

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ÁREA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**NITRURACIÓN SÓLIDA CATALIZADA POR UREA Y SULFATO DE AMONIO EN ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO.**

**T E S I S**

**que presenta para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS.**

**BLANCA SARAI DIAZ SILVA**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ALVARO GONZALEZ ANGELES**

**MEXICALI, B. C.**

**AGOSTO 2014**

# U.A.B.C

**NITRURACIÓN SÓLIDA CATALIZADA POR UREA Y SULFATO DE AMONIO EN ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO.**



**Director de Tesis: Dr. Álvaro González Ángeles.**

**Tesista: Blanca Sarai Diaz Silva.**

## **DEDICATORIA**

**Esta tesis va dedicada a mi esposo, quien con sus consejos me brindo su apoyo incondicional, a mis padres y hermanos, quienes con su ejemplo siempre me enseñaron a seguir adelante. Gracias por compartir esta etapa en mi vida.**

**Los quiero  
Blanca Sarai Diaz Silva.**

## **AGRADECIMIENTOS**

**Quiero agradecer a la Universidad Autónoma de Baja California, al sistema CONACYT y a la planta docente del Programa de Maestría y Doctorado de la Facultad de Ingeniería campus Mexicali.**

**Gracias  
Blanca Sarai Diaz Silva.**

## Contenido.

Indice	Pág
	I
Indice de Figuras	IV
Indice de Tablas	VII
Indice de Formulas	VII
Objetivo	8
Hipotesis	8
Metas	8
Justificacion	8
Resumen	10
Abstract	11
<b>Capítulo 1. Estado del Arte.</b>	
1.1 Introducción.	13
1.2 Materiales de Ingeniería.	13
1.2.1. Metales y Aleaciones.	14
1.2.2. Cerámicos, vidrios y vitrocerámicos.	14
1.2.3. Polímeros (plásticos).	15
1.2.4. Semiconductores.	15
1.2.5. Materiales Compuestos.	16
1.3. Aceros.	17
1.3.1. Antecedentes Históricos.	17
1.3.2. Definición.	19
1.3.3. Designación y clasificación de los aceros.	19
1.3.3.1. Aceros al Carbón.	20
1.3.3.2. Aceros Aleados.	20
1.3.3.3. Aceros Inoxidables.	21
1.3.3.4. Aceros de baja aleación ultrarresistentes.	21
1.3.4. Diagrama Hierro-Carbono.	21
1.3.5. Fases en el Diagrama Hierro-Carbono.	22
1.3.5.1. Cambios de fases del Hierro.	23
1.3.6. Componentes microscópicos de los aceros.	23
1.3.6.1. Ferrita.	25
1.3.6.2. Cementita.	27
1.3.6.3. Perlita.	28
1.3.6.4. Austenita.	29
1.3.6.5. Martensita.	31
1.3.6.6. Troostita.	32
1.3.6.7. Sorbita.	32

1.3.6.8. Bainita.	33
1.3.6.9. Carburos.	34
1.3.6.10. Inclusiones no metálicas.	35
1.3.7. Elementos aleados: Distribución y Efectos.	36
1.3.8. Enfriamiento lento de las aleaciones Hierro-Carbono de alto y bajo contenido de carbono.	38
1.4. Estudios realizados sobre Nitruración.	39
<b>Capítulo 2. Marco Teórico: Conceptos generales y tratamientos del acero.</b>	
2.1. Introducción.	47
2.2. Diseño de Experimentos.	47
2.2.1. Tipos de Diseños de Experimentos.	47
2.2.2. Unidad Experimental.	49
2.2.3. Variables, Factores y Niveles.	49
2.2.4. Etapas en el diseño de experimentos.	50
2.2.4.1. Planeación y Realización.	51
2.3. Propiedades mecánicas para caracterizar un material de ingeniería.	54
2.3.1. Dureza.	55
2.3.1.1. Ensayos para la medición de dureza superficial y micro-dureza.	55
2.3.1.1.1. Prueba o ensayo de dureza Brinell.	56
2.3.1.1.2. Prueba o ensayo de dureza Rockwell.	56
2.3.1.1.2.1. Norma ASTM E18.	58
2.3.1.1.3. Prueba o ensayo de dureza Vickers.	58
2.3.1.1.3.1. Norma ASTM E384.	60
2.3.1.2. Método para medición de profundidad de capa.	60
2.3.1.2.1. Proceso de medición de profundidad de capa utilizando la Norma SAE J423.	61
2.3.1.2.2. Norma ASTM G79-83.	64
2.3.2. Tensión.	65
2.3.2.1. Prueba o ensayo de tensión.	65
2.3.2.2. Propiedades de tensión.	66
2.3.2.2.1. Ductilidad.	66
2.3.2.2.2. Resistencia a la tensión.	67
2.3.2.2.3. Límite proporcional y límite elástico.	67
2.3.2.2.4. Módulo de elasticidad o Módulo de Young y Módulo de Resiliencia ( $E_r$ )	68
2.3.2.2.5. Resistencia de cedencia o fluencia y punto de cedencia o fluencia.	69
2.3.2.2.6. Resistencia máxima (final) y Resistencia a la	69

ruptura.	
2.3.3. Metalografía.	69
2.3.3.1. Proceso de montaje metalográfico utilizando la norma ASTM E3.	70
2.4. Tratamiento del acero.	75
2.4.1. Clasificación de los tratamientos del acero.	75
2.4.1.1. Tratamientos térmicos.	76
2.4.1.1.1. Temple.	76
2.4.1.1.2. Revenido.	79
2.4.1.1.3. Recocido.	80
2.4.1.1.4. Normalizado.	83
2.4.1.1.5. Austempering.	84
2.4.1.1.6. Martempering.	85
2.4.1.1.7. Patenting.	87
2.4.1.1.8. Sub-cero.	88
2.4.1.2. Tratamientos termoquímicos.	89
2.4.1.2.1. Cementación.	89
2.4.1.2.2. Nitruración.	90
2.4.1.2.3. Carbonitruración.	92
2.4.1.2.4. Sulfunización.	93
2.4.1.2.5. Aluminización y Cromización.	93
2.4.1.2.5.1. Recubrimiento de metales.	94
<b>Capítulo 3. Experimentación.</b>	
3.1. Metodología desarrollada.	97
3.1.1. Material.	98
3.1.1.1. Material para montaje metalográfico.	98
3.1.1.2. Material para manipulación de especímenes.	99
3.1.1.3. Mezcla Nitrurante.	99
3.1.2. Equipo.	100
3.1.3. Elección de la temperatura de nitruración.	101
3.1.4. Características del material A36.	101
3.1.4.1. Proceso de nitruración sólida y los tratamientos térmicos posteriores.	104
3.2. Aplicación del tema de tesis en la industria.	105
<b>Capítulo 4. Análisis y resultados.</b>	
4.1. Introducción.	110
4.2. Resultados de experimentación.	110
Conclusiones.	131
Trabajos futuros.	134
Referencias Bibliográficas.	136
Anexos	139

## Índice de Figuras.

	Pág.	
Figura 1-1.	Resistencias representativas de diversas categorías de materiales.	14
Figura 1-2.	Diversidad de partes complejas de cerámica, incluyendo impulsores y alabes para turbinas.	15
Figura 1-3.	Circuitos integrados para computadoras y otros dispositivos electrónicos.	16
Figura 1-4.	El ala X de un helicóptero está formada con un polímero reforzado con fibra de carbono.	17
Figura 1-5.	Diagrama Hierro-Carbono.	22
Figura 1-6.	Curva de enfriamiento del hierro puro.	22
Figura 1-7.	Cristales de ferrita y perlita en un acero de 0.35% de carbono recocido. Imagen obtenida a 750 aumentos.	24
Figura 1-8.	Estructura metalográfica para aceros de alto contenido de carbono. <b>a)</b> Cristales negros de perlita y retícula blanca de cementita en un acero de 1.10% de carbono recocido. <b>b)</b> Cristales blancos de austenita mezclado con agujas en zigzag de martensita. Imagen a 500 aumentos.	25
Figura 1-9.	Cristales blancos de austenita mezclado con agujas de zigzag de martensita. Imagen a 500 aumentos.	25
Figura 1-10.	Estructura metalográfica para la microestructura ferrita y perlita de acuerdo al contenido de carbono. <b>a)</b> Acero de 0.34% de carbono recocido a 860 °C con enfriamiento al aire. Ferrita y perlita con 150 Brinell. <b>b)</b> Micrografía de un acero con 0.75% de carbono a 450 aumentos.	26
Figura 1-11.	Estructura metalográfica de Perlita. <b>a)</b> Acero de 0.35% de Carbono en bruto de colada. <b>b)</b> Imagen de perlita en láminas paralelas obtenida a 500 aumentos.	26
Figura 1-12.	Estructuras de aceros al carbono. <b>a)</b> Estructura globular de aceros al carbón de herramientas obtenida a 2,000 aumentos. <b>b)</b> Acero de 0.45% de Carbono. Templado a 775 C en agua. Ferrita y Martensita. Imagen obtenida a 1,000 aumentos.	27
Figura 1-13.	Estructura de Perlita y Ferrita en acero de 0.75% de C. Imagen obtenida a 450 aumentos.	28
Figura 1-14.	Cristales de austenita. Imagen obtenida a 100 aumentos.	29
Figura 1-15.	Posible disposición teórica de los átomos de hierro y carbono en un cubo elemental de austenita.	30
Figura 1-16.	Estructura microscópica de martensita, analizada a 500 aumentos.	31
Figura 1-17.	Estructura microscópica de Troostita, analizada a 1,000 aumentos.	32
Figura 1-18.	Estructura microscópica de Sorbita, analizada a 500 aumentos.	33
Figura 1-19.	Estructura metalográfica de Bainita a diferentes temperaturas. <b>a)</b> Bainita superior de aspecto arborescente, obtenida 540 °C. <b>b)</b> Bainita inferior acicular, obtenida en un acero de 0.90% de C a 290 °C.	34
Figura 1-20.	Estructuras de carburos en aceros rápidos. Imagen obtenida a 2,500 aumentos.	35

Figura 1-21.	Inclusiones de silicatos. a) Inclusión de Sulfato de Manganeso. Imagen a 250 aumentos. b) Inclusión de Alúmina. Imagen a 250 aumentos. c) Inclusión de Silicato Angular. Imagen a 250 aumentos. d) Inclusión de Silicato Vítreo. Imagen a 250 aumentos.	36
Figura 1-22.	Efecto del Cromo en el rango de austenita del acero.	37
Figura 1-23.	Diagrama Hierro-Carbono. a) Microestructuras a diversas temperaturas de un acero SAE 1020 enfriado muy lentamente. b) Microestructuras a diversas temperaturas que se producen al enfriar un acero SAE 1095.	38
Figura 2-1.	Variables del proceso.	50
Figura 2-2.	Diagrama de flujo del diseño de experimentos $2^k$	54
Figura 2-3.	Estructura metalografía del acero al ser templado a) Estructura de perlita laminar. Micrografía electrónica a 11000 aumentos. b) Micrografía de acero inoxidable tipo 304 recocido, el cual es austenítico a temperatura común. Imagen a 250 aumentos.. c) Estructura acicular muestra patrón de martensita fina. Imagen obtenida a 1000 aumentos.	77
Figura 2-4.	Gamas de temperaturas que se utilizan para el temple del acero al carbón.	78
Figura 2-5.	Rangos de temperatura utilizados para el tratamiento térmico del acero al carbón.	81
Figura 2-6.	Acero con 0.10% de C recocido a 1025 °F (552 °C). Los granos de ferrita se reforman en su mayoría a su estado original. Imagen obtenida a 1000 aumentos.	82
Figura 2-7.	Efecto del carbono y del tratamiento térmico sobre las propiedades de los aceros al carbón.	84
Figura 2-8.	Representación esquemática del Austempering.	85
Figura 2-9.	Representación esquemática del Martempering.	86
Figura 2-10	Estructura metalográfica de Martensita. a) Martensita en listones en acero al bajo carbono. Imagen obtenida a 80 aumentos. b) Martensita en placas en acero al alto carbono. Imagen obtenida a 400 aumentos.	87
Figura 3-1.	Actividades desarrolladas durante la etapa experimental.	97
Figura 3-2.	Material para manipulación de piezas.	99
Figura 3-3.	Equipo utilizado durante la etapa de experimentación.	100
Figura 3-4.	Metalografía del acero A36.	101
Figura 3-5.	Gráfica de tensión (Crosshead (in) vs Load (Lbf)). Muestra 1	103
Figura 3-6.	Gráfica de tensión (Crosshead (in) vs Load (Lbf)). Muestra 2	103
Figura 3-7.	Ciclo térmico de nitruración sólida a diferentes temperaturas y tiempos de permanencia.	105
Figura 3-8.	Thickness Gage para medir espesor de porcelana.	106
Figura 3-9.	Thickness Gage fabricados de acero 8620.	107
Figura 3-10.	Elementos aleantes presentes en acero 8620.	107
Figura 3-11.	Metalografía de Acero 8620 Nitrurado.	108
Figura 3-12.	Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa de acero 8620 nitrurado.	108
Figura 4-1.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (2 h-Mezcla 90/10-Todas las temperaturas).	111
Figura 4-2.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (2h-Mezcla 80/20-Todas	112

	las temperaturas).	
Figura 4-3.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (2h-Mezcla 70/30-Todas las temperaturas).	112
Figura 4-4.	Perfil dureza Vs profundidad de capa (2h-3 Mezclas-900 °C).	113
Figura 4-5.	Perfil dureza Vs profundidad de capa (2h-Todas las mezclas-940°C).	113
Figura 4-6.	Perfil dureza Vs profundidad de capa (2h-Todas las mezclas-980°C).	114
Figura 4-7.	Profundidad de capa para muestra #8 (980 °C-2h-Mezcla 80/20).	114
Figura 4-8.	Elementos presentes en muestra #8 (980 °C-2h-Mezcla 80/20).	115
Figura 4-9.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (4h-Mezcla 90/10-Todas las temperaturas).	117
Figura 4-10.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (4h-Mezcla 80/20-Todas las temperaturas).	117
Figura 4-11.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (4h-Mezcla 70/30-Todas las temperaturas).	118
Figura 4-12.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (4h-Todas las mezclas- 900 °C).	118
Figura 4-13.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (4h-Todas las mezclas- 940 °C).	119
Figura 4-14.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (4h-Todas las mezclas-980 °C).	119
Figura 4-15.	Profundidad de capa para muestra #17 (4 h-Mezcla 80/20-980 °C).	120
Figura 4-16.	Elementos presentes en muestra #17 (4 h-Mezcla 80/20-980 °C).	120
Figura 4-17.	Comparación de dureza Vs profundidad de capa en muestra #8 (Verde) y muestra #17 (Azul).	121
Figura 4-18.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (6h-Mezcla 90/10-Todas las temperaturas).	123
Figura 4-19.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (6h-Mezcla 80/20-Todas las temperaturas).	123
Figura 4-20.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (6h-Mezcla 70/30-Todas las temperaturas).	124
Figura 4-21.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (6h-Todas las mezclas-900 °C).	124
Figura 4-22.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (6h-Todas las mezclas-940 °C).	125
Figura 4-23.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (6h-Todas las mezclas-980 °C).	125
Figura 4-24.	Profundidad de capa para muestra #26 (6h-Mezcla 80/20-980 °C)	126
Figura 4-25.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa (4h-Todas las mezclas-980 °C).	127
Figura 4-26.	Elementos presentes en capa formada por difusión de la muestra #29 (4h-Mezcla 80/20-980 °C).	127
Figura 4-27.	Elementos presentes en el núcleo de la muestra #29 (4h-Mezcla 80/20-980 °C)	128
Figura 4-28.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa de Sulfato de Amonio y Urea (4h-Mezcla 80/20-980 °C)	129
Figura 4-29.	Perfil de dureza Vs profundidad de capa de Sulfato de Amonio y Urea (6h-Mezcla 70/30-980 °C).	129
Figura 4-30.	Profundidad de capa de muestra #29 (4h-Mezcla 80/20-980 °C)	130

## Índice de Tablas.

	Pág.	
Tabla 1-1.	Composiciones de los aceros AISI-SAE	19
Tabla 2-1.	Características químicas del acero A36.	49
Tabla 2-2.	Clasificación de dureza e indentador a utilizar.	57
Tabla 2-3.	Tamaño de grano.	73
Tabla 2-4.	Características del Lente de Microscopio-Software.	75
Tabla 2-5.	Porcentaje de Austenita Residual.	88
Tabla 3-1.	Cantidad de resina y catalizador para preparación metalográfica.	98
Tabla 3-2.	Resultados de Micro-dureza del material de llegada.	102
Tabla 3-3.	Resultados de prueba de tensión al material de llegada.	103
Tabla 3-4.	Lecturas de dureza Rockwell.	106
Tabla 4-1.	Comparación de ganancia de masa a una temperatura de 2 h constante.	110
Tabla 4-2.	% en peso de elementos en muestra #8 (980 °C-2h-Mezcla 80/20).	115
Tabla 4-3.	Comparación de ganancia de masa a una temperatura de 4 h constante.	116
Tabla 4-4.	% en peso de elementos en muestra #17 (4 h-Mezcla 80/20-980 °C).	121
Tabla 4-5.	Comparación de % en peso de elementos en muestra #8 y #17	121
Tabla 4-6.	Comparación de ganancia de masa a una temperatura de 6 h constante.	122
Tabla 4-7.	Comparación de ganancia de masa a una temperatura de 6 h constante.	126
Tabla 4-8	% en peso de elementos en muestra #29 (4h-Mezcla 80/20-980 °C). Catalizador: Sulfato de Amonio.	128
Tabla 4-9.	Comparación de % en peso de elementos en el núcleo de muestra #29 (4h-Mezcla 80/20-980 °C).	128

## Índice de Ecuaciones.

	Pág.	
Ecuación 2.1	Fórmula para dureza Brinell.	56
Ecuación 2.2	Fórmula para dureza Vickers.	58
Ecuación 2.3	Fórmula para cálculo de promedio de las diagonales en dureza Vickers.	58
Ecuación 2.4	Fórmula para cálculo de resistencia a la tracción.	66
Ecuación 2.5	Fórmula para cálculo de % de alargamiento (elongación).	66
Ecuación 2.6	Fórmula para cálculo de % reducción de área.	66
Ecuación 2.7	Fórmula para cálculo de módulo de elasticidad (psi).	68
Ecuación 2.8	Reacción de disociación del amoníaco.	90

## **Objetivo.**

Realizar nitruración sólida en aceros de bajo contenido de carbono utilizando Urea y Sulfato de amonio como fuentes de nitrógeno.

## **Hipótesis.**

La utilización de Urea y Sulfato de Amonio servirán para realizar nitruración sólida en aceros de bajo contenido de carbono.

## **Metas.**

- Identificar el efecto del tiempo de permanencia y profundidad de capa en aceros de bajo contenido de carbono.
- Comparar la efectividad entre las diferentes mezclas de grafito y cada uno de los catalizadores (Urea y Sulfato de Amonio) en proporciones de 10%, 20% y 30% de cada uno y la profundidad de capa que se obtendrá para cada fuente.
- Comparar el efecto de variación de temperatura (900°C, 940°C y 980°C) en la profundidad de capa.
- Determinar el efecto de los catalizadores (Urea y Sulfato de Amonio) en las propiedades mecánicas del material (Perfil de dureza Vs profundidad de capa).

## **Justificación.**

En la actualidad, el tratamiento termoquímico de nitruración gaseosa representa una opción para obtener buenos resultados en la mejora de propiedades mecánicas de los aceros.

Este procedimiento permite mejorar la resistencia a la corrosión, obtención de mayor dureza, mayor resistencia a la fatiga y resistencia al desgaste en comparación con el método de cementación.

Sin embargo, en términos económicos es bien conocido el alto precio que tiene la realización de la nitruración gaseosa debido a la larga duración del tratamiento,

entrenamiento adecuado del personal, extremo cuidado de las piezas durante el proceso y el costo de las instalaciones necesarias para su realización.

Debido a lo anterior, se desea desarrollar una metodología que permita desarrollar en materiales de ingeniería, específicamente aceros de bajo contenido de carbono, una mayor dureza en comparación con el método de cementación.

En este caso, la estabilidad de la estructura y las propiedades de las capas de difusión formadas a partir de la nitruración sólida, proporcionaran por introducción de aditivos en la activación de una mezcla a base de carbón vegetal, un aumento de la tasa de difusión de carbono y el nivel de formación de carburos en la capa superficial.

Esta nueva metodología tiene como objetivo permitir a aquellas micro-empresas dedicadas a la metalurgia, la obtención de aceros de bajo contenido de carbono con alta dureza sin la necesidad de un entrenamiento especial, no tener un alto grado de riesgo durante el proceso y su realización se lleve a cabo con equipos convencionales.

# **NITRURACIÓN SÓLIDA CATALIZADA POR UREA Y SULFATO DE AMONIO EN ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO.**

## **RESUMEN**

En la presente tesis se trabajó con el tratamiento termoquímico de nitruración sólida. La catalización de la reacción fue llevada a cabo por dos diferentes proveedores de nitrógeno : Urea y Sulfato de Amonio.

Ambos catalizadores se mezclaron con grafito en diferentes proporciones de mezcla: 90/10 , 80/20, 70/30 a 3 diferentes temperaturas ( 900 °C, 940 °C y 980 °C) y 3 diferentes tiempos de permanencia en el horno (2 h, 4 h y 6 h).

La selección de la mejor mezcla, temperatura , tiempo de permanencia y catalizador se basó en aquellas que dieron como resultados finales mayor dureza superficial y profundidad de capa.

## **SOLID NITRURATION CATALYZED BY UREA AND AMMONIUM SULFATE IN LOW CARBON STEEL.**

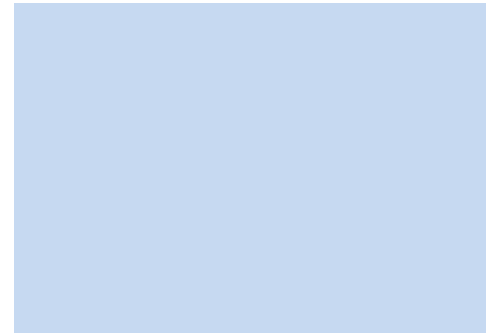
### **ABSTRACT**

In the present investigation the thermochemical treatment of solid nitration was performed. The catalyzed process of the reaction was performed by two different catalyst : Urea and ammonium sulfate.

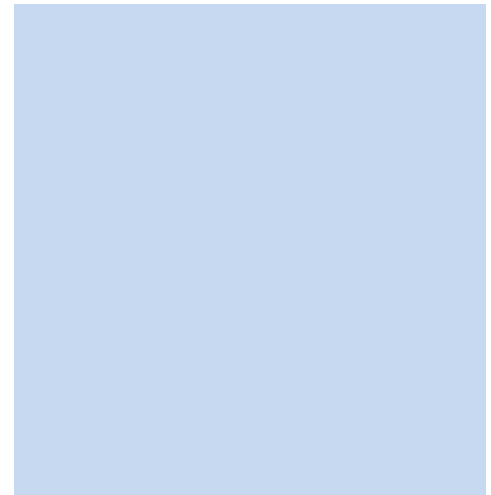
Urea and ammonium sulfate were mixed each with carbon in different mixture relation: 90/10, 80/0 and 70/30 with 3 different temperatures (900 °C, 940 °C y 980 °C) and 3 different cure time in the oven (2 h, 4 h y 6 h).

The selection of the mixture, temperature, cure time in the oven and the catalyst were based in the one that gave us good results in superficial hardness and deep case.

# U.A.B.C



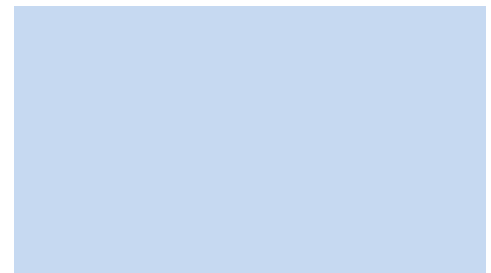
## Capítulo 1. ESTADO DEL ARTE.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA.**

**“NITRURACIÓN SÓLIDA CATALIZADA POR UREA Y SULFATO DE AMONIO EN ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO”**

**TESISTA: BLANCA SARAI DIAZ SILVA.**



## Capítulo 1. Estado del Arte

En este capítulo se presentarán los antecedentes históricos y la descripción de conceptos generales íntimamente relacionados con los procesos de tratamientos térmicos y termoquímicos, específicamente, la nitruración sólida.

Estos conceptos fortalecerán los conocimientos mínimos necesarios para el entendimiento del proceso y comprensión del comportamiento de los materiales a estudiar durante el proceso de experimentación.

A su vez, se presentará una recopilación de publicaciones científicas concernientes a temas de nitruración.

### 1.1 Introducción

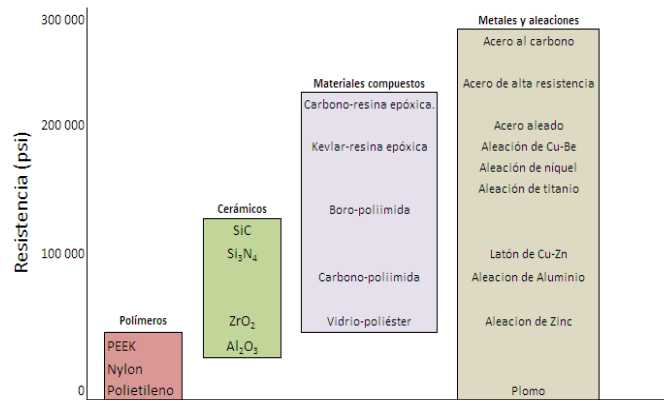
Las propiedades mecánicas de los materiales de ingeniería pueden predecirse y controlarse al comprender el enlace atómico, el arreglo atómico y los mecanismos de endurecimiento.

### 1.2 Materiales de Ingeniería

Existen varias formas de clasificar a los materiales de ingeniería, una de ellas consiste en describirlos en 5 grandes grupos:

1. Metales y aleaciones.
2. Cerámicos, vidrios y vitrocerámicos.
3. Polímeros (plásticos).
4. Semiconductores.
5. Materiales compuestos.

Los diferentes grupos descritos anteriormente poseen diferentes características tanto en su estructura como en sus propiedades. Por ejemplo, la diferencia en la resistencia de cada tipo de material se describe en la **Figura 1-1**.<sup>[1]</sup>



**Figura 1-1.** Resistencias representativas de diversas categorías de materiales.

### 1.2.1. Metales y aleaciones

Las aleaciones ferrosas, basadas en aleaciones hierro-carbono, incluyen los aceros al bajo carbono, los aceros aleados y para herramientas, los aceros inoxidables y los hierros fundidos. Estos son los materiales más ampliamente utilizados en el mundo [1].

Las aleaciones no ferrosas (es decir, aleaciones de elementos distintos al hierro) incluyen, pero no están limitados a, aleaciones base aluminio, cobre, níquel, cobalto, zinc, metales preciosos (como Pt, Au, Ag, Pd) y otros metales (por ejemplo, Nb, Ta, W) [1].

En general, los metales poseen buena conductividad eléctrica y térmica, poseen una alta resistencia, rigidez, ductilidad o formabilidad y una buena resistencia a choques térmicos [1].

### 1.2.2. Cerámicos, vidrios y vitrocerámicos

Los materiales cerámicos se pueden definir como materiales cristalinos inorgánicos, se utilizan en la actualidad para fabricar ladrillos, vajillas, artículos sanitarios, refractarios (materiales resistentes al calor) y abrasivos. En general debido a la presencia de porosidad, no conducen bien el calor y deben calentarse a altas temperaturas para que se fundan. Este tipo de materiales cerámicos son resistentes, duros y poseen gran resistencia a la compresión, sin embargo, son muy frágiles. [1].

Dentro de los cerámicos se encuentran aquellos denominados “cerámicos avanzados”, los cuales se obtienen a partir de la refinación de cerámicos naturales y con procesos especiales. Ver **Figura 1-2**.



**Figura 1-2.**Diversidad de partes complejas de cerámica, incluyendo impulsores y alabes para turbinas.

### 1.2.3. Polímeros (plásticos)

Los polímeros son materiales orgánicos comunes. Se producen con un proceso llamado polimerización.

Un polímero es un material constituido al combinar varios meros o unidades. Los polímeros son materiales que consisten en moléculas gigantes o macromoléculas en cadena con pesos moleculares promedios de 10,000 a más de 1,000,000 g/mol y que se forman al unir muchos meros o unidades mediante enlace químico<sup>[1]</sup>.

La mayoría de los polímeros, sólidos o líquidos, son orgánicos basados en el carbono; sin embargo, también pueden ser inorgánicos (por ejemplo siliconas basadas en una red Si-O)<sup>[1]</sup>.

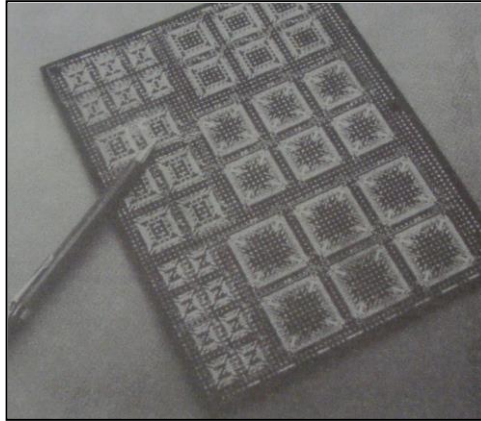
Dentro de sus aplicaciones se encuentran los chalecos antibalas, discos compactos (CD), cuerdas, ropa, entre muchas aplicaciones mas.

### 1.2.4. Semiconductores

Los semiconductores base silicio, germanio y arseniuro de galio, como los que se usan en las computadoras y en electrónica (Ver **Figura 1-3.**), son parte de una clase más amplia, la de los materiales electrónicos. La conductividad eléctrica de los materiales

semiconductores es intermedia entre la de los aisladores cerámicos y los conductores metálicos.

Los semiconductores han activado la era de la información. En algunos de ellos, se puede controlar el valor de la conductividad, lo que permite usarlos en dispositivos electrónicos como transistores, diodos y circuitos integrados [1].



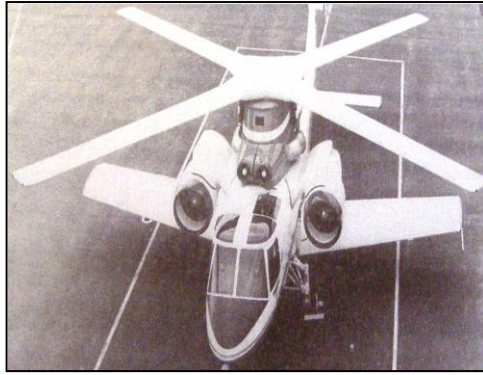
**Figura1-3.** Circuitos integrados para computadoras y otros dispositivos electrónicos.

### 1.2.5. Materiales Compuestos

Los materiales compuestos se forman cuando dos o más materiales o fases se utilizan juntas para dar una combinación de propiedades que no se pueden lograr de otra manera. Los materiales compuestos se pueden seleccionar para obtener combinaciones no usuales de rigidez, peso, desempeño a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad [1].

Con materiales compuestos se pueden obtener materiales ligeros, resistentes, dúctiles, resistentes a altas temperaturas, fabricación de herramientas de corte duras, pero resistentes al choque, que se romperían de no alear esos materiales.

Como ejemplo de materiales compuestos se encuentran los equipos deportivos como bicicletas, palos de golf, raquetas de tenis y otros por el estilo también usan distintos tipos de materiales compuestos que son ligeros y rígidos (Ver **Figura 1-4.**) [1].



**Figura1-4.** El ala en X de un helicóptero está formada con un polímero reforzado con fibra de carbono.

## 1.3.Aceros

### 1.3.1.Antecedentes Históricos

El arte de fundir, refinar y moldear los metales, tuvo un gran desarrollo, tanto entre los egipcios como entre los chinos [3].

Probablemente el hierro meteórico fue el primer metal ferroso que se utilizó. Casi todos los nombres originales para el hierro significaban algo como “piedra del cielo” o “metal de las estrellas”. Solo rara vez se encuentra al hierro como hierro nativo, y ya que los meteoritos también son escasos, no se utilizó mucho el hierro hasta que se descubrió un medio de extraerlo de sus minerales. Se cree que este descubrimiento ocurrió en China el año 2,000 a.C. y en Asia Menor hacia 1,500 a.C. En tiempos pasados, el hierro se producía en hornos primitivos o fraguas que forzaban una corriente de aire a presión a través de carbón en combustión en proximidad al mineral de hierro o mezclado con él, usualmente un óxido de hierro, como la hematita o la magnetita. Este proceso originaba un producto, llamado algunas veces hierro “esponja” por los historiadores antiguos [6].

Los antiguos egipcios sabían separar al hierro de su mineral, y que el acero tenía la propiedad de endurecerse, pero la utilización del hierro no se generalizó antes del año 1,000 a. de C.; este metal no fue popular entre los antiguos, por su tendencia a oxidarse; preferían trabajar con oro, plata, cobre, latón y bronce [3].

---

Los primeros utensilios de hierro descubiertos por los arqueólogos en Egipto datan del año 3,000 a.C., y se sabe que antes de esa época se empleaban adornos de hierro. Los griegos ya conocían hacia el 1,000 a.C., la técnica, de cierta complejidad, para endurecer armas de hierro mediante tratamiento térmico [4].

Las aleaciones producidas por los primeros artesanos del hierro (y, de hecho, todas las aleaciones de hierro fabricadas hasta el siglo XIV d.C.) se clasificarían en la actualidad como hierro forjado. Para producir esas aleaciones se calentaba una masa de mineral de hierro y carbón vegetal en un horno o forja con tiro forzado. Ese tratamiento reducía el mineral a una masa esponjosa de hierro metálico llena de una escoria formada por impurezas metálicas y cenizas de carbón vegetal. Esta esponja de hierro se retiraba mientras permanecía incandescente y se golpeaba con pesados martillos para expulsar la escoria y soldar y consolidar el hierro. El hierro producido en esas condiciones solía contener un 3% de partículas de escoria y un 0.1% de otras impurezas. En ocasiones esta técnica de fabricación producía accidentalmente acero autentico en lugar de hierro forjado. Los artesanos del hierro aprendieron a fabricar acero calentando hierro forjado y carbón vegetal en recipientes de arcilla durante varios días, con lo que el hierro absorbía suficiente carbono para convertirse en acero autentico [4].

Después del siglo XIV se aumentó el tamaño de los hornos utilizados para la fundición y se incrementó el tiro para forzar el paso de los gases de combustión por la carga o mezcla de materias primas. En estos hornos de mayor tamaño el mineral de hierro de la parte superior del horno se reducía a hierro metálico y a continuación absorbía más carbono como resultado de los gases que lo atravesaban. El producto de estos hornos era el llamado arrabio, una aleación que funde a una temperatura menor que el acero o el hierro forjado. El arrabio se refinaba después para fabricar acero. La producción moderna de acero emplea altos hornos que son modelos perfeccionados de los usados antiguamente. El proceso de refinado de arrabio mediante chorros de aire se debe al inventor británico Henry Bessemer, que en 1855 desarrolló el horno o convertidor que lleva su nombre. Desde la década de 1960 funcionan varios mini hornos que emplean electricidad para producir aceros a partir de chatarra. Sin embargo, las grandes instalaciones de altos hornos continúan siendo esenciales para producir acero a partir de mineral de hierro [4].

### 1.3.2. Definición

Los metales y las aleaciones empleados en la industria y en la construcción pueden dividirse en dos grupos principales: materiales ferrosos y no ferrosos. Ferroso viene de la palabra *Ferrum* que los romanos empleaban para el fierro o hierro. Por lo tanto, los materiales ferrosos son aquellos que contienen hierro como su ingrediente principal; es decir, las numerosas calidades del hierro y el acero.

