UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ÁREA DE POSGRADO

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

"CEMENTACIÓN SÓLIDA DE ACEROS DE BAJO CARBONO UTILIZANDO GRAFITO NATURAL Y CONCHAS DE ALMEJAS COMO CATALIZADOR"

Tesis que Presenta:

Miguel Ángel Ramírez Hernández

Para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias

Tutor:

Dr. Álvaro González Ángeles

Mexicali, Baja california, 14 Septiembre de 2012

CONTENIDO

Resumen VI

Abstract VIII

Índice de figuras X

Índice de tabla XIII

Introducción 1

Hipótesis 3

Objetivo 3

Metas 3

Justificación 4

CAPÍTULO 1 Estado del Arte 5

1.1 Estudios realizados en cementación sólida 5

1.2 Donadores de Carbonato de calcio (CaCO3) 13

1.2.1 Calcita 13

1.2.2 Aragonita 14

1.3 Normas ASTM 15

1.3.1 Guía estándar para la preparación de muestras metalográficas ASTM E3 16

1.3.2 Métodos de prueba estándar para ensayo de tensión de materiales metálicos ASTM E8 17

1.3.3 Métodos de prueba estándar para dureza Rockwell y dureza superficial Rockwell de materiales metálicos norma ASTM E18 20

1.3.4 Método de prueba estándar para microindentación de la dureza de materiales ASTM 384 20

1.3.5 Práctica Estándar para la Evaluación de los metales expuestos a ambientes carburación ASTM G79. 22

1.3.5.1 Método A Masa total de ganancia 23

1.3.5.2 Método B Evaluación Metalográfica 23

1.3.5.3 Método C perfil Difusión de carbono 23

1.3.5.4 Método D Cambio en Propiedades Mecánicas 23

1.3.6 Métodos de medición de profundidad, Estándar SAE J 423 (1998-02) 23

1.3.6.1 Método químico 24

1.3.6.2 Métodos mecánicos 24

1.3.6.3 Métodos visuales 25

CAPÍTULO 2 Marco teórico 26

2.1 Materiales 26

2.1.1 Metales 28

2.1.2 Cerámicos, vidrios y vitrocerámicos 28

2.1.3 Polímeros 30

2.1.4 Semiconductores 31

2.1.5 Materiales compuestos 31

2.2 Materiales ferrosos 32

2.2.1 Diagrama de Hierro Carbono 32

2.2.1.1 Ferrita. 34

2.2.1.2 Austenita 34

2.2.1.3 Cementita 35

2.3 Clasificación de los aceros 37

2.3.1 Aceros al carbono 37

2.3.1.1 Aceros de bajo carbono 38

2.3.1.2 Aceros al medio carbono 38

2.3.1.3 Aceros de alto carbono 38

2.3.2 Aceros aleados 39

2.4 Tratamientos térmicos 39

2.4.1 Recocido 39

2.4.1.1 Recocidos de austenización completa 41

2.4.1.2 Recocido subcríticos 41

2.4.1.2.1 Recocido de ablandamiento 41

2.4.1.2.2 Recocido contra acritud 41

2.4.1.3 Recocidos de austenización incompleta 42

2.4.2 Normalizado 42

2.4.3 Temple 43

2.4.4 Revenido 44

2.4.5 Tratamientos térmicos selectivos 46

2.4.5.1 Temple superficial 47

2.4.5.2 Temple superficial por inducción 47

2.4.5.3 Temple superficial a la llama 47

2.4.5.4 Temple superficial por laser 48

2.5 Tratamientos termoquímicos 48

2.5.1 Cementación 48

2.5.1.1 Mecanismos de difusión 49

2.5.1.1.1 Energía de activación en la difusión 49

2.5.1.1.2 Velocidad de difusión (Primera ley de Fick) 50

2.5.1.1.3 Perfil de composición (Segunda ley de Fick) 51

2.5.1.2 Con materias sólidas 54

2.5.1.3 Con materias líquidas. 54

2.5.1.4 Con gases. 55

2.5.1.5 La tenacidad del núcleo de una pieza cementada 56

2.5.2 Carbonitruración. 56

2.5.3 Nitruración 59

CAPÍTULO 3 Análisis experimental 62

3.1 Materiales para la cementación 64

3.2 Preparación de los materiales y probetas 66

3.2.1 Molienda de Material para cementar 66

3.2.2 Diseño de probetas 68

3.3 Metalografías de los aceros 70

3.4 Dureza experimental de los aceros 72

3.5 Preparación de la mezcla de $CaCO_3$ –grafito 74

3.6 Cementación de Probetas 74

3.7 Medición de la capa cementada 77

3.8 Tratamientos térmicos de las probetas 77
CAPÍTULO 4 Resultados y discusión 79
4.1 Resultados de difracción y análisis químico 79
4.2 Resultados Espectroscopía Raman 80
4.3 Resultados de ganancia de masa 81
4.4 Resultados de capa cementada 83
4.4.1 Método visual 83
4.4.2 Método de dureza media efectiva acero 1018 86
Conclusiones 90
Recomendación para trabajos futuros 91
GLOSARIO 92
REFERENCIAS 97
Anexos 99
ARAGONITE, [1] *CPDS Card* 100
CALCITE, [1] *CPDS Card* 101
Diagrama de flujo 102

Resumen

El creciente desarrollo industrial requiere de una demanda elevada de elementos o máquinas con características de resistencia mecánicas confiables, como resistencia a la tensión, corte, dureza superficial, tenacidad entre otras, de las cuales han surgido un sin número de técnicas de tratamientos termoquímicos, de las que se encuentra la cementación sólida.

Esta investigación se dio con el objetivo de crear un procedimiento de cementación utilizando carbonatos obtenidos de cuatro fuentes, como lo son; la almeja chocolata, ostión, calcita y piedra caliza, que sustituyen los carbonatos obtenidos de forma comercial por empresas especializadas, en los que los precios son muy elevados. Esto con el fin; que esta tecnología esté al alcance no solo de grandes empresas dedicadas a la manufacturas que tienen el potencial económico de usar productos más refinado, sino también por pequeños talleres que son subcontratados para la fabricación de piezas que necesiten de propiedades que la cementación sólida les brinda.

Uno de las metas iniciales fue la de obtener una molienda de las cuatro fuentes de carbonatos y la fuente de grafito, la cual se logró con la ayuda del molino atrisionador, con los parámetros de tiempo, tamaño bolas, y un tamizado para tener una molienda de tamaño uniforme. La cual se mezcló en las proporciones de treinta, veinte y diez por ciento. A las cuales se le realizó un estudio por difracción y análisis químico, el primero para determinar la información estructural, importante si se desea saber que estructura adopta el material de estudio aunque tenga la misma composición química. El análisis químico nos dio la composición de cada una de las muestras y sus proporciones.

Otro de los factores importantes para la correcta cementación de las piezas fue la de tener un recipiente de cementación que fuera hermético, y duradero, problema que fue resuelto gracias a la fabricación de recipientes de acero inoxidable y prensas de sujeción, motivo por el cual también se fabricó una pequeña grúa para extracción de probetas, que fue de gran ayuda debido al peso y temperaturas que se manejaron (925°C), estos accesorios servirán a futuros investigadores que se presenten con las mismas dificultades presentes en esta investigación.

En la proceso de cementación se realizó un barrido con tiempos que van de 20 minutos a 120 minutos, para los cuatro diferentes carbonatos en sus tres proporciones, las cuales fueron

montadas, pulidas y atacadas con nital al dos por ciento, y se midió la profundidad por medios de visuales, los datos obtenidos en deposición se graficaron, después se templaron las piezas y se obtuvo el perfil de dureza de cada una de las fuentes en sus tres proporciones a los diferentes tiempos, así se obtuvo la profundidad efectiva de acuerdo a la norma SAE J423 y se graficaron con respecto al tiempo de cementación.

De los resultados obtenidos, se procedió a utilizar la fuente de mejor resultado, cementado elementos de corte para aditamentos de prueba de corte de la máquina Tinius Olsen, en medidas de 1/8, 1/16, y ¼ de pulgada, los cuales alcanzaron durezas de hasta 68 HRC, también se cementaron aditamentos para tensión de probetas para el estudio de propagación de grietas. Mostrando así el potencial de utilización de las cuatro fuentes de carbono usados en la presente investigación.

Abstract

The increasing industrial development requires a high demand of elements or machinery featuring reliable mechanical resistance, such as tension resistance, cut, superficial hardness and tenacity among other characteristics, from which a great number of techniques for thermo chemical treatments had emerged, for instance, the solid cementation.

This research was conducted with the objective of creating a cementation procedure by using carbonates obtained from four different sources: chocolate clam, oyster, calcite and limestone, which substitute the carbonates commercially obtained by specialized companies and which prices are significantly high. The purpose that this technology is within the reach not only of large manufacturing enterprises, which have the economic potential to use a more refined product, but also of small workshops, which are subcontracted for manufacturing pieces that require the characteristics provided by solid cementation.

One of the initial goals was to obtain a grinding from the four different carbonate sources and the graphite source, which was accomplished with the use of an attrition mill and control parameters of time, ball size, and sieving to obtain a uniform grinding. Such grinding was mixed in thirty, twenty and ten percent proportions that later underwent a diffraction study and chemical analysis. The first, to determine the structural information which is important in order to know the structure adopted by the material under study in spite of having the same chemical composition, while the chemical analysis provided data regarding the composition of each sample and its proportions.

Another important factor for the correct cementation of the pieces was to have a hermetic and durable cementation container. This was achieved with the manufacturing of stainless steel containers and fastening presses, reason for which a small crane was also produced for test tube extraction; the latter being very helpful due to the weights and temperatures that were being handled (925°C). Such accessories will be useful for future researchers who may encounter the same difficulties of this research.

During the cementation process a sweep was performed with times that ranged from 20 to 120 minutes for the four different carbonates in their three proportions, which were mounted, refined and attacked with nital by two percent. Depth was measured visually and data obtained through

deposition was plotted. Afterwards, pieces were tempered and the hardness profile of each source was obtained in its three different proportions and with the time ranges, thus obtaining and plotting the effective depth in accordance with norm SAE J423 in regards to the cementation timing.

From the obtained data, the source with best result was used, cemented cutting elements for testing cutting parts of the Tinius Olsen machine, with 1/8, 1/16, and ¼ inch measures, which reached hardness up to 68 HRC. Thus, accessories were cemented for test tube tension in order to study the spreading of cracks, demonstrating the potential of the four carbon sources used in this research.

Índice de figuras

Figura 1-1 *Fuentes de carbonatos de calcio, a) Calcita mineral, b) corales, c) conchos de animales bivalvos.* 14
Figura 1-2 *Estructuras alotrópicas de la caliza, a) Dolomita, b) Aragonita* 15
Figura 1-3 *Muestra de prueba de la tensión rectangular.* 18
Figura 1-4 *Standard 0.500-in. Demás especímenes siguen la designaciones de la tabla 1-5.* 19
Figura 1-5 *Indentador Vickers.* 21
Figura 1-6 *Muestra de cono* 25
Figura 1-7 *Procedimiento de espécimen de sección cruzada.* 25
Figura 1-8 *Procedimiento alternativo de sección transversal.* 25
Figura 1-9 *Procedimiento escalonado.* 25
Figura 2-1 *Resistencias representativas de diversas categorías de materiales* [19] 26
Figura 2-2 *Corte transversal de un turborreactor* [19] 28
Figura 2-3 *Una diversidad de componentes cerámicos complejos* [19] 29
Figura 2-4 *La polimerización ocurre cuando moléculas pequeñas, se combinan produciendo moléculas más grandes.* 30
Figura 2-5 *Circuitos integrado* [19] 31
Figura 2-6 *Diagrama de fase hierro-carburo de hierro.* [24] 33
Figura 2-7 *Celdas unitarias de (a) austenita, (b) ferrita y (c) martensita. En (d) se muestra el efecto del porcentaje de carbono (en peso).* 35
Figura 2-8 *Esquema de las Microestructuras de una aleación hierro-carbono de composición eutectoide (0.77% de carbono.* 36
Figura 2-9 *Microestructura de perlita en acero 1080 formada de austenita, las regiones más claras son ferrita y las regiones más oscuras son carburo. Aumento 2500x.* 37
Figura 2-10 *Tipos de recocidos.* 40
Figura 2-11 *Metalografía de recocido completo a 900˚C, se puede apreciar perlita globular.* 40
Figura 2-12 *Cinética del normalizado.* 42
Figura 2-13 *Acero 1018 templado a* 955˚*C, se observa agujas de martensita.* 43
Figura 2-14 *Cinética del tratamiento térmico.* 44
Figura 2-15 *Acero 1018 templado a* 955˚*C* y revenida a *Revenido a 200 °C. se aprecia martensita revenida.* 45
Figura 2-16 *Tratamiento de revenido en conexión con el de temple.* 45
Figura 2-17 *Flujo durante la difusión* 51
Figura 2-18 *a) Diagrama de fases en la zona de cementación. b) Difusión del carbono, C = f (x, t).* 53
Figura 2-19 *Contenido de carbono en la capa superficial según el contenido de hidrógeno del gas cementante a 925˚C.* [28] 55

Figura 2-20 *Dependencia del N absorbido en función de la temperatura Tc y contenido de amoniaco añadido* [28] 57
Figura 2-21 *Correlación C y N en función de la profundidad de capa, Tc = 850˚C.* [28] 58
Figura 2-22 *Correlación espesor con el tiempo de cementación.* [28] 59
Figura 2-23 *a) Diagrama de equilibrio Fe-N. y b) Cinética del tratamiento de nitruración.* 59
Figura 2-24 *Proporciones de absorción de N y C en el proceso de nitruración en baño de sales.* 60
Figura 3-1 *Metodología de la cementación sólida usando grafito natural y carbonato de calcio donado por almejas.* 63
Figura 3-2 *Difractogramas de los donadores de carbonato de calcio.* 64
Figura 3-3 *Triturador.* 66
Figura 3-4 *Sistema de molienda, a) Molino atrisionador b) Sistema de refrigeración.* 67
Figura 3-5 *Torno paralelo KENT USA.* 68
Figura 3-6 *Prensa universal Tinius Olsen de 25 KN de capacidad..* 69
Figura 3-7 *Probeta maquinada en acero 1018.* 69
Figura 3-8 *Cortadora de disco* 70
Figura 3-9 *Moldes de caucho.* 70
Figura 3-10 *Lijas de óxido de aluminio* Al_2O_3. 71
Figura 3-11 *Pulidora* 71
Figura 3-12 *Microscopio* 72
Figura 3-13 *Durómetro digital Rockwell, de la marca Future Tech.* 73
Figura 3-14 *Microdurómetro digital Vickers modelo HVS-100A de La compañía Laizhou Huayin Testing Instrument Co., Ltd.* 73
Figura 3-15 *Balanza digital dela marca SCIENTECH®* 74
Figura 3-16 *Horno de resistencia* 75
Figura 3-17 *Recipientes de cementación* 75
Figura 3-18 *Prensa para sello de recipientes de cementación* 76
Figura 4-1 *Resultados Espectroscopía Raman* 80
Figura 4-2 *Gráfica de ganancia unitaria de masa con respecto al tiempo de la almeja chocolata.* 81
Figura 4-3 *Gráfica de ganancia unitaria de masa con respecto al tiempo de la piedra caliza.* 81
Figura 4-4 *grafica de ganancia unitaria de masa con respecto al tiempo del ostión.* 82
Figura 4-5 *Gráfica de ganancia unitaria de masa con respecto al tiempo de la piedra de jardín (caliza)* 82
Figura 4-6 *Medición de capa cementada a 50 aumentos, catalizado con conchas de almeja chocolata al 10%* 83
Figura 4-7 *Medición de capa cementada a 100 aumentos, catalizado con conchas de almeja chocolata al 10%.* 84
Figura 4-8 *Medición de capa cementada a 100 aumentos, catalizado con conchas de almeja chocolata al 10%.* 84

Figura 4-9 *Profundidad de capa contra relación $C/CaCO_3$ en deposición y difusión.*..... 85
Figura 4-10 *Profundidad de cementación con mezcla al 10 % de carbonato*..... 86
Figura 4-11 *Profundidad de cementación con mezcla al 20 % de carbonato*..... 87
Figura 4-12 *Profundidad de cementación con mezcla al 30 % de carbonato*..... 87
Figura 4-13 *Perfil de dureza, dureza HV contra profundidad de capa.*..... 89

Índice de tabla

Tabla 1-1 *Se muestra la utilización de mezclas para cementación utilizadas a lo largo del tiempo.* 8
Tabla 1-2 *Característica de un acero cementado* 9
Tabla 1-3 *Parámetros de control, para realizar el proceso de investigación.* 10
Tabla 1-4 *Designaciones asociadas a la figura 1.3* 18
Tabla 1-5 *Designaciones asociadas a la figura 1-4* 19
Tabla 1-6 *Contenido de carbono* 24
Tabla 2-1 *Propiedades de los materiales* [19] 27
Tabla 2-2 *Características del acero revenido* 46
Tabla 2-3 *Datos de energía de activación en el acero.* 50
Tabla 2-4 *Datos de difusión para el acero.* [19] 52
Tabla 3-1 *Composición del acero DIN/SAE 1018* 65
Tabla 3-2 *Composición del acero DIN/SAE 8620* 65
Tabla 4-1 *Composición química de la Almeja chocolata* 79
Tabla 4-2 *Composición química de la Piedra caliza* 79
Tabla 4-3 *Composición química de la Calcita de la rumorosa.* 80
Tabla 4-4 *Composición química del Ostión* 80
Tabla 4-5 *comparación entre porcentajes con respecto al tiempo, fuentes almeja chocolata W, calcita X, ostión Y y caliza Z.* 88

Introducción

La utilización del acero desde épocas muy remotas hasta la actualidad, ha pasado por una serie de avances en la tecnología, que ha venido acompañando la evolución del hombre. Desde la elaboración de los primeros utensilios, armas de guerra hasta las máquinas con elementos de aceros con usos específicos, un auto, barcos hasta las armaduras de los edificios que superan los 500 metros, son sin dudas de las aplicaciones más notables del acero en la comodidad del hombre moderno.

En el paso del tiempo, desde las primeras aplicaciones del hierro hasta la actualidad en el uso del acero, la tecnología aplicada ha evolucionado para adquirir aleaciones de hierro con propiedades químicas y físicas mejoradas, todo con el propósito de alargar la vida útil del material y disminuir los costos de fabricación. Al aumentar la población mundial ha aumentado la producción del acero y los insumos que se necesitan para producir aceros de alta calidad. En los países que están emergiendo en su desarrollo. Los insumos son de difícil acceso, el optar por insumos que ofrezcan características similares a los utilizados más comercialmente a un costo menor es una ventaja para muchos países; inclusive para aquellos que ya cuenta con avances en la producción de aceros.

En la actualidad la industria requiere de piezas con propiedades mecánicas especiales desde un engrane a ejes de turbinas donde se requieren de superficies con alta dureza por naturaleza de su aplicación y de un cuerpo tenaz capaz de soportar grandes cargas y los cambios que estos sufren durante el funcionamiento, un engrane que está sometido a fricción constante, que de ser un material blando, este se deformaría , pero de ser completamente duro por los cambios de carga e impactos se podría quebrar, por eso para esta aplicación se necesita dureza superficial y un núcleo tenaz que absorba esta energía.

Para tener estas propiedades mecánicas se encuentran los tratamientos termoquímicos, donde se encuentra la cementación, entre ellas la cementación sólida, que se caracteriza por ser catalizado por medio de carbonatos, como lo es el carbonato de bario ($BaCO_3$), carbonato de sodio (Na_2CO_3), carbonato de potasio (KCO_3), carbonato de calcio ($CaCO_3$). Todos estos carbonatos se

encuentran comercialmente y sus costos pueden no ser sostenidos por pequeños talleres o incluso países en desarrollo.

La utilización de organismos donadores de carbonato de calcio ($CaCO_3$), como lo es las conchas de almejas será de gran utilidad como activador para el enriquecimiento de carbono en aceros de bajo contenido de carbono para su posterior tratamiento térmico, ya que es fácil de conseguir sobretodo en lugares que se encuentren cerca del mar.

Hipótesis

La cementación sólida activada por carbonato de calcio ($CaCO_3$) donado por conchas de almejas es una opción viable y económica para enriquecimiento de carbono a aceros de bajo carbono, comparados con el carbonato de bario ($BaCO_3$), carbonato de sodio (Na_2CO_3) y el carbonato de calcio ($CaCO_3$) de uso comercial.

Objetivo

- Crear un procedimiento de cementación sólida utilizando grafito natural, conchas de almejas y calcita como elemento catalizador.

Metas

- Acondicionar el laboratorio de ciencias de los materiales para llevar a cabo el proceso de cementación.
- Obtener los parámetros óptimos de porcentaje de mezclas de grafito-$CaCO_3$ en la cementación sólida.
- Definir la mejor metodología de cementación sólida con mezcla de grafito-$CaCO_3$ usando como donador de $CaCO_3$ a moluscos bivalvos.
- Determinar si existe diferencia en la utilización de las diferentes fuentes donadores de calcio.

Justificación

Los activadores utilizados comúnmente para la cementación sólida como los son el carbonato de bario ($BaCO_3$), carbonato de sodio (Na_2CO_3) y el carbonato de calcio ($CaCO_3$) vendidos comercialmente en su versión pura tienen costo elevados. Empresas como Sigma Aldrich manejan precios para el carbonato de calcio de $1,126.00, carbonato de bario $ 1,208.00, carbonato de sodio $669.00 pesos. [(1)] Y estos no pueden ser costeados regularmente en pequeños talleres hasta países que están en inicios de su desarrollo.

Una de las razones que ha motivado esta investigación es buscar un procedimiento más económico en el proceso de cementación sólida utilizando recursos disponibles en la naturaleza como lo son las conchas de los moluscos bivalvos de mar o de rio, ricas en carbonato de calcio ($CaCO_3$).

CAPÍTULO 1 Estado del Arte

En éste capítulo se presentaran los antecedentes históricos de la cementación, utilizados comúnmente para el dopado de carbono en aceros de bajo carbono, desde los inicios de la utilización del hierro hasta la actualidad. Se hará mención de las clasificaciones de los aceros y el diagrama de hierro-carbono y los diferentes tratamientos térmicos aplicados a los aceros.

Así también una recopilación de los conocimientos científicos relevantes en el tema de la cementación solida por $CaCO_3$ donado por conchas de especies de mar o de agua dulce.

1.1 Estudios realizados en cementación sólida

La capacidad del ser humano para fabricar y utilizar herramientas es quizá la razón más importante del notable progreso que ha dado por resultado la actual era tecnológica. Los primeros hombres utilizaron herramientas de madera, hueso y piedra, sin embargo sin los metales estas herramientas eran primitivas y burdas, lo que obstaculizaba el progreso. Después del descubrimiento de los metales útiles, como cobre, estaño (ambos necesarios para producir bronce) y hierro, fue posible un mundo totalmente nuevo de desarrollo tecnológico. [(2)]

Casi todo lo que la actual civilización requiere depende de los metales. Se necesitan grandes cantidades de hierro y acero para fabricar automóviles, armas, barcos, construir puentes y edificios, máquinas y muchos otros productos.

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 el hierro como hierro nativo, y ya que los meteoritos son también escasos, no se utilizó el hierro hasta que se encontró un medio para extraerlo de sus minerales, se cree que este descubrimiento ocurrió en China hacia el año 2000 a.C y en Asia menor hacia el año 1500 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 oxidó de hierro, como la hematita o magnetita. Este proceso originaba u producto llamado algunas veces hierro “esponja” por los historiadores antiguos. Esto se debía que la masa de hierro no se fundía si no que las

impurezas llamadas “ganga” eran las que se fundían debido a su bajo punto de fusión. Esta ganga se iba hasta el fondo de la de la fragua como escoria. Y dejaba una masa esponjosa de hierro blanco caliente, pero no se fundía. Luego, esta masa se golpeaba sobre un yunque para producir una barra sólida de hierro. La mayoría de las escorias remanente se eliminaba sobre el yunque, pero algo permanecía y le daba al hierro una calidad tenaz y fibrosa. El contenido extremadamente bajo de carbono le daba al hierro buena resistencia a la corrosión. (2)

No fue sino hasta el siglo XIV cuando en Europa se empezó a utilizar el horno de fundición o de túnel para producir fundición de hierro.

Ha transcurrido mucho tiempo desde que se fundió el primer hierro, según se cree, por los hititas hace aproximadamente 3500 años, sin embargo sus herramientas nuevas de hierro no eran mucho mejores que las hechas por los metales más blandos, tales como cobre y bronce, que ya estaba en uso en ese tiempo. Esto se debía a que las herramientas de hierro de doblaban y no retenían el filo. Aún faltaba mucho tiempo para que se descubriera el proceso de obtención de acero, el cual utiliza el hierro para producir un material más fuerte y duro por tratamiento térmico. (2)

La mayor parte del hierro se extrae del mineral por medio de un proceso llamado oxidación-reducción. La historia moderna y el acero principian con la materia prima, el mineral de hierro, el carbón y la caliza. A partir de estos ingredientes se produce el arrabio en los altos hornos. El arrabio es el origen de casi todos los metales ferrosos (aquellos que contienen hierro). Luego en las plantas de productoras de acero se le somete a un proceso de refinación en hornos para producir acero, después del cual luego se cuela en lingoteras para producir lingotes o se cuela continuamente en formas de planchas gruesas, tochos, placas delgadas y barras. Los lingotes y las placas delgadas se procesan mediante diferentes técnicas para fabricar los numerosos productos de acero tan comúnmente en la vida diaria. Actualmente se están creando y utilizando métodos más modernos de fabricación de hierro y acero con el objeto de competir en los mercados mundiales.

