pruebas de hipótesis para determinar la validez de los procedimientos.

3.3. Análisis metalográfico y dureza de probetas

Análisis metalográfico¹

La metalografía trata del estudio de la estructura interna de los metales y aleaciones mediante sus propiedades físicas y mecánicas. Se procedió según el diagrama de la figura 3.13.

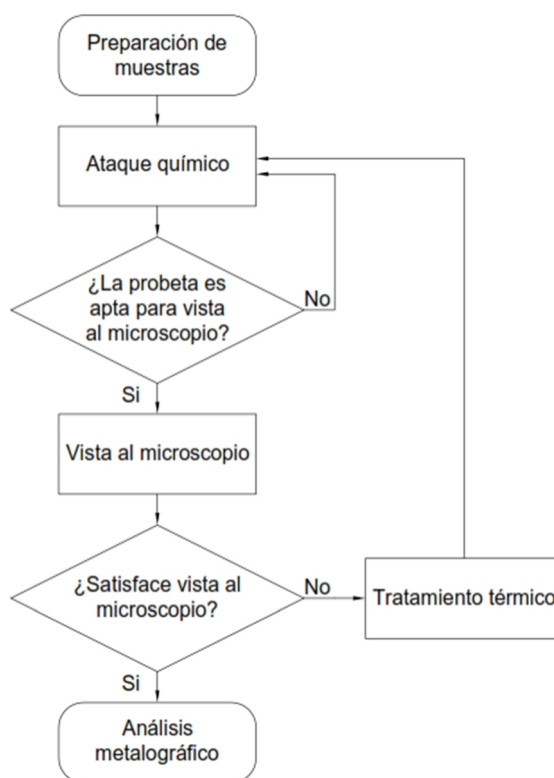


Figura 3.13 Análisis metalográfico de probetas

¹ El análisis metalográfico fue realizado en el laboratorio de metalografía de la empresa INTRAMET.

- **Preparación de la muestra:** Se presenta en el contenido de la tabla 29.

TABLA 29
Preparación de coladas para análisis metalográfico

Descripción	Detalle	
Coladas seleccionadas	Colada 1 (acero ASTM A297 HI)	Por su calidad superficial
	Colada 14 (acero ASTM A297 HK)	
Preliminares	No fue necesario la separación de la fundición	Por las dimensiones de cada muestra
	No fue necesario el montaje en una pastilla maciza	
Desbaste grueso	Uso de lijas No. 220, 240, 280, 320, 400, 500, 600, 1000, 1200 y 1500	Ver figura 3.14
	Lavado con agua destilada	Ver figura 3.15
	Secado con aire caliente	
Desbaste fino (pulido final)	Alúmina (Al_2O_3) de 0.05 μm en un paño Struers	Ver figura 3.16

Se presentan las imágenes del desbaste grueso, de una probeta lavada con agua destilada y del desbaste fino en las figuras 3.14, 3.15 y 3.16, respectivamente.



Figura 3.14 Desbaste grueso con lijas

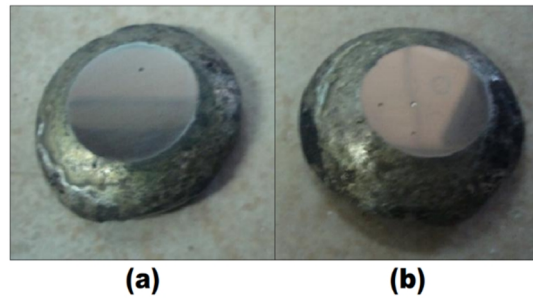


Figura 3.15 Coladas (a) 1 y (b) 14 después del desbaste con lijas



Figura 3.16 Pulido fino en paño Struers

- **Ataque químico:** El ataque químico evidencia la estructura del metal cuando sea observada en el microscopio. Para aceros refractarios, la ASM recomienda la glyceregia como reactivo químico (figura 3.17).



Figura 3.17 Ataque químico con glyceregia

La tabla 30 detalla las especificaciones de la glyceregia.

TABLA 30
Especificaciones de la glyceregia

Composición	10 ml HNO ₃ / 20 a 50 ml HCl / 30 ml glicerol	
Características	Reactivo químico recomendado por la ASM para aceros refractarios	
	Desechar si se torna de color naranja	
	No revelará efectivamente los límites de grano en aleaciones con alto contenido de Cr o Ni	
Modo de uso	Usar fresco	
	Sumergir la muestra durante 15 min	Ver figura 3.17
	Lavar con agua destilada	
	Secar con una pistola de aire	

- **Vista al microscopio:** Las primeras imágenes de las probetas obtenidas mediante el microscopio Zeiss 47 30 12 no fueron concluyentes, por tanto, se procedió a realizar el tratamiento térmico de recocido a las muestras, detallado en la tabla 31.

TABLA 31
Tratamiento térmico de recocido a las probetas

Procedimiento	Detalle	
Calentamiento progresivo de las muestras en un horno de crisol hasta llegar a 1000° C	Con ayuda de un soplador y con combustible de un tanque de gas	Ver figura 3.18
Mantener la temperatura constante durante 2 horas	La temperatura se controló según su escala de coloración	Ver figura 3.19
Sumergirlas en agua a temperatura ambiente		

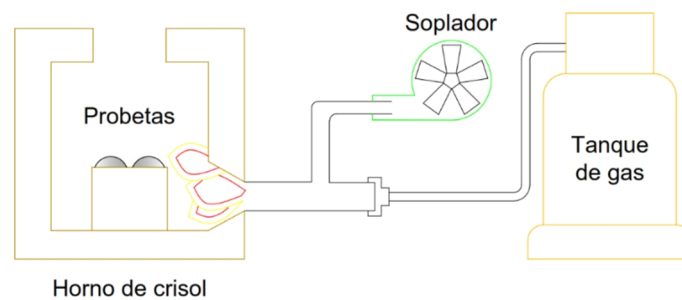


Figura 3.18 Muestras calentadas en horno de crisol

Colour	°C
White	1200
Light Yellow	1100
Yellow	1050
Light Orange	980
Orange	930
Light Red	870
Light Cherry	810
Cherry	760
Dark Cherry	700
Blood Red	650
Brown Red	600

Figura 3.19 Escala de coloración de acero recocido

Posteriormente, se repitió el ataque químico y se observaron en el microscopio usando lentes de aumento 200x (figura 3.20).

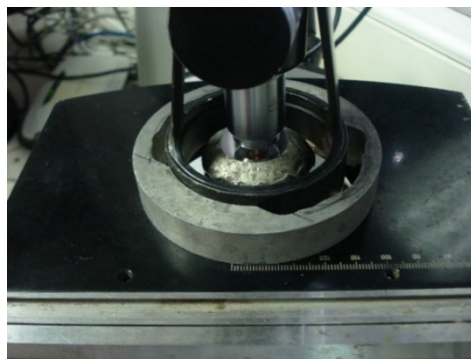


Figura 3.20 Puesta de la probeta en el microscopio

Las imágenes que se obtuvieron se muestran en las figuras 3.21 (acero HI) y 3.22 (acero HK). Se aprecian las estructuras austeníticas y de tipo monofásicas, con límites de grano bien definidos en forma de hojuelas, en especial para el acero ASTM A297 HI.

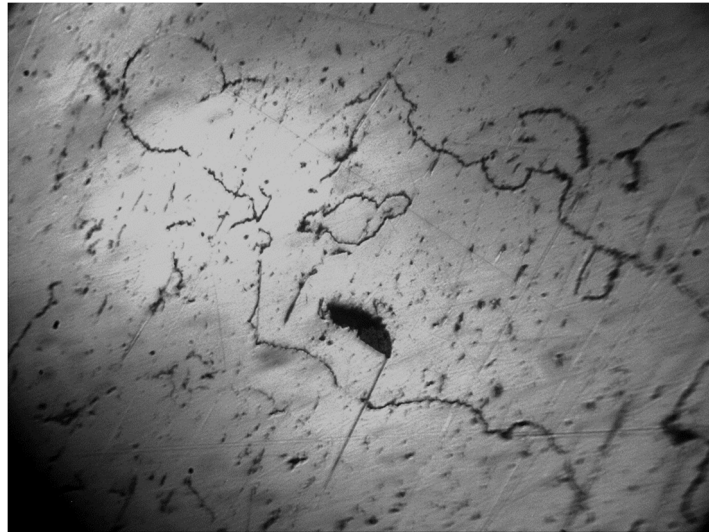


Figura 3.21 Microscopia 200x usando glyceresia del acero ASTM A297
HI

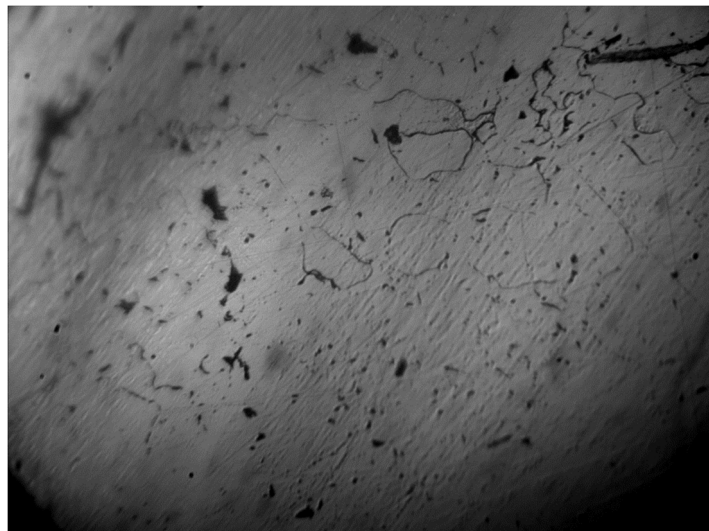


Figura 3.22 Microscopia 200x usando glyceresia del acero ASTM A297
HK

Dureza¹

Se realizó el ensayo de dureza a las probetas 5 (acero HI) y 10 (acero HK) usando el equipo marca Leco modelo LR 300 TD (figura 3.23). Las probetas fueron mecanizadas con torno y rectificadora para obtener caras planas y paralelas en cada una de las mismas, obteniéndose los resultados de la tabla 32.

TABLA 32
Resultados de ensayo de dureza de probetas 5 y 10

Probeta	Resultado	Desviación estándar
5	40.86	0.15
10	36.66	0.28



Figura 3.23 Durómetro Leco LR 300 TDL

¹ El equipo Leco LR 300 TD fue facilitado por el laboratorio de materiales de la FIMCP (ESPOL).

La figura 3.24 muestra a las probetas 5 y 10 después de realizarse los ensayos de dureza.

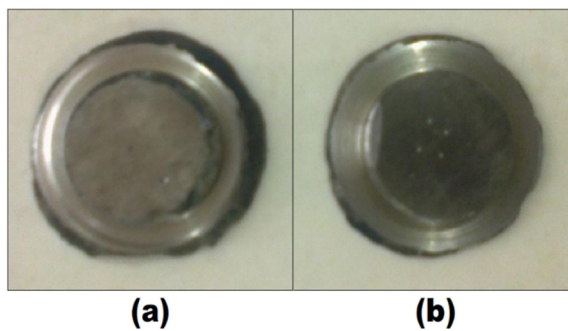


Figura 3.24 Probetas (a) 5 y (b) 10 después del ensayo de dureza

CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

Efectuados los ensayos para evaluación química de las probetas obtenidas en el horno de microfusión con variaciones de porcentaje de cromo y níquel, los resultados obtenidos en los dos equipos espectroscópicos conllevan a las siguientes conclusiones relacionadas con los objetivos general y específicos enunciados en la introducción.

- Con relación al objetivo general que establecía precisión y confiabilidad de los resultados de análisis químico para la producción de acero inoxidable, se puede concluir que solo el espectrómetro basado en la fluorescencia de Rayos X puede efectuar los ensayos sin necesidad de calibración alguna, lo cual brinda mucha confianza en su uso, sin embargo, tiene grandes limitaciones porque no es capaz de dar resultados con relación al carbono y silicio.

- El espectrómetro basado en la descarga luminiscente posee un método de calibración de acorde a los elementos principales a medir. Este equipo proporcionó resultados concretos y concordantes para los contenidos de cromo y níquel, inclusive pudo determinar el carbono y silicio.
- Las lecturas de los porcentajes de cromo y níquel de las coladas según la tecnología espectroscópica estuvieron dentro de lo previsto y son significativamente correctas con una confianza del 99%.
- La experiencia demuestra que haciendo probetas con una carga de 80 g se pudieron obtener las muestras de aleación deseadas con la rapidez y sin variación de los contenidos de los elementos, es decir sin pérdidas de metal durante la fusión.
- El diseño, construcción y fusión en el horno de microfusión cumplieron con el objetivo metodológico de obtención de las coladas requeridas en acero inoxidable. El tiempo de duración de una colada fue entre 15 y 25 segundos con el gasto de un electrodo de grafito por cada colada, lo cual representa un coste mínimo y una velocidad de respuesta ultrarrápida y con poca pérdida de metal durante la fusión.
- La calibración correcta de una máquina no significa una condición suficiente para asegurar un buen resultado de lectura de análisis químico, debido a la influencia de otros factores, entre los cuales se encuentra el factor humano.

- Para determinar la caracterización completa de un acero, no basta realizar su análisis químico, se deben incluir también otros análisis complementarios como el ensayo de dureza y el análisis metalográfico.
- No existe todavía un espectrómetro que muestre una lectura completa de la composición química de alguna muestra.

Recomendaciones

- Aplicar las normativas básicas de seguridad relacionadas con soldadura y manipulación de objetos a altas temperaturas.
- Preparar cuidadosamente cualquier muestra a la que se desee hacer análisis químico.
- Cuando se requiera un espectrómetro para realizar análisis químico, no solo se debe tomar en cuenta si el equipo está operativo, también se debe verificar su mantenimiento, calibración y el historial de análisis previos.
- Realizar siempre al menos dos o más análisis químicos para una determinada muestra, de esa forma se puede contrastar resultados. De ser posible usar equipos de distinta tecnología espectroscópica para contrastar resultados.
- Llevar un plan de mantenimiento y calibración para una máquina acorde a su capacidad de producción, de tal manera que no se exceda la carga de trabajo para el equipo.

BIBLIOGRAFÍA

1. BOTERO FEDERICO. Hornos de Inducción: Producción Limpia y Eficiente. Revista Metal Actual. [online, tomado de Yumpu]. Colombia, 2011. <https://www.yumpu.com/es/document/view/51571232/hornos-de-induccion-revista-metal-actual>
2. Horno de inducción [online, Tomado de Wikipedia]. https://es.wikipedia.org/wiki/Horno_de_inducci%C3%B3n
3. Steel Casting Handbook. Supplement 9. High Alloy Data Sheets Heat Series. Steel Founders' Society of America (SFSA). 2004.
4. Standard Specification for Steel Castings, Iron-Chromium and Iron-Chromium-Nickel, Heat Resistant, for General Application (A 297/A 297M – 97). ASTM. 2003.
5. ASM Handbook. Volume 9: Metallography and Microstructure. 2004.
6. SKOOG DOUGLAS. Principios de Análisis Instrumental. Sexta Edición. Editorial Cengage Learning. 2008.
7. WALPOLE R., MYERS R., MYERS S. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. Novena Edición. Editorial Pearson Education. 2012.
8. RUFFINO Juan, NAPOLITANO Federico. Curso Introducción al Sistema de Análisis por Espectrometría de Emisión Óptica GDS. Inbox Technology and Services. Leco. 2013.

APÉNDICES

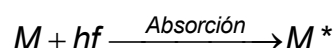
APÉNDICE A

MÉTODOS ESPECTROSCÓPICOS USADOS EN LA INVESTIGACIÓN

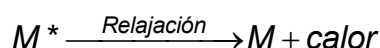
MÉTODOS ESPECTROSCÓPICOS USADOS EN LA INVESTIGACIÓN

Los métodos espectroscópicos de análisis de composición química se fundamentan en la interacción o intercambio energético de la radiación electromagnética (REM) con la materia.

Cuando la materia M absorbe energía, hay un proceso de absorción de radiación por parte de las moléculas pasando a un estado de excitación M^* :



Y en un tiempo dado, se produce una relajación (desactivación) con emisión de energía en forma de calor.



