

**ESCUELA TÉCNICA Y SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



Proyecto fin de carrera

**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL
REVENIDO EN UN ACERO ALEADO**

**(Influence of tempering temperature in alloy
steel)**

Para acceder al título de:

**INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL
ESPECIALIDAD QUÍMICA INDUSTRIAL**

Autor: Esther García Cueto

Septiembre - 2016

INDICE

1. PLANTEAMIENTO	5
1.1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1.1. EL ACERO	6
1.1.1.1. CLASIFICACIÓN.....	6
1.1.1.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	10
1.1.1.3. ELEMENTOS DE ALEACIÓN DEL ACERO	13
1.1.2. TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	17
1.1.3. PROCESO PRODUCTIVO FAED S.L.	29
1.2. ANÁLISIS DE ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	56
2. DESARROLLO	59
2.1. METODOLOGÍA	60
2.1.1. TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	60
2.1.2. ENSAYOS FÍSICOS.....	61
2.2. RESULTADOS	66
3. CONCLUSIONES	81
4. BIBLIOGRAFÍA	87
5. ANEXO I	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 -Primera etapa del revenido (aceros poco aleados).....	22
Figura 2 - Tercera etapa revenido (aceros poco aleados).....	23
Figura 3 -Primera etapa del revenido (aceros muy aleados)	24
Figura 4 - Curva de revenido de acero al carbono: 0,73%C; 0,30%Mn; Si<0,25%	26
Figura 5 - Curvas de disminución de la resiliencia en función de T y t.....	26
Figura 6 - Curva dilatómica de un acero al carbono	28
Figura 7 - Esquema de una caja de moldeo.....	33
Figura 8 - Moldeo con modelo de madera	38
Figura 9 - Modelo de madera	38
Figura 10 - Pintado del molde después de retirar el modelo	39
Figura 11 - Resinas y catalizadores	40
Figura 12 - Fusión del acero.....	41
Figura 13 - Horno de inducción	43
Figura 14 - Toma de muestra del caldo.....	44
Figura 15 - Probeta analizada en el laboratorio.....	45
Figura 16 - Cuchara.....	46
Figura 17 - Trasvase a la cuchara (del horno).....	47
Figura 18 - Trasvase de la cuchara al molde	48
Figura 19 - Pieza desmoldeada.....	50
Figura 20 - Desbarbado de una pieza	52
Figura 21 - Horno de tratamiento térmico.....	53
Figura 22 –Localización Cantabria (ampliado).....	57
Figura 23 –Localización Polígono Requejada	57
Figura 24 – FAED S.L.	57
Figura 25 - Diferentes penetradores ensayo de dureza	61
Figura 26 - Ensayo de dureza	62
Figura 27 - Características dureza Brinell	62
Figura 28 - Huella ensayo dureza.....	63
Figura 29 - Probeta ensayo de tracción	63
Figura 30 - Esquema ensayo de tracción.....	64
Figura 31 - Esquema de un aparato estándar para la prueba de impacto	65

Figura 32 - Límite elástico - T ^a Revenido (TTT 880°C - Agua)	67
Figura 33 - Resistencia a la tracción - T ^a Revenido (TTT 880°C - Agua)	68
Figura 34 - Elongación - T ^a Revenido (TTT 880°C - Agua)	68
Figura 35 - Estricción - T ^a Revenido (TTT 880°C - Agua)	69
Figura 36 - Tenacidad - T ^a Revenido (TTT 880°C - Agua)	69
Figura 37 - Dureza - T ^a Revenido (TTT 880°C - Agua)	70
Figura 38 - Límite elástico - T ^a Revenido (TTT 920°C - Agua)	71
Figura 39 - Resistencia a tracción - T ^a Revenido (TTT 920°C - Agua)	71
Figura 40 - Elongación - T ^a Revenido (TTT 920°C - Agua)	72
Figura 41 - Estricción - T ^a Revenido (TTT 920°C - Agua)	72
Figura 42 - Tenacidad - T ^a Revenido (TTT 920°C - Agua)	73
Figura 43 - Dureza - T ^a Revenido (TTT 920°C - Agua)	73
Figura 44 - Límite elástico - T ^a Revenido (TTT 880°C - Aire)	74
Figura 45 - Resistencia a tracción - T ^a Revenido (TTT 880°C - Aire)	75
Figura 46 - Elongación - T ^a Revenido (TTT 880°C - Aire)	75
Figura 47 - Estricción - T ^a Revenido (TTT 880°C - Aire)	76
Figura 48 - Tenacidad - T ^a Revenido (TTT 880°C - Aire)	76
Figura 49 - Dureza - T ^a Revenido (TTT 880°C - Aire)	77
Figura 50 - Límite elástico - T ^a Revenido (TTT 920°C - Aire)	78
Figura 51 - Resistencia a tracción - T ^a Revenido (TTT 920°C - Aire)	78
Figura 52 - Elongación - T ^a Revenido (TTT 920°C - Aire)	79
Figura 53 - Estricción - T ^a Revenido (TTT 920°C - Aire)	79
Figura 54 - Tenacidad - T ^a Revenido (TTT 920°C - Aire)	80
Figura 55 - Dureza - T ^a Revenido (TTT 920°C - Aire)	80
Figura 56 - Límite elástico (comparación)	82
Figura 57 - Resistencia a tracción (comparación)	83
Figura 58 - Dureza (comparación)	83
Figura 59 - Elongación (comparación)	84
Figura 60 - Estricción (comparación)	85
Figura 61 - Tenacidad (comparación)	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Comparación de la dilatación térmica de arenas.....	34
Tabla 2 - Composición acero G14NiCrMo10-6.....	60
Tabla 3 - Resultados ensayos físicos.....	66
Tabla 4 - Tabla completa de resultados (Ensayos de tracción y dureza)	91
Tabla 5 - Tabla completa de resultados (Ensayos de impacto)	93

1. PLANTEAMIENTO

1.1. INTRODUCCIÓN

1.1.1. EL ACERO

Las aleaciones ferrosas incluyen los aceros al bajo carbono, los aceros aleados, los aceros inoxidables y los hierros fundidos. Éstos se producen de dos formas, refinando el mineral de hierro o reciclando chatarra.

UNE EN 10020:2001 define el acero como “aquel material en el que el hierro es el elemento predominante, el contenido de carbono es, normalmente inferior al 2% y contiene además otros elementos”.

El límite superior al 2% en el contenido de carbono es el límite que separa acero y fundición. El aumento del porcentaje de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción pero también incrementa la fragilidad en frío y disminuye la tenacidad y ductilidad.

El acero producido refinando el mineral de hierro se obtiene calentando en un alto horno el hierro en presencia de coque (carbono) y oxígeno. El óxido de hierro se reduce a hierro líquido y se produce monóxido de carbono y dióxido de carbono. Se agrega piedra caliza para eliminar impurezas y se forma escoria líquida. Por último, se sopla oxígeno en un horno de oxigenación o de aceración para eliminar el carbón sobrante y obtener el acero líquido.

El acero producido con chatarra se obtiene introduciendo ésta en hornos eléctricos de arco, que debido al calor se funde. El acero líquido a veces se introduce directamente en moldes donde el acero fundido obtiene su forma final, o se le permite solidificar en formas que posteriormente son procesadas mediante conformado de metales (laminado o forjado).

Para controlar la estructura propiedades de acero, se hace uso de la reacción eutectoide mediante el tratamiento térmico.

1.1.1.1. CLASIFICACIÓN

Existen varios tipos de clasificación para los aceros según norma UNE-EN 10020:2001.

- **Composición química:** Atendiendo a su composición química, los aceros se clasifican en:

Aceros no aleados (aceros al carbono): son aquellos en el que el contenido de cualquiera de los elementos de los que se compone el acero (excepto el carbono), es inferior a la tabla 1 UNE EN 10020:2001. Siendo elementos aleantes el manganeso, cromo, níquel, vanadio, o titanio. Estos aceros se pueden clasificar en función del contenido de carbono del acero:

- **Aceros de bajo carbono** (contenido menor al 0,25%). Presentan una buena soldabilidad aplicando la técnica adecuada y sirven para piezas de resistencia media, de buena tenacidad, deformación en frío, herrajes, etc.