El acero es básicamente una aleación o combinación de hierro y carbono [5].

Los aceros que se emplean en la industria, son aleaciones y no metales puros como el oro, la plata, el estaño, etc. El contenido de carbono de los aceros varía desde 0.035% a 1.7%, llegando en algunos casos excepcionales a 2.2% [2].

### 1.3.3. Designación y clasificación de los aceros

AISI (*American Iron and Steel Institute*) y SAE (*Society of Automotive Engineers*) han organizado sistemas de designación (Ver **Tabla 1-1.**) que utilizan un número de cuatro dígitos o cinco dígitos. Los primeros dos dígitos se refieren a los principales elementos de aleación presentes, y los últimos dos o tres dígitos corresponden al porcentaje de carbono. El AISI 1040 es un acero al bajo carbono con 0.40% C. El SAE 10120 es un acero al bajo carbono con 1.20% C. El AISI 4340 es una aleación de acero con 0.40% C [1].

**Tabla 1-1** Composiciones de los aceros AISI-SAE.

AISI-SAE Número	% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	Otros
1020	0.18-0.23	0.30-0.60				
1040	0.37-0.44	0.60-0.90				
1060	0.55-0.65	0.60-0.90				
1080	0.75-0.88	0.60-0.90				
1095	0.90-1.03	0.30-0.50				
1140	0.37-0.44	0.70-1.00				0.08-0.13% S
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.15-0.30		0.80-1.10	0.15-0.25% Mo
4340	0.38-0.43	0.60-0.80	0.15-0.30	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.300% Mo
4620	0.17-0.22	0.45-0.65	0.15-0.30	1.65-2.00		0.20-0.30% Mo
52100	0.98-1.10	0.25-0.45	0.15-0.30		1.30-1.60	
8620	0.18-0.23	0.70-0.90	0.15-0.30	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25% Y
9260	0.56-0.64	0.75-1.00	1.80-2.20			

En el caso de la ASTM (*American Society for Testing Materials*) utiliza un procedimiento distinto para clasificar los aceros. La ASTM tiene una lista de especificaciones que describe los aceros apropiados para distintas aplicaciones.

Los aceros pueden clasificarse con base en su composición o según la forma en que han sido procesados <sup>[1]</sup>.

### **1.3.3.1. Aceros al carbón**

Más del 90% de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbono y menos del 1.65% de manganeso, el 0.60% de silicio y el 0.60% de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran maquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques y horquillas <sup>[5]</sup>.

### **1.3.3.2. Aceros aleados**

Estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono normales. Estos aceros de aleación se pueden sub-clasificar en:

Estructurales.- Son aquellos aceros que se emplean para diversas partes de maquinas, tales como engranajes, ejes y palancas. Además se utilizan en las estructuras de edificios, construcción de chasis de automóviles, puentes, barcos y semejantes. El contenido de la aleación varía desde 0.25% a un 6%.

Para herramientas.- Aceros de alta calidad que se emplean en herramientas para cortar y modelar metales y no-metales. Por lo tanto, son materiales empleados para cortar y construir herramientas tales como taladros, fresas etc.

Especiales.- Los aceros de aleación especiales son los aceros inoxidable y aquellos con un contenido de cromo generalmente superior al 12%. Estos aceros de gran dureza y alta resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión, se emplean en turbinas de vapor, engranajes, ejes y rodamientos <sup>[5]</sup>.

### **1.3.3.3. Aceros inoxidables**

Los aceros inoxidables contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes a la herrumbre y oxidación a pesar de la acción de la humedad o de ácidos y gases corrosivos.

Algunos aceros inoxidables son muy duros; otros son muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largos periodos a temperaturas extremas. Debido a sus superficies brillantes, en arquitectura se emplean muchas veces con fines decorativos. El acero inoxidable se utiliza para las tuberías y tanques de refinerías de petróleo o plantas químicas, para los fuselajes de los aviones o para capsulas espaciales <sup>[5]</sup>.

### **1.3.3.4. Aceros de baja aleación ultrarresistentes**

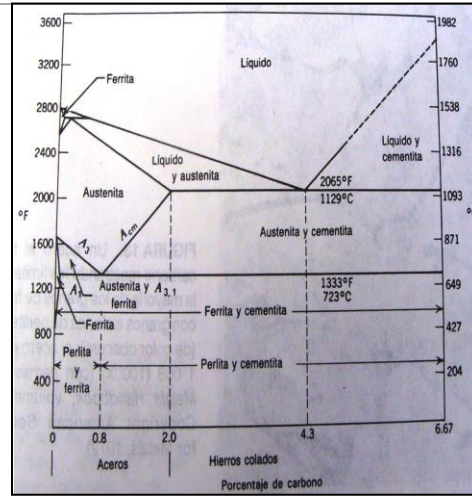
Esta familia es la más reciente de las cuatro grandes clases de aceros. Los aceros de baja aleación son más baratos que los aceros aleados convencionales ya que contienen cantidades menores de los costosos elementos de aleación.

Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono. En la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de aceros de baja aleación. las vigas pueden ser más delgadas sin disminuir su resistencia, logrando un mayor espacio interior en los edificios <sup>[5]</sup>.

### **1.3.4. Diagrama Hierro-Carbono**

El diagrama Hierro-Carbono es una representación gráfica esquemática de las transformaciones que sufre un material durante el enfriamiento y calentamiento de una pieza.

Al diagrama de Hierro-Carbono se le conoce como un diagrama de equilibrio o diagrama de fases (Ver **Figura 1-5.**). El diagrama de fases indica las transformaciones que ocurren durante un enfriamiento muy lento o a condiciones de cuasi equilibrio <sup>[6]</sup>.



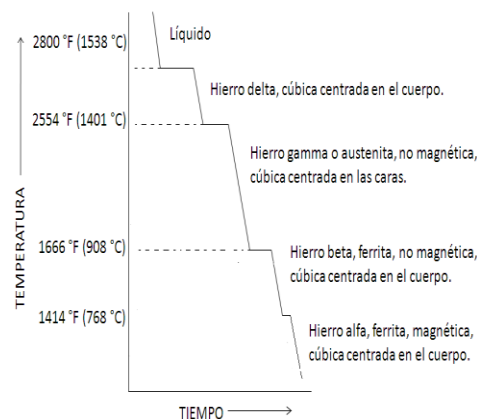
**Figura1-5.** Diagrama Hierro-Carbono

### 1.3.5. Fases en el diagrama Hierro-Carbono

Los diagramas de composición (llamados algunas veces diagramas de aleación o de fase) son un medio útil de explicar y comprender el comportamiento de los metales. La materia puede existir en tres estados: sólida, líquida o gaseosa.

Algunas sustancias son capaces de cambiar dentro del estado sólido a otras fases o estructuras cristalinas. A la capacidad de cambiar a diferentes fases se le conoce como alotropía. El hierro es un elemento alotrópico y durante el enfriamiento cambia de cúbico centrado en las caras a cúbico centrado en el cuerpo [6].

Las reacciones de cambio de fase se caracterizan por ser exotérmicas (liberan calor) y son representadas mediante una línea recta o curvada horizontalmente en una curva de enfriamiento. Conforme aumenta la temperatura, mayor será el tiempo necesario para que se dé la transformación (Ver **Figura 1-6.**).



**Figura1-6.** Curva de enfriamiento del hierro puro

### 1.3.5.1. Cambios de fases del Hierro

El hierro por ser un elemento alotrópico, puede existir en más de una estructura unitaria reticular, dependiendo de la temperatura. Cuando una sustancia pasa por un cambio de fase al enfriarse, libera calor. Cuando se logra un cambio de fase durante el calentamiento, se absorbe calor. Esta característica se utiliza para construir las curvas de enfriamiento [6].

Cada segmento plano de la curva de enfriamiento representa un cambio de fase. Estas porciones planas se deben a la liberación de calor durante los cambios de fase. a 2800 °F (1538 °C), el hierro cambia a una estructura sólida cúbica centrada en el cuerpo (hierro delta). Todos los cambios restantes implican la transformación de un sólido de una estructura reticular en un sólido de otra estructura reticular.

A 2554 °F (1401 °C) el hierro delta CC cambia a austenita CCC (hierro gama). La austenita se transforma en ferrita CC a 1666 °F (908 °C). El siguiente cambio no es un cambio de fase del todo, pero produce calor. Este es el cambio de ferrita no magnética (hierro beta) a ferrita magnética (hierro alfa) [6].

### 1.3.6. Componentes microscópicos de los aceros

Los componentes microscópicos que caracterizan a las diferentes transformaciones que sufre un material durante el enfriamiento y calentamiento son:

- |               |               |             |
|---------------|---------------|-------------|
| 1. Ferrita.   | 4. Austenita. | 1. Sorbita  |
| 2. Cementita. | 5. Martensita | 2. Bainita  |
| 3. Perlita    | 6. Troostita  | 3. Carburos |

Si calentamos un trozo de acero de 0.35% de carbono a 900 C y lo dejamos enfriar lentamente dentro del horno, y luego lo pulimos y atacamos con una solución de ácido nítrico al 3% durante diez segundos, podremos ver, con ayuda del microscopio, una estructura formada por cristales blancos y negros, semejantes a las de la **Figura 1-7.** [2].



**Figura 1-7.** Cristales de ferrita y perlita en un acero de 0.35% de carbono recocido. Imagen obtenida a 750 aumentos.

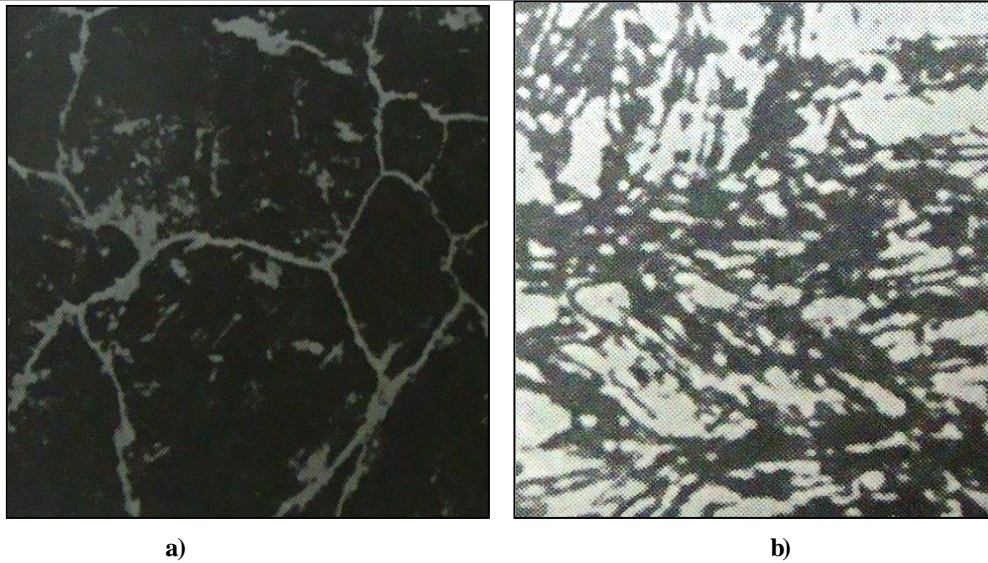
Los cristales blancos son de ferrita y los negros de perlita. Si hacemos lo mismo con un acero de 1.10% de carbono, veremos unos cristales negros contorneados por una retícula blanca. Los cristales negros son de perlita y la retícula blanca de Cementita (Ver **Figura 1-8 inciso a**).

La ferrita, Cementita y perlita, que son los constituyentes característicos de los aceros recocidos, se aprecian con gran claridad en el examen microscópico, aunque se empleen pocos aumentos. [2].

Al calentar un acero de 1.10% de C. a 1000 °C, ósea por encima del punto crítico  $A_{cm}$  (Ver **Figura 1-5.**) se modifica la estructura cristalina que poseía a temperatura ambiente, quedando el acero tratado térmicamente con una estructura caracterizada por cristales de austenita. Si el enfriamiento de la pieza se realiza lentamente, estos cristales se desdoblán y transforman en cristales de cementita y perlita [2].

Sin embargo, si se somete una pieza de 1cm de lado a la misma temperatura (1000 °C) y su enfriamiento se realiza rápidamente en agua, no se da el tiempo necesario para que los cristales de austenita se transformen en perlita y cementita.

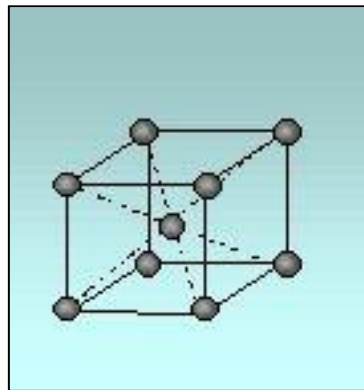
Esto mostrará como consecuencia una estructura de austenita mezclada con agujas de martensita (Ver **Figura 1-8 inciso b**) [2].



**Figura 1-8.** Estructura metalografica para aceros de alto contenido de carbono. **a)** Cristales negros de perlita y retícula blanca de cementita en un acero de 1.10% de carbono recocido. **b)** Cristales blancos de austenita mezclado con agujas en zigzag de martensita. Imagen a 500 aumentos.

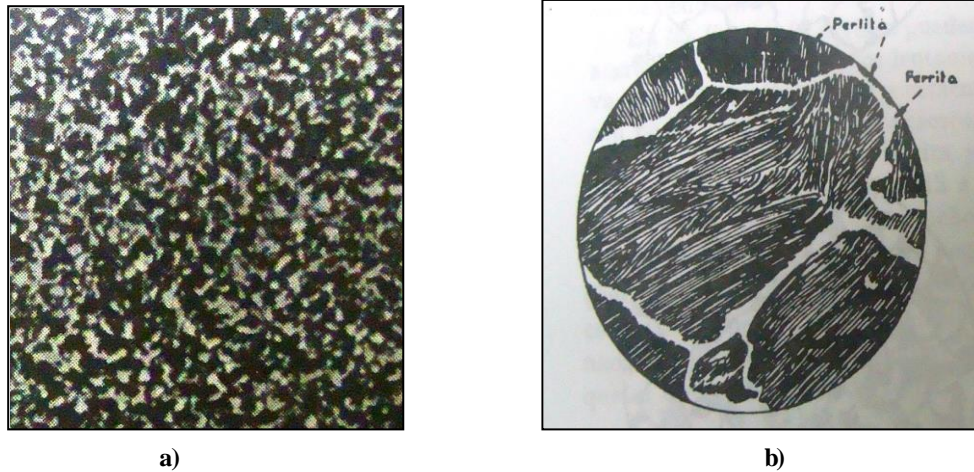
### 1.3.6.1. Ferrita

La ferrita es hierro alfa, o sea hierro casi puro, que puede contener en solución pequeñas cantidades de silicio, fósforo y otras impurezas. En los aceros aleados, suelen formar solución sólida con la ferrita o hierro alfa, el níquel, manganeso, cobre, silicio, aluminio, etc [2]. Cristaliza en el sistema cúbico, de cuerpo centrado (Ver **Figura 1-9**), estando el cubo elemental formado por 8 átomos, situados en los vértices y uno en el centro. Tiene aproximadamente una resistencia a la tracción de 28 Kg/mm<sup>2</sup>, 35% de alargamiento y una dureza de 90 unidades Brinell. Es el más blando de todos los constituyentes del acero, muy dúctil y maleable, magnética y de pequeña fuerza coercitiva. [2].



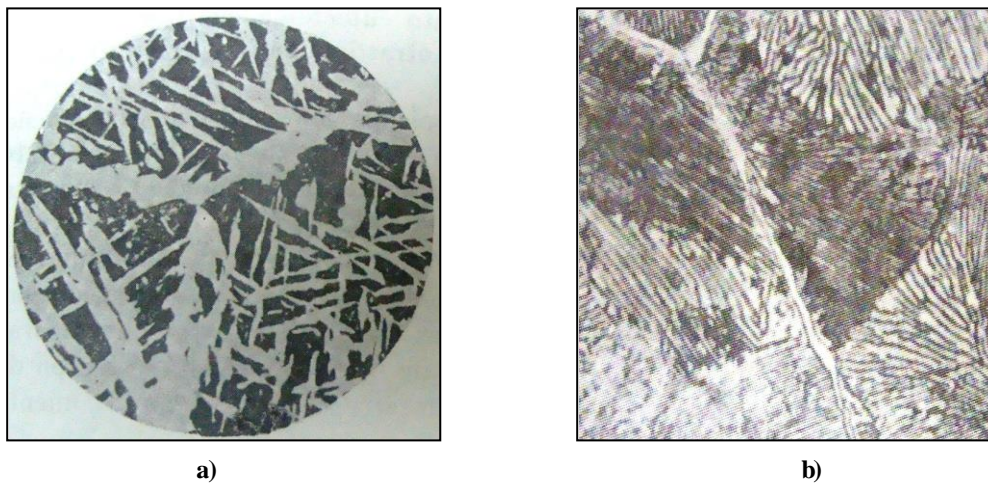
**Figura 1-9.** Cristales blancos de austenita mezclado con agujas en zigzag de martensita. Imagen a 500 aumentos.

En los aceros puede aparecer bajo formas muy diversas. Como elemento proeutectoide que acompaña a la perlita. En este caso se presenta: En forma de cristales mezclados con los de perlita en los aceros de menos de 0.55% de carbono aproximadamente (**Figura 1-10 inciso a**). Formando una red o malla que limita los granos de perlita en los aceros de 0.55% a 0.85% de carbono, aproximadamente (**Figura 1-10 inciso b**).



**Figura 1-10.** Estructura metalografica para la microestructura ferrita y perlita de acuerdo al contenido de carbono. **a)** Acero de 0.34% de carbono recocido a 860 C con enfriamiento al aire. Ferrita y perlita con 150 Brinell. **b)** Micrografía de un acero con 0.75% de carbono a 450 aumentos.

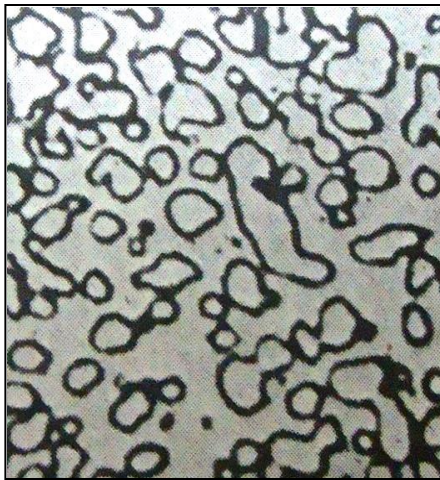
En forma de agujas o bandas acirculares (estructura de Widmanstätten), orientadas en dirección de los planos cristalográficos de la austenita (**Figura 1-11 inciso a**). También aparece como elemento eutectoide de la perlita, formando láminas paralelas, separadas por otras láminas de cementita (**Figura 1-11 inciso b**) [2].



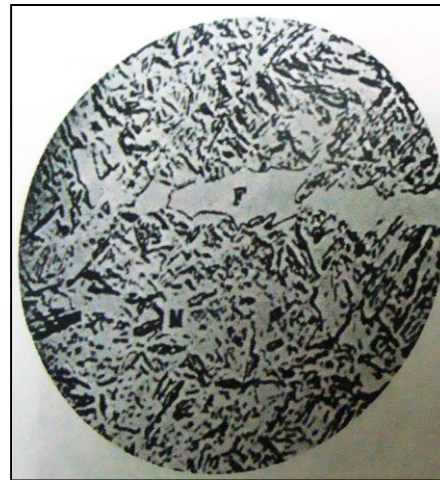
**Figura 1-11.** Estructura metalografica de Perlita. **a)** Acero de 0.35% de Carbono en bruto de colada. **b)** Imagen de perlita en láminas paralelas obtenida a 500 aumentos.

En la estructura globular (**Figura 1-12 inciso a**), propia de los aceros al carbón de herramientas (de 0.9 a 1.4%) recocidos a temperaturas próximas a 721 °C ( $A_{321}$ ), aparece formando la matriz que rodea a los glóbulos de cementita [2].

En los aceros hipoeutectoides templados, puede también aparecer mezclada con la martensita o con los demás elementos de transición formando zonas blancas irregulares o agujas finas, cuando las temperaturas de calentamiento han sido más bajas que la crítica ( $A_{c3}$ ), el tiempo de calentamiento insuficiente o ha habido interrupciones en el enfriamiento (**Figura 1-12 inciso b**) [2].



a)



b)

**Figura 1-12.** Estructuras de aceros al carbono. **a)** Estructura globular de aceros al carbón de herramientas obtenida a 2,000 aumentos. **b)** Acero de 0.45% de Carbono. Templado a 775 C en agua. Ferrita y Martensita. Imagen obtenida a 1,000 aumentos.

### 1.3.6.2. Cementita

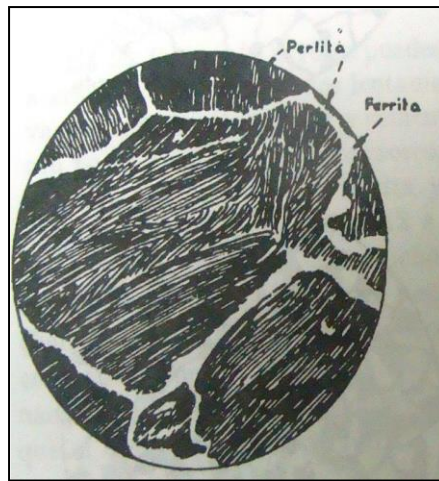
La cementita es carburo de hierro,  $Fe_3C$ , contiene 6.67% de carbono y 93.33% de hierro. Es el constituyente más duro y frágil de los aceros al carbono, su dureza es superior a 68 Rockwell-C [2].

Es magnética a la temperatura ordinaria, pero pierde su magnetismo a 218 °C.

Examinando los aceros con el microscopio puede aparecer:

Como cementita proeutectoide en los aceros con más de 0.90% de C, formando una red que envuelve los granos de perlita [2].

Formando parte de la perlita, y en ese caso se le llama cementita perlítica o eutectoide, y toma la forma de láminas paralelas separadas por otras de ferrita (**Figura 1-13.**) [2].



**Figura 1-13** Estructuras de Perlita y Ferrita en acero de 0.75% de C. Imagen obtenida a 450 aumentos.

Como cementita globular se presenta en forma de pequeños glóbulos o granos redondos dispersos en una matriz de ferrita cuando los aceros de 0.9% a 1.4% de carbono han sufrido un recocido a temperaturas próximas a 721 °C ( $A_{321}$ ) (Ver **Figura 1-5.**) [2].

En los aceros hipereutectoides templados, cuando la temperatura alcanzada ha sido superior a  $A_{321}$  (Ver **Figura 1-5.**), pero inferior a  $A_{cm}$  o cuando el tiempo de calentamiento no ha sido suficiente, aparece la cementita rodeada de martensita o de otros constituyentes de transición [2].

Como cementita terciaria, de forma alargada vermicular (forma de gusano) en las uniones de los granos de los aceros de bajo contenido de carbono (inferior a 0.25%). En los aceros de más alto contenido de carbono la cementita terciaria con frecuencia se confunde con la eutectoide [2].

### 1.3.6.3. Perlita

La estructura laminar de  $\alpha$  y de  $Fe_3C$  que se desarrolla en el sistema hierro carbono se conoce como perlita, que es un micro constituyente en el acero. Fue llamada así porque una perlita pulida y atacada químicamente muestra el colorido de la madreperla [1].

Es de composición química constante y definida y contiene aproximadamente seis partes de hierro y una de carburo, que corresponden a 13.5% de  $Fe_3C$  y 86.5% de Fe y a 0.9% de C y 99.1% de Fe. Tiene una resistencia a la tracción de 80  $Km/mm^2$  y un alargamiento de 15% aproximadamente.

La perlita aparece en general en el enfriamiento lento de la Austenita o por transformación isotérmica de la Austenita en la zona de los 650 a 725 C [2].

La ferrita y la cementita que componen la perlita aparecen formando láminas paralelas y alternadas que tienen reflejos nacarados, por lo que Sorby, en 1864, le dió el nombre de constituyente perlítico. Según la velocidad de enfriamiento, esas laminillas aparecerán más o menos separadas, y cuando el enfriamiento ha sido bastante rápido, las láminas se acercan mucho, de forma que en el microscopio aun con grandes aumentos, no se pueden distinguir [2].

La distancia interlaminar de la perlita sirve para clasificarla en:

Perlita gruesa con una separación entre láminas de unas 400 $\mu$ m y una dureza 200 Brinell, que se obtiene por enfriamiento muy lento dentro del horno.

Perlita normal, la cual tiene 350 $\mu$ m y 220 Brinell de dureza.

Perlita fina, que se obtiene cuando se enfría dentro del horno bastante rápido o cuando se deja enfriar el acero al aire, tiene 250 $\mu$ m y 300 Brinell de dureza.

#### 1.3.6.4. Austenita

Es una solución sólida de carbono o carburo de hierro en hierro gamma. Puede contener desde 0 a 1.7% de carbono y es, por lo tanto, un constituyente de composición variable. Todos los aceros se encuentran formados por cristales de austenita cuando se calientan a temperaturas superiores a las críticas ( $A_{c3}$  o  $A_{cm}$ ) (Ver **Figura 1-5.** y **Figura 1-14**). Aunque generalmente es un constituyente inestable, se puede obtener esa estructura a la temperatura ambiente por enfriamiento rápido de aceros de alto contenido en carbono o de muy alta aleación [2].



**Figural-14.** Cristales de austenita. Imagen obtenida a 100 aumentos.

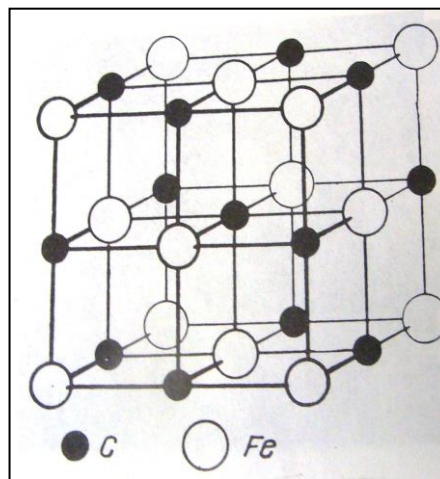
En algunos aceros de alta aleación, como los cromo-níqueles inoxidables y los aceros altos en manganeso (Mn=12%), aparece la austenita a la temperatura ambiente por simple enfriamiento al aire.

Templando perfiles muy delgados de aceros de elevado contenido en carbono, desde alta temperatura en agua muy fría, aparecen grandes cristales blancos de austenita mezclados con agujas en zigzag de martensita.

Su resistencia a la tracción es de 88 a 105 Kg/mm<sup>2</sup> aproximadamente, su dureza es de 300 Brinell y su alargamiento de 30 a 60%. Es poco magnética, blanda, muy dúctil y tenaz. Tiene gran resistencia al desgaste, siendo el constituyente más denso de los aceros.

A temperatura ordinaria, es muy raro encontrarla en la microestructura de las piezas o herramientas fabricadas con aceros de baja aleación. Aparece, en cambio, más frecuentemente aunque en cantidades muy pequeñas y casi siempre mezclada con la martensita en los aceros muy aleados, enfriados rápidamente desde alta temperatura, siendo como es natural, el constituyente fundamental de los aceros cromo-níqueles austeníticos y de los aceros con 12% de manganeso [2].

Una posible disposición atómica de la austenita se explica en la **Figura 1-15**, esta señala la posible situación de los átomos de carbono en el cubo de hierro gamma de caras centradas.



**Figura 1-15** Posible disposición teórica de los átomos de hierro y carbono en un cubo elemental de austenita.

Estos átomos de carbono ocupan posiciones de una forma desordenada y al azar. Debido a la pequeña proporción de carbono que contienen los aceros hay muchos menos

átomos de carbono que de hierro y, por lo tanto, en la mayoría de los casos, los centros de las aristas se encuentran vacíos.

### 1.3.6.5. Martensita

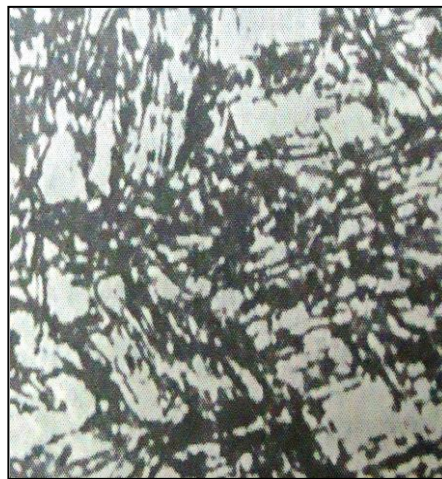
Es el constituyente típico de los aceros templados. Se admite que está formado por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en hierro alfa, y se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde altas temperaturas. Su contenido en carbono suele variar generalmente desde pequeñas trazas hasta 1% de C y algunas veces, en los aceros hipereutectoides, aun suele ser más elevado.

Sus propiedades físicas varían con su composición, aumentando su dureza, resistencia y fragilidad con el contenido en carbono, hasta un máximo para  $C = 0.90\%$  aproximadamente. Después de los carburos y de la cementita, es el constituyente más duro de los aceros. Tiene una resistencia a la tracción de 170 a 250 Kg/mm<sup>2</sup>, una dureza de 50 a 68 Rockwell-C, alargamiento de 2.5 a 0.5% y es magnética.

Presenta un aspecto marcadamente acicular, formando agujas de zigzag, con ángulos de 60 grados. Ver **Figura 1-16**.

La martensita cristaliza en el sistema tetragonal, estando formada su red elemental por un paralelepípedo que difiere muy poco del cubo de cuerpo centrado del hierro alfa.

La Martensita es una fase que se forma como resultado de una transformación de estado sólido sin difusión.



**Figura 1-16** Estructura microscópica de Martensita, analizada a 500 aumentos

### 1.3.6.6. Troostita

Es un agregado extremadamente fino de cementita y de hierro alfa. Se produce por enfriamiento de la austenita a velocidad ligeramente inferior a la crítica de temple, o por transformación isotérmica de la austenita a temperatura de 500 °C a 600 °C aproximadamente según sea la composición de los aceros.

Sus propiedades físicas son intermedias entre la martensita y la sorbita. Es magnética.

Tiene una resistencia a la tracción de 140 a 175 Kg/mm<sup>2</sup>, su dureza es de 400 a 500 Brinell, y el alargamiento de 5 a 10%. Es un constituyente nodular, obscuro (Ver **Figura 1-17**).



**Figura 1-17** Estructura microscópica de Troostita, analizada a 1,000 aumentos.

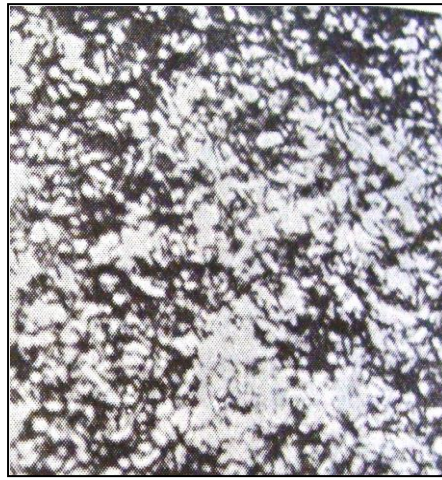
### 1.3.6.7. Sorbita

Es un agregado fino de cementita y hierro alfa. Se obtiene por enfriamiento de la austenita a velocidad bastante inferior a la crítica de temple o por transformación isotérmica de la austenita en la zona de 600 °C a 650 °C aproximadamente.

Su resistencia a la tracción es de 88 a 140 Kg/mm<sup>2</sup>, su dureza de 250 a 400 Brinell y su alargamiento es de 10 a 20%. Es el constituyente de máxima resistencia de los aceros.

Con pocos aumentos aparece mal definida en forma de manchas difusas, pero con grandes ampliaciones se ve en forma de pequeños gusanillos y a veces como granos blancos muy fino sobre un fondo oscuro. (Ver **Figura 1-18**).

Es el constituyente de casi todos los aceros forjados y laminados, pues la velocidad de enfriamiento en estos procesos no suele ser suficientemente lenta para la formación de perlita.



**Figura 1-18** Estructura microscópica de sorbita, analizada a 500 aumentos.

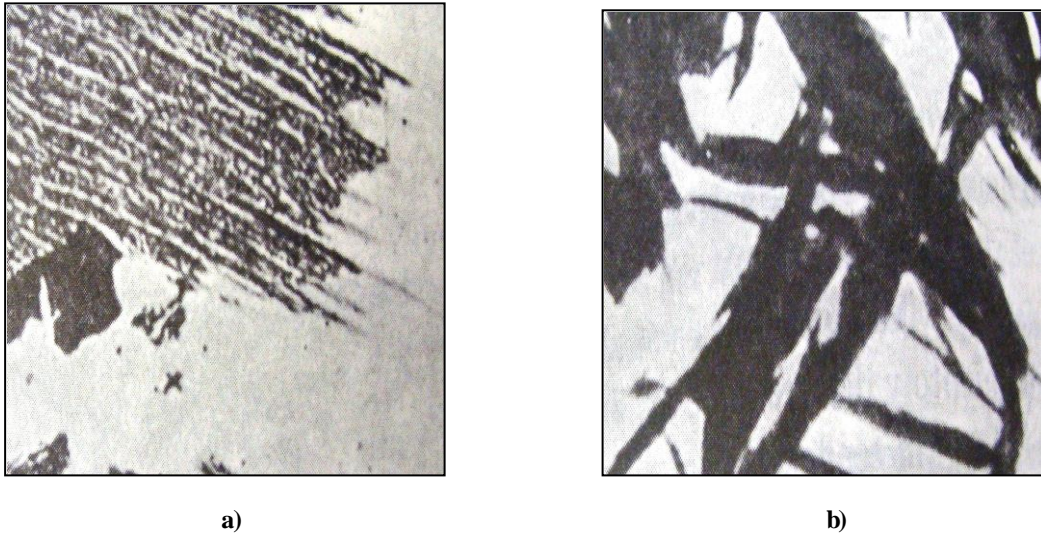
### 1.3.6.8. Bainita

Componente característico en el tratamiento isotérmico de Austempering. Se diferenciaron desde un principio de su estudio dos tipos de estructuras.

La bainita superior de aspecto arborescente (Ver **Figura 1-19 inciso a**), formada a 500°C-550 °C, que difiere bastante de la bainita inferior, formada a más baja temperatura 250°C-400 °C, que tiene un aspecto acicular bastante parecido a la martensita (Ver **Figura 1-19 inciso b**).

La bainita superior está formada por una matriz férrica conteniendo carburos (en los aceros al carbono, cementita).

Las placas discontinuas de los carburos tienden a tener una orientación paralela a la dirección de las agujas de la propia bainita.



**Figura 1-19.** Estructura metalografica de Bainita a diferentes temperaturas. **a)** Bainita superior de aspecto arborescente, obtenida 540 °C. **b)** Bainita inferior acicular, obtenida en un acero de 0.90% de C a 290 °C.

### 1.3.6.9. Carburos

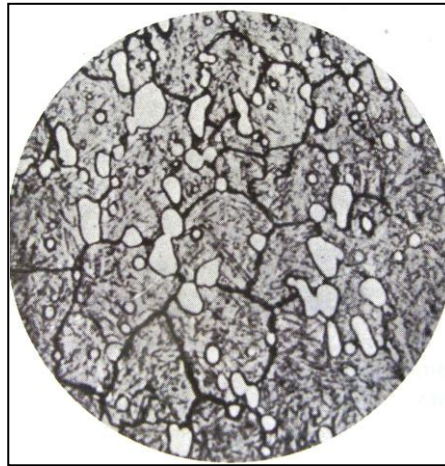
Son cuerpos muy duros que se forman al combinarse algunos elementos especiales con el carbono. De acuerdo con su constitución, se pueden considerar, tres clases diferentes.