Clasificación de los métodos espectroscópicos

La interacción entre la REM y la materia puede darse en forma de absorción o emisión y las variaciones energéticas pueden ser a nivel molecular o atómico. Según esto, los métodos espectroscópicos se clasifican de la siguiente forma (figura A.1):

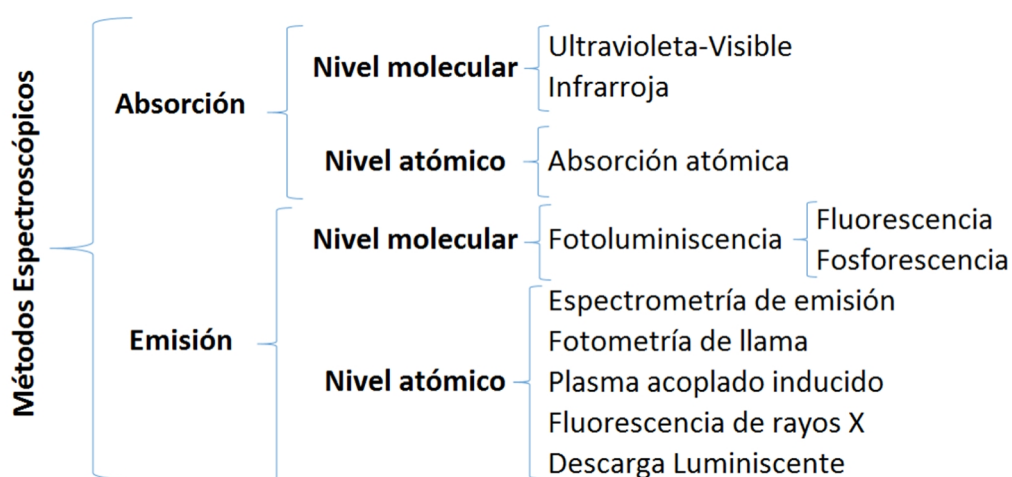


Figura A.1 Clasificación de los métodos espectroscópicos

Los métodos usados en el presente trabajo de investigación fueron el de fluorescencia de rayos X y descarga luminiscente, ambos dentro del grupo de espectroscopia de emisión a nivel atómico.

Métodos de emisión a nivel atómico

Se basan en la medida de radiación electromagnética emitida por los átomos de una muestra durante el proceso de relajación, es decir después de haber alcanzado el estado de excitación.

▪ FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Los rayos X son radiación electromagnética que ocurre cuando hay desaceleración de los electrones o por transiciones electrónicas al interior de los átomos. Los rayos X son lo suficientemente energéticos para desprender electrones fuertemente enlazados al interior del átomo. Cuando esto ocurre, se produce inestabilidad en la estructura atómica y los electrones de niveles mayores sustituyen a los expulsados.

La fluorescencia de rayos X es un método eficaz en el aspecto cuantitativo y cualitativo de la mayoría de elementos. Además, a diferencia de otros métodos espectroscópicos, no es necesario destruir la muestra para la realización del análisis.

Instrumentación

La instrumentación consta de una fuente, monocromador y detector, representados en la figura A.2.

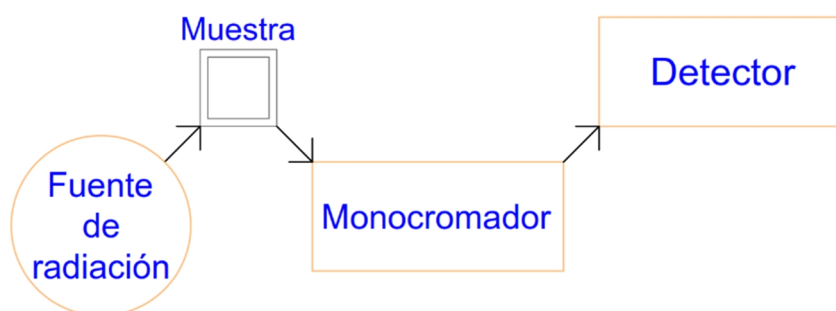


Figura A.2 Espectrómetro de fluorescencia de rayos X

Fuente de radiación

La principal fuente de generación de la excitación primaria de rayos X se denomina tubo de rayos X. Consta de un recipiente a alta vacío que contiene un filamento de tungsteno que actúa como cátodo y está conectado a alta tensión. Hay también un ánodo, que suele tratarse de un bloque de cobre con un blanco metálico, que se trata de una placa de metal incrustada en la superficie del bloque, cuyo material puede ser de tungsteno, cromo, cobre, molibdeno, plata, hierro y cobalto. En figura A.3 se presenta un esquema fundamental de un tubo de rayos X. Fluye corriente por el circuito del filamento, se calienta eléctricamente y produce emisión de electrones en dirección al ánodo. Como consecuencia de la emisión, se generan rayos X propios del material anódico.

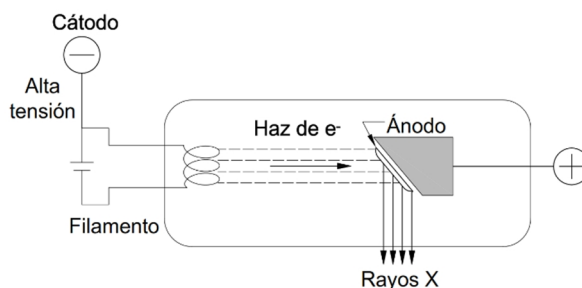


Figura A.3 Tubo de rayos X

Monocromador

Está conformado por dos lentes colimadores para generar un haz paralelo de rayos X derivados de la fuente. Hay un monocristal (o cristal analizador) que funciona como elemento dispersor y está ubicado sobre un goniómetro, de tal manera que se pueda medir el ángulo de incidencia del haz de rayos X sobre la superficie del cristal.

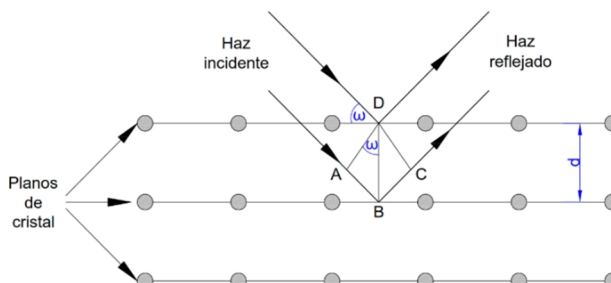


Figura A.4 Refracción de rayos X

Para que ocurra la refracción de rayos X (figura A.4) y la radiación pueda ser detectada posteriormente, la distancia recorrida de los rayos (AB y BC) debe ser múltiplo entero de las longitudes de onda λ . Por la geometría de la figura anterior, se obtiene la ecuación de Bragg:

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen}(\omega)$$

Donde n es un número natural ($n=1, 2, 3, \dots$), d es la distancia entre planos de cristal y ω es el ángulo de incidencia de la radiación primaria.

Detectores

Los más usados son los sistemas de ionización de gas (contador Geiger) y el contador de centelleo.

- **Contador Geiger:** El contador Geiger es un tubo que contiene un gas inerte (Ar) con un filamento que funciona como ánodo. La ionización del gas ocurre cuando los rayos X traspasan el tubo a través de una ventana de mica, esto origina fluencia de electrones hacia el electrodo central y, consecuentemente, se crea una corriente en un circuito anexo que fácilmente puede leerse. En la figura A.5 se muestra un diagrama básico.

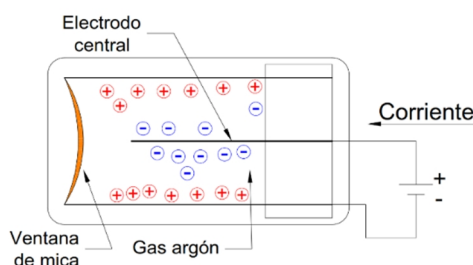


Figura A.5 Contador Geiger

- **Contador de centelleo:** Se basa en la luminiscencia que se produce por la incidencia de radiación sobre sustancias luminiscentes, también llamadas luminóforos o centelladores. Consta de un cristal transparente de yoduro de sodio que se encuentra anexo a los tubos fotomultiplicadores. Cuando la radiación atraviesa el cristal, esta pierde su energía y después es liberada mediante fotones fluorescentes como destellos de luz. Los destellos de luz pasan al fotocátodo del tubo fotomultiplicador para después convertirse en pulsos eléctricos prestos a ser interpretados.

▪ FUENTE DE DESCARGA LUMINISCENTE

La fuente de radiación es conocida como fuente de Grimm. Una descarga luminiscente ocurre dentro de un ambiente de gas argón a baja presión (1 a 10 torr) entre un par de electrodos mantenidos a un voltaje de corriente directa de 250 a 1000 V. El voltaje aplicado causa la descomposición del gas argón en iones positivos y electrones. El campo eléctrico acelera los iones argón hacia la superficie del cátodo que contiene la muestra. Los átomos neutros de la muestra son expulsados por un proceso denominado chisporroteo. En la superficie del cátodo (figura A.6), los átomos de la muestra en estado basal se excitan al chocar con electrones de alta energía, vuelven a su estado fundamental y emiten su radiación característica.

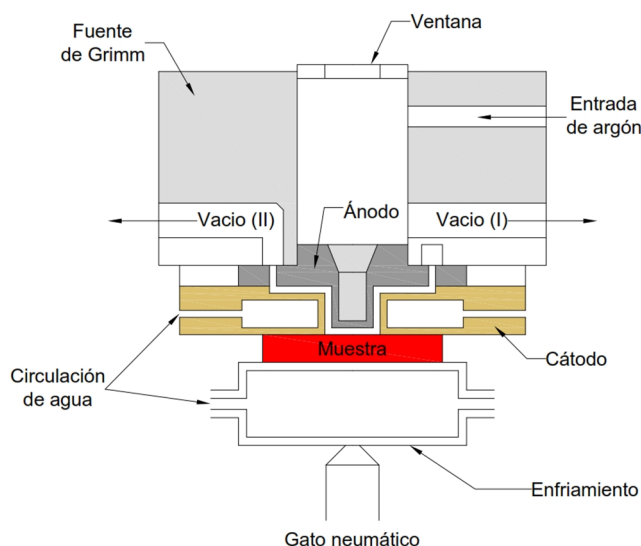


Figura A.6 Espectrómetro de descarga luminiscente

La espectrometría de descarga luminiscente es una técnica multielemental que puede trabajar con grandes volúmenes y realizar análisis profundos de sólidos, debido a esto su uso se ha intensificado en los últimos años.

APÉNDICE B

HOJAS TÉCNICAS DE ESPECTROSCOPIOS USADOS EN LA INVESTIGACIÓN

APÉNDICE B.1

HOJA TÉCNICA DE EQUIPO LECO GDS 500A

GDS500A Glow Discharge Spectrometer

Specification Sheet

Optics	Horizontal-centered sphere with convex grating
Detector	Charge-coupled array with 12,000 active pixels (0.007 mm W x 0.2 mm H)
Spectral Range	Complete spectral coverage (165 nm to 460 nm)
Dispersive Focal Length	0.225 m
Source	4 mm diameter DC glow discharge (2 mm optional)
Vacuum System	Two stage, direct drive vacuum pump for spectrometer and source with air bleed to prevent pump oil vaporization
Temperature Stability	Regulated at 104°F (40°C)
Gas Requirements	
Source/Spectrometer:	Argon, 99.998% purity, 40 psi (2.8 bar) ±10%
Pneumatics:	Inert Gas, 99.99% purity; 40 psi (2.8 bar) ±10%
Nominal Environmental Operating Conditions	
Temperature:	64 to 86°F (18 to 30°C)
Humidity:	20 to 80% (non-condensing)
Electrical Power Requirements	230 V~ (±10%; at max load), 50/60 Hz, single phase, 6 A, 4,800 BTU/hr
Dimensions	46.5 in. H x 41 in. W x 31.5 in. D (118 cm H x 105 cm W x 80 cm D)
Weight	530 lb. (239 kg)
Shipping Weight	~1000 lb. (450 kg)
Part Numbers	
GDS500C	GDS500A Package with PC, 15 in. flat-panel monitor, software
Options	
612-625	NWA Quality Analyst Software
617-737	15 in. Flat-Panel Monitor
710-172	19 in. Flat-Panel Monitor
686-024	24 in. Widescreen Flat-Panel Monitor
611-457	PC Table with Adjustable Tray
612-708	Sample Holder; 2 mm wires
612-774	Sample Holder; Porous Samples
612-775	Sample Holder; TRS Bars
612-798	Sample Holder; 13 mm; Briquettes
621-434-110	Deskjet Printer Kit
612-917	Dot Matrix Serial Printer Kit
615-763	SmartLine® Modem-Based Remote Diagnostics
710-198-B/O	SmartLine Internet-Based Remote Diagnostics
618-227	2 mm Lamp Kit

V~ denotes VAC

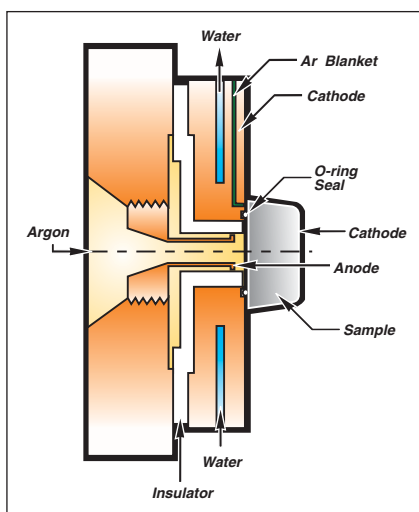


The Sputtering Process

- The Glow Discharge Spectrometer (GDS) lamp provides a low pressure argon environment (typically 5-10 Torr) over the sample surface.
- A high negative potential (typically -800 to -1200V) is applied to the sample. The sample thus becomes the cathode.
- Spontaneously produced Argon ions (Ar^+) are accelerated across the anode/cathode gap by this potential.
- The collision of Ar^+ ions with argon gas molecules causes plasma formation and further production of Ar^+ ions. This plasma is called a glow discharge.
- Some of these high velocity Ar^+ ions reach the sample surface where they sputter (or mill out) materials uniformly from the sample substrate.
- Some of this sputtered material diffuses into the glow discharge plasma where it is dissociated into atomic particles and finally excited.
- The light emitted from these excited state species as they collapse back to a lower energy level is characteristic of the elements composing the sample.
- The wavelengths and intensity of the light emission are used to identify and quantify the composition of the sample.

GDS Advantages

- Layer-by-layer removal of material allows for qualitative and quantitative analysis
- Separation of sampling (sputtering) and excitation resulting in:
 - Freedom from metallurgical history
 - Fewer matrix effects
- Grimm-type Lamp design provides lowered self-absorption and material re-deposition
- Linear calibration curves with wide dynamic range
- Fewer lines required to analyze full concentration range
- Linear calibrations require fewer standards for calibration
- Fewer spectral interferences due to:
 - Narrow emission lines
 - Excitation of almost exclusively atom lines
- Very little sample-to-sample carry-over allows quick matrix changes
 - Automatic cleaning between samples
 - No sputtering of anode or other lamp components
- Low reference material consumption
 - More burns before required resurfacing
 - Shallower burn spots requiring less material removal during resurfacing
- Low gas and other consumable consumption
- Very easy to operate
- Quiet, clean, and low maintenance



GDS Source

Specifications and part numbers may change.
Consult LECO for latest information.