- **Aceros de medio carbono** (entre 0,25% y 0,55%). Aumentan la resistencia a la rotura y la dureza con respecto a los anteriores que a su vez, pueden ser mejoradas mediante tratamiento térmico de templado. Sirven para la fabricación de ejes, elementos de maquinaria, piezas resistentes y tenaces, pernos, tornillos, cilindros de motores de explosión, transmisiones, etc.

- **Aceros de alto carbono** (entre 0,55% y 2%). Aumentan la resistencia a la rotura y la dureza respecto a los anteriores, y además se pueden aumentar sus valores sometiéndolo a tratamiento térmico de templado. Se aplican en piezas regularmente cargadas y de espesores no muy elevados.

Aceros aleados: aquellos en los que además del carbono, al menos uno de sus otros elementos presentes en la aleación es igual o superior a la tabla 1 de UNE EN 10020:2001. Se pueden clasificar en

- **Aceros de baja aleación** (elementos aleantes menor 5%)

- **Aceros de alta aleación** (elementos aleantes más 5%)

Aceros inoxidables: son aquellos en contienen un mínimo del 10,5% en Cromo y un máximo del 1,2% de Carbono.

- **Calidad:** La norma los clasifica en:

Aceros no aleados:

- Aceros no aleados de calidad: presentan características específicas en cuanto a su tenacidad, tamaño de grano, formabilidad, etc.

- Aceros no aleados especiales: presentan mayor pureza que los aceros de calidad. Son aceros destinados a tratamientos de temple y revenido, caracterizándose por un buen comportamiento frente a esos tratamientos. Se fabrican prestando especial atención a su composición y condiciones de elaboración y tienen valores de templabilidad o límite elástico elevados, además de un buen comportamiento en frío frente a conformabilidad, soldabilidad o tenacidad.

Aceros aleados:

- Aceros aleados de calidad: presentan buen comportamiento frente a la tenacidad, control de tamaño de grano o la formabilidad. No se suelen someter a tratamiento de temple y revenido, ni al temple superficial. Se dividen en:

I) aceros destinados a la construcción metálica, aparatos de presión o tubos, de grano fino y soldables.

II) aceros aleados para carriles, tablestacas y cuadros de entibación de minas.

III) aceros aleados para productos planos, laminados en caliente o frío, destinados a operaciones severas de conformación en frío

IV) aceros cuyo único elemento de aleación sea el cobre

V) aceros aleados para aplicaciones eléctricas, cuyos principales elementos de aleación son el Si, Al, y que cumplen los requisitos de inducción magnética, polarización o permeabilidad necesarios.

- Aceros aleados especiales: están caracterizados por un control preciso de su composición química y de unas condiciones particulares de elaboración y control para asegurar unas propiedades mejoradas.

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

I) aceros aleados destinados a la construcción mecánica y aparatos de presión

II) aceros para rodamientos

III) aceros para herramientas

IV) aceros rápidos

V) otros aceros con características físicas especiales, como aceros con coeficiente de dilatación controlado, con resistencias eléctricas, etc.

- Aceros inoxidables: se dividen en dos grupos

I) Según su contenido en Níquel

a) Aceros inoxidables con contenido en menor 2,5%

b) Aceros inoxidables con contenido en Ni mayor o igual 2,5%

II) Según sus características físicas:

a) Aceros inoxidables resistentes a la corrosión

b) Aceros inoxidables con buena resistencia a la oxidación en caliente

c) Aceros inoxidables con buenas prestaciones frente a la fluencia

- **Por tipo de aplicación:** Según el uso que se les quiera dar:

Aceros de construcción: suele tener buenas condiciones de soldabilidad

Aceros de uso general: se suele comercializaren estado bruto de laminación

Aceros cementados: se les somete a un tratamiento termoquímico que le proporciona dureza a la pieza, aunque son aceros también frágiles (posibilidad de rotura por impacto). El proceso de cementación aporta carbono a la superficie de la pieza de acero mediante difusión, y sometiéndola después a un tratamiento térmico.

Aceros para temple y revenido: Son tratamientos térmicos que buscan endurecer y aumentar la resistencia de los aceros (temple) y disminuir la dureza y resistencia de los materiales, elimina las tensiones creadas en el temple y se mejora

la tenacidad, dejando el acero con la resistencia o dureza deseada. Para ello, se calienta el material a una temperatura ligeramente más elevada de a crítica y se somete a un enfriamiento más o menos rápido (según las características que se busquen).

Aceros inoxidables o para usos especiales: este tipo de aceros son aleaciones de hierro con un mínimo de 10% de cromo. El acero inoxidable es resistente a la corrosión ya que el cromo reacciona con el oxígeno formando una capa exterior protectora, evitando la corrosión de las capas interiores. Esta capa protectora puede ser atacada por ácidos y por lo tanto el hierro se vería afectado. Algunos aceros inoxidables contienen otros elementos aleantes como níquel o molibdeno.

Aceros para herramientas de corte y mecanizado: aceros que presentan una alta dureza y resistencia al desgaste.

Aceros rápidos: aceros especiales para uso como herramientas con elevadas velocidades de corte.

1.1.1.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

- **TENSIÓN Y DEFORMACIÓN**

Cuando una pieza de metal es sometida a una fuerza de tensión uniaxial, se produce una deformación del metal. Si el metal vuelve a sus dimensiones originales cuando la fuerza cesa, es una deformación elástica. Estas deformaciones no pueden soportarse demasiadas veces, ya que al someterse a dicha fuerza, los átomos del metal son desplazados de su posición original pero no hasta el extremo de tomar nuevas posiciones fijas. Por ello, al cesar la fuerza, los átomos del metal vuelven a sus posiciones originales.

Si el metal es deformado hasta el extremo de que no puede recuperar completamente sus dimensiones iniciales, es una deformación plástica. Durante la deformación plástica, los átomos del metal son desplazados permanentemente de sus posiciones originales y toman nuevas posiciones.

Éstos y otros datos son obtenidos mediante ensayos de tensión, obteniendo un diagrama de tensión-deformación que se utiliza para evaluar la resistencia de metales y aleaciones.

- **DUREZA**

Es la medida de la resistencia de un metal a la deformación permanente, es decir, la deformación plástica, en su superficie.

La dureza del metal depende de la facilidad con la que se deforme plásticamente. Se puede determinar de forma empírica una relación entre la dureza y la resistencia, para un metal en particular. Los valores de dureza de cada metal se obtienen incrustando/forzando con un penetrador sobre la superficie del material.

- **FRACTURA DE METALES**

Es la separación de un sólido bajo tensión en dos piezas o más. En general, la fractura metálica puede clasificarse en dúctil o frágil pero puede ser una mezcla de las dos.

- **Fractura dúctil**: Ocurre después de una intensa deformación plástica, y se caracteriza por una lenta propagación de la grieta, pudiendo fracturarse el metal si se aplica una tensión que exceda de su tensión máxima de fractura y se mantiene suficiente tiempo.

- **Fractura frágil**: se produce a lo largo de planos cristalográficos característicos, llamados planos de fractura, y tiene una rápida propagación de la grieta. Se cree que la fractura frágil en los metales tiene lugar en tres estados:

a) La deformación plástica concentra las dislocaciones a lo largo de los planos de deslizamiento en obstáculos.

b) La tensión de cizalla se acumula en lugares donde las dislocaciones se bloquean, y como resultado se nuclean microgrietas.

c) Una posterior tensión propaga microgrietas, y la energía de deformación elástica almacenada puede contribuir a la propagación de las grietas.

Las bajas temperaturas y altas deformaciones favorecen la fractura frágil.

- **TENACIDAD**

Es la medida de la cantidad de energía que un material puede absorber antes de fracturar. Es importante cuando se considera la habilidad del material a soportar un impacto sin fracturarse. La fractura de un metal comienza en el lugar donde la concentración de tensión es lo más grande posible.

Uno de los métodos de medida de la tenacidad es mediante un aparato de pruebas de impacto.