1. Los carburos simples que están formados por un elemento especial combinado con el carbono.
2. Los carburos dobles de un elemento especial y hierro.
3. Los carburos constituidos por mezclas isomorfas de un carburo simple con el carburo de hierro.

Se presentan principalmente en los aceros rápidos (Ver **Figura 1-20**), aceros indeformables con alto contenido en cromo etc., siendo el cromo, tungsteno, molibdeno y vanadio los elementos que lo forman.

Una de las propiedades de los aceros con carburos es la facultad que poseen de conservar su dureza cuando son calentados a temperaturas relativamente elevadas, mientras que los aceros al carbono templados, de estructura martensíticas, se ablandan mucho más

rápida. Por eso se utilizan esos aceros para fabricar herramientas que conservan su poder cortante aun trabajando casi al rojo.



**Figura 1-20** Estructuras de carburos en aceros rápidos. Imagen obtenida a 2,500 aumentos.

#### **1.3.6.10. Inclusiones no metálicas**

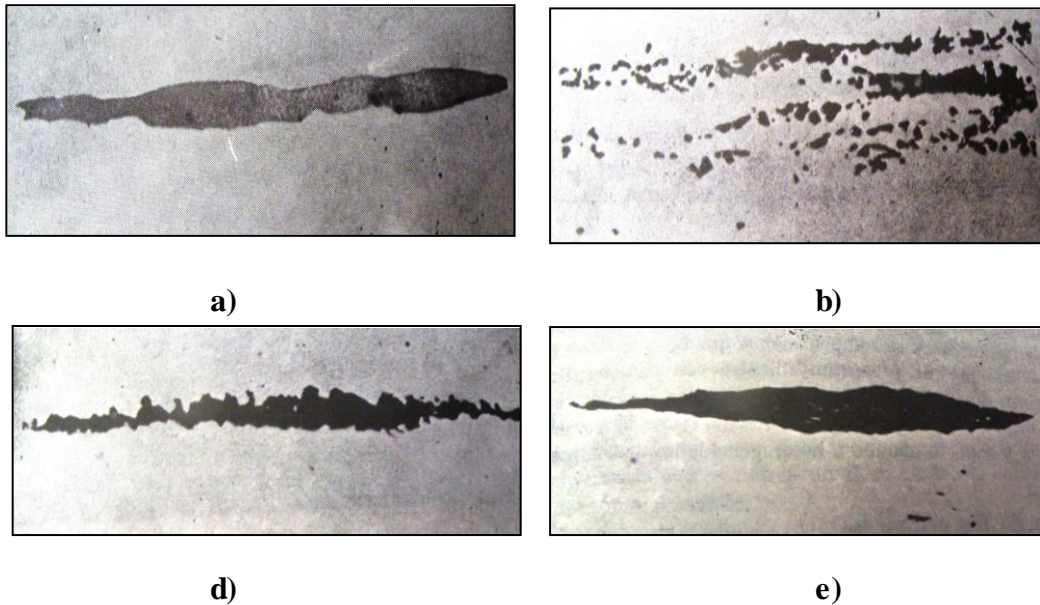
Son elementos extraños en la matriz metálica que aparecen en los aceros, siendo muy perjudicial su presencia, ya que reducen sus características y propiedades.

Pueden provenir de las escorias, refractarios o de las materias producidas en los procesos de oxidación y desoxidación.

Se pueden clasificar en los siguientes grupos: sulfuros, óxidos y silicatos.

1. Sulfuros: El más importante es el sulfuro de manganeso (Ver **Figura 1-21 inciso a**). Es plástico, de color gris paloma, se deforma y alarga por forja y laminación. Es menos perjudicial que los óxidos y silicatos.
2. Óxidos: El óxido que con más frecuencia se presenta en los aceros es la alúmina (Ver **Figura 1-21 inciso b**). Es muy dura y frágil. En la forja y laminación se rompe y dispersa apareciendo siempre de color oscuro, de pequeño tamaño, en forma de grupos o rosarios. Se presenta en los aceros desoxidados con aluminio.

3. Silicatos: Son inclusiones muy peligrosas porque son las que más reducen las características de los ceros. Suelen presentarse silicatos complejos de manganeso, hierro, cromo etc., (Ver **Figura 1-21 inciso c** y **Figura 1-21 inciso d**) se alargan y rompen en la laminación y forja.



**Figura 1-21.** Inclusiones de silicatos. **a)** Inclusión de Sulfato de Manganeso. Imagen a 250 aumentos. **b)** Inclusión de Alúmina. Imagen a 250 aumentos. **c)** Inclusión de Silicato Angular. Imagen a 250 aumentos. **d)** Inclusión de Silicato Vítreo. Imagen a 250 aumentos.

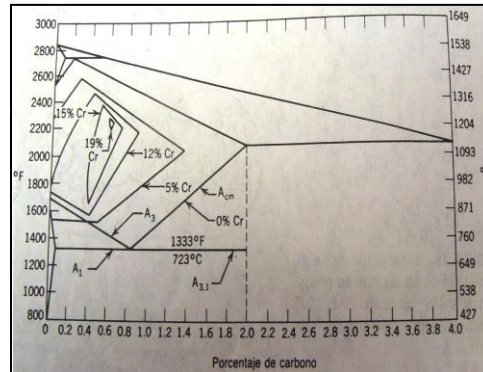
### 1.3.7. Elementos aleados: Distribución y Efectos

Los elementos aleantes hacen que las líneas de transformación del diagrama hierro-carbono se muevan, un elemento aleante común es el cromo.

Considerando la zona de austenita en el diagrama hierro-carbono (Ver **Figura 1-22**), puede observarse que el efecto de incrementar el contenido de cromo es el de disminuir el rango de la austenita. Esto hace que se incremente el rango de la ferrita.

Otros ejemplos de elementos aleantes que también son promotores de ferrita son: Molibdeno, Silicio y Titanio.

El Níquel y el Manganeso tienden a incrementar el rango de la austenita y a bajar la temperatura de transformación (de austenita a ferrita). Un gran porcentaje de estos metales hará que los aceros permanezcan austeníticos a temperatura ambiente [6].



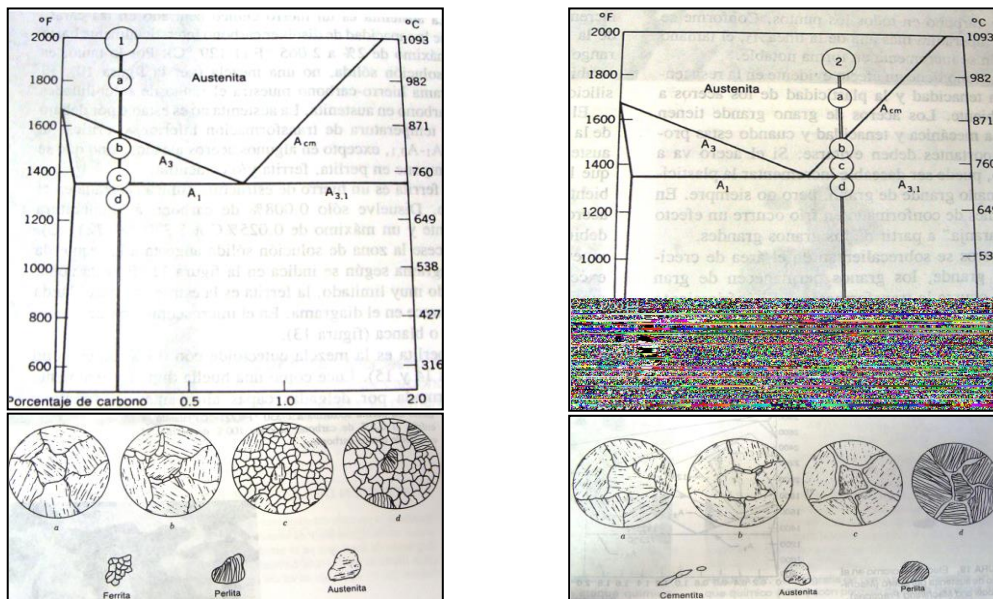
**Figura 1-22** Efecto del Cromo en el rango de austenita del acero.

Los diferentes elementos aleados se pueden encontrar en los aceros recocidos en algunas de las siguientes formas:

- a) Disueltos en la ferrita: Ciertos elementos se disuelven en el hierro alfa o ferrita lo mismo que el azúcar en el agua. Los más destacados son el Níquel, Silicio, Aluminio, Manganeso, Cobre, Fosforo y Cromo [2].
- b) Combinados con el carbono: Hay elementos que tienen tendencia a formar con el carbono carburos simples o complejos, que son cuerpos muy duros que hacen a los aceros muy resistentes al desgaste. Los elementos que forman carburos son el Cromo, Molibdeno, Manganeso, Wolframio y Vanadio.
- c) Combinados con otros elementos: Formando inclusiones no metálicas. El Si forma silicatos o silico-aluminatos de cal o de hierro, manganeso y cromo. El aluminio forma alúmina y silico-aluminatos. El titanio puede presentarse en forma de óxido de titanio y de nitruros y ciano-nitruros de titanio. El manganeso forma silicatos y sulfuros.
- d) Dispersos: Formando cuerpos raros. El Cu, cuando su porcentaje es mayor de 0.75% Y EL Pb en algunos casos especiales [2].

### 1.3.8. Enfriamiento lento de las aleaciones Hierro-Carbono de alto y bajo contenido de carbono

Para un acero al carbono simple menor al punto eutectoide, tal como un acero SAE 1020 (0.20% de carbono) durante el enfriamiento, puede verse en la **Figura 1-23 inciso a)** que en la línea 1 en el punto *a* toda la microestructura es austenita. Después de cruzar la línea  $A_3$  (punto *b*), la ferrita se empieza a formar a lo largo de los límites de grano de la austenita (Ver **Figura 1-23 inciso b)** [6].



**Figura 1-23.** Diagrama Hierro-Carbono. **a)** Microestructuras a diversas temperaturas de un acero SAE 1020 enfriado muy lentamente. **b)** Microestructuras a diversas temperaturas que se producen al enfriar un acero SAE 1095.

Un posterior enfriamiento hace que se forme más ferrita. Debido a que la solubilidad del carbono en la ferrita es tan baja, el exceso de carbono debe disolverse en la austenita restante. En el punto *c*, la mayor parte de la austenita se ha vuelto ferrita. La austenita restante contiene 0.8% de carbono. Conforme el acero cruza la línea  $A_1$ , la restante austenita rica en carbono se transforma en el eutectoide o perita en el punto *d*.

En aceros de alto contenido de carbono (SAE 1095) el punto *a* consiste totalmente de austenita y carbono disuelto intersticialmente. Cuando el acero se enfría hasta el punto *b*, ha cruzado la línea  $A_{cm}$ . La línea  $A_{cm}$  indica el límite de solubilidad del carbono en la

austenita. Puesto que la austenita ya no puede contener todo el carbono en solución, empieza a aparecer la cementita a lo largo de los límites de grano. En el punto *c*, la solubilidad de la austenita ha caído aún más, de modo que la cementita adicional ha formado una red bastante continua entre los granos de austenita. Ahora, el contenido de carbono de la austenita restante es la composición eutectoide de 0.8% de carbono. En el punto *d*, el acero ha cruzado la línea  $A_{3,1}$  y la austenita restante se transforma en perlita [6].

## 1.4. Estudios realizados sobre Nitruración

A continuación se presentan una serie de investigaciones relacionadas al tema de nitruración.

I. M. Pohrelyuk y colaboradores realizaron la investigación denominada “*Properties and structural-phase state of the surface layers of titanium after combined nitriding*” en la cual estudiaron la nitruración simultánea en aleaciones de titanio por dos métodos: saturación por termodifusión e implantación iónica (Nitrógeno). En el estudio realizado, se demostró que la implantación del ion Nitrógeno cambia el estado de la superficie de la aleación de titanio e incrementa la micro-dureza en la superficie [10].

Los investigadores A.V. Bil’chenko y S.A. Dunaeva realizaron la investigación denominada “*Characteristics of Nitriding of cast irons*” en la cual estudiaron los factores que influyen en la cinemática del proceso, el mecanismo por el cual se forma el nitruro durante el proceso de nitruración, así como la cantidad de carbono en el hierro fundido. Se concluyó que conforme aumenta la concentración de carbono en hierro fundido la profundidad de la capa nitrurada y su espesor disminuye. La combinación del carbono cementita inhibe el crecimiento de la capa de difusión, esto se explica por el bajo coeficiente de difusión del nitrógeno en cementita [11].

Los investigadores Yu. A. Belov y G.M. Markin realizaron la investigación denominada “*Nitriding of Steel 25Kh5MA*” en la cual estudiaron la variación en la profundidad de capa y la dureza de diferentes muestras de 8-12 mm de diámetro y 20 mm de largo. Esto con la finalidad de mejorar la vida útil de los pares de precisión para bombas de combustible de alta presión [12].

---

N.I. Tishchenko y colaboradores, realizaron la investigación denominada “*Surface modification of silicon nitride nanofibers with titanium nitride particles*”, en el cual estudiaron el impacto de recubrir nanofibras de nitruro de silicio con partículas de nitruro de titanio formados por deposición de dióxido de titanio y peróxido de titanio con hidrólisis controlada de cloruro de titanio seguido por nitruración con gaseosa (Amoniac). La nitruración se realizó dentro de un intervalo de temperatura de 700-900°C. Este rango permite obtener la formación de 5 a 15 partículas de nitruro de titanio. La capa amorfa de nitruro de silicio limita la nucleación del nitruro de titanio y por lo tanto la formación de revestimientos continuos [13].

Los investigadores Yu. M. Lakhtin y N.V. Silina realizaron la investigación denominada “*The high hardness of alloyed ferrite after nitriding*”, en el cual estudiaron el efecto individual de los diferentes elementos utilizados como aleantes en los aceros, específicamente Aluminio, Cromo, Vanadio, Titanio, los cuales es bien conocido son utilizados para aumentar de forma considerable la dureza del nitrado así como el estudio de las transformaciones estructurales. Concluyeron que la nitruración a temperaturas superiores a los 550° conduce a una redistribución difusional de los átomos de aluminio, en contraste con los otros elementos aleantes, los cuales se distribuyen de forma uniforme en la solución de un sólido con nitrógeno. A su vez, se concluyó que el aluminio no aumenta la solubilidad del nitrógeno en ferrita y no forma nitruros [14].

Aleaciones con alta concentración de aluminio (6.85%) poseen una poligonal altamente desarrollada en condiciones originales, lo que acelera en gran medida la difusión del nitrógeno. Los elementos aleantes diferentes del Al, aumentan de forma sustancial la solubilidad del nitrógeno.

El investigador G.N. Neustoyev realizó la investigación denominada “*Soft nitriding of structural steels*”, la cual es practicada por técnicos extranjeros en aquellas piezas que por su diseño estarán sometidas a desgaste. Este proceso se lleva a cabo dentro de un rango de temperaturas que comprenden los 550-580 °C en periodos de 3 horas. Específicamente, la nitruración blanda se lleva a cabo en un baño que contiene 45% de NaCN y 35% de KCNO. Este método es utilizado para el fortalecimiento de herramienta estructural, acero inoxidable y aceros resistentes a la oxidación. Como resultado de la aplicación de este tipo

---

de nitruración en engranajes de dientes no tratados, el investigador G.N. Neustoyev obtuvo un aumento en la carga específica admisible el cual varío de 0.25 Kg/mm<sup>2</sup> a 2.3 Kg/mm<sup>2</sup> [15].

El investigador A.N. Tarasov realizó la investigación denominada “*Structure and properties of diffusion layers formed on alloy steels due to carburizing in activated charcoal mixtures*” en la cual estudió el proceso termoquímico con el cual se tratan las herramientas, accesorios y piezas de aleaciones de aceros que son resistentes al desgaste, específicamente, las capas de difusión de carburo a altas temperaturas de cementación en una base sólida carburante. El estudio se desarrolló con diferentes mezclas de carbón y la activación de aditivos, específicamente, nitrógeno [16].

El investigador I.M. Pohrelyuk realizó la investigación denominada “*Nitriding titanium under nonisothermal conditions*”. Estableció que un cambio cíclico en la temperatura de curso de calentamiento intensifica el proceso de nitruración. Este cambio afectó la formación y propiedades de una película de nitruro y, por tanto, el resultado de la nitruración [17].

A través de su experimentación, I.M. Pohrelyuk concluyó que la variación cíclica de la temperatura en el curso de calentamiento de titanio intensifica la difusión saturada de nitrógeno. A medida que la pureza del nitrógeno se incrementa, el proceso se vuelve más activo, es decir, los calentamientos cíclicos del nitrógeno proporcionan una mayor característica mecánica del titanio en comparación con los de funcionamiento continuo.

El investigador G.A. Solodkin y colaboradores, realizaron el estudio denominado “*Prediction of the composition of the carbonitride phase in the zone of inner nitriding of steels*”. En base al estudio realizado y como es bien conocido, la capa que se forma durante el proceso de nitruración está estrechamente relacionada al grado de aleación que presenta el acero. Hasta el momento no se ha elaborado un método teórico para predecir la composición de los carbonitruros precipitados. En la actualidad los aceros para nitrurar son aquellos aleados con Vanadio, Cromo y Titanio. En esta investigación se estudió la transición VC/VN, TiC + TiN, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> + CrN. Como resultado se obtuvo un método para

predecir la composición de la fase carbonitrurada en la zona interior de la nitruración de aceros, con el objetivo de optimizar los resultados de dureza [18].

El investigador A.V. Bil'chenko y colaboradores, realizaron el estudio denominado "*Nitriding of Martensitic-Austenitic steel with a different original structure*". En este trabajo se realizó un estudio de los efectos de fase inicial y las condiciones estructurales en la resistencia a la estructura, la dureza, y el desgaste de las capas nitruradas de alta resistencia martensítico-acero austenítico N26Yu3TB ( 0.02% C, 26.3 % Ni, 2.6 % Al, 1.2 % Ti, 0.4% Nb). Estos aceros permitieron estudiar diferentes aspectos de la nitruración (estructural) que difieren entre ellos pero son de la misma composición química [19].

El investigador R. Pelka y colaboradores, realizaron el estudio denominado "*The effect of iron nanocrystallites' size in catalysts for ammonia synthesis on nitriding reaction and catalytic ammonia decomposition*". El proceso de nitruración investigado fue a una temperatura de 475 °C y a presión atmosférica. Así, en esta investigación se concluyó que junto con un aumento de la media del tamaño de los nano cristales de hierro, el grado de nitruración sólida en la muestra fue aumentando. Al mismo tiempo, la tasa de reacción de la superficie de la descomposición catalítica de amoníaco fue disminuyendo. Cuanto mayor es la superficie específica, mayor es la actividad que se observa del catalizador [20].

Los investigadores D. Farkas y K. Ohla, realizaron el estudio denominado "*Modeling of Diffusion Processes During Carburization of Alloys*". El modelo fue desarrollado para el cálculo de diferencia finita de perfiles de carburización en aleaciones de alta temperatura. El método incluye el efecto debido a los elementos sustitutos que alean y preferencialmente son oxidados. Esto puede ser usado para tratar casos como carburización de aleaciones pre-oxidadas o la oxidación simultánea y carburización. Hasta tres tipos distintos de reacciones de precipitación de carburo puede ser incluido en los cálculos. El producto de solubilidad es calculado para cada reacción y la cantidad de C que reacciona es quitado del proceso de difusión.

El modelo puede tratar dos juegos de condiciones divisorias correspondientes a la presencia o la ausencia de una escala protectora de óxido, Para la comparación, en condiciones protectoras de carburización, perfiles fueron obtenidos para aleaciones pre-oxidadas.

La aplicación del modelo cede valores para las difusividades de C en las aleaciones probadas. En condiciones no protectoras, las predicciones del modelo fueron comparadas a perfiles de carburización anteriormente probados. El método es capaz de predecir niveles de carburo máximos y profundidades de penetración para aleaciones diferentes en varias condiciones y puede ser usado en la selección y el diseño de aleaciones de alta temperatura para el empleo en entornos carburizados [26].

Los investigadores V. I. Belyakova and M.F. Alekseenko realizaron el estudio denominado “*Structure and Properties of Carburized Martensite Stainless Steels*”. La Carburización de aceros con una alta concentración de Cromo ha mostrado que es imposible obtener la profundidad de capa necesaria y dureza en el intervalo de temperatura de 900°C-925°C.

Sin embargo, fue encontrado que en el acero Kh17N2 se obtiene una profundidad de capa equivalente a 1 mm de espesor a temperaturas que varían de 950°C a 1000°C y 1050°C. El aumento de temperatura en un intervalo de 950°C a 1000°C reduce el tiempo de carburización en un factor menor, a diferencia de lo que sucede a una temperatura mayor (1050°C).

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que la temperatura óptima de carburización para aceros con alto contenido de Cromo no debe exceder los 1000°C [27].

Los investigadores A. V. Belotskii, P. V. Dukhota, and V. G. Permyakov realizaron el estudio denominado “*Nitriding and Heat Treatment of Iron Alloys with Titanium*”. En esta investigación se realizó nitruración a alta temperatura en hierro aleado con 1.96, 2.37, y el 2.83 % Ti. Las aleaciones eran nitruradas con el amoníaco en una cámara de rayos X. Las muestras fueron calentadas pasando una corriente eléctrica por ellos para una mayor activación de la fase gaseosa. Las muestras eran primero nitruradas a 820 °C por 1 h para obtener una fase homogénea original y luego calentado a 870°C durante 10 minutos para disolver la fase formada sobre la superficie, seguida por un enfriamiento a una temperatura dada y sosteniendo esta temperatura hasta la descomposición completa de la austenita [28].

---

Los autores Rafa Pelka y Walerian Arabczyk realizaron el estudio denominado ***“Modelling of nanocrystalline iron nitriding process, influence of specific surface area”***. En este estudio las muestras de acero de varias superficies específicas se sometieron al tratamiento termoquímico de nitruración con amoníaco en un reactor tubular donde la medida continua termogavimétrica y las medidas de concentración de hidrógeno en la fase gaseosa simultáneamente fueron realizadas.

En esta experimentación, el proceso de nitruración fue realizado bajo presión atmosférica a una temperatura de 475 °C . Fue observado que, con un aumento del tamaño medio de los nanocristales del acero, el mínimo potencial de nitruración de la fase gaseosa también aumentó [29].

El autor A. N. Tarasov realizó el estudio denominado ***“Cutting and Shaping tools from nitrocarburized hig-speed steels: a possible alternative to hard-alloy tools”***. Es bien conocido el método especial utilizado por los diferentes fabricantes de herramientas especiales con una resistencia aportada por la utilización de ambientes carburizados o nitro-carburizados con la formación de una capa de difusión en la cual se contiene más del 60-65% de carburos [30].

Este tipo de métodos proporcionan alta dureza superficial y resistencia al calor de la capa con una fragilidad mínima, así como la dureza del corazón del instrumento usando aceros de bajo contenido de carbón.

El investigador A.N.Tarasov utilizó el acero R6M5 y R6M5-P expuestos a ambientes nitro-carburizados.

Es así como, una vez realizada la etapa de experimentación, A.N.Tarasov concluyó que los aceros después de haber sido expuestos a un ambiente nitro-carburizado a alta temperatura obtienen mayor resistencia a agrietarse y dureza en comparación con herramientas de aleación utilizadas comúnmente, así como, las herramientas de acero R6M5 expuestas a ambientes nitro-carburizados no tienen una resistencia menor en comparación con aleaciones del tipo VK utilizadas para trabajos de resistencia, teniendo una reducción de costos en un factor de 1.2 y de un 15-20% respectivamente.

Esto permitió al investigador A.N.Tarasov recomendar este tipo de tecnología para la producción de herramientas de corte u otro tipo de herramientas comerciales.

Los autores Sule Yildiz Sirin y Erdinc Kaluc realizaron el estudio denominado “*Structural surface characterization of ion nitride AISI 4340 steel*”. En este experimento, se varió el tiempo, la temperatura y las propiedades fueron evaluadas a través de un perfil de dureza, grosor y profundidad de capa utilizando como herramientas un micro-durómetro, microscopía óptica y difracción de rayos X [31].

Los resultados de esta investigación arrojaron que el grosor de la capa de compuesto aumenta conforme es creciente el tiempo y la temperatura a la cual fue expuesto el espécimen.

# U.A.B.C

## Capítulo 2. MARCO TEORICO: CONCEPTOS GENERALES Y TRATAMIENTO DEL ACERO.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA.**

**“NITRURACIÓN SÓLIDA CATALIZADA POR UREA Y  
SULFATO DE AMONIO EN ACEROS DE BAJO  
CONTENIDO DE CARBONO”**

**TESISTA: BLANCA SARAI DIAZ SILVA.**

---

## Capítulo 2. Marco Teórico: Conceptos generales y tratamientos del acero.

### 2.1 Introducción

En el presente capítulo se desarrollarán todas aquellas herramientas teóricas y normas, así como la introducción a los Tratamientos Térmicos, conocimientos necesarios y concernientes a la solución del problema.

### 2.2 Diseño de Experimentos

Un diseño de experimentos se define como aquella aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender mejor situaciones complejas de relación causa-efecto [23].

#### 2.2.1 Tipos de Diseño de Experimentos

Un experimento es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del producto o resultado [23].

Existen diferentes tipos de experimentos los cuales a continuación se describen:

1. Experimentos de Comparación Simples: Estos experimentos son utilizados para comparar dos condiciones [24].
2. Experimentos con un solo factor: Análisis de Variancia. Diseño de experimento utilizado para aquellos experimentos con un solo factor o unifactoriales con  $a$  niveles del factor [24].
3. Diseño de bloques completos al azar: Conocido como diseño de doble vía, se aplica cuando el material es heterogéneo. Las unidades experimentales homogéneas se agrupan formando grupos homogéneos llamados bloques. Entre las características de este tipo de experimentos se encuentran: Las unidades experimentales son heterogéneas, las unidades homogéneas están agrupadas formando los bloques, en

cada bloque se tiene un número de unidades igual al número de tratamientos (bloques completos), los tratamientos están distribuidos al azar en cada bloque, el número de repeticiones es igual al número de bloques. [25].

4. Diseño de cuadrado latino: Este modelo se basa en aprovechar la simetría del experimento factorial seleccionando un conjunto de condiciones experimentales con la condición de que cada nivel de un factor aparezca una vez con cada uno de los niveles de los otros factores. Por tanto, el diseño de cuadrado latino se puede utilizar si se verifican las siguientes condiciones: Es un diseño de experimentos con tres factores, los tres factores tienen el mismo número de niveles:  $K$ . No hay interacciones entre los tres factores. El diseño en cuadrado latino está especialmente indicado para estudiar un factor-tratamiento con  $K$  niveles y con dos factores-bloque de  $K$  bloques cada uno. Este diseño se basa en el concepto de cuadrado latino que es el siguiente.
5. Diseño de cuadrados Greco-latinos: Diseño de experimentos que puede utilizarse para controlar sistemáticamente tres fuentes extrañas de variabilidad [24].
6. Diseño por bloques incompletos: Diseño de experimento utilizado cuando las comparaciones entre todos los tratamientos tienen la misma importancia, estas deben elegirse de manera que ocurran en forma balanceada dentro de cada bloque, es decir, que cualquier par de tratamientos ocurran justo el mismo número de veces que cualquier otro par [24].
7. Diseños Factoriales: Diseños de experimentos en los que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento [24].
8. Diseño Factorial  $2^k$ : Diseños de experimentos en los cuales cada factor posee dos niveles: alto y bajo. Estos niveles pueden ser cuantitativos (valores de temperatura, presión o tiempo). También pueden ser cualitativos (2 máquinas, 2 operadores, nivel superior y nivel inferior del factor) [24].
9. Diseño Factorial  $3^k$ : Diseño que consta de  $k$  factores con tres niveles cada uno. Los factores y las interacciones se representarán mediante letras mayúsculas. Sin pérdida de generalidad, los tres niveles de los factores pueden referirse como nivel inferior, intermedio y superior. Estos niveles se representan mediante los dígitos 0 (nivel inferior), 1 (nivel intermedio), 2 (nivel superior) [24].

10. Diseños Jerárquicos o (Anidados): Este tipo de arreglos se presentan cuando los niveles de un factor (por ejemplo, el factor B) son similares pero no idénticos para diferentes niveles del otro factor (por ejemplo, el factor A) [24].
11. Diseño de experimentos con mezclas: En este tipo de diseño de experimentos, los factores son los componentes o ingredientes de una mezcla y los niveles de dichos ingredientes no son independientes [23].

### 2.2.2 Unidad Experimental

La unidad experimental es la pieza(s) o muestra(s) que se utiliza para generar un valor que sea representativo del resultado del experimento o prueba [23].

La unidad experimental en este proceso será el acero A36. Sus características son:

1. Varilla cuadrada de ½ pulgada basada en la norma ASTM A36/A36M-08 CARBON STEEL, la cual hace referencia a las especificaciones del acero al carbono para estructuras (Ver **Tabla 2-1**). En esta norma se especifican las características químicas, las cuales se presentan a continuación:

**Tabla 2-1** Características químicas del acero A36

	≤3/4" (≤20)	>3/4" ≤1 ½"	>1 ½" ≤2 ½"	>2 ½" ≤4"	>4"
		(>20≤40)	(>40≤65)	(>65≤100)	(>100)
C% Max	0.25	<b>0.25</b>	0.26	0.27	0.29
Mn %	...	<b>0.8-1.2</b>	0.8-1.2	0.85-1.2	0.85-1.2
P % Max	0.04	<b>0.04</b>	0.04	0.04	0.04
S % Max	0.05	<b>0.05</b>	0.05	0.05	0.05
Cu % Min	0.20	<b>0.20</b>	0.20	0.20	0.20

### 2.2.3 Variables, factores y niveles

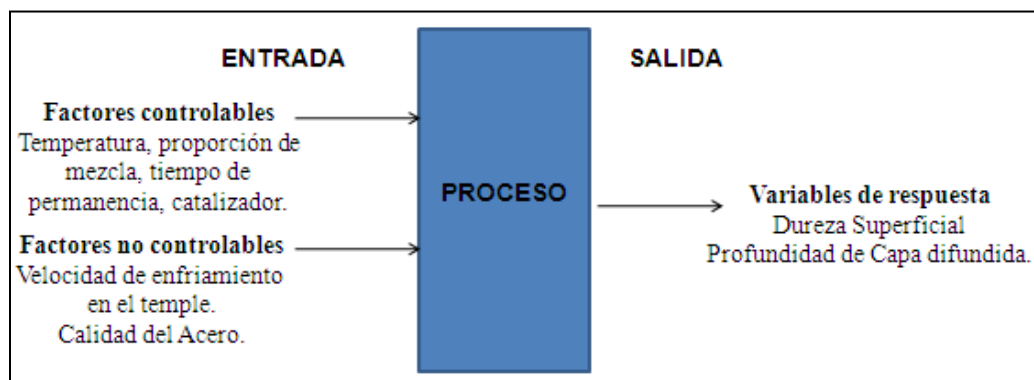
En todo proceso intervienen distintos tipos de variables o factores, los cuales se ejemplifican en la **Figura 2-1**.

Variable(s) de respuesta: A través de esta(s) variable(s) se conoce el efecto o los resultados de cada prueba experimental, por lo que pueden ser características de la calidad del producto y/o variables que miden el desempeño de un proceso [23].

**Factores controlables:** Son variables de proceso o características de los materiales experimentales que se pueden fijar en un nivel dado.

**Factores no controlables o de ruido:** Son variables o características de los materiales y métodos que no se pueden controlar durante el experimento o la operación normal del proceso [23].

**Factores estudiados:** Son las variables que se investigan en el experimento para observar cómo afectan o influyen en la variable de respuesta.



**Figura 2-1** Variables del proceso.

**Niveles y tratamientos:** Los diferentes valores que se asignan a cada factor estudiado en un diseño experimental se llaman niveles. Una combinación de niveles de todos los factores estudiados se llama tratamiento o punto de diseño [23].

#### 2.2.4 Etapas en el diseño de experimentos

El arreglo formado por los diferentes tratamientos que serán corridos, incluyendo las repeticiones, reciben el nombre de matriz de diseño o solo diseño.

Para que un estudio experimental sea exitoso es necesario realizar, por etapas, diferentes actividades las cuales a continuación se desarrollaran.

---

### **2.2.4.1 Planeación y realización.**

#### **Determinación del problema u objeto de estudio.**

En la actualidad, el tratamiento termoquímico de nitruración gaseosa representa una opción para obtener buenos resultados en la mejora de propiedades mecánicas de los aceros.

Este procedimiento permite mejorar la resistencia a la corrosión, obtención de mayor dureza, mayor resistencia a la fatiga y resistencia al desgaste en comparación con el método de cementación.

Sin embargo, en términos económicos es bien conocido el alto precio que tiene la realización de la nitruración gaseosa debido a la larga duración del tratamiento, entrenamiento adecuado del personal, extremo cuidado de las piezas durante el proceso y el costo de las instalaciones necesarias para su realización.

El objeto de estudio se enfoca en la obtención de las condiciones óptimas (tiempo de permanencia, mezcla nitrurante y temperatura) en aceros de bajo contenido de carbono, específicamente el acero A36, comparando dos catalizadores (Urea y Sulfato de Amonio), que fungirán como fuentes de nitrógeno a través del tratamiento termoquímico de nitruración sólida. Lo anterior con la finalidad de obtener los mismos resultados de dureza superficial que se obtienen actualmente con la nitruración gaseosa, a un bajo costo de reproducción y sin un alto riesgo en el proceso de obtención a través de equipos convencionales.

#### **Elección de la(s) variable(s) de respuesta que será medida en cada punto del diseño y verificar que se mide de manera confiable.**

La variable de respuesta será la dureza superficial del material (micro-dureza).

Se utilizará un Micro-durómetro para la obtención de micro dureza. Son utilizados en la industria y su aplicación va desde el control de pequeñas piezas, cables, laminar y flejes de poco espesor hasta el estudio de capas superficiales endurecidas y componentes aislados de microestructuras metalográficas.

---

Estos equipos se caracterizan por su precisión y rapidez. El sistema de medida por ocular con doble línea facilita en gran manera la medición, al no ser necesario reposicionar la pieza. El microprocesador calcula automáticamente la dureza.

**Determinación de los factores a estudiarse o investigarse, de acuerdo a la supuesta influencia que tienen sobre la respuesta.**

De acuerdo a la bibliografía, los factores que son determinantes en los tratamientos termoquímicos son el tiempo de permanencia y la temperatura, sin embargo, no se puede dejar de lado la influencia que tiene la calidad del material, es decir, el porcentaje de elementos químicos que ayudan al acero elegido a formar compuestos nitrurados y por consecuencia aumentar la dureza superficial de la pieza.

A su vez, el factor de cantidad de mezcla (catalizadores) será un elemento que, como parte de la experimentación, arrojará resultados determinantes y nos permitirá analizar y determinar al final que factor es predominante y cuál será la mezcla óptima y sus condiciones.

**Seleccionar los niveles de cada factor, así como el diseño experimental adecuado a los factores que se tienen y al objeto del experimento.**

En esta etapa experimental se utilizará el diseño de experimentos factorial  $2^k$ , el cual se caracteriza por investigar todas las posibles combinaciones de 2 niveles (bajo y alto) para cada factor en cada ensayo completo o replica del experimento. Para observar el comportamiento de las variables a utilizar, a su vez se recurrirá a la reproducción de puntos centrales, es decir, niveles intermedios para cada variable.