World Headquarters/United States

In United States (800) 292-6141
(269) 985-5496
Outside U.S.A. (269) 983-5531

International Offices/Subsidiaries

Africa • LECO Africa (Pty.) Ltd.
Kempton Park, South Africa
Ph: 27-11-974-1681 • Fax: 27-11-974-1848

Argentina • LECO Argentina S.A.
Buenos Aires, Argentina
Ph: 54-114-523-8077 • Fax: 54-114-523-8873

Australia • LECO Australia Pty. Ltd.
Castle Hill, NSW, Australia
Ph: 61-2-9894-5955 • Fax: 61-2-9894-5247

Brazil • LECO Instrumentos Ltda.
Rio De Janeiro, Brazil
Ph: 55-212-538-4250 • Fax: 55-212-538-4299

Canada • LECO Instruments Ltd.
Mississauga, Ontario Canada
Ph: 905-564-6577 • Fax: 905-564-6582

China • LECO Corp/Beijing Office
Beijing, China
Ph: 86-10-6512-8877 • Fax: 86-10-6528-0373

Czech Republic • LECO Instrumente Plzen s.r.o.
Plzen/Czech Republic
Ph: 420-37-751-0811 • Fax: 420-37-725-9304

France • LECO France
GARGES-Les-GONESSE; Cedex, France
Ph: 33-134-45-4600 • Fax: 33-139-86-4105

Germany • LECO Instrumente GmbH
Mönchengladbach, Germany
Ph: 49-2166-687-0 • Fax: 49-2166-687-100

Hong Kong • LECO Instruments Hong Kong Ltd.
Kowloon, Hong Kong
Ph: 852-2387-7028 • Fax: 852-2708-4388

Italy • LECO Italy, S.R.L.
Milan, Italy
Ph: 39-02-953-43391 • Fax: 39-02-953-43461

Japan • LECO Japan Corporation
Tokyo, Japan
Ph: 813 (5782) 7800 • Fax: 813 (5782) 7801

Korea • LECO Korea Co. Ltd.
Gyeonggi-Do, Korea
Ph: 82-31-478-2441 • Fax: 82-31-478-2440

Malaysia • LECO Instruments (M) Sdn. Bhd.
Selangor, D.E. Malaysia
Ph: 60-3-7805-2100 • Fax: 60-3-7805-2212

Mexico • LECO Mexico S.A. de C.V.
Monterrey, NL CP 64900 Mexico
Ph: 52-81-83-49-3927 • Fax: 52-81-83-49-6485

The Netherlands • LECO Europe B.V.
Geleen, The Netherlands
Ph: 31-46-4747473 • Fax: 31-46-4747333

Poland • LECO Polska Sp.zo.o
Katowice, Poland
Ph: 48-32-2000-760 • Fax: 48-32-2000-536

Russia • Z.A.O. LECO Center Moscow
Moscow, Russia
Ph: 7495-710-3818 • Fax: 7495-710-3826

Spain • LECO Instrumentos S.A.
Madrid, Spain
Ph: 3491-803-1250 • Fax: 3491-804-0577

Sweden • LECO Corporation Svenska AB
Upplands Väsby, Sweden
Ph: 468-594-11000 • Fax: 468-594-11011

Taiwan • LECO Instruments Taiwan Ltd.
Taipei, Taiwan R.O.C.
Ph: 886-22-518-4699 • Fax: 886-22-518-4671

Thailand • LECO Instruments (Thailand) Ltd.
Bangkok, Thailand
Ph: 66-2-886-4350 • Fax: 66-2-886-4351

United Kingdom • LECO Instruments (U.K.) Ltd.
Stockport, Cheshire, England
Ph: 44-161-487-5900 • Fax: 44-161-456-0969

Venezuela • Instrumentos LECO Venezuela, C.A.
Puerto Ordaz, Edo. Bolivar, Venezuela
Ph: 58-286-994-4835 • Fax: 58-286-994-1570

Vietnam • LECO (Vietnam) Co., Ltd.
Ho Chi Minh City, Vietnam
Ph: 848-829-8979 • Fax: 848-829-8978

LECO Corporation

3000 Lakeview Avenue • St. Joseph, MI 49085 • Phone: 800-292-6141 • Fax: 269-982-8977
info@leco.com • www.leco.com • ISO-9001:2000 • No. FM 24045 • LECO is a registered trademark of LECO Corporation.



Delivering the Right Results

© 2008 LECO Corporation

APÉNDICE B.2

HOJA TÉCNICA DE EQUIPO THERMO NITON XL2

Thermo Scientific Niton XL2 XRF Analyzer

Thermo Scientific Niton XL2 x-ray tube-based x-ray fluorescence (XRF) analyzers are purpose-built for your demanding applications. When speed, accuracy, and reliability count, our perfect combination of hardware, software, and direct industry experience helps meet your specific analytical requirements. The Niton XL2 – the practical solution from the pioneer in handheld XRF instrumentation. Leadership through excellence in innovation.



Thermo Scientific Niton XL2 analyzers provide you with many distinct advantages:

- **Very easy to use – even by non-technical personnel**
- **Rugged design for real-world industrial environments**
- **Truly nondestructive test with near instantaneous results**
- **From turn on to trigger pull to results in seconds**
- **Confident analysis with technology from the industry leader**



Eliminate the guesswork – verify metal alloys for manufacturing quality assurance.

Built for the Way You Work

The value choice Thermo Scientific Niton XL2 analyzer offers high performance and advanced electronics while maintaining the point-and-shoot simplicity that has been the hallmark of all of our XRF instruments. Sealed against moisture and dust with 100% embedded software tools, these analyzers are lightweight yet ruggedly built to withstand the harshest environments – in the field or on the shop floor.

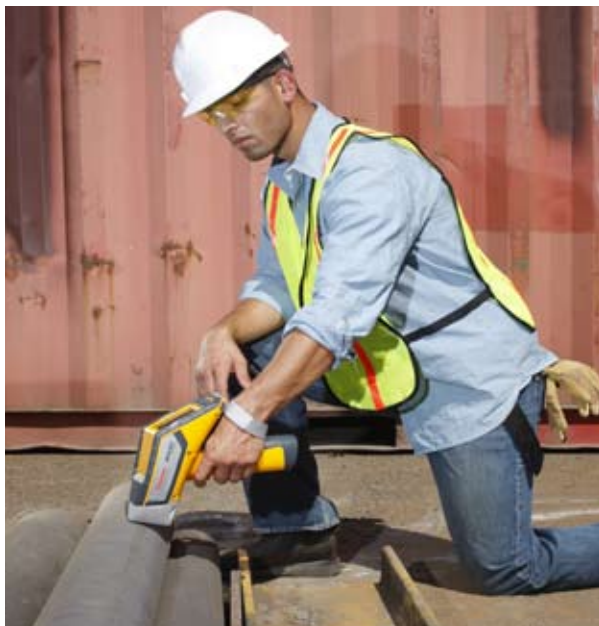
Ergonomically designed and featuring daylight-readable icons, the Niton® XL2 incorporates customizable menus, multi-language options, and a standard analytical range of more than 25 elements from sulfur to uranium.

The Instrument of Choice

The Niton XL2 is the instrument of choice when you require accuracy, precision, and ease of use. It is the ideal instrument to:

- Analyze metal alloys for scrap recycling or final product QC
- Carry out grade control, plant operations, and near-mine exploration
- Screen electronics and consumer goods for lead

For example, the Niton XL2 is the definitive tool for scrap metal recycling. It provides immediate nondestructive chemical analysis of alloy materials from titanium to nickel, as well as achieving superior performance for tramp and trace element analysis. With its unparalleled accuracy, you can be confident that the Niton XL2 won't misidentify value, grade, or residuals.



With point-and-shoot simplicity, you can view the alloy grade and chemistry on the built-in, color, touch-screen display.

The Niton XL2 stands far above the competition, with its many standard features and available options. Taking advantage of the standard Thermo Scientific Niton Data Transfer (NDT©) PC software suite to customize the instrument, you can set operator permissions, generate custom reports, print certificates of analysis personalized with your own company logo, or remotely monitor, and operate the instrument hands-free from your PC. Integrated USB and Bluetooth™ communications provide direct data transfer to your PC or networked storage device, eliminating the cumbersome data synchronization procedures required by PDA-based XRF analyzers.

Niton XL2 Analyzers

Whether you need an analyzer for metal alloy analysis, mining operations, or electronics and consumer goods screening, the value-choice Niton XL2 provides cost-effective high-speed performance, point-and-shoot simplicity, and the cutting-edge technology that you have come to expect from industry-leading Thermo Scientific Niton XRF analyzers.

Thermo Scientific Niton XL2 analyzers represent just one of our handheld analyzer solutions, which include XRF tools for metal alloy identification, lead-based paint testing, RCRA metals in soil, toy and consumer goods screening, RoHS and WEEE compliance screening, and many other analysis needs.

©2010 Thermo Fisher Scientific Inc. All rights reserved. Bluetooth is a trademark of Bluetooth SIG, Inc. All other trademarks are the property of Thermo Fisher Scientific Inc. and its subsidiaries. Specifications, terms and pricing are subject to change. Not all products are available in all countries. Please consult your local sales representative for details.

Thermo Scientific Niton XL2 Specifications

Weight	3 lbs 5.8 oz (1.53 kg)
Dimensions	10.25 x 11 x 4 in. (256 x 275 x 100 mm)
Tube	Ag anode 45 kV maximum, 80 uA maximum
Detector	High-performance semiconductor
System Electronics	400 MHz ARM 11 CPU 300 MHz dedicated DSP 80 MHz ASICS DSP for signal processing 4096 channel MCA 64 MB internal system memory/ 128 MB internal user storage
Display	Fixed angle, color, touch-screen display
Standard Analytical Range	>25 elements from S to U (varies by application)
Data Storage	Internal >10,000 readings with spectra
Data Transfer	USB, Bluetooth™, and RS-232 serial communication
Security	Password-protected user security
Mode (Varies by application)	Alloy Modes: Metal Alloy, Electronics Alloy, Precious Metals Bulk Modes: Mining, Soil Plastic Modes: RoHS Plastics, Toy & Consumer Goods Plastics, TestAll™, Painted Products Custom Modes: Upon request (based on application feasibility)
Data Entry	Touch-screen keyboard User-programmable pick lists Optional wireless remote barcode reader
Standard Accessories	Locking shielded carrying case Shielded belt holster Two 6-cell lithium-ion battery packs 110/220 VAC battery charger/ AC adaptor PC connection cables (USB and RS-232) Niton Data Transfer (NDT) PC software Safety lanyard Check samples/standards
Optional Features and Accessories	Thermo Scientific portable test stand, stationary (bench-top) stand, mobile test stand Welding mask Soil testing guard
Licensing/Registration	Varies by region. Contact your local distributor.
Compliance	CE, RoHS

XRF Analyzers

Americas

Billerica, MA USA
+1 978 670 7460
niton@thermofisher.com

Europe, Middle East, Africa and South Asia

Munich, Germany
+49 89 3681 380
niton.eur@thermofisher.com

Asia Pacific

Central, Hong Kong
+852 2869 6669
niton.asia@thermofisher.com

www.thermoscientific.com/niton
T-204 04/2010



APÉNDICE C

NORMA ASTM A297



Standard Specification for Steel Castings, Iron-Chromium and Iron-Chromium-Nickel, Heat Resistant, for General Application¹

This standard is issued under the fixed designation A 297/A 297M; 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 specification covers iron-chromium and iron-chromium-nickel alloy castings for heat-resistant service. The grades covered by this specification are general purpose alloys and no attempt has been made to include heat-resisting alloys used for special production application.

NOTE 1—For heat-resisting alloys used for special product application, reference should be made to Specification A 351/A 351M, A 217/A 217M, and A 447/A 447M.

1.2 The values stated in either inch-pound units or SI units are to be regarded separately as standard. Within the text, the SI units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the specification.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

A 217/A 217M Specification for Steel Castings, Martensitic Stainless and Alloy, for Pressure-Containing Parts, Suitable for High-Temperature Service²

A 351/A 351M Specification for Castings, Austenitic, Austenitic-Ferritic (Duplex), for Pressure-Containing Parts²

A 370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products³

A 447/A 447M Specification for Steel Castings, Chromium-Nickel-Iron Alloy (25-12 Class), for High-Temperature Service²

A 781/A 781M Specification for Castings, Steel and Alloy, Common Requirements, for General Industrial Use²

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee A01 on Steel, Stainless Steel, and Related Alloys and is the direct responsibility of Subcommittee A01.18 on Castings.

Current edition approved April 10, 2003. Published April 2003. Originally approved in 1946. Last previous edition approved in 1998 as A 297/A 297M – 97 (1998).

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.02.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.03.

3. General Conditions for Delivery

3.1 Material furnished to this specification shall conform to the requirements of Specification A 781/A 781M, including any supplementary requirements that are indicated in the purchase order. Failure to comply with the general requirements of Specification A 781/A 781M constitutes nonconformance with this specification. In case of conflict between the requirements of this specification and Specification A 781/A 781M, this specification shall prevail.

4. Ordering Information

4.1 The inquiry and order should include or indicate the following:

4.1.1 A description of the casting by pattern number or drawing (dimensional tolerances shall be included on the casting drawing),

4.1.2 Grade of steel,

4.1.3 Options in the specification, and

4.1.4 The supplementary requirements desired including the standards of acceptance.

5. Process

5.1 Alloys shall be made by the following processes: electric-arc, electric-induction, or other approved processes.

6. Heat Treatment

6.1 Castings for heat-resistant service may be shipped in the as-cast condition without heat treatment. If heat treatment is required, the treatment shall be established by mutual agreement between the manufacturer and the purchaser and shall be so specified in the inquiry, contract, or order.

7. Chemical Composition

7.1 Alloys shall conform to the requirements as to chemical composition prescribed in Table 1.

8. Repair by Welding

8.1 The composition of the deposited weld metal shall be similar to the composition of the casting. All weld repairs shall be subjected to the same inspection standards as the casting.

TABLE 1 Chemical Requirements

Grade	Type	Composition, %							
		Carbon	Manganese, max	Silicon, max	Phosphorus, max	Sulfur, max	Chromium	Nickel	Molybdenum, max ^A
HF	19 Chromium, 9 Nickel	0.20–0.40	2.00	2.00	0.04	0.04	18.0–23.0	8.0–12.0	0.50
HH	25 Chromium, 12 Nickel	0.20–0.50	2.00	2.00	0.04	0.04	24.0–28.0	11.0–14.0	0.50
HI	28 Chromium, 15 Nickel	0.20–0.50	2.00	2.00	0.04	0.04	26.0–30.0	14.0–18.0	0.50
HK	25 Chromium, 20 Nickel	0.20–0.60	2.00	2.00	0.04	0.04	24.0–28.0	18.0–22.0	0.50
HE	29 Chromium, 9 Nickel	0.20–0.50	2.00	2.00	0.04	0.04	26.0–30.0	8.0–11.0	0.50
HT	15 Chromium, 35 Nickel	0.35–0.75	2.00	2.50	0.04	0.04	15.0–19.0	33.0–37.0	0.50
HU	19 Chromium, 39 Nickel	0.35–0.75	2.00	2.50	0.04	0.04	17.0–21.0	37.0–41.0	0.50
HW	12 Chromium, 60 Nickel	0.35–0.75	2.00	2.50	0.04	0.04	10.0–14.0	58.0–62.0	0.50
HX	17 Chromium, 66 Nickel	0.35–0.75	2.00	2.50	0.04	0.04	15.0–19.0	64.0–68.0	0.50
HC	28 Chromium	0.50 max	1.00	2.00	0.04	0.04	26.0–30.0	4.00 max	0.50
HD	28 Chromium, 5 Nickel	0.50 max	1.50	2.00	0.04	0.04	26.0–30.0	4.0–7.0	0.50
HL	29 Chromium, 20 Nickel	0.20–0.60	2.00	2.00	0.04	0.04	28.0–32.0	18.0–22.0	0.50
HN	20 Chromium, 25 Nickel	0.20–0.50	2.00	2.00	0.04	0.04	19.0–23.0	23.0–27.0	0.50
HP	26 Chromium, 35 Nickel	0.35–0.75	2.00	2.50	0.04	0.04	24–28	33–37	0.50

^A Castings having a specified molybdenum range agreed upon by the manufacturer and the purchaser may also be furnished under these specifications.

8.2 Castings with major weld repairs shall be heat treated in accordance with Section 6.

8.3 Weld repairs shall be considered major when the depth of the cavity after preparation for repair exceeds 20 % of the actual wall thickness, or 1 in. [25 mm], whichever is smaller, or when the extent of the cavity exceeds approximately 10 in.² [65 cm²].

8.3.1 When Supplementary Requirement S7 is specified on the purchase order, or inquiry, major weld repairs shall be subject to the prior approval of the purchaser.

8.4 All other weld repairs shall be considered minor and may be made at the discretion of the manufacturer without prior approval of the purchaser.

SUPPLEMENTARY REQUIREMENTS

The following supplementary requirements shall not apply unless specified in the purchase order. A list of standardized supplementary requirements for use at the option of the purchaser is included in Specification A 781/A 781M. Those which are ordinarily considered suitable for use with this specification are given below. Others enumerated in A 781/A 781M may be used with this specification upon agreement between the manufacturer and purchaser.