El Proceso de cementación es una técnica obsoleta para la carburación del hierro. A diferencia de la siderurgia moderna que aumenta la cantidad de carbono en el hierro, al parecer fue desarrollado antes del siglo XVII. El proceso fue descrito en un tratado publicado en Praga en

1574. Fue de nuevo inventado por Johann Nussbaum de Magdeburgo, que comenzó sus operaciones en Nuremberg con los socios 1601. [3]

EL proceso comienza con hierro forjado y carbón vegetal. Utiliza una o más ollas de piedra durante mucho tiempo dentro del horno. Normalmente en Sheffield, cada uno era de 4.26m por 1.2192m y 3.5 metros de profundidad, las barras de hierro y el carbón de leña fueron envasados en capas alternas, con una capa superior de la materia refractarias del carbón y tapadas herméticamente, algunos fabricantes utilizaron una mezcla de polvo de carbón, hollín y sales minerales, llamado polvo de cementación en las obras más grandes se hicieron hasta 16 toneladas en cada ciclo. [3]

Dependiendo del grosor de las barras de hierro. Las ollas se calientan desde abajo por una semana o más. Las barras fueron examinados periódicamente y cuando se alcanzó las condiciones correctas se retiró del calor y se enfriaron alrededor de 14 días, con esta técnica se ganó un poco más de 1% de masa de C, llamándole a estas barras heterogéneas acero Blíster. [3]

En las épocas en las cuales el único tipo de aceros disponibles para el tratamiento térmico eran el acero al medio carbono y al alto carbono, solo se necesitaban comprender en parte las propiedades de los metales por parte del trabajador del ramo. Simplemente se calentaba el metal hasta obtener un color rojo cereza y luego se enfriaba rápidamente en agua o salmuera (se templaba), a esto seguía un tratamiento de revenido (o sea, un tratamiento térmico, controlado usualmente por método del color de óxido) para darle la tenacidad apropiada según el propósito de su uso. Sin embargo los requisitos actuales demandan una gran variedad de aceros para herramientas, incluyendo los aceros cementados para fabricar productos tales como matrices de dados los cuales deben endurecerse completamente a través de secciones gruesas. Los aceros de carbono simple y los aceros templados en agua se endurecen solo en secciones delgadas y en apenas 1/8” de profundidad en la superficie de piezas más gruesas por lo tanto no son convenientes para fabricar piezas que deben endurecerse totalmente. [2]

La mayor parte de las piezas que componen las máquinas y motores, se fabrican de forma que sus propiedades mecánicas sean bastante uniformes en toda la masa. Sin embargo en ciertos mecanismos es necesario que algunas piezas tengan superficies muy duras, resistentes al desgaste y a la penetración, y un núcleo tenaz, para poder soportar los choques a que están sometidas. Los

procedimientos más usados en la actualidad para conseguir estas características, gran dureza y mucha tenacidad, al parecer opuestas entre sí, son las siguientes: la cementación, la cianuración, la carbonitruración, la nitruración, la sulfinización, el temple local, del depósito de soldadura de delgadas capas superficiales de aceros de elevado contenido de carbono y el cromado duro. (4)

Durante muchos siglos la técnica de cementación permaneció estancada, es decir, sin acontecimientos importantes en relación con el agente de cementación, así como en la técnica de proceso. En el siglo XVII se introdujo el uso de carbón como resultado de la carbonización de los huesos los animales, incluso hay informes de la utilización de carbón de huesos humanos. Con la revolución industrial en los siglos XVIII y XIX, la cementación llegó a representar el principal tratamiento utilizado en la fabricación de herramientas, maquinaria y equipos y componentes mecánicos para la industria de la bicicleta, automóvil y en el ámbito militares. En la tabla 1.1 se muestra la utilización de mezclas utilizadas a lo largo del tiempo. (4)

Tabla 1-1 *Se muestra la utilización de mezclas para cementación utilizadas a lo largo del tiempo.*

Periodo	Mezcla
300 A. C. – 1.600 D. C.	1 Carbón vegetal 2 - Carbón + harina de hueso
1600 – 1900	3 - harina de carbón + harina de hueso + sangre 4 - harina de carbón + harina de hueso + sangre + cuerno raspado
1900 – 1990	5 - carbón+ barril Soda (luz barril) 6 - Carbón + carbonato de bario 7 – carbón +turba + carbonato de bario 8 - Carbón + carbonato de bario + de carbonato Potasio 9 - Carbón + carbonato de bario + Ferrocianuro de potasio
1990 – actualidad	10 - Carbón + carbonato de bario + carbonato calcio 11 - carbón + carbonato de potasio + carbonato de calcio 12 - Carbón + carbonato de calcio y carbón vegetal reciclado

El proceso de cementación sólida, es un tratamiento térmico de los más antiguos en el registro en la historia, y los artículos encontrados en acero tratado en el período de 300 años antes de Cristo, preparado probablemente por los herreros antiguos de Roma. Desde entonces, el hombre ya estaba preocupado por desarrollar procesos que garanticen una mayor vida, fuerza y fiabilidad en aplicaciones mecánicas. (5)

La cementación, que es el más antiguo de esos procedimientos de endurecimiento superficial, que consiste en aumentar el contenido de carbono en la superficie de los aceros. (4)

La cementación se usó en damasco y en Toledo, se calienta barras de hierro rodeada de carbón de leña en polvo, en cajas cerradas de ladrillos refractarios, a unos 1000 °C durante varios día (6)

La cementación sólida es muy utilizada ya que muchos componentes de máquinas están sometidos a rotación o deslizamientos, necesitan tener una superficie dura resistentes al desgastes y un núcleo tenaz capas soportar a la fractura. Y a veces es mejor maquinar un acero de bajo contenido de carbono ya que ahorraría tiempo de mecanización y costos de material. Además que no se obtendrían las características como dureza en la superficie y tenacidad en el corazón al utilizar un acero de alto contenido carbono.

La cementación es un procedimiento en el cual un acero de bajo carbono, 0,2% C o menos, se austenitiza en una atmósfera o en un ambiente rico en C, el cual difunde hacia el interior de la pieza, permitiendo a la austenita disolver altos porcentajes de éste. La temperatura usual de cementación es cercana a los 950ºC y la profundidad de este tratamiento depende del tiempo y de la dureza deseada. Una vez obtenida la capa exterior rica en C, se endurece por temple. Cabe señalar que la cementación en lo posible debe usarse en aceros en los cuales no pueda crecer mucho el grano y se pueda templar directamente. Un acero cementado muestra las siguientes características Tabla1.2. (7)

Tabla 1-2 *Característica de un acero cementado*

Dureza superficial	50 a 62 Rc
Contenido de C superficial	0.85 - 1%
Espesor característico capa cementada	2 - 20 mm

Es usual definir el espesor de cementación por la capa con dureza Rc > 50

EL investigador Ayala Rodríguez y col. [8] realizaron estudios de cementación sólida en aceros SAE1018 y SAE8620, en hornos de cementación en tiempos de 2, 4, y 6 horas, donde se determinó la influencia de las aleaciones y caracterizó las propiedades de dureza y resistencia al desgastes, el cual se obtuvieron mediante el análisis metalográficos, ensayo de dureza, resistencia a la abrasión, microscopia óptica y electrónica, y donde se analizan mediante los datos obtenidos y las gráficas generadas el comportamiento que presenta cada acero. Se emplearon temperaturas de cementación de 920° C y agua como medio de temple, se hicieron dos probetas o testigos para cementar, los parámetros de cementación se muestran en la tabla 1.3

Tabla 1-3 *Parámetros de control, para realizar el proceso de investigación.*

Ensayo No	**Tipo de acero SAE**	**Tiempo de cementación horas**
1	1018	2
2	8620	2
3	1018	4
4	8620	4
5	1018	6
6	8620	6

Se preparó una mezcla de 1000 gramos compuesta de carbón vegetal pulverizado y 10% de carbonato de sodio (Na_2CO_3) y resultando una profundidad de cementación que va de 1,1mm hasta 2,5mm de profundidad.

D. U. I. Ogo y col. De la University of Agriculture, de Nigeria, [9] realizaron experimentos con carbón de madera usando como activador conchas de almejas de rio (Aspatharia Sinuata) para cementar aceros dulces (bajo contenido de carbono). Se utilizó una caja de cementación de 80x80x70mm resistente al calor de (Ni-Cr), horno de mufla, máquina de ensayo de microdureza Vickers, el carbón y el activador fueron pulverizados en un 80% hasta 425µm. las barras redondas de aceros de bajo carbono se cortaron en 30mm de longitud y 16mm de diámetro, se

determinó una temperatura de cementación de 950° C en tiempos de 2, 4, 6, 8y 10 horas, después fueron templadas a 850° C con un tiempo de calentamiento de 10 minutos

Los resultados de la dureza fueron tomados a intervalos de 0,2mm a 4mm en las diferentes mezclas. Se obtuvieron los mejores resultados en la mezcla de 70% carbón y 30 de cochas de almejas de rio.

Se observó que a mezclas de más de un 30 % de conchas no se da una atmosfera rica en CO_2 dando así una descarbonización y a mezclas inferiores la atmosfera es deficiente en CO y la cinética de carbonización es lenta.

Ahmad Aniq Sofiyyudin [10] realizó cementación sólida, utilizando cascaras de coco con un contenido de $BaCO_3$, estas pruebas fueron hechas a temperaturas de 850°C, 900°C, 950° C con tiempos de permanencia de 6 horas, los resultados fueron de la cementación 0,1mm a 850°C , 1,0mm a 900°C y 1.5mm a 950°C se obtuvieron durezas de 179,2kg/mm^2, 277,83kg/mm^2 y 293,168kg/mm^2, todas la prueba realizadas en un acero AISI 4140.

El cuidado del medio ambiente ha traído como resultado investigaciones de cementación, utilizando carbón activado reciclado de las industrias refresqueras, sustituyendo activadores contaminantes por otros no muy contaminantes. Estudios y pruebas de sustitución de $BaCO_3$ por CaCO3 ya que el carbonato de bario es un potencial contaminante, [5]

D. U. I. Ogo y col. [11] Realizaron estudios utilizando conchas de mar y cascara de coco demostraron que las conchas tienen un potencial cementante en proporciones de 70 % carbón vegetal y 30 % conchas para las diferentes temperaturas, y mostró que las cascaras de coco son poco eficientes a temperaturas de 900°C y 950°C, así también que la cementación con conchas de mar presenta una eficiencia relativa del 82.5% comparada con el BaCO3 y un 134.7% comparado con la piedra de cal.

Experimentos realizados de cementación sólida a base de huesos molidos y calcinados, sal común e hidróxido de sodio, se obtuvo buenos resultados de capa después de tratamientos térmicos dando así una aplicación a la industria. [12]

P.O. Atanda y col. [13] investigaron sobre las variables de cementación-temperatura, tiempo y porcentajes de activadores en el acero obtenido de C2R HMT Ltd. India, el carburante compuesto de carbón y coque de madera, respectivamente, en la proporción de 2:1 se utiliza para la investigación con carbonato de sodio como el energético. Los especímenes fueron cementados utilizando diferentes porcentajes de estimulantes (10, 20 y 30%) a diferentes temperaturas (820, 860, 900 y 940^{o}C) a diferentes tiempos (de una a cinco horas). Todas las muestras fueron templadas a la temperatura de cementación. Las superficies fueron pulidas y atacadas con nital al 25%, la profundidad se midió utilizando un microscopio de 100 aumentos se midió la dureza con un micro- durómetro, Los resultados del estudio mostraron que la dureza media de cada caso de acero C2R aumentó con la temperatura en un determinado tiempo y la temperatura de cementación. Para un determinado porcentaje energético y la temperatura, la profundidad de casos y aumento de dureza con el tiempo. Sin embargo al aumentar el energético disminuyó el porcentaje de energía de activación necesaria para la difusión.

El ingeniero Freddy Cori Nina [14] ha investigado la influencia de la cementación sólida depositada en la superficie de un acero de bajo carbono SAE 1022, sobre el comportamiento al desgaste y a la fatiga en condiciones de flexión rotativa en ménsula. Los recubrimientos fueron obtenidos por el proceso de difusión e intercambio gas metal, utilizando como carburante carbón vegetal en un 80 % y como activador el carbonato de bario en un 20 %. Los espesores de los recubrimientos o de la capa carburada obtenidos fueron: 0,554, 0,738, 2,343 y 2,665 mm. Mediante estudios fractográficos se observó que las grietas por fatiga tienen, generalmente, la zona de origen en la superficie del substrato o también en el recubrimiento. Sobre la base de un modelo experimental, se seleccionaron como parámetros de la cementación 900°C y un tiempo de 8 horas. Luego un temple en agua seguido desde 800 °C y 2h de calentamiento previo. Finalmente un revenido a 205 °C durante 3h; con ello se obtuvo un incremento en el límite de fatiga muy significativo.

Las investigaciones realizadas por los proveedores de insumos para los tratamientos térmicos, confirma la preocupación en el desarrollo de granulados neutrales, y la Compañía de Heatbath Corporation ofrece al mercado su nuevo producto llamado "carburador Pack" BF 21 [www.heatbath.com, 2003] libre de carbonato de bario. Empresa HEF-Durferrit ofrece al

mercado sus agregados llamados KG6 y KG30, que emplea el carbonato de potasio y de calcio como agente activador. [5]

La atmosfera más utilizada de la cementación del acero en medio sólido consiste en la mezcla de carbón y carbonato de bario o sodio, conocido con el nombre de Caron esta mezcla tiene una proporción de 80 por ciento de carbón y 20 por ciento en peso de carbonato aproximadamente. [15]

Mediante la técnica de carbonitruración se obtienen mayores durezas y profundidades de cementación superiores a la cementación pero estas requieren de equipos más especializados y costosos.

En general todas las investigaciones tienen en común buscar procesos de cementación alternos a los usados tradicionalmente, que tenga un menor costo y que puedan ser empleado por pequeñas a grandes industrias, además en la reciente preocupación del cuidado del medio ambiente usar agentes cementantes que no tengan un impacto negativo severo en el procesos es de vital importancia.

1.2 Donadores de Carbonato de calcio (CaCO3)

En la naturaleza se encuentra el calcio, que es el quinto elemento más abundante en la litosfera, en forma natural se encuentra en minerales y en menas, esto debido a su reactividad con el oxígeno, sus compuestos se encuentran ampliamente difundidos entre los materiales geológicos, de ellos se encuentran carbonatos.

Entre los elementos geológico que contienen calcio, hay tres carbonatos, calcita ($CaCO_3$, romboédricos), aragonita [$CaCO_3$, ortorrómbico], y dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), (16) [16]

1.2.1 Calcita

La calcita es el componente principal de las rocas sedimentarias como la piedra caliza, yeso, mármol, dolomita figura 1-1a, cáscaras de huevo, perlas, corales (figura 1-1b) y las conchas de muchos animales marinos (figura 1-1c) [16]

a) b) c)

Figura 1-1 *Fuentes de carbonatos de calcio, a) Calcita mineral, b) corales, c) conchos de animales bivalvos.*

La caliza es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO3), generalmente calcita. También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo, etc., que modifican (a veces sensiblemente) el color y el grado de coherencia de la roca. El carácter prácticamente monomineral de las calizas permite reconocerlas fácilmente gracias a dos características físicas y químicas fundamentales de la calcita: es menos dura que el cobre (su dureza en la escala de Mohs es de 3) y reacciona con efervescencia en presencia de ácidos tales como el ácido clorhídrico.

1.2.2 Aragonita

El aragonito o aragonita (figura 1-2b) es una de las formas cristalinas del carbonato de calcio ($CaCO_3$), junto con la calcita. Puede encontrarse en forma de estalactitas, y también en la concha de casi todos los moluscos (figura1-1c), y en el esqueleto de los corales. Entre las variedades del aragonito destaca la llamada flos-ferri (flor de hierro), que se asemeja a un hermoso coral. [17]

El par aragonito/calcita fue el primer caso de polimorfismo mineral reconocido. Esto quiere decir que ambos tienen idéntica composición química, pero diferente estructura cristalina. Debido a esta diferencia, el aragonito es más soluble en agua que la calcita e inestable a temperatura y presión ambientes. De hecho, para periodos geológicos de tiempo (de 10 millones a 100 millones de años), el aragonito tiende a transformarse en calcita. Esta última propiedad puede usarse para determinar la edad de ciertas formaciones rocosas. [17]

a) b)

Figura 1-2 *Estructuras alotrópicas de la caliza, a) Dolomita, b) Aragonita*

El aragonito también pertenece a una serie isomorfa, esto es, un grupo de minerales que pertenecen a la misma clase y presentan la misma estructura cristalina, pero cuya composición es diferente. El aragonito contiene sustituciones isomorfas de bario (witherita), plomo (cerusita), cinc (bromlita) o estroncio (estroncianita). Estos minerales forman el grupo del aragonito. [17]

En cuanto a las aplicaciones del aragonito, son muy limitadas debido a la inestabilidad del mineral. El aragonito sólo suele usarse como piedra ornamental o de coleccionismo.

1.3 Normas ASTM

La organización ASTM que por sus siglas en ingles American Society for Testing Materials, que con el tiempo se fue ampliando de tratar materiales ferroviarios a todos los tipos de materiales, comprendiendo los revestimientos y los procesos de tratamiento. Actualmente desarrolla normas, cubriendo desde los tradicionales materiales para construcción, abarcando los materiales y equipos más variados, como las muestras metalográficas hasta cascos de motocicletas, equipos deportivos etc.

1.3.1 Guía estándar para la preparación de muestras metalográficas ASTM E3

El siguiente texto presenta para la orientación de la metalografía sólo aquellas prácticas que la experiencia ha demostrado son en general satisfactorias, no puede y no describe las variaciones en la técnica para resolver los problemas individuales preparación de la muestra.

La selección de muestras de análisis para el estudio metalográfico es extremadamente importante porque, si su interpretación ha de ser de valor, las muestras deben ser representativas del material que se está estudiando. La intención o el propósito del examen metalográfico suelen dictar la ubicación de las muestras a estudiar. Con respecto a los fines de estudio, el estudio metalográfico se pueden dividir en tres clasificaciones:

Estudios Generales o rutina de trabajo. Las muestras deben ser elegidas entre los lugares más propensos a revelar las variaciones máximas en el material en estudio. Por ejemplo, especímenes podría tomar de un casting en las zonas en donde la segregación máxima era de esperar que se produzca, así como ejemplares de las secciones en que la segregación podría estar a un mínimo. En el examen de las tiras o alambre, las muestras pueden obtenerse de cada extremo de las bobinas

Estudio de fallos. Las probetas de ensayo deben tomarse lo más cerca posible de la fractura o al inicio de la falla. Antes de tomar las muestras metalográficas, el estudio de la superficie de fractura debe ser completa, o, al menos, la superficie de la fractura debe ser documentado. En muchos casos, las muestras deben tomarse de un área de sonido para una comparación de las estructuras y propiedades.

Estudios de Investigación-La naturaleza del estudio dictará ubicación modelo, orientación, etc. Muestreo por lo general será más amplia que en los exámenes de rutina

Una vez establecido el tipo de estudio, es importante determinar el tipo sección que se examinará dependiendo del tipo de material, por ejemplo para un hierro vaciado un corte perpendicular muestra variaciones en la estructura del interior al exterior. Un material trabajado en frio o en caliente deben ser estudiadas tanto longitudinal como transversal.

Los cortes transversales se emplean principalmente para revelar la siguiente información

- Las variaciones en la estructura del centro de a la superficie.
- Distribución de impurezas no metálicas a través de la sección.
- Descarburización en la superficie de un material ferroso.
- Profundidad de imperfecciones de la superficie.
- La profundidad de la corrosión.
- Espesor de recubrimientos de protección, y Estructura de la capa protectora.

Para mayor comodidad, las muestras a pulir para el estudio metalográfico no son en general de 12 a 25 mm (0,5 a 1,0 pulgadas) cuadradas, o en aproximadamente 12 a 25 mm de diámetro si el material es de forma cilíndrica. La altura de la muestra no debe ser mayor de lo necesario para facilitar el manejo durante el pulido

Las muestras que son frágiles, con formas extrañas o demasiado pequeño como para ser manipulados fácilmente durante el pulido debe ser montado para garantizar una superficie satisfactoria para el estudio microscópico. Hay, basado en la técnica utilizada, tres métodos fundamentales de montaje de especímenes

Para obtener la muestra se debe tener cuidado para minimizar la alteración de la estructura para la cual hay tres tipos de corte., el primero es el corte sierra manual o con máquina usando lubricación es fácil, rápido y relativamente fresco, para durezas de 350 HV. La segunda por disco abrasivo para dureza por arriba de 350HV y el tercero es por corte por cuchillas.

Una vez que se tienen los cortes, se limpian de cualquier grasa o suciedad para ser montadas en resina o en plástico para su fácil manipulación y se procede con el desbaste de la superficie, con lijas de acuerdo a la dureza con giros de 45 a 90°y se continua puliendo la superficie en una disco en dirección contraria al giro del disco hasta obtener un acabado espejo.

1.3.2 Métodos de prueba estándar para ensayo de tensión de materiales metálicos ASTM E8

Estos métodos de prueba cubren los ensayos de tracción de materiales metálicos de cualquier forma a temperatura ambiente, en particular, los métodos de determinación de la resistencia a la fluencia, resistencia a la tracción, el alargamiento, y la reducción de área. [18]

Los ensayos de tracción proporcionan información sobre la fuerza y ductilidad de los materiales sometidos a tensiones de tracción uniaxial. Esta información puede ser útil en las comparaciones de los materiales, desarrollo de aleaciones, control de calidad y el diseño bajo circunstancias seguras.

Para el análisis de las piezas se siguen las especificaciones de tamaño, maquinado de piezas para maximizar la precisión y reducir los errores en los resultados.

Dentro de la sección reducida de especímenes rectangulares (figura 1-3 designaciones tabla 1-4), bordes o esquinas no debe haber tierra o abrasión en una manera que pueda causar al área de la sección transversal real de la muestra ser significativamente diferente de la zona calculada.

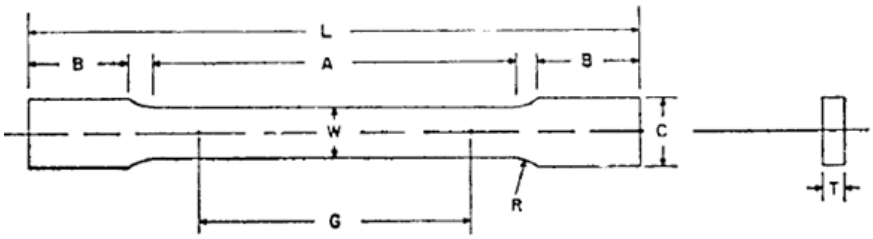


Figura 1-3 *Muestra de prueba de la tensión rectangular.*

Tabla 1-4 *Designaciones asociadas a la figura 1.3*

	Dimensions		
	Standard specimen		Subsize Specimen
	Plate-type 11/2-in wide	Sheet-type ½ in wide	1/4 in wide
	in	in	in
G-Gage length	8.00±0.001	2.00±0.005	1.00±0.003
W-Whith	1 ½ + 1/8 , - ¼	8.00±0.001	0.250±0.005
T-Thickness		Thickness of Material	
R-Radius of fillet, min	1	½	¼
L-Over length	18	8	4
A-Length of reduced section	9	2 ¼	1 ¼
B- Length of grid section	3	2	1 ¼
C-Width of grid section	2	¾	3/8

Dentro de los especímenes redondos se encuentra el de media pulgada hasta diámetros más pequeños (figura 1-4 designaciones tabla 1.5) Estos pueden ser utilizados cuando sea necesario

para poner a prueba el material desde el cual el modelo estándar o las muestras no pueden ser utilizados. Otros tamaños de pequeñas y redondas muestras pueden ser utilizadas. En cualquier muestra de pequeño tamaño es importante que la longitud del medidor para la medición de la elongación sea de cuatro veces el diámetro de la muestra.

La forma de los extremos de la muestra fuera de la longitud de la escala deberá ser adecuada al material y de una forma al ajuste a los sujetadores de la máquina de prueba de modo que las fuerzas puedan aplicarse axialmente.

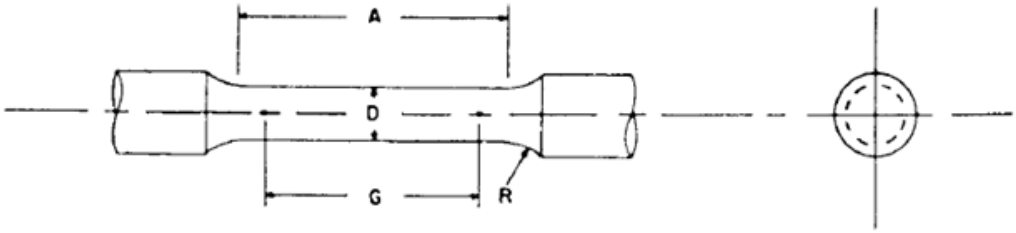


Figura 1-4 *Standard 0.500-in. Demás especímenes siguen la designaciones de la tabla 1-5.*

Tabla 1-5 *Designaciones asociadas a la figura 1-4*

	Dimensions				
	Standard specimen	Small-size Specimen Proportional to standard			
	in	in	in	in	in
Nominal diameter	0.500	0.350	0.250	0.160	0.113
G-Gage length	2.000±0.005	1.400±0.005	1.000±0.005	0.640±0.005	0.450±0.005
D-Diameter	0.500±0.010	0.350±0.007	0.250±0.005	0.160±0.005	0.1130±0.005
R-Radius of fillet min	3/8	1/4	3/16	5/32	3/32
A-Length of reduced	2 1/4	1 3/4	1 1/4	3/4	5/8

1.3.3 Métodos de prueba estándar para dureza Rockwell y dureza superficial Rockwell de materiales metálicos norma ASTM E18

Estos métodos de prueba se refieren a la determinación de la dureza Rockwell y la dureza superficial Rockwell de materiales metálicos, incluidos los métodos de prueba para la verificación de máquinas para la verificación de la dureza Rockwell y la calibración de los bloques de las pruebas estandarizadas de dureza. (18)

Una prueba de dureza de indentación utilizando una máquina verificada para forzar a un indentador de diamante esférico-cónico (indentador de diamante), o indentador de bola de acero duro bajo condiciones especificadas, en la superficie del material bajo prueba en dos operaciones, y para medir la diferencia de la profundidad de la indentación bajo las condiciones especificadas de preliminar y las fuerzas de prueba total (menor y mayor carga, respectivamente).

Prueba de dureza superficial Rockwell.- Al igual que la prueba de dureza Rockwell, salvo la prueba preliminar y las fuerzas de prueba totales son usadas.

La prueba de dureza Rockwell es una prueba de dureza de indentación empírica. La prueba de dureza Rockwell proporciona información útil sobre los materiales metálicos. Esta información se correlaciona con la resistencia a la tracción, resistencia al desgaste, ductilidad, y otras características físicas de los materiales metálicos, y puede ser útil en control de calidad y selección de los materiales.

1.3.4 Método de prueba estándar para microindentación de la dureza de materiales ASTM 384

Este método de ensayo cubre la determinación de la microindentación de la dureza de los materiales, la verificación de microindentación de la dureza de máquinas de prueba, y la calibración de bloques de prueba estandarizados.

Este método se aplica a las pruebas de microindentación hechas con indentadores Vickers y Knoop bajo las fuerzas de ensayo en el intervalo de 1-1000 gf (9.8×10^{-3} a 9,8 N).

Este método de prueba incluye un análisis de las posibles fuentes de errores que pueden ocurrir durante la prueba de microindentación y cómo estos factores afectan a la exactitud, repetitividad y reproducibilidad de los resultados de la prueba.

Prueba de dureza de la microindentación: una prueba de dureza usando una máquina calibrada para obligar a un indentador de diamante de geometría específica en la superficie del material que se evalúa, en el que las fuerzas de prueba van de 1 a 1000 gf, (9,8 X 3 $^{-3}$ a 9.8 N), y la indentación diagonal o diagonales son medidas con un microscopio de luz después de la eliminación de la carga; de cualquier prueba de dureza de microindentación, es asumido que la indentación no es sometida a la recuperación elástica después de retirar la fuerza.

El número de dureza Vickers, HV, es una expresión de la dureza obtenida dividiendo la fuerza aplicada a un indentador Vickers por la superficie del área de la impresión permanente hecha por el indentador. Indentador Vickers, en una base cuadrada de forma piramidal indentador de diamante con ángulos de cara de 136° figura 1-5.

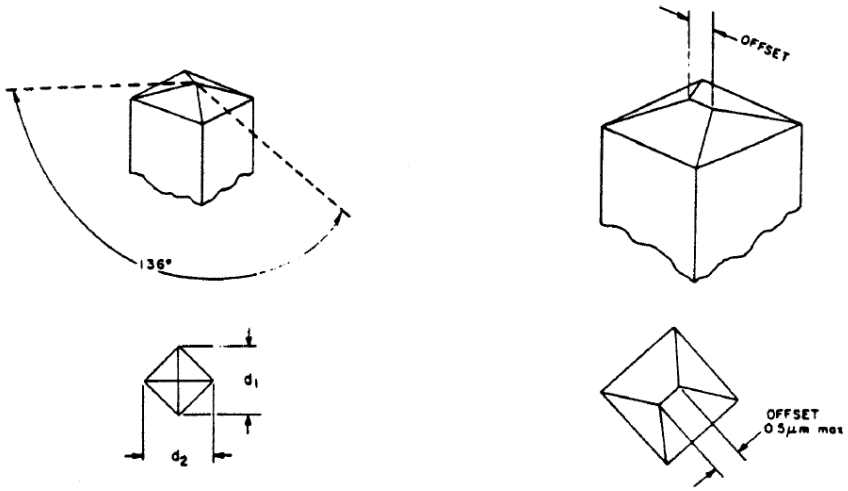


Figura 1-5 *Indentador Vickers.*

Para la prueba de dureza Vickers, en la práctica, las cargas de prueba son en gramos-fuerza y los indentación diagonal en micrómetros. El número de dureza Vickers se calcula como sigue:

$$HV = 1.00 \times 10^3 \times \frac{P}{A_s} = 2.00 \times 10^3 \times \frac{P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2}$$

o

$$HV = 1.8544 \times \frac{P}{d^2}$$

Dónde:

P = Fuerza, gf.