Para probar el impacto de un factor en general bastan dos niveles, salvo que por su naturaleza incluya tres o más niveles. Los niveles muy juntos no sirven para detectar el efecto de ese factor, mientras que niveles muy separados pueden causar problemas en la operación del proceso [23].

Por lo general, si se esperan diferencias pequeñas entre tratamientos será necesario un mayor tamaño de muestra. Aunque existen varios métodos para estimar el tamaño

---

muestral, muchas veces tienen poca aplicabilidad porque requieren cierto conocimiento previo sobre la varianza del error experimental [23].

Si se recurre a la experiencia, se observa que el número de replicas en la mayoría de las situaciones experimentales en las que se involucra un factor varía entre cinco y diez; incluso, en algunos casos puede llegar hasta 30. Por lo anterior se toman las siguientes consideraciones:

1. A menor diferencia que se espere en los tratamientos, mayor será la cantidad de replicas si se quieren detectar diferencias significativas, y viceversa, es decir, si se esperan grandes diferencias quizás con pocas replicas sea suficiente [23].
2. Si se espera mucha variación dentro de cada tratamiento, debido a la variación de fuentes no controladas como métodos de medición, medio ambiente, materia prima, etc., entonces se necesitarán más replicas [23].
3. Si son varios tratamientos (cuatro o más), entonces este es un punto favorable para reducir el número de replicas [23].

Además de lo anterior, es preciso considerar los costos y el tiempo global del experimento. De aquí que, si se toman en cuenta las consideraciones anteriormente expuestas, se podrá establecer el tamaño de muestra la cual permitirá responder en una primera fase las preguntas más importantes que se plantearon con el experimento.

En base a lo anterior, se concluyó tener un tamaño de muestra equivalente a 22 combinaciones por catalizador, dando un total de 44 especímenes (Ver **Figura 2-2**).

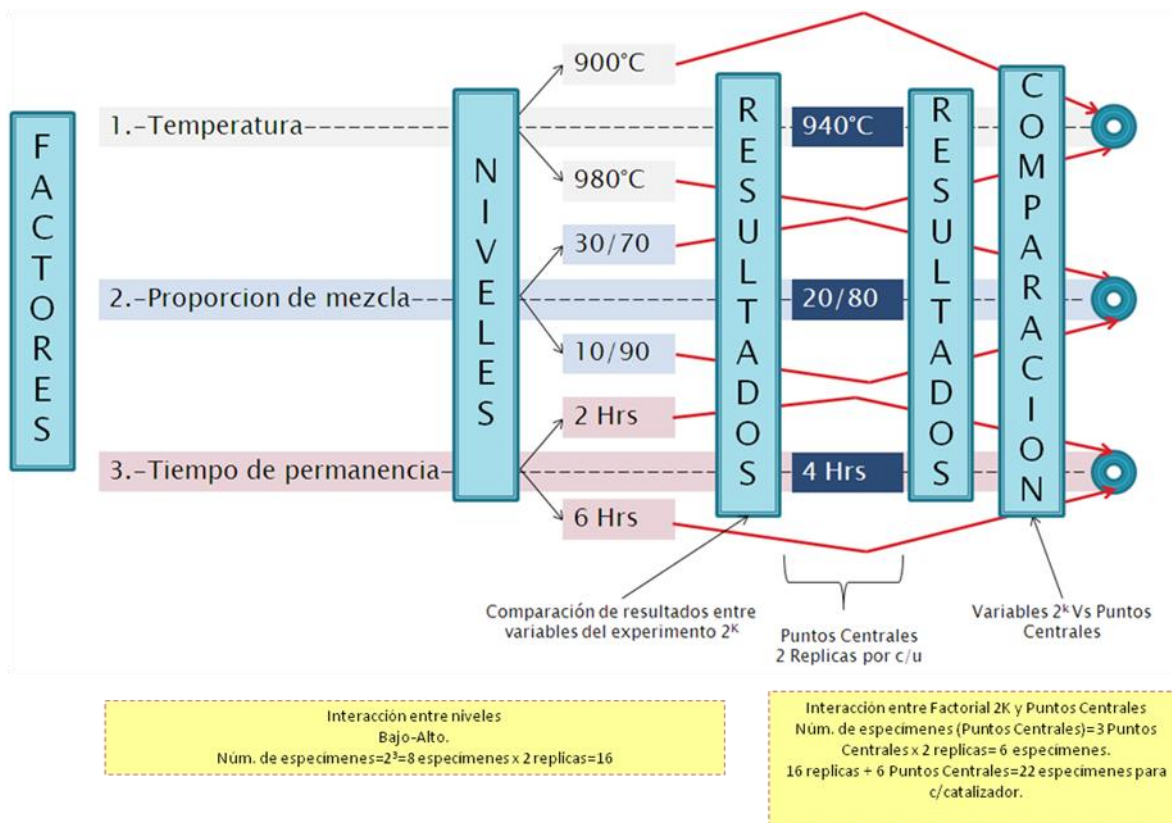


Figura 2-2 Diagrama de Flujo del Diseño de Experimentos  $2^K$

### 2.3. Propiedades mecánicas para caracterizar un material de ingeniería.

Las propiedades mecánicas de los materiales se refieren a la capacidad de los mismos de resistir acciones de cargas o fuerzas. Se puede decir que las propiedades mecánicas se clasifican en:

Por acción:

- Estáticas.
- Dinámicas:
- Cíclicas o de signo variable: las cargas varían por valor, por sentido o por ambos simultáneamente.

### **2.3.1.Dureza**

Se entiende por dureza la propiedad de la capa superficial de un material de resistir la deformación elástica, plástica y destrucción, en presencia de esfuerzos de contacto locales inferidos por otro cuerpo, más duro, el cual no sufre deformaciones residuales (indentador o penetrador), de determinada forma y dimensiones [24].

#### **2.3.1.1.Ensayos para la medición de dureza superficial y micro-dureza.**

Para poder señalar la calidad de los metales y sus posibles aplicaciones, es necesario conocer sus principales características, que se pueden determinar haciendo en cada caso los ensayos apropiados [2].

Entre las diversas características que pueden interesar en la industria, las características mecánicas son en general las que se determinan con más facilidad y también las más importantes para poder decir con cierto criterio el empleo adecuado de los metales en la construcción de máquinas, motores, edificios, puentes, vías férreas, etc [2]. Los ensayos en los metales se comenzaron a hacer muy recientemente. La primera máquina de tracción fue construida en 1750, y los primeros laboratorios se instalaron hacia el año de 1880 aproximadamente. En la actualidad todas las fábricas metalúrgicas y también las de maquinaria, motores y las de automovilismo, aviación, ferrocarriles y construcciones navales de alguna importancia, poseen laboratorios propios [2].

Entre los diversos fines para los que es interesante realizar estos ensayos, los más importantes son los siguientes:

- a) Para determinar las propiedades de los aceros y fijar sus posibilidades de utilización.
- b) Para efectuar el control de calidad durante los procesos de fabricación.
- c) Para determinar los tratamientos, composiciones o tipos de acero más apropiados para un uso determinado.
- d) Para establecer las causas de fracasos en servicios y determinar si unos materiales pueden ser reemplazados por otros.
- e) Para el estudio de nuevos tipos de aceros.

- f) Para investigación de nuevos procesos de fabricación.

### 2.3.1.1.1. Prueba o ensayo de dureza Brinell

Método propuesto por el profesor sueco J.A. Brinell, el cual consiste en aplicar y comprimir progresivamente sobre una superficie plana y lisa del material a ensayar, una bola de acero muy duro, manteniendo la presión durante un cierto tiempo para que se produzca una impresión o huella en forma de casquete esférico. Después se mide el diámetro de la huella con un pequeño microscopio de mano y se halla la dureza Brinell dividiendo la carga que ha actuado sobre la bola por la superficie de la huella. Esta superficie se calcula en función del diámetro de la huella producida. Para mayor comodidad existen tablas que señalan la dureza que corresponde a cada uno de los diferentes diámetros de las huellas desde 2 mm hasta 6 mm [2].

La dureza Brinell H se calcula por la siguiente fórmula:

$$H = \frac{P}{S} = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad 2.1$$

En la que H es la dureza Brinell; P es el peso (en Kg) aplicado; S la superficie (en mm<sup>2</sup>) del casquete esférico; D el diámetro de la bola (en mm), y d el diámetro del casquete esférico (mm) [2].

El número Brinell indica por tanto la presión en Kg por mm<sup>2</sup> que ha actuado sobre el material [2].

### 2.3.1.1.2. Prueba o ensayo de dureza Rockwell

El ensayo Rockwell se basa, como el de Brinell, en la resistencia que oponen los materiales a ser penetrados por un cuerpo más duro, pero se diferencia de aquél en que en el ensayo Brinell se determina la dureza en función de la superficie de la huella y en el Rockwell en función de la profundidad de penetración. Además, con la máquina Brinell la presión se aplica de una sola vez, y en el ensayo Rockwell actúan dos cargas diferentes. Primero se aplica una carga pequeña de 10 Kg y luego, además de aquélla, actúa otra carga

mayor de 90 o 140 Kg, según se emplee como cuerpo penetrador una bola o un diamante [2].

La cifras de dureza Rockwell son función de la diferencia entre la penetración conseguida cuando actúa la carga pequeña y la profundidad de la huella permanente que hicieron las dos cargas cuando actuaron a la vez [2].

La aplicación de la carga grande se hace a continuación de la pequeña sin mover la pieza de la máquina. Para piezas templadas y duras se emplea como cuerpo penetrador un cono de diamante tallado con ángulo de 120°, con la punta ligeramente esférica, con un radio de 1/64” y las durezas obtenidas se denominan Rockwell-C [2].

Para materiales blandos se utiliza una bola de acero templado de 1/16”, denominándose en este caso las durezas Rockwell-B.

En ambos casos el ensayo se verifica de forma parecida, empleándose la misma carga preliminar (de 10 Kg), y utilizando luego cargas principales de 90+10=100 Kg con la bola y de 140+10=150 Kg con el diamante [2].

En la actualidad, existen más escalas correspondientes a la dureza Rockwell, las cuales dependerán del grosor de la pieza a analizar. En la Tabla 2-1 se aprecia la clasificación [2].

**Tabla 2-2** Clasificación de Dureza e Indentador a utilizar.

Materiales Duros		
Indentador de diamante		
Delgados		Grosos
30 N, 15 N, 45 N	Escalas	A,C,D
30 Kg, 15 Kg, 45 Kg	Cargas	60 Kg, 150 Kg, 100 Kg.
Formula: HR(A,C,D)= 100-500t		
Materiales Blandos		
Delgados		Grosos
Indentador de 1/16” de acero		
15T, 30T, 45T	Escalas	B, F, G
15 Kg, 30 Kg, 45 Kg	Cargas	100 Kg, 60 Kg, 150 Kg
Indentador de 1/8” de acero		
15W, 30W, 45W	Escalas	E, H, K
15 Kg, 30 Kg, 45 Kg	Cargas	100 Kg, 60 Kg, 150 Kg

### 2.3.1.1.2.1. Norma ASTM E18

La norma que estipula el procedimiento para la realización de la prueba de dureza Rockwell es la ASTM E18. En esta se describen diversos puntos de importancia como el principios de la prueba y aparato, los símbolos y designaciones para cada tipo de indentador y escala, su descripción, descripción del uso correcto de la carga e indentador dependiendo de la aplicación normal del espécimen, descripción del mínimo espesor necesario para la utilización de cada tipo de indentador y el procedimiento.

En base a lo anterior, el investigador podrá reproducir la prueba de dureza bajo los estándares estipulados por la American Society for Testing and Materials (ASTM), requisito indispensable para la investigación científica.

#### 2.3.1.1.3.1. Prueba o ensayo de dureza Vickers

Otro método muy interesante y extendido para medir la dureza de los materiales es el ideado por el inglés Vickers. Su fundamento es parecido al de Brinell, se basa en la resistencia que oponen los cuerpos a ser penetrados y también se halla la dureza, dividiendo la carga por la superficie de la huella.

Se diferencia de aquél por emplear, como cuerpo penetrador, un diamante tallado en forma de pirámide cuadrangular de 136° entre caras [2].

En este caso la dureza es:

$$H = \frac{P}{E^2} \times 1,854 \quad 2.2$$

Siendo H la dureza Vickers, P, la carga aplicada (en Kg), E<sub>1</sub> y E<sub>2</sub> las diagonales de la huella y E es el promedio de las diagonales expresado por la ecuación 2.3.

$$E = \frac{E_1 + E_2}{2} \quad 2.3$$

El ángulo de 136° fue elegido para que las cifras Vickers coincidan con las Brinell. Esto ocurre hasta 250 unidades, pero a partir de esta cifra la dureza Vickers es siempre algo

---

superior a la Brinell. La diferencia al principio es pequeña, pero es bastante grande para durezas elevadas. Esto es debido a la deformación de la bola, que falsea los resultados teóricos, lo que no sucedería si la bola pudiera fabricarse de un material que no sufriera ninguna deformación [2].

Al utilizar un diamante como cuerpo penetrador, tenemos además un cuerpo de dureza más definida y constante que una bola de acero que la tiene muy incierta, y aún admitiendo que la dureza del diamante no sea absolutamente constante en la práctica, como es superior a la de todos los metales que deben ensayarse, las diferencias que existen no producirán efecto alguno en el ensayo. Este método es sobre todo interesante cuando la dureza del metal a ensayar es superior a los 500 Brinell, pues a partir de esta cifra la deformación de la bola es ya de bastante importancia [2].

Otra diferencia notable con el sistema Brinell, es que usando como cuerpo penetrador la pirámide de diamante, los resultados que se obtienen son siempre comparables, aunque se emplean cargas diferentes, porque las huellas son siempre geoméricamente semejantes entre sí, lo que no ocurre con la bola. Normalmente se emplean cargas variables de 1 a 120 Kg, siendo la carga normal 30 Kgs [2].

El principio de Vickers ha sido aplicado al microscopio, habiéndose podido determinar la dureza de los constituyentes de estructura utilizando cargas muy pequeñas desde 1 a 100 gr.

Puede utilizarse por tanto para toda clase de materiales, blandos y duros, y también para chapas muy delgadas, piezas cementadas, nitruradas, endurecidas superficialmente, etc. Por todas estas razones es el procedimiento que se emplea para determinar las durezas en todos los estudios e investigaciones científicas [2].

La forma de operar es muy sencilla. La carga es aplicada por medio de un juego de palancas que mueven una leva. Después de haber mantenido la carga durante un cierto tiempo, relativamente corto, se coloca automáticamente un microscopio sobre la huella a la vez que se levanta la punta del diamante. La huella formada es muy pequeña y sus bordes

forman en la superficie ensayada un cuadrado cuyas diagonales se miden en una retícula graduada y luego en una tabla se halla la dureza [2].

Existen en la actualidad, micro-durómetros que permiten tomar la medida de las diagonales de la huella y obtener inmediatamente la dureza HV.

### **2.3.1.1.3.1. Norma ASTM E384**

La norma que estipula el procedimiento para la realización de la prueba de micro-dureza es la ASTM E384. En esta se describen diversos puntos los cuales se enlistan a continuación:

- a) Descripción de los tipos de escalas (Vickers y Knoop).
- b) Descripción de los indentadores para cada escala.
- c) Formulas para determinar la micro-dureza en cada escala.
- d) Consideraciones con respecto a la máquina de micro-dureza durante el ensayo (precauciones).
- e) Fuerza aplicada al espécimen.
- f) Tiempo de aplicación de la fuerza.
- g) Descripción de la huella en el espécimen de cada una de las escalas (Vickers y Knoop).
- h) Preparación del espécimen para la prueba de micro-dureza.
- i) Procedimiento para tomar micro-dureza.

El procedimiento a desarrollar para la medición de micro dureza se describe ampliamente en la Norma ASTM E384.

### **2.3.1.2 Método para medición de profundidad de capa.**

El endurecimiento superficial se puede definir como un proceso de endurecimiento de un material ferroso, de tal manera que la capa superficial, es mucho más dura que el resto del material, conocido como núcleo.

---

Este método abarca los procesos termoquímicos de Carburación, Nitruración, Carbonitruración, Cianuración, la inducción y Temple a la llama.

Existen diversos métodos para la medición de profundidad de capa y las variaciones existentes de uno a otro método pueden deberse a diversos factores como:

- a) Características del acero (composición).
- b) Condiciones de enfriamiento, entre otros.

Es importante, por tanto, que el método de determinación de profundidad de capa sea cuidadosamente seleccionado, sobre la base de los requisitos específicos y en relación directa con la economía.

Para la realización de la medición de profundidad de capa, se utilizará las normas SAE J423 y ASTM G70-83. Estas normas describen el procedimiento utilizado para los tratamientos termoquímicos descritos anteriormente, los cuales permiten el endurecimiento superficial de materiales ferrosos.

#### **2.3.1.2.1. Proceso de medición de profundidad de capa utilizando la Norma SAE J423**

Esta norma describe el procedimiento para la medición de profundidad de capa de aquellos materiales endurecidos a partir de tratamientos termoquímicos.

Como parte de su estructura, describe el significado de algunos conceptos como:

**Profundidad efectiva de capa (Effective Case Depth):** Se denomina como la distancia perpendicular de la superficie de la capa endurecida hasta el punto más alejado en el cual se mantiene un determinado nivel de dureza equivalente a 50 HRc [27].

**Profundidad de capa total (Total Case Depth):** La distancia (medida perpendicularmente) de la superficie endurecida o sin endurecer a un punto donde las diferencias químicas o físicas de la capa y el núcleo no se pueden distinguir [27].

Dentro de los métodos químicos, se encuentran diversas especificaciones como:

- a) Método aplicable para casos de Cementación, Cianuración y Carbonitrurados. Este procedimiento consiste en determinar el contenido de carbono y (nitrógeno en su caso) a diferentes profundidades bajo la superficie de una muestra de prueba. Se considera este método como el más preciso para medir la profundidad total de casos de cementación [27].
- b) Los especímenes de prueba pueden ser anillos, barras, siendo estos rectos o de otra manera, adecuados para el mecanizado de precisión de las capas superficiales.
- c) Se debe tener cuidado para evitar la distorsión y la descarburación en las muestras de ensayo de enfriamiento después de la cementación [27].
- d) Las muestras de ensayo deben tener las superficies limpias y secas y deberán ser ajustados en incrementos de profundidad determinadas [27].

A su vez, esta norma muestra tablas de información, en la cual, se puede dar una idea el investigador de la dureza de la capa efectiva dependiendo el contenido de carbono.

Con respecto a la medición de dureza, se recomiendan aquellas que realicen impresiones pequeñas y poco profundas, con el fin de que los valores obtenidos sean representativos de la superficie o área que se esté analizando. Para diferentes casos, se describen las formas en las cuales serán realizadas las mediciones de micro-dureza [27].

Dentro de los métodos visuales se utilizará un microscopio para la lectura de la profundidad de capa producido por cualquiera de los procesos anteriormente mencionados.

La observación a través del microscopio será utilizado para determinar la profundidad de capa efectiva en condiciones de dureza. Cuando el espécimen es recocido correctamente, la profundidad de capa puede ser determinada de forma precisa en distintas zonas (hipereutectoide, eutectoide e hipoeutectoide) [27].

La preparación de la muestra se realizará de la siguiente manera:

- a) Se corta el espécimen en forma perpendicular a la superficie.

- 
- b) Para la observación de la microestructura, se ataca con Nital de 2% a 5%.
  - c) Para la profundidad de capa eficaz, se debe realizar la lectura desde la superficie hasta la estructura metalográfica con equivalencia a una dureza de 50 HRc.
  - d) En el caso de la profundidad de capa total, se realizará una lectura (línea) entre la superficie y el núcleo. En aceros aleados, la línea de demarcación no es fuerte. Lea toda la zona oscura que indica una diferencia en contenido de carbón de la estructura uniforme del núcleo.

Para muestras ya templadas o enfriadas bajo condiciones no controladas.

- a) Muestras pueden encontrarse protegidas por una placa de cobre o algún medio apropiado para evitar la descarburación.
- b) Se colocará el espécimen en un pequeño contenedor con pared delgada y con un catalizador (carbón).
- c) Se colocará el recipiente en el horno de 40 a 80°C por encima de la temperatura crítica superior ( $AC_3$ ) para el núcleo. Generalmente, una temperatura en el rango de 870-925 °C es satisfactoria.
- d) Se dejará en el horno el tiempo suficiente, para que la muestra alcance la temperatura programada.
- e) Para el enfriamiento del espécimen, se pueden utilizar diferentes medios como cal, algún tipo de material aislante que reduzca la temperatura a 430 °C en un tiempo de 2:30 a 3 horas.

Para aceros aleados, el enfriamiento lento o transformaciones isotérmicas serán necesarios si existe martensita retenida en la microestructura. Para esto la pieza se someterá a una temperatura de 540-600°C [27].

Para cada uno de los tratamientos termoquímicos como Carbonitruración, Cianuración, Nitruración, Temple por llama, se especifica el procedimiento para la realización de la medición de profundidad de capa obtenida durante la metodología [27].

### 2.3.1.2.2. Norma ASTM G79-83

Esta norma cubre los procedimientos para la identificación y la medición de la extensión de carburización en un metal y de la interpretación y evaluación de los efectos de la carburización. Se aplica principalmente a hierros y aleaciones de níquel para aplicaciones de alta temperatura.

Hay cuatro métodos descritos en esta norma:

- a) Ganancia total de masa.
- b) Evaluación metalográfica.
- c) Perfil de difusión de carbono.
- d) Cambio en propiedades mecánicas.

En el método de ganancia total de masa provee de forma rápida, simple y económica una técnica de comparación del material. La ganancia total de masa del espécimen durante la exposición al ambiente carburante es considerada como primera aproximación la ganancia total de carbono que ha absorbido el metal.

El procedimiento a utilizar asume el uso de un espécimen que será pesado antes y después de la exposición al medio carburante para obtener la ganancia de masa por unidad de área.

En el método que abarca la evaluación metalográfica fue descrito anteriormente en la norma ASTM E3, en la cual se menciona el procedimiento para el corte, montaje y pulido de la pieza, así como su ataque químico para apreciar la microestructura característica.

La evaluación metalográfica puede ser utilizada como una medida de la penetración de carbón a través de la evaluación del material. Puede ser particularmente utilizable cuando se combina con los datos de ganancia total de masa, dando algunos indicadores de solubilidad y movilidad del carbón expuesto.

El método de perfil de difusión de carbono, en general, envuelve el análisis de las consecutivas capas que se han formado por la exposición del material al medio carburante.

El perfil de dureza está representado por la medición consecutiva de micro-dureza a intervalos equivalentes y es graficado con respecto a la profundidad de capa. A su vez, se puede utilizar un análisis de rayos X en conjunto con el análisis metalográfico.

La carburización usualmente ha tenido gran influencia en las propiedades mecánicas de los metales, por ejemplo dureza, ductilidad, esfuerzo. Así la dureza, tensión, resistencia al impacto y las curvas del material carburizados obtenidas en el método C a menudo ceden resultados significativos cuando se compara con el material de llegada.

Para la realización y estudio de los cambios en las propiedades mecánicas se tomarán como guía la norma ASTM E8 la cual describe el procedimiento para realizar pruebas a tensión.

### **2.3.2. Tensión**

A continuación se presentan algunas definiciones de tensión:

Tensión: Se le denomina así a la fuerza que apunta fuera de la superficie (tira de la superficie) [22].

Tensión: Valor de la distribución de fuerzas por unidad de área en el entorno de un punto material dentro de un cuerpo material o medio continuo [25].

Tensión: Fuerza que aplica a un cuerpo elástico le produce o le tiende a producir una tensión. También llamada fuerza de tracción [26].

#### **2.3.2.1. Prueba o ensayo de tensión**

La prueba de tensión se utiliza para obtener información acerca de las propiedades mecánicas de un material [6].

La resistencia a la tracción de un material en libras por pulgada cuadrada, puede determinarse si se divide la carga máxima (en libras) entre el área de la sección transversal original (en pulgadas cuadradas) antes del ensayo. Por lo tanto,

$$\text{Resistencia a la tracción (LPC)} = \frac{\text{Carga máxima (libras)}}{\text{área de la sección transversal original (pulg. cuad.)}} \quad 2.4$$

### 2.3.2.2. Propiedades de tensión

Dentro de las propiedades que se pueden obtener a partir de la prueba de tensión se encuentran: ductilidad, resistencia a la tensión, límite proporcional, límite elástico, módulo de elasticidad, resiliencia, punto cedente, resistencia a punto cedente, resistencia final y resistencia a la ruptura [6].

A continuación se describe cada una de las propiedades de los materiales metálicos.

#### 2.3.2.2.1. Ductilidad

La propiedad que le permite a un metal deformarse permanentemente cuando se le carga en tracción, se conoce como ductilidad. Cualquier metal que pueda estirarse para formar alambre es dúctil. El acero, el aluminio, el oro, la plata y el níquel son ejemplos de metales dúctiles [6].

La ductilidad se determina mediante la prueba de tracción. En esta prueba se mide el área de la sección transversal y la longitud calibrada entre dos marcas de la muestra de prueba antes y después de estirarlos. El porcentaje de elongación (incremento de longitud) y el porcentaje de reducción (disminución del área de la sección transversal en el punto más angosto) son medidas de la ductilidad [6].

$$\% \text{ alargamiento} = \left( \frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100 \quad 2.5$$

$$\% \text{ reducción de área} = \left( \frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100 \quad 2.6$$

La cantidad de elongación antes de que la muestra se rompa es un indicador de la cantidad de deformación plástica (trabajo en frío) que puede ocurrir en dicha muestra de metal. Estos datos son útiles para las operaciones de formado en frío durante la manufactura [6].

El porcentaje de reducción de área se refiere al estrechamiento de la muestra y a la diferencia entre el área original y el área del punto más pequeño después de que se rompe la probeta. Esta es una medida de la plasticidad, fragilidad o ambas de la probeta. Un pequeño porcentaje de reducción (más o menos un 30%) mostraría muy poca deformación en los extremos rotos y mostraría en su mayor parte una fractura frágil, en tanto que un 80% de reducción indicaría mucho estrechamiento y muy poca fractura frágil [6].

### **2.3.2.2. Resistencia a la tensión**

El esfuerzo obtenido con la máxima fuerza aplicada es la resistencia a la tensión o resistencia a la tracción ( $\sigma_{TS}$ ), que es el esfuerzo máximo en la curva esfuerzo-deformación ingenieril. En muchos materiales dúctiles, la deformación no permanece uniforme. En algún punto, una región se deforma más que otras y se presenta una reducción local grande de la sección transversal en dicho punto. Esta región de deformación local se llama “cuello”. A este fenómeno se le llama estricción o formación de cuello. Como el área transversal es menor en ese punto, se necesita una fuerza menor para continuar la deformación, y el esfuerzo ingenieril, calculado con el área original  $A_0$ , decrece. La resistencia a la tensión es el esfuerzo en el cual comienza la estricción en los materiales dúctiles [1].

Otras fuentes bibliográficas describen a la resistencia a la tensión como:

Máximo esfuerzo de tensión que puede soportar un material antes de llegar a su límite de destrucción [21].

Se presenta cuando un material está sometido a la extracción o estiran. El estrés se define como una fuerza aplicada sobre un área transversal, con unidades típicas de libras por pulgadas cuadradas (psi) o newton por metro cuadrado, también conocidos como pascales (Pa).

Otro autor, define a la resistencia de tensión como aquel máximo esfuerzo de tensión que un material es capaz de desarrollar [22].

### **2.3.2.2.3. Límite proporcional y límite elástico**

El límite de proporcionalidad se define como el valor del esfuerzo arriba del cual la relación entre esfuerzo y deformación ingenieril no es lineal.

Al aplicar esfuerzo a un material, éste muestra primero una deformación elástica. La deformación que se produce desaparece por completo cuando se elimina el esfuerzo aplicado. Sin embargo, al continuar aumentando el esfuerzo aplicado, el material comienza a mostrar deformación tanto elástica como plástica. Al final, el material “cede” al esfuerzo aplicado. El valor crítico del esfuerzo necesario para iniciar la deformación plástica se llama límite elástico del material <sup>[1]</sup>.

En los materiales metálicos, éste es normalmente el esfuerzo necesario para iniciar el movimiento de las dislocaciones o deslizamientos <sup>[1]</sup>.

#### **2.3.2.2.4. Módulo de elasticidad o módulo de Young y Módulo de Resiliencia ( $E_r$ )**

La rigidez se expresa por medio del módulo de elasticidad, conocido también como el módulo de Young. Dentro del rango elástico, si el esfuerzo se divide entre la deformación correspondiente a cualquier punto dado, el resultado será el módulo de elasticidad del material. Por lo tanto, el módulo de elasticidad se representa por la pendiente de la curva esfuerzo-deformación por abajo del límite elástico.

$$\text{Módulo de elasticidad en psi} \frac{lb}{pulg^2} = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación}} \quad 2.7$$

Esta relación es la ley de Hooke. En los materiales metálicos, se considera que el módulo de elasticidad es una propiedad insensible a la microestructura, porque el valor está muy influido por la fuerza de los enlaces atómicos.

El tamaño de grano y otras propiedades micro-estructurales no tienen un efecto muy grande sobre el módulo de Young <sup>[1]</sup>.

El módulo de Resiliencia ( $E_r$ ) o área contenida bajo la parte elástica de una curva de esfuerzo-deformación ingenieril, es la energía elástica que absorbe un material durante la carga y que después se desprende, cuando se quita la carga.

### **2.3.2.2.5. Resistencia de cedencia o fluencia y Punto de cedencia o fluencia**

En la mayoría de los materiales, el límite elástico y el límite de proporcionalidad están bastante cercanos. Sin embargo, ni el valor del límite elástico y el límite de proporcionalidad se pueden determinar con precisión. Los valores medidos dependen de la sensibilidad del equipo que se usa. En consecuencia, se define un valor convencional de deformación plástica (normalmente 0.002 o 0.2%, pero no siempre). A continuación se traza una recta comenzando en este valor desplazado, paralela a la parte lineal de la curva esfuerzo-deformación ingenieril <sup>[1]</sup>.

El valor de esfuerzo que corresponde al cruce de esa recta y la curva de esfuerzo-deformación ingenieril se le define como la resistencia a la cedencia y el procedimiento que se ha descrito para determinarlo se le conoce como criterio “offset” o de deformación plástica convencional <sup>[1]</sup>.

Muchos materiales alcanzan un estado en el cual la deformación comienza a crecer rápidamente sin que haya un incremento correspondiente en el esfuerzo. Tal punto recibe el nombre de punto de cedencia o punto de fluencia <sup>[21]</sup>.

### **2.3.2.2.6. Resistencia máxima (final) y Resistencia a la ruptura**

Se denomina así al esfuerzo máximo basado en la sección transversal original, que puede resistir un material. Este es el esfuerzo último  $\sigma_U$  <sup>[22]</sup>.

Es el esfuerzo basado en la sección original, que produce la fractura del material. La importancia básica para la ingeniería es el poder determinar el esfuerzo máximo posible para un determinado material, y de esa manera poder determinar los factores de seguridad para la construcción determinada <sup>[22]</sup>.

### **2.3.3. Metalografía**

El proceso de preparar una muestra de metal y observar su microestructura se llama metalografía <sup>[1]</sup>.

Sus orígenes se remontan desde el año de 1806, cuando Aloys Beck Von Widmanstätten descubrió que algunos meteoritos, al ser cortados y pulidos, desarrollaban una estructura característica cuando se oxidaban subsecuentemente por calentamiento en el aire.

Más tarde, encontró que al atacarlos con ácido nítrico se obtenían mejores resultados, que revelaban el tipo de estructura metalúrgica que aún lleva su nombre. Puede, por lo tanto, argüirse que Von Widmanstätten originó el examen metalográfico; el microscopio, sin embargo, no se usó para este objeto sino hasta 1841, cuando Paul Annosow usó el instrumento para examinar las superficies atacadas de las espadas orientales de acero [7].

Al principio de la década de 1860, el profesor Henry C. Sorby, de Sheffield, desarrolló una técnica para el examen sistemático de los metales bajo el microscopio y, por lo tanto, puede considerársele como el fundador de esta rama de la metalurgia, conocida como metalografía microscópica [7].

En el Capítulo 3 se desarrollará la metodología que se empleará para el montaje metalográfico de los especímenes.

### **2.3.3.1. Proceso de montaje metalográfico utilizando la norma ASTM E3.**

EL procedimiento para realizar el montaje metalográfico se describe en la norma ASTM E3, la cual establece lo siguiente:

1. Selección de muestras metalográfica.
2. Tamaño de muestras metalográficas.
3. Corte de muestras metalográficas.
4. Limpieza de muestras metalográficas.
5. Montaje de muestras metalográficas.
6. Métodos manuales para el lijado de piezas.
7. Procedimientos especiales (pulido vibratorio).
8. Ataque químico.

---

## **Selección de muestras metalográfica y Tamaño de muestra metalográfica.**

La selección de una probeta para examen microscópico, requiere la aplicación del sentido común, ya que un gran cuerpo de metal puede no ser homogéneo en composición o en su estructura cristalina. Algunas veces, será necesaria más de una probeta para representar adecuadamente el material [7].

Para examinar los defectos de la superficie, una probeta debe seleccionarse de manera que en la cara que ha de pulirse se incluya una sección que pase por la capa de la superficie. Las grietas superficiales y otros detalles parecidos deben investigarse cortando una pieza metálica que contenga a la grieta y montándola en baquelita o en un compuesto similar [7].

En esta experimentación se utilizará el acero A36 (Ver **Tabla 2-1** Características químicas del acero A36).

La norma ASTM E3 con respecto al tamaño de muestras metalográficas recomienda dimensiones aproximadas de 12 a 25 mm (0.5 a 1.0 In), o aproximadamente de 12 a 25 mm de diámetro si el material es cilíndrico. El peso del espécimen no debe ser más de lo necesario para el manejo conveniente durante el pulido.

### **Corte de espécimen.**

Se toma la muestra del espécimen a analizar. Una vez realizados los tratamientos termoquímicos y térmicos, la muestra se cortará con la finalidad de observar los cambios producidos en su microestructura.

Como parte del montaje del espécimen, es importante definir el tipo de corte que se realizará.

Existen 3 tipos comunes de corte:

- a) Aserrado o corte ya sea a mano o maquina con lubricación.
- b) Abrasivo corte con cuchilla.
- c) Cizalla

Cualquier recubrimiento de metal que pueda intervenir con el procedimiento, debe ser removido antes de pulir. El recubrimiento se puede retirar por disolución en HNO<sub>3</sub> frío, en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluido o en HCl diluido.

Para esta actividad se utilizará la cortadora METACUT- M250, esto nos permitirá tener un corte homogéneo, fácil y rápido. Este puede ser utilizado sobre todo en aquellos materiales con durezas por debajo de aproximadamente 350 HV.

### **Limpieza de muestras metalográficas.**

La limpieza del espécimen durante la preparación es esencial. Toda la grasa, aceites, refrigerante y residuos de la cortadora en el espécimen deben de ser removidos por algún disolvente orgánico. Esto para evitar que algún residuo sobre el material impida la adhesión de la resina sobre la superficie del espécimen.

### **Montaje del espécimen metalográfico.**

Después del corte y limpieza del espécimen se procede al montaje. Esta se realiza cuando es necesario preservar un borde o cuando una probeta es tan pequeña que sea difícil de sujetar contra el papel de esmeril, la probeta se puede montar sobre un compuesto adecuado.