- **FATIGA DE METALES**

Las piezas de metal sometidas a tensiones repetitivas o cíclicas romperán a tensiones mucho menores que aquellas que puede soportar la pieza bajo la aplicación de una única tensión estática. Estas fracturas que ocurren con bajas tensiones repetitivas o cíclicas, son fracturas por fatiga.

Los cambios que ocurren en un metal dúctil en un proceso de fatiga son los siguientes:

a) Iniciación de la grieta: Ocurre un desarrollo temprano del daño por fatiga.

b) Crecimiento de la grieta en la banda de deslizamiento: la iniciación de la grieta ocurre debido a que la deformación plástica no es un proceso completamente reversible. Las irregularidades superficiales y el daño a lo largo de las bandas de deslizamiento persistentes producen grietas que se forman en o cerca de la superficie que se propagan en la muestra a lo largo de los planos sujetos a mayor tensión de cizalla.

c) Crecimiento de la grieta sobre planos de gran resistencia a la tensión: En este estado, una grieta bien definida se propaga a una velocidad relativamente rápida, y se crean estrías por la fatiga mientras la grieta avanza a través de la sección de una muestra del metal.

d) Fractura dúctil definitiva: Cuando la grieta cubre un área suficiente de forma que el material que queda en la sección no pueda soportar la carga aplicada, el metal se rompe por fractura dúctil.

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

La fatiga de un metal se ve afectado por algunos factores, además de la composición química.

- Concentración de tensión: la presencia de mellas, agujeros, hendiduras o cambios bruscos en la sección afectan gravemente a la resistencia a la fatiga. Estas fracturas pueden minimizarse con un diseño cuidadoso para evitar los aumentadores de tensión, siempre que sea posible.

- Rugosidad superficial: En general, cuanto más liso sea el acabado superficial de la muestra metálica, mayor será la resistencia a la fatiga. Las superficies rugosas crean aumentadores de tensión que facilitan la formación de grietas por fatiga.

- Estado superficial: la mayoría de las fracturas por fatiga se originan en la superficie del metal, los cambios en la condición de la superficie afectará en la resistencia a la fatiga. Se puede mejorar esto con tratamientos de endurecimiento de la superficie para los aceros.

- Medio ambiente: Con el ataque químico, por agentes corrosivos, se acelera la velocidad a la cual se propagan las grietas por fatiga. La combinación de ataque corrosivo y tensiones cíclicas sobre un metal se conoce como fatiga por corrosión.

1.1.1.3. ELEMENTOS DE ALEACIÓN DEL ACERO

Los aceros contienen elementos de aleación que mejoran algunas de sus características fundamentales. Los aceros al carbono, como norma general, contienen: carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre, por eso, se llaman aceros aleados, a aquellos aceros que además de los cinco elementos anteriores, contienen aleantes como: níquel, manganeso, cromo, vanadio, wolframio, molibdeno, cobalto, silicio, cobre, titanio, zirconio, plomo, selenio, niobio, aluminio y boro.

La influencia de estos elementos es muy distinta, y, utilizando el porcentaje conveniente, obtenemos aceros con características muy diferentes.

Se pueden fabricar piezas de gran espesor, con resistencias muy elevadas en el interior de las mismas, herramientas que resisten perfectamente a la acción de los agentes corrosivos, componentes mecánicos que alcanzan grandes durezas con gran

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

tenacidad, mecanismos que mantengan elevadas resistencias, aún a altas temperaturas, moldes de formas muy complicadas que no se deformen ni agrieten en el temple, etc.

Estos aleantes pueden disolverse en la ferrita o formar soluciones sólidas con el hierro alfa, o bien, pueden tener tendencia a formar carburos. Algunos aleantes elevan o disminuyen las temperaturas críticas de los diagramas de equilibrio, Ac y Ar, diagrama hierro-carbono. Ensanchan o disminuir el campo austenítico o ferrítico del diagrama de equilibrio, y otras influencias, también relacionadas con el diagrama hierro-carbono, como la tendencia a grafitizar el carbono, a modificar el tamaño del grano, etc.

Níquel: evita el crecimiento del grano en los tratamientos térmicos, lo que sirve para producir en ellos gran tenacidad. El níquel además hace descender el punto crítico Ac y por ello los tratamientos pueden hacerse a temperaturas ligeramente más bajas que la que corresponde a los aceros ordinarios.

En los aceros aleados con níquel se obtiene para una misma dureza, un límite de elasticidad ligeramente más elevado y mayores alargamientos y resistencias que con los aceros al carbono o de baja aleación. Es imprescindible en la fabricación de aceros inoxidable y/o resistentes a altas temperaturas, en los que además de cromo se emplean porcentajes de níquel de entre un 8% al 20%.

El níquel se disuelve en la ferrita y no es un gran formador de carburos. Aumenta la tenacidad y la resistencia de los aceros recocidos, tendiendo a retener austenita en los aceros altos en cromo.

Cromo: Es el aleante especial más empleado, usándose indistintamente en los aceros de construcción, en los de herramientas, en los inoxidables y los de resistencia en caliente.

Aumenta la dureza y la resistencia a la tracción de los aceros, mejora la templabilidad, impide deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste, y a la abrasión. Aumenta la resistencia en altas temperaturas y proporciona inoxidabilidad, etc.

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

El cromo se disuelve en la ferrita y muestra una fuerte tendencia a formar carburos de cromo y carburos complejos.

Molibdeno: Este aleante proporciona una gran resistencia a la tracción, aumentando la templabilidad, así como la resistencia a la fluencia mecánica, o deformación por desplazamiento del grano de acero debido al trabajo prolongado en altas temperaturas. En los aceros cromo-níquel, elimina la fragilidad de revenido, o fragilidad Krupp, que se presenta cuando estos aceros son revenidos en la zona de 450° a 550°. Aumenta también la resistencia de los aceros en caliente y reemplaza al wolframio en la fabricación de los aceros rápidos, pudiéndose emplear para las mismas aplicaciones aproximadamente una parte de molibdeno por cada dos de wolframio.

El molibdeno se disuelve en la ferrita, es un gran formador de carburos, pero también es gran estabilizador de estos. Retarda el ablandamiento de los aceros, durante el revenido, apareciendo la dureza secundaria.

Wolframio: este aleante está presente en la fabricación de la mayor parte de las herramientas, Su uso está generalizado en los aceros rápidos, aceros para herramientas de corte y aceros para trabajos en caliente. Permite mantener la dureza en el aceros a elevada temperatura y evita que se produzcan desafilados y ablandamientos en las herramientas, aunque alcancen temperaturas superiores a 500°C o 600°C.

El wolframio se disuelve ligeramente en la ferrita y tiene una gran tendencia a formar carburos, los cuales tienen gran estabilidad. Forma carburos muy duros y resistentes al desgaste en elevadas temperaturas, y mejora la dureza de los aceros a elevadas temperaturas. Retarda el ablandamiento de los aceros, durante el revenido, apareciendo la dureza secundaria.

Vanadio: también está presente en la fabricación de la mayor parte de las herramientas, tiende a afinar el grano y a disminuir la templabilidad. Es un elemento desoxidante muy fuerte. Es un gran formador de carburos, por ello su porcentaje es muy pequeño, 0.02%/0.03%, excepto en los aceros de herramientas.

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

Dificulta enormemente el ablandamiento por revenido, y da lugar al fenómeno de dureza secundaria. Puede no influir en la templabilidad si se encuentra disuelto.

Manganeso: Este aleante nos proporciona el equilibrio necesario ante los inconvenientes del azufre y del oxígeno, presentes en los procesos de fabricación.

- Con el oxígeno: El manganeso es un desoxidante que evita que se desprendan gases, en la solidificación del acero y se originen poros y rechupes en la fabricación del acero.

- Con el azufre: El manganeso en los aceros nos permite laminar y forjar, porque el azufre que suele encontrarse en los aceros, forma sulfuros de hierro, que tiene muy bajo punto de fusión (981° aprox.), y en caliente se funde y fragilizan.

El manganeso en los aceros, aumenta su resistencia, templabilidad, siendo interesante destacar que es un elemento de aleación relativamente barato. Forma carburos.