A_S = Superficie del área de la indentación, μm^2.

d = Longitud diagonal principal de la indentación, μm.

α = Angulo de la cara del indentador., 136°0.

Dureza, aunque empírica en la naturaleza, puede ser correlacionada con resistencia a la tracción para muchos metales, y es un indicador de la resistencia al desgaste y de ductilidad.
Pruebas de microindentación ampliando las pruebas de dureza de los materiales delgados o demasiado pequeño para las pruebas de microindentación Las pruebas de microindentación permiten las fases específicas o componentes y las regiones o gradientes muy pequeñas para las pruebas de microindentación a ser evaluados. Debido a la dureza de la microindentación revelará la variaciones de la dureza que pueden existir dentro de un material, una sola prueba puede no ser representativa de la dureza a granel.

1.3.5 Práctica Estándar para la Evaluación de los metales expuestos a ambientes carburación ASTM G79.

Esta práctica abarca los procedimientos para la identificación y medición de la extensión de la carburación en una muestra de metal y de la interpretación y evaluación de los efectos de la carburación. Se aplica principalmente al hierro y de aleaciones de níquel para aplicaciones de alta temperatura. Existen cuatro métodos.

1.3.5.1 Método A Masa total de ganancia

Este método proporciona una técnica relativamente rápida, simple y barato para la comparación de los materiales o las variables ambientales. El aumento de la masa total de la muestra durante la exposición, se considera como una primera aproximación del cambio de carbono total.

1.3.5.2 Método B Evaluación Metalográfica

La muestra se corte, pulido, y grabado para acentuar la estructura de carburo. El grado de penetración de carbono suficiente para formar carburos insolubles se mide directamente en un área ampliada.

El número de penetración de carbono se refiere al punto en el que los carburos insolubles se forman por primera vez. No indica la profundidad de la penetración total de carbono. Metalografías de medición de la penetración de carbono puede ser utilizado por sí mismo para la evaluación de materiales

1.3.5.3 Método C perfil Difusión de carbono

En general, este método consiste en el análisis de las sucesivas capas de una muestra expuesta. Esto puede hacerse mediante la eliminación y recolección del material con una técnica de mecanizado adecuados, como el fresado o torneado.

1.3.5.4 Método D Cambio en Propiedades Mecánicas

Carburación por lo general tiene una gran influencia en las propiedades mecánicas tales como resistencia, ductilidad y dureza. Así, las pruebas de dureza, tensión, impacto, fluencia, y la curva de los materiales de cementación a menudo producen resultados significativos en comparación con material no modificado

1.3.6 Métodos de medición de profundidad, Estándar SAE J 423 (1998-02)

Ámbito de aplicación en procesos de endurecimiento de un material ferroso, de tal manera que la capa superficial, es considerablemente más duro que el resto del material, conocido como el núcleo. El proceso abarca carburación, nitruración, carbonitruración, cianuración, la inducción, y

temple a la llama. En todos los casos, las propiedades de la composición química, mecánica, o ambos se ven afectados por esta práctica.

Este procedimiento de prueba se describe varios métodos para medir la profundidad a la que se hayan introducido modificaciones en cualquier composición química o propiedades mecánicas. Cada procedimiento tiene su propio ámbito de aplicación establecido por la práctica, y ningún método es recomendado para todos los efectos

1.3.6.1 Método químico

Este método es generalmente aplicable únicamente a los casos carburado, pero puede ser utilizado para los casos cianurada o carbonitrurado. El procedimiento consiste en determinar el contenido de carbono (y nitrógeno en su caso) a distintas profundidades por debajo de la superficie de un espécimen de la prueba. Este método es considerado el más exacto para medir la profundidad del caso total de casos carburado.

1.3.6.2 Métodos mecánicos

General: Este método es considerado como uno de los más útiles y precisos métodos de medición de la profundidad, Puede ser utilizado con eficacia en todo tipo de casos endurecido, y es el método preferido para la determinación de la profundidad eficaz de los casos. El uso de este método requiere la obtención y registro de valores de dureza a intervalos conocidos a través de la muestra Para la determinación de la profundidad eficaz del caso, el criterio del 50 HRC se utiliza generalmente. La muestra o una parte se considera templado cuando el nivel de dureza no cae por debajo del valor de la dureza eficaz. niveles sugeridos dureza se tabulan en la Tabla 1-6 para los distintos niveles de carbono nominal

Tabla 1-6 *Contenido de carbono*

Contenido de carbono	Dureza de profundidad efectiva
0,28-0,32% C	35 HRC
0,33-0,42% C	40HRC
0,43-0,52% C	45HRC
0,53% C y mas	50HRC

Las figuras 1-6 a la figura 1-9 ilustran los procedimientos recomendados

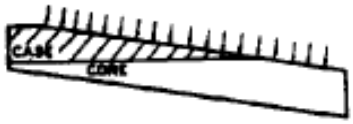


Figura 1-6 *Muestra de cono*

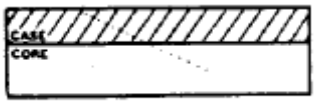


Figura 1-7 *Procedimiento de espécimen de sección cruzada.*

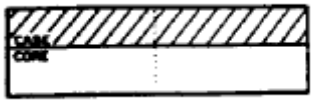


Figura 1-8 *Procedimiento alternativo de sección transversal.*

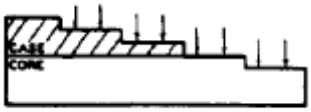


Figura 1-9 *Procedimiento escalonado.*

1.3.6.3 Métodos visuales

Este método emplea un procedimiento visual con o sin la ayuda de la ampliación para la lectura de la profundidad del caso, producido por cualquiera de los diversos procesos. Las muestras pueden ser preparadas por las combinaciones de fractura, de corte, pulido y pulido de los métodos. Grabado con un reactivo adecuado normalmente se requiere para producir un contraste entre el caso y el núcleo. Nital (ácido nítrico concentrado en alcohol) de varias fuerzas se utiliza con frecuencia para este propósito.

CAPÍTULO 2 Marco teórico

2.1 Materiales

Los materiales son la fuente, de que todo lo imaginado por el hombre sea posible, desde un tornillo, un auto de carreras, hasta el más grande de todos los edificios. En la vida moderna se cuentan con cinco grupos importantes de materiales, los metales, excelentes conductores y la base de la mayoría de los adelantos, entre los más importantes se encuentra los metales ferrosos; los cerámicos excelentes aislantes térmicos y en algunos casos superconductores a bajas temperaturas; los polímeros de los más aplicados en la vida moderna; semiconductores, sin estos materiales no sería posible la vida moderna llena de aparatos electrónicos como las computadoras; y por último, los compuestos que son la combinación de dos o más materiales que le dotan de cualidades físicas y mecánicas mejores.

La figura 2-1 muestra la relación de resistencias entre diversos materiales. Los materiales de cada grupo poseen distintas estructuras y propiedades, como se puede observar en la tabla 2-1.

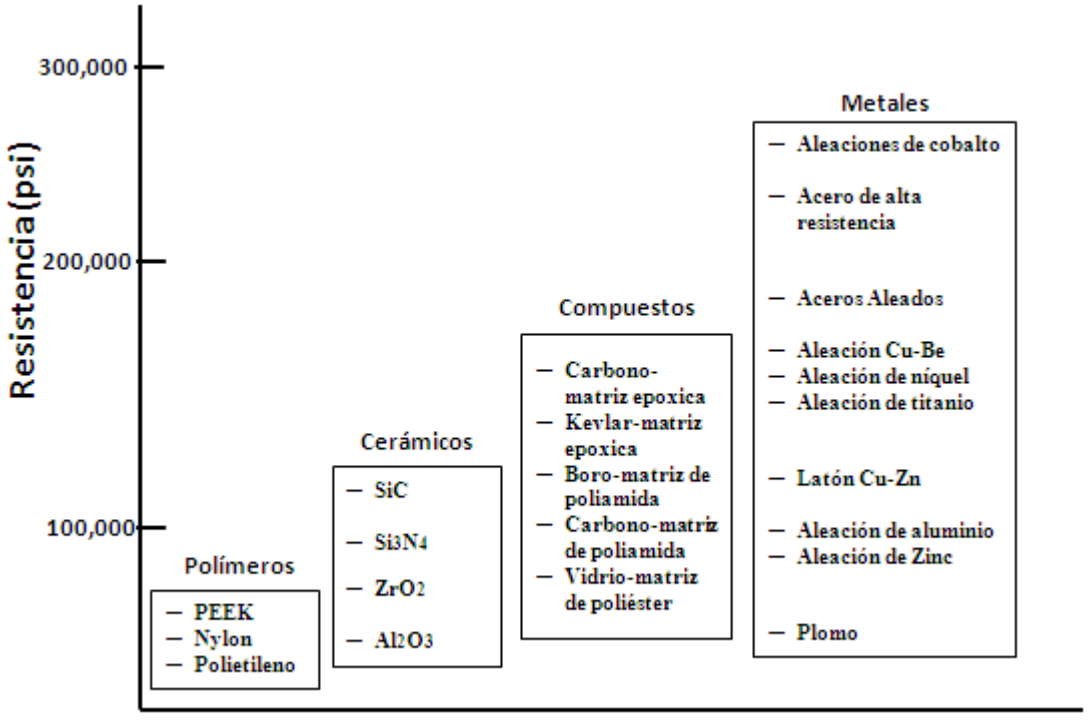


Figura 2-1 *Resistencias representativas de diversas categorías de materiales* [19]

Tabla 2-1 *Propiedades de los materiales* [19]

	Aplicaciones	**Propiedades**
Metales		
Cobre	Alambres conductores eléctricos	Alta conductividad eléctrica, buena formabilidad
Hierro fundido gris	Bloques para motor	Moldeable, maquinable, absorbe vibraciones
Aleación de aceros	Llaves	Endurecidas de manera significativas mediante tratamientos térmicos
Cerámicos		
SiO_3-Na_2-CaO	Vidrio para ventanas	Ópticamente útil
Al2O3,MgO,SiO	Refractarios para contener metal fundido	Aislantes térmicos, se funde a alta temperatura, relativamente inertes ante metal fundido
Titanato de Bario	Transductores para equipos de audio	Convierte el sonido en electricidad
Polímeros		
Polietileno	Empacado de alimentos	Fácilmente conformable en delgadas películas flexibles e impermeables
Epóxidos	Encapsulados de circuitos integrados	Eléctricamente aislante y resistente a la humedad
Fenólicos	Adhesivos para unir capas de madera laminada	Fuertes y resistentes a la humedad
Semiconductores		
Silicio	Transistores y circuitos integrados	Comportamiento eléctrico único
Galio	Sistemas de fibras ópticas	Convierte señales eléctricas en luz
Compuestos		
Grafito en matriz eléctrica	Componentes para aeronaves	Relación resistencia-peso
Carburo de tungsteno-cobalto	Herramienta de corte de carburo para maquinado	Alta dureza y de una buena resistencia al impacto
Acero recubierto de titanio	Recipientes para reactores	Tiene el bajo costo y la alta resistencia del acero con la resistencia a la corrosión del titanio

2.1.1 Metales

Los metales, incluyen aceros, aluminio, magnesio, zinc, hierro colado, titanio, cobre y níquel. En general, los metales tienen buena conductividad eléctrica y térmica. (19)

Las aleaciones son materiales metálicos que se obtienen mediante combinaciones químicas de distintos elementos. (19)

Los metales y las aleaciones tienen una resistencia relativamente alta, gran rigidez, ductilidad o formabilidad y buena resistencia a los choques térmicos. Tienen utilidad especial en aplicaciones estructurales o bajo cargas dinámicas. Aunque a veces se usan metales puros, las mezclas de metales llamadas aleaciones permiten mejorar determinadas propiedades o mejores combinaciones de propiedades. El corte longitudinal de un motor de reacción que se ve en la figura 2-2 ilustra el uso de materiales metálicos en varias aplicaciones críticas. (19)

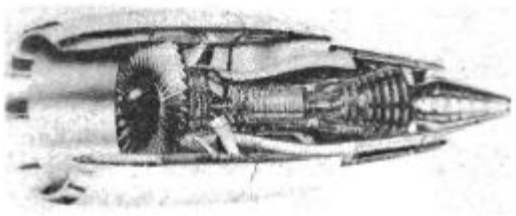


Figura 2-2 *Corte transversal de un turborreactor* (19)

Corte transversal de un turborreactor. La sección de compresión delantera opera a temperaturas bajas o medianas, y a menudo se utilizan componentes de titanio. La sección trasera de combustión opera a alta temperatura y se requieren de superaleaciones a base níquel. La coraza exterior está sujeta a temperaturas bajas y resultan satisfactorios el aluminio y los materiales compuestos. (19)

2.1.2 Cerámicos, vidrios y vitrocerámicos

Los cerámicos se pueden definir como materiales cristalinos inorgánicos. La arena de la playa y las rocas son ejemplo de cerámicos naturales. Los cerámicos avanzados son materiales obtenidos refinando cerámicos naturales y con otros procesos especiales. Se usan en sustratos que albergan

chips de computadora, sensores y actuadores, capacitores, comunicaciones inalámbricas, bujías de motores, inductores y aislantes eléctricos.

Algunos cerámicos se usan como recubrimientos, actuando como barrera para proteger sustratos metálicos en motores de turbina. También se usan en productos para el consumidor como pinturas, plásticos y neumáticos, así como en aplicaciones industriales como losetas para transbordadores espaciales. Las cerámicas tradicionales se usan para fabricar ladrillos, vajillas, artículos sanitarios, refractarios y abrasivos. En general, debido a la presencia de porosidad, no conducen bien el calor y deben calentarse a temperaturas muy altas para que se fundan. Los cerámicos son resistentes y duros, pero también muy frágiles. Las nuevas técnicas de procesamiento obtienen cerámicos con la resistencia suficiente a la fractura como para usarlos en aplicaciones bajo cargas dinámicas, como por ejemplo, en impulsores de motores de turbina (Figura 2-3). Los cerámicos tienen una resistencia excepcional a la compresión. [19]

Figura 2-3 *Una diversidad de componentes cerámicos complejos* [19]

El vidrio es un material amorfo y se obtiene con frecuencia, pero no siempre, de la sílice fundida. EL término amorfo se aplica a materiales que no tienen arreglo regular y periódico de sus átomos. La industria de fibras ópticas se basa en esas fibras, que son de vidrio de sílice de alta pureza. Los vidrios también se usan en las casas, los automóviles, pantallas de computadora y de televisión y cientos de otras aplicaciones. Los vidrios se pueden tratar térmicamente (templar) para hacerlos más resistentes. [19]

Vitrocerámicos, se obtienen al moldear los vidrios y nuclear (formar) pequeños cristales dentro de ellos con un proceso térmico especial. El Zerodur™ es un ejemplo de material vitrocerámico que se usa para fabricar los sustratos de los espejos de grandes telescopios (como el Hubble). [19] Los vidrios y las vitrocerámicas suelen procesarse por fusión y colado.

2.1.3 Polímeros

Son materiales orgánicos comunes. Se producen con un proceso llamado polimerización. Entre los materiales poliméricos están el caucho (elastómero) y muchas clases de adhesivos. Muchos polímeros tienen una resistividad eléctrica muy buena. También pueden proporcionar un buen aislamiento térmico. Aunque tienen menos resistencia, tienen una relación de resistencia a peso muy buena. Normalmente no son adecuados para usos a altas temperaturas. Muchos polímeros tienen muy buena resistencia a las sustancias corrosivas. Tienen miles de aplicaciones: desde chalecos antibalas, CD, cuerdas y pantallas de cristal líquido (LCD), hasta ropa y tazas de café. Los polímeros termoplásticos, cuyas largas cadenas moleculares no están unidas en forma rígida, tienen buena ductilidad y formabilidad; los polímeros termofijos son más resistentes, pero más frágiles porque las cadenas moleculares están estrechamente enlazadas (Figura 2-4). Los polímeros tienen muchos usos, que incluyen dispositivos electrónicos. Los termoplásticos se fabrican conformándolos en estado fundido. Los termofijos se cuelan en moldes. Los plásticos contienen aditivos. (19)

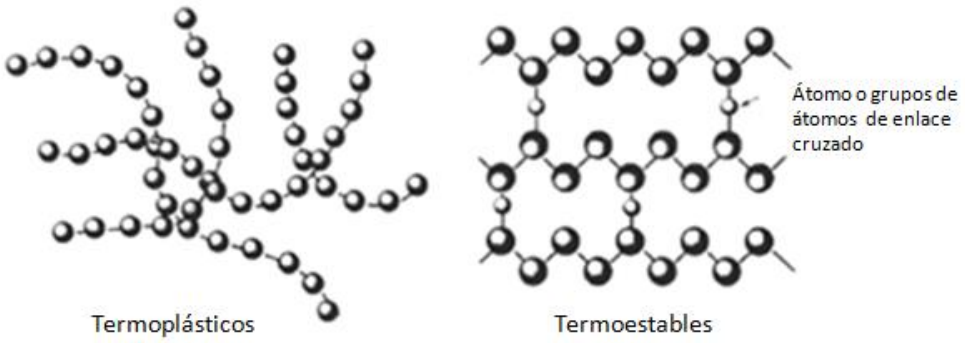


Figura 2-4 *La polimerización ocurre cuando moléculas pequeñas, se combinan produciendo moléculas más grandes..*

2.1.4 Semiconductores

Los semiconductores base silicio, germanio y arseniuro de galio, como los que usan en las computadoras y en electrónica, son parte de una clase más amplia, las 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 (Figura 2-5). [19]

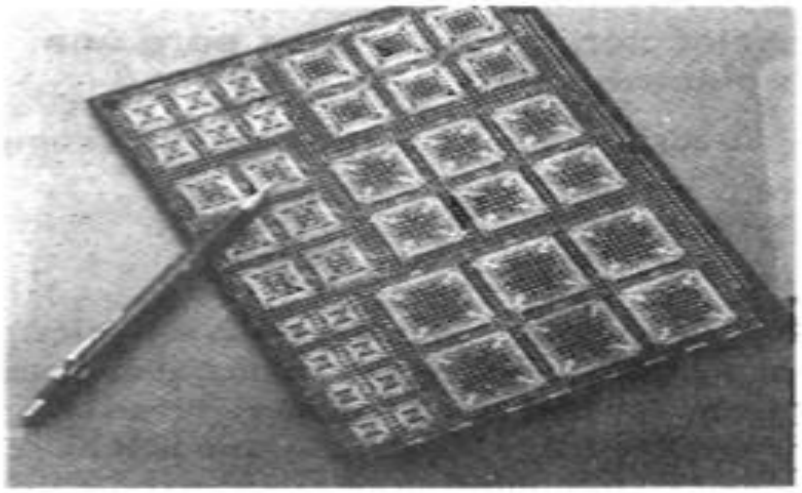


Figura 2-5 *Circuitos integrado* [19]

2.1.5 Materiales compuestos

La idea principal del desarrollo de materiales compuestos es combinar las propiedades de materiales distintos. Se forman a partir de dos o más materiales y se obtienen propiedades que no posee un solo material. El concreto, la madera terciada y los plásticos reforzados con fibras de vidrio son ejemplos de materiales compuestos. Estos últimos se fabrican dispersando fibras de vidrio en una matriz de polímero. Las fibras de vidrio hacen más rígido al polímero sin aumentar mucho su densidad. Con materiales compuestos se pueden obtener materiales ligeros, resistentes, dúctiles, resistentes a altas temperaturas, o también se pueden fabricar herramientas de corte

duras, pero resistentes al choque, que se romperían de no alear esos materiales. Los vehículos aéreos y aeroespaciales dependen mucho de materiales compuestos como, por ejemplo, los polímeros reforzados con fibra de carbono. [19]

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. [19]

2.2 Materiales ferrosos

Se dice que un material es ferroso si está constituido principalmente de hierro y son magnéticos y que raramente se encuentra en su estado puro, en ingeniería se encuentra principalmente en tres grandes grupos; acero, hierro dulce o forjado y hierro vaciado. [20; 21] Su principal materia prima es el mineral de hierro como las hematita, la limonita, la magnetita y la taconita. [22]

2.2.1 Diagrama de Hierro Carbono

Los aceros e hierros fundidos están representados por el sistema binario hierro-carbono el hierro comercialmente puro contiene hasta 0.008% de C, los aceros hasta 2.11% de C, y los hierros fundidos hasta 6.67% de C, aunque la mayoría de estos contienen menos de 4.5% de C. En la figura 2.7 se muestra el diagrama de fases de hierro-carburo de hierro aunque el diagrama se puede extender hacia la derecha hasta el 100%, (grafito puro), la gama que importa para aplicaciones de ingeniería es de hasta 6.67% de C. ya que el Fe_3C es una fase estable. El hierro puro se funde hasta una temperatura de 1538°C (2798°F) [23]

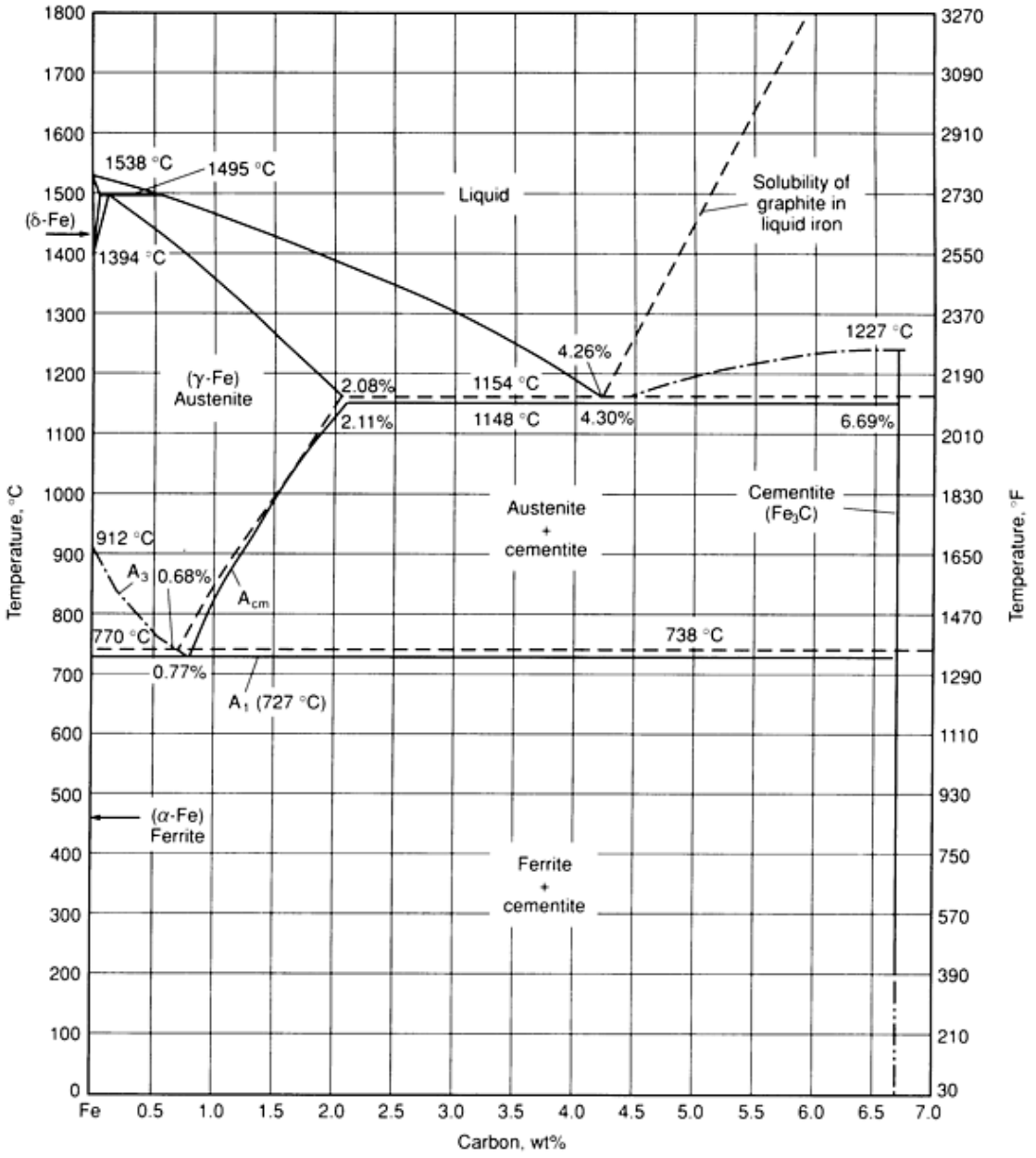


Figura 2-6 *Diagrama de fase hierro-carburo de hierro.* [24]

Como se muestra en el extremo izquierdo de la figura 2.6. Al enfriarse el hierro, primero se forma ferrita delta, después austenita y finalmente ferrita alfa. [20]

2.2.1.1 Ferrita.

La ferrita alfa, o simplemente ferrita, es una solución solida de hierro cubico centrado en el cuerpo; tiene una máxima solubilidad solida de 0.022% de C a una temperatura de 727°C (1341 °F). La ferrita delta es estable solo a temperaturas muy altas y no tiene importancia práctica en la ingeniería. Al igual que existe un límite de solubilidad para la sal en el agua (cualquier cantidad adicional se precipita en el fondo del recipiente como sal solida), hay un límite de solubilidad sólida para el carbono en el hierro. [23]

La ferrita es relativamente suave y dúctil; es magnética desde la temperatura ambiente hasta 768°C (1414°F), la temperatura de Curie (llamada así en honor de M. Curie, 1867-1934). Aunque se puede disolver muy poco carbono intersticialmente en el hierro bcc, la cantidad de carbono puede afectar de modo significativo las propiedades mecánicas de la ferrita. Además, es posible que una solución solida de hierro contenga cantidades importantes de cromo, manganeso, níquel, molibdeno, tungsteno y silicio, dando lugar así propiedades deseables. [23]

2.2.1.2 Austenita

Como se muestra en la figura 2-6, dentro de cierto margen de temperatura, el hierro sufre una transformación polimórfica de la estructura bcc a una estructura fcc para convertirse en hierro gama o (más comúnmente) austenita (bautizada así en honor de W.R. Austen, 1843-1902). Esta tiene una solubilidad sólida de hasta 2.11% de C a 1148°C (2098°F). Debido a que la estructura fcc tiene más posiciones intersticiales, la solubilidad sólida de la austenita es casi dos órdenes de magnitud mayor que la de la ferrita, ocupando el carbono las posiciones intersticiales (fig. 2-7a). [23]

La austenita representa una fase importante en el tratamiento térmico de los aceros: Es más densa que la ferrita y su estructura fcc de fase simple es dúctil a temperaturas elevadas. En consecuencia, posee buena formabilidad. También se pueden disolver grandes cantidades de níquel y manganeso en el hierro fcc para impartirle diversas propiedades. En la forma austenitica, el acero no es magnético, ya sea a altas temperaturas (para los aceros inoxidables austeniticos) o a temperatura ambiente. [23]