Comúnmente suelen ser preparaciones a temperatura ambiente. Algunos pueden requerir un calor externo de origen o de la presión aplicada con el fin de curar. Estas resinas consisten en 2 o más componentes que deben ser mezclados justo antes de usar. Hay 4 tipos de plásticos moldeables de uso común, los cuales se recomienda por la norma ASTM E3:

- a) Acrílico
- b) Poli ester-Acrílico
- c) Poli ester
- d) Epoxy

En esta etapa se monta el espécimen en la resina cristal. Para esto es indispensable contar con el molde, el recipiente para realizar la mezcla y la plancha de calor, así como los materiales señalados en el Capítulo 3 (**Tabla 3-1**).

Una vez realizada la mezcla, se vacía en el depósito correspondiente. Se deja reposar para que endurezca aproximadamente 5 minutos en la plancha térmica a 70 °C.

Pasado este tiempo se desmolda la resina y se tiene el montaje metalográfico listo para ser analizado.

### Métodos manuales para el lijado de piezas.

Una vez desmontada la pieza metalográfica se procede al análisis. Este se preparará lijando la superficie de la pieza montada. El lijado intermedio se realiza utilizando lijas de diferentes números de granos, es decir, requerirán combinaciones específicas de abrasivos.

El procedimiento es el siguiente:

- a) Lijar se puede hacer de diferentes maneras. Estas van desde frotar la muestra en una pieza fija de papel de lija con el uso de dispositivos automáticos.
- b) Designación del tamaño de grano abrasivo expresado por ANSI o CAMI.
- c) Para esto, se toma de referencia la tabla de tamaño de grano que se describe en la norma ASTM E3. Las que se utilizarán en el desarrollo de esta experimentación se describen en la **Tabla 2-3**.

**Tabla 2-3** Tamaño de grano.

Grit Number	FEPA		ANSI/CAMI	
	Size (µm)		Grit Number	Size (µm)
P120	125.0		120	116.0
P150	100.0		180	78.0
P220	68.0		220	66.0
P240	63.5			
P280	52.2		240	51.8
P320	46.2		...	...
P360	40.5		280	42.3
P400	35.0		320	34.3
P500	30.2		...	...
P600	25.8		360	27.3
P800	21.8		400	22.1
P1000	18.3		500	18.2
P1200	15.3		600	14.5
P1500	12.6		800	11.5
P2000	10.3		1000	9.5
P2500	8.4		1500	8.0
P4000 <sup>a</sup>	5.0		...	...

<sup>a</sup> Not found in the FEPA grading system.

ANSI—American National Standards Institute

CAMI—Coated Abrasives Manufacturers Institute

FEPA—European Federation of Abrasive Producers

- d) Se debe iniciar con el papel, rodillo o piedra capaz de aplastar la muestra y eliminar efectos de la operación anterior, como el corte. Cuando se realiza el lijado de las piezas, estas deben ser giradas 45°-90°, en su caso, la superficie de la muestra debe ser plana con un conjunto de unidirecciones del lijado.

- e) El método manual consiste en pulir la muestra sostenida por nuestra mano contra una rueda abrasiva con carga rotatoria y mover la muestra en una trayectoria circular alrededor de la muestra rueda y en sentido o contrario al giro de la rueda.
- f) La cantidad de fuerza aplicada a la muestra es cuestión de preferencia personal y experiencia.
- g) Después de todo lijado, la muestra debe ser limpiada a fondo, para esto, se utiliza una sustancia que contenga un inhibidor de la corrosión.
- h) También se encuentran los métodos automatizados. Muchos pulidores automáticos son capaces de montar muchos especímenes, teniendo una ventaja sustancial en tiempo y calidad.

### **Procedimientos especiales (pulido vibratorio)**

Esta etapa es ejecutada en general con paños macizos colocados sobre platos giratorios circulares, sobre los cuales se depositan pequeñas cantidades de abrasivos. Este se realiza sujetando la muestra a tratar con la mano o bien mediante un cabezal automático para pulir varias muestras a la vez. El cabezal automático ejerce una presión pre-configurada hacia el disco o paño de desbaste o pulido durante un tiempo concreto. Estos parámetros deberán ser configurados según el tipo de material (dureza, estado de pulido etc.).

Otra opción para el pulido fino, es realizarlo de forma manual, utilizando lijas de un tamaño de grano menor las cuales son descritas en la norma ASTM E3. Para esta actividad se utilizará la pulidora MARK V LAB ubicada en el Laboratorio de Ciencias de los Materiales. Según la norma ASTM E3, para el pulido fino de aceros de bajo carbono se utiliza una pasta de óxido o de suspensión de  $\text{SiO}_2$  o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . En este caso, se utilizará la Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

### **Ataque químico**

Una vez que se ha realizado el montaje metalográfico, se procederá al ataque químico de la muestra con Nital al 2%. Esto nos permitirá revelar la microestructura característica del acero con los tratamientos termoquímicos y térmicos realizados.

Ya atacada la pieza, se procederá a la observación en el microscopio. Para esto es importante que se tenga el equipo encendido y el microscopio listo. Se tomará como referencia la **Tabla 3-3** para la manipulación del software.

**Tabla 2-4** Características del Lente de Microscopio-Software.

10X	Lente de Microscopio	Default
80X	Lente del Software	
5X	Lente de Microscopio	Default
40X	Lente del Software	
200X	Lente de Microscopio	400X300
60X	Lente de Software	
400X	Lente de Microscopio	320X240
9X	Lente de Software	

## 2.4.Tratamientos del acero

Desde los primeros tiempos, el acero al carbono simple ha sido muy apreciado por algunas de sus propiedades. Este metal blando de color gris plateado puede convertirse en una sustancia súper dura que podría cortar al vidrio y muchas otras sustancias, incluyendo al hierro en su estado blanco. Además, su dureza se puede controlar. Esta conversión del acero al carbono en un acero de dureza útil se efectúa con diferentes tratamientos térmicos [6].

### 2.4.1.Clasificación de los tratamientos del acero

Los tratamientos del acero se clasifican en dos:

- Tratamientos Térmicos, que comprenden el Temple, Revenido, Recocido, Normalizado, Austempering, Martempering, Patenting, Sub-cero como los más destacados dentro de esta categoría.
- Tratamientos Termoquímicos, que comprenden la Cementación, Nitruración, Carbonitruración, Sulfinización, Aluminización, Cromización como los más destacados dentro de esta categoría.

### 2.4.1.1. Tratamientos Térmicos

La definición de tratamiento térmico dada en el Metals Handbook es: “Una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento, de tiempos determinados y aplicados a un metal o aleación en el estado sólido en una forma tal que producirá propiedades deseadas”.

Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita. La naturaleza y la apariencia de estos productos de transformación determinan las propiedades físicas y mecánicas de cualquier acero [3].

El primer paso en el tratamiento térmico del acero es calentar el material a alguna temperatura en o por encima del intervalo crítico para formar austenita. En la mayoría de los casos, la rapidez de calentamiento a la temperatura deseada es menos importante que otros factores en el ciclo del tratamiento térmico.

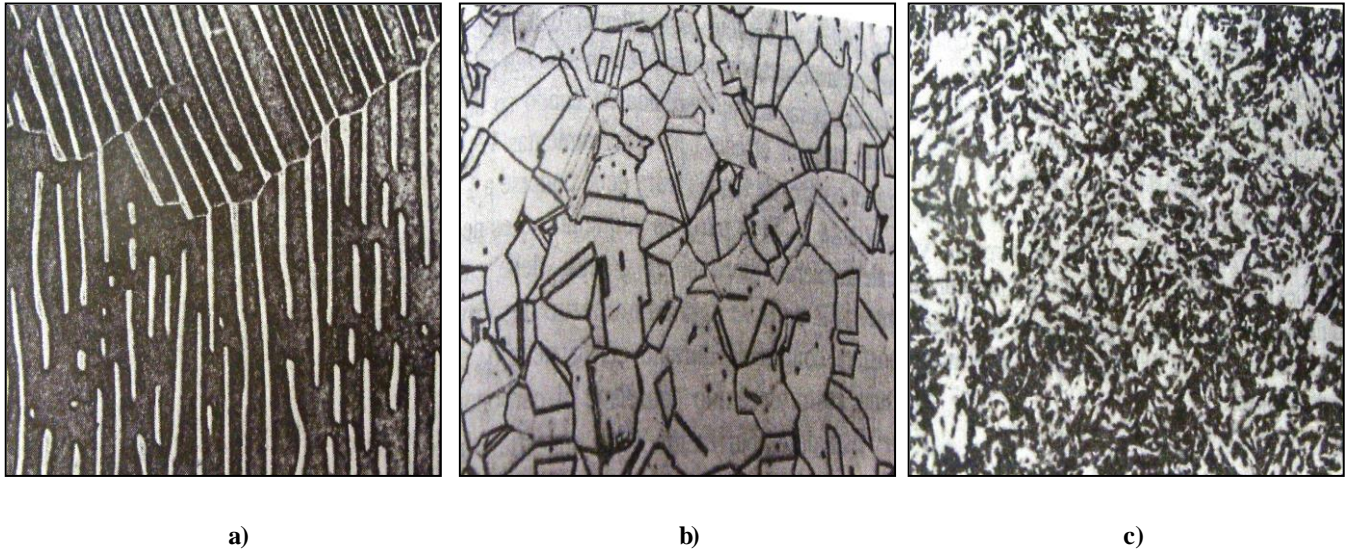
Los materiales altamente esforzados producidos por trabajado en frío deben calentarse más lentamente que los que se hallan libres de esfuerzos para evitar distorsión. Se puede considerar la diferencia en temperatura que tiene lugar dentro de las secciones gruesas y delgadas de artículos de sección transversal variable y, siempre que sea posible, se debe tomar alguna medida para hacer más lento el calentamiento de las secciones más delgadas, de tal modo que sea posible minimizar el esfuerzo térmico y la distorsión.

Por lo general se hará menos daño al acero al utilizar una rapidez de calentamiento tan lenta como sea práctico [3].

#### 2.4.1.1.1. Temple

Conforme el acero se calienta más allá de la temperatura crítica inferior de 1330 °F (721 °C), el carbono que se encontraba en forma de capas de carburo de hierro en la perlita (Ver **Figura 2-3 inciso a**) se empieza a disolver en el hierro y forma una solución sólida llamada austenita (Ver **Figura 2-3 inciso b**) .

Cuando esta solución de hierro y carbono se enfría repentinamente o se temple, se forma una nueva microestructura. Ésta se conoce como martensita (Ver **Figura 2-3 inciso c)** [6].

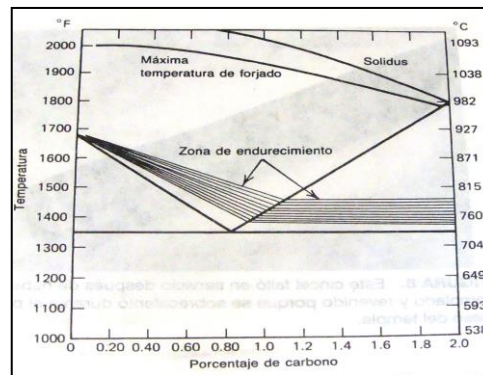


**Figura 2-3.** Estructura metalografía del acero al ser templado **a)** Estructura de perlita laminar. Micrografía electrónica a 11000 aumentos. **b)** Micrografía de acero inoxidable tipo 304 recocido, el cual es austenítico a temperatura común. Imagen a 250 aumentos. **c)** Estructura acicular muestra patrón de martensita fina. Imagen obtenida a 1000 aumentos.

El acero AISI-C-1095, conocido comúnmente como un acero para herramientas templado en agua (WI), empieza a mostrar dureza cuando se temple desde una temperatura justo más allá de 1330 °F (721 °C), pero no se endurecerá del todo si se le temple desde una temperatura inferior a 1330 °F (721 °C). Este acero alcanzará su máxima dureza si se calienta a 1450 °F (788 °C) y se temple en agua. Esta temperatura de temple varía según el contenido de carbono. Debe ser de 50 °F (28 °C) más allá de la temperatura crítica superior para los aceros al carbono que contienen menos de 0.83% de carbono. La razón de que el acero al carbono, de grado menor que el eutectoide, deba calentarse a una temperatura más alta que la crítica superior, es que la ferrita no se transforma totalmente en austenita por debajo de ese punto y, cuando se temple, queda retenida en la estructura martensíticas. La ferrita retenida provoca fragilidad aun después del revenido.

Los aceros al bajo carbono, tales como el AISI 1020, para todo propósito práctico, no se endurecen cuando se calientan y se templean. Los aceros endurecidos en aceite o en aire tienen una templabilidad mayor y no tienen que resistir enfriamientos tan bruscos como los aceros al carbono simples. En consecuencia, se endurecen a mayores profundidades

dentro de su espesor que los tipos templados en agua, los cuales deben enfriarse a 200 °F (93 °C) en un término de 1 a 2 segundos [6]. Ver **Figura 2-4**.



**Figura 2-4** Gammas de temperaturas que se utilizan para el temple del acero al carbón.

Existen diferentes tipos de temple de los cuales describiremos los más interesantes.

**Temple continuo completo.** Se aplica a los aceros hipoeutectoides (contenido de carbono inferior a 0,9%). Se calienta la pieza hasta la temperatura de temple y seguidamente se enfría en el medio adecuado (agua, aceite, sales, aire) con lo que obtendremos como elemento constituyente martensita [8].

**Temple continuo incompleto.** Se aplica a los aceros hipereutectoides (contenido de carbono superior a 0,9%). Se calienta la pieza hasta la temperatura indicada, transformándose la Perlita en austenita y quedando intacta la cementita. Después de enfriar, la estructura resultante estará formada por martensita y cementita.

**Temple escalonado.** Consiste en calentar el acero a temperatura adecuada y mantenerlo hasta que se transforme en austenita, seguidamente se enfría con una temperatura uniforme en un baño de sales hasta transformarlo en bainita [8].

**Temple superficial.** Se basa en un calentamiento superficial muy rápido de la pieza y un enfriamiento también muy rápido, obteniendo la austenización solo en la capa superficial, quedando el núcleo de la pieza blanda y tenaz y la superficie exterior dura y resistente al rozamiento.

---

**Temple por inducción** Es un proceso de endurecimiento de acero en el cual las superficies de las piezas se calientan rápidamente a temperatura de austenitización mediante inducción electromagnética, (con un diseño adecuado del inductor, se puede confinar el calor a áreas pequeñas). Una vez alcanzada la temperatura de austenitización se aplica una ducha de agua fría que produce el temple [8].

Entre las ventajas de este proceso podemos destacar el hecho que no necesita de personal especializado para su operación debido a que es un proceso prácticamente automático.

Entre las desventajas resaltan el alto costo del equipo, el alto costo de mantenimiento y el hecho que no es económico si se desean endurecer pocas piezas.

## **Velocidades de enfriamiento en el temple**

El volumen y espesor de las piezas tiene gran importancia en el temple de los aceros. El enfriamiento en agua de un cilindro que ha sido calentado a altas temperaturas se dará primero en la capa exterior de forma más rápida. Esto debido a que se encuentra en contacto con el líquido.

La capa siguiente no se enfría con tanta rapidez, porque el calor no se transmite directamente al líquido sino que debe atravesar antes la capa superficial del acero, y esta capa tiene una conductibilidad bastante limitada. Una tercera capa del acero, situada más hacia el centro, se enfría todavía más lentamente, pues cuanto más al interior se encuentra, la transmisión del calor, se hace cada vez con más dificultad, ya que tiene que atravesar mayor capa de metal [2].

### **2.4.1.1.2.Revenido**

El término “revenir” originalmente fue utilizado por los herreros con el significado de dureza o endurecimiento del acero para herramientas. Utilizaban un proceso de recalentamiento para “sacar” el revenido. Lo que el herrero llamaba regulación ahora se llama revenido [6].

El revenido o regulación del temple por recalentamiento, es un proceso en el cual se recalienta la pieza de acero que previamente se endureció con el fin de eliminar la fragilidad y tensiones creadas en la pieza.

Cuanto mayor sea la temperatura de revenido que se utilice, es más la cantidad de martensita que se transforma y la pieza se vuelve más blanca y tenaz (menos frágil) [6].

Este tratamiento térmico siempre se tiene que realizar después del temple y consiste en calentar las piezas a una temperatura inferior a la del temple, consiguiendo que la martensita se transforme en una estructura más estable, terminando con un enfriamiento rápido, dependiendo del tipo de material [8].

La temperatura y el tiempo de calentamiento son los factores que más influyen en el resultado del revenido.

Hay que tener muy en cuenta que el revenido es fundamental para conseguir el adecuado temple y una buena tenacidad en las piezas.

Se calienta y enfría el acero para conseguir una estructura molecular del material (temple) para posteriormente volver a calentarlo y enfriarlo modificando así la estructura anteriormente conseguida (revenido) [8].

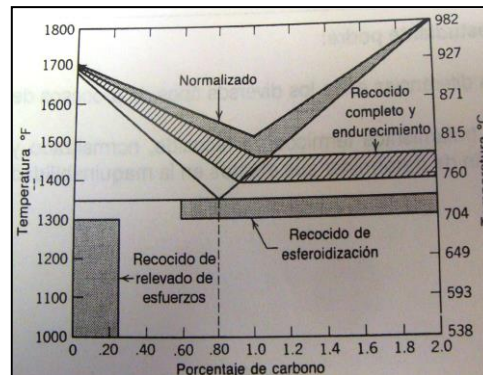
### **2.4.1.1.3. Recocido**

El tratamiento térmico del hierro y del acero conocido generalmente como recocido puede dividirse en varios procesos diferentes: recocido total, recocido esferoidización, disminución de esfuerzos (recocido) y recocido de proceso.

El recocido total se utiliza para ablandar completamente un acero endurecido, por lo general, con el fin de maquinar con facilidad los aceros para herramientas que tienen más de 0.8% de carbono. Los aceros de menor contenido de carbono se recocen también con otros propósitos.

Es necesario un recocido total cuando se suelda o previamente al tratamiento térmico de un acero al alto carbono que se maquinará [6].

El recocido total se realiza calentando la parte en un horno hasta 50 °F (28 °C) arriba de la temperatura crítica superior (Ver **Figura 2-5**) y luego enfriándola muy lentamente en el horno o en un material aislante.



**Figura 2-5** Rangos de temperatura utilizados para el tratamiento térmico del acero al carbón.

Por medio de este proceso, la microestructura se vuelve perlita y ferrita gruesa, la cual es bastante blanda para maquinarse. Es necesario calentar a una temperatura más alta que la crítica, como en el recocido total, con el fin de recristalizar los granos que contienen los carburos de hierro (perlita y martensita) en aceros de bajo carbono y volver a formar los nuevos granos, completamente blandos a partir de los antiguos duros. Sin embargo, los granos de ferrita tensionados y deformados recristalizarán por debajo de la temperatura crítica a alrededor de 900 °F (482 °C) y se transformarán en granos completamente blandos [6]. En el recocido de esferoidización se utiliza para mejorar la maquinabilidad de los aceros al alto carbono (0.8 a 1.7%). Este tratamiento produce una estructura de grano de carburo esférico o globular en el acero más bien que una estructura laminar (en forma de placas) de perlita. Los aceros de bajo carbono (0.08 a 0.3%) se pueden esferoidizar, pero su maquinabilidad empeora debido a que se vuelven gomosos y blandos, provocando el acumulamiento de borde en la herramienta y un acabado insatisfactorio. La temperatura de esferoidización es cercana a 1300 °F (704 °C). El acero se mantiene a esta temperatura alrededor de 4 horas. Los carburos duros que se desarrollan a partir de la soldadura en los aceros al carbono medio, provocando su fragilidad, pueden cambiarse a los esferoides de

carburo de hierro más dúctil por medio del proceso de esferoidización. En el acero se obtiene la ductilidad máxima por este método [6].

El recocido de relevado de esfuerzos es un proceso por el cual se recalientan los aceros al bajo carbono hasta 950 °F (510 °C). Mediante este proceso se eliminan los esfuerzos de los granos de ferrita (principalmente hierro puro) debidos a operaciones de trabajo en frio del acero tales como laminado, prensado, soldadura, conformado o estirado. Los granos distorsionados vuelven a formarse o recristalizan en unos nuevos más blandos (Ver **Figura 2-6**) [6].



**Figura 2-6** Acero con 0.10% de C recocido a 1025 °F (552 °C). Los granos de ferrita se reforman en su mayoría a su estado original. Imagen a 1000 aumentos.

Este tratamiento no afecta a los granos de perlita y algunas otras formas de carburo de hierro, al menos que se efectuó a la temperatura de esferoidización y se mantenga el tiempo suficiente como para que se lleve a cabo la esferoidización. A menudo, la eliminación de esfuerzos se utiliza sobre soldaduras porque la temperatura más baja limita la cantidad de distorsión debida al calentamiento.

El recocido de proceso (para recristalización después del trabajo en frio) es esencialmente el mismo que el recocido de relevado de esfuerzos. Se realiza a las mismas temperaturas y con los aceros al bajo y medio carbono. En la industria de los alambres y de las laminas de acero, el termino se utiliza para designar los procesos de recocido que se

usan en los procesos de laminado en frío o de estirado de alambre (refilado) y en aquellos que se utilizan para relevar los esfuerzos residuales cuando sea necesario [6].

El recocido, entre varias operaciones de trabajo en frío, vuelve a formar los granos hasta la condición original de blandos y dúctiles, de modo que pueda continuar el trabajo en frío.

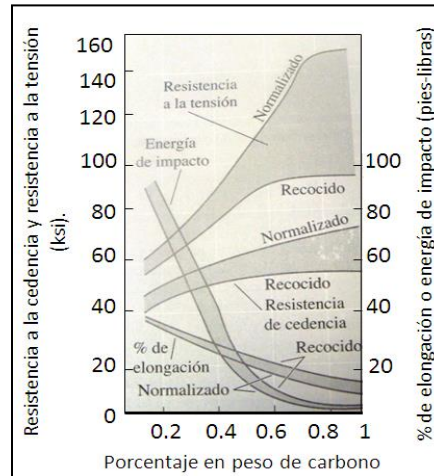
Algunas veces, el recocido de proceso se conoce como recocido brillante y se lleva a cabo usualmente en un recipiente cerrado provisto de gas inerte para prevenir la oxidación de la superficie. En el recocido de proceso no ocurren transformaciones de fase debido a que la temperatura está por debajo de  $A_1$  [6].

#### **2.4.1.1.4. Normalizado**

El normalizado es considerado como uno de los tratamientos térmicos más fáciles de efectuar. Se utiliza lo mismo para piezas fundidas, forjadas o mecanizadas, y sirve para afinar la estructura y eliminar las tensiones que suelen aparecer en la solidificación, forma o en otras operaciones posteriores. Como el nombre lo indica, se da este tratamiento a los aceros para que queden con los constituyentes y características que puedan considerarse normales o propios de su composición. Se efectúa no sólo después de la forja o laminación, si no también después de ciertos sobrecalentamientos o enfriamientos hechos en malas condiciones y siempre que se quiere destruir los efectos de cualquier calentamiento o tratamiento anterior [2].

El normalizado se asemeja al recocido en que la temperatura máxima alcanzada es similar. La diferencia se encuentra en el método de enfriamiento. Mientras que en el recocido se tarda el enfriamiento, en el normalizado el acero se retira del horno y se permite su enfriamiento en aire quieto. Este método de enfriamiento, relativamente rápido, limita el crecimiento del grano en el normalizado, de manera que las propiedades mecánicas son algo mejores que en la componente recocida (Ver **Figura 2-7**). Además, el acabado de la superficie de un artículo normalizado es con frecuencia superior al del mismo recocido al maquinarse, ya que la alta ductilidad de este último da con frecuencia, lugar a un desgarramiento local de la superficie [7].

El tipo de estructura que se obtiene por el normalizado dependerá mucho del espesor de la sección transversal, ya que esto afecta la rapidez de enfriamiento. Las secciones delgadas darán un grano mucho más fino que las gruesas, y estas últimas difieren poco en su estructura, de una sección recocida [7].



**Figura 2-7** Efecto del carbono y del tratamiento térmico sobre las propiedades de los aceros al carbono.

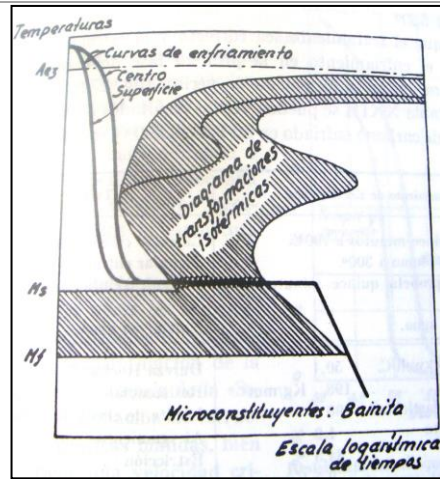
#### 2.4.1.1.5. Austempering

Las piezas sometidas a este tratamiento quedan con estructuras bainíticas, que tienen una tenacidad mucho más elevada que la que corresponde a piezas idénticas, en las que se ha conseguido la misma dureza por temple y revenido.

Además, al verificarse la transformación de la austenita isotérmicamente y no existir la etapa martensíticas, el peligro de grietas y deformaciones desaparece [2].

El Austempering consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente superior a la crítica y enfriarlo luego en un baño caliente, que es mantenido a una temperatura constante, durante un tiempo suficiente para que se verifique la total transformación de la austenita en bainita.

La temperatura del baño, que debe ser superior a la del punto  $M_s$  suele variar de 250 °C a 550 °C (Ver **Figura 2-8**).



**Figura 2-8** Representación esquemática del Austempering.

Para que el tratamiento sea correcto y la estructura sea totalmente bainítica, el enfriamiento en la primera fase debe ser suficientemente rápido para evitar la formación de perlita [2].

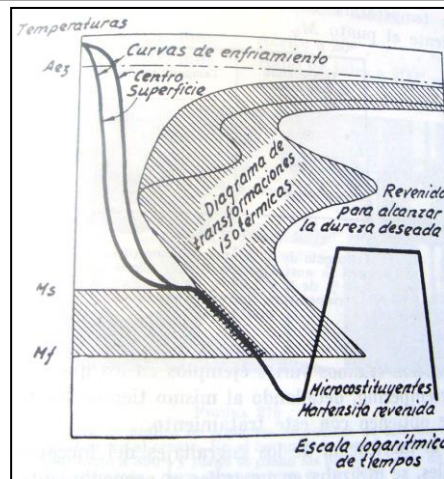
#### 2.4.1.1.6. Martempering

Este tratamiento se efectúa calentando el acero y manteniéndolo a una temperatura superior crítica durante un tiempo suficiente para su completa austenización y enfriándolo luego en un baño de sal fundida, cuya temperatura suele oscilar entre 200 y 300 °C no debe ser superior al punto  $M_s$  (Ver **Figura 2-9**), de comienzo de formación de la martensita.

El material debe permanecer en el baño caliente el tiempo suficiente para conseguir que toda la masa del acero, incluso el corazón de la pieza, alcance e iguale la temperatura del baño, no prolongando demasiado la permanencia para evitar que se inicie la transformación en ningún punto, enfriándose luego la pieza al aire [2].

Con este tratamiento térmico se obtiene una estructura martensítica con muy pocas tensiones residuales.

Cuando convenga disminuir la dureza o resistencia obtenida, se puede dar posteriormente al acero un revenido.



**Figura 2-9** Representación esquemática del Martempering.

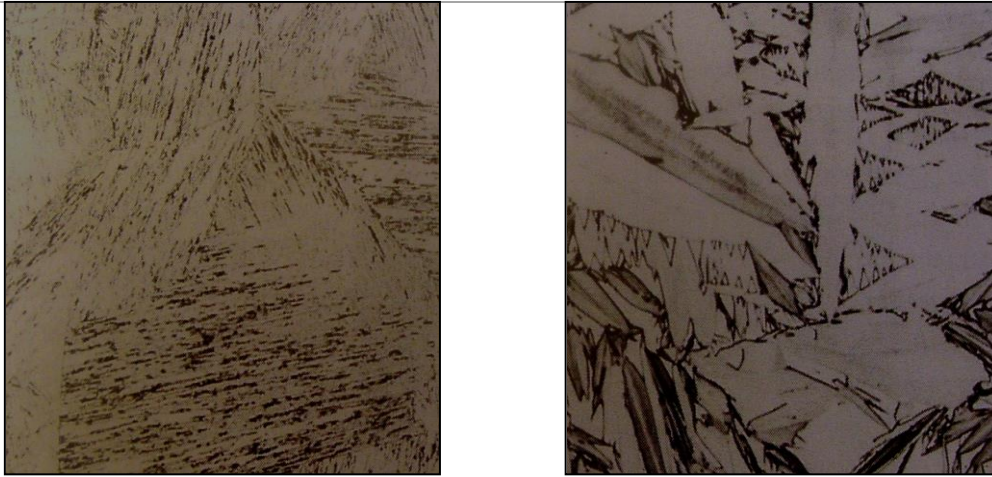
Es necesario que el enfriamiento en el Martempering sea suficientemente rápido para que la curva de enfriamiento no corte a la nariz de la “S” (curva de enfriamiento continuo del acero) en ningún punto, pues si así lo hiciera, parte de la austenita se transformaría en otros constituyentes y al llegar a la zona de formación de la martensita, tendríamos que parte de la masa no sería ya de austenita y no se podría transformar [2].

Es muy importante que la temperatura del baño sea próxima y superior a  $M_s$ , pues si fuera inferior, parte de la austenita de la periferia se transformaría en martensita antes que el resto de la austenita del centro, y el proceso sería imperfecto.

La estructura y las propiedades de las martensitas en el acero dependen del contenido de carbono de las aleaciones.

Cuando el contenido de carbono es bajo, la martensita crece en forma de “listones” compuestos por paquetes de placas planas y angostas que crecen unas al lado de las otras.

Esta martensita no es muy dura. Con un mayor contenido de carbono, crece martensita en placa, en la cual crecen placas individuales planas y angostas, en vez de crecer en forma de paquetes. (Ver **Figura 2-10 inciso a**). La dureza es mayor en la estructura martensítica de placas con mayor contenido de carbono; esto se debe, parcialmente, a una mayor distorsión. (Ver **Figura 2-10 inciso b**) [1].



a)

b)

**Figura 2-10.** Estructura metalografica de Martensita. **a)** Martensita en listones en acero al bajo carbono. Imagen obtenida a 80 aumentos. **b)** Martensita en placas en acero al alto carbono. Imagen obtenida a 400 aumentos.

#### 2.4.1.1.7. Patenting

El Patenting es especialmente interesante en el caso de aceros de alto contenido de carbono (0.50% a 0.70% de C.), que en general son muy difíciles de estirar. Este problema no se suele presentar en cambio en los aceros de menos de 0.30% de carbono, porque la ferrita, que es en ellos el constituyente predominante de su estructura, es muy plástica y se deforma con gran facilidad [2].

En la microestructura de los aceros de alto contenido de carbono que han de ser estirados en frío, es muy perjudicial la presencia de cementita libre o de perlita laminar, porque ofrecen una gran resistencia a la deformación.

El proceso que se sigue en el tratamiento de estos aceros consiste en calentarlos por encima de la temperatura crítica  $A_{c32}$ , hasta conseguir el estado austenítico completo y enfriarlos luego con relativa rapidez, según el espesor del alambre y los resultados que se quieren obtener, al aire, en baño de sales o en plomo fundido [2].

Este tratamiento se suele utilizar en la industria de la trefilería para la fabricación de alambres de alta resistencia. Unas veces se aplica como tratamiento intermedio, para destruir el efecto del estirado y conseguir estructuras muy finas de tipo sorbítico, troostítico

o bainítico muy convenientes para los trabajos de trefilería, pues tienen una gran tenacidad y una excelente aptitud para el estirado, y otras veces se emplea como operación final para que el alambre de acero quede con una resistencia muy elevada [2].

### 2.4.1.1.8.Sub-cero

Este tratamiento se aplica en los aceros que después del temple normal en agua o aceite, conservan todavía en su estructura una cierta cantidad de austenita residual sin transformar, cuyo porcentaje varía con la composición, temperatura de austenización, medio de enfriamiento, tamaño de la pieza, etc. En el temple de los diversos aceros, el porcentaje de austenita residual suele variar entre los límites especificados en la **Tabla 2-2**

**Tabla 2-5.**Porcentaje de Austenita Residual

Aceros de 1% de carbono y 5% de cromo	.....5 a 35 %
Aceros de 1.5% de carbono y 12% de cromo	.....15 a 30 %
Aceros rápidos	.....15 a 25 %
Aceros de herramientas de baja aleación	.....3 a 15 %
Aceros al carbón	.....5 a 10 %

En los aceros de alta aleación se verifica esta transformación al ser calentado el acero templado, a temperaturas variables de 400 °C a 650 °C y al ser luego enfriado al aire.

Con el tratamiento sub-cero se consigue también transformar la austenita residual en martensita, y desde hace algunos años se viene utilizando este proceso para los aceros rápidos, indeformables, de cementación, etc.

Si en el temple del acero se interrumpe el enfriamiento, durante un cierto tiempo a la temperatura ambiente, la austenita retenida que queda, se vuelve extraordinariamente refractaria a ser transformada en un posterior enfriamiento por debajo de cero grados. Así por ejemplo, si se mantiene al acero un cierto tiempo a la temperatura ambiente, y luego se continúa el enfriamiento, la cantidad de austenita que al final queda sin transformar es mayor que si el enfriamiento hasta la temperatura sub-cero hubiera sido continuo.

En cambio, si en el proceso de enfriamiento se estabiliza momentáneamente la temperatura del acero a 20 °C no se alcanza ese grado de transformación. A la temperatura ambiente la austenita se transforma lentamente, aumentando el porcentaje de martensita

---

desde 88% a 89% al cabo de una hora, a 90.5% a las diez horas y 91% a las cincuenta horas.

Si se continúa luego el enfriamiento después de este estacionamiento, hay un cierto intervalo en el que no hay modificaciones de estructura, iniciándose nuevamente la transformación de la austenita en la zona de 40° a 80° bajo cero y consiguiéndose al fin a 160° bajo cero, para estacionamientos del acero a 20° de 1,10 y 50 horas, 92,92.5 y 93 % de martensita en lugar de 98.5% que se consigue en el enfriamiento continuo

### **2.4.1.2.Tratamientos Termoquímicos**

Los tratamientos termoquímicos son tratamientos de recubrimiento superficial en los cuales interviene un elemento químico el cual se deposita por proceso de difusión en la superficie del material [9].

Este tipo de tratamientos se efectúan en aceros de bajo contenido de carbono (menos de 0.30%) [8].

A diferencia de los tratamientos térmicos, en los tratamientos termoquímicos existe modificación en su composición química, añadiendo diferentes productos químicos durante el proceso de tratamiento.

Tienen efecto solo superficial en las piezas tratadas y consiguen aumentar la dureza superficial de los componentes dejando el núcleo más blando y flexible.

#### **2.4.1.2.1.Cementación**

La cementación es el más antiguo de todos los procedimientos de endurecimiento superficial [2].

Consiste en el endurecimiento de la superficie externa del acero al bajo carbono, quedando el núcleo blando y dúctil. Como el carbono es el que genera la dureza en los aceros en el método de cementado se tiene la posibilidad de aumentar la cantidad de carbono en los aceros de bajo contenido de carbono antes de ser endurecido. El carbono se agrega al calentar al acero a su temperatura crítica mientras se encuentra en contacto con un material carbonoso. Los tres métodos de cementación más comunes son: empacado para carburación, baño líquido y gas [9].

Se emplean aceros aleados y sin aleación, de bajo contenido en carbono, generalmente de 0.08 a 0.25% de C y excepcionalmente algunas veces se cementan también aceros hasta de 0.40% de C [2].

La operación se realiza generalmente a temperaturas comprendidas entre 850 C y 1,000 C, siendo las temperaturas próximas a 900 C las más utilizadas [2].