- S1. Magnetic Particle Examination
- S2. Radiographic Examination
- S3. Liquid Penetrant Examination
- S4. Ultrasonic Examination
- S5. Examination of Weld Preparation
- S6. Certification
- S7. Prior Approval of Major Weld Repairs
- S8. Marking
- S9. Tension Test

S9.1 One tension test shall be made from material representing each heat. The bar from which the test specimen is taken shall be heat treated in production furnaces to the same procedure as the castings it represents. The results shall conform to the requirements specified in Table S9.1.

S9.2 Test bars shall be poured in separately cast keel blocks similar to Fig. 3 of Test Methods and Definitions A 370 of Fig.1 of Specification A 447/A 447M.

S9.3 Tension test specimens may be cut from heat-treated castings; or from as-cast castings if no heat treatment is specified for the castings, instead of from test bars when agreed upon between the manufacturer and the purchaser.

S9.4 Test specimens shall be machined to the form and dimensions of the standard round 2-in. [50-mm] gage length

TABLE S9.1 Tensile Requirements

Grade	Type	Tensile Strength, min		Yield Point, min		Elongation in 2 in. [50 mm], min, % ^A
		ksi	[MPa]	ksi	[MPa]	
HF	19 Chromium, 9 Nickel	70	485	35	240	25
HH	25 Chromium, 12 Nickel	75	515	35	240	10
HI	28 Chromium, 15 Nickel	70	485	35	240	10
HK	25 Chromium, 20 Nickel	65	450	35	240	10
HE	29 Chromium, 9 Nickel	85	585	40	275	9
HT	15 Chromium, 35 Nickel	65	450	...	...	4
HU	19 Chromium, 39 Nickel	65	450	...	...	4
HW	12 Chromium, 60 Nickel	60	415	...	...	...
HX	17 Chromium, 66 Nickel	60	415	...	...	...
HC	28 Chromium	55	380	...	...	...
HD	28 Chromium, 5 Nickel	75	515	35	240	8
HL	29 Chromium, 20 Nickel	65	450	35	240	10
HN	20 Chromium, 25 Nickel	63	435	...	...	8
HP	26 Chromium, 35 Nickel	62.5	430	34	235	4.5

^A When ICI test bars are used in tensile testing as provided for in this specification, the gage length to reduced section diameter ratio shall be 4 to 1.

specimen shown in Fig. 6 of Test Methods and Definitions A 370 and shall be tested in accordance with Test Methods and Definitions A 370.

S9.5 If the results of the mechanical tests for any heat do not conform to the requirements specified, the castings may be

re-heat treated and re-tested, but may not be solution treated or substituted from the same heat. re-austenitized more than twice.

S9.6 If any test specimen shows defective machining or develops flaws, it may be discarded and another specimen

ASTM International 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 International 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, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

APÉNDICE D

ESPECIFICACIONES DE LOS ACEROS ASTM A297 HH, HI Y HK

Heat Resistant Type HH (UNS J93503)

Description

Type HH is an iron-chromium-nickel alloy containing the minimum quantities of chromium and nickel in proportions to supply a useful combination of properties for elevated temperature service. The chromium range is high enough to ensure good scaling resistance up to 2000°F (1093°C) (and sometimes higher) in air or normal combustion gases. Sufficient nickel is present, aided by carbon, nitrogen and manganese, to maintain austenite as the major phase; but the alloy is borderline in character and its microstructure is very sensitive to composition balance. For high ductility near 1800°F (982°C) a structure exhibiting both austenite and ferrite is appropriate. Such an alloy is relatively weak, however, and if high strength is needed, and lower ductility can be tolerated, a composition balanced to be wholly austenitic is desirable. Fortunately, two distinct grades of material can be obtained within the stated chemical composition range of the type HH alloy. These grades are defined as Type I and Type II in ASTM Specification A447. The various useful properties obtainable in the type HH alloy make it suitable for a wide range of high temperature applications and, for this reason, it is used in greater quantity than any other heat resistant grade.

The alloy is basically austenitic and holds considerable carbon in solid solution, but carbides, ferrite (soft, ductile and magnetic) and sigma (hard, brittle and non-magnetic) also may be present in the micro-structure. The amounts of the various structural constituents present depend on the chemical composition and the thermal history of the sample under consideration. Near 1600°F (871°C) the partially ferritic alloys tend to embrittle from development of the sigma phase, while around 1400°F

Chemical composition - %									
	C	Mn	Si	P	S	Mo	Cr	Ni	Fe
min.	0.20						24	11	
max.	0.50	2.00	2.00	0.04	0.04	0.5 ¹	28	14	bal
¹ Mo not intentionally added.									
Physical properties									
Modulus of elasticity, psi x 10 ⁶									27.0
Density, lb/in ³									0.279
Sp. Heat, Btu/lb.°F, at 70 °F									0.12
Electrical resistivity, μΩ.m, at 70 °F									0.75 - 0.85
Melting point, approximate °F									2500
Magnetic permeability									1.00 - 1.9
Thermal conductivity Btu/(ft.h. °F)					Mean coefficient of Linear thermal expansion μ in./(in. °F)				
At 212 °F	8.2	70 - 1000 °F	9.5	70 - 1800 °F	10.5				
At 600 °F	10.1	70 - 1200 °F	9.7	70 - 2000 °F	10.7				
At 1000 °F	12.0	70 - 1400 °F	9.9	1200 - 1600 °F	11.4				
At 1200 °F	13.0	70 - 1600 °F	10.2	1200 - 1800 °F	11.7				
At 1400 °F	14.1								
At 1600 °F	15.3								
At 1800 °F	16.3 ²								
At 2000 °F	17.5 ²								
² Estimated									
Type I - Partially ferritic									
Mechanical properties at room temperature									
	Representative values			Minimum tensile requirements					
	As cast	Aged 24h at 1400 °F Furnace cooled	ASTM A297						
Tensile strength, ksi	85.0	86.0	75.0						
Yield strength, 0.2% offset, ksi	50.0	55.0	35.0						
Elongation, in 2in., %	25	11	10						
Brinell hardness (HBW)	185	200	-						
At elevated temperatures									
Representative values - short time	Tensile ksi	Yield ksi	Elongation in 2 in. %						
1200 °F	-	-	-						
1400 °F	33.0	17.0	18						
1600 °F	18.5	13.5	30						
1800 °F	9.0	6.3	45						
Creep rupture properties									
Representative values ³ - long time	Limiting creep stress, ksi (rate 0.0001%/h)	Stress to rupture in hours							
		10	100	1,000					
1400 °F	3.0	-	14.0	6.5					
1600 °F	1.7	-	6.4	3.8					
1800 °F	1.1	4.7	3.1	2.1					
2000 °F	0.3	-	1.5	-					
For constant temperature, for cyclic temperature lower values would apply									

(760°C) carbide precipitation may cause a comparable loss of ductility. Such possible embrittlement suggests that 1700 to 2000°C (927 to 1093°C) is the best service temperature range, but this is not critical for steady temperature conditions in the absence of unusual thermal or mechanical stresses.

A serious cause of embrittlement is absorption of carbon from the service environment. Accordingly, the HH type alloy is seldom used for carburizing applications. High silicon content (over 1.5 percent) will fortify the alloy against carburization under mild conditions but will promote ferrite formation and possible sigma embrittlement. Thus, although the HH type alloy can give satisfactory service in carburizing atmospheres, types HT, HU, HW and HX are considered superior and are generally preferred for such application, particularly where thermal shock is involved.

The partially ferritic (Type I) HH alloy is frequently considered best adapted to operating conditions which are subject to changes in temperature level and applied stress. A plastic extension in the weaker, ductile ferrite under changing load tends to occur more readily than in the stronger austenitic phase, thereby reducing unit stresses and stress concentrations and permitting rapid adjustment to suddenly applied overloads without cracking. Where load and temperature conditions are comparatively constant, the wholly austenitic (Type II) HH alloy provides the highest creep strength and permits use of maximum design stress. The stable austenitic alloy is also favored for cyclic temperature service that might induce sigma phase formation in the partially ferritic type.

Castings of type HH alloy have good weldability and fair machining characteristics. At room temperature, thermal expansion is about 40 percent greater than carbon steel or iron-chromium alloy types HC or HD and almost 10 percent more than the nickel-predominant types such as HT or HW. Also, at room temperature, electrical resistance is about five times that of carbon steel.

The alloy varies from non-magnetic to weakly magnetic. The magnetic permeability increases with the amount of the ferrite phase present, but decreases if the ferrite is converted to sigma phase. Thus, this property can be used to indicate constitution and, under the proper conditions, to estimate high temperature strength.

Heat Treatment

Castings of type HH alloy are normally supplied in the as-cast condition. The alloy cannot be hardened by

Type II - Wholly austenitic						
Mechanical properties at room temperature						
	Representative values		Minimum tensile requirements			
	As cast	Aged 24h at 1400 °F Furnace A297 cooled	ASTM			
Tensile strength, ksi	80.0	92.0	75.0	80.0		
Yield strength, 0.2% offset, ksi	40.0	45.0	35.0	-		
Elongation, in 2in., %	15	8	10	4		
Brinell hardness (HBW)	180	200	-	-		
Impact, Charpy keyhole (see Fig. 1)						
At elevated temperatures						
Representative values - short time	Tensile ksi	Yield ksi	Elongation in 2 in. %			
1200 °F	60.5	32.2	14			
1400 °F	37.4	19.8	16			
1600 °F	21.5	16.0	18			
1800 °F	10.9	7.3	31			
2000 °F	5.5	-	-			
Creep rupture properties						
Representative values ³ - long time						
	Limiting stress, ksi, creep rate 0.0001%/h	1% creep in, ksi		Stress to rupture in stress, ksi		
		100,000	100	1,000	hours 10,000	100,000
1200 °F	18.0	9.5	35.0	22.00	14.00	9.00 ⁴
1400 °F	6.3	2.0	14.0	8.00	4.80	2.80 ⁴
1600 °F	3.9	1.1	6.8	3.80	2.15	1.20 ⁴
1800 °F	2.1	-	3.2	1.65	0.86 ⁴	0.44 ⁴
2000 °F	0.8	-	1.4	0.68	0.34 ⁴	0.15 ⁴

³ For constant temperature, for cyclic temperature lower values would apply

⁴ Extrapolated

heat treatment. For alloys of medium carbon content (about 0.30%) in applications involving thermal fatigue from rapid heating and cooling, improved performance sometimes may be obtained by heating castings at 1900°F (1038°C) for 12 hours followed by furnace cooling prior to placing in service.

Applications

The following lists of consuming industries, cast parts, and corrosive environments are useful as examples of typical applications where type HH alloy has been employed successfully; they are not comprehensive, nor are they intended as guides to alloy selection for specific end uses.

Industries Cement, Chemical, Furnace, Construction, Glass, Heat Treating, Oil Refining, Ore Refining, Steel.

Castings Annealing trays, billet skids, burner nozzles, carburizing boxes, convection tube supports, dampers exhaust manifolds, flue gas stacks, grate supports, hardening trays, kiln nose ring segments, muffles, normalizing discs, pier caps, quenching trays, rabble arms and blades, radiant tubes and supports, refractory supports, retorts, roller hearths and rails, stoker parts, tube hangers.

Environment Air, ammonia, carburizing gas, combustion gases, flue gases oxidizing and reducing, high sulfur gases, molten cyanide, steam, tar.

NOTE: Proper selection of an alloy for a specific high temperature service involves consideration of some or all of the following factors: 1) required life of the part, 2) range frequency and speed of temperature cycling, 3) atmosphere and contaminants therein, 4) complexity of casting design, and 5) further fabrication of the casting. The criteria that should be used as the bases of alloy comparison will depend on the factors enumerated, and the designer will be aided in his choice by providing the foundry with as much pertinent information as possible on intended operating conditions before reaching a definite decision to use this alloy.

The mechanical property and physical property data presented here in tabular and graphical form are representative for alloy HH. These data are neither average nor minimum values and should not be used for either specification or design purposes. Information on specification and/or design can be obtained from an appropriate technical association such as: ASTM, ASME, API, SAE and NACE.

Design Considerations

Section thicknesses from 3/16 inch up can be cast satisfactorily in HH alloy. Somewhat lighter sections are also feasible depending on casting design and pattern equipment. Good castability of this alloy permits designs involving intricate shapes. Drastic changes in section should be avoided, however, and uniform thickness should be maintained as far as possible. This applies to the casting *as cast*; i.e., including finish allowance of 1/8 inch or more on surfaces to be machined. Normally used patternmakers' shrinkage allow for this alloy is 5/16 inch per foot.

Fabricating Considerations

Dimensional tolerances for rough castings are influenced by the quality of pattern equipment provided. In general, overall dimensions and locations of cored holes can be held to 1/16 inch per foot.

Welding Type HH castings can be welded by metal-arc, inert-gas arc, and oxyacetylene gas methods. Metal-arc welding is generally preferred for high temperature applications of this alloy. Neither preweld nor postweld heat treating is required.

Welding procedures utilizing SMAW, GMAW and GTAW techniques are described in this section.

Machining Most machining operations can be performed satisfactorily on castings of HH alloy. It is important in all cases that the tool be kept continually entering into the metal to avoid work-hardening the surface. Slow feeds, deep cuts and powerful rigid machines are necessary for best results. Work should be firmly mounted and supported, and tool mountings should provide maximum stiffness. Both high speed steel and carbide tools may be used successfully.

Good lubrication and cooling are essential. The low thermal conductivity of the alloy makes it most important to have the cutting fluid flood both the tool and the work. Sulfo-chlorinated petroleum oil containing active sulfur and about 8 to 10 percent fatty oil is suggested for use with high speed steel tools. Water-soluble cutting fluids are primarily coolants and are most useful for high speed operation with carbide tools.

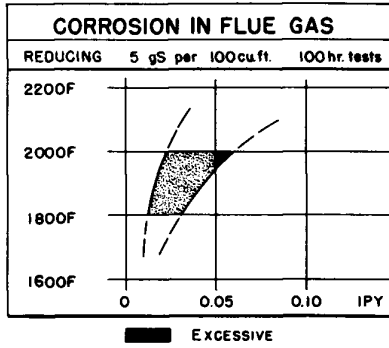
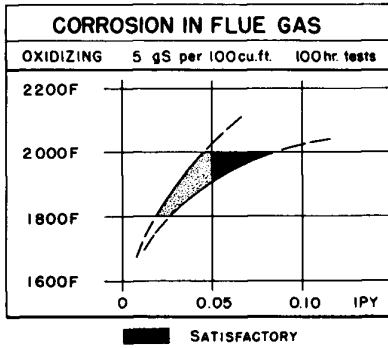
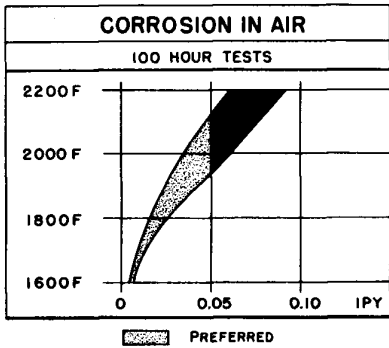
Information on the procedures for specific machining operations is contained in SFSA Steel Casings Handbook, 6th Edition, Chapter 26.

Casting designations, specifications, and corresponding wrought alloy

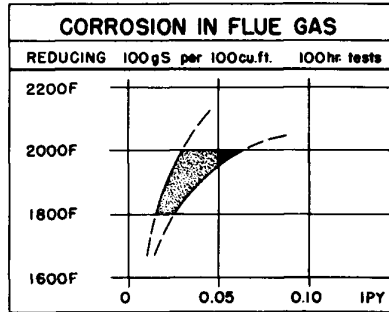
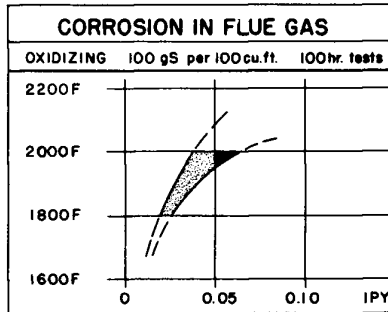
The American Iron and Steel Institute wrought alloy designation is listed only for the convenience of those who want to determine corresponding wrought and cast grades. Because the cast chemical composition ranges *are not the same* as the wrought composition ranges, buyers should use cast alloy designations for proper identification of castings.