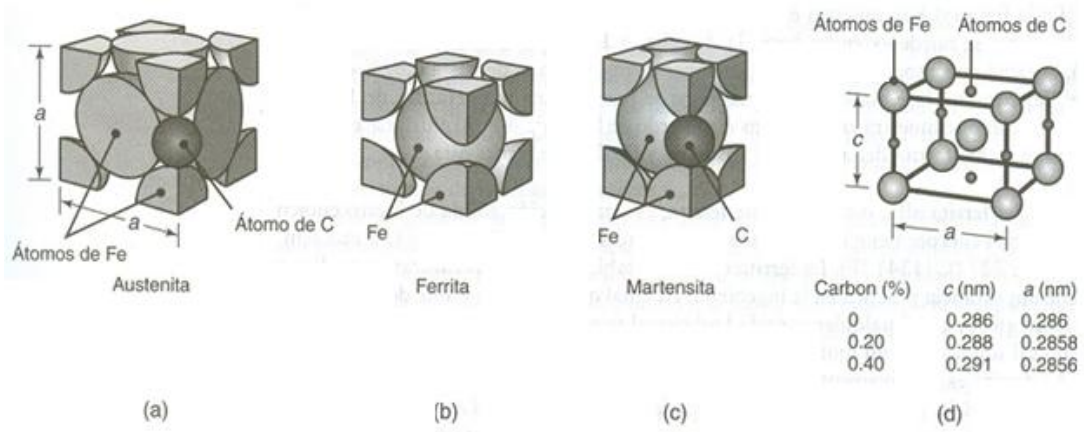


Figura 2-7 *Celdas unitarias de (a) austenita, (b) ferrita y (c) martensita. En (d) se muestra el efecto del porcentaje de carbono (en peso).*

2.2.1.3 Cementita

El extremo derecho de la figura 2-6 representa la cementita, que es 100% de carburo de hierro (Fe_3C) y tiene un contenido de carbono de 6.67%. La cementita (del latín caementum, que significa "astilla de piedra"), también se llama carburo. No debe confundirse este carburo de hierro con otros carburos utilizados como matrices, herramientas de corte y abrasivos (como el carburo de tungsteno, de titanio y de silicio). La cementita es un compuesto intermetálico muy duro y frágil que tiene una influencia significativa en las propiedades de los aceros. Puede incluir otros elementos de aleación, como cromo. Molibdeno y manganeso. [23]

La región del diagrama de fase hierro-carburo de hierro que se encuentra arriba de 2.11% de C, lo cual es importante para los aceros, se muestra en la figura 2-8; esta es una amplificación de la parte inferior izquierda de la figura 2-6 Se pueden desarrollar diversas microestructuras, dependiendo del contenido de carbono, la cantidad de deformación plástica (trabajado) y el método de tratamiento térmico. Por ejemplo, considérese el punto eutéctico del hierro con un contenido de 0.77% de C mientras se enfría muy lentamente de una temperatura de, por ejemplo 1100°C (2000°F) en la fase austenitica. [23]

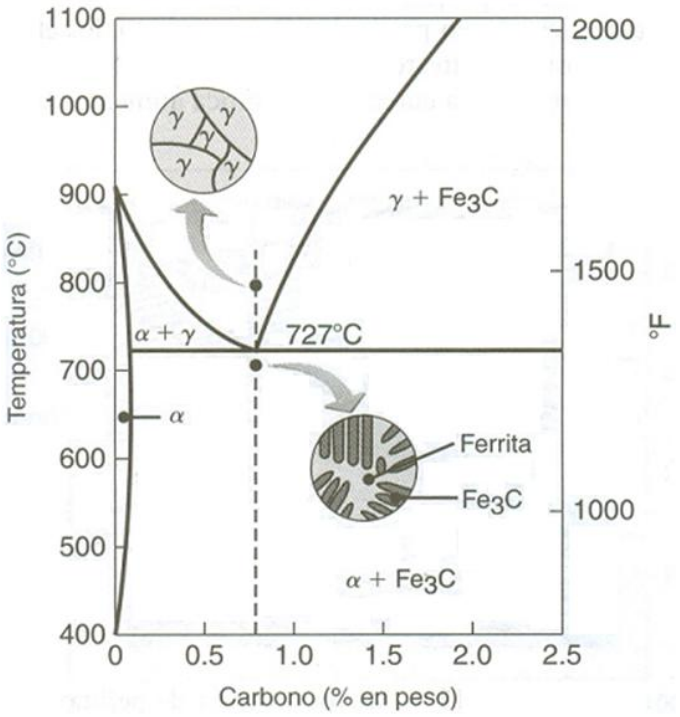


Figura 2-8 *Esquema de las Microestructuras de una aleación hierro-carbono de composición eutectoide (0.77% de carbono.*

La razón del enfriamiento lento es mantener el equilibrio. En el tratamiento térmico se emplean mayores velocidades de enfriamiento. A 727°C (1341°F) ocurre una reacción en la que la austenita se transforma en ferrita alfa (bcc) y cementita. Debido a que la solubilidad sólida de carbono en ferrita es de solo 0.022%, el carbón adicional forma cementita. A esta reacción se le llama reacción eutectoide (que significa similar a la eutéctica). Este término significa que, a cierta temperatura, una fase sólida única (austenita) se transforma en otras dos fases sólidas (ferrita y cementita). A la estructura del acero eutectoide se le llama perlita, porque a una baja amplificación se parece a la madreperla figura 2-9 La Microestructura de la perlita consta de capas alternas (laminillas) de ferrita y cementita. En consecuencia, sus propiedades mecánicas son intermedias entre las de la ferrita (suave y dúctil) y la cementita (dura y frágil). [23]

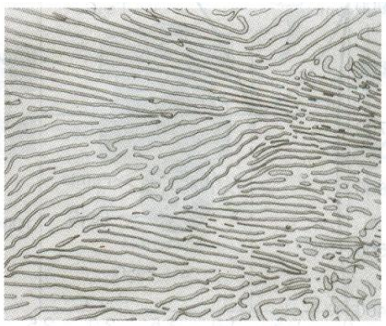


Figura 2-9 *Microestructura de perlita en acero 1080 formada de austenita, las regiones más claras son ferrita y las regiones más oscuras son carburo. Aumento 2500x.*

En el hierro con menos de 0.77% de C, la Microestructura formada consta de una fase de perlita (ferrita y cementita) y una fase de ferrita. A la ferrita en la perlita se le llama ferrita eutectoide, y a la fase de ferrita se le llama ferrita proeutectoide (pro significa antes). Se forma a una temperatura superior a la temperatura eutectoide de 727°C (1341°F) en la región alfa + gama. Si el contenido de carbono es mayor que 0.77%, la austenita se transforma en perlita y cementita. A la cementita en la perlita se le llama cementita eutectoide y a la fase de cementita se le llama cementita proeutectoide, pues se forma en la región alfa + Fe_3C a una temperatura mayor que la temperatura eutectoide. [23]

2.3 Clasificación de los aceros

2.3.1 Aceros al carbono

El acero es considerado como de acero al carbono cuando no se especifica el contenido mínimo o necesario para el cromo, el cobalto, el columbio [niobio], molibdeno, níquel, titanio, tungsteno, vanadio o zirconio, o cualquier otro elemento que se añade para obtener un efecto de aleación deseada; cuando el mínimo especificado para el cobre no supere el 0,40%; o cuando el contenido máximo fijado para cualquiera de los siguientes los elementos no supere los porcentajes de: 1,65 de manganeso, silicio 0,60, cobre 0, [24]

El acero puede clasificarse en aceros al carbono simples y aceros aleados. [22] Por tal, los aceros al carbono son generalmente clasificados según su contenido de carbono. En general, los aceros

contienen un máximo de 2.11% de carbono en total de elementos de aleación y se pueden subdividir en aceros de bajo carbono, de medio carbono, aceros de alto carbono. [24]

2.3.1.1 Aceros de bajo carbono

Contienen hasta un de 0,02 a 0,30% C. La categoría más grande de este tipo de acero es el de productos laminados planos (lámina o tira), por lo general en la condición de laminados en frío y recocido. El contenido de carbono de estos aceros de alta conformabilidad es muy baja, menos de 0,10% C, con un máximo de 0,4% Mn. Las aplicaciones típicas son elementos de la carrocería del automóvil, la hojalata, y productos de alambre y debido a su bajo contenido de carbono este tipo de acero no puede endurecerse, solo superficialmente, [22; 24]

Este tipo de acero se utiliza principalmente para maquinaria. [22] Para placas estructurales de acero laminado y perfiles, el contenido de carbono puede ser aumentado a aproximadamente el 0,30%, con mayor manganeso hasta 1,5%. Estos últimos materiales pueden ser utilizados para estampados, forjados, tubos sin soldadura, y la placa de la caldera. [24]

2.3.1.2 Aceros al medio carbono

Son similares a los aceros de bajo carbono, excepto los rangos de carbono van de 0,30 a 0,60% y el manganeso de 0,60 a 1,65%. El aumento del contenido de carbono a 0,5% con el consiguiente aumento en el manganeso permite a los aceros de medio carbono ser utilizados en las condiciones de templado y revenido. Son utilizados cuando se requiere una mayor resistencia y al ser tratados térmicamente adquieren durezas de 38 a 46 Rockwel C. [22; 24; 25] Los usos de los aceros de medio carbono-manganeso son: flechas, acoplamientos, cigüeñales, ejes, engranajes y piezas de forja. Aceros en el rango de 0,40 a 0,60%C son también utilizados para los rieles, ruedas de ferrocarril, y los ejes ferroviarios.

2.3.1.3 Aceros de alto carbono

Contienen desde 0,60 a 1,70% C con un contenido de manganeso que va de 0,30 a 0,90%. También conocidos como aceros para herramientas, este tipo de aceros se utiliza en herramientas

de corte, punzones, machuelos, matrices, brocas y rimas, su dureza por tratamiento térmico se encuentra entre 52 y 64 Rockwell C [25; 24; 25]

2.3.2 Aceros aleados

Al introducir elementos químicamente no encontrados en el acero al carbono es llamado acero aleado, o que sus propiedades características se deban a algún diferente al carbono. [26; 27] Se pueden clasificar también dependiendo del número de elementos aleantes a parte del carbón, y el hierro, ternario para un elemento diferente al carbono y hierro, cuaternario si tiene dos elementos. Entre los elementos más usuales se encuentran Cr, Ni, Mn, Si, W, Mo, V, Co, Ti, Al, Cu, Nb, Zr, y Be.

Cuando los elementos aleantes interactúan con el acero se obtienen propiedades mecánicas, químicas y físicas diferentes del acero al carbono, por lo que dependiendo del propósito del acero es la cantidad de los elementos aleantes.

2.4 Tratamientos térmicos

2.4.1 Recocido

El objetivo es homogeneizar la composición química de las piezas, ablandar, regenerar su estructura o eliminar tensiones internas, que por diversas causas mantienen composiciones diferentes entre sus diversos puntos. Consiste en el calentamiento a temperaturas adecuadas seguida de un enfriamiento lento, los diferentes recocidos utilizados en la industria son: Recocidos con austenización completa, recocidos subcríticos y recocidos de austenización incompleta (figura 2-10) [4; 28]

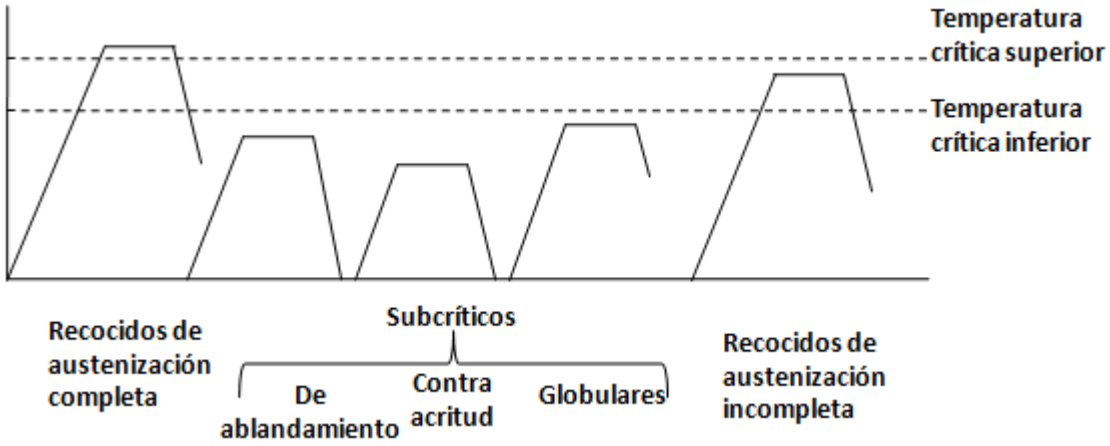


Figura 2-10 *Tipos de recocidos.*

La microestructura esquematizada es la de la figura 2-11, que corresponde al tratamiento industrial denominado recocido. [28]

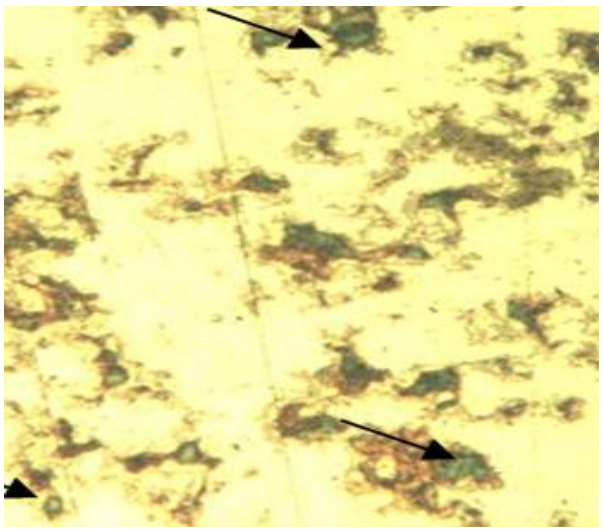


Figura 2-11 *Metalografía de recocido completo a 900˚C, se puede apreciar perlita globular*.

El recocido es el tratamiento térmico industrial consistente en enfriar en horno a puerta cerrada sin calentamiento y que obtiene el máximo ablandamiento del acero con estructura de tipo ferrito-perlítica equiaxial de tamaños groseros tanto en los granos como en las láminas de la perlita. [24]

2.4.1.1 Recocidos de austenización completa

En este caso el calentamiento se hace a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y luego el material se enfría muy lentamente sirve para ablandar el acero y regenerar su estructura [(4)]

2.4.1.2 Recocido subcríticos

El calentamiento se hace por debajo de la temperatura crítica inferior, no teniendo tanta importancia como en el caso anterior la velocidad de enfriamiento, pudiendo incluso enfriarse el acero al aire sin que se endurezca. Por medio de este tratamiento se eliminan las tensiones del material y aumenta su ductilidad. Se pueden distinguir tres clases de recocido subcríticos: de ablandamiento, contra acritud y globular.

2.4.1.2.1 Recocido de ablandamiento

Su principal objeto es ablandar el acero por un procedimiento rápido y económico, con este tratamiento no se suelen tener las menores durezas pero en muchos casos las que se consiguen son suficientes para mecanizar perfectamente el acero. El proceso consiste en calentar el acero por debajo de la temperatura critica inferior pero que sea lo más elevado posible y enfriar luego en aire. [(4)]

2.4.1.2.2 Recocido contra acritud

Se efectúa a temperatura de 550 y 650ºC para recristalizar materiales o trabajos en frio y tiene por objeto aumentar la ductilidad de los acero con poco contenido de carbono (menos de0,4%) con este procedimiento se destruye la cristalización alargada de la ferrita, apareciendo nuevos cristales poliédricos más dúctiles que los primitivos, el enfriamiento suele ser ala aire. [(4)]

2.4.1.3 Recocidos de austenización incompleta

También conocido como globulares, son tratamientos que suelen darse a los aceros al carbono y o aleados, de más de 0,5% de carbono, para ablandarlos y mejorar maquinabilidad. Consiste en calentamientos prolongados a temperaturas intermedias entre la crítica superior e inferior seguido de un enfriamiento lento. (4)

2.4.2 Normalizado

Al igual que el recocido es un tratamiento térmico para la regeneración de las estructuras que pueden estar afectadas por deformaciones plásticas, transformaciones martensíticas o incluso segregaciones dendríticas, este tratamiento consiste en un calentamiento a la temperatura ligeramente más elevada a la crítica superior, por lo general 30-80ºC (86-176ºF) seguido de un enfriamiento al aire. (4; 26; 28)

El normalizado es un tratamiento de una sola etapa isotérmica, como se muestra en la figura 2-12. Su cinética es similar a la del temple difiriendo exclusivamente en la velocidad de enfriamiento, V_e. (28)

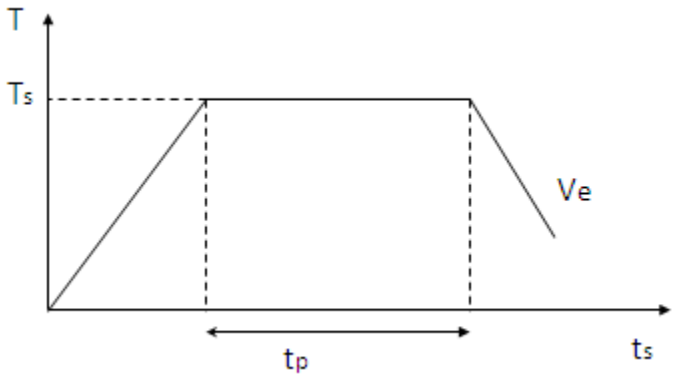


Figura 2-12 *Cinética del normalizado.*

La variable de control es la temperatura isotérmica de austenización, el tiempo de permanencia a la temperatura de austenización, seguida de la velocidad de enfriamiento V_e al aire. Existe una forma empírica para calcular el tiempo de permanencia a la temperatura de austenización (26) donde t es el tiempo de permanencia a la temperatura de austenización en min y del máximo diámetro de la pieza en mm.

$$t = 60 + D \quad \text{.....2.1}$$

La micrografía esquematizada es la de la figura 2-13 y corresponde a la del tratamiento industrial denominado normalizado. Su dureza es mayor que en el recocido, consecuencia del endurecimiento por densidad de granos y finura de la perlita. [28]

El normalizado es el tratamiento térmico consistente en enfriar al aire. Se obtiene una estructura equiaxial fina de ferrita y perlita de láminas finas con dureza superior al del recocido. [28]

2.4.3 Temple

El objetivo de este tratamiento es alcanzar altas cotas de endurecimiento y resistencia de los aceros debido a un drástico cambio en su estructura perlítica hasta alcanzar la martensita (figura 2-13). Por lo general se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y se enfría rápidamente. [4; 28]Se utiliza por lo general agua, aceite.

El proceso de transformación martensítica es de una sola etapa, si bien, la velocidad de enfriamiento es el parámetro más importante. [1]

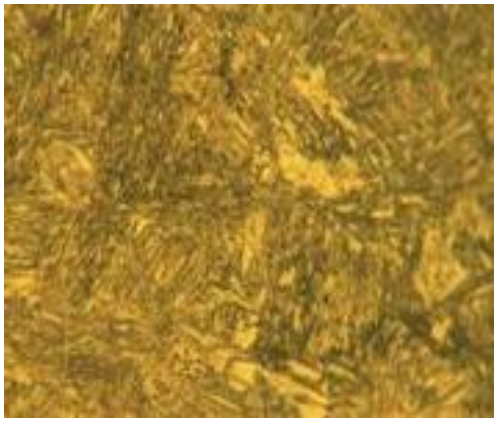


Figura 2-13 *Acero 1018 templado a* 955 ˚*C, se observa agujas de martensita.*

Se somete la muestra a un proceso de calentamiento y enfriamiento como el indicado en la figura 2-14, siendo variables del ensayo: la temperatura de austenización, T_{au}, y la velocidad de enfriamiento, V_e. [1]

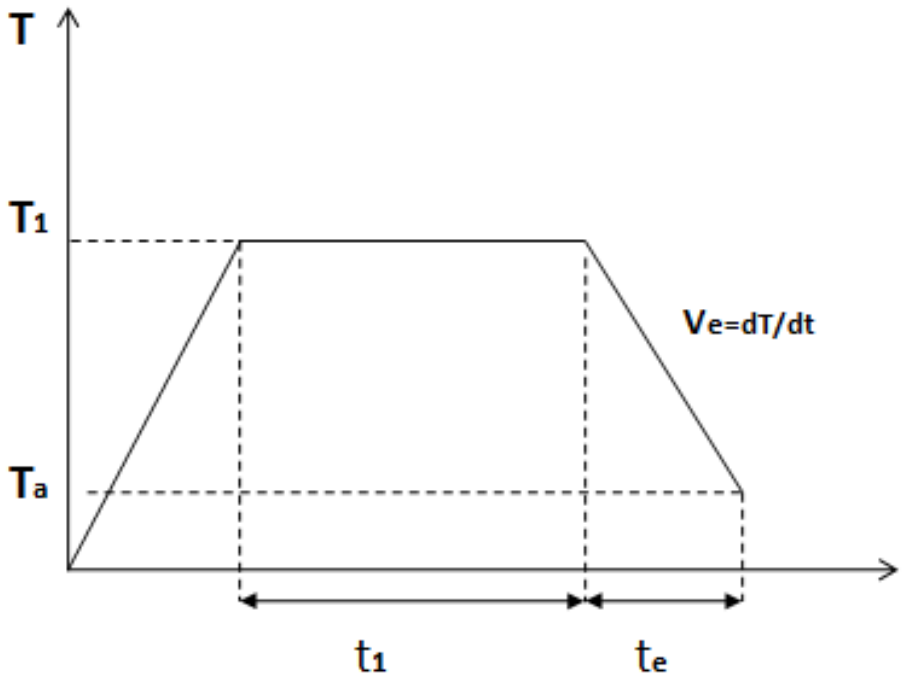


Figura 2-14 *Cinética del tratamiento térmico.*

2.4.4 Revenido

El Revenido es el proceso que permite retornar la martensita a las fases estables originales, y lo que es más importante, controlar de forma continua las características de la martensita tendiendo a mejorar sus características tenaces, muy débiles en la martensita, aunque sea necesario ceder algún grado en sus altas características estáticas (figura 2-15) Este tratamiento se aplica a las piezas de acero que han sido previamente templadas. [4; 28]

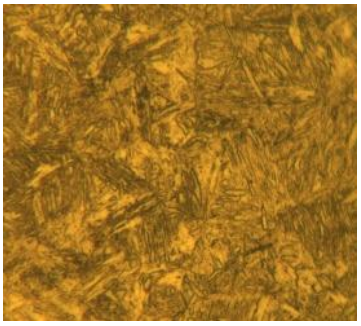


Figura 2-15 *Acero 1018 templado a* 955 ˚*C* y revenida a *Revenido a 200 °C. se aprecia martensita revenida.*

El campo de aplicación es el mismo que se comentó para la transformación martensítica, es decir, las aleaciones con composiciones de transformación eutectoide, Fe-C, In-Tl, Fe-Ni,y su importancia estriba en la aplicación de la transformación martensítica en las mismas, transformación que permite alcanzar las máximas cotas de endurecimiento, pero que requiere la aplicación de procesos para mejorar la tenacidad a fin de conseguir su aplicación óptima. [24]

El proceso de revenido es de una sola etapa. Si bien la condición de estar siempre conexo a la transformación martensítica, podríamos suponer que corresponde a la segunda etapa de un tratamiento completo de doble etapa en la que la primera corresponde al temple. La figura 2-16 muestra la cinética conjunta de este tratamiento. Corresponde a un tratamiento isotérmico con las variables fundamentales: temperatura, T_2, y el tiempo de mantenimiento, t_2. [1]

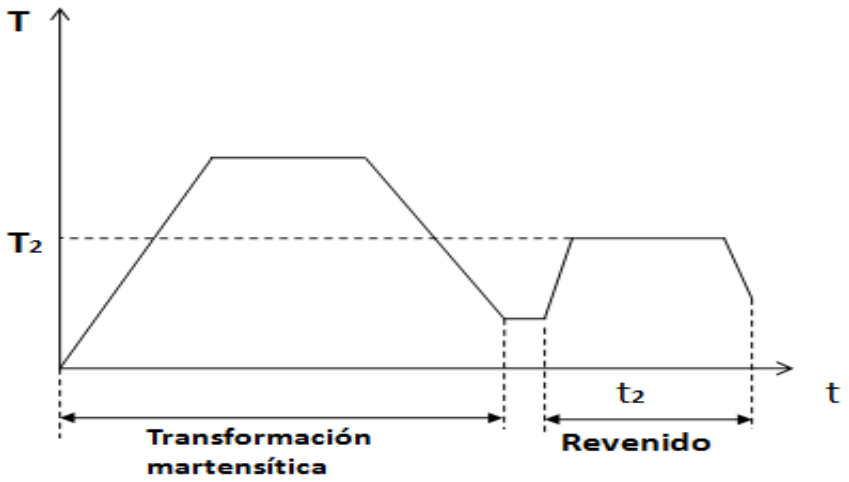


Figura 2-16 *Tratamiento de revenido en conexión con el de temple.*

La temperatura es la variable que controla las características de la martensita revenida. El tiempo podemos eliminarlo como variable si es superior de una hora, pues su influencia a partir de este nivel es de menor importancia. (1)

En la tabla 2-2 se resumen estas características y aplicaciones según la temperatura de revenido.

Tabla 2-2 *Características del acero revenido*

Características del acero revenido			
Rango de temperaturas	**Características Mecánicas**		**Tipo aplicación**
	Estáticas	**Dinámicas**	
Bajo T<250˚C	Altas	Medias	Estáticas
250˚C< T<400˚C	Medias	Bajas	No
Alto 400˚C< T<650˚C	Bajas	Altas	Dinámicas

El tratamiento de revenido sobre estructuras martensíticas se aplica fundamentalmente para mejorar sus características tenaces. Por esta circunstancia debe evitarse los revenidos a temperaturas medias de baja resiliencia. (1)

El tratamiento de revenido a temperaturas bajas, T < 200 ˚C, mejora ligeramente la resiliencia mantiene sus características estáticas lo que le hace aconsejable para piezas con solicitaciones, fundamentalmente estáticas.

El tratamiento de revenido a temperaturas altas, T > 400 ˚C, responde con resiliencias crecientes aun rebajando sus características estáticas. Se aconseja para piezas sometidas a solicitaciones fundamentalmente dinámicas y tenaces. (1)

2.4.5 Tratamientos térmicos selectivos

El diseño de una pieza con características superficiales diferenciadas exige en primer lugar la selección del material, que ha de constituir la generalidad de la pieza de acuerdo con su

resistencia específica, y en segundo lugar la selección del proceso, que aporta las variables del tratamiento selectivo que en la superficie debe alcanzar las especificadas deseadas. El campo de aplicación es el de piezas de maquinaria que se requiere características de alta dureza en su superficie y tenacidad en el resto: engranajes, matrices, leves, bulones, implantes quirúrgicos, etc.