Silicio: proporciona gran poder desoxidante, complementario al manganeso para evitar la aparición de poros y rechupes.

Mejora la templabilidad en aceros con elementos no graficantes y aumenta la resistencia de los aceros bajos en carbono, eleva sensiblemente el límite elástico y la resistencia a la fatiga de los aceros sin reducir su tenacidad.

Cobalto: limita su uso en las calidades superiores de aceros rápidos. Este aleante, se combina con la ferrita, aumentando su dureza y resistencia. Disminuye la templabilidad en los aceros de alto porcentaje de carbono

Para aquellos aceros con base de wolframio, endurece la ferrita con lo que facilita el mantenimiento de la dureza y de la aptitud de corte de las herramientas a elevada temperatura. Reduce la templabilidad de los aceros.

Aluminio: Este aleante se emplea en los aceros de nitruración, que suele tener 1% aproximadamente de aluminio. Como desoxidante es usado comúnmente para gran cantidad de aceros. Todos los aceros aleados de alta calidad contienen aluminio pero en bajo porcentaje.

Titanio: Su uso como aleante sólo se aplica en aceros de alta gama y en cantidades bajas, por su gran poder desoxidante y su gran capacidad de afinar el grano. Es un gran formador de carburos y combina rápidamente con el nitrógeno. Se usa también en los aceros inoxidable cromo-níquel.

Boro: Este aleante se usa recientemente en el mercado del acero. Recientes estudios de investigación aclaran que mínimas cantidades de boro del orden 0,001 a 0,006%, mejoran enormemente la templabilidad, siendo el más efectivo de los aleantes y el de mayor capacidad de temple. La templabilidad es tan grande, que para un mismo acero de 0,40% de carbono, su aleación es:

- 50 veces superior a la de molibdeno
- 75 veces superior a la de cromo
- 150 veces superior a la de manganeso
- 400 veces superior a la de níquel

La utilización de este elemento presenta bastantes dificultades, ya que es un desoxidante muy fuerte. Se emplea en los aceros de 0,30 a 0,50% de carbono.

1.1.2. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

"Es el proceso en el que el acero en estado sólido, es sometido a uno o varios ciclos de calentamiento y enfriamiento para variar alguna o algunas de sus propiedades de la forma deseada", definición dada por el "Metal Handbook"

Todos los tratamientos térmicos comienzan con un calentamiento. La función del calentamiento es obtener una estructura parcial o totalmente austenítica, excepto en el revenido y en algunos recocidos.

El calentamiento se realiza introduciendo la pieza en un horno o baño de sales, se busca conseguir en toda la pieza, una temperatura uniforme para poder obtener una estructura homogénea.

En la mayoría de las ocasiones, no se conoce como varía la distribución de temperaturas durante su calentamiento pero aún así se debe prestar atención a la velocidad de éste, ya que un calentamiento muy rápido conlleva a diferencias de temperatura entre diferentes puntos de las piezas y se originan más tensiones,

aumentando así el riesgo de sufrir deformaciones o roturas. Hay que procurar que la distribución de temperaturas sea lo más homogénea posible en todo momento.

Cuando se calienta, desde T^a ambiente, piezas de gran espesor, la periferia no puede expandirse libremente y queda sometida a esfuerzos de compresión, y el núcleo a esfuerzos de tracción.

El tamaño de la pieza es una variable importante, ya que, cuanto mayor sea la pieza, más elevados son los gradientes de temperatura. No es recomendable introducir piezas grandes frías en hornos que se encuentran a temperaturas elevadas.

El tipo de acero también es un factor importante, ya que las propiedades térmicas son significativas. La conductividad térmica de los aceros no aleados cae suavemente al aumentar el contenido en Carbono. En cambio, una pieza de acero inoxidable austenítico tendrá mayores diferencias de temperatura entre distintos puntos y por lo tanto más tensiones. El calentamiento de un acero de alta aleación debe ser más lento que los aceros no aleados.

Otras variables a tener en cuenta son:

- El tipo de horno, su grado de ocupación (mayor cantidad de metal, calentamiento más lento).
- El estado superficial de las piezas: el tiempo necesario para el calentamiento de una pieza brillante, es dos o tres veces mayor al que necesita una pieza oxidada (por la cantidad de energía radiante que se absorbe y se refleja).

- **TEMPLE**

Se denomina templabilidad a la capacidad que tiene un acero de formar martensita, por enfriamiento adecuado, en puntos del interior de la pieza.

El temple consiste en el calentamiento de un acero hasta una temperatura concreta (T^a de temple), entre 750 °C y 1.300 °C dependiendo del material base, se mantiene dicha temperatura durante un tiempo específico y se enfría en un medio adecuado (medio de temple). Ajustando estos puntos de control podemos conseguir las condiciones idóneas previo al temple disolviendo los elementos aleantes de manera correcta y obteniendo una estructura austenítica deseada.

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

La temperatura alcanzada y su mantenimiento debe ser controlada para que no aparezcan defectos tales como, grietas y deformaciones. Se mantendrá durante el tiempo necesario para asegurar la homogeneidad térmica, y química de la pieza pero sin excederse para no provocar el crecimiento del tamaño del grano. Importante es evitar la oxidación superficial.

La etapa de enfriamiento es también una parte importante de este tratamiento. Para conseguir estructuras totalmente martensíticas en los puntos más al interior de la pieza, requerirá enfriamiento a velocidad muy altas (temple perfecto, completo o total). Depende de la pieza, lo que es una velocidad de enfriamiento perfecta, para otras piezas puede suponer un temple correcto o incompleto. Con un correcto ajuste del temple se consigue la transición estructural de austenita a martensita, mejorando notablemente la dureza de la zona templada.

Se obtiene martensita después de su enfriamiento, y se consigue una dureza y resistencia mecánica mucho más elevada que la correspondiente al estado de equilibrio. Existen algunas excepciones, por ejemplo las aleaciones de aluminio obtienen una dureza más baja.

En algunos tipos de acero, como los denominados aceros de construcción, el temple clásico va seguido del tratamiento de revenido. La combinación de ambos tratamientos es conocida como bonificación. Se consigue de esta forma, una microestructura que proporcione las características mecánicas más adecuadas, alcanzando un equilibrio óptimo entre las propiedades resistentes y las plásticas.

Factores de temple

- Composición química: La presencia de aleantes suele tener conductividad térmica menor que los aceros al carbono.
- Temperatura: los aceros de alta aleación, necesitarán temperaturas más altas, entre 1150°C y 1325°C.
- Tamaño de grano: los aceros de grano fino y austenita homogénea permiten obtener mejores propiedades y en especial, mayor tenacidad.
- Inclusiones: aceros más cuidados presentan mayores velocidad críticas de temple y los menos limpios, tienen velocidad inferiores).

Factores de la pieza

La forma de las piezas y sus dimensiones es muy importante. Piezas muy grandes y con formas complicadas, son más susceptibles de agrietamiento que las piezas con formas más regulares.

Factores debidos al medio de enfriamiento

- Grado de agitación
- Temperatura de ebullición
- Temperatura inicial
- Conductividad térmica del vapor
- Conductibilidad térmica del líquido
- Viscosidad
- Calor específico
- Calor de evaporación

Deformaciones, tensiones y grietas

Las causas de agrietamiento y deformación de las piezas en el temple son las tensiones de dos orígenes distintos. Tensiones térmicas debidas a velocidades diferentes de enfriamiento entre la superficie y el núcleo. Tensiones estructurales debidas a los cambios de volumen por la transformación de la austenita en otros microconstituyentes.

Al enfriar la pieza, la superficie se enfría a mayor velocidad que el núcleo, sufriendo una contracción. A altas temperaturas, el acero se encuentra en estado plástico y la resistencia a la deformación es pequeña por lo que pueden producirse deformaciones. A temperaturas bajas la deformación es más difícil y la diferencia de velocidades de enfriamiento se traduce en tensiones internas.

En la transformación de austenita en martensita, se produce un aumento de volumen (4% en un acero al carbono con 1% de C), en este momento la periferia se encuentra en tracción mientras que el núcleo está sometido a compresión. Al estar el núcleo en estado austenítico y más caliente absorbe sin dificultad estos esfuerzos.