Cast ASTM: A297(HH), A447, A608(HH33), SAE 70309

Wrought AISI 309



RESISTANCE TO CORROSION BY		MOLTEN METALS		
SALTS		LEAD	GOOD	TYPE METAL
Tempering	FAIR			
Neutral	FAIR	TIN		SOFT SOLDER
		ZINC		BABBITT
Cyaniding	FAIR		Not	ANTIMONY
High Speed	FAIR	ALUMINUM	Resistant	
		Magnesium	Resistant	CADMIUM



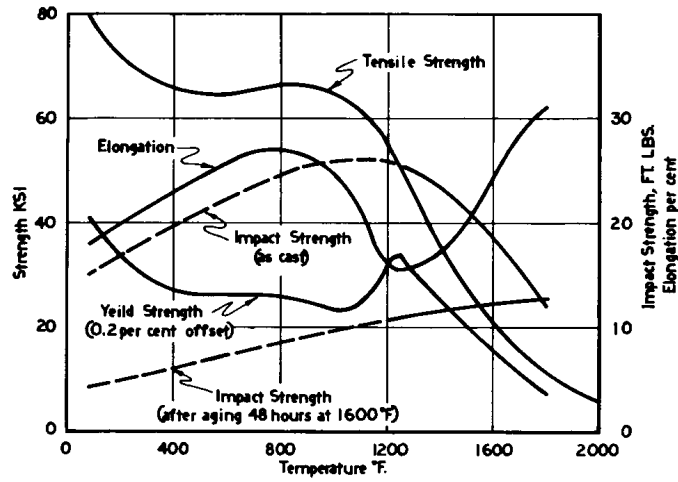


Fig 1 Effect of temperature on short time tension test and Charpy impact properties of wholly austenitic Type HH alloy.

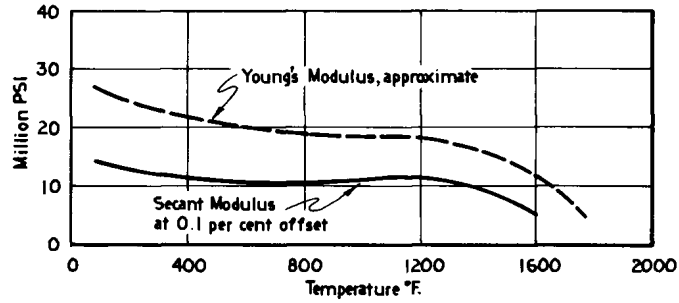


Fig 2 Effect of temperature of tension test on approximate modulus of elasticity of Type HH alloy

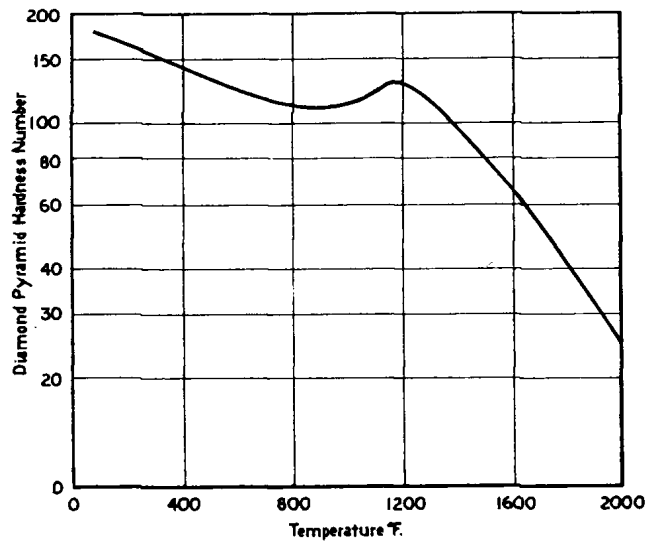


Fig 3 Effect of temperature on hardness of wholly austenitic Type HH alloy.

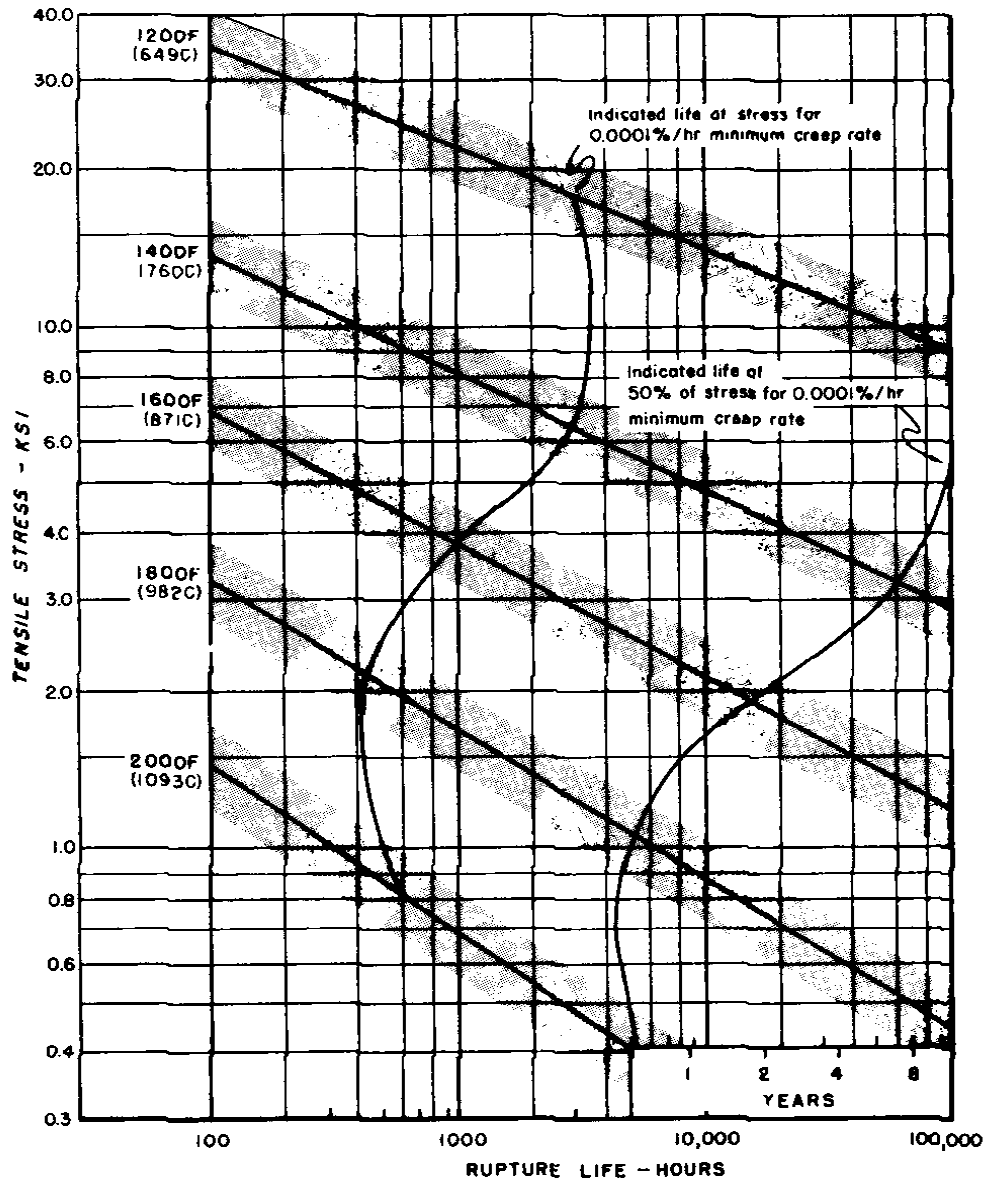


Fig. 4. Creep-rupture properties of Type HH (wholly austenitic) alloy. The scatter bands shown are set arbitrarily at $\pm 20\%$ of the stress for the central tendency line. Such a range usually embraces test data for similar alloy compositions, but should not be considered statistically significant confidence limits. Scatter of values may be much wider, particularly at the longer times and higher temperatures.

Heat Resistant Type HI (UNS J94003)

Description

Type HI is an iron-chromium-nickel alloy similar to type HH, but containing more nickel and chromium. The increased chromium content makes this grade more resistant to oxidation than the HH type and the additional nickel serves to maintain good strength of high temperature. Exhibiting adequate strength, ductility and corrosion resistance, this alloy has been used extensively for retorts operating with an internal vacuum at continuous temperature of 2150°F.

The alloy has a predominantly austenitic structure containing carbides and, depending on the exact composition balance, may or may not contain small amounts of ferrite. Aging at 1400 to 1600°F (760 to 871°C) is accompanied by precipitation of finely dispersed carbides which tend at room temperature to increase mechanical strength and to decrease ductility. Following service at temperatures to increase the room temperature mechanical strength and to decrease the ductility above 2000°F (1093°C), however, such carbides remain in solution and room temperature ductility is not impaired.

Castings of type HI alloy have good weldability and fair machining characteristics. At room temperature, thermal expansion is about 50 percent greater than carbon steel or iron-chromium alloy types HC and HD, and heat conductivity is about 40 percent less. The alloy is virtually non-magnetic.

Heat Treatment

Castings of type HI alloy are normally supplied in the as-cast condition.

Applications

The following lists of consuming industries, cast parts, and corrosive environments are useful as examples of typical applications where type HI alloy has been employed

Chemical composition - %									
	C	Mn	Si	P	S	Mo	Cr	Ni	Fe
min.	0.20						26	14	
max.	0.50	2.00	2.00	0.04	0.04	0.5 ¹	30	18	bal

¹ Mo not intentionally added.

Physical properties

Modulus of elasticity, psi x 10 ⁶	27.0
Density, lb/in ³	0.279
Sp. Heat, Btu/lb.°F, at 70 °F	0.12
Electrical resistivity, μΩ.m, at 70 °F	0.85
Melting point, approximate °F	2550
Magnetic permeability	1.00 - 1.7

Thermal conductivity Btu/(ft.h. °F)	Mean coefficient of Linear thermal expansion μ in./(in. °F)
--	---

At 212 °F	8.2	70 - 1000 °F	9.9
At 600 °F	10.1	70 - 1200 °F	10.0
At 1000 °F	12.0	70 - 1400 °F	10.1
At 1200 °F	13.0	70 - 1600 °F	10.3
At 1400 °F	14.1	70 - 1800 °F	10.5
At 1600 °F	15.3	70 - 2000 °F	10.8
At 1800 °F	16.3	1200 - 1600 °F	11.0
At 2000 °F	17.5	1200 - 1800 °F	12.0

Mechanical properties at room temperature

	Representative values		Minimum tensile requirements ASTM A297
	As cast	Aged 24h at 1400 °F Furnace cooled	
Tensile strength, ksi	80.0	90.0	70.0
Yield strength, 0.2% offset, ksi	45.0	65.0	35.0
Elongation, in 2in., %	12	6	10
Brinell hardness (HBW)	180	200	-

At elevated temperatures

Representative values - short time	Tensile ksi	Yield ksi	Elongation in 2 in. %
1200 °F	38.0	-	6
1400 °F	26.0	-	12

Creep rupture properties

Representative values ³ - long time	Limiting creep stress, ksi (rate 0.0001%/h)	Stress to rupture in hours	
		100	1,000
1400 °F	6.60	13.0	8.50
1600 °F	3.60	7.5	4.80
1800 °F	1.90	4.1	2.60
2000 °F	0.80	1.9	1.25
2150 °F			

² For constant temperature, for cyclic temperature lower values would apply

successfully; they are not comprehensive, nor are they intended as guides to alloy selection for specific end uses.

Industries Heat Treating, Magnesium Reducing, Steel.

Castings Billet skids, brazing fixtures, conveyor rollers, furnace rails, hearth plates, lead pots, pier caps, retorts, tube spacers.

Environment Air, flue gases oxidizing and reducing, molten lead.

NOTE: Proper selection of an alloy for a specific high temperature service involves consideration of some or all of the following factors: 1) required life of the part, 2) range frequency and speed of temperature cycling, 3) atmosphere and contaminants therein, 4) complexity of casting design, and 5) further fabrication of the casting. The criteria that should be used as the bases of alloy comparison will depend on the factors enumerated, and the designer will be aided in his choice by providing the foundry with as much pertinent information as possible on intended operating conditions before reaching a definite decision to use this alloy.

The mechanical property and physical property data presented here in tabular and graphical form are representative for alloy HI. These data are neither average nor minimum values and should not be used for either specification or design purposes. Information on specification and/or design can be obtained from an appropriate technical association such as: ASTM, ASME, API, SAE and NACE.

Design Considerations

Section thicknesses from 3/16 inch up can be cast satisfactorily in HI alloy. Somewhat lighter sections are also feasible depending on casting design and pattern equipment. Good castability of this alloy permits designs involving intricate shapes. Drastic changes in section should be avoided, however, and uniform thickness should be maintained as far as possible. This applies to the casting *as cast*; i.e., including finish allowance of 1/8 inch or more on surfaces to be machined. Normally used patternmakers' shrinkage allow for this alloy is 5/16 inch per foot.

Fabricating Considerations

Dimensional tolerances for rough castings are influenced by the quality of pattern equipment provided. In general, overall dimensions and locations of cored holes can be held to 1/16 inch per foot.

Welding The welding procedures outlined for Alloy HH are applicable for Alloy HI. Welding procedures utilizing SMAW, GMAW and GTAW techniques are described in this section.

Machining Most machining operations can be performed satisfactorily on castings of HI alloy. It is important in all cases that the tool be kept continually entering into the metal to avoid work-hardening the surface. Slow feeds, deep cuts and powerful rigid machines are necessary for best results. Work should be firmly mounted and supported, and tool mountings should provide maximum stiffness. Both high speed steel and carbide tools may be used successfully.

Good lubrication and cooling are essential. The low thermal conductivity of the alloy makes it most important to have the cutting fluid flood both the tool and the work. Sulfo-chlorinated petroleum oil containing active sulfur and about 8 to 10 percent fatty oil is suggested for use with high speed steel tools. Water-soluble cutting fluids are primarily coolants and are most useful for high speed operation with carbide tools.

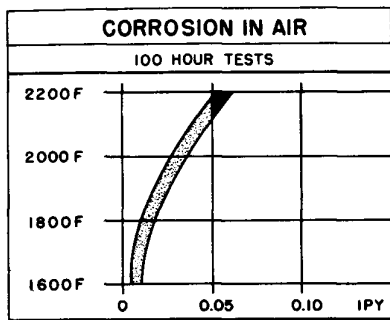
Information on the procedures for specific machining operations is contained in SFSA Steel Casings Handbook, 6th Edition, Chapter 26.

Casting designations, specifications, and corresponding wrought alloy

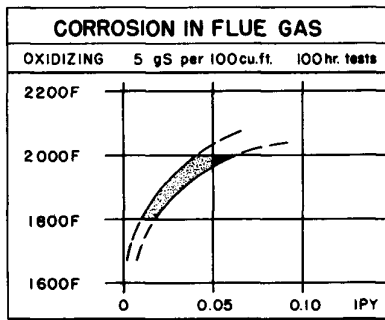
The American Iron and Steel Institute wrought alloy designation is listed only for the convenience of those who want to determine corresponding wrought and cast grades. Because the cast chemical composition ranges *are not the same* as the wrought composition ranges, buyers should use cast alloy designations for proper identification of castings.