2.4.5.1 Temple superficial

Los procesos para incorporación de la superficie endurecida son diversos y ello condiciona, tanto la selección de la materia prima original, como los tratamientos posteriores. (24)

La variación de características en la superficie de la pieza por temple superficial se fundamenta en la transformación martensítica selectiva: solo se realiza en la capa contorneada por la superficie. Con este objeto, las áreas superficiales que deben transformarse a martensita se calientan con suficiente potencia de forma que se creen fuertes gradientes de temperatura hacia el interior de la pieza; correspondiendo a la parte más externa del espesor requerido, los niveles de temperatura propios de la estabilidad de la austenita. (28)

En este momento, un enfriamiento rápido superior a la velocidad crítica de temple transforma a martensita la capa más exterior, de espesor h_m, a bainitas la interface y sin variaciones apreciables el resto de la pieza. (28)

2.4.5.2 Temple superficial por inducción

El calentamiento superficial se realiza por el campo magnético creado en la superficie de la pieza, que compone el núcleo de una bobina inductora que la envuelve.

El enfriamiento se realiza mediante agua a presión con aditivos inhibidores de la corrosión.

2.4.5.3 Temple superficial a la llama

En este proceso el calentamiento es producido por la combustión de gases de alta potencia calorífica como el acetileno, gas natural o propano. (28)

El control de la profundidad de la capa austenizada se realiza por medio del flujo de gas combustible y el tiempo de permanencia de cada punto. Pero la potencia calorífica está limitada, pues la alta temperatura de la llama puede inducir sobrecalentamientos superficiales. [18]

La ventaja principal del proceso de calentamiento por llama sobre el de inducción es que exige menor inversión, pero tiene algunos inconvenientes que dimanan de las condiciones de aplicación de la llama, como son: (28)

- Riesgo de descarburación superficial, si es llama oxidante.
- Peor incorporación a procesos automatizados.
- El proceso de calentamiento superficial a la llama requiere escasa inversión pero tiene gran riesgo de defectos y dificultad de control. (28)

2.4.5.4 Temple superficial por laser

El láser produce energía luminosa sobre todo el espectro electromagnético, desde el infrarrojo al ultravioleta, incluyendo la luz visible. Contrariamente a las fuentes de luz tradicionales, el laser industrializado genera energía a una única longitud de onda, y es capaz de concentrarla en un rayo de muy baja divergencia el cual está coordinado en tiempo y fase. Esto permite focalizar alta energía en pequeñas áreas, del orden de 0.2 mm de diámetro, lo que le hace idealmente aplicable al endurecimiento por austenización puntual o incluso por fusión local para soldadura. (1)

El láser a gas con medio amplificador formado por CO_2, nitrógeno y helio, obtiene una luz monocromática de longitud de onda 10.6 µm. Pueden alcanzar potencias altas, de 500W a 15KW, que aplicadas sobre las superficies de acero producen la austenización. El efecto de enfriamiento obtenido, por el entorno frio de la pieza, produce el efecto de temple. (28)

El láser, como técnica de endurecimiento superficial de aceros, se emplea fundamentalmente en el temple selectivo de pequeñas superficies.

2.5 Tratamientos termoquímicos

2.5.1 Cementación

La cementación o carburación para el endurecimiento de la superficie de los aceros se realiza donde se desea tener una superficie, como la de los dientes de un engrane, que sea dura, sin

embargo no se desea que todo el engrane sea todo duro, para aumentar la dureza de la superficie, se usa procesos de cementación.

En este proceso la variación de características en la superficie de la pieza se fundamenta en la incorporación, hasta límites de saturación, de carbono a la capa superficial de un acero de bajo contenido en carbono.

La incorporación del carbono al acero se realiza por procesos de difusión a través de la superficie cuando este muestra máxima solubilidad, en fase austenita, y cuando las temperaturas favorecen los procesos de difusión. (28)

La difusión indica el flujo neto de cualquier especie, como iones, átomos o electrones, vacancias o moléculas. La magnitud de este flujo depende del gradiente inicial de concentraciones y de la temperatura. (19)

2.5.1.1 Mecanismos de difusión

Existen defectos llamados vacancias el desorden que crean esas vacancias (es decir a mayor entropía) ayuda a minimizar la energía libre y, en consecuencia, la estabilidad termodinámica de un material cristalino. Los materiales cristalinos también tienen otra clase de defectos. En materiales que contienen vacancias, los átomos se mueven y saltan de una posición en la red a otra. Este proceso se llama autodifusión.

2.5.1.1.1 Energía de activación en la difusión

Un átomo que se difunde debe oprimir o forzar a los átomos que lo rodean a su paso para alcanzar su nuevo sitio. Para que esto suceda se debe suministrar energía, para forzar al átomo a su nueva posición para difusiones de vacancias e intersticios. El átomo se encuentra originalmente en un lugar de baja energía y relativamente estable, para pasar a un nuevo lugar, el átomo debe superar una barrera de energía, esta barrera de energía es la energía de activación *Q*. la energía térmica suministra a los átomos o iones la energía necesaria para superar esta barrera.

Los valores característicos de la energía de activación para átomos diferentes en el acero se muestran en la tabla 2-3.

Tabla 2-3 *Datos de energía de activación en el acero.*

Par de difusión	Q (cal/mol)	D_0
Difusión intersticial		
C en Hierro FCC	32900	0.23
C en Hierro BCC	20900	0.011
N en Hierro FCC	34600	0.0034
N en Hierro BCC	18300	0.0047
H en Hierro FCC	10300	0.0063
H en Hierro BCC	3600	0.0012

Se usara el par de difusión para indicar una combinación de un átomo determinado que se difunde en por un material. La energía de activación baja significa que la difusión es fácil. La tabla también muestra valores de D_0 que es el coeficiente de difusión cuando 1/ T =0.

La cinética del proceso de difusión depende fuertemente de la temperatura de, el coeficiente de difusión D se relaciona con la temperatura, de acuerdo con la ecuación del tipo Arrhenius,

$$D = D_0 \, exp \, \frac{-Q}{RT} \qquad 2.2$$

2.5.1.1.2 Velocidad de difusión (Primera ley de Fick)

Adolf Eugen Fick (1829-1901) fue el primer científico, que presento una descripción cuantitativo del proceso de difusión.

La velocidad con que se difunde los átomos, iones, partículas u otras especies en un material se puede medir con flujo J. lo que aquí interesa principalmente es la difusión de iones o átomos. El flujo J se define como la cantidad de átomos que atraviesan un plano en un área unitaria por unidad de tiempo (Figura 2-17)

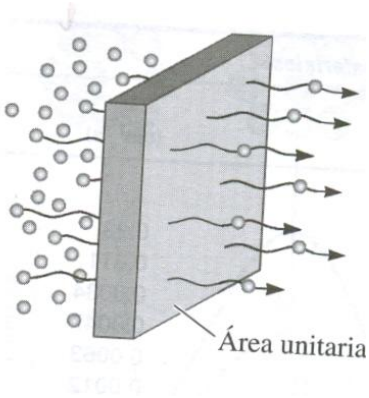


Figura 2-17 *Flujo durante la difusión*

La primera ley de Fick explica el flujo neto de átomos:

$$J = -D\frac{dc}{dx} \qquad 2.3$$

En donde J es el flujo, D es la difusividad o el coeficiente de difusión ($^{cm}/_{S}$) y $^{dc}/_{dx}$ es el gradiente de concentración $\frac{Atomos}{cm^3 cm}$. Dependiendo del caso, la concentración se puede expresar en porcentaje de átomos, porcentaje en peso, porcentaje molar, fracción de átomos o fracción de mol. El gradiente de concentración indica la forma en que la composición del material varía en función de la distancia.

2.5.1.1.3 Perfil de composición (Segunda ley de Fick)

La segunda ley de Fick, que describe la difusión dinámica, o en estado no estacionario de los átomos es la ecuación diferencial

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\ D\frac{dc}{dx} \qquad 2.4$$

Si se supone que el coeficiente de difusión D no es una función de ubicación *x* ni de la concentración (*c)* de la especie que se difunde, se puede plantear una versión simplificada de la segunda ley de Fick como sigue:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \qquad 2.5$$

La solución de esta ecuación depende de las condiciones de las condiciones de frontera para un caso en particular la solución es

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = erf \quad \frac{x}{2 \quad \overline{Dt}} \qquad 2.6$$

Donde C_s es la concentración constante de los átomos que se difunden en la materia, C_0 es la concentración inicial uniforme de los átomos que se difunden en el material y, C_x es la concentración del átomo que se difunde en el lugar *x* debajo de la superficie después del tiempo *t*. La función "erf" es la función de error, y se puede evaluar en la tabla 2-4.

Tabla 2-4 *Datos de difusión para el acero.* [19]

Argumento de la función de error $\frac{x}{2 \quad \overline{Dt}}$	**Valor de la función de error** $erf \quad \frac{x}{2 \quad \overline{Dt}}$
0	**0**
0.10	**0.1125**
0.20	**0.2227**
0.30	**0.3286**
0.40	**0.4284**
0.50	**0.5205**
0.60	**0.6039**
0.70	**0.6778**
0.80	**0.7421**
0.90	**0.7970**
1.00	**0.8427**
1.50	**0.9661**
20.0	**0.9953**

En la figura 2-18 se observa la zona del diagrama de fases en el que se realiza el proceso de cementación, de acuerdo con la selección citada, siendo T_a la mínima temperatura de austenización para el acero del 0.2 % de carbono y con la máxima solubilidad del carbono del 1.1 %.

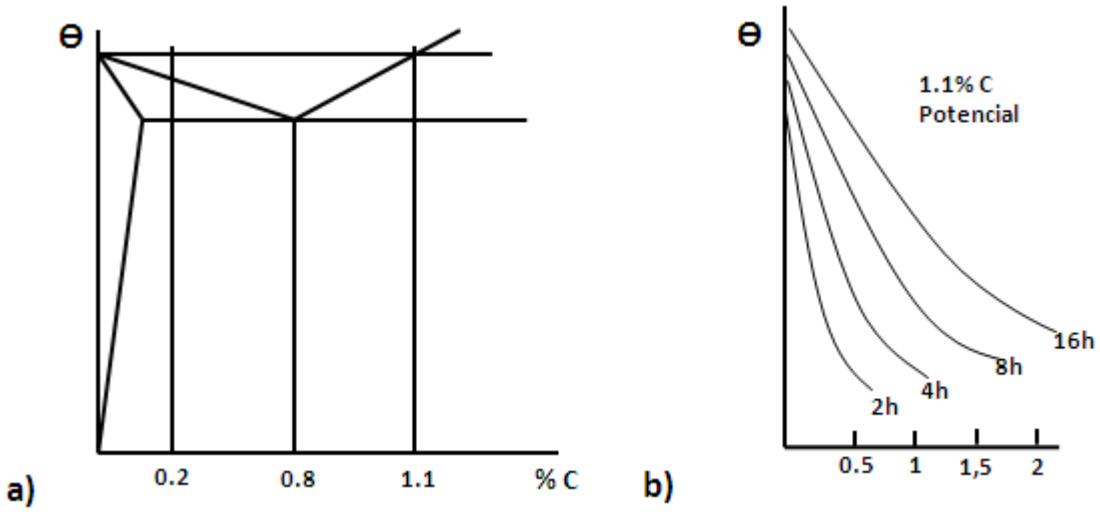


Figura 2-18 *a) Diagrama de fases en la zona de cementación. b) Difusión del carbono, C = f (x, t).*

La fuente de carbono que debe difundirse en el acero es siempre CO en fase gaseosa a una atmosfera de presión. La reacción primaria de cesión de carbono es: [28]

$$2\,CO + Fe \rightarrow Fe_{(C)} + CO_2 \qquad 2.7$$

El mantenimiento de la reacción hacia la derecha exige unas proporciones máximas de CO_2 a 900˚C en la proporción CO/CO_2 del 4%; lo que obliga al enriquecimiento continuo en CO para evitar la inversión de la reacción. Esta condición asegura que el contenido en carbono, C%, es el que corresponde a la saturación de la austenita.

El fundamento de cualquier método de carburación es disponer de una atmosfera rica en CO que pueda mantener un contenido superior al 96%, sobre la atmosfera de CO + CO_2, para cualquier consumo del mismo. [28]

Existen diversos procedimientos de conseguir este objetivo, diferenciados por las materias primas que requieren para la obtención de la atmosfera rica en CO, o alternativamente del carbono requerido para la formación de CO en la reacción: [28]

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad 2.8$$

$$CO_2 + 1\ \ 2\,O_2 \rightarrow 2CO \quad 2.9$$

2.5.1.2 Con materias sólidas

El elemento portador es el carbono, y se emplean activadores, a base de carbonatos alcalinos o alcalinotérreos, que permiten aumentar la presión de CO resultante de la combustión del carbono. [28]

La instalación es simple: cajas cerradas calentadas por fuente externa, lo que constituye una ventaja por la baja inversión; Las piezas se encierran en su interior. Sin embargo, tiene inconvenientes sobre los otros procesos, como son:

1) Dificultad de conseguir temperatura constante en todos sus puntos.
2) Elevado coste de producción derivado de la dificultad de automatización.

2.5.1.3 Con materias líquidas.

El elemento portador es un baño de sales mantenido a la temperatura de austenización. Las piezas se sumergen en su interior. Las sales pueden ser diversas; entre ellas el cianuro sódico activado por carbonatos alcalinos, de bario. [28]

La fuente de calefacción puede ser eléctrica, actuando la propia sal, conductora, como resistencia. El suministro de carbono suele ir acompañado por el de nitrógeno del radical CN, lo que significa un efecto combinado de nitruración y cementación, que potencia el endurecimiento del carbono.

La cementación en sales no tiene las desventajas de la cementación en sólido aunque sigue teniendo algunas dificultades en la automatización, siendo destacable la toxicidad de las sales empleadas, cianuros. (28)

2.5.1.4 Con gases.

Las atmosferas carburantes están compuestas de un gas portador y un gas activo. El gas activo, fuente de carbono, suele ser un hidrocarburo, butano o propano, que mediante catalizadores se transforma en metano. A las temperaturas de austenización se descompone en carbono e hidrogeno: (28)

$$CH_4 \rightarrow C + 2H_2 \qquad 2.10$$

El gas portador contiene CO y relleno para rebajar la proporción de carbono en el horno. EL CO reacciona con el hidrogeno para dar agua: [24]

$$CO + H_2 \rightarrow C + H_2O \qquad 2.11$$

Así, se establece un equilibrio entre los gases activos en la mezcla H_2, CO y H_2O, vapor, dando como resultado un carbono libre que se difunde en la superficie del acero. La figura 2-19 muestra la correlación entre estos gases cuando la proporción de H_2O se mide por el punto de roció. (28)

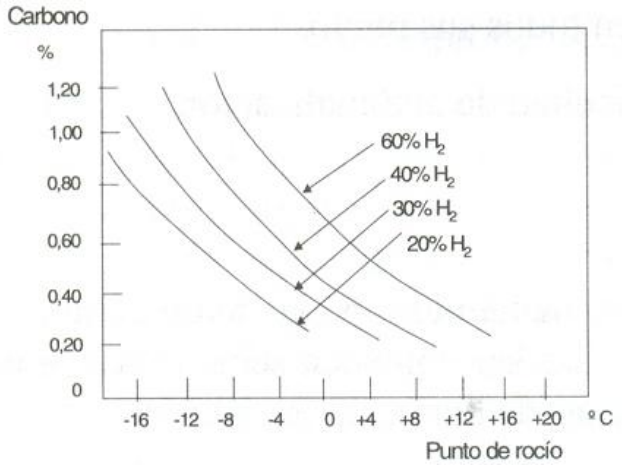


Figura 2-19 *Contenido de carbono en la capa superficial según el contenido de hidrógeno del gas cementante a 925˚C.* (28)

El contenido de carbono en la capa superficial crece con el contenido de hidrógeno y decrece con el de agua. (28)

El horno se calienta mediante combustibles o resistencias eléctricas, y las piezas se mantienen en su interior bajo los efectos del gas cementante.

El proceso de cementación gaseosa no tiene las desventajas apuntadas en los procesos de cementación sólida o líquida, y permite además el control de la aportación de carbono por control de las proporciones de CO y CO_2 en el gas. Sin embargo, apunta la desventaja de una mayor inversión, como contrapartida a su mayor automatización. (28)

2.5.1.5 La tenacidad del núcleo de una pieza cementada

La tenacidad del núcleo es muy superior a la de la capa cementada, que es martensita. Sin embargo, hay que anotar que por el proceso de austenización durante 8 horas el tamaño de grano ferrito-perlítico es muy superior al inicial, como se ha observado en las diferentes micrografías, lo que conlleva una disminución fuerte de la tenacidad, tal como se investigó sobre el engrosamiento de grano. (28)

2.5.2 Carbonitruración.

Como se ha apuntado, en el proceso de carburación con sales, el nitrógeno puede actuar como un potenciador del carbono de la cementación, lo que se define como proceso de carbonitruración, cuando la deposición de ambos elementos se realiza en fase gaseosa. Este no es más que una variante de la cementación en la que se incorpora el nitrógeno como elemento de aleación adicional para la capa difundida. (28)

En el proceso de cementación gaseosa, el nitrógeno se incorpora a través de la disociación del amoniaco que deja nitrógeno atómico capaz de difundirse en la misma. (28)

$$2NH_3 \rightarrow 2N + 3H_2 \qquad 2.12$$

Las temperaturas de tratamiento son las recomendadas para la cementación: las de austenización del acero, T_a. Sin embargo la temperatura de tratamiento, T_c, tiene la influencia indicada por la figura 2-20 en la absorción y difusión de nitrógeno por la capa como función del NH_3 adicionado.

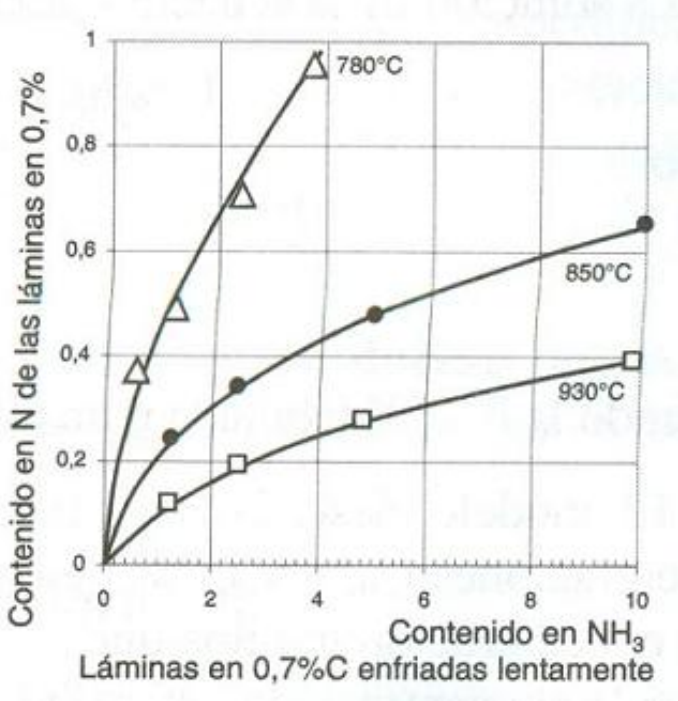


Figura 2-20 *Dependencia del N absorbido en función de la temperatura Tc y contenido de amoniaco añadido* [28]

La absorción de nitrógeno aumenta con el contenido de NH_3 y con la disminución de la temperatura de proceso. [28]

Después del proceso, la capa difundida dispone de carbono y nitrógeno disuelto, figura 2-21, que permite el endurecimiento como en el caso de la cementación. El nitrógeno aporta sobre la pieza cementada las ventajas siguientes:

1) Mayor nivel de endurecimiento y resistencia al desgaste.
2) Mayor templabilidad, con menor necesidad de temples severos.

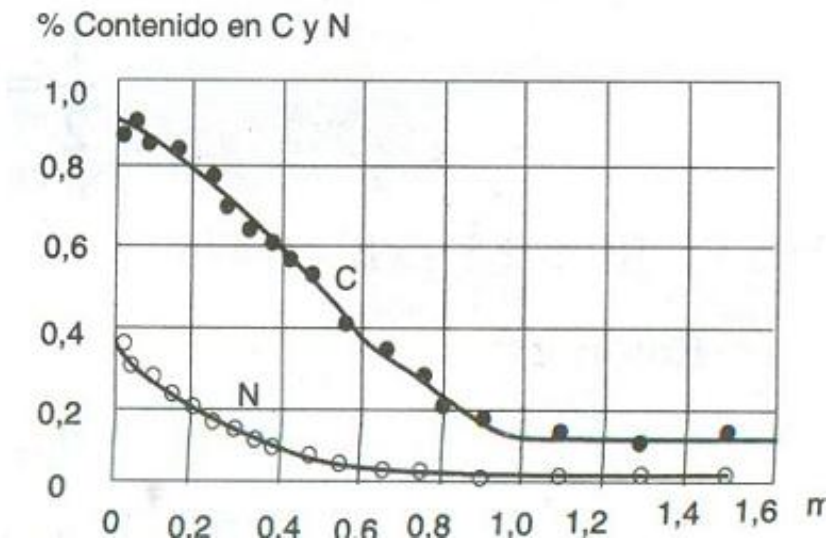


Figura 2-21 *Correlación C y N en función de la profundidad de capa, Tc = 850˚C.* [28]

El tiempo es, pues, la variable más importante en el proceso de cementación. El tiempo requerido por el proceso es función del espesor de capa, h_c, especificado. Para su cálculo puede aplicarse la segunda ley de Fick, [28]

$$D = \partial^2 C\% \ \partial h_c{}^2 = \partial C\% \ \partial t \qquad 2.13$$

Donde C% es la concentración de carbono y D el coeficiente de difusión a la temperatura de proceso, T_c.

En la figura 2-22, se observa la función de correlación entre el espesor y el tiempo, para diferentes temperaturas de tratamiento del acero. [28]

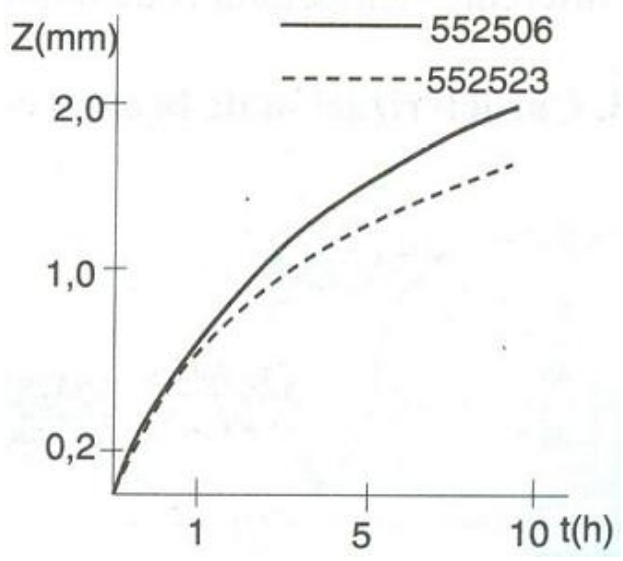
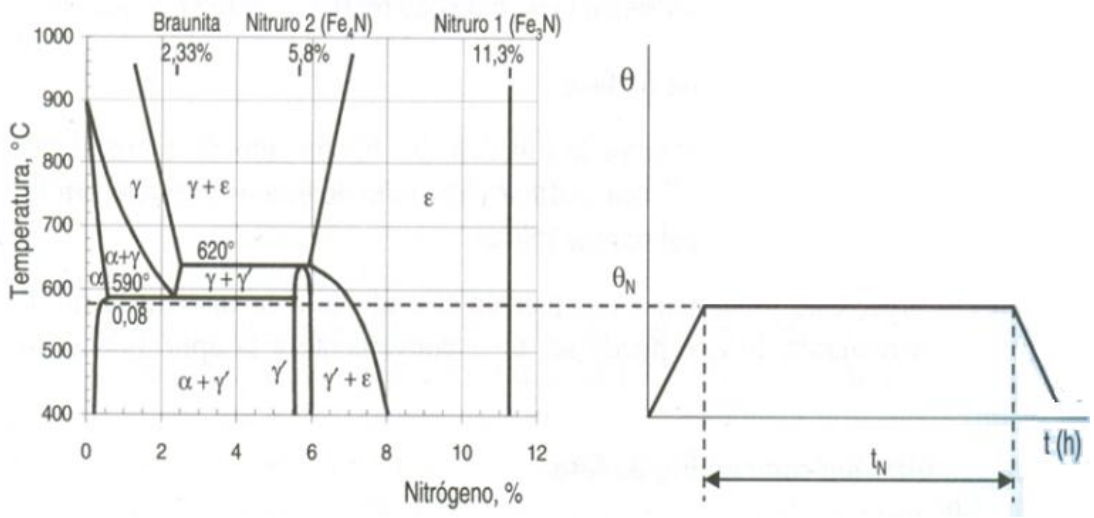


Figura 2-22 *Correlación espesor con el tiempo de cementación.* [28]

2.5.3 Nitruración

En la nitruración, el endurecimiento superficial se consigue por absorción de nitrógeno atómico, en un proceso isotérmico a temperaturas de 500 a 590˚C, por la capa exterior de la pieza de acero. La figura 2-23a muestra el diagrama de equilibrio Fe-N y la figura 2-23b la de la cinética genérica del tratamiento con enfriamiento lento. No requiere del tratamiento térmico posterior. [28]



a) b)

Figura 2-23 *a) Diagrama de equilibrio Fe-N. y b) Cinética del tratamiento de nitruración.*

Las fases que se encuentran en el diagrama de equilibrio son las siguientes [28]:

1. γ`, compuesto iónico de formulación Fe_4N que existe para T < 680˚C y contenido N ≈ 6%. Presenta características frágiles.
2. ε, compuesto iónico con composición variable entre 6 y 11% de N y formulación $Fe_{2-3}N$, en todo el rango de temperaturas.
3. ρ´, compuesto iónico de formulación Fe_2N con campo de existencia T < 500˚C y composición N ≈ 11%. Características frágiles.
4. Braunita, eutectoide γ` + Fe_α, con temperatura eutectoide T_{eu} = 590˚C y composición N ≤ 6%.
5. Fe_α; solución sólida de ferrita con solubilidad máxima 0.42 de N a T = 590˚C.

   Este proceso requiere menos tiempo que el gaseoso para obtener los mismos espesores de capas y estas son, además, menos frágiles. Además la capa nitrurada difunde, también, carbono. Las reacciones que facilitan la absorción de nitrógeno y carbono son las siguientes: [28]

$$4NaCNO + calor \rightarrow 2NaCN + Na_2CO_3 + CO + 2N$$

   En la figura 2-24 se observa las proporciones de N y C absorbidas por la capa superficial en función del tiempo de tratamiento. [24]

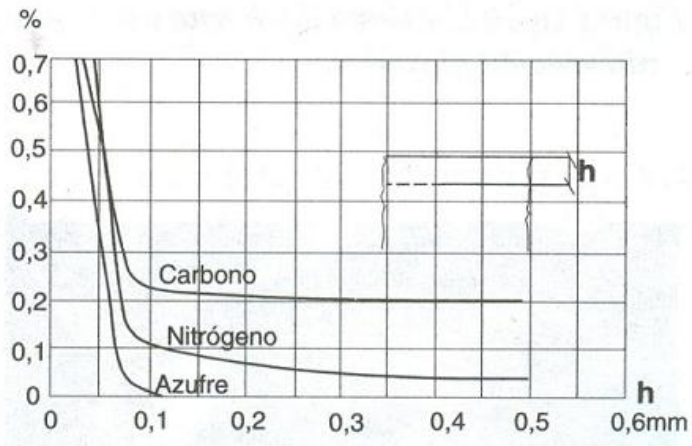


Figura 2-24 *Proporciones de absorción de N y C en el proceso de nitruración en baño de sales.*

La nitruración en baño de sales corresponde a un proceso mixto de nitruración y cementación que se denomina nitrocarburación. [28]

a) En atmosfera gaseosa nitrocarburante.