Se realiza una aportación de carbono a la pieza creándose una capa, la cual puede ir desde 0.8 hasta 2.5 mm de profundidad [9].

Aplicaciones: Piñones, coronas, ejes, levas, guías, chavetas, columnas, etc.

#### **2.4.1.2.2. Nitruración**

La nitruración es un procedimiento de endurecimiento superficial en el que por absorción de nitrógeno, se consiguen durezas extraordinarias en la periferia de las piezas de acero [2].

Los objetos que se desean nitrurar son siempre templados y revenidos antes de la nitruración, para que el núcleo central quede con una resistencia elevada y sea capaz de resistir, durante el trabajo, las grandes presiones que le transmitirá la capa exterior dura. Las piezas después de templadas y revenidas se colocan en una caja cerrada, a través de la cual se hace pasar durante toda la operación una corriente de amoníaco. Todo el conjunto se introduce dentro de un horno, en el cual se mantiene una temperatura muy próxima a los 500°. Al calentarse el amoníaco a esas temperaturas, se disocia, según la siguiente reacción (ecuación 2.8):



Formándose nitrógeno atómico, que se combina con el aluminio, cromo, molibdeno, y hierro de los aceros formando nitruros en la capa periférica [2].

Con procesos normales de 20 a 80 horas de duración se obtienen capas nitruradas de espesores variables desde 0.20 a 0.70 mm.

Como después de la nitruración las piezas quedan ya duras superficialmente, no es necesario enfriarlas rápidamente desde elevada temperatura, después de estar completamente mecanizadas, como se hace en la cementación, evitándose, por tanto, las deformaciones que en esos enfriamientos se originan. Además la nitruración no modifica las características que se han obtenido previamente en el núcleo por temple y revenido, siempre que este último haya sido hecho a temperatura superior a 500° [2].

Por ser la temperatura de nitruración relativamente baja, no hay aumento del tamaño de grano y tampoco es necesario someter las piezas nitruradas a ningún tratamiento de regeneración posterior. Además con este tratamiento se pueden conseguir durezas muy superiores a las que se obtienen en la cementación [2].

Dentro de las ventajas de utilizar este tratamiento termoquímico se encuentran:

- Obtención de gran dureza en comparación con la cementación.
- Gran resistencia a la corrosión.
- Ausencia de deformaciones.
- Endurecimiento exclusivo de determinadas superficies de las piezas.
- Retención de las durezas a temperaturas elevadas.

Aunque en la actualidad no hay unanimidad absoluta en la interpretación de los fenómenos de endurecimiento que se producen en la nitruración, la teoría más admitida es la desarrollada por Fry y sus colaboradores, que señalan que la gran dureza de la capa nitrurada es debida a que el nitrógeno o los nitruros que se forman en el proceso originan una fuerte deformación de la red cristalina del acero situado en la zona periférica de las piezas, que es la causa directa del aumento de dureza [2].

Fry sugirió que el endurecimiento de los aceros cromo-aluminio es debido a la formación de nitruros de aleación, los cuales por ser insolubles en la matriz de ferrita son precipitados inmediatamente después de su formación en un estado de gran dispersión, y de la deformación que ocasionan en la red cristalina es la que ocasiona el endurecimiento.

Es probable que el hierro actúe de portador, formándose primero el nitruro de hierro que es soluble en el hierro alfa (ferrita), el cual en estado de solución reacción con los elementos aleados que también se encuentran disueltos en el hierro alfa.

De esta manera se forman los nitruros aleados que, por ser insolubles en el hierro alfa, se precipitan inmediatamente, quedando en forma de partículas submicroscópicas muy dispersas que forman la red y aumentan la dureza en el acero [2].

El éxito de Fry al nitrurar a 500° aceros aleados se debe a que en las condiciones que él eligió para la operación, existían en el acero en solución sólida elementos aleados capaces de formar nitruros.

Al difundirse hacia el interior del nitrógeno, cuando reacciona con esos elementos, se forman y precipitan nitruros de aluminio, cromo, molibdeno y vanadio que endurecen extraordinariamente la capa exterior.

La continua precipitación de nitruros aleados muy dispersos en la superficie de las piezas, llega a saturar el acero formándose una barrera de nitruros que se opone a la penetración del nitrógeno hacia el interior [2].

### **2.4.1.2.3. Carbonitruración**

La Carbonitruración es un procedimiento muy empleado en la actualidad para endurecer superficialmente los aceros. Este tratamiento se diferencia de la cementación en que parte del endurecimiento se consigue por la acción del nitrógeno.

Las piezas que se carbonituran se calientan a temperaturas próximas a 850 C en una atmósfera gaseosa que cede al acero simultáneamente carbono y nitrógeno y luego se enfrían en forma adecuada para obtener gran dureza en la zona superficial con buena tenacidad en el núcleo [2].

#### **2.4.1.2.4. Sulfinización**

Es un tratamiento desarrollado en Francia que mejora extraordinariamente la resistencia al desgaste de las piezas de acero, por la acción del azufre que se incorpora a la masa metálica por calentamiento a baja temperatura (565 °C) de las piezas en un baño de sales [2].

Como en este tratamiento, aunque no se observa un aumento muy sensible de la dureza superficial del acero, si se produce en cambio un gran aumento de la resistencia al desgaste [2].

Para el tratamiento se suele usar un baño formado por dos sales: una de bajo punto de fusión, constituida por carbonato sódico, con cianuro sódico y cloruro potásico, que en cierto modo puede considerarse como una típica sal de Cianuración, y una sal portadora del azufre, constituida por cloruro potásico con cianuro sódico y sulfito sódico. El contenido en sulfito sódico del baño suele ser un 12% aproximadamente.

En la Sulfinización se forman dos capas: una superficial dura y frágil de muy poco espesor (de 10 a 30 micrones), y otra interior más blanda y de más espesor. La profundidad total máxima que se alcanza en el tratamiento es 0.30 mm [2].

#### **2.4.1.2.5. Aluminización y Cromización**

Para endurecer el aluminio por el proceso de precipitación deben cumplirse ciertas condiciones. Primero, debe estar presente un elemento o compuesto en cantidades significativas cuya solubilidad en el estado sólido en el aluminio disminuya al disminuir la temperatura. Los elementos y compuestos que se encuentran en el aluminio como precipitados son: cobre, zinc, silicio, magnesio,  $Mg_2Si$  y  $MgZn_2$  [6].

El cobre es el principal elemento que causa el endurecimiento por precipitación de las aleaciones de aluminio tipo 2XXX. El aluminio puede retener mas cobre en solución solida a 900-1000° F (482-538° C) que a temperatura ambiente.

El éxito de un tratamiento térmico a solución depende de llevar el cobre a solución solida y luego atraparlo ahí. Esto se logra templando en agua después de calentar a la temperatura correcta [6].

El segundo requisito consiste en que cuando se lleva el cobre a una solución sobresaturada en el aluminio, precipita partículas muy finas de aluminuro de cobre en los límites de grano y a lo largo de los planos cristalinos, produciéndose deformaciones en el aluminio. Este proceso se conoce como envejecimiento o tratamiento térmico de precipitación.

El envejecimiento artificial se acelera este proceso y también incrementa la resistencia, pero disminuye la resistencia a la corrosión de algunas aleaciones tales como la 2024. El envejecimiento artificial consiste en calentar la pieza, tratada térmicamente a solución y templada, durante horas a 250-360° F (121-182 ° C), dependiendo de la aleación y luego enfriar la pieza a una temperatura inferior a 100° F (38 ° C). Esto se repite algunas veces antes de enfriar a temperatura ambiente, lo cual se conoce como tratamiento térmico interrumpido [6].

A menudo, el trabajo en frío del aluminio se realiza inmediatamente después del tratamiento térmico a solución y antes de que se inicie el envejecimiento. Este proceso asegura una dureza aún mayor así como mayor resistencia a la tracción de la pieza envejecida [6].

#### **2.4.1.2.5.1. Recubrimiento de metales**

Algunas veces se cubren placas o láminas de metales base o menos costosos, así como aquellos sometidos a deterioración por corrosión por una capa delgada de un metal menos sensible a la corrosión. Usualmente, estos metales protectores son más costosos y su costo resulta prohibitivo para fabricar la placa completa con ellos. Por lo general, el proceso de unir estos metales disímiles se realiza por medio de calor y presión. Algunos metales tales como el aluminio y el acero son tan diferentes que no pueden unirse por este medio, sino que se adhieren por método conocido como soldadura de explosión [6].

Debido a que el aluminio es más resistente a la corrosión que cualquier de sus aleaciones, a veces se aplica una capa delgada de aluminio puro sobre lámina de aleaciones que pueden ser endurecidas. El aluminio puro no puede tratarse térmicamente, pero las aleaciones de aluminio protegidas por recubrimientos pueden tratarse igual que otras aleaciones tratables térmicamente debido a la parte aleada del “sándwich”. Debe tenerse cuidado de evitar un sobrecalentamiento porque puede ocurrir la difusión de los elementos

aleantes en la superficie revestida. Este proceso invertiría eventualmente la superficie revestida del aluminio puro en una aleación de baja resistencia a la corrosión [6].

# U.A.B.C

## Capítulo 3. EXPERIMENTACIÓN.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA.**

**“NITRURACIÓN SÓLIDA CATALIZADA POR UREA Y SULFATO DE AMONIO EN ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO”**

**TESISTA: BLANCA SARAI DIAZ SILVA.**

## Capítulo 3. Experimentación

En este capítulo se presenta la metodología y procedimiento que se desarrolló durante la primera parte de la etapa experimental utilizando variabilidad de mezcla nitrurante, tiempo de permanencia, temperatura y catalizadores como agentes proveedores de nitrógeno.

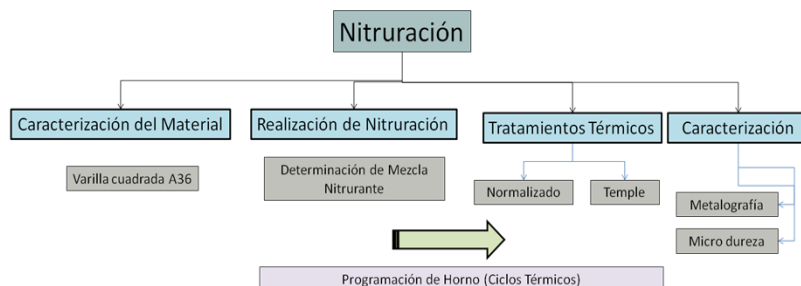
### 3.1. Metodología Desarrollada.

Dentro de las diferentes actividades realizadas en la primera parte de la etapa experimental se comprende la caracterización del material de llegada, la realización de los tratamientos termoquímicos y térmicos, así como su posterior caracterización.

Como primer paso se realizó la molienda de los componentes de las mezclas. Fue importante que estos tuvieran un granulado fino con la intención de dar homogeneidad y facilidad a la reacción química durante el tratamiento termoquímico.

Después se realizó el corte del material a estudiar así como su caracterización. Se preparó primero las piezas para su tratamiento termoquímico y tratamiento térmico posterior. En esta etapa se desarrolló cada espécimen de acuerdo a las condiciones de temperatura, tiempo de permanencia y mezcla nitrurante seleccionada.

Una vez obtenidas las piezas ya tratadas, se realizó el montaje metalográfico de acuerdo a la norma ASTM E3. Posteriormente se realizó el análisis a través de la obtención de la profundidad de capa de acuerdo a la norma ASTM G79-83 y SAE J423, a si como su micro-dureza bajo la norma ASTM E384. Ver **Figura 3-1**.



**Figura 3-1.** Actividades desarrolladas durante la etapa experimental.

### 3.1.1. Material

Durante esta etapa experimental se utilizaron los siguientes materiales:

- Material para montaje metalográfico.
- Material para manipulación de especímenes.
- Mezcla Nitrurante.

#### 3.1.1.1. Material para montaje metalográfico

El material utilizado para el montaje metalográfico fué:

1. Molde para montar el espécimen.
2. Secante.
3. Resina Cristal.
4. Especímenes (Acero A36).
5. Recipiente para realizar la mezcla.
6. Lijas de acuerdo a la norma ASTM E3.
7. Algodón.

Como parte del procedimiento y de acuerdo a la norma ASTM E3, se utilizó Alúmina para la obtención de un pulido espejo y Nital al 2% para mostrar la estructura característica del acero.

La cantidad de resina y secante utilizada para el montaje metalográfico se muestra en la **Tabla 3-1**.

**Tabla 3-1** Cantidad de resina y catalizador para preparación metalográfica.

Material	Características del Material	Cantidad	Tiempo
Resina Cristal	Resina para realizar montaje metalografico.	30 cm <sup>3</sup>	Depende de la cantidad de Catalizador (Secante).
Secante (Catalizador)	Catalizador para endurecer la resina.	10 gotas	Al mezclarlo con la resina, esta endurece en aproximadamente 5 minutos aplicando calor.

### 3.1.1.2. Material para manipulación de especímenes

El material para realizar la manipulación de los especímenes a tratar térmicamente se realizó con las medidas de precaución de Seguridad e Higiene. Ver **Figura 3-2**.

En base a lo anterior, el material que se utilizó fue:

1. Casco protector.
2. Guantes especiales.
3. Pinzas de sujeción de espécimen.

Es importante calzar zapato cerrado cuando se realicen tratamientos térmicos así como una bata de protección.



**Figura 3-2** Material para manipulación de piezas

### 3.1.1.3. Mezcla Nitrurante

En esta etapa de experimentación se utilizaron 2 tipos de mezclas, una consistió en Carbón Vegetal con Urea como catalizador y la otra en Carbón Vegetal con Sulfato de Amonio en diferentes proporciones de 70% carbón vegetal-30% catalizador, 80% carbón vegetal-20% catalizador y 90% carbón vegetal-10% catalizador.

El nitrógeno que se empleó en el proceso provino de la Urea y el Sulfato de Amonio, los cuales al exponerse a elevada temperatura en contacto con el acero caliente actúan como un verdadero agente catalizador, se disocia en nitrógeno e hidrógeno atómico.

Únicamente una pequeña proporción del nitrógeno reacciona con el acero, transformándose rápidamente el resto en nitrógeno molecular inerte.

El hidrogeno también se encuentra en los primeros momentos en estado atómico, pero pasa luego rápidamente al estado molecular.

Ambos materiales se trituran y se pesaron en la balanza analítica para sacar las proporciones de acuerdo al volumen del recipiente utilizado.

### 3.1.2. Equipo

El equipo utilizado durante la primera parte de la etapa experimental se muestra en la **Figura 3-3**.



**Figura 3-3.**Equipo utilizado durante la etapa de experimentación.

La balanza analítica fue utilizada para pesar la pieza y cada uno de los componentes de la mezcla nitrurante con exactitud. Esto, una vez terminado el proceso de nitruración, me permitió calcular la ganancia de masa en la pieza.

La cortadora METACUT fue utilizada para realizar los cortes de los especímenes.

En el horno eléctrico se sometieron las piezas a los diferentes tratamientos termoquímicos y térmicos.

La plancha térmica y la pulidora se utilizaron para realizar el montaje metalográfico bajo la norma ASTM E3. El microscopio junto con el software Motic Images Plus 2.0 fue utilizado para realizar el análisis micro-estructural para cada una de las diferentes muestras obtenidas.

### 3.1.3. Elección de la temperatura de nitruración

Las temperaturas del tratamiento termoquímico de nitruración sólida serán intervalos representados por 900°C, 940°C y 980°C, respectivamente.

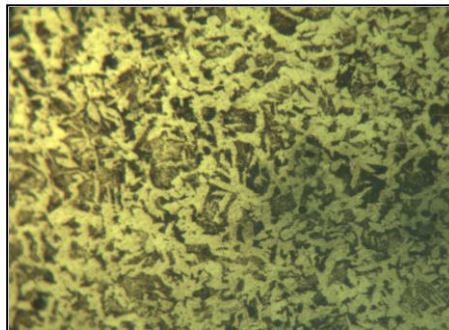
La temperatura óptima de acuerdo a la bibliografía consultada, para un proceso de “empaquetamiento” hace posible tener un potencial de carbono estable del gas formado durante el tratamiento termoquímico a altas temperaturas en un intervalo de 940°C a 1000°C para una buena nitruración sólida en base a grafito y un catalizador donador de nitrógeno.

En base a lo anterior, se fijó la temperatura de 940°C como la temperatura “intermedia”, 900°C y 980°C, como las respectivas temperaturas bajas y altas, con la finalidad de estudiar el impacto de la variabilidad de este factor sobre el proceso de nitruración sólida.

### 3.1.4. Características del material A36

Como parte de la etapa experimental, es de gran importancia la caracterización del material de llegada, esto con la finalidad de comparar el material virgen y el material obtenido bajo tratamiento termoquímico.

En la **Figura 3-4** se observa la metalografía característica del acero A36, la cual consiste en una matriz Ferrita-Perlita.



**Figura 3-4.** Metalografía del acero A36.

Con respecto a su micro dureza, a continuación se desglosan los resultados obtenidos.

**Tabla 3-2** Resultados de Micro-dureza del material de llegada.

Distancia	Dureza		Distancia	Dureza	
	<i>Vickers</i>	<i>Rockwell</i>		<i>Vickers</i>	<i>Rockwell</i>
<b>0</b>	172.3 HV	3.7 HRc	<b>180</b>	173.3 HV	4.0 HRc
<b>20</b>	214.1 HV	14.2 HRc	<b>200</b>	182.7 HV	6.8 HRc
<b>40</b>	203.1 HV	11.8 HRc	<b>220</b>	178.2 HV	5.4 HRc
<b>60</b>	199.6 HV	11.0 HRc	<b>240</b>	178.2 HV	5.4 HRc
<b>80</b>	197.3 HV	10.3 HRc	<b>260</b>	178.9 HV	5.7 HRc
<b>100</b>	192.8 HV	9.3 HRc	<b>280</b>	180.4 HV	6.0 HRc
<b>120</b>	185.4 HV	7.3 HRc	<b>300</b>	179.3 HV	5.7 HRc
<b>140</b>	179.1 HV	5.7 HRc	<b>Centro</b>	175.2 HV	4.6 HRc
<b>160</b>	162.9 HV	1.0 HRc			

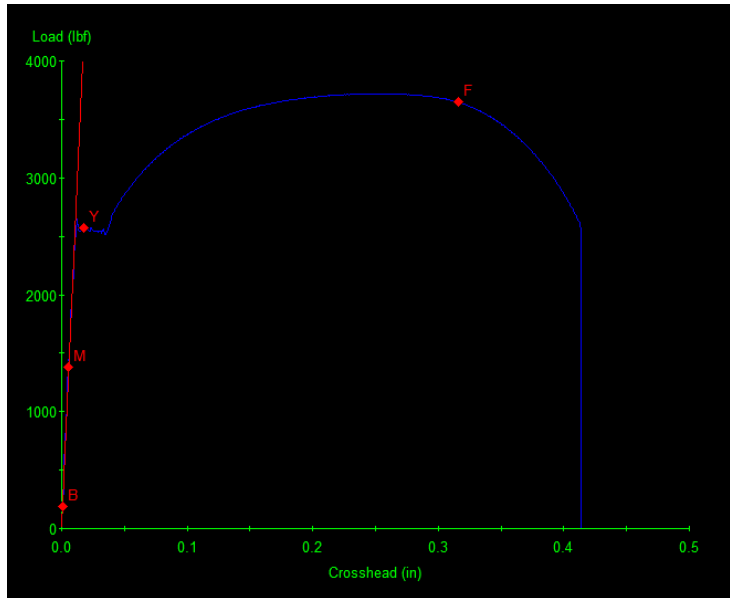
De acuerdo con la Norma Mexicana Siderúrgica NMX-B-254-1993 “Acero Estructural” en la cual se describen los grados de acero estructural disponibles en perfiles, placas y secciones estructurales huecas (tubos) en el Mercado nacional, se puede consultar de forma breve aquellas que son importantes, reconocidas y aceptadas por las normas de diseño mexicanas.

Para el Acero Estructural la resistencia a la tracción ( $F_u$ ) en barras y placas deberá encontrarse entre 400 a 500 MPa [58-60 Ksi] para la Norma Mexicana (NMX) o 4080 a 5620 Kg/cm<sup>2</sup> (American Society for Testing Materials). En base a lo anterior y con el objetivo de caracterizar el material de llegada, se realizaron 2 pruebas de tensión a especímenes de tubo sólido A36. Las dimensiones fueron seleccionadas acorde a la ASTM E8.

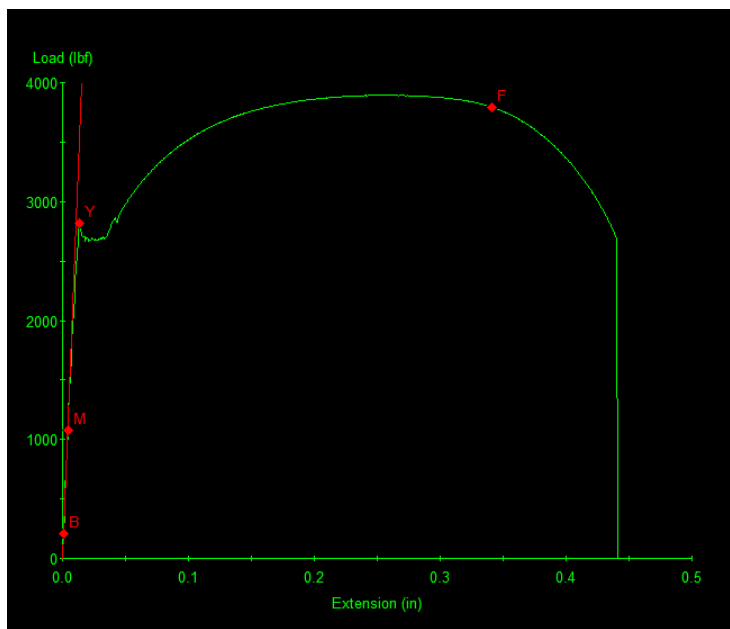
En la **Tabla 3-3** , **Figura 3-5** y **Figura 3-6** se pueden observar los resultados obtenidos.

**Tabla 3-3** Resultados de Prueba de Tension al material de llegada.

Especimen	Pi	Diametro (In)	Radio (In)	Peak Load (Lbf)	Esf. Max (Ksi)
Muestra 1	3.14	0.25	0.125	2589.19	52.20
Muestra 2	3.14	0.25	0.125	3854.424	78.56
			Average	3276.78	65.67
			Std.Dev	603.57	18.24



**Figura 3-5.** Grafica de Tensión (Extensión (in) Vs Carga (Lbf) Muestra 1.



**Figura 3-6.** Grafica de Tensión (Extensión (in) Vs Carga (Lbf) Muestra 2.

---

### 3.1.4.1. Proceso de Nitruración Sólida y los Tratamientos Térmicos posteriores.

#### Nitruración Sólida

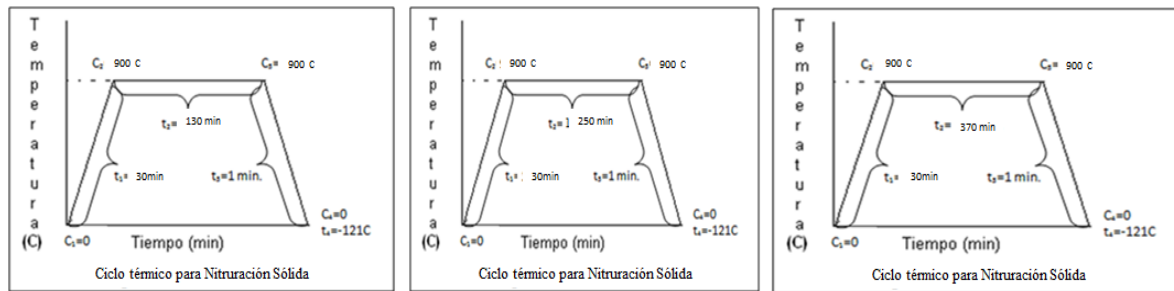
- Se inició pesando la muestra a nitrurar en la balanza analítica, esto permitió comparar la ganancia de masa al final del tratamiento termoquímico.
- Se seleccionaron los recipientes a utilizar para realizar el tratamiento de nitruración.
- Se obtuvo la cantidad de gramos de grafito que puede contener el recipiente.
- Una vez que se supo la cantidad de gramos a utilizar, se realizó una regla de tres para obtener el porcentaje de la mezcla. Se pesó cada uno y se mezcló.

Una de las normas utilizadas durante esta primera etapa de experimentación fue la ASTM G79-83.

Esta norma cubre los procedimientos para la identificación y la medición de la extensión de carburización en un metal y de la interpretación y evaluación de los efectos de la carburización.

- Se colocó la mezcla y se asentó dando pequeños golpes al recipiente.
- Una vez listo el recipiente, se colocó en el horno junto con algunos refractarios (ladrillos) y se programó el horno de acuerdo al ciclo térmico correspondiente.
- Una vez que se cumplió el ciclo térmico se sacó el recipiente y se dejó enfriar al aire. **Figura 3-7.**
- Enfriado el recipiente, se sacó la pieza y se limpió. Se utilizó la balanza analítica para pesar nuevamente la pieza.

Los resultados se apuntaron para después realizar el cálculo de ganancia de masa.



**Figura 3-7.** Ciclo Térmico de Nitruración Sólida a diferentes temperaturas y tiempos de permanencia.

### Normalizado

- La pieza previamente nitrurada se colocó en el horno y se programó a una temperatura de 850°C.
- El tiempo de permanencia para este tratamiento térmico fue de 40 minutos.
- Una vez que se cumplió el tiempo de permanencia se sacó la pieza para que su enfriamiento se realizará a temperatura ambiente.

### Temple

- La pieza previamente nitrurada se colocó en el horno y se programó a una temperatura de 825°C.
- El tiempo de permanencia fue de 40 minutos.
- Una vez que se cumplió el tiempo de permanencia se sacó la pieza con cuidado y se sumergió rápidamente en un recipiente con agua.

## 3.2. Aplicación del tema de tesis en la industria.

La aplicación del tema de tesis se enfocó en una problemática actual en la empresa Rheem Heating, Cooling and Water Heating Products ubicada en la ciudad de Mexicali, Baja California, Mexico, especializada en la fabricación de boilers eléctricos y de gas. La aplicación consiste en la optimización del material para un Thickness Gage (Medidor de espesor), el cual es utilizado para medir el espesor de la porcelana del boiler. **Figura 3-8.**



**Figura 3-8.** Thickness Gage para medir espesor de porcelana.

Este material presenta abolladuras en su superficie externa debido a las caídas en el área de producción lo que hace que pierda las especificaciones y tome medidas erróneas.

Las acciones que se iniciaron para abordar esta problemática fueron:

1. Caracterización del material de llegada: Se tomaron durezas superficiales (Rockwell) para conocer la dureza promedio que manejaba. Esta fue equivalente a 22 HRC. **Tabla 3-4.**

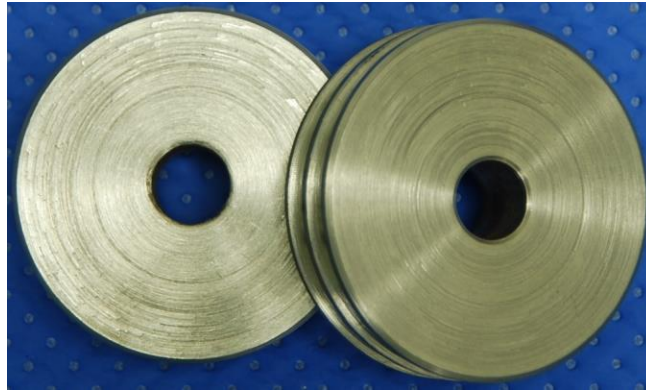
**Tabla 3-4.** Lecturas de dureza Rockwell.

Resultados de Dureza Superficial.		
ESCALA PARA MATERIALES DUROS		
15 N	30 N	45 N
72.7	44.8	21.4
HRC= APROX. 22		

2. Debido al desconocimiento del material, si tenía algún tratamiento térmico, se templó para saber hasta que dureza se podría alcanzar. Los resultados fueron muy similares a los de la caracterización superficial. Esto permitió concluir que el material había sido previamente templado y su contenido de carbono no era lo suficientemente alto como para incrementar su dureza.

A partir de lo anterior, se propuso:

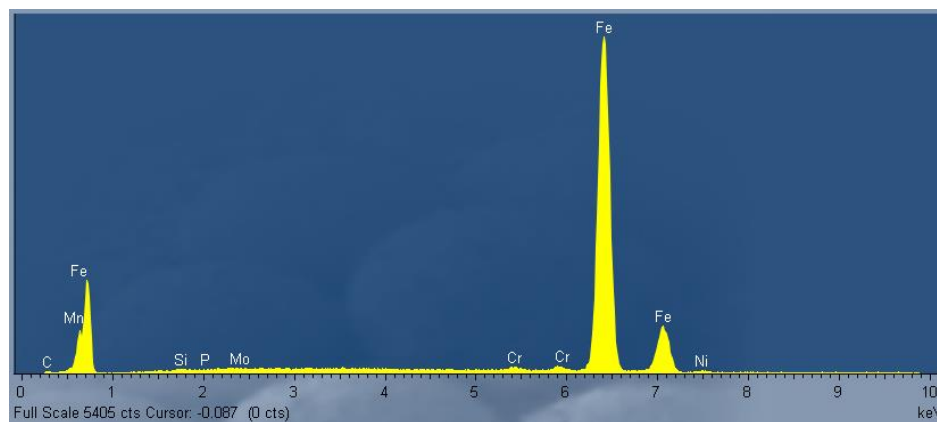
1. Manufactura del Thickness Gage en acero 8620. Ver **Figura 3-9**.



**Figura 3-9.** Thickness Gage fabricado de acero 8620.

El acero 8620 es un acero grado maquinaria al Níquel-Cromo Molibdeno para cementado. Ofrece muy buena dureza superficial y gran tenacidad al núcleo. El proceso de cementado se aplica para incrementar el contenido de carbón en la superficie para que con un tratamiento térmico adecuado, la superficie sea substancialmentemas dura.

La composicion química del acero 8620 consta de un 0.20 % de Carbono, 0.80% de Manganeso, 0.25 % de Silicio, 0.60 % de Níquel, 0.50 % de Cromo y 0.20 % de Molibdeno. Estos elementos aleantes se corroborant en el espectro arrojado por el análisis químico puntual realizado en el microscopio electronico de barrido (MEB) marca por la técnica EDX.

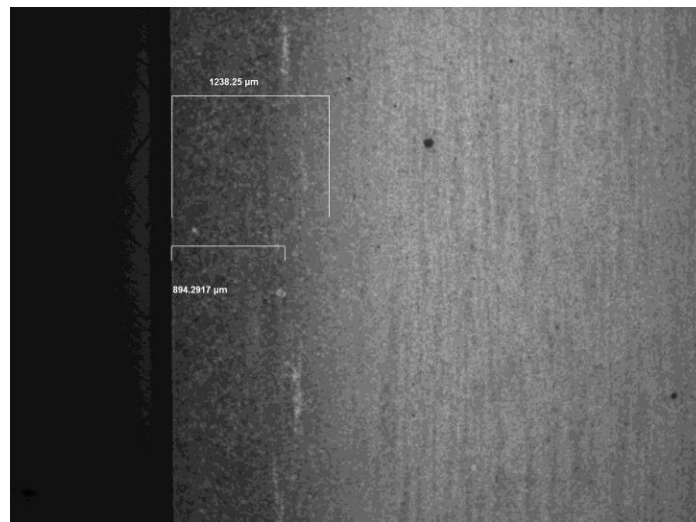


**Figura 3-10.** Elementos aleantes presentes en acero 8620.

Con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas del medidor de espesores, se decidió realizar Nitruración Solida en espécimen manufacturado de acero 8620 bajo las condiciones óptimas descritas a continuación:

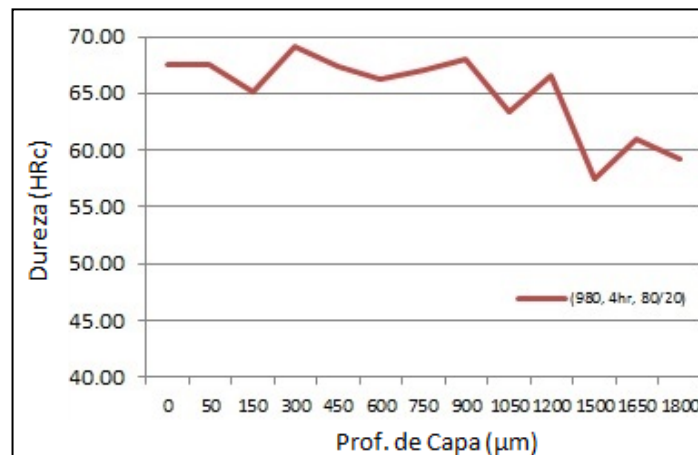
1. Mezcla Nitrurante : 80/20 (80 % Grafito – 20 % Urea).
2. Tiempo de Permanencia: 4 hrs.

En la **Figura 3-11** se observa que para un acero 8620 tratado con una mezcla 80/20 de grafito-urea con un tiempo de permanencia de 4 horas se obtiene una capa efectiva total de 1238.25  $\mu\text{m}$  y una capa efectiva de 894.2917  $\mu\text{m}$ .



**Figura 3-11.** Metalografía de Acero 8620 Nitrurado.

La dureza superficial obtenida se puede apreciar en la **Figura 3-12**.



**Figura 3-12.** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa de acero 8620 nitrurado.

# U.A.B.C

## Capítulo 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA.**

**“NITRURACIÓN SÓLIDA CATALIZADA POR UREA Y SULFATO DE AMONIO EN ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO”**

**TESISTA: BLANCA SARAI DIAZ SILVA.**

## Capítulo 4. Análisis y resultados

### 4.1.Introducción.

En este capítulo se presentaran y analizaran los resultados obtenidos durante la etapa de experimentación para muestra de acero A36 expuesta a diferentes mezclas (90/10,80/20 y 70/30), diferentes catalizadores (Urea y Sulfato de Amonio) y diferentes temperaturas (900 °C, 940 °C y 980 °C).

Su análisis se basa, según las condiciones utilizadas, en los resultados de ganancia de masa, dureza promedio máxima y profundidad de capa nitrurada.

### 4.2.Resultados de Experimentación

Los resultados de ganancia de masa se expresarán de acuerdo al catalizador utilizado, sus diferentes tiempos de permanencia en el horno, así como la temperatura a la cual se sometieron.

A continuación se presentan los resultados obtenidos con el catalizador Urea. En la **Tabla 4.1** se aprecia la ganancia de masa en el acero A36 para un tiempo de permanencia de 2 horas con variaciones de temperaturas (900°C, 940°C, 980°C) y variaciones de mezcla grafito-urea (90/10,80/20,70/30).

**Tabla 4-1** Comparación de ganancia masa a una temperatura de 2 h constante.

Muestra	Temperatura			Tiempo Permanencia (h)			Mezcla			Pesos de las muestras			
	900 °C	940 °C	980 °C	2	4	6	90/10	80/20	70/30	Pieza (Inicio)	Pieza (Final)	Dif. Pesos	Catalizador
1	X			X			X			19.54 g	19.57 g	0.030 g	Urea
2	X			X				X		18.77 g	18.8 g	0.030 g	Urea
3	X			X					X	20.38 g	20.4 g	0.020 g	Urea
4		X		X			X			19.58 g	19.62 g	0.040 g	Urea
5		X		X				X		18.73 g	18.76 g	0.030 g	Urea
6		X		X					X	18.21 g	18.23 g	0.020 g	Urea
7			X	X			X			17.85 g	17.9 g	0.050 g	Urea
8			X	X				X		17.75 g	17.8 g	0.050 g	Urea
9			X	X					X	19.34 g	19.38 g	0.040 g	Urea

Los resultados arrojan que, para 900 °C a un tiempo de permanencia de 2h y variación de mezcla grafito-urea, la ganancia de masa se da en mayor proporción en una mezcla 90/10.