Cast ASTM: A297(HI), A608(HI35)

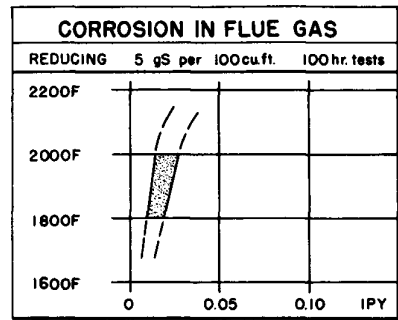
Wrought None



PREFERRED

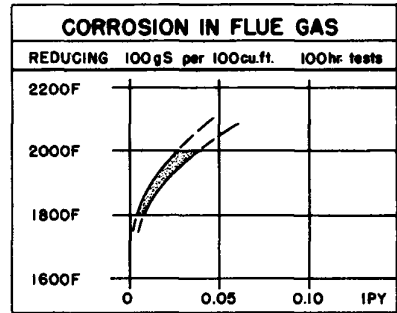
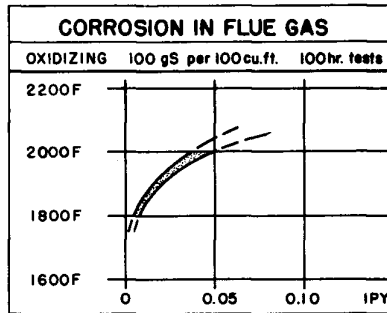


SATISFACTORY



EXCESSIVE

RESISTANCE TO CORROSION BY		MOLTEN METALS			
SALTS		LEAD	GOOD	TYPE METAL	
Tempering	FAIR				
		TIN		SOFT SOLDER	
Neutral	POOR	ZINC	POOR	BABBITT	
Cyaniding	GOOD	ALUMINUM	Not Resistant	ANTIMONY	
High Speed	POOR	Magnesium	Not Resistant	CADMIUM	



Heat Resistant Type HK (UNS J94224)

Description

Type HK is an iron-chromium-nickel alloy somewhat similar to a wholly austenitic type HH in general characteristics and mechanical properties. Although not quite as resistant to oxidizing gases as types HC, HE, OR HI, the HK alloy has chromium content high enough to ensure good resistance to corrosion by hot gases, in both oxidizing or reducing conditions. The high nickel content helps to make the HK grade one of the strongest heat resistant casting alloys at temperatures above 1900°F (1038°C). Accordingly, HK type castings are widely used for stressed parts in structural applications up to 2100°F (1149°C).

As normally produced, the HK alloy type is stable austenitic over its entire temperature range of application. The as-cast microstructure consists of an austenite matrix containing massive carbides as scattered islands or networks. After aging at service temperature, the alloy exhibits a dispersion of fine, granular carbides within the austenite grains, with subsequent agglomeration if the temperature is high enough. These fine, dispersed carbides contribute to the creep strength of the alloy. A lamellar constituent tentatively identified as an austenite, carbonitride eutectoid resembling pearlite also is frequently observed in HK alloys but its exact nature is in doubt. Except when present in excessive amounts, however, it is not associated with loss of hot strength. Unbalanced compositions are possible within the stated chemical ranges of this grade, and in this event some ferrite may be present in the austenite matrix. Such ferrite will transform to the brittle sigma phase if the alloy is held for more than short times around 1500°F (816°C) with consequent weakening at this temperature and embrittlement

Chemical composition - %										
	C	Mn	Si	P	S	Mo	Cr	Ni	Fe	
min.	0.20						24	18		
max.	0.60	2.00	2.00	0.04	0.04	0.5 ¹	28	22	bal	
¹ Mo not intentionally added.										
Physical properties										
Modulus of elasticity, psi x 10 ⁶										
								Equiaxed grains	27.0	
								Columnar grains	20.0	
See Fig. 1 for variation with temperature										
Poisson's ratio (See Fig. 1 for variation with temperature)										
									0.30	
								Density, lb/in ³	0.280	
								Sp. Heat, Btu/lb.°F, at 70 °F	0.12	
								Electrical resistivity, μΩ.m, at 70 °F	0.90	
								Melting point, approximate °F	2550	
								Magnetic permeability	1.02	
Thermal conductivity					Mean coefficient of					
Btu/(ft.h. °F)					Linear thermal expansion					
					μ in./(in. °F)					
<hr/>										
At 212 °F	7.9	70 - 1000 °F	9.4	70 - 1800 °F	10.2					
At 600 °F	9.8	70 - 1200 °F	9.6	70 - 2000 °F	10.4					
At 1000 °F	11.8	70 - 1400 °F	9.8	1200 - 1800 °F	11.4					
At 1200 °F	12.9	70 - 1600 °F	10.0	1200 - 2000 °F	11.7					
At 1400 °F	14.2									
At 1600 °F	15.7 ²									
At 1800 °F	17.1 ²									
At 2000 °F	18.6 ²									
² Estimated										
Mechanical properties at room temperature										
	Representative values		Minimum tensile							
	As cast	Aged 24h at 1400 °F Furnace cooled	requirements							
			ASTM							
			A297							
Tensile strength, ksi	75.0	85.0	65.0							
Yield strength, 0.2% offset, ksi	50.0	50.0	35.0							
Elongation, in 2in., %	17	10	10							
Brinell hardness (HBW)	170	190	-							
Charpy keyhole, ft lbs	21.5									
At elevated temperatures										
Representative values - short time	Tensile ksi	Yield ksi	Elongation in 2 in. %							
1400 °F	37.5	24.4	12							
1600 °F	23.3	14.7	16							
1800 °F	12.4	8.7	42							
1900 °F	9.1	6.8	54							
2000 °F	5.6	5.0	55							
Creep rupture properties										
Representative values ³ - long time										
Limiting stress, ksi, creep	1% creep in, ksi	Stress to rupture in stress, ksi								
		hours								
		100	1,000	10,000	100,000					
	rate 0.0001%/h	100,000	1,000	10,000	100,000					
1400 °F	10.20	6.30 ⁴	15.55	12.00	8.80	6.20 ⁴				
1600 °F	6.00	2.50 ⁴	9.20	6.00	3.80	2.50 ⁴				
1800 °F	2.50	0.90 ⁴	4.75	2.80	1.70	1.00 ⁴				
1900 °F	1.40	0.39 ⁴	3.20	1.90	1.10 ⁴	0.66 ⁴				
2000 °F	0.65	0.23 ⁴	2.20	1.25	0.72 ⁴	0.42 ⁴				
³ For constant temperature, for cyclic temperature lower values would apply										
⁴ Extrapolated										

at room temperature. Formation of sigma phase in HK type alloy can occur directly from austenite in the range 1400 to 1600°F (760 to 871°C) particularly at the lower carbon level (0.20-0.30 percent), and for this reason a considerable scatter in properties at intermediate temperatures is observed for this grade. Silicon is helpful in conferring resistance of the alloy to carburization, but is normally held to 2.00 percent maximum because higher amounts promote sigma formation.

Minimum creep rate and average rupture life are influenced strongly by variations in the carbon content of the HK alloy. Under the same conditions of temperature and load, alloys with higher carbon content have reduced creep rates and longer lives than those with lower carbon contents. Room temperature properties after aging at elevated temperatures are affected also: the higher the carbon the lower the residual ductility. For these reasons, within the chemical composition required by ASTM Specification A297 for the general HK alloy type shown in the Summary of Properties, three grades with narrower carbon ranges are recognized. These are the HK-30, HK-40 and HK-50 grades, in which the number following the alloy type designation indicates the midpoint of a +0.05 percent carbon range. In addition to the carbon limitation, a nitrogen range of 0.05 to 0.15 percent is specified for grades HK-40 and HK-50 in ASTM Specification A567. Nitrogen and molybdenum are not specified for grades HK-30 and HK-40 in ASTM Specification A351 but the manganese and silicon limits are lowered to 1.50 and 1.75 maximum, respectively, the chromium range is lowered to 23 to 27 percent and the nickel range is narrowed to 19 to 22 percent for each grade. An extended discussion of the influence of chemical composition variations on the mechanical properties of the HK type alloys is given in ALLOY CASTING BULLETIN No. 17, October 1961. Of the three grades, the HK-40 alloy of Specification A351 has become the most widely used. It has found extensive application in the petroleum and petro-chemical industries for process equipment operating at high temperatures.

Castings of type HK alloy have good weldability and machining characteristics. Thermal expansion is about 40 percent greater than carbon steel or iron-chromium alloy types HC and HD, and heat conductivity is about 40 percent less. At room temperature, electrical resistance is about six times that of carbon steel, and the alloy is virtually non-magnetic.

Heat Treatment

Castings of type HK alloy are normally supplied in the as-cast condition. The alloy cannot be hardened by heat treatment.

Applications

The following lists of consuming industries, cast parts, and corrosive environments are useful as examples of typical applications where type HK alloy has been employed successfully; they are not comprehensive, nor are they intended as guides to alloy selection for specific end uses.

Industries Aircraft, Cement, Fertilizer, Heat Treating, Ore Refining, Petrochemical, Petroleum, Steel.

Castings Billet skids, brazing fixtures, calcining tubes, cement kiln nose segments, conveyor rolls, furnace door arches and lintels, heat treating trays and fixtures, pier caps, rabble arms and blades, radiant tubes, reformer tubes, retorts, rotating shafts, skid rails, sprockets, stack dampers.

Environment Air, ammonia, carburizing gases, combustion gases, flue gases oxidizing and reducing, hydrogen, molten neutral salts.

NOTE: Proper selection of an alloy for a specific high temperature service involves consideration of some or all of the following factors: 1) required life of the part, 2) range frequency and speed of temperature cycling, 3) atmosphere and contaminants therein, 4) complexity of casting design, and 5) further fabrication of the casting. The criteria that should be used as the bases of alloy comparison will depend on the factors enumerated, and the designer will be aided in his choice by providing the foundry with as much pertinent information as possible on intended operating conditions before reaching a definite decision to use this alloy.

The mechanical property and physical property data presented here in tabular and graphical form are representative for alloy HK. These data are neither average nor minimum values and should not be used for either specification or design purposes. Information on specification and/or design can be obtained from an appropriate technical association such as: ASTM, ASME, API, SAE and NACE.

Design Considerations

Section thicknesses from 3/16 inch up can be cast satisfactorily in HK alloy. Somewhat lighter sections are also feasible depending on casting design and pattern equipment. Good castability of this alloy permits designs involving intricate shapes. Drastic changes in section should be avoided, however, and uniform thickness should be maintained as far as possible. This applies to the casting *as cast*; i.e., including finish allowance of 1/8 inch or more on surfaces to be machined. Normally used patternmakers' shrinkage allow for this alloy is 5/16 inch per foot.

Fabricating Considerations

Dimensional tolerances for rough castings are influenced by the quality of pattern equipment provided. In general, overall dimensions and locations of cored holes can be held to 1/16 inch per foot.

Welding Type HK castings can be welded by metal-arc, inert-gas arc, and oxyacetylene gas methods. Metal-arc welding is generally preferred for high temperature applications of this alloy. Neither preweld nor postweld heat treating is required.

Welding procedures utilizing SMAW, GMAW and GTAW techniques are described in this section.

Machining Most machining operations can be performed satisfactorily on castings of HK alloy. It is important in all cases that the tool be kept continually entering into the metal to avoid work-hardening the surface. Slow feeds, deep cuts and powerful rigid machines are necessary for best results. Work should be firmly mounted and supported, and tool mountings should provide maximum stiffness. Both high speed steel and carbide tools may be used successfully.

Good lubrication and cooling are essential. The low thermal conductivity of the alloy makes it most important to have the cutting fluid flood both the tool and the work. Sulfo-chlorinated petroleum oil containing active sulfur and about 8 to 10 percent fatty oil is suggested for use with high speed steel tools. Water-soluble cutting fluids are primarily coolants and are most useful for high speed operation with carbide tools.

Information on the procedures for specific machining operations is contained in SFSA Steel Casings Handbook, 6th Edition, Chapter 26.

Casting designations, specifications, and corresponding wrought alloy

The American Iron and Steel Institute wrought alloy designation is listed only for the convenience of those who want to determine corresponding wrought and cast grades. Because the cast chemical composition ranges *are not the same* as the wrought composition ranges, buyers should use cast alloy designations for proper identification of castings.

Cast ASTM: A297(HK), A351(HK30, HK40), A567(HK40, HK50), A608(HK30, HK40), SAE 70310, AMS 5365

Wrought AISI 310

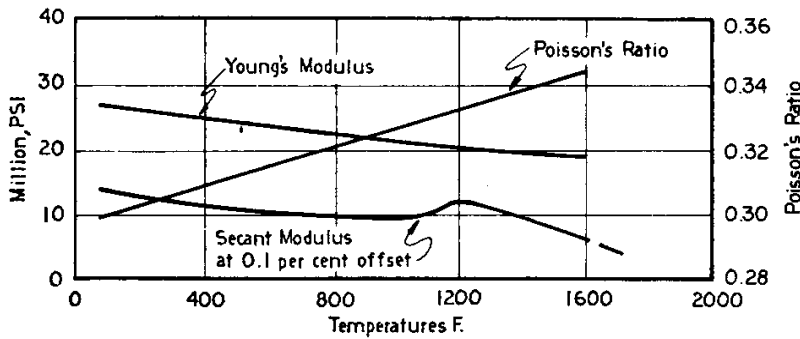
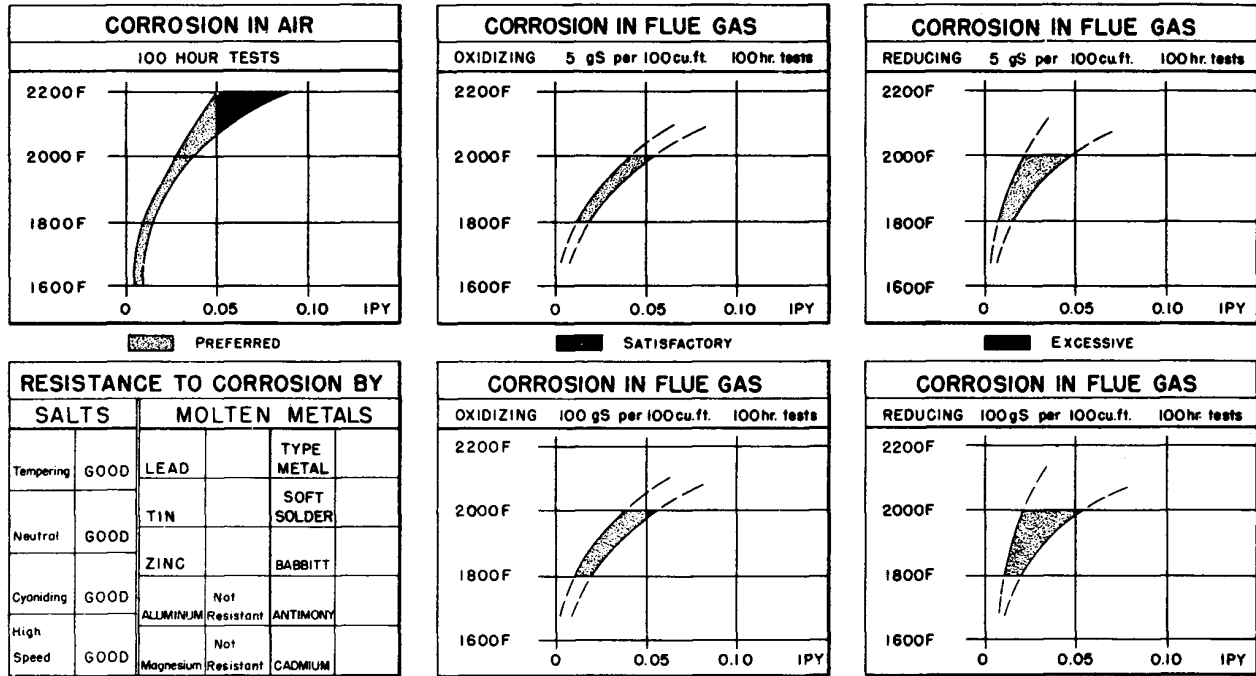


Fig. 1. Effect of temperature of tension test on elastic moduli and Poisson's Ratio of equiaxed grain Type HK 40 alloy.

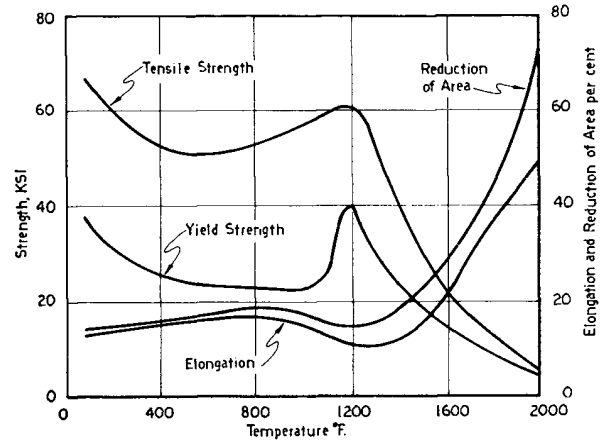


Fig. 2. Effect of temperature on short-time tension test properties of Type HK 40 alloy.