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

Cuando el núcleo empieza a transformarse en martensita, se invierte la situación pero la periferia está formada por martensita muy poco plástica y a baja temperatura, mientras que el núcleo es austenítico y a temperatura relativamente alta. Hay peligro de rotura por las tensiones generadas, aflorando la grieta a la superficie.

Debe elegirse el medio del temple que conlleve menores gradientes térmicos, el que menor severidad tenga y conduzca al temple adecuado.

- **REVENIDO**

Una vez realizado el temple, al ser la martensita demasiado frágil, es necesario elevar la resiliencia del acero, así como eliminar las tensiones ocasionadas por el rápido enfriamiento y la contracción volumétrica. No se pretende eliminar los efectos del temple sino modificarlos, se consigue disminuir la dureza y la resistencia, eliminando tensiones internas, y aumentando la tenacidad.

El revenido se aplica a las aleaciones tratadas con temple martensítico. Se consigue mejorar la tenacidad de las piezas templadas, a costa de disminuir su dureza. La temperatura del calentamiento en este tratamiento es inferior a la del temple. Cuanto más se aproxima a la temperatura máxima de temple, mayor es la disminución de la dureza y la mejora de la tenacidad.

En este tratamiento térmico, la velocidad de enfriamiento no influye en el resultado, suele dejarse enfriar al aire, aunque algunos aceros es conveniente enfriarlos en agua o aceite.

Modificaciones microestructurales

Las variaciones que se producen en las propiedades de los aceros tras ser sometidos a un revenido, son debidas a cambios microestructurales, que consisten en la descomposición más o menos completa de la martensita en constituyente más estables. Estas modificaciones se dan en varias etapas.

- **Etapas - aceros de baja o media aleación**

Las etapas en aceros al carbono, de baja o media aleación, tras el temple o no contienen austenita retenida o si la contienen no posee en disolución gran porcentaje de elementos de aleación.

A) Primera etapa: A temperaturas inferiores a los 250°C, de la martensita sobresaturada en carbono (del temple), se precipita un carburo de hierro, llamado carburo Épsilon, ϵ , transformándose en martensita β de red cúbica, por la pérdida de carbono, suele contener alrededor de 0,25% de carbono y se oscurece al precipitar el carburo Épsilon en los límites de los primitivos subgranos de la austenita. La martensita β , igual que la martensita α , es acicular.

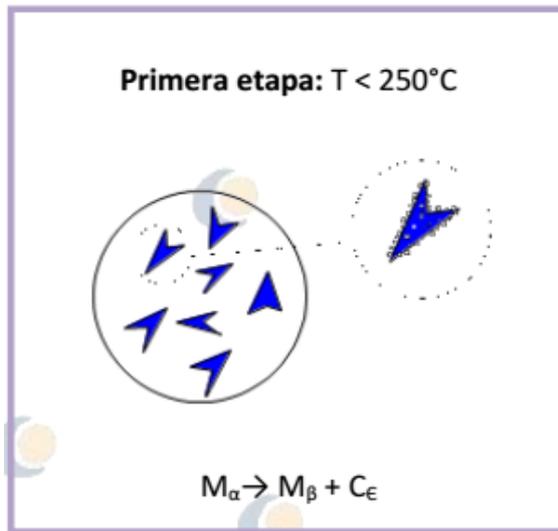
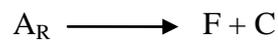


Figura 1 -Primera etapa del revenido (aceros poco aleados)

B) Segunda etapa: si el acero contiene austenita retenida, A_R , se transforma entre los 200°C y los 300°C en un agregado de ferrita y carburos de apariencia micrográfica similar a la bainita inferior:



C) Tercera etapa: el carburo épsilon, se transforma entre los 200°C y 350°C en Fe_3C . Esta cementita precipita primero en los contornos de las agujas de M_{β} así como en su interior. Al elevarse la temperatura dentro de este intervalo, la cementita del interior se redisuelve en la M_{β} , inicialmente discontinua, se completa y engrosa.

La elevación de la temperatura por encima de los 350°C destruye esta red y la cementita globuliza. Ahora el acero está formado por una matriz ferrítica en la que están embebidos los glóbulos de cementita.

Para temperaturas cerca de 650°C, la cementita coalesce y los glóbulos de cementita se engrosan. El agregado de ferrita y carburos, obtenidos en la segunda etapa se transforma también en ferrita y cementita globulizada.

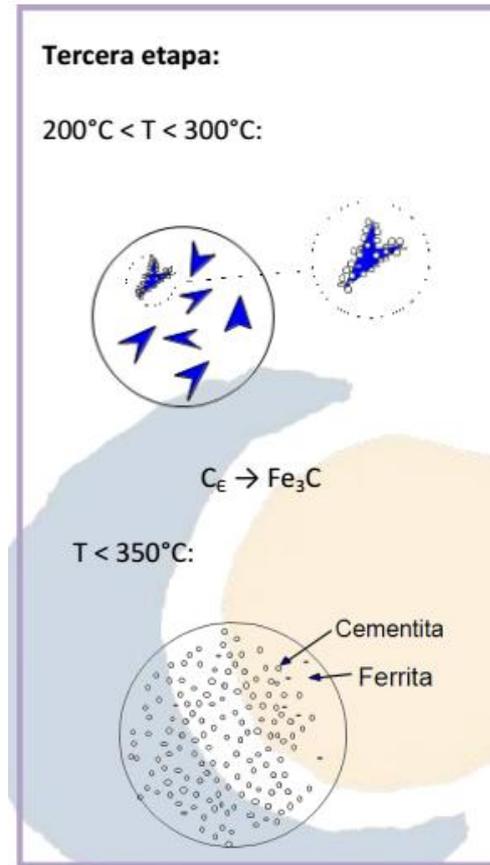


Figura 2 - Tercera etapa revenido (aceros poco aleados)

D) Cuarta etapa: En aceros aleados con Cr, Mo, V, W, Ti, etc., precipitan carburos a temperaturas entre 500°C y 600°C, dando lugar a un aumento de dureza: dureza secundaria.

La precipitación de estos carburos requiere unos contenidos mínimos de carbono y del elemento aleante. Por ejemplo, un acero con 0,35% C no da lugar a dureza secundaria sino sobrepasa el 5% de Cr, mientras que con un acero de 0,1% C sólo es necesario el 0,45% de Mo. Los elementos que antes precipitan son Zr, Ti, Nb, Ta, V, W, Mo y Cr.

Si el revenido se realiza a temperatura alta, el acero está formado por ferrita y cementita o carburos con una estructura tan fina que no es resoluble en microscopía óptica, que suele conocerse como martensita revenida. Esta transformación conlleva

una pérdida de resistencia y dureza del acero y un incremento en las propiedades plásticas (alargamiento y resiliencia), cuanto mayor sea la temperatura del revenido, mayor variación.

○ **Etapas del revenido en aceros de alta aleación**

Los aceros de alta aleación y gran contenido en carbono pueden llegar a tener tras el temple, cantidades superiores al 40% de austenita retenida.

A) Primera etapa: A temperaturas inferiores a los 250°C, de la martensita sobresaturada en carbono (del temple), se precipita un carburo de hierro, llamado carburo Épsilon, ϵ , transformándose en martensita β de red cúbica, por la pérdida de carbono, suele contener alrededor de 0,25% de carbono y se oscurece al precipitar el carburo Épsilon en los límites de los primitivos subgranos de la austenita. La martensita β , igual que la martensita α , es acicular.