   El proceso es similar al de la nitruración en atmosfera nitrurante pero con la incorporación de gas monóxido de carbono activo que efectúa una reacción cementante adicional. Como en el caso de la cementación gaseosa, el CO se obtiene por proceso de disociación y oxidación del metano.

b) Nitruración por plasma

Plasma se denomina a gases ionizados que se tornan luminiscentes. Se obtiene plasma por calentamiento de gases a altas temperaturas y por conducción de una intensidad eléctrica, *i*, con una diferencia de potencial U^e, entre un ánodo y un cátodo. Un tubo fluorescente es una aplicación domestica del plasma. [28]

CAPÍTULO 3 Análisis experimental

En este capítulo se presenta la metodología (Figura 3-1) que se siguió para obtener el mejor procedimiento de cementación sólida a partir de grafito natural, catalizado con carbonato de calcio obtenido de conchas de almejas y piedra caliza.

- En primer lugar se realiza la molienda de los materiales cementantes (grafito, conchas, piedra caliza), para obtener un granulado más fino; y así obtener una mezcla homogénea. Después se mezcla el grafito y conchas de almejas, grafito y piedra caliza. En proporciones de 70/30, 70% grafito y 30% para conchas de almejas; y piedra caliza.
- Concluyendo el primer paso, se prosigue con la cementación de probetas de acero 8620, con un ciclo termoquímico llamado deposición donde se somete la pieza de acero en un ambiente carburante (mezcla grafito y carbonato) a una temperatura de 925°C, después se pasa al siguiente ciclo termoquímico denominado difusión sólida con un tiempo de 4 veces el tiempo de deposición a la misma temperatura. Al obtener la mayor profundidad de capa cementada se pasará al siguiente paso.
- Después se realizan los tratamientos térmicos de normalizado, temple y revenido, según los criterios de tiempo de permanencia y temperaturas adecuadas.
- Posteriormente se realiza la evaluación de las propiedades mecánicas (dureza, tensión, cortante, fatiga). Si las propiedades son las óptimas se analiza y discuten los resultados, de no ser así, se regresa a las etapas de mezclado o de cementación.

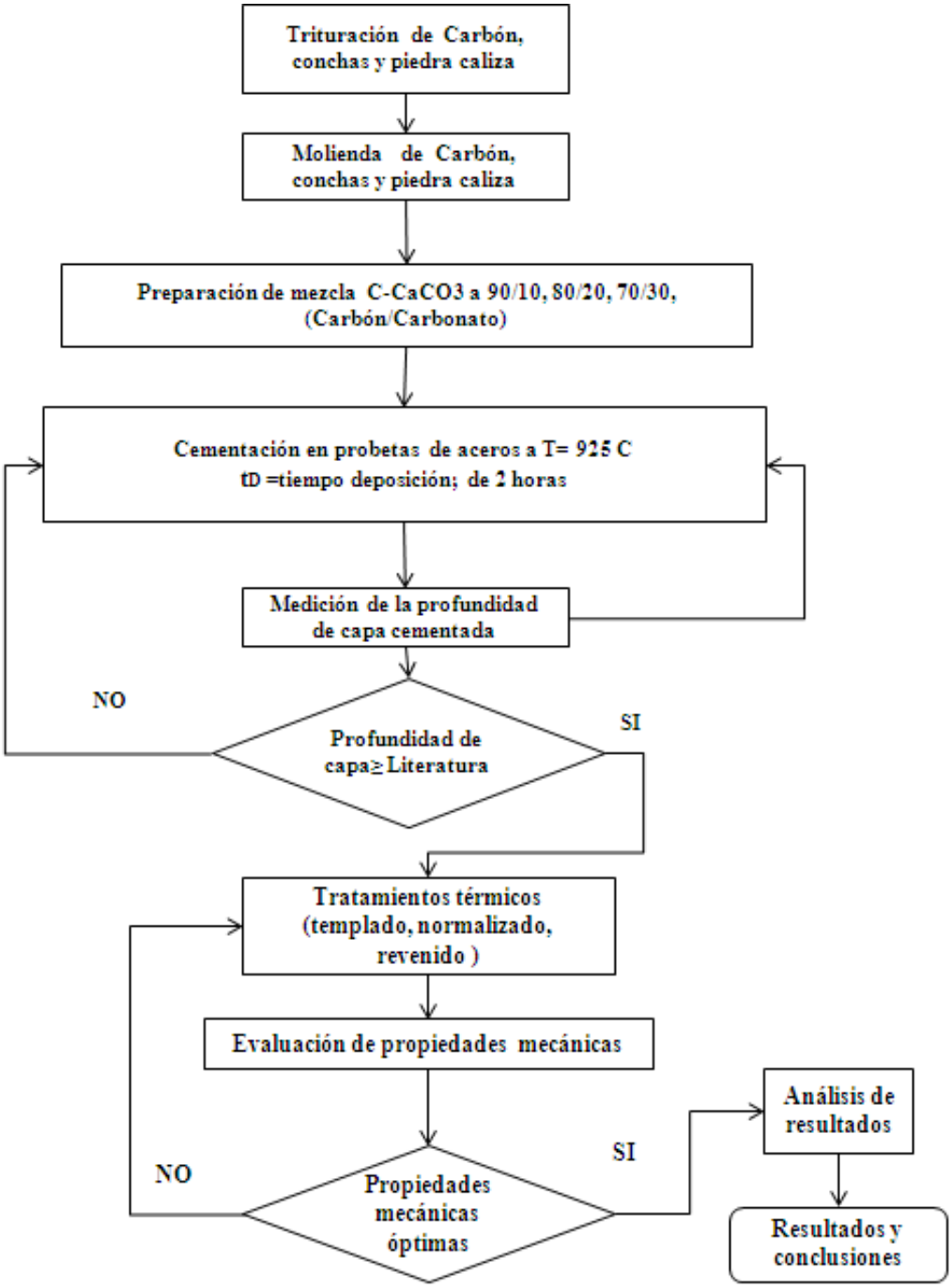


Figura 3-1 *Metodología de la cementación sólida usando grafito natural y carbonato de calcio donado por almejas.*

3.1 Materiales para la cementación

Los materiales que se utilizaron para realizar la cementación fueron, carbonato de calcio obtenido de las conchas de moluscos bivalvos (ostión y almeja chocolata), piedra caliza de jardín y piedra calcita de la rumorosa, usados como catalizador y carbón vegetal en polvo.

Fueron tomadas muestras de cada material para determinar su composición por medios de técnicas de difracción y análisis químico.

Los difractogramas practicados a los cuatro diferentes muestras se muestran en la figura 3-2.

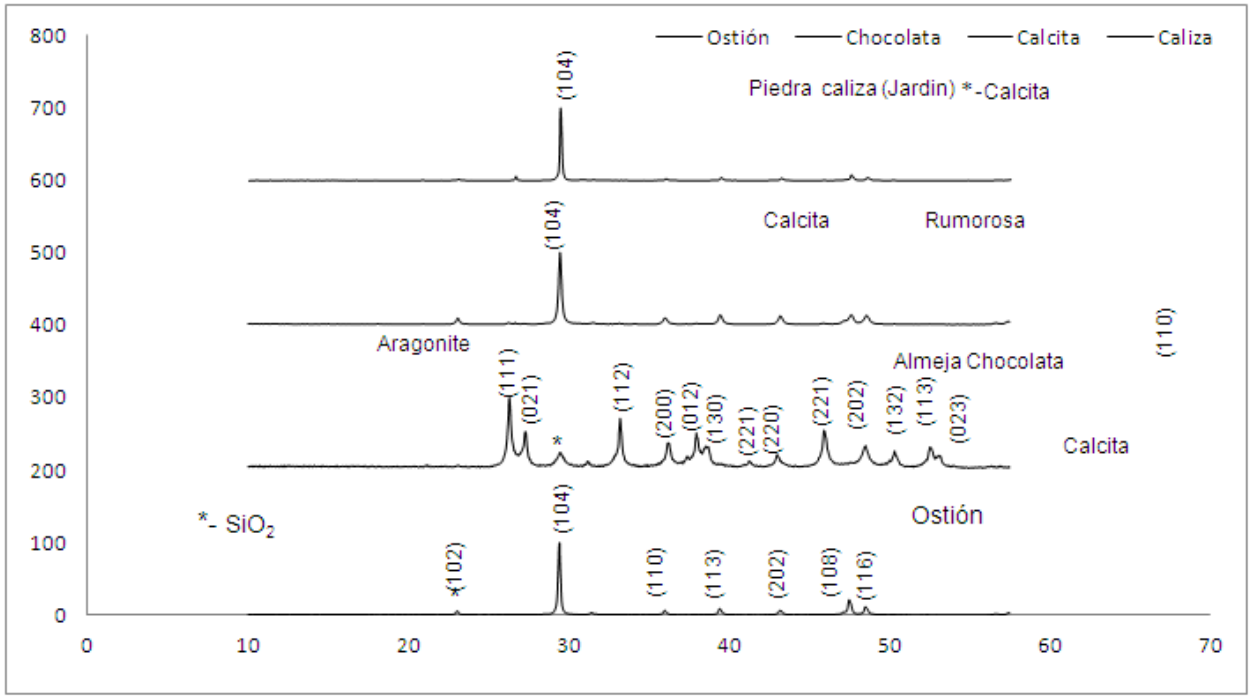


Figura 3-2 *Difractogramas de los donadores de carbonato de calcio*.

La identificación de fases cristalinas en las muestras fueron realizadas usando un difractometro X-Pert Phillips con fuente de radiación Cu-Kα los patrones de difracción de las muestras fueron escaneadas en un rango de 10 a 80º.

Los aceros utilizados en este proyecto de investigación son el acero al carbón 1018, y el acero 8620 de acuerdo a la clasificación AISI/SAE.

El acero SAE 1018 es un acero al bajo carbón con un contenido de .18% de carbono, Mn 1.00% máx. De acuerdo a la literatura son los aceros ideales para cementar. En la tabla 3.1 se muestra la composición del acero DIN/SAE 1018.

Tabla 3-1 *Composición del acero DIN/SAE 1018*

Composición del acero a DIN/SAE 1018						
DIN	C	Si	Mn	P	S	Cr
1.0453, C16.8	**0.14-0.19**	**0.15-0.35**	**0.4-0.8**	**0.040**	**0.040**	**0.30**

El acero 8620 es un acero aleado al Ni, Cr, Mo con un contenido de carbón de .2% de carbón los datos de la composición se dan en la tabla 3.2

Tabla 3-2 *Composición del acero DIN/SAE 8620*

Composición del acero a SAE 8620/DIN									
DIN	**C**	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**Ni**	**Cr**	**Mo**	**otros**
1.6522, 20NiCrMo2	**0.17-0.23**	**0.10-0.25**	**0.60-0.90**	**0.025**	**0.025**	**0.40-0.70**	**0.35-0.65**	**0.15-0.25**	**0.02-0.05Al**
1.6523, 21NiCrMo2	**0.17-0.23**	**0.15-0.35**	**0.60-0.90**	**0.035**	**0.035**	**0.40-0.70**	**0.35-0.65**	**0.15-0.25**	**……..**
1.6526, 21NiCrMoS2	**0.17-0.23**	**0.40**	**0.65-0.95**	**0.035**	**0.020-0.035**	**0.40-0.70**	**0.40-0.70**	**0.15-0.25**	**……..**
1.6543, 21NiCrMo22	**0.18-0.23**	**0.20-0.35**	**0.70-0.90**	**0.035**	**0.035**	**0.40-0.70**	**0.40-0.60**	**0.20-0.30**	**……..**

3.2 Preparación de los materiales y probetas

3.2.1 Molienda de Material para cementar

Para realizar la cementación es necesario que los materiales cementantes tenga una consistencia en polvo para garantizar una mezcla homogénea, mantener el tamaño de grano es muy importante, para que haya una reacción química uniforme.

El grafito natural utilizado en este proyecto se puede adquirir en cualquier supermercado. El carbonato de calcio se obtuvo de las especies de moluscos bivalvos como lo son conchas de almeja chocolate (Megapitaria squalida), de ostión (Ostrea lurida), pata de mula (Anadara grandis) desechados por los restaurantes de mariscos, y la piedra caliza se obtuvo de las montañas de la rumorosa. Todos estos materiales se trituraron para obtener pedazos de 1 a 1.2cm y posteriormente se pasa al molino de bolas para obtener una molienda más fina.

Para realizar la operación anterior, se fabricó un triturador en acero inoxidable para su fácil limpieza, neopreno para absorber el impacto y disminuir el ruido, y teflón resistente a la fricción como tapa, una barra de acero el cual funcionará como martillo. Un diámetro de 7.5cm una longitud de carrera de 30cm y volumen de 1325cm^3 (figura 3-3).

Figura 3-3 *Triturador.*

El molino utilizado para moler las conchas de almejas y la piedra caliza, es un molino de laboratorio atrisionador (figura 3-4 a), de velocidad variable al cual se adaptó un sistema de

refrigeración (figura 3-7 b) para evitar el sobrecalentamiento del recipiente del molino, utilizando menor volumen de agua para su refrigeración. Los pasos que se siguieron para moler las conchas y la piedra caliza son:

a) b)

Figura 3-4 *Sistema de molienda, a) Molino atrisionador b) Sistema de refrigeración.*

- Primero separando las diferentes especies de conchas, las cuales se dejan secar al sol, o se hierven en agua con cal (óxido de calcio, la cal sirve, para que los conchas que aún tienen una capa de resina natural en las almejas, o que aún contienen rastros de carne se caigan de la concha) y se limpian de cualquier otra impureza que acumuló la especie en su ciclo de vida.
- Después se trituraron las conchas por especie. hasta obtener un cribado de 1 a 1.5 cm.
- Posteriormente se pasó al molino atrisionador, con bolas de acero de un diámetro de 1/8 de pulgada y se molieron durante un periodo de 8 a 10 horas.
- Al término de la molienda se tamizó con malla de número 100.
- El grano que no paso la malla número 100 se pasa de nuevo a la molienda.
- Se envasó e identificó, como el tipo de concha, y tamaño de grano.

La molienda del grafito se realizó de manera similar a la molienda de las conchas, de acuerdo a los siguientes pasos:

- Se trituró el carbón hasta obtener un cribado de 1 a 1.5 cm.
- Posteriormente se pasó al molino atrisionador, con bolas de acero de un diámetro de 1/8 de pulgada y se molieron durante un periodo de 8 a 10 horas.
- Al término de la molienda se tamizó con malla de número 100
- El grano que no pasó la malla número 100 se pasa de nuevo a la molienda.
- Se envasó y se identificó con el tamaño de grano.

3.2.2 Diseño de probetas

Las probetas empleadas tienen dimensiones de acuerdo a la norma ASTM E8 las cuales fueron maquinadas en un torno paralelo manual de la marca KENT USA modelo KLS-1760 (figura 3-5) para las pruebas de tensión.

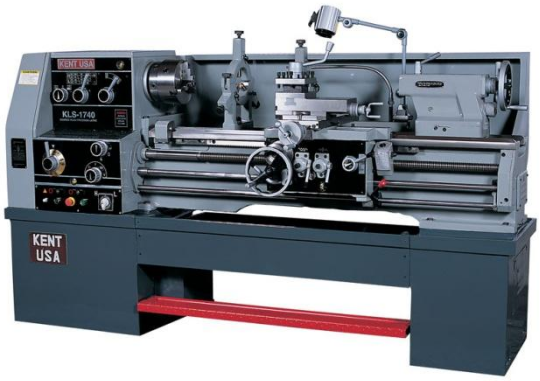


Figura 3-5 *Torno paralelo KENT USA.*

El diámetro de la probeta se escogió de acuerdo a la capacidad de la prensa universal para hacer las pruebas de tensión. Esta máquina se utilizó para determinar el comportamiento de los materiales bajo cargas cuasi-estáticas de tensión, para obtener sus gráficos de esfuerzo-deformación y su módulo de elasticidad. Con esta información podemos determinar que tan elástico o plástico será el comportamiento de un material bajo la acción de una fuerza axial actuando sobre él. En la figura 3-6 se muestra la máquina de tensión con la que cuenta el laboratorio de la marca Tinius Olsen con capacidad de 25 KN de carga axial con un diámetro de sujeción de 3/8 de pulgada.

Figura 3-6 *Prensa universal Tinius Olsen de 25 KN de capacidad*..

La figura 3-7 muestra una de las probetas maquinadas, se fabricaron 2 probetas una de diámetro nominal de 0.16 pulgadas, radio de 5/32 pulgadas, distancia entre radios de ¾ de pulgada en acero 1018. Para el acero 8620, diámetro nominal de 0.35 de pulgada , radio de 1/4 pulgadas, distancia entre radios de 1¾ de pulgada.

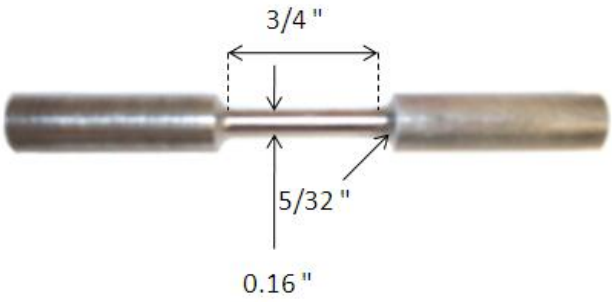


Figura 3-7 *Probeta maquinada en acero 1018.*

3.3 Metalografías de los aceros

La metalografía de los aceros 1018 y 8620 se realizó de acuerdo a la norma ASTM E3, el procedimiento que se siguió fue el siguiente

- Primero se corta un con la máquina un pedazo de cada material aproximado de 12 mm. Se utilizó una cortadora de disco marca Metacut M-250 figura 3-8, Motor compacto de 4HP, campana protectora de fibra de vidrio, y unidad de recirculación del refrigerante de 80l para cortar muestras de aceros para estudio metalográfico.

Figura 3-8 *Cortadora de disco*

- Después se encapsularon las muestras en resina epoxica en un molde de silicona .para fácil desmolde figura 3-9.

Figura 3-9 *Moldes de caucho.*

- Se dejó secar dependiendo del tipo de resina (resina termo fijadora, esta se puede secar a temperatura ambiente o se seca en una plancha eléctrica)
- Ya que la resina esta endurecida se procede a lijar la pieza de acuerdo al número correspondiente de lijas. Se hizo esto procurando tener continuidad en el número de grano de las lijas (figura3-10), hasta obtener una superficie plana y acabado espejo con la ayuda de una pulidora y emulsiones. La figura 3-11 muestra la pulidora empleada de la marca MARK V LAB serie 2B la cual se utilizó para pulir las muestras en este proyecto.

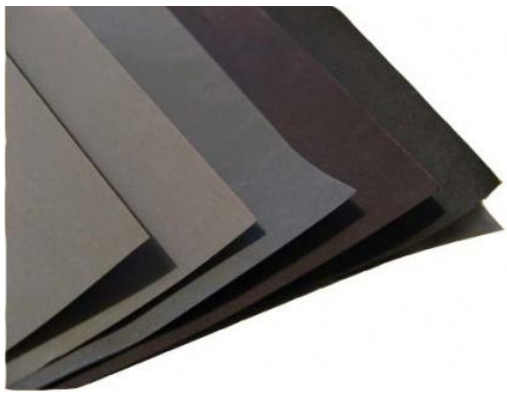


Figura 3-10 *Lijas de óxido de aluminio* Al_2O_3.

Figura 3-11 *Pulidora*

- Después de obtener la superficie pulida a espejo se hace el ataque químico con nital al 2% (el cual tiene una composición de 2 % de ácido nítrico y 98% de alcohol etílico o metílico) para obtener el máximo contraste entre la red de perlita y ferrita o cementita, pudiendo diferenciar la ferrita de martensita

- Una vez atacada la muestra se observa la microestructura en un microscopio metalográfico (figura 3-12) de la marca MARK V LABORATORY y capacidad de aumentos de 50X, 100X, 200X y 400X con el cual se Capturan y analizan las imágenes por medio del software Moticam.

Figura 3-12 *Microscopio*

3.4 Dureza experimental de los aceros

La dureza de los materiales se realizó de acuerdo a las normas ASTM E3 y E18, las cuales indican la metodología para medir dureza superficial, la primera para realizar la preparación de la muestra y la segunda para la medición de la dureza Rockwell.

El equipo utilizado para determinar la dureza de los materiales es un durómetro digital (figura 3-13) con el podemos obtener los valores de dureza en escala Rockwell. Donde se miden durezas Rockwell superficiales.

También se utilizó el microdurómetro digital Vickers (figura 3-14) de acuerdo a las normas ASTM E384 la cual indica la metodología para medir la dureza

Figura 3-13 *Durómetro digital Rockwell, de la marca Future Tech*.

Figura 3-14 *Microdurómetro digital Vickers modelo HVS-100A de La compañía Laizhou Huayin Testing Instrument Co., Ltd.*

3.5 Preparación de la mezcla de $CaCO_3$ –grafito

La mezcla de $CaCO_3$ –grafito, fueron en proporción que van de un 90% grafito (C) y 10% de carbonato de calcio $CaCO_3$, hasta un 50% Grafito (C) y 50% de carbonato de calcio $CaCO_3$. Para realizar estas mezclas se utilizó una balanza digital (figura 3-15), instrumento con una precisión 0.001 gr y también sirvió para medir la ganancia de carbón en la capa cementada de acuerdo a la metodología indicada por la norma ASTM G79

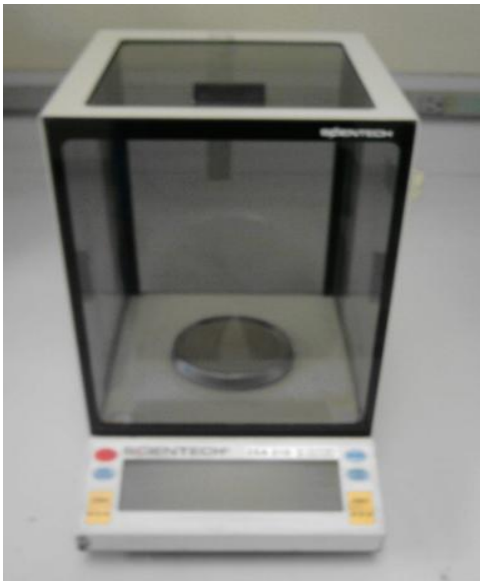


Figura 3-15 *Balanza digital dela marca SCIENTECH®*

3.6 Cementación de Probetas

La cementación de las probetas se realizó de acuerdo a las proporciones del punto 3.5. El horno utilizado (figura 3-16) es un horno eléctrico, que alcanza una temperatura máxima de 1200°C, y cuenta con un sistema de control de ciclos de tiempo-temperatura.

Figura 3-16 *Horno de resistencia*

Los recipientes que se usaron para la cementación de las probetas, se fabricaron en acero inoxidable 304, en tubo de 1 pulgada de diámetro nominal cedula 40, en longitudes de 2, 3,4 y 7 pulgadas figura 3-17, la selección del material se realizó en base a que el acero inoxidable tiene más resistencia a la oxidación a altas temperaturas es decir, es más durable ya que su superficie no se oxida en comparación con un recipiente de acero al carbono que se descarburiza a altas temperaturas.

Figura 3-17 *Recipientes de cementación*

Para garantizar un sello hermético en los recipientes, se fabricó una prensa en acero inoxidable con tornillos de ¾ rosca estándar para un apriete rápido, con agarraderas para fácil manipulación como se muestra en la figura 3-18

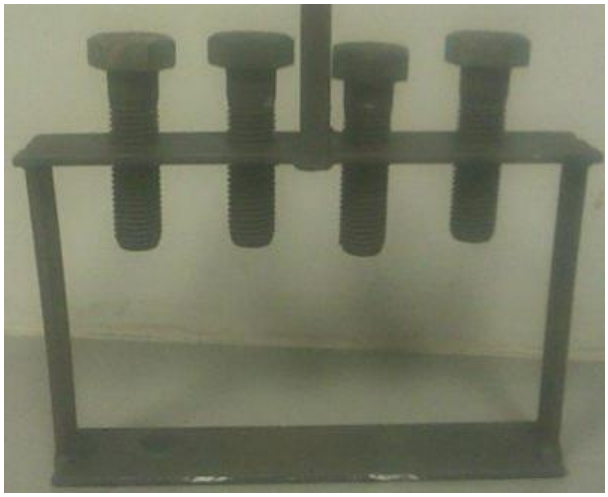


Figura 3-18 *Prensa para sello de recipientes de cementación*

El ciclo térmico de la cementación se realizó en 2 etapas, la primera tuvo un tiempo de permanencia de deposición (D_P) de 20 minutos, la segunda etapa de difusión (D_F) tuvo un tiempo de permanencia de 4 veces el tiempo deposición.

El primer ciclo (deposición) es para que el carbono se deposite en el acero y el segundo ciclo (difusión) para que el carbono se difunda en el acero.

En el horno utilizados, en algunos ciclos térmicos, se observó que hay una diferencia entre en tiempo del controlador y el tiempo real en cual se alcanza la temperatura deseada, por lo que se elaboró un diagrama, para monitorear el tiempo en que el controlador llega a la temperatura y el tiempo real en que llega cámara a la temperatura de deposición, así se obtuvo un mejor control de los tiempos de permanencia para los diferentes ciclo térmicos (Deposición, difusión, normalizado, temple, revenido, etc.).

Donde C_1 es la temperatura de inicio en la programación, t_1 el tiempo en minutos en que alcanzará la temperatura C_2, t_2 el tiempo en minutos en que alcanzará la temperatura C_3 (tiempo de permanencia) que para los ciclos de Deposición, difusión, normalizado, temple, revenido $C_2 = C_3$ t_3 el tiempo en minutos en que alcanzará la temperatura C_4 y t_4 en este caso es -121 que indica el fin del programa.

3.7 Medición de la capa cementada

En la medición de la capa cementada se utilizó un microdurómetro Vickers de la marca OMNIPOTENT INSTRUMENTS (figura 3-14). Donde se realizó el perfil de dureza de acuerdo a la norma de la práctica estándar para microindentación de los materiales ASTM E 384, la cual indica la metodología para dicho perfil de durezas. También se utilizó el microscopio con el software Moticam que también sirve para medir la capa cementada preparada de acuerdo a la norma ASTM E3 y medida de acuerdo a la norma de las prácticas para la evaluación de los metales expuestos a ambientes de carburación ASTM G79, aplicándose principalmente al hierro y sus aleaciones.

3.8 Tratamientos térmicos de las probetas

Los tratamientos térmicos que se realizaron en el horno con tiempo permanencia de acuerdo a la fórmula:

$$tp = \frac{1\ hora}{1\ pulgada\ de\ diámetro} + \frac{0.5 hora}{pulgada\ adicional} \qquad 3.1$$

Para los tratamientos de:

- Normalizado; este se realizó a 825°C con una velocidad de calentamiento (V_c) de 30°C/min y un tiempo de permanencia de acuerdo a la fórmula 3.1 con un enfriamiento al aire

- Temple, se realizó a con un tiempo de permanencia de acuerdo a la fórmula 3.1 a una temperatura de 850 °C, donde se obtiene una estructura FCC o mejor conocida como hierro gama o austenita, seguido de un enfriamiento superior a la crítica; en este caso se realizó en agua, para lograr una estructura martensítica o bainítica.

- Revenido, el tiempo de permanencia se hizo de acuerdo a la fórmula 3.1 Las temperaturas comprendidas entre 150 ° C y 220 ° C le da más resistencia sin quitar dureza significativa

(empleados en aceros para herramientas) o entre 450°C y 600°C. la temperatura empleada es de 200°C para todas las probetas. Con enfriamiento en aire.