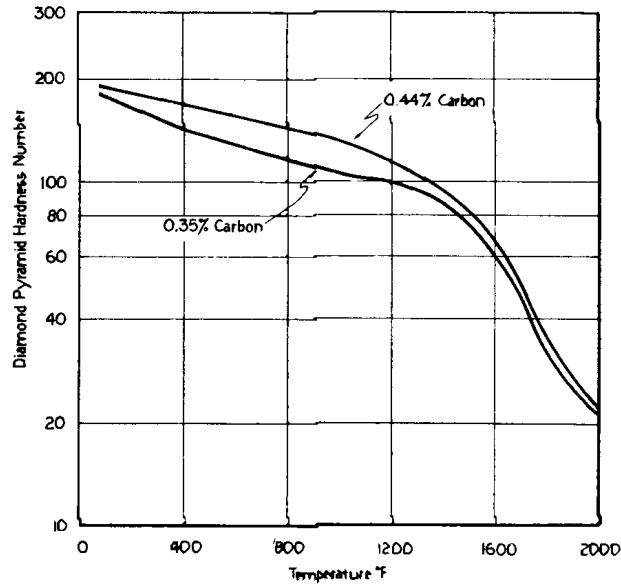


Fig. 3. Effect of temperature on hardness of Type HK 40 alloy.

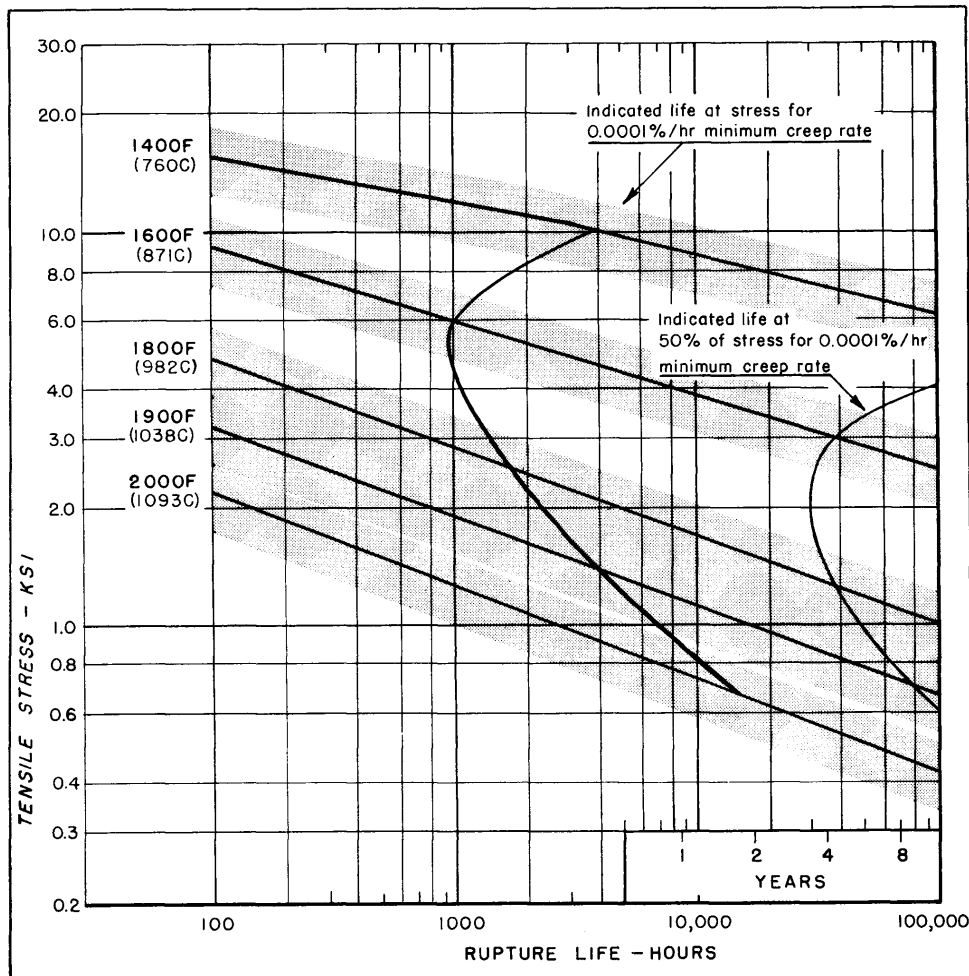


Fig. 4. Creep-rupture properties of Type HK-40 alloy. The scatter bands shown are set arbitrarily at $\pm 20\%$ of the stress for the central tendency line. Such a range usually embraces test data for similar alloy compositions, but should not be considered statistically significant confidence limits. Scatter of values may be much wider, particularly at the longer times and higher temperatures.