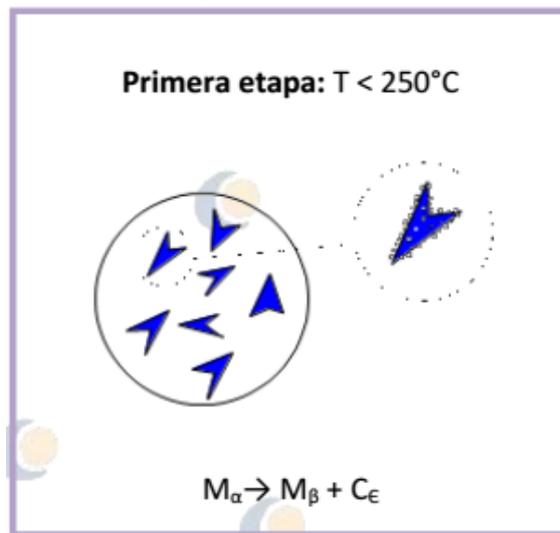


Figura 3 -Primera etapa del revenido (aceros muy aleados)

B) Segunda etapa: La austenita retenida sufre una precipitación de carburos de elementos aleantes, empobreciéndose en carbono, se le conoce como acondicionamiento de la austenita, es progresivo desde los 200°C hasta los 550°C.

C) Tercera etapa: La M_{β} se transforma en ferrita y cementita.



Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

En el enfriamiento posterior desde la temperatura de revenido hasta la temperatura ambiente, la austenita acondicionada se transforma en un agregado de ferrita y carburos de igual morfología acicular que la bainita inferior. Suele someterse a un doble revenido para eliminar la fragilidad asociada a su formación, así el agregado se transforma en ferrita y cementita globulizada, quedando el acero formado por ferrita y cementita (martensita revenida) y por carburos del acondicionamiento de la austenita durante el primer revenido.

Curvas del revenido

Las características mecánicas del acero sufren variaciones, aumentando éstas cuando se aumenta la temperatura. Mientras que hay una reducción del límite elástico y dureza, el alargamiento, estricción y resiliencia aumentan.

Las curvas de revenido reflejan dicha variación en función de la temperatura de revenido. Las anomalías que pueden encontrarse son las siguientes:

- Ligero aumento de dureza en algunos aceros con respecto a la obtenida en el temple en los revenidos a 00°C por la precipitación del carburo épsilon.
- aumento de dureza en aceros con austenita retenida cuando se transforma a 150°C-350°C.
- Aparición de la llamada dureza secundaria, en aceros aleados con elementos carburígenos, en la zona de los 500°C-600°C.
- Disminución de la resiliencia para algunos aceros en la zona de los 250°C-400°C, llamada fragilidad de los revenidos medios.
- Disminución de la resiliencia entre los 450°C y los 550°C, para aceros de Cr-Ni y Cr-Mn, llamada fragilidad Krupp.

Fragilidad del revenido

A veces la resiliencia disminuye en la zona de los 250°C - 400°C sin que aumente la dureza. Esta fragilidad es inherente a la continuidad y engrosamiento de la cementita precipitada en el contorno de las agujas de martensita β durante la tercera etapa del revenido. La fragilidad desaparece cuando se eleva la temperatura y se rompe y globuliza la red de cementita.

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

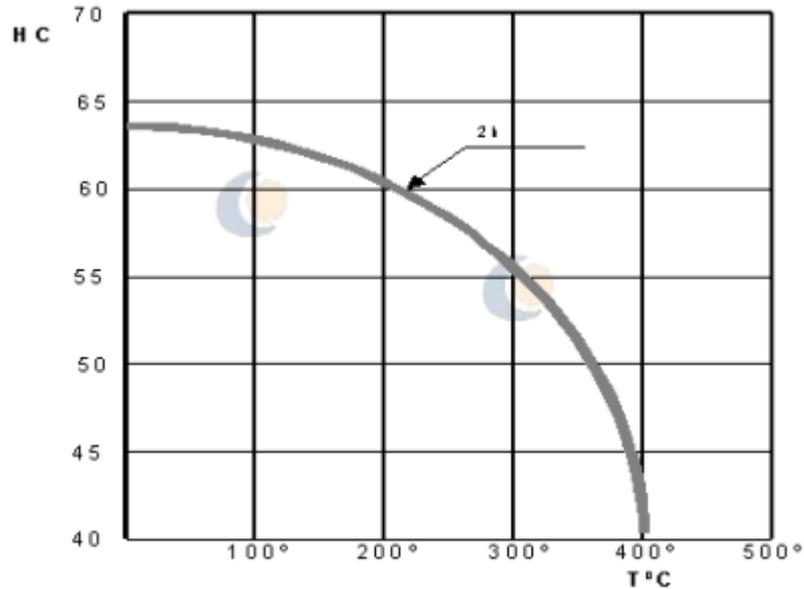


Figura 4 - Curva de revenido de acero al carbono: 0,73%C; 0,30%Mn; Si<0,25%

Fragilidad de Krupp

Los aceros Cr-Ni y Cr-Mn de construcción, presentan una disminución de la resiliencia cuando se revienen a temperaturas entre los 450°C y los 550°C, o bien durante el enfriamiento tras revenido a temperaturas superiores, el acero permanece un tiempo suficiente en dicho intervalo.

Este fenómeno, está ligado a la precipitación submicroscópica de nitruros y a la segregación del fósforo en el borde de grano de la ferrita en dicha zona de temperaturas.

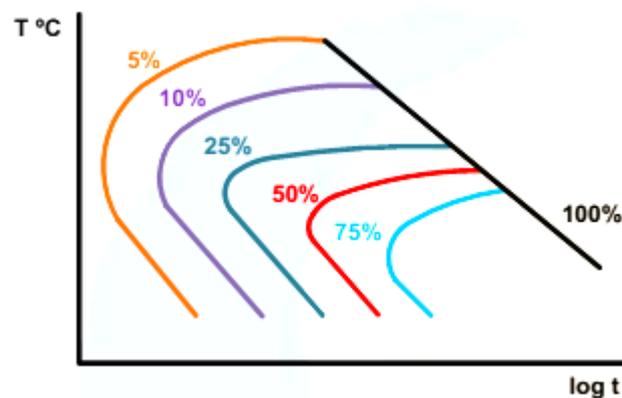


Figura 5 - Curvas de disminución de la resiliencia en función de T y t

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

Esta fragilidad no se presentan en aceros de igual composición química que contienen molibdeno. El enfriamiento en agua tras el revenido a superior temperatura evita la fragilidad en aceros con molibdeno pero no siempre son aconsejables estos enfriamientos bruscos de las piezas.

La fragilidad de Krupp tiene una influencia notable en la temperatura de transición de la resiliencia, separa las roturas dúctiles de las frágiles en el acero.

Factores del revenido

Las variables que intervienen en el revenido son el estado inicial del acero, el tiempo y la temperatura del tratamiento.

Con respecto al estado inicial del acero, la microestructura obtenida tras el temple, condiciona la evolución microestructural durante el revenido. La mayor o menor cantidad de austenita retenida, o la presencia o no de microconstituyentes intermedios (perlita fina o gruesa) que no sufren alteraciones, influyen sobre la variación de características obtenidas tras el revenido.

En general, es preferible utilizar revenidos a más alta temperatura tras un temple severo, que revenidos de menor temperatura tras temple menos enérgicos. Se obtiene una mayor resiliencia para igual resistencia mecánica, aunque no siempre sea posible proceder por el peligro de que se produzcan agrietamientos y deformaciones en los temple muy severos. La resiliencia está relacionada con la naturaleza de los microconstituyentes del acero y de la homogeneidad estructural.

Modificaciones dimensionales

Mientras que por efecto del temple, los aceros se dilatan, en el revenido se contraen. Solamente los aceros que poseen austenita retenida sufren una ligera dilatación en la zona de 200°C-300°C, por la transformación de ésta en el agregado de ferrita y carburos.