CAPÍTULO 4 Resultados y discusión

4.1 Resultados de difracción y análisis químico

Los análisis de difracción y análisis químico, de los polvos de las conchas y las piedras calizas, fueron realizados por investigadores del Cinvestad unidad saltillo. Los resultados de la difracción se muestran en los difractogramas de las figuras 3-2 a la figura 3-5.

La figura 3-2 nos da la información estructural de la almeja chocolata, el compuesto cristalino presente en la almeja chocolata es Aragonita de sistema ortorrómbico ($CaCO_3$, que se diferencia de la calcita solo en su estructura cristalina ya que tienen la mismo formula química) y Nitratina ($NaNO_3$, sistema trigonal). Los resultados del análisis químico se muestran en la tabla 4-1.

Tabla 4-1 *Composición química de la Almeja chocolata*

Muestra : Almeja chocolata
Resultado
Fe2O3 0.047 % MgO 0.059 % SO3 0.065 % SrO 0.184 % Na2O 0.339 % PPI 44.1 % CaO 55.3 %

La figura 3-2 nos da la información estructural de la piedra caliza (Piedra de jardín), el compuesto cristalino presente en la piedra caliza es la calcita ($CaCO_3$, Trigonal, hexagonal escalenoédrico) y cuarzo. Los resultados del análisis químico se muestran en la tabla 4-2.

Tabla 4-2 *Composición química de la Piedra caliza*

Muestra : Caliza
Resultado
SrO 0.038 % Fe2O3 0.249 % MgO 0.526 % SiO2 3.1 % PPI 38.3 % CaO 57.8 %

La figura 3-2 nos da la información estructural de la calcita ($CaCO_3$, piedra obtenida de la rumorosa), el compuesto cristalino presente en la calcita de la rumorosa es calcita y Aragonita. Los resultados del análisis químico se muestran en la tabla 4-3.

Tabla 4-3 *Composición química de la Calcita de la rumorosa.*

Muestra : Calcita (Rumorosa)
Resultado
K2O 0.084 % SrO 0.117 % Fe2O3 0.133 % Al2O3 0.143 % SO3 0.162 % SiO2 0.857 % MgO 1.5 % PPI 41.6 % CaO 55.4 %

La figura 3-2 nos da la información estructural de la concha de ostión, el compuesto cristalino presente en la concha de ostión es calcita ($CaCO_3$). El análisis químico reveló la composición de del polvo de Ostión y los resultados se muestran en la tabla 4-4

Tabla 4-4 *Composición química del Ostión*

Muestra : Ostión
Resultado
K_2O 0.030 % Al_2O_3 0.079 % SrO 0.116 % Fe_2O_3 0.130 % Cl 0.194 % MgO 0.252 % SiO_2 0.320 % SO3 0.357% Na2O 0.447 % PPI 44.0 % CaO 54.1 %

4.2 Resultados Espectroscopía Raman

Los resultados obtenidos comparados con carbonato de grado reactivo son evidentes en la figura 4-1, donde se puede apreciar que el ostión tiene una marcada diferencia de picos debido a su menor contenido de carbonatos y otros compuestos.

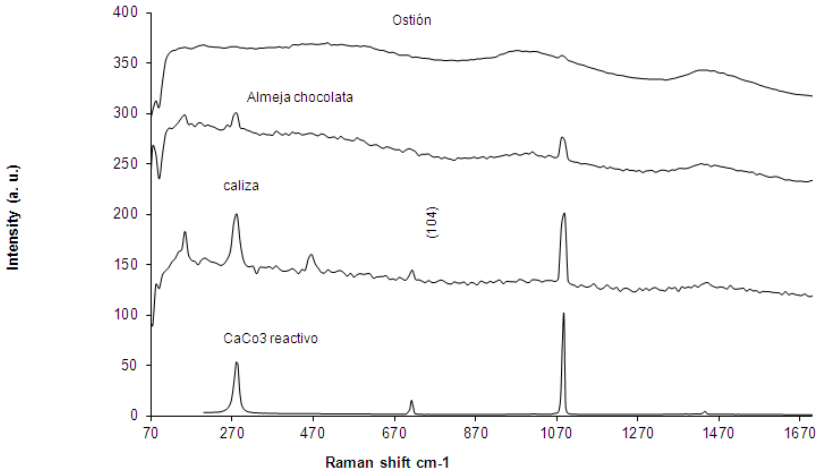


Figura 4-1 *Resultados Espectroscopía Raman*

4.3 Resultados de ganancia de masa

Se realizó un barrido de cementación en las proporciones de 10 a 30 porciento de carbonato en tiempos de 40 a 120 minutos en acero 1018; los resultados se muestran en las gráficas de las figuras 4-2 a 4-5.

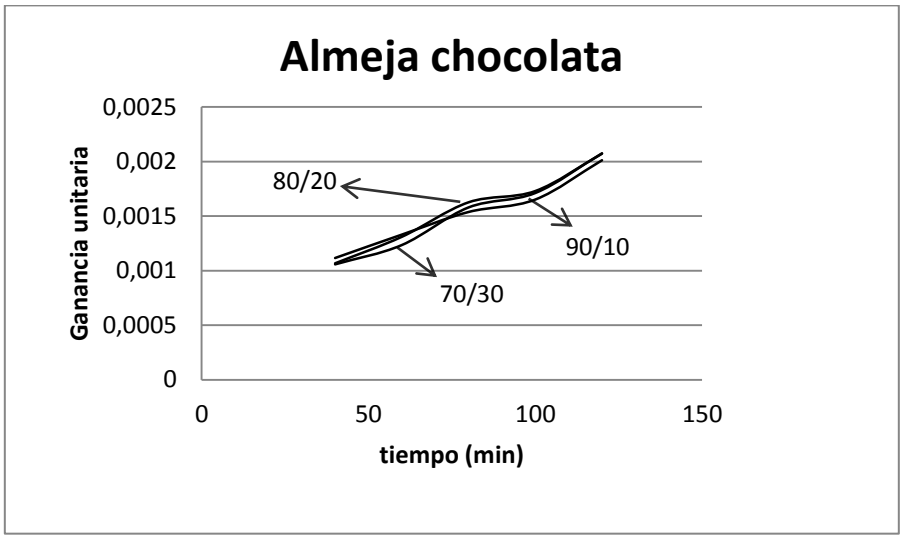


Figura 4-2 *Gráfica de ganancia unitaria de masa con respecto al tiempo de la almeja chocolata.*

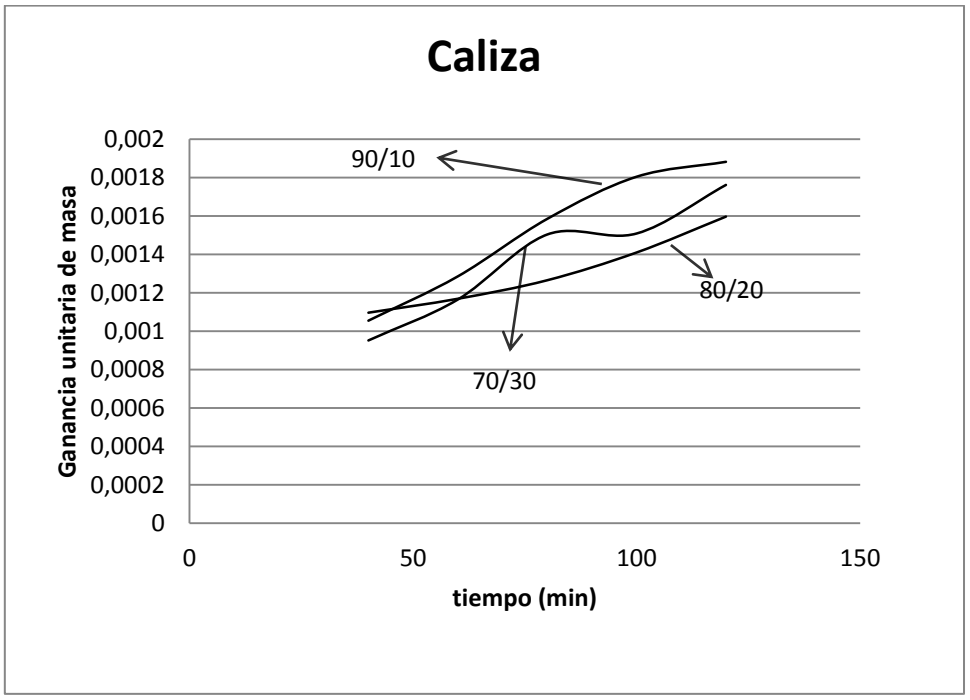


Figura 4-3 *Gráfica de ganancia unitaria de masa con respecto al tiempo de la piedra caliza.*

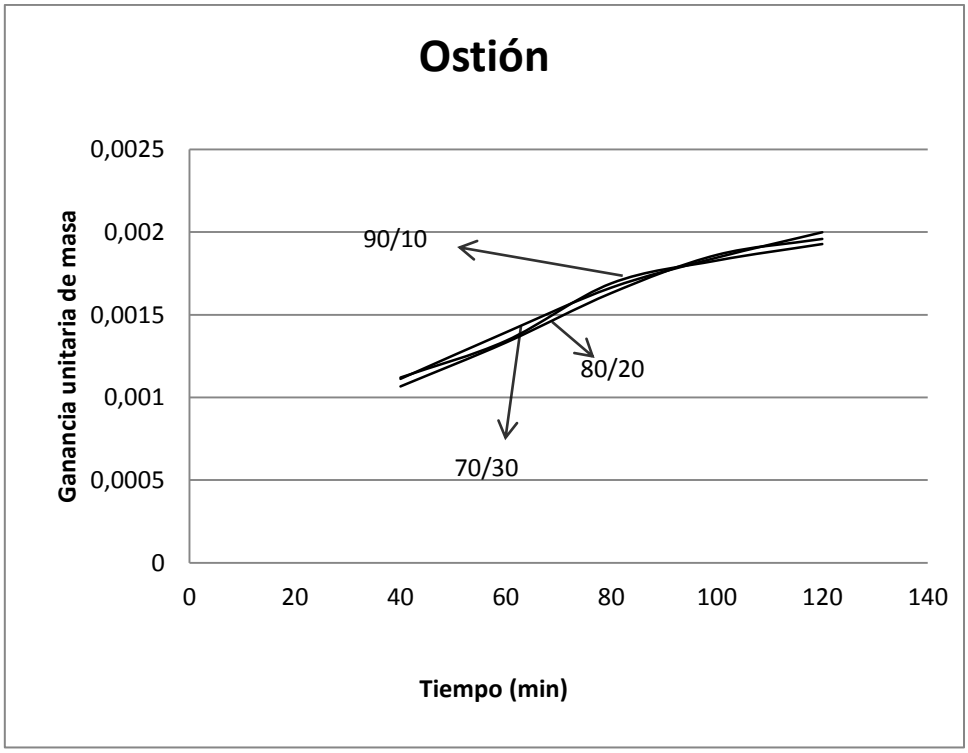


Figura 4-4 *grafica de ganancia unitaria de masa con respecto al tiempo del ostión.*

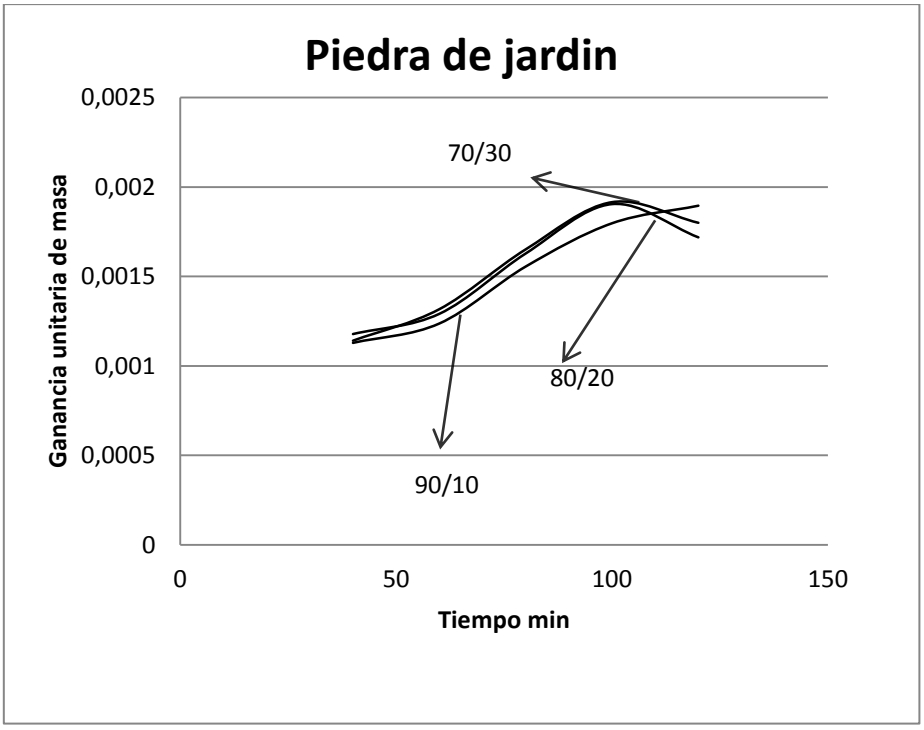


Figura 4-5 *Gráfica de ganancia unitaria de masa con respecto al tiempo de la piedra de jardín (caliza)*

4.4 Resultados de capa cementada

4.4.1 Método visual

La cementación que se realizó de acuerdo a metodología descrita en la norma ASTM 384 en el capítulo uno, dio los resultados mostrados en la figura 4-9, en la cual se grafican las profundidades de capa contra por ciento de carbonato.

Para la medición de la profundidad de capa en la etapa de deposición se realizó con el software Moticam a 50, 100 y 200 aumentos (Figuras 4-6 a 4-8); Los resultados se muestran de acuerdo a la especie o al tipo de carbonato empleado, y el porcentaje utilizado de carbonato.

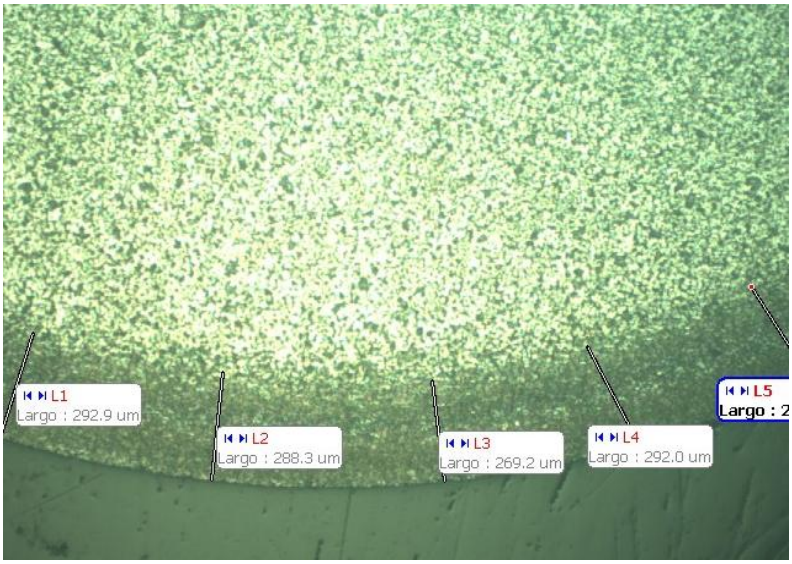


Figura 4-6 *Medición de capa cementada a 50 aumentos, catalizado con conchas de almeja chocolata al 10%*

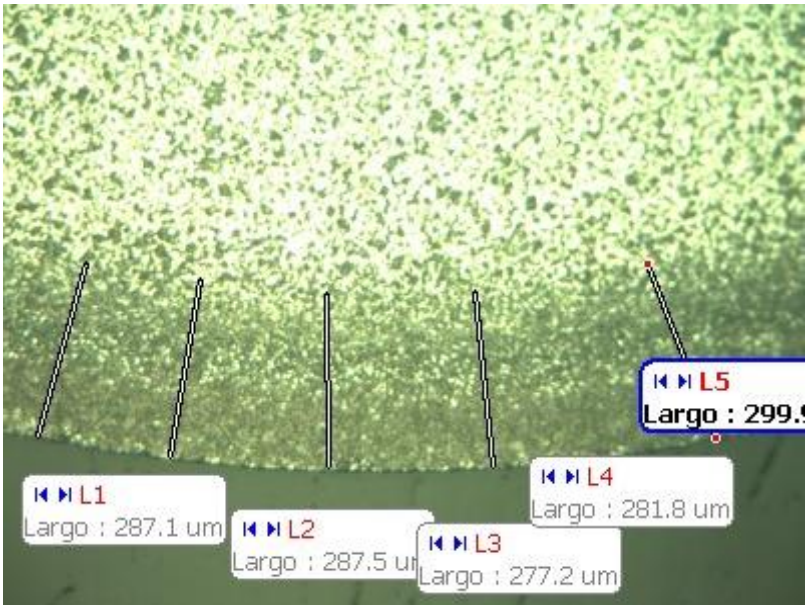


Figura 4-7 *Medición de capa cementada a 100 aumentos, catalizado con conchas de almeja chocolata al 10%.*

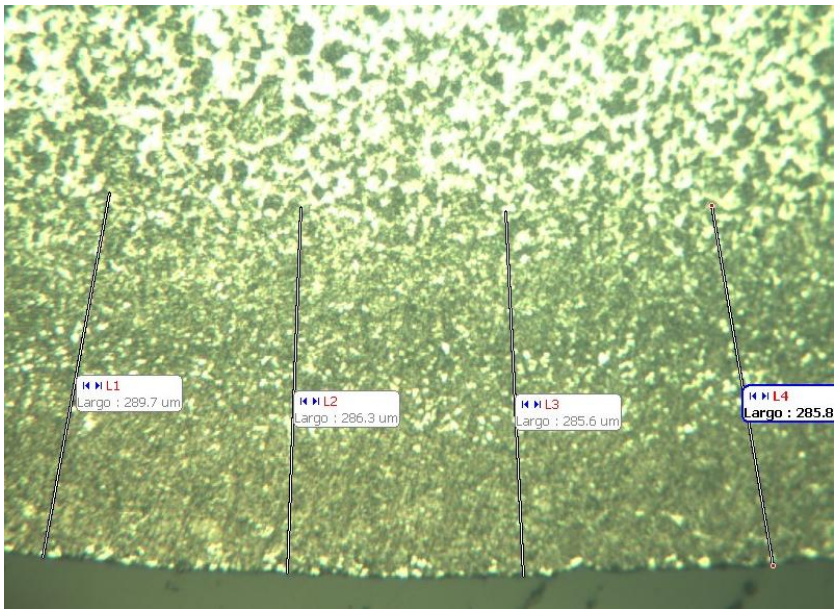


Figura 4-8 *Medición de capa cementada a 100 aumentos, catalizado con conchas de almeja chocolata al 10%.*

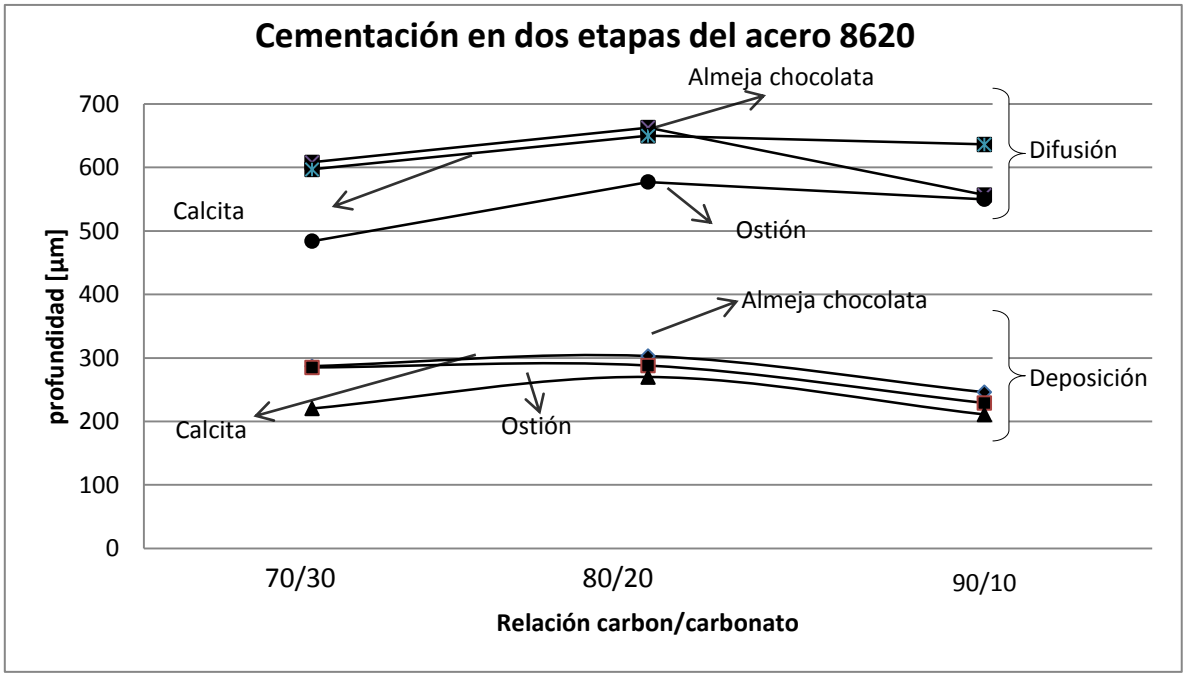


Figura 4-9 *Profundidad de capa contra relación C/$CaCO_3$ en deposición y difusión.*

La medición de la profundidad de capa en la etapa de deposición y difusión se realizó con el softwareMoticam a 50 aumentos; los resultados se muestran en la figura 4-9 para el acero 8620, de acuerdo a la especie o al tipo de carbonato empleado, y el porcentaje utilizado de carbonato.

Se puede observar en la gráfica que las más altas profundidades de capa se encuentran en una relación de masa de 80/20 a diferencia del 70/30 reportadas por la literatura por D.U. I Ogo y colaboradores.

Las diferencias mostradas en la figura 4-9 entre la almeja y el ostión se debe a la composición química uno tiene aragonita y el otro calcita como se puede constatar en estudios de difracción de rayos X.

4.4.2 Método de dureza media efectiva acero 1018

Se utilizó el método de medición de profundidad mecánica de la norma Estándar SAE J 423 (1998-02) y se midió la dureza de acuerdo a las normas ASTM E18 (Rockwell y dureza superficial Rockwell) y ASTM 384 (estándar para microindentación de la dureza de materiales) y se utilizó el criterio de 50 HRC para un contenido de 0,53 % de C y más de acuerdo a la tabla 1-6 los resultado se muestran en las figuras 4-10 a la 4-2. En la tabla se muestra la comparación entre porcentajes de mezclas en tiempos de 20 a 120 minutos, la identificación para cada una de las fuentes se muestran en la tabla 4-5.

Se puede observar en la figura 4-10 que hasta 60min de tiempo de permanencia, la profundidad de capa va en aumento rápidamente después permanece sin cambios hasta los 100min, incrementando nuevamente en la mezcla de 90/10.

En la mezcla de 80/20 (figura 4-11) los mejores resultados los obtienen el ostión y la caliza, después de 100min de tiempo de permanencia. Esto debido que se descompuso la estructura cristalina de la calcita que como ya sabemos es más estable que la aragonita y dolomita.

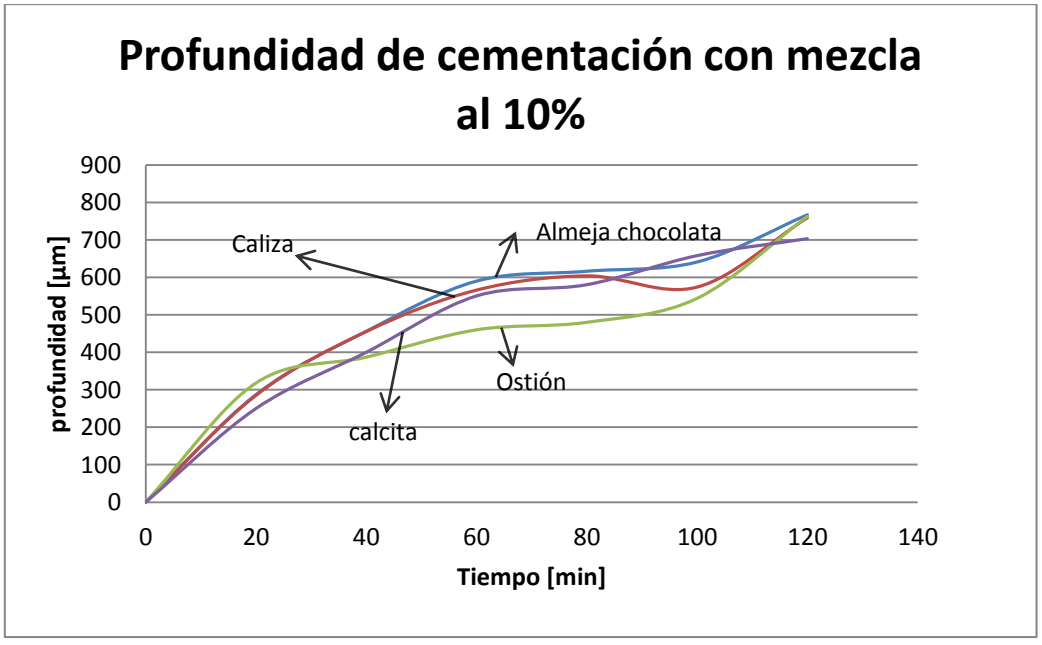


Figura 4-10 *Profundidad de cementación con mezcla al 10 % de carbonato*

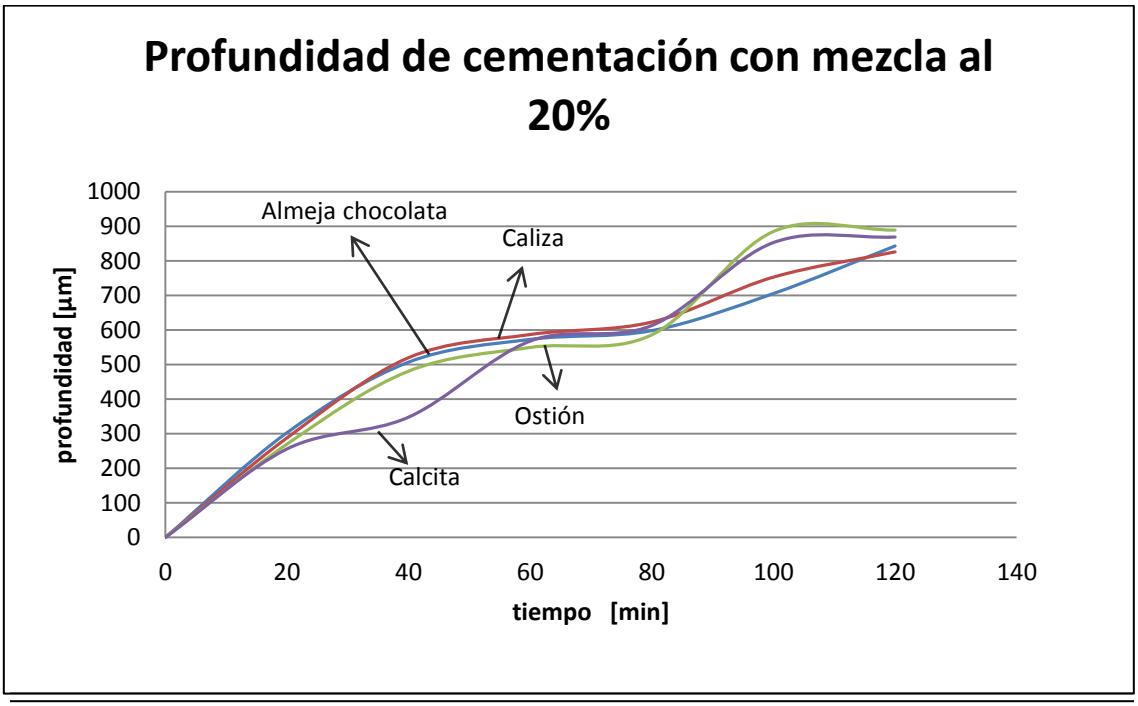


Figura 4-11 *Profundidad de cementación con mezcla al 20 % de carbonato*

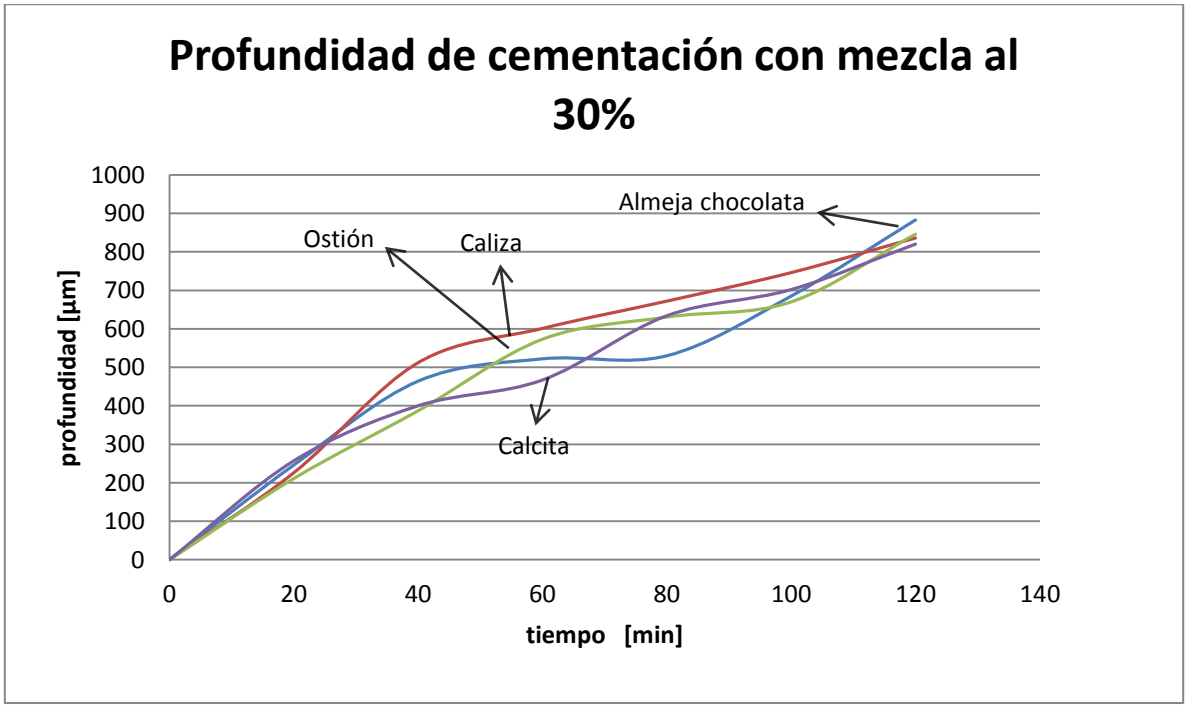


Figura 4-12 *Profundidad de cementación con mezcla al 30 % de carbonato*

Tabla 4-5 *comparación entre porcentajes con respecto al tiempo, fuentes almeja chocolata W, calcita X, ostión Y y caliza Z.*