APÉNDICE E

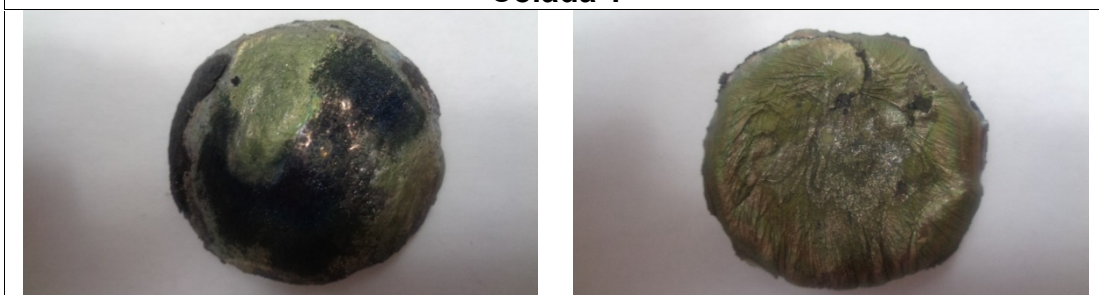
IMÁGENES VARIAS

APÉNDICE E.1

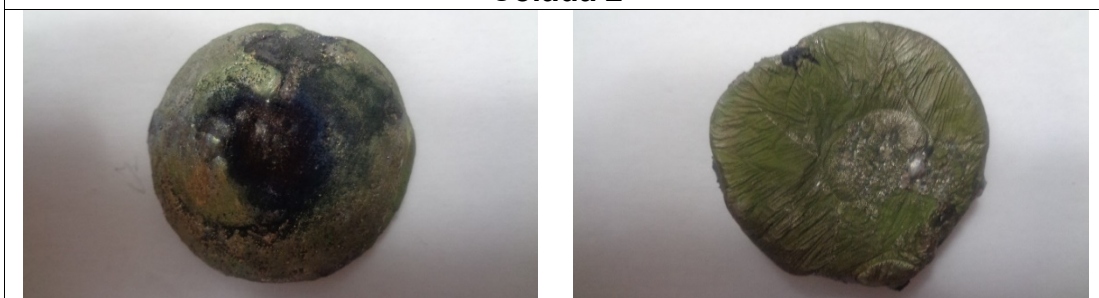
COLADAS OBTENIDAS DEL HORNO DE MICROFUSIÓN



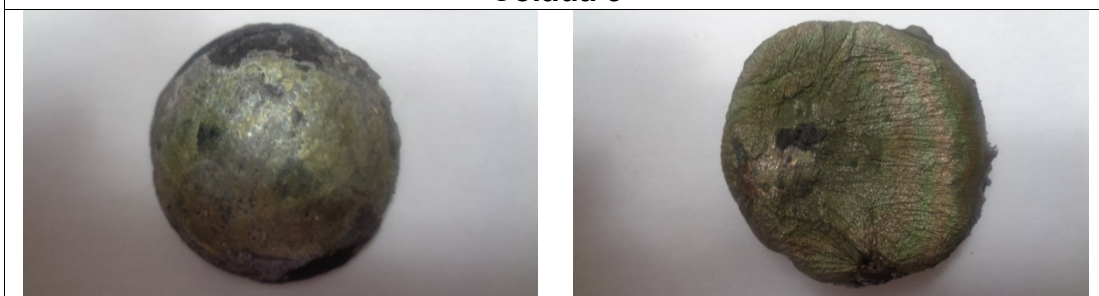
Colada 1



Colada 2



Colada 3



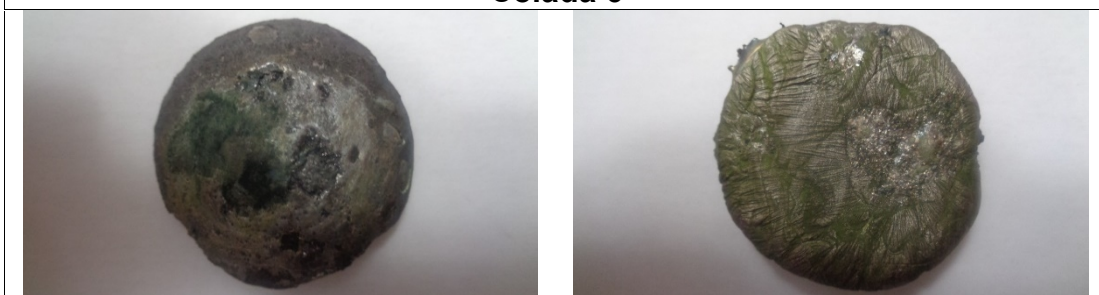
Colada 4



Colada 5



Colada 6



Colada 7



Colada 8



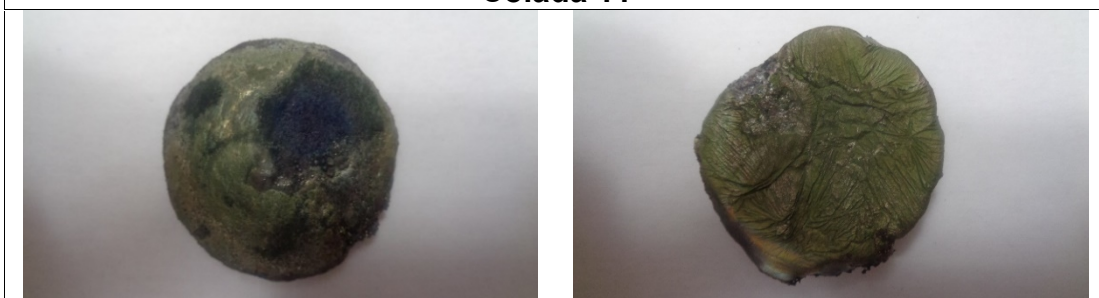
Colada 9



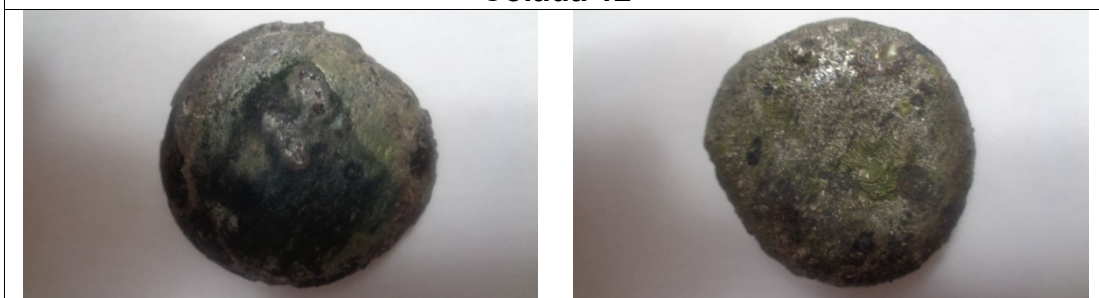
Colada 10



Colada 11



Colada 12



Colada 13



Colada 14



Colada 15



Colada 16



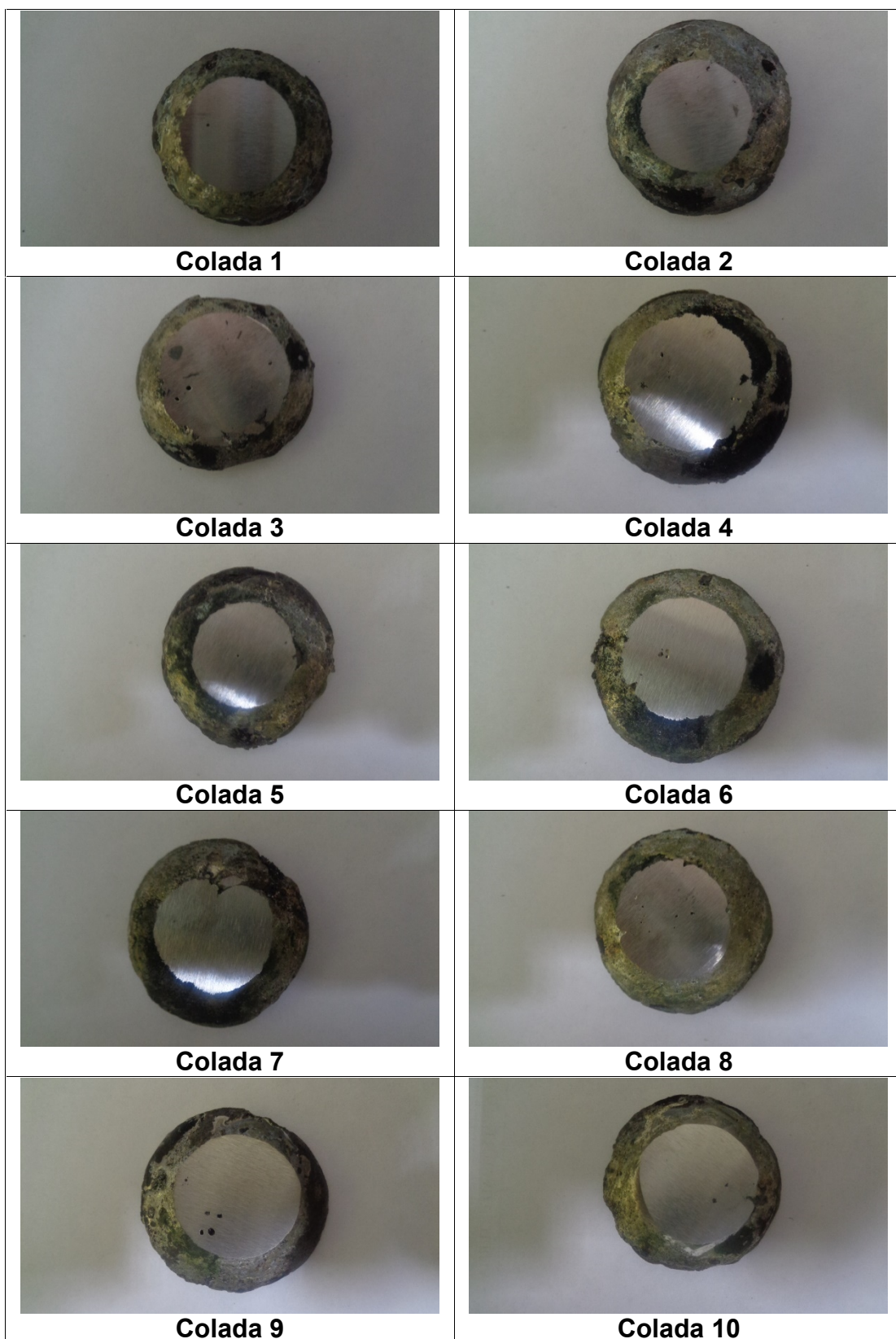
Colada 17

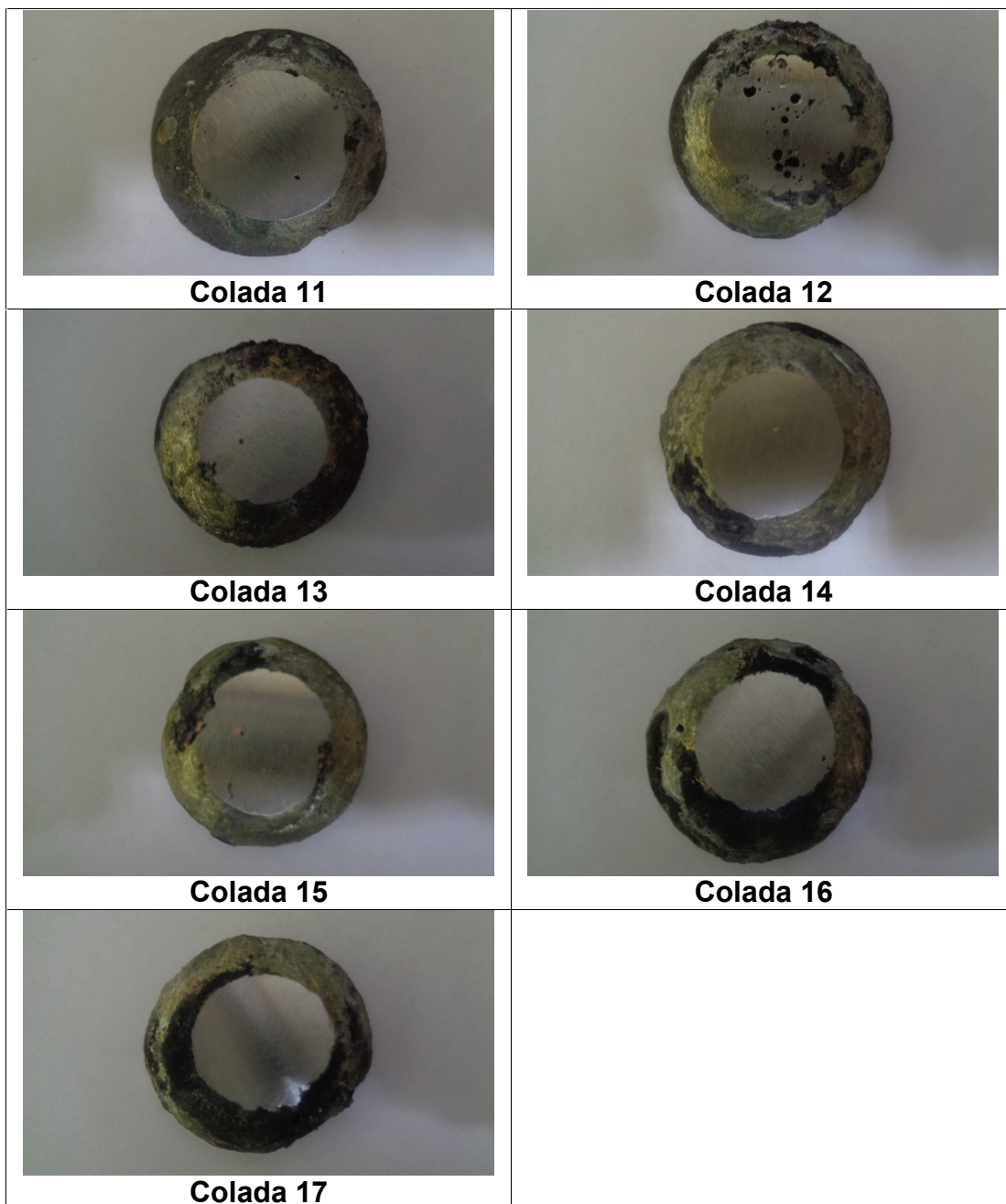


Todas las coladas

APÉNDICE E.2

COLADAS APTAS PARA ANÁLISIS ESPECTROSCÓPICO

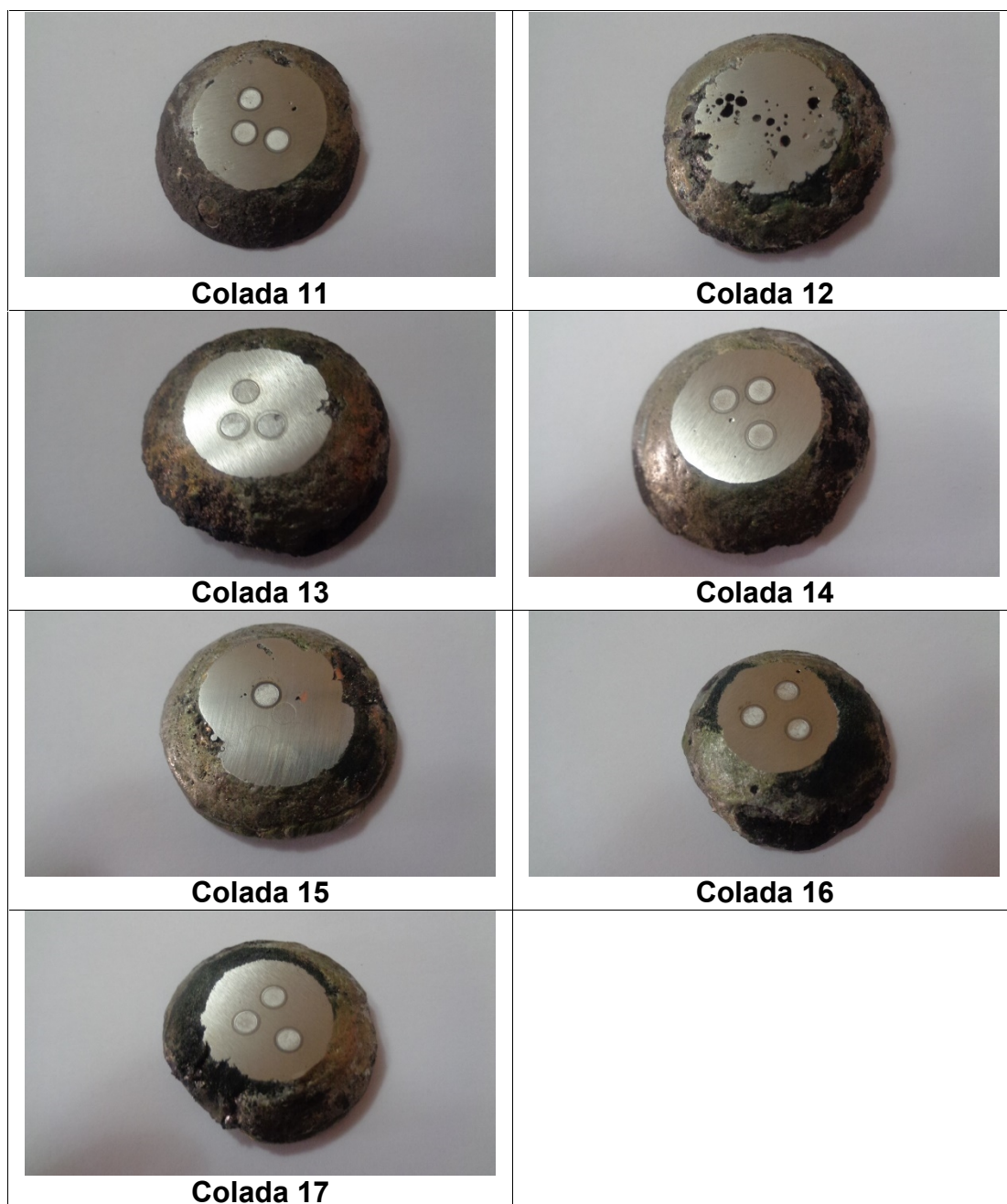




APÉNDICE E.3

COLADAS ANALIZADAS POR EQUIPO LECO GDS 500A





APÉNDICE E.4

LECTURAS DE COLADAS POR EQUIPO THERMO NITON XL2

3815 General Metals
NAV Utililaje
Tiempo 10.9 sec
No hay comparacion

Ele	%	±2σ
Sn	0.011	0.006
Mo	0.106	0.018
Cu	0.692	0.082
Ni	29.55	0.26
Fe	27.98	0.26
Mn	0.274	0.129
Cr	41.23	0.24

Colada 4

3844 General Metals
NAV Utililaje
Tiempo 10.4 sec
No hay comparacion

Ele	%	±2σ
Mo	0.086	0.020
Zn	0.075	0.021
Cu	0.359	0.057
Ni	4.66	0.17
Fe	19.14	0.37
Cr	75.48	0.40

Colada 7

3839 General Metals
NAV Utililaje
Tiempo 10.7 sec
±HL *3.5

Ele	%	±2σ
Ru	0.011	0.007
Mo	0.210	0.020
Zn	0.026	0.016
Cu	0.666	0.076
Ni	17.82	0.24
Fe	42.42	0.30
Mn	0.384	0.137
Cr	38.26	0.24

Colada 8

3843 General Metals
NAV Utililaje
Tiempo 11.2 sec
±HW6015 2.0

Ele	%	±2σ
Mo	0.195	0.029
Cu	1.92	0.13
Ni	62.64	0.33
Fe	22.91	0.21
Mn	0.399	0.093
Cr	11.79	0.16

Colada 12

3841 General Metals
NAV Utililaje
Tiempo 11.5 sec
No hay comparacion

Ele	%	±2σ
Mo	0.139	0.040
Cu	67.87	0.40
Ni	5.75	0.19
Fe	14.90	0.23
Mn	1.38	0.13
Cr	9.69	0.21

Colada 13

3838 General Metals
NAV Utililaje
Tiempo 10.8 sec
±HL 3.2

Ele	%	±2σ
Sn	0.011	0.006
Mo	0.196	0.020
Cu	0.777	0.079
Ni	24.09	0.25
Fe	42.32	0.27
Mn	0.429	0.121
Cr	32.07	0.20

Colada 16

3842 General Metals
NAV Utililaje
Tiempo 10.1 sec
±SS-310 3.0

Ele	%	±2σ
Sn	0.022	0.012
Mo	0.309	0.035
Cu	1.63	0.14
Ni	14.62	0.34
Fe	56.49	0.44
Mn	0.647	0.185
Cr	25.88	0.28
Ti	0.147	0.087

Colada 17

APÉNDICE F

PRUEBAS DE HIPÓTESIS PARA DETERMINAR VALIDEZ DE PROCEDIMIENTOS

PRUEBAS DE HIPÓTESIS PARA DETERMINAR VALIDEZ DE PROCEDIMIENTOS

Con el afán de determinar si los procedimientos realizados para obtener los datos de lecturas de cromo y níquel en los respectivos espectroscopios son confiables, se realizarán pruebas de hipótesis estadística.

Particularmente, se usará la distribución “t” de student (tabla F.3, al final del Apéndice F) para promedios ya que se satisfacen las siguientes condiciones:

- Es conocida el promedio poblacional (teórico) y desconocida su desviación estándar.
- El tamaño de la muestra es menor a 30 (en el estudio hay 17 muestras o coladas).
- Es posible calcular el promedio y la desviación estándar en base a las muestras.

Los datos necesarios para cada una de estas pruebas se presentan en la tabla F.1.

TABLA F.1
Datos para pruebas de hipótesis de medias poblacionales

Símbolo	Descripción		Valor
μ_0	Promedio poblacional de % Cr		26.53%
	Promedio poblacional de % Ni		19.12%
\bar{x}	Promedio real de % Cr	Descarga luminiscente	24.90%
		Fluorescencia de rayos X	25.30%
	Promedio real de % Ni	Descarga luminiscente	18.37%
		Fluorescencia de rayos X	18.26%
s_x	Desviación estándar de % Cr	Descarga luminiscente	2.34
		Fluorescencia de rayos X	1.78
	Desviación estándar de % Ni	Descarga luminiscente	1.43
		Fluorescencia de rayos X	1.23
n	Número de muestras (coladas)		17
α	Nivel de significancia		0.01

Para aplicar la prueba estadística a la investigación en curso se toman las siguientes consideraciones.

- Se aplicará la prueba de hipótesis para cada elemento (Cr y Ni) y a la vez por cada método (Descarga luminiscente y Fluorescencia de rayos X), dando un total de cuatro pruebas de hipótesis.
- El promedio teórico de cromo y níquel se calcula en función de la tabla 12 (ver sección 2.1). En tanto, el promedio real y desviación estándar de los porcentajes de cromo y níquel provienen de la tabla 32 (ver sección 3.2).
- El nivel de significancia es elección del investigador, en este caso se usa $\alpha = 0.01$, valor recomendado para estudios relacionados con proyectos de investigación, en los que se desea saber si existe diferencia significativa entre resultados de laboratorio y resultados teóricos.

Prueba de hipótesis para Cr: Descarga luminiscente

Para iniciar la prueba de hipótesis se plantea la hipótesis nula H_0 y se contrasta con la hipótesis alterna H_1 respecto al porcentaje promedio esperado de cromo para descarga luminiscente:

$$H_0 : \mu = 26.53\%$$

$$H_1 : \mu \neq 26.53\%$$

Se calcula el valor del estadístico t^* de student mediante la fórmula:

$$t^* = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s_x}{\sqrt{n}}} \quad (2.7)$$

Reemplazando los valores de la tabla F.1, se tiene:

$$t^* = \frac{24.9 - 26.53}{\frac{2.34}{\sqrt{17}}}$$

$$t^* = -2.87$$

Mientras, que de la tabla t de student, se halla el estadístico $t_{\alpha/2}$ con $n - 1$ grados de libertad, en este caso el valor correspondiente de $t_{0.005}$ con 16 grados de libertad es $t_{0.005; 16} = 2.92$. Como $|t^*| < t_{0.005; 16}$, entonces se acepta la hipótesis nula y se puede inferir que la media de la muestra (las 17 coladas) *no* es significativamente distinta al de la población.

Prueba de hipótesis para Cr: Fluorescencia de rayos X

De la misma manera, se plantean las hipótesis nula y alterna respecto a la media poblacional del porcentaje de cromo según el método de fluorescencia de rayos X.

$$H_0 : \mu = 26.53\%$$

$$H_1 : \mu \neq 26.53\%$$

El valor del estadístico t^* se calcula con la formula (2.7), resultando $t^* = -2.84$. Al comparar con el valor obtenido de la tabla $t_{0.005; 16} = 2.92$, se tiene que $|t^*| < t_{0.005; 16}$.

Por tanto, se acepta la hipótesis nula y se concluye que el promedio de cromo bajo el método de fluorescencia de rayos X *no* es significativamente distinto al esperado.

Prueba de hipótesis para Ni: Descarga luminiscente

Se plantean la hipótesis nula y alterna en referencia al promedio poblacional de porcentaje de níquel en el método de descarga luminiscente.

$$H_0 : \mu = 19.12\%$$

$$H_1 : \mu \neq 19.12\%$$

Con la formula (2.7), se calcula el valor del estadístico y resulta $t^* = -2.16$, al compararlo con el valor de la tabla se tiene que $|t^*| < t_{0.005; 16}$.

Por tanto, se acepta la hipótesis final y *no* hay diferencia significativa entre la media de las muestras y la media esperada teórica.

Prueba de hipótesis para Ni: Fluorescencia de rayos X

La hipótesis nula y alterna se plantean en función del promedio poblacional teórico de níquel.

$$H_0 : \mu = 19.12\%$$

$$H_1 : \mu \neq 19.12\%$$

Con la fórmula (2.7), el valor del estadístico es $t^* = -2.89$ y se realiza la comparación con el valor obtenido de la tabla $|t^*| < t_{0.005; 16}$.

Por tanto, se acepta la hipótesis nula y *no* hay diferencia significativa entre la media de las muestras y la media esperada teórica.

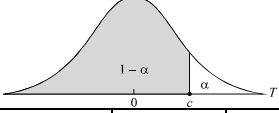
La tabla F.2 presenta un resumen de las pruebas de hipótesis.

TABLA F.2
Resumen de pruebas de hipótesis de medias poblacionales

Elemento	Método	Estadístico t^*	Comparación con $t_{0.005; 16}$
Cr	Descarga luminiscente	-2.87	$|t^*| < t_{0.005; 16} = 2.92$
	Fluorescencia de rayos X	-2.84	
Ni	Descarga luminiscente	-2.16	
	Fluorescencia de rayos X	-2.89	

Por tanto, los promedios de cromo y níquel de las coladas que se obtuvieron bajo ambos métodos de espectroscopia son representativos de los promedios esperados.

TABLA F.3
Distribución t-Student



The diagram shows a bell-shaped curve representing a t-distribution. The horizontal axis is labeled 't'. The mean of the distribution is marked as '0'. A vertical line is drawn at a point 'c' to the right of the mean. The area under the curve to the right of 'c' is shaded and labeled with the Greek letter alpha (α). The area to the left of 'c' is labeled with $1 - \alpha$.

Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845
21	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831
22	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819
23	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807
24	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
25	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787
26	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779
27	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771
28	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763
29	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756
30	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750
40	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704
60	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660
120	0.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617
∞	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576