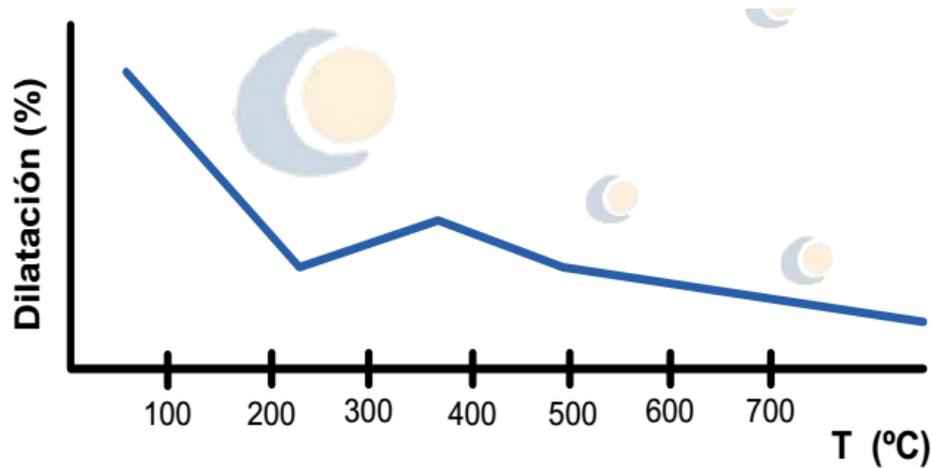


Figura 6 - Curva dilatométrica de un acero al carbono

La figura anterior, muestra la curva dilatométrica absoluta de un acero al carbono con 1,20%C, templado desde una temperatura de 1000°C (incorrecta para este acero) con objeto de obtener una cantidad importante de austenita retenida, y revenido a una temperatura de 650°C. Entre los 200°C y los 300°C se produce la transformación a ferrita y carburos.

- **RECOCIDO**

Una aleación se dice que está en estado recocido cuando se encuentra en equilibrio físico, químico, mecánico y estructural. Es difícil en la práctica asegurar estos equilibrios, ya que las velocidades de enfriamiento y calentamiento utilizadas industrialmente distan mucho de las velocidades termodinámicas, por lo que no se produce un material homogéneo.

El recocido consiste en realizar un calentamiento hasta la temperatura adecuada, seguido de un enfriamiento lento, generalmente en horno. Los tratamientos de recocido tratan de devolver, al menos parcialmente, el estado de equilibrio a la aleación y pueden clasificarse en función de sus objetivos en:

- Recocido de homogeneización
- Recocido de regeneración
- Recocido de cristalización
- Recocido de ablandamiento
- Recocido de atenuación y relajación
- Recocido de deshidrogenación

Otros tratamientos que, aunque no conducen a estados de equilibrio tienen ciclos térmicos similares a los recocidos son:

- Hipertemple
- Normalizado

- **NORMALIZADO**

Es un tratamiento térmico con el que se pretende obtener estructuras laminares. El tipo de estructuras obtenidas dependerá de la composición del acero, espesor, morfología, etc., y vendrá marcada por la curva de la S.

El tratamiento consiste en un calentamiento a temperaturas 880°C-900°C, con el fin de conseguir una austenización total, seguido de un enfriamiento al aire. Aplicando un normalizado a un acero con un contenido en carbono inferior al 0,20% se consiguen unos constituyentes laminares que disminuyen la excesiva plasticidad del acero debido al alto porcentaje de ferrita, así mejoramos la maquinabilidad y se facilita el fraccionamiento de la viruta.

- **HIPERTEMPLE**

Este tratamiento térmico, se efectúa a las temperaturas de recocidos de homogeneización pero se emplean velocidades de enfriamiento muy altas. Se calienta el acero a 1050°C y se enfría en agua para evitar la precipitación de los carburos. En productos de pequeño espesor se puede enfriar al aire.

1.1.3. PROCESO PRODUCTIVO FAED S.L.

En este apartado se describe de forma genérica la producción de cualquier pieza, ya que las diferentes fases de fabricación siguen el mismo orden. Desde un primer contacto entre cliente y empresa al solicitarse presupuesto para la fabricación de una pieza hasta la entrega del pedido.

1. Modelos.

Los modelos pueden ser fabricados con diferentes materiales como son: poliestireno, madera, metal, resinas sintéticas, cera, yeso, cemento, etc., pero lo más importante es que sean copias exactas de las piezas que se van a producir, ya que si éstos tienen algún defecto no se obtendrá el resultado final deseado.

FAED S.L. recibe los planos de las piezas que se van a fabricar diseñados en los departamentos de ingeniería de cada empresa/cliente y la oficina técnica de FAED S.L. se las encarga a talleres de modelistas especializados en fundición, que elaboran los modelos tanto en madera como en poliestireno expandido (EPS por sus siglas en inglés).

La fundición establece cuál va a ser la contracción de la pieza y se informa a la empresa modelista para que se aplique ese porcentaje de más en los modelos y así poder compensarlo. Es importante porque todo lo que sobre pase el espesor de la contracción, se consideran sobrantes y se necesitarán más horas de debastado en talleres mecánicos, lo que se traduce en un sobrecoste.

Los modelos de madera, una vez se reciben se comprueba su estado, si tienen imperfecciones se devuelven al fabricante porque FAED S.L. no dispone de los medios necesarios para repararlo. Una vez comprobado que el modelo está correcto se calcula su peso de manera teórica y se pasa al moldeo.

Los modelos de poliespan, a diferencia de los modelos anteriores, se pueden reparar pequeñas imperfecciones mediante cinta adhesiva para evitar que en su pintado penetre pintura al interior del modelo. Después de comprobado, se pasa a su pesado y se calcula el caldo necesario para su fusión, de esto se encarga un operario que pesa el modelo en una báscula destinada a ello.

En el siguiente paso, un operario con ayuda de una pistola dispersante de pintura, recubre todo el modelo con pintura refractaria, con un grosor específico que ronda los 2 milímetros. De este modo se forma una separación entre la arena del molde y el lugar donde que va a ocupar el caldo (así no se calcina la arena y no pasa a la matriz metálica). Se pasa a una sala de secado con temperatura algo mayor que la de ambiente en donde se secan los modelos. De aquí, se pasa al moldeo.

2. Moldeo.

Mazarotaje

El depósito de metal que suministra caldo a la pieza de una forma continua hasta el final de la solidificación, se llama Mazarota. Su posición debe ser elegida con cuidado, igual que su tamaño. Las mazarotas suministran el caldo a la pieza

según va enfriándose y se contrae para compensar los rechupes (cavidad ocasionada por la contracción líquida) que de otra manera se producirían en la pieza. La causa de los rechupes es la contracción que experimenta el metal desde el estado pastoso o semisólido hasta la solidificación definitiva. Cuanto menor sea la propia tendencia del metal a la contracción habrá menor riesgo de la formación de este defecto.

Para producir las piezas de acero es necesario introducir el caldo en las cajas de moldeo, este proceso se conoce como alimentación. Es necesaria una buena alimentación para que la pieza se funda de manera satisfactoria. Se suministra el caldo, una vez los moldes correspondientes han sido llenados de metal, durante las transformaciones volumétricas que tienen lugar en las mismas desde dicho fin de llenado hasta el fin de la solidificación.

Mazarotas y alimentación

A lo largo del proceso de alimentación, todos los metales sufren variaciones o transformaciones volumétricas, suelen ser contracciones que se producen durante todo el proceso, a excepción de algunos metales que sólo lo sufrirán en parte de él.

Las contracciones tienen lugar desde la fase líquida del metal (colada) hasta que empieza su solidificación, es decir, se producen en el cambio de estado líquido a sólido. Esto es así porque el metal se solidifica en capas paralelas a la superficie del modelo, excepto la parte superior que permanece en fase líquida hasta el final de la solidificación (exceptuando sus bordes). El caldo se enfría a la vez que se contrae, por ello el nivel superior desciende y forma una cavidad más o menos cónica (rechupe), siendo necesario evitarlo para evitar defectos en la pieza.

La cantidad de contracción depende del volumen de metal que forme la pieza y de sus características. También depende de otros factores como el exceso de temperatura del líquido en el momento en que se termina el llenado de la pieza hasta la temperatura a la que da comienzo su solidificación.

Se puede evitar el rechupe suministrando la cantidad de caldo adecuado a medida que se va produciendo la contracción volumétrica en su estado líquido, es decir hasta que la pieza solidifica por completo.

Para evitar las contracciones volumétricas, se realiza una alimentación utilizando las mazarotas.

Para determinar cuántas mazarotas debe tener una pieza, su forma y tamaño dimensional y en qué lugares deben ir colocadas se utiliza la técnica de alimentación de piezas, que es el conjunto de conocimientos que permiten prever estos datos. Normalmente son necesarias varias mazarotas con el fin de evitar que el rechupe penetre en la pieza. De esta forma, mientras se alimenta la pieza se creará en la mazarota el rechupe quedando confinado en ésta.