Tiempo min	**Mezcla del 10%**				**Mezcla del 20%**				**Mezcla del 30%**			
t	w	x	y	z	w	x	y	z	w	x	y	z
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	287	285	318	250	303	288	270	256	246	226	211	257
40	456	455,3	387	400	507	520	481	348	464	512	387	400
60	590	566	460	550,5	573	587	549,56	568	522	601	573	467
80	616,2	604	480	580,43	598,2	623	586	613	530	672	630,55	634
100	641	574	544	658	705,5	753	885	853	685	746	670	702
120	767	759	762,5	703,27	843	826	889	869	882,8	836	846	820

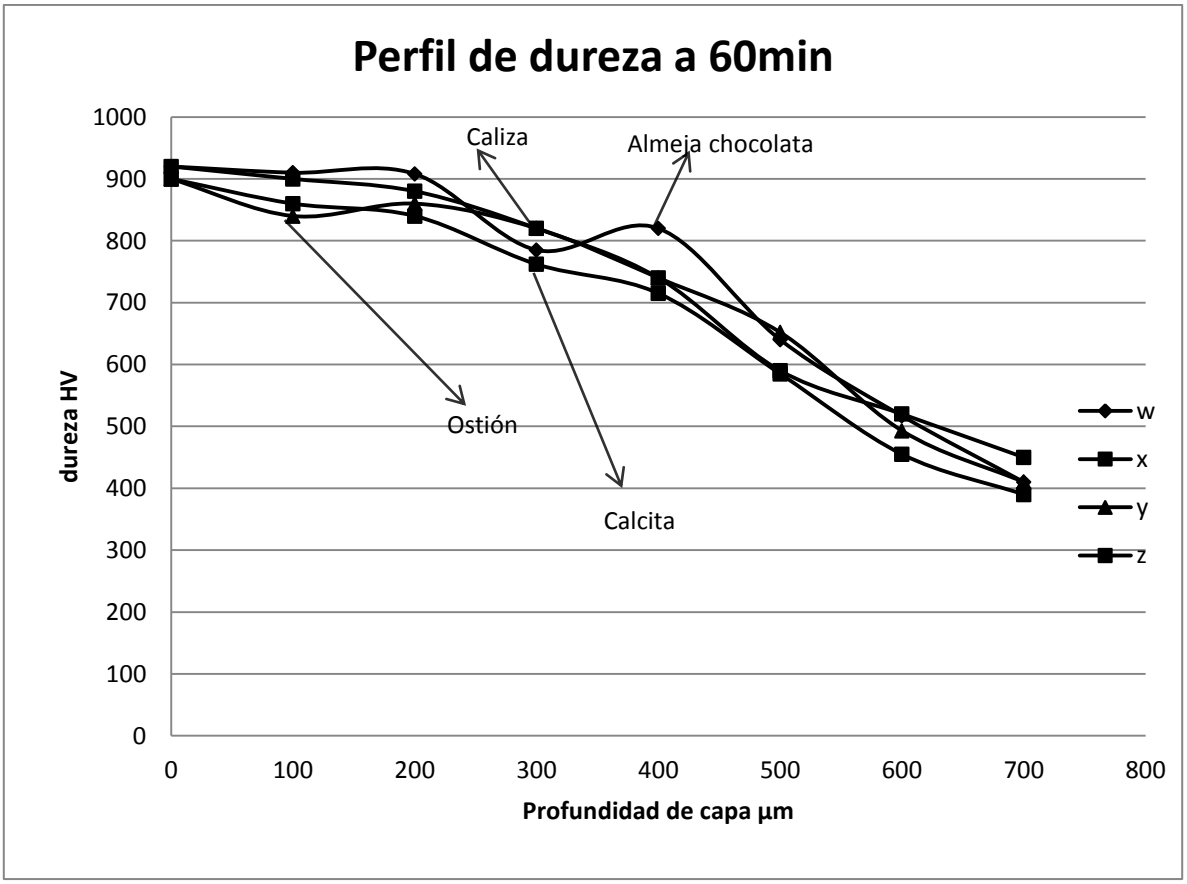


Figura 4-13 *Perfil de dureza, dureza HV contra profundidad de capa.*

En la gráfica de perfil de dureza la primera fuente en alcanzar la capa con dureza 520 HV equivalente a 50 HRC es la calcita (piedra de jardín), seguida del ostión, donde la almeja chocolata y la caliza obtuvieron resultados similares a más profundidad de capa.

Conclusiones

- Se pudo comprobar que la piedra caliza y conchas de almejas son fuentes naturales de $CaCO_3$, que se puede utilizar para hacer cementación sólida
- Se acondiciono el laboratorio de ciencia de los materiales para realizar con éxito el proceso de cementación sólida.
- El porcentaje con una capa cementada óptima, fue la de 20% de carbonato en el acero 8620, obteniendo la máxima profundidad en la mezcla de almeja chocolata, que de acuerdo a los resultados de difracción de rayos x, está formado de aragonita de sistema ortorrómbico que es menos estable, y por lo tanto hay una mayor reacción provocando una mayor absorción de carbono activo de parte de la pieza a cementar.
- Se observa que la tendencia de ganancia de masa y profundidad de cementación aumenta con el tiempo, como se esperaba.
- El porcentaje con la mayor profundidad de capa se obtuvo con la mezcla del 80/20 en todas las fuentes, como se observa en la tabla 4-9.
- En la mezcla del 10% la de mayor profundidad la obtuvo la almeja chocolata.
- En mezcla del 20%, las profundidades fueron mayores para la almeja y caliza a una dureza de 520 HV con 600µm de profundidad de capa.
- En la mezcla del 30% la mayor profundidad con respecto al tiempo la obtuvo la fuente de caliza (obtenida de la rumorosa).
- De acuerdo a nuestros resultados no hay una gran diferencia si se utiliza $CaCO_3$ grado reactivo o fuentes naturales como piedra caliza y concha de almejas como activador en la cementación sólida.

Recomendación para trabajos futuros

- Seguir investigando para encontrar métodos de endurecimiento superficial más eficientes como boronizado y boroaluminizado donde se pueden obtener del doble de durezas que en la cementación sólida.
- Buscar nuevos elementos reactivos que se puedan utilizar bajo el mismo proceso de carburación empaquetada pero que de mejores resultados.
- Ofrecer u organizar cursos a la pequeña industria para que apliquen estos métodos encontrados en esta investigación, en los procesos de endurecimiento de piezas o elementos de máquinas que así lo requieran.

GLOSARIO

Abrasivo Dicho de un producto: Que sirve para desgastar o pulir, por fricción, sustancias duras como metales, vidrios.

Abrasión: Proceso de profundo desgaste o de destrucción, producido en la superficie terrestre al arrancarle porciones de materia los agentes externos.

Acritud: Estado en que se encuentra un cuerpo metálico que ha perdido su ductilidad y maleabilidad.

Amorfo: Sin forma regular o bien determinada.

Austenita Nombre dado a la estructura cristalina FCC del hierro.

Austenita retenida La que no se transforma en martensita durante el templado debido a la dilatación volumétrica asociada con la reacción.

Austenizado Tratamiento térmico de un acero o de un hierro fundido a una temperatura en la cual se pueda generar austenita homogénea, la austenización es el primer paso en la mayoría de los tratamientos térmicos para los ceros y el hierro fundido.

Arrabio (o hierro cochino) Hierro fundido líquido producido por un alto horno, también conocido como metal fundido contiene 95% de hierro, 4% de carbono, 0.3-0.9% de silicio, 0.5% de Mn y 0.025-0.05% de azufre, fósforo, y titanio.

Bainita un microconstituyente de dos fases que contiene ferrita y cementita, se forma en los aceros transformados isotérmicamente a temperaturas relativamente bajas.

Capa cementada Se da el nombre de capa cementada a la zona que después de la cementación queda con un contenido de carbono superior al del acero y recibe el nombre de capa dura, la zona que después del último tratamiento térmico queda con una dureza superior a 58-60 HRC y que suele corresponder a la zona cuyo porcentaje de carbono es superior a 0.50-0.80% C

Carbonitruración Endurecimiento de la superficie de un acero mediante el carbono y nitrógeno obtenido a partir de una atmosfera especial de gas.

Carburizado Grupo de técnicas de endurecimiento superficial mediante las cuales el carbono se difunde en el acero

Cementación o carburación Tratamiento térmico para endurecer la superficie de los aceros mediante una fuente gaseosa o solida de carbono. El carbono que se difunde lo hacia la superficie la hace más dura y más resistente a la abrasión.

Cementita Compuesto duro y frágil de composición Fe_3C parecido a los cerámicos que, cuando es dispersado adecuadamente, proporciona endurecimiento en los aceros.

Cianuración Endurecimiento de la superficie del acero con carbono y nitrógeno obtenido de un baño de sales de cianuro fundido.

Difusión Flujo neto de átomos, iones u otras especies dentro de una material, causado por un gradiente de temperatura y de concentración.

Ductilidad: Dicho de un metal: Que mecánicamente se puede extender en alambres o hilos.

Eutectoide Es una mezcla de dos componentes con punto de fusión (solidificación) o punto de vaporización (licuefacción) mínimo. En efecto, dados un disolvente y un soluto existe para ellos una composición llamada mezcla eutéctica en la que, a presión constante, la adición de soluto ya no logra disminuir más el punto de fusión. Esto hace que la mezcla alcance el punto de congelación (en caso de líquidos, licuefacción) más baja posible y ambos se solidifiquen a esa temperatura (temperatura eutéctica).

Elongación Alargamiento de una pieza sometida a tracción.

Ferrita Nombre dado a la estructura cristalina BCC del hierro que puede ocurrir como α o como δ.

Ganga Materia que acompaña a los minerales y que se separa de ellos como inútil.

Grafito Mineral untuoso, de color negro y lustre metálico, constituido por carbono cristalizado en el sistema hexagonal. Se puede producir artificialmente, y se usa en la manufactura de lapiceros, crisoles refractarios y en otras aplicaciones industriales.

Grano Cristal pequeño en un material policristalino.

Globular De forma de glóbulo. Compuesto de glóbulos.

Hematita La hematita, hematites u oligisto es un mineral compuesto de óxido férrico (Fe_2O_3) y constituye una importante mena de hierro ya que en estado puro contiene un 70% de este metal.

Indentación Hacer presión con un elemento duro y dejar una huella.

Isotérmica Se dice del proceso en que la temperatura permanece constante.

Martensita Fase metaestable formada en el acero y en otros materiales a causa de una transformación atérmica sin difusión.

Martensita revenida Microconstituyente de la ferrita y cementita que se forma al revenir la martensita

Meteórico Perteneciente o relativo a los meteoros.

Metalografía Proceso de preparar una muestra de metal y observar su microestructura.

Microestructura Estructura de un material a una escala de longitud de 10-1000 nm. Suele incluir características como tamaño promedio de grano, distribución de tamaños de granos orientación de granos y las relaciones con los defectos en los materiales.

Microdureza Dureza de los materiales que se suele medir con cargas menores de 2N.

Nital Una solución de alcohol y ácido nítrico comúnmente utilizados para la rutina aguafuerte de metales. Es especialmente adecuado para revelar la microestructura de aceros al carbono. El alcohol puede ser metanol, etanol

Neopreno Caucho sintético de gran resistencia mecánica y propiedades aislantes del calor y la oxidación, por lo que tiene usos industriales y en materiales y prendas deportivas.

Nitruración Endurecimiento de la superficie de un acero mediante nitrógeno obtenido de una atmosfera especial de gas.

Normalizado Tratamiento térmico simple obtenido por la austenización de y el enfriamiento al aire para producir una estructura perlítica fina. Se puede aplicar a aceros y hierros fundidos.

Perlita Microconstituyente laminar de dos fases que contiene ferrita y cementita, se forma en los aceros enfriados de forma normal o transformados isotérmicamente a temperatura relativamente altas.

Recocido Tratamiento térmico utilizado para producir una perlita blanda y gruesa en un acero mediante la austenización y, a continuación de un enfriamiento en horno.

Remanente Aquello que queda de algo.

Revenido tratamiento térmico a baja temperatura que se utiliza para reducir la dureza de la martensita al permitir que ésta empiece a descomponerse hacia las fases de equilibrio. Esto conduce a tener una tenacidad mayor.

Salmuera Agua que sueltan las cosas saladas.

Sílice Mineral formado por silicio y oxígeno. Si es anhidro, forma el cuarzo y, si está hidratado, el ópalo.

Siderurgia Arte de extraer hierro y de trabajarlo.

Sulfinización Es un tratamiento termoquímico en el cual se introduce superficialmente azufre al acero. El objetivo no es mejorar las propiedades mecánicas sino mejorar su comportamiento frente al mecanizado. Se realiza en piezas terminadas. El tratamiento consiste en elevar la temperatura de la pieza a 570°C en un baño de sales que ceden C, Ni, S.

Temple Es un tratamiento térmico al que se somete al acero, concretamente a piezas o masas metálicas ya conformadas en el mecanizado, para aumentar su dureza, resistencia a esfuerzos y tenacidad. El proceso se lleva a cabo calentando el acero a una temperatura aproximada de 915°C en el cual la perlita se convierte en austenita, después la masa metálica es enfriada por lo general rápidamente

Templabilidad Facilidad con la que un acero puede ser templado para formar martensita, aceros de alta templabilidad forman martensita incluso en enfriamiento lento.

Turborreactor Motor de reacción del que es parte funcional una turbina de gas.

Vitrocerámicos Clase especial de materiales que se obtienen moldeando un vidrio y tratándolo después con calor para formar cristales pequeños.

REFERENCIAS

1. **Carlos Ferrer Gimenez, Vicente Amigo Borrás.** *Tecnologías de Materiales.* Mexico, Df : AlfaOmega, 2005. pp.560.

2. **Baumgarten, Júlio Frederico.** *CEMENTAÇÃO SÓLIDA EMPREGANDO GRANULADO ELABORADO A PARTIR DE CARVÃO VEGETAL RECICLADO E ATIVADOR DE CaCO3 ECOLOGICAMENTE CORRETO.* Joinville, SC, Brasil : s.n., 2003.

3. http://www.sapiens.itgo.com/documents/doc5.htm,2009. [En línea]

4. http://www.pucp.edu.pe/congreso/cibim8/pdf/15/15-53.pdf. [En línea]

5. *The Use of River Clam Shells (Aspatharia Sinuata) as an Energizer in Case Carburization of Mild Steels.* **D. U. I. OGO, TERVER-AUSE and E. J. IBANGA.** 5, Nigeria : s.n., 2004, Vol. 44.

6. http://eprints.ums.ac.id/561/1/2._MEKANIS_PADA_PROSE S_PENGKARBONAN_PADAT_BAJA_MILD_STEEL_edit.pdf 2009. [En línea] 2009.

7. *Feasibility of Sea and in Coconut Shells as Substitute to Barium carbonate (BaCO3) in small scale Foundry and Heat Treatment Shop in Nigeria.* **IYORCHIR, D U I OGOA. O. ETTEand A. I.** 2, Makurdi, Benue State, Nigeria : ISIJ International, 1994, Vol. 35. pp 203-2009.

8. http://www.slideshare.net/xMorfe0x/presentacion-cited-cementacion. [En línea]

9. **Barreiro, Jose Opraiz.** *Tratamientos termicos de los aceros.* s.l. : LIMUSA, Noriega Editoriales. Novena edicion.

10. *A Study of Processing Parameters on the Carburization of C2R Steels.* **P.O. Atanda, O.E. Olorunniwo, L.E. Umoru, and A.D. Adeyeye.** 2, Ibadan. Nigeria : s.n., 2009, Vol. 8. pp 79-92.

11. **Nina, Freddy Cori.** http://www.unjbg.edu.pe/coin/pdf/c&d_9_art_20.pdf. [En línea] 2009.

12. http://en.wikipedia.org. [En línea] 2009.

13. **Vial, Cristián.** http://www2.ing.puc.cl/icmcursos/metalurgia/apuntes/cap4/46/. [En línea] 2009.

14. **Peinado, Norma Pozos.** *Tecnologias de los metales y procesos de manufactura* . Caracas : Universidad Catolica Andres Bello, 2005. pp 318.

15. **Donald R. Askeland, Pradeed P. Phulé.** *Ciencia e ingeniería de los materiales.* Mexico : THOMSON, 2004. 4ta. Edición, pp 1004.

16. **Cardarelli, François.** *Materials handbook : a concise desktop reference.* s.l. : Springer-Verlag London Limited, 2000. 2nd Edition pp. 1340.

17. http://es.wikipedia.org/wiki/Aragonito. [En línea] 2009.

18. **NEELY, JHON E.** *Metalurgia y materiales industriales.* s.l. : LIMUSA Noriega editores, 2001.

19. **S. Kalpakjian, S.R Schmid.** *MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA.* México : PEARSON, Prentice Hall, 2008. quinta edición, pp 1295.

20. *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys.* s.l. : ASM International Handbook Committee, 1990. pp. 1618.

21. http://www.sigmaaldrich.com/mexico.html. [En línea] 2009.

22. **(editado por) George E.Totten, Maurice A. H. Howes.** *Steel Heat Treatment Handbook.* New York, New York : MARCEL DEKKER, INC., 1997. PP.1192.

23. **Auner, Sydney H.** *Introducción a la Metalurgia Física.* s.l. : MC. GRAW HILL, 1979. segunda edicion, pp.695.

24. **2001, Annual Book ASTM Standards.** *Metal-Mechanical testing; Elevated and Low temperature test; Metalography;Metal Test Methods and Analytical Procedures,.* 2001. Volume 03.01.

25. **Timings, R. L.** *Tecnología de la Fabricación, Procesos y Materiales del taller.* México, D.F : Alfaomega, 2001. Primera edición.

26. **Krar, Steve F.** *Entrenamiento en el taller Mecánico.* México : Mc. Graw Hill, 1977. segunda edición. pp.203.

27. **Steve F. Krar, Albert F. Check.** *Tecnología de las Máquinas Herramientas.* México, D.F : Alfaomega, 2002. Quinta edición, pp. 869.

28. **school, Henry Ford Trade.** *Teoría del taller* . México : McGraw Hill , 1994. Quinta edición, pp.575.

Anexos

ARAGONITE, [1] *CPDS Card*

N/N	H	K	L	d(hkl)	I/I_0*100, %%
1	1	1	1	3.39558	100.00
2	2	2	1	1.97688	77.30
3	0	2	1	3.27275	57.40
4	0	1	2	2.70032	53.60
5	1	1	2	2.37175	42.30
6	1	1	3	1.74208	34.60
7	0	4	1	1.88174	34.10
8	1	3	2	1.81428	32.60
9	1	3	0	2.34137	29.40
10	1	0	2	2.48438	29.20
11	2	2	0	2.10568	22.40
12	2	0	2	1.87677	20.70
13	0	2	2	2.32871	20.10
14	2	0	0	2.48055	18.10
15	0	3	1	2.41029	15.70
16	0	2	3	1.72481	15.70
17	2	1	1	2.18939	14.60
18	2	6	0	1.17068	12.70
19	3	1	3	1.23603	12.30
20	2	4	3	1.20587	10.20

CALCITE, [1] *CPDS Card*

N/N	H	K	L	d(hkl)	I/I_0*100, %%
1	1	0	4	3.03555	100.00
2	1	1	6	1.87532	29.70
3	1	1	3	2.28463	28.00
4	1	0	-8	1.91240	21.90
5	2	0	2	2.09443	17.00
6	1	0	-2	3.85478	16.50
7	1	1	0	2.49480	13.60
8	3	0	0	1.44037	12.40
9	2	1	-2	1.60409	11.20
10	2	1	4	1.52524	9.00
11	2	0	-4	1.92739	8.60
12	3	1	-4	1.15378	7.90
13	3	1	8	1.04479	6.10
14	0	0	12	1.42175	5.50
15	1	1	9	1.50937	5.10
16	2	1	-8	1.29666	5.00
17	4	0	4	1.04721	5.00
18	2	2	6	1.14232	4.20
19	3	0	-12	1.01185	3.90
20	3	0	12	1.01185	3.90

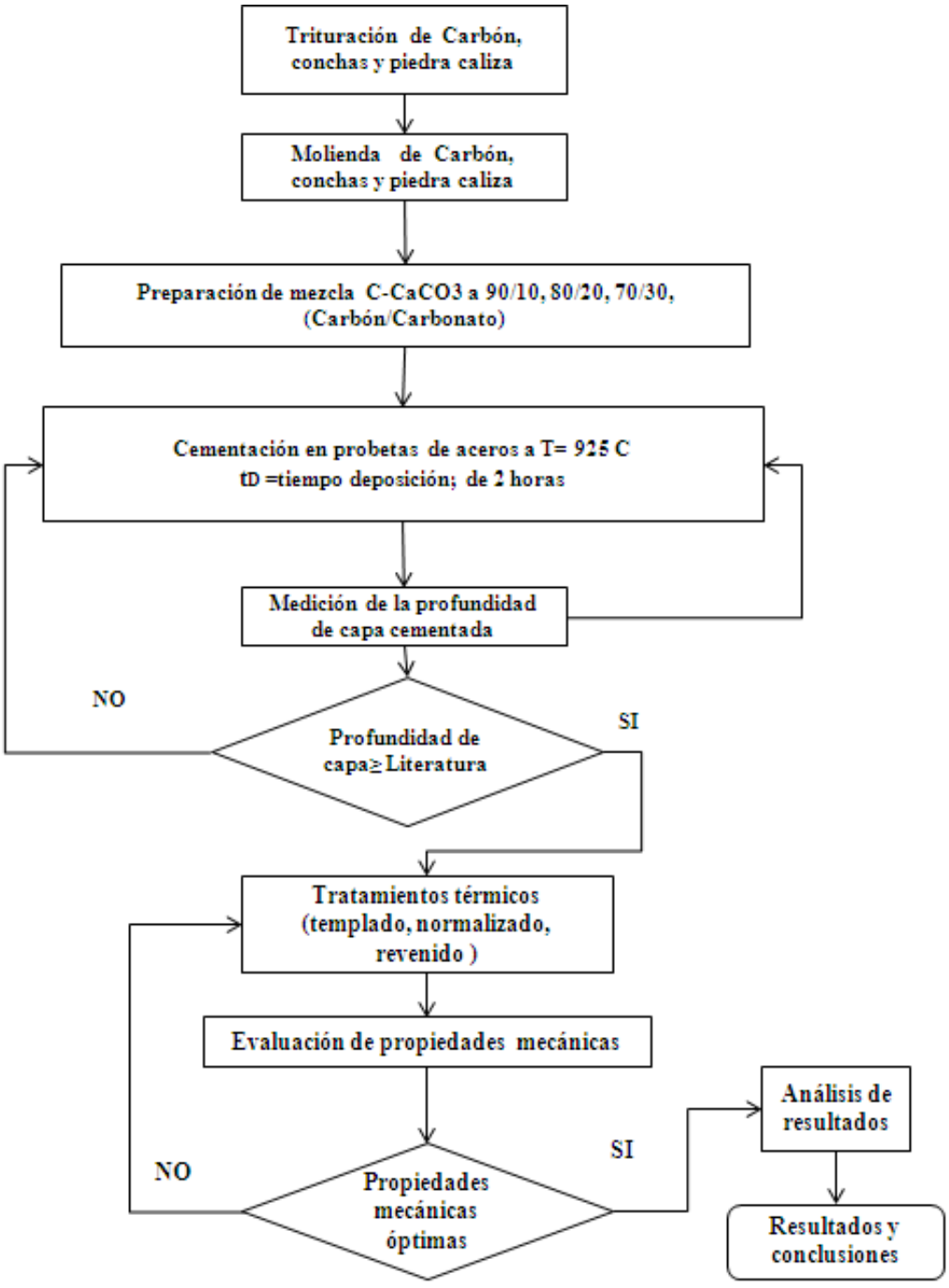



Diagrama de flujo