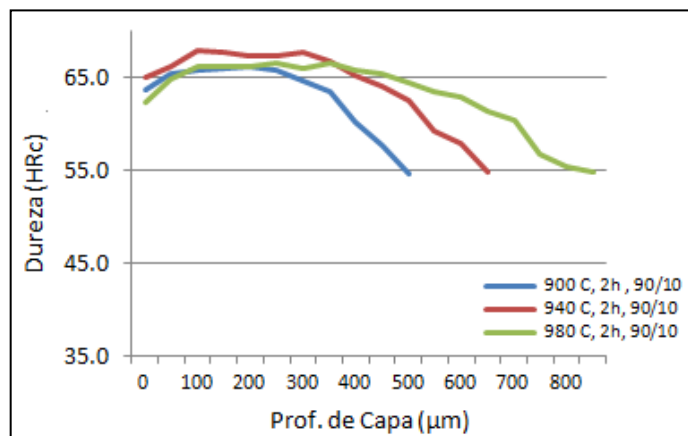
Con respecto a la temperatura de 940 °C, a un tiempo de permanencia de 2 h y variación de mezcla grafito-urea, la ganancia de masa sigue siendo mejor para una mezcla 90/10, se observa que, al aumentar la temperatura de 900 °C a 940 °C, la ganancia va incrementando de 0.03 a 0.04 gramos.

El efecto de la temperatura de 980 °C, a un tiempo de permanencia de 2 h y variación de mezcla grafito-urea indica que la ganancia de masa es similar para condiciones de mezcla de 90/10 y 80/20.

Esto permite concluir que conforme aumenta la temperatura de 900 °C a 980 °C, la ganancia de masa tiene una estrecha relación entre una mezcla 80/30 y 90/10.

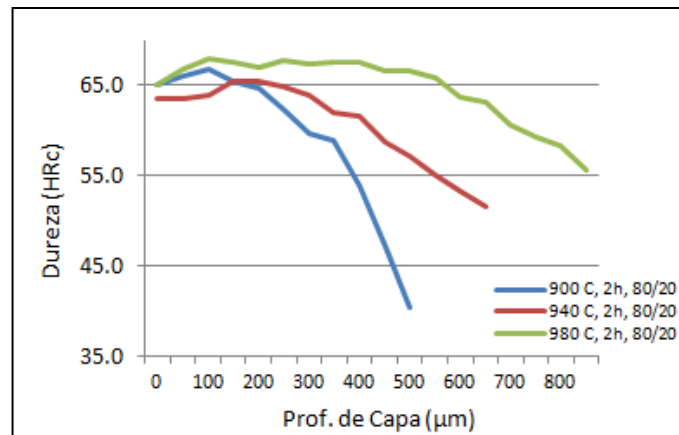
En las **Figuras 4-1, Figura 4-2 y Figura 4-3** se muestra el efecto de la variación de temperatura y variación de mezcla en la profundidad de capa a 2 horas y con variación de mezcla y temperatura.

En la **Figura 4-1** se observa que, para una variación de temperatura (900 °C, 940 °C y 980°C), a un tiempo de permanencia equivalente a 2h y una mezcla de 90/10, se obtiene mayor dureza a una temperatura de 940 °C , siendo esta equivalente a 67.8 HRc. Sin embargo, la profundidad de capa se presenta en mayor grado en la mezcla elevada a 980 °C, independientemente de su dureza.



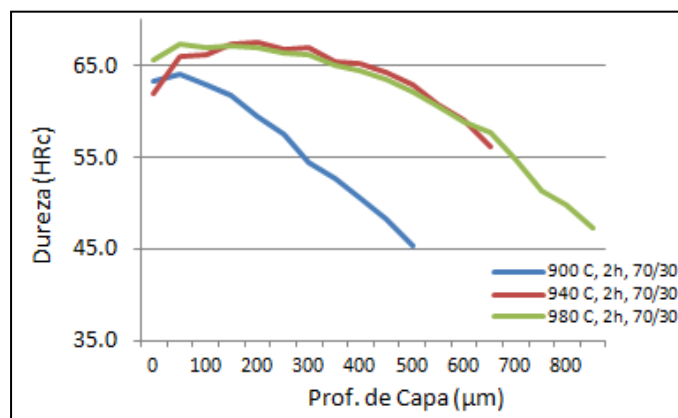
**Figura 4-1** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (2 h-90/10- Todas las Temperaturas).

Lo anterior permite concluir que la temperatura influye en la penetración de la capa nitrurada. En la **Figura 4-2** para variación de temperatura (900 °C, 940 °C y 980 °C), a un tiempo de permanencia equivalente a 2h y una mezcla de 80/20, se observa que se obtiene mayor dureza a una temperatura de 980 °C, siendo esta equivalente a 67.8 HRc. En estas mismas condiciones, la profundidad de capa se presenta en mayor grado conforme aumenta la temperatura.



**Figura 4-2** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (2 h-80/20- Todas las Temperaturas).

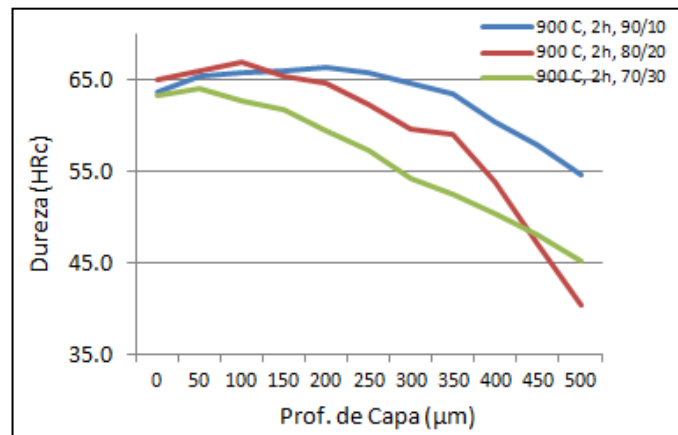
En la **Figura 4-3** para una variación de temperatura (900 °C, 940 °C y 980 °C), a un tiempo de permanencia equivalente a 2 h y una mezcla 70/30, se obtiene mayor dureza en dos condiciones. Para temperaturas de 940°C y 980°C, arrojando la primera y segunda condición una dureza promedio equivalente a 67.3 y 67.1. Sin embargo, la profundidad de capa presente en estas dos condiciones difiere, obteniendo mejor profundidad de capa en la de mayor temperatura.



**Figura 4-3** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (2 h-70/30- Todas las Temperaturas).

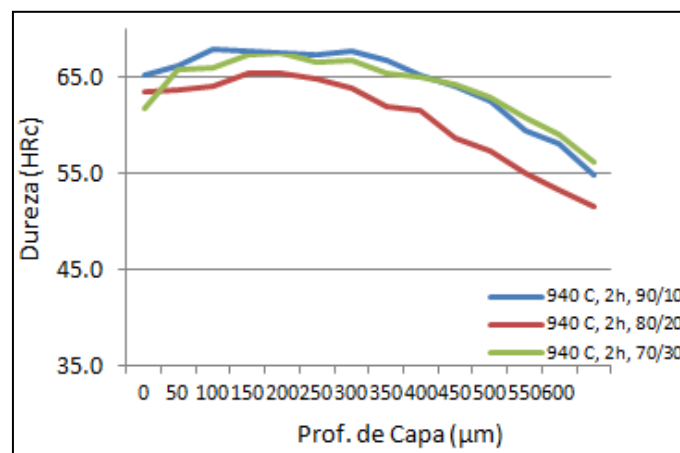
En las **Figuras 4-4, Figura 4-5 y Figura 4-6** se muestra el efecto de la mezcla a un tiempo de permanencia de 2 hrs, todas las mezclas y temperaturas variables.

En la **Figura 4-4** se observa que a una temperatura equivalente a 900 °C todas las mezclas coinciden en una profundidad de capa total aproximada a las 450-500 micras. Esto debido a que todas se sometieron a la misma temperatura. Sin embargo, dependiendo de la mezcla cambia la dureza en las muestras. La mezcla que da resultados de mayor dureza es la de 90/10.



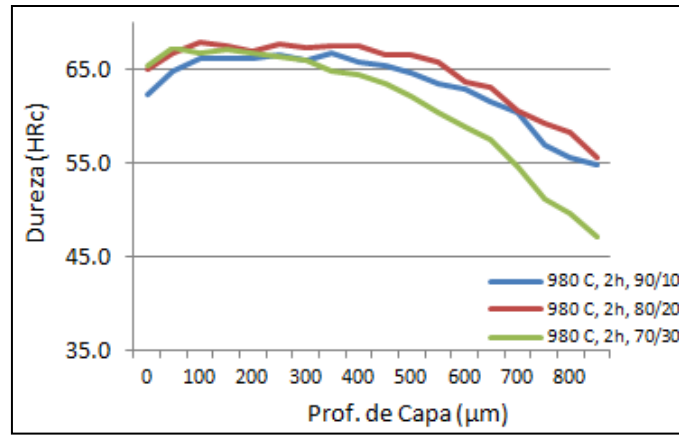
**Figura 4-4** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (2 h- Todas las Mezclas-900 °C).

En la **Figura 4-5** el comportamiento de las mezclas 90/10 y 70/30 conforme se aumenta la temperatura a 940°C es semejante, dando una dureza promedio equivalente a 67 HRc. Su profundidad de capa en los tres casos a 940 °C es aproximadamente de 650 micras.



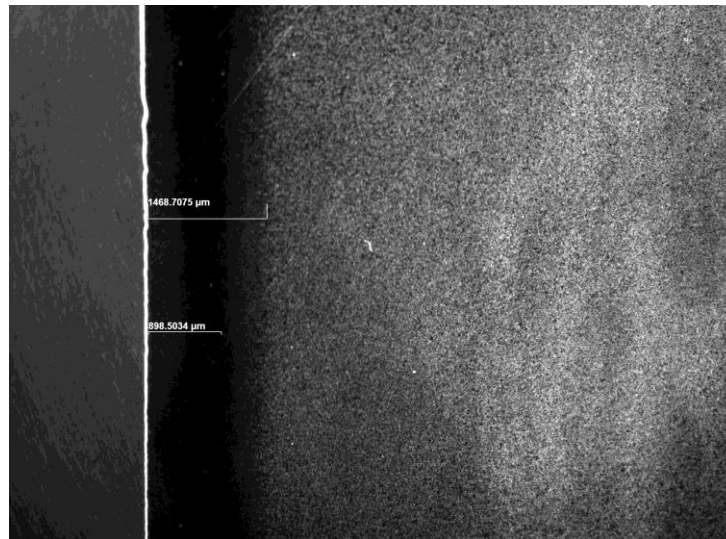
**Figura 4-5** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (2 h- Todas las Mezclas-940 °C).

En la **Figura 4-6** para las condiciones de 980 °C , 2 h de permanencia y todas las mezclas, se observa que el comportamiento de las mezclas 90/10 y 80/20 sigue siendo muy semejante. Su profundidad de capa aproximada aumenta a un intervalo aproximado de 850 micras.



**Figura 4-6** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (2 h- Todas las Mezclas-980 °C).

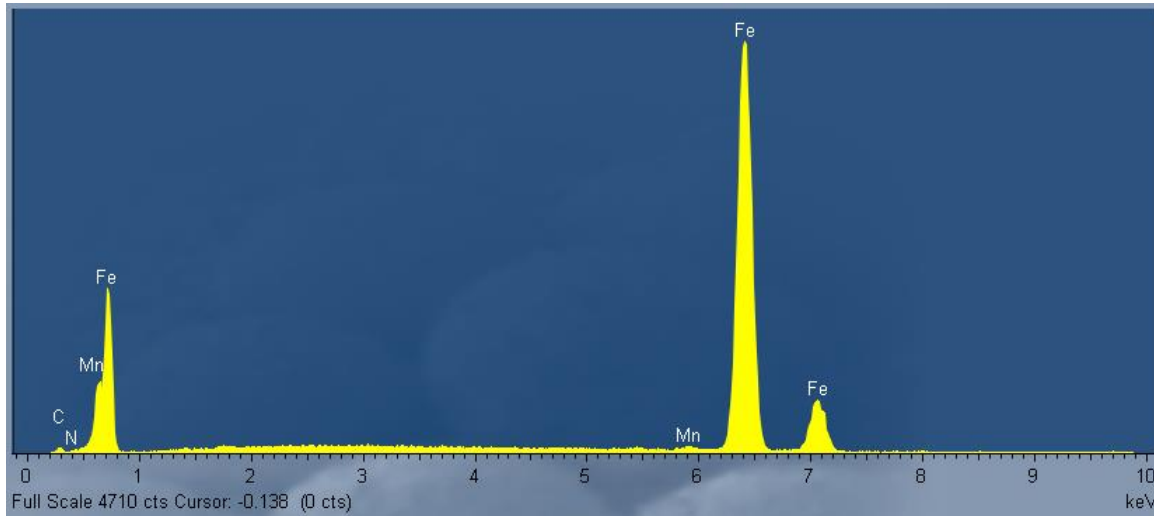
Concluyendo que a mayor temperatura de tratamiento, mayor profundidad de capa. A mayores temperaturas, los mejores resultados de dureza se presentan con menor cantidad de mezcla. Para la mezcla 90/10, la dureza promedio más alta fue de 66 HRc, mientras que para la mezcla de 80/20 fue de 67 HRc.



**Figura 4-7** Profundidad de Capa para espécimen #8 (980 °C, 2 h, 80/20).

En la **Figura 4-7** se puede apreciar que la profundidad de capa efectiva es equivalente a 898.50 µm y una capa total de 1468.70 µm.

En la **Figura 4-8** se pueden apreciar los elementos presentes en la capa nitrurada de la muestra #8.



**Figura 4-8** Elementos presentes en muestra #8 (980 °C, 2 h-80/20).

A través de este análisis químico puntual realizado en el MEB (Microscopio Electrónico de Barrido) con la técnica EDX (Espectroscopia de dispersión de energía de rayos X) se establecieron los diferentes elementos presentes en la muestra #8, nitrurada 2 hrs en una mezcla 80/20 a 980 °C.

A su vez, al ser un análisis cuantitativo, se determina que, el porcentaje de los elementos más significantes se presentan en % de peso de la siguiente manera (Ver **Tabla 4.2**).

La **Tabla 4.2** % en peso de elementos en muestra #8.

Elemento	% en peso
Carbono (C)	5.28%
Nitrogeno (N)	0.52%
Manganeso (Mn)	0.63%
Hierro (Fe)	93.56%

Lo anterior permite confirmar que, la presencia del elemento Nitrógeno permite la formación de nitruros en la capa depositada en la muestra #8 proporcionando las características de dureza y profundidad de capa descritas.

En la **Tabla 4.3** se aprecia la ganancia de masa en el acero A36 para un tiempo de permanencia de 4 horas con variaciones de temperaturas (900°C, 940°C, 980°C) y variaciones de mezcla grafito-urea (90/10,80/20,70/30).

La **Tabla 4.3** Comparación de ganancia masa a una temperatura de 4 h constante.

Muestra	Temperatura			Tiempo Permanencia (h)			Mezcla			Pesos de las muestras			
	900 °C	940 °C	980 °C	2	4	6	90/10	80/20	70/30	Pieza (Inicio)	Pieza (Final)	Dif. Pesos	Catalizador
10	X				X		X			20.13 g	20.15 g	0.020 g	Urea
11	X				X			X		18.16 g	18.18 g	0.020 g	Urea
12	X				X				X	18.03 g	18.06 g	0.030 g	Urea
13		X			X		X			20.6 g	20.66 g	0.060 g	Urea
14		X			X			X		19.32 g	19.37 g	0.050 g	Urea
15		X			X				X	17.11 g	17.15 g	0.040 g	Urea
16			X		X		X			19.43 g	19.5 g	0.070 g	Urea
17			X		X			X		18.21 g	18.27 g	0.060 g	Urea
18			X		X				X	19.36 g	19.42 g	0.060 g	Urea

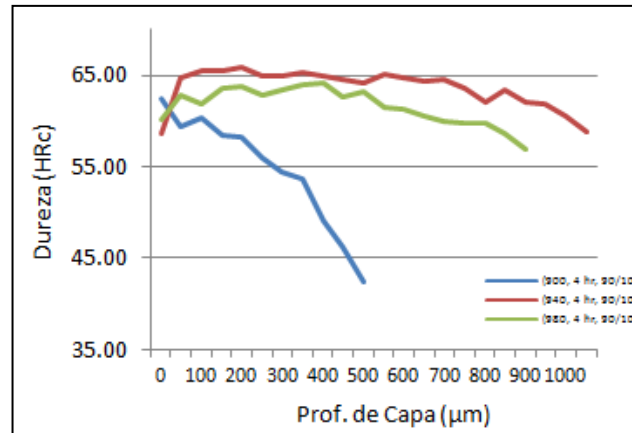
La **Tabla 4.3** permite observar que conforme se aumenta la temperatura, la ganancia de masa aumenta.

Los resultados arrojan que, para 900 °C a un tiempo de permanencia de 4h y variación de mezcla grafito-urea, la ganancia de masa se da en mayor proporción en una mezcla 80/20. Con respecto a la temperatura de 940 °C, a un tiempo de permanencia de 4 h y variación de mezcla grafito-urea, la ganancia de masa fue mejor para una mezcla 90/10.

El efecto de la temperatura de 980 °C, a un tiempo de permanencia de 4 h y variación de mezcla grafito-urea indica que la ganancia de masa será mejor para la mezcla 90/10. Sin embargo, cabe resaltar que la relación de ganancia de masa entre las mezclas a una temperatura creciente está estrechamente relacionada, no existiendo un rango de diferencia muy grande entre cada una.

Las **Figuras 4-9**, **Figura 4-10** y **Figura 4-11** muestra el efecto del tiempo de permanencia (4 hrs) con las diferentes mezclas y variación de temperatura en la profundidad de capa. En la **Figura 4-9** se observa que, para una variación de temperatura

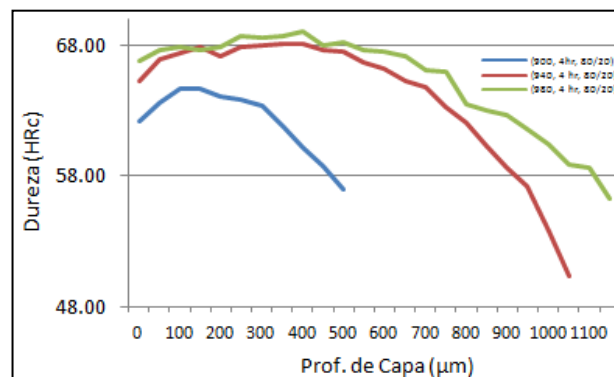
(900 °C, 940 °C y 980°C), a un tiempo de permanencia equivalente a 4 h y una mezcla de 90/10, se obtiene mayor dureza a una temperatura de 940 °C , siendo esta equivalente a 65.9 HRc. Sin embargo, la profundidad de capa se presenta en mayor grado en la mezcla elevada a 940 °C.



**Figura 4-9** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (4 h-90/10- Todas las Temperaturas).

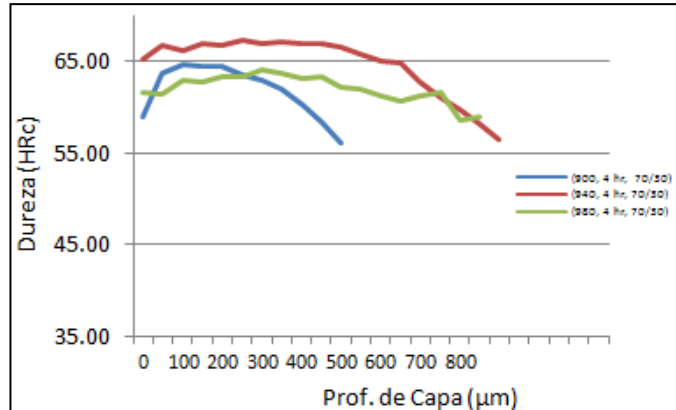
Se observa que a temperatura de 940 °C y 980 °C el comportamiento es muy similar a diferencia de la muestra tratada a 900 °C.

En la **Figura 4-10** para una variación de temperatura (900 °C, 940 °C y 980 °C), a un tiempo de permanencia equivalente a 4 h y una mezcla de 80/20, se observa que se obtiene mayor dureza a una temperatura de 980 °C, siendo esta equivalente a 68.75 HRc. En estas mismas condiciones, la profundidad de capa se presenta en mayor grado conforme aumenta la temperatura.



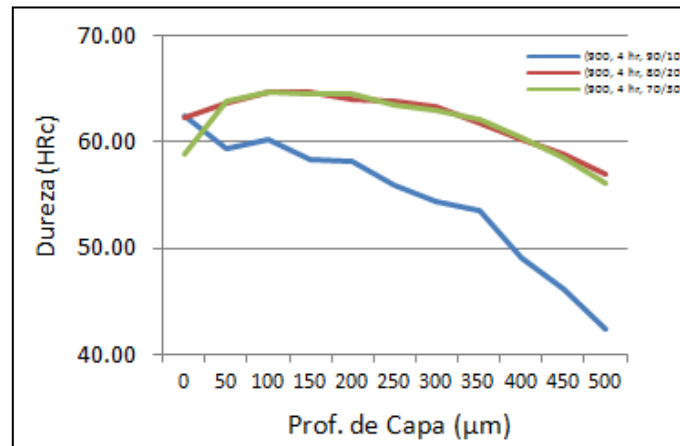
**Figura 4-10** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (4 h-80/20- Todas las Temperaturas).

En la **Figura 4-11** para una variación de temperatura (900 °C, 940 °C y 980 °C), a un tiempo de permanencia equivalente a 4 h y una mezcla 70/30, se obtiene mayor dureza a una temperatura de 940 °C, siendo esta equivalente a 67.23 HRc. La profundidad de capa presente a este tiempo de permanencia es equivalente a 850-900 micras.



**Figura 4-11** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (4 h-70/30- Todas las Temperaturas).

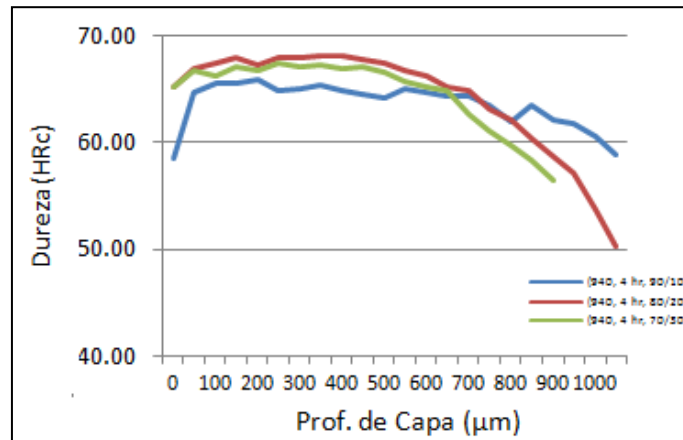
Se concluye que para mezclas con una relación de grafito-catalizador de 70/30 a 4 horas la temperatura óptima será de 940 °C. En la **Figura 4-12** se observa que a una temperatura equivalente a 900 °C todas las mezclas coinciden en una profundidad de capa aproximada a las 500 micras. Esto debido a que todas se sometieron a la misma temperatura. Sin embargo, dependiendo de la mezcla es la dureza a obtener.



**Figura 4-12** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (4 h-Todas las Mezclas-900°C)

Las mezclas que presentan un comportamiento similar en estas condiciones son la mezcla 80/20 y 70/30.

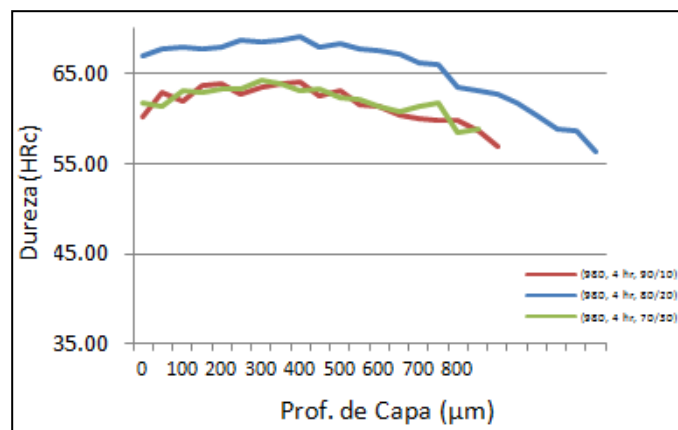
El comportamiento de las mezclas 80/20 y 70/30 conforme se aumenta la temperatura a 940°C es semejante (Ver **Figura 4-13**), dando una dureza promedio equivalente a 68 HRc, siendo ligeramente mayor la mezcla 80/20.



**Figura 4-13** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (4 h-Todas las Mezclas-940°C).

Para las condiciones de 980 °C, 4 h de permanencia y todas las mezclas (**Figura 4-14**), se observa que el comportamiento de las mezclas 90/10 y 70/30 es muy semejante.

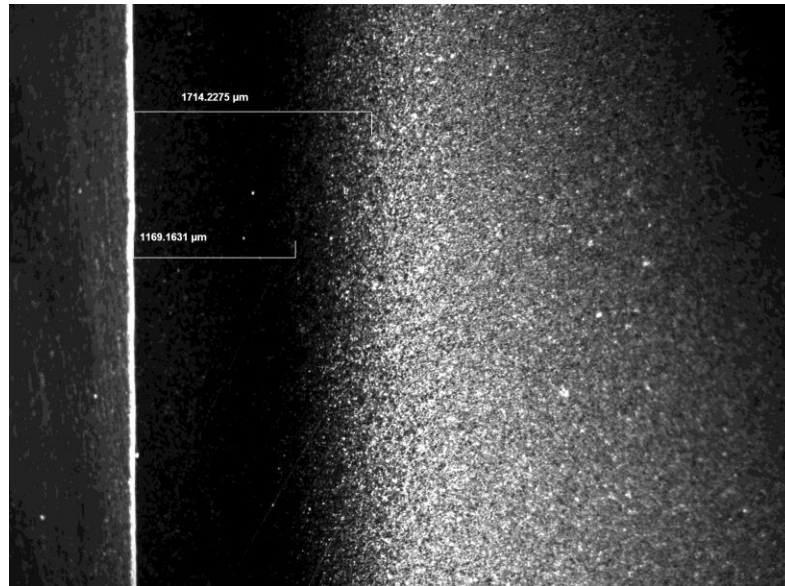
Su profundidad de capa aproximada aumenta a un intervalo aproximado de 850-900 micras, presentando una dureza promedio equivalente a 64 HRc.



**Figura 4-14** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (4 h-Todas las Mezclas-980°C).

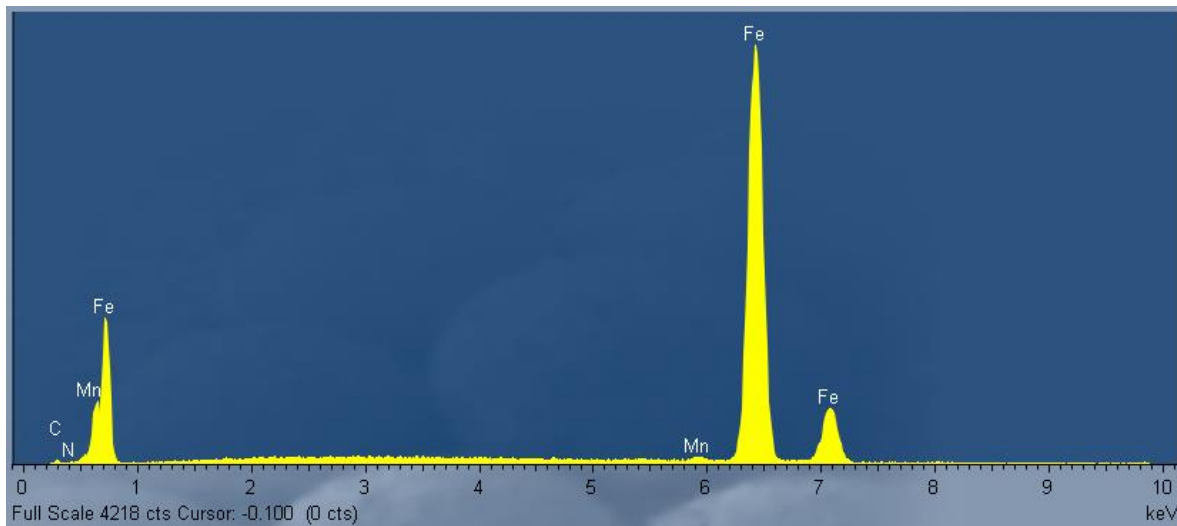
Para la mezcla 80/20, la dureza promedio más alta fue de 68.75 HRc, con una profundidad de capa equivalente a 1150 micras aproximadamente. En la metalografía de la

muestra #17 (**Figura 4-15**) se puede apreciar que la profundidad de capa efectiva es equivalente a 1169.16  $\mu\text{m}$  y una capa total de 1714.22  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4-15** Profundidad de Capa para especimen #17 (980 °C, 4 hrs, 80/20).

En los espectros realizados en MEB por la técnica EDX (**Figura 4-16**) se observan los elementos presentes en la muestra #17.



**Figura 4-16** Elementos presentes en muestra #17 (980 C, 4 h-80/20).

La presencia de los elementos característicos de acuerdo al análisis realizado (% de peso) se describen en la **Tabla 4.4**.

**Tabla 4.4** % en peso de elementos en muestra #17.

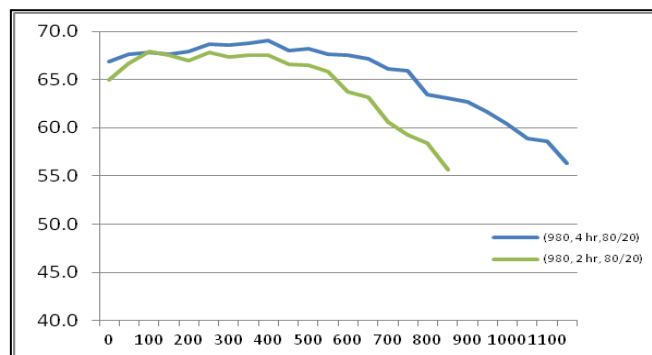
Elemento	% en peso
Carbono (C)	3.75%
Nitrogeno (N)	0.72%
Manganeso (Mn)	0.79%
Hierro (Fe)	94.74%

La **Tabla 4.5** Comparacion de % en peso de elementos en muestra #8 y #17.

Elemento	Muestra #8	Muestra #17
	% en peso	% en peso
Carbono (C)	5.28%	3.75%
Nitrogeno (N)	0.52%	0.72%
Manganeso (Mn)	0.63%	0.79%
Hierro (Fe)	93.56%	94.74%

Al comparar los resultados ( Tabla 4.2 y Tabla 4.4) se observa como disminuye la presencia en % de peso de Carbono y aumenta la presencia de Nitrogeno en la capa nitrurada.

La diferencia existente entre la muestra #8 y la muestra #17 es el tiempo de permanencia en el horno. La muestra #8 se trato a 980 C, 2 hr con una mezcla de 80/20 . La muestra #17 se trato a 980 C, 4 hr con una mezcla 80/20. En ambas se utilizó como catalizador Urea. Ver **Figura 4-17**.



**Figura 4-17** Comparación de muestra # 8 ( verde) y muestra #17 (azul).

La diferencia de % en peso del elemento nitrógeno permite corroborar que, conforme aumenta la profundidad de capa, la dureza se presentara en mayor proporción en aquella preparación que tenga un tiempo de permanencia mayor en el horno, esto debido a que la presencia del nitrógeno en la capa nitrurada se presentará en mayor proporción obteniendo la formación de nitruros a mayor profundidad.

En la **Tabla 4.6** se aprecia la ganancia de masa en el acero A36 para un tiempo de permanencia de 6 horas con variaciones de temperaturas (900°C, 940°C, 980°C) y variaciones de mezcla grafito-urea (90/10,80/20,70/30).

**Tabla 4-6** Comparación de ganancia masa a una temperatura de 6 h constante.

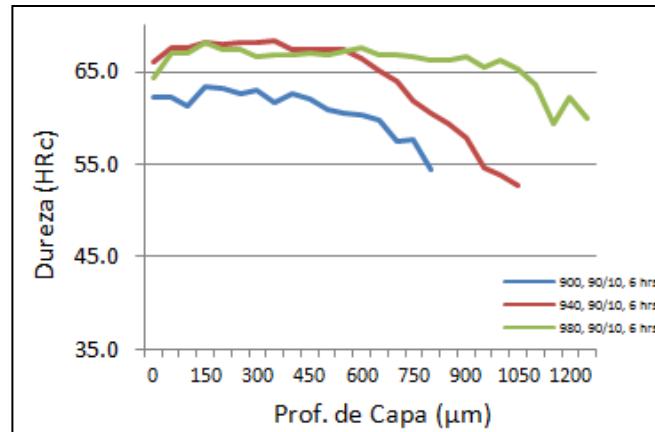
Muestra	Temperatura			Tiempo Permanencia (h)			Mezcla			Pesos de las muestras			
	900 °C	940 °C	980 °C	2	4	6	90/10	80/20	70/30	Pieza (Inicio)	Pieza (Final)	Dif. Pesos	Catalizador
19	X					X	X			19.03 g	19.07 g	0.040 g	Urea
20	X					X		X		21.36 g	21.4 g	0.040 g	Urea
21	X					X			X	20.47 g	20.51 g	0.040 g	Urea
22		X				X	X			19.87 g	19.91 g	0.040 g	Urea
23		X				X		X		19.45 g	19.49 g	0.040 g	Urea
24		X				X			X	19.21 g	19.24 g	0.030 g	Urea
25			X			X	X			20.99 g	21.07 g	0.080 g	Urea
26			X			X		X		17.1 g	17.17 g	0.070 g	Urea
27			X			X			X	17.61 g	17.69 g	0.080 g	Urea

Los resultados arrojan que, para 900 °C a un tiempo de permanencia de 6 h y variación de mezcla grafito-urea, la ganancia de masa se presenta en proporciones iguales en la mezcla 90/10 y 80/20.

Con respecto a la temperatura de 940 °C, a un tiempo de permanencia de 6 h y variación de mezcla grafito-urea, el comportamiento de ganancia de masa es similar, teniendo mayor ganancia en las mezclas 90/10 y 80/20.

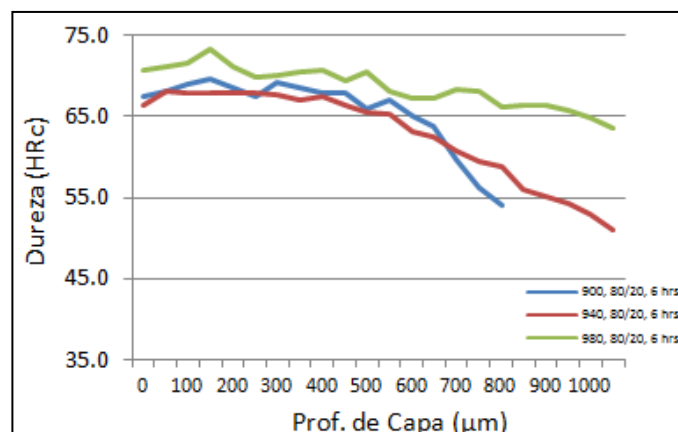
El efecto de la temperatura de 980 °C, a un tiempo de permanencia de 6 h y variación de mezcla grafito-urea indica que la ganancia de masa será mejor para la mezcla 90/10.