Manguitos

- **Manguitos exotérmicos:** son casquillos hechos de termita (polvos de aluminio y de óxidos de hierro, entre otros) y un aglomerante. Se recubren de polvos exotérmicos de cobertura, fabricados de termita, después de colar (llenar la mazarota). Con los polvos exotérmicos se consigue una acción mantenedora de calor más eficiente, con lo que disminuye el volumen de la mazarota.

Se reducen los costes si se disminuye el diámetro del cuello de la mazarota por medio de un diseño adecuado del manguito o por implantación de un estrangulamiento cerámico, así se disminuyen el volumen y se simplifica el corte de las mazarotas de la pieza.

- **Manguitos aislantes:** estos casquillos confinan térmicamente las mazarotas, alargando su vida útil en estado líquido y posibilitan su reducción de tamaño. Se añade tras colar polvos exotérmicos y se les puede implantar un estrangulamiento en la parte inferior. Están fabricados de diferente material y tienen distinta confinación térmica que los anteriores.

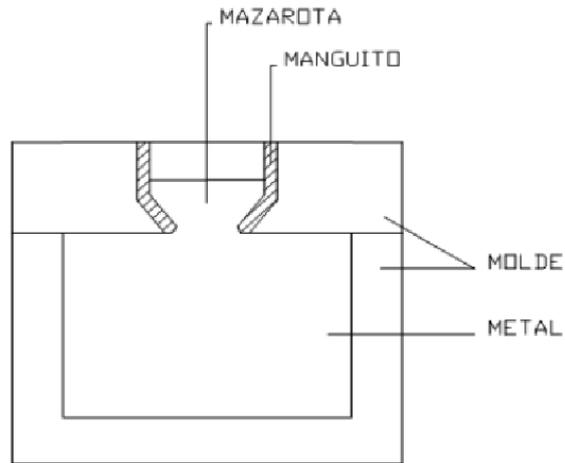


Figura 7 - Esquema de una caja de moldeo

Arenas

Para la realización del molde es necesario disponer de materiales adecuados para el moldeo.

Los moldes perdidos de fundición destinados a recibir colada deben poseer las siguientes características:

- Ser plásticos
- Tener resistencia y cohesión, para poder reproducir y conservar la reproducción correcta del modelo.
- Resistir la acción de las altas temperaturas (ser refractarias).
- Permitir la evacuación rápida de aire contenido en el molde y de los gases que se producen en el vertido de la colada por la acción del calor sobre el molde, es decir, debe tener permeabilidad.
- Disgregación fácil para permitir la extracción y el acabado de las piezas.

Las arenas de fundición son los materiales con estas características. Están constituidas por granos de cuarzo (Dióxido de silicio, SiO_2 , muy refractario) y arcillas (silicatos hidratados de aluminio).

Tipos de arenas

- **Arena de Sílice:** Cumple perfectamente las exigencias del moldeo en la fundición, por ello, además de tener la mejor relación calidad-precio, es el tipo de arena más utilizado.
- **Arena de Cromita:** producto con gran resistencia a la penetración del metal y alto factor refractario. Se utiliza para controlar defectos superficiales originados por las elevadas temperaturas del metal colado. Se usa en las zonas de moldes y machos expuestos al calor radiante del metal fundido durante tiempos considerables. Sus requerimientos de aglomerantes son realmente bajos y son compatibles con todos los sistemas de moldeo.
- **Arena de Olivino:** es una roca eruptiva volcánica básica. Una característica importante es que no contiene cuarzo por lo que no provoca silicosis. Es muy adecuado para el moldeo de piezas que requieren baja expansión, buenas propiedades de enfriamiento y buena resistencia a la penetración del metal líquido. (Este tipo de arena no se utiliza en FAED S.L.)

Tipo de arena	Dilatación térmica lineal		
	20300 °C	20600 °C	20800 °C
Sílice	14	23	17
Cromita	7,1	7,5	7,5
Bauxita	7,1	7,3	7,2
Circonio	3,4	4,1	4,5
Cerabeads	3,5	4	4,3

Tabla 1 - Comparación de la dilatación térmica de arenas.

Las arenas de cromita y olivino tienen varias ventajas sobre las arenas de sílice.

- Buenas propiedades de enfriamiento.
- Buena resistencia a la penetración del metal.
- Aguantan más tiempo el calor radiante del metal y tienen un alto punto de fusión.

Se emplean en zonas de los moldes que no interesa que se produzcan penetraciones o defectos superficiales por culpa de las altas temperaturas del

metal al colar. Se pueden utilizar, gracias a sus propiedades, para fabricar machos.

Son mucho más caras que las arenas de sílice, lo que es una desventaja importante.

Elementos de moldeo

Los elementos de moldeo son elementos o artificios que ayudan a evitar defectos en el moldeo, normalmente en zonas complicadas de las piezas, como son:

- **Salidas de gases:** se hacen para evitar las sopladuras (pequeñas cavidades producidas por los gases desprendidos durante el enfriamiento de las piezas, que no pueden llegar a la superficie. Forma de burbuja alargada, normalmente con sus ejes perpendiculares a las paredes de las piezas). Suelen ser gases de monóxido de carbono y dióxido de carbono, y también pueden ser gases de hidrógeno de la reducción del vapor de agua atmosférico, que se haya introducido en el horno. Para proporcionar salida a los gases se realizan, sobre la superficie superior del molde y alrededor de las mazarotas, pinchazos o agujeros de pequeño diámetro.
- **Enfriadores:** son artificios que aceleran el enfriamiento en una zona concreta de la pieza, se utilizan desde mucho tiempo atrás en las fundiciones porque dan buenos resultados.

Los enfriadores externos se desprenden de la pieza en el desmoldeo, suelen ser un taco de cobre, acero o grafito.

Los enfriadores internos quedan englobados o formando parte de la masa de la pieza porque se funden en ella mientras solidifica. Son de formas simples como clavos de herrar, espirales u otras formas similares. El efecto de éstos se basa en la creación de superficies interiores que aumentan la superficie efectiva de la zona masiva y disminuyen su módulo de enfriamiento. La zona masiva se enfría antes y se igualan la velocidad y el tiempo de enfriamiento al resto de la pieza (contribuye a ello el hecho de ser metálicos). Deben usarse con precaución, si están oxidados o tienen grasa y materia orgánica pueden originar poros en la zona masiva y perderá gran parte de su resistencia mecánica a flexión.

Para evitar problemas de condensación (si son elementos metálicos se condensa sobre el enfriadero la humedad del molde), se usan enfriaderos refractarios que tienen como ventaja que son moldeables, por contra su conductividad térmica que es menor que la de los enfriaderos metálicos pero es mayor (dos o tres veces mayor) que las mezclas normales de arena de moldeo.

Los enfriaderos refractarios pueden ser fabricados por los fundidores (se suelen fabricar con virutas de hierro a la mezcla de arena, normalmente en la fabricación de machos, actuando como enfriaderos internos) o de productos comerciales.

- **Machos:** su función es realizar o formar las zonas huecas de las piezas. Se colocan en portadas adecuadas (piezas destinadas a apoyarse en el molde, es decir, sostienen a los machos en la posición adecuada). La fabricación de los machos es una de las operaciones más delicadas al moldear, es muy importante para conseguir piezas sin defectos.

Al fabricar los machos se deben tener en cuenta las siguientes características:

- Han de ser simples y de fácil preparación.
 - Deben aguantar el empuje y la presión, por lo que necesitan una buena resistencia mecánica.
 - Que no produzcan rebabas.
 - Para aguantar la temperatura del metal líquido sin vitrificarse, fundirse y evitar las penetraciones del metal, deben ser de material refractario.
 - Soportar las cargas o esfuerzos sobre los machos y ayudar a la salida de gases, mediante el uso de portadas.
 - Ser muy permeables para facilitar la salida de gases y evitar la formación de sopladuras.
 - Algo elástico para no obstaculizar la