En la **Figura 4-18** se observa que, para una variación de temperatura (900 °C, 940 °C y 980°C), a un tiempo de permanencia equivalente a 6 h y una mezcla de 90/10, se obtienen durezas altas con una temperatura de 940 °C y 980 °C, siendo esta equivalente a 68 HRc. La profundidad de capa se presenta en mayor grado en la mezcla de 90/10 elevada a 980 °C.



**Figura 4-18** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (6 h-90/10-Todas las Temperaturas).

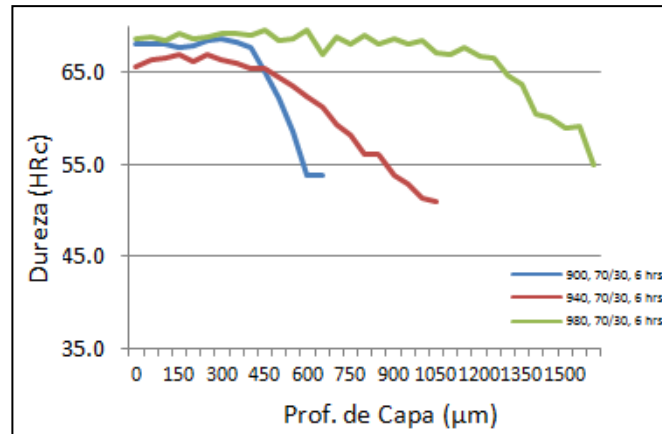
En la **Figura 4-19** para variación de temperatura (900 °C, 940 °C y 980 °C), a un tiempo de permanencia equivalente a 6 h y una mezcla de 80/20, se observa que se obtiene mayor dureza a una temperatura de 980 °C, siendo esta equivalente a 71 HRc. En estas mismas condiciones, la profundidad de capa se presenta en mayor grado en temperaturas de 940 °C y 980 °C.



**Figura 4-19** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (6 h-80/20-Todas las Temperaturas).

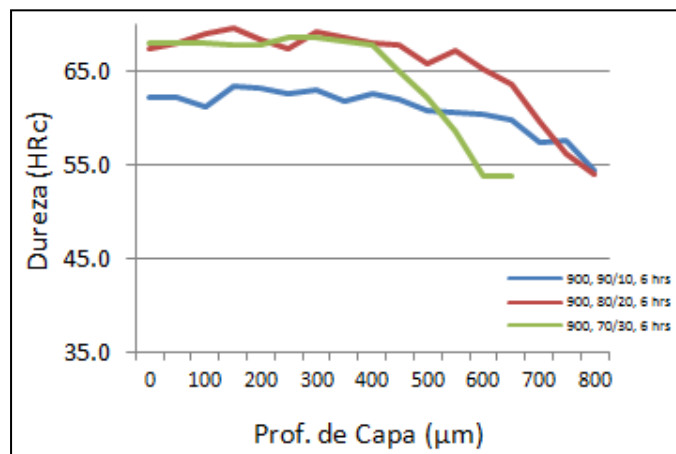
En la **Figura 4-20** para una variación de temperatura (900 °C, 940 °C y 980 °C), a un tiempo de permanencia equivalente a 6 h y una mezcla 70/30, se obtiene mayor dureza a una temperatura de 980 °C, siendo esta equivalente a 69 HRc.

La profundidad de capa presente a este tiempo de permanencia es equivalente a 1600 micras.



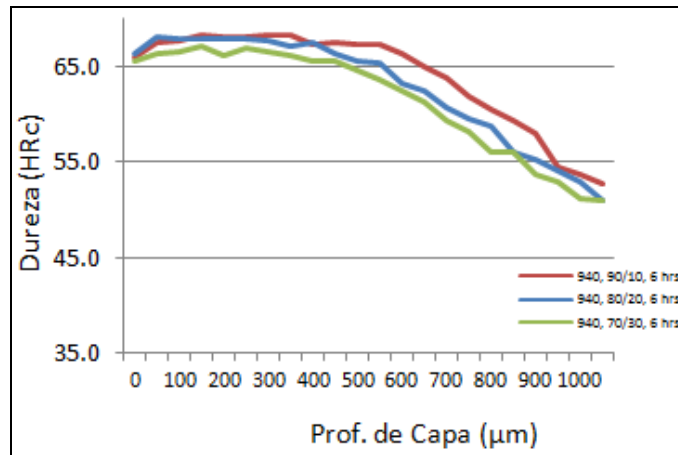
**Figura 4-20** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (6 h-70/30-Todas las Temperaturas).

En la **Figura 4-21** se observa que a una temperatura equivalente a 900 °C las mezclas 70/30 y 80/20 coinciden en su comportamiento inicial. Sin embargo, la mezcla 80/20 presenta mayor profundidad de capa equivalente a 1300 micras y dureza de 71 HRc al igual que la mezcla 90/10 con una dureza menor equivalente a 67 HRc.



**Figura 4-21** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (6 h--Todas las Mezclas-900 °C)

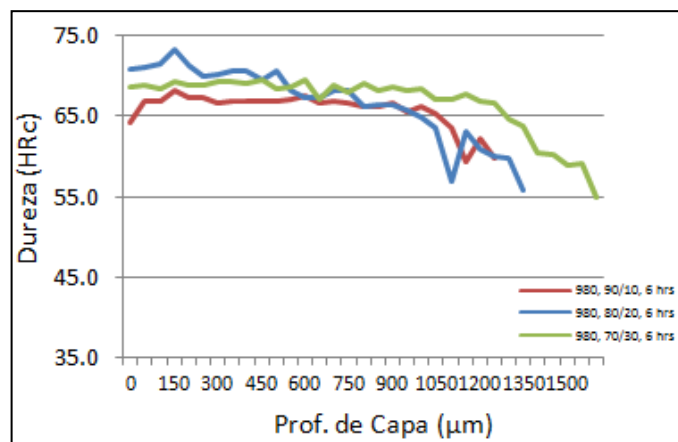
El comportamiento de las mezclas conforme se aumenta la temperatura a 940°C es semejante (**Figura 4-22**), obteniendo durezas promedio equivalentes a 67-68 HRc y una profundidad de capa equivalente a 1050 micras.



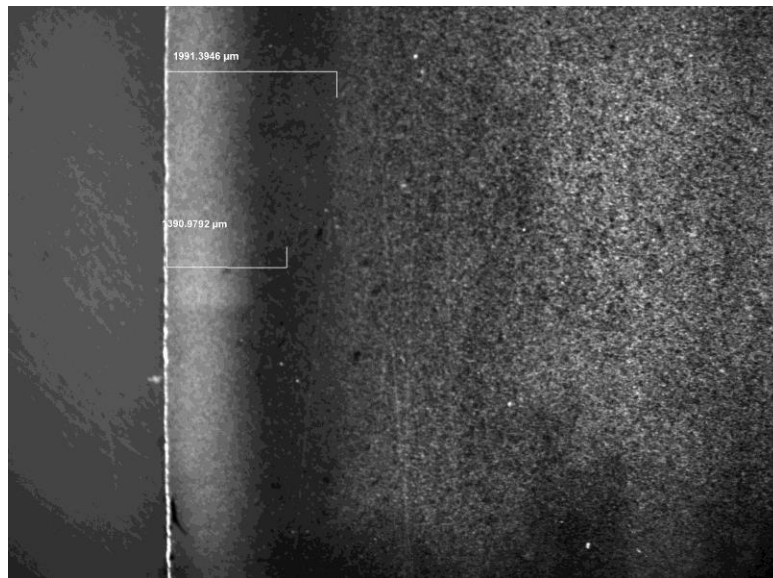
**Figura 4-22** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (6 h--Todas las Mezclas-940 °C)

En la **Figura 4-23** para las condiciones de 980 °C , 6 h de permanencia y todas las mezclas, se observa que el comportamiento de la mezcla 80/20 es mejor en comparación con las demás mezclas.

Su dureza promedio es equivalente a 71 HRc y la profundidad de capa equivalente a 1300 micras.



**Figura 4-23** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (6 h--Todas las Mezclas-980 °C)



**Figura 4-24** Profundidad de Capa para especimen #26 (980 °C, 6 h, 80/20).

En la **Figura 4-24** se puede apreciar que la profundidad de capa efectiva es equivalente a 1390.97  $\mu\text{m}$  y una capa total de 1991.39  $\mu\text{m}$ .

Para el catalizador Sulfato de Amonio, se realizaron únicamente 3 muestras bajo condiciones óptimas del catalizador de Urea.

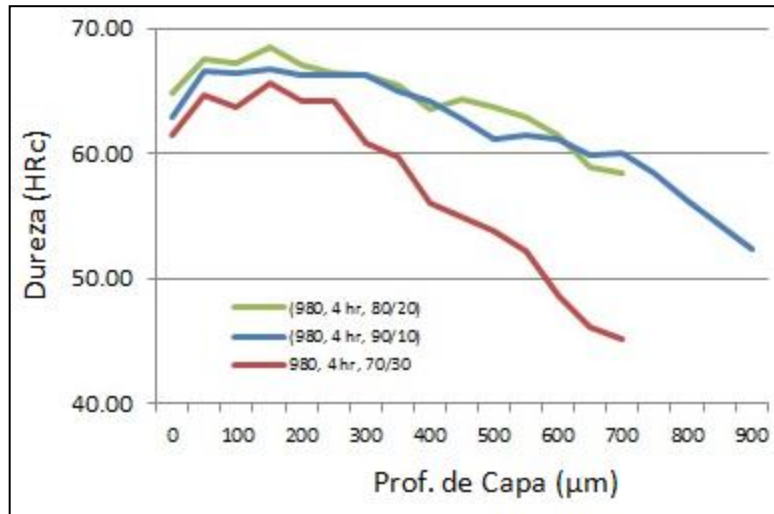
En la **Tabla 4.7** se aprecia la ganancia de masa en el acero A36 para un tiempo de permanencia de 6 horas con temperaturas de 980°C y variaciones de mezcla grafito-sulfato de amonio (90/10,80/20,70/30).

**Tabla 4-7** Comparación de ganancia masa a una temperatura de 6 h constante.

Muestra	Temperatura			Tiempo Permanencia (h)			Mezcla			Pesos de las muestras			Catalizador
	900 °C	940 °C	980 °C	2	4	6	90/10	80/20	70/30	Pieza (Inicio)	Pieza (Final)	Dif. Pesos	
28			X		X		X			29.35 g	29.426 g	0.08 g	S.Amonio
29			X		X			X		26.13 g	26.168 g	0.04 g	S.Amonio
30			X		X				X	23.47 g	23.549 g	0.08 g	S.Amonio

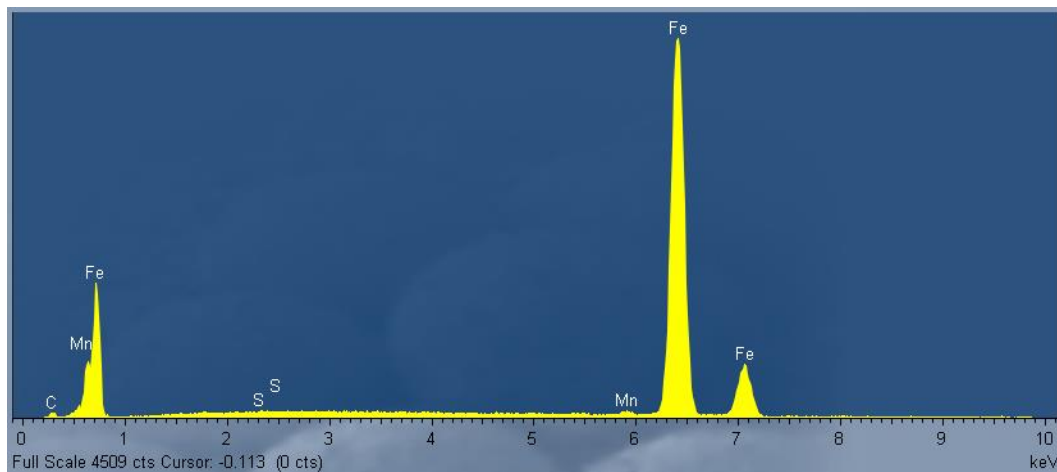
Los resultados obtenidos se pueden apreciar a continuación:

En la **Figura 4-25** el catalizador con mayor dureza es el de Sulfato de amonio a una relación de mezcla 80/20, un tiempo de permanencia de 4 hr y una temperatura de 980 °C.



**Figura 4-25** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa (4 h--Todas las Mezclas-980 °C)

En la **Figura 4-26** se pueden observar los elementos presentes en la muestra #29 (980 C, 4 h, 80/20, Catalizador: Sulfato de Amonio) Este análisis químico puntual realizado en el MEB (Microscopio Electrónico de Barrido) con la técnica EDX (Espectroscopia de Dispersión de energía de rayos X) se realizó en la capa formada por la reacción de difusión.



**Figura 4-26** Elementos presentes en capa formada por difusión de la muestra #29 (980 C, 6 h-80/20).

La presencia de los elementos característicos en la capa de difusión de acuerdo al análisis realizado (% de peso) se describe en la **Tabla 4.8**.

**Tabla 4.8** % en peso de elementos en muestra #29 (980, 4hr, 80/20, Catalizador: Sulfato de Amonio).

Elemento	% en peso
Carbono (C)	6.22%
Azufre (S)	0.11%
Manganeso (Mn)	0.60%
Hierro (Fe)	93.06%

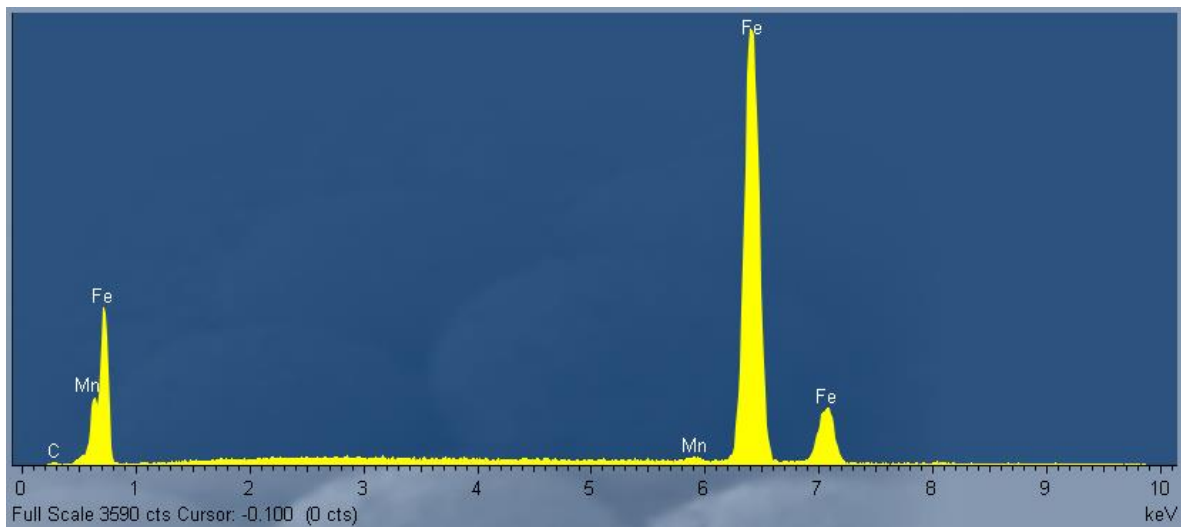
En estos resultados se observa que no existe la presencia del elemento Nitrógeno en la capa formada por la reacción de difusión a diferencia de las muestras tratadas con Urea.

La **Tabla 4.9** describe el porcentaje de los elementos que conforman el núcleo de la muestra #29 (980, 4h, 80/20, Catalizador: Sulfato de Amonio), con lo cual se comprueba que si hubo adición de carbono en el tratamiento termico de nitruración.

La **Tabla 4.9** Comparacion de % en peso de elementos en la muestra #29 (Nucleo).

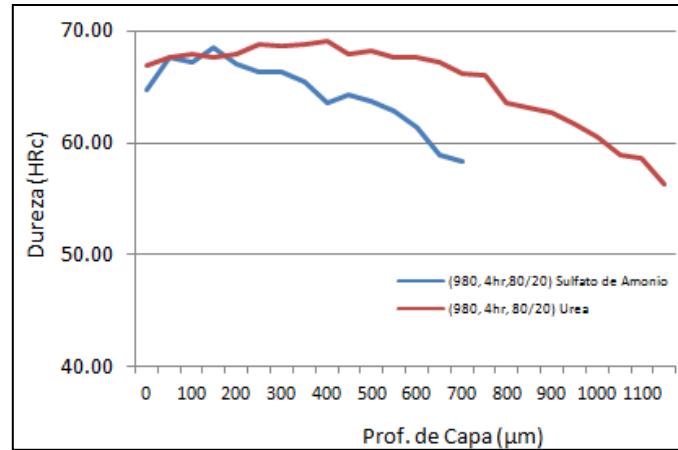
Elemento	% en peso
Carbono (C)	2.66%
Manganeso (Mn)	0.72%
Hierro (Fe)	96.62%

En la **Figura 4-27** se pueden observar los elementos presentes en el núcleo de la muestra #29 (980, 4h, 80/20, Catalizador: Sulfato de Amonio).

**Figura 4-27** Elementos presentes en el nucleo de la muestra #29 (980 C, 4 h-80/20) .

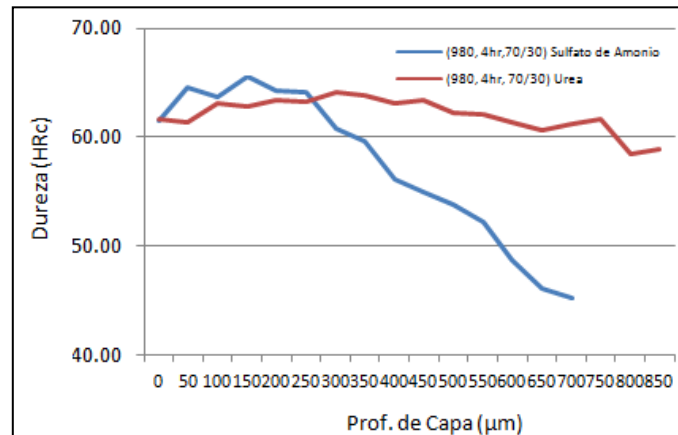
En la **Figura 4-28** el catalizador que muestra una profundidad de capa y estabilidad bajo estas condiciones es el de Urea, con una relación de mezcla de 80/20 y una profundidad de capa mayor.

La dureza alcanzada es mayor con el catalizador Urea.



**Figura 4-28** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa de Sulfato de Amonio y urea (4 h-80/20-980 °C)

En la **Figura 4-29** se observa como el catalizador de Sulfato de Amonio tiene una dureza un poco mayor que la alcanzada con Urea a una proporción de mezcla 70/30.



**Figura 4-29** Perfil de Dureza Vs Profundidad de Capa de Sulfato de Amonio y Urea (4 h-70/30-980 °C)

En la **Figura 4-30** se puede apreciar que la profundidad de capa efectiva es equivalente a 708.58 µm y una capa total de 1482.57 µm bajo las condiciones descritas en la **Figura 4-28** con el catalizador Sulfato de Amonio.

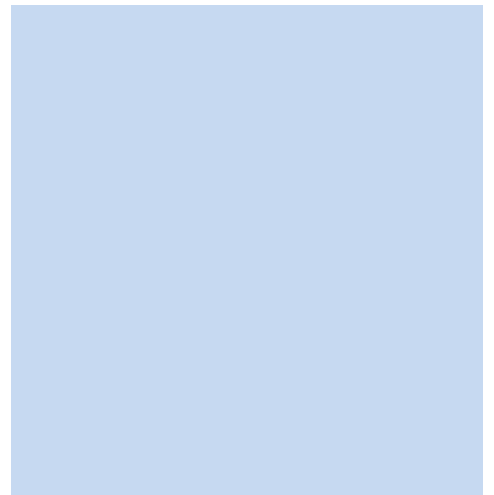


**Figura 4-30** Profundidad de Capa para muestra #29 (4 h, 980 °C, 80/20) - Sulfato de Amonio.

# U.A.B.C



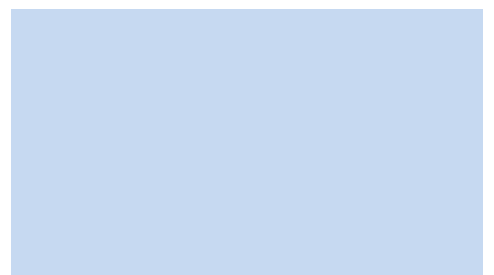
## CONCLUSIONES



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA.**

**“NITRURACIÓN SÓLIDA CATALIZADA POR UREA Y SULFATO DE AMONIO EN ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO”**

**TESISTA: BLANCA SARAI DIAZ SILVA.**



---

## Conclusiones

1. A un tiempo de permanencia de 2 h se obtuvieron mayores durezas bajo las mezclas 90/10 y 80/20 a una temperatura de 980 °C.
2. A un tiempo de permanencia de 4 h se obtuvo mejor comportamiento a temperatura de 940 °C con una mezcla de 80/20.
3. A un tiempo de permanencia de 6 hr se obtuvieron mayores durezas bajo la mezclas 80/20 a temperaturas entre los 940 °C y 980 °C.
4. Se obtuvo la mezcla óptima (80/20) bajo un tiempo de permanencia equivalente a 4-6 hr dependiendo su aplicación y una temperatura de 980 °C.
5. El catalizador que proporciona la mayor dureza es Urea, esto comprueba la hipótesis inicial, donde se pensaba que este catalizador sería probablemente el óptimo pues tiene un contenido de Nitrógeno mayor (22%) en comparación con el Sulfato de Amonio (17%).
6. El tiempo de permanencia en el horno y la temperatura son dos variables que se encuentran directamente relacionadas. Esto debido a que la reacción que se presenta en este tratamiento termoquímico se da por difusión. Gracias a las características (celdas cristalinas) del acero con bajo contenido de carbono, donde al momento de estar en la temperatura de austenización presenta una estructura FCC (Solubilidad al 2% de C).
7. Conforme aumenta el tiempo de permanencia en el horno, la presencia del elemento nitrógeno en la capa nitrurada se encuentra en mayor proporción (% en peso).
8. El catalizador Urea bajo la mezcla 80/20 alcanza durezas mayores en comparación con el catalizador de Sulfato de Amonio. Y la diferencia entre las distintas mezclas 90/10 y 70/30 de ambos catalizadores no presentan durezas superficiales lo suficientemente altas.

9. La disminución del % en peso de Carbono conforme aumenta la distancia hacia el núcleo (muestra #29) se puede aludir a que existió durante el tratamiento una descarburización debido a la reacción gaseosa entre el Sulfato de Amonio y Grafito.
  
10. El que no haya presencia de elemento Nitrógeno en la pieza tratada con Sulfato de Amonio permite concluir que probablemente el # de Nitrógeno presente en la muestra no fue lo suficiente como para depositarse en la capa originada por el proceso de difusión. Realizando una comparación del % en peso atómico del elemento en la fórmula química de cada uno de los catalizadores nos lleva a concluir que la presencia de Nitrógeno es mayor en el catalizador Urea.

# U.A.B.C

## RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA.**

**“NITRURACIÓN SÓLIDA CATALIZADA POR UREA Y  
SULFATO DE AMONIO EN ACEROS DE BAJO  
CONTENIDO DE CARBONO”**

**TESISTA: BLANCA SARAI DIAZ SILVA.**

## **Recomendaciones para trabajos posteriores**

1. Realizar Tratamiento Termoquímico en Aceros Inoxidables bajo las mismas condiciones realizadas en este tema de tesis.
2. Identificar el efecto del Ciclo Térmico Vs Termociclo en la profundidad de capa y dureza.
3. Reproducir el Tratamiento termoquímico de Boronización con el objetivo de alcanzar durezas superficiales superiores.

# U.A.B.C

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA.**

**“NITRURACIÓN SÓLIDA CATALIZADA POR UREA Y  
SULFATO DE AMONIO EN ACEROS DE BAJO  
CONTENIDO DE CARBONO”**

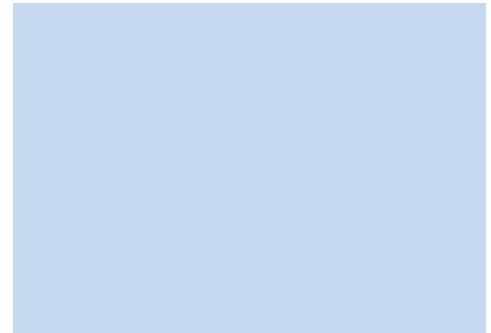
**TESISTA: BLANCA SARAI DIAZ SILVA.**

## Referencias Bibliográficas.

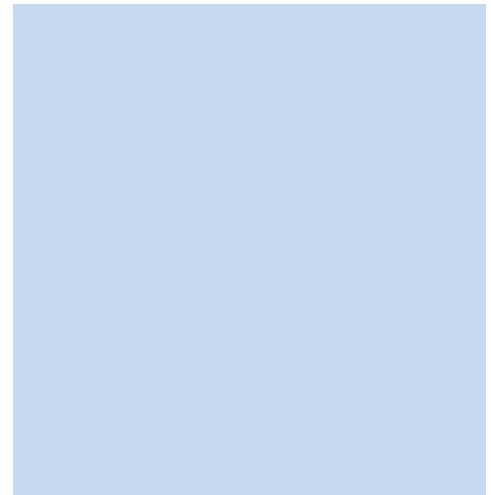
- [1]. ASKELAND, DONALD R. Y PHULE, PRADEEP P. Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 4ª. ed., Cengage Learning, 2004, pp 11-14, 360-364, 514, 523-525, 547-548, 669.
- [2]. APRAIZ B. JOSE, Tratamiento térmico de los aceros, 10ª. Ed., CIE DOSSAT 2000, pp 2,106-108,110-113,129,321-322,284-285,292-295,385-396.
- [3]. AVNER S. Introduccion a la metalurgia moderna, 2a ed.,McGraw-Hill, 1988,pp 9,252.
- [4]. [www.infoacero.cl/acero/historia.htm](http://www.infoacero.cl/acero/historia.htm), Microsoft Encarta 2000.
- [5]. [www.infoacero.cl/acero/que\\_es](http://www.infoacero.cl/acero/que_es), Microsoft Encarta 2000 y capacitacion CSH.
- [6]. NEELY, JOHN E. Metalurgia y Materiales Industriales, 2a ed., Limusa, 2001. pp 13,139-151, 157-160,220-223.
- [7]. HIGGINS, RAYMOND A. Ingeniería Metalurgica Tomo 1.8va ed., Compañía Editorial Continental, S.A , 1980, pp 211.
- [8]. <http://juliocorrea.wordpress.com/2007/08/23/tratamientos-termicos-del-acero/> Creado por Julio Correa.
- [9]. <http://sifunpro.tripod.com/termoquim.htm>
- [10]. O.I. Yas'kiv, ImM, Pohrelyuk, V.M. Fedirko, O.Yu Bonchyk and T.M.Kravchyshyn, Material Science, 2007, Vol.43, pp 370-376.
- [11] A.V. Bil'chenko and S.A. Dunaeva, Metal Science and Heat Treatment, 1975, Vol. 17, pp 1021-1022
- [12]. Yu.A. Belov and G.M. Markin, Metal Science and Heat Treatment, 1965, Vol.4, pp 259-261.
- [13]. N.I. Tishchenko, V.G. Kolesnichenko, N.V. Dubovitskaya, P.M. Silenko and N.I. Danilenko, et al, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2009, Vol. 48, pp 214-220.
- [14]. Yu. M. Lakhtin and N.V. Silina, Metal Science and Heat Treatment, 1977, Vol. 19, pp 447-454.
- [15]. G.N.Neustoyev, Metal Science and Heat Treatment, 1962, Vol.4, pp 264-267.
- [16]. A.N.Tarasov, Metal Science and Heat Treatment, 2007, Vol. 49, pp 78-81.
- [17]. I.M. Pohrelyuk, Materials Science, 1998, Vol. 34, pp 226-230.
- [18]. G.A. Solodkin, Yu.M Lakhtin and Ya. D. Kogan, Metal Science and Heat Treatment, 1986, Vol. 1, pp 25-27.
- [19]. A.V.Bil'chenko, V.G. Gorbach and S.A. Dunaeva, Metal Science and Heat Treatment, 1990, Vol. 32, pp 361-362.
- [20]. R.Pelka, K. Kietbasa, W.Arabczyk, Central European Journal of Chemistry, 2010, Vol. 9, pp 240-244.
- [21]. [www.cemexcostarica.com/ce/ce\\_co\\_gl.asp](http://www.cemexcostarica.com/ce/ce_co_gl.asp)
- [22]. [www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/5000155/lecciones/lec2/2\\_6.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/5000155/lecciones/lec2/2_6.htm)
- [23]. Gutiérrez Pulido Humberto, De la Vara Salazar Román, Análisis y Diseño de experimentos, 2da. ed., Mc Graw Hill, 2008, pp 6-12, 89-90, 482.

- [24]. Montgomery, Douglas C, Diseño y Análisis de Experimentos, Grupo Editorial Iberoamericana S.A de C.V,1991, pp 13,45,119,155,175,229,241,393.
- [25]. <http://tarwi.lamolina.edu.pe/~fmendiburu/index-filer/academic/metodos1/Bloques.pdf>
- [26] D. Farkas and K. Ohla, Oxidation of Metals, 1983, Vol. 19.
- [27] V . I . Belyakova and M.F. Alekseenko, Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov, No. 1, pp. 31-34.
- [28] A. V. B e l o t s k i i , P . V. Dukhota, and V. G. Permyakov, Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov, 1974, No. 3, pp.38-39.
- [29] Rafa\_1Pelka, Walerian Arabczyk, Versita, 2010, pp 198-202.
- [30] A. N. Tarasov, Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov, 2001, No. 4, pp 36-39.
- [31] S.Y. Sirin, E. Kaluc , Materials and Design ,36 (2012) , pp. 741–747

# U.A.B.C



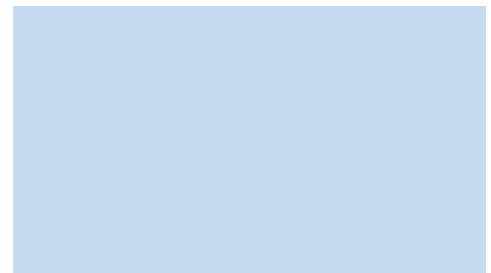
## ANEXOS



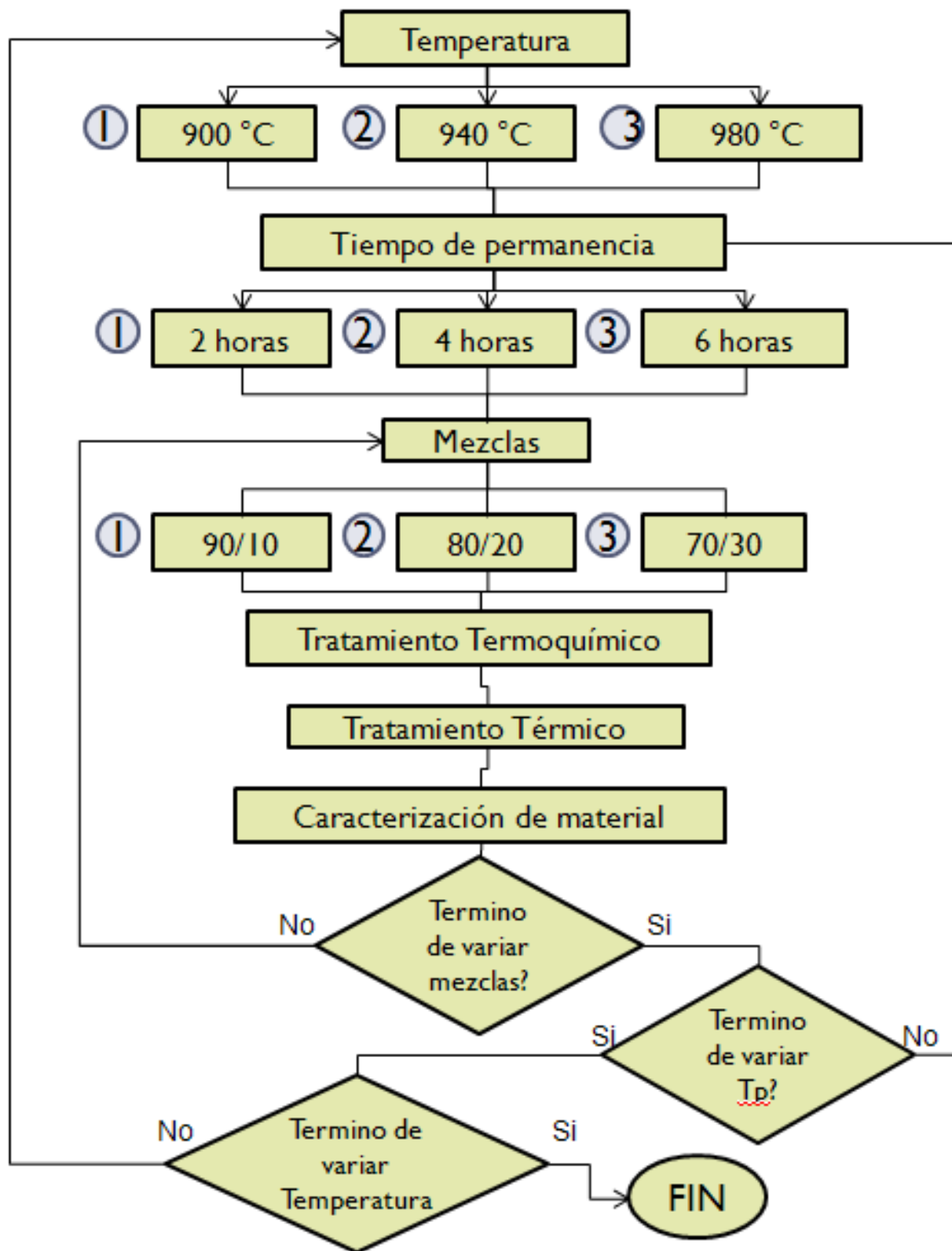
**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA.**

**“NITRURACIÓN SÓLIDA CATALIZADA POR UREA Y SULFATO DE AMONIO EN ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO”**

**TESISTA: BLANCA SARAI DIAZ SILVA.**



## Anexos



Actividades	1er Semestre (2011-2)					2do Semestre (2012-1)					3er Semestre (2012-2)					4to Semestre (2013-1)						(2014-1)	
	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Ago	
1. Materias de Primer Semestre.																							
2. Definición de Tema de Tesis.																							
3. Definición de Objetivos, Metas, Justificación e Hipótesis.																							
4. Desarrollo del Capítulo I y II.																							
5. Revisión bibliográfica.																							
6. Actividades de Investigación I.																							
7. Materias de Segundo Semestre.																							
8. Diseño de experimentos.																							
9. Cotización y adquisición de material.																							
10. Caracterización de material de llegada.																							
11. Manufactura de especímenes (muestras)																							
13. Desarrollo del Capítulo III.																							
14. Actividades de Investigación II.																							
15. Materias de Tercer Semestre.																							
16. Realización de tratamiento termoquímico de Nitruración																							
17. Realización de tratamientos térmicos posteriores																							
18. Metalografías de especímenes.																							
19. Continuación del Capítulo III																							
20. Actividades de Investigación III.																							
22. Materias de Cuarto Semestre.																							
23. Análisis de resultados.																							
24. Redacción de Capítulo IV																							
25. Actividad de Investigación IV.																							
26. Selección, desarrollo y conclusion de caso de aplicación.																							
27. Defensa de Tesis.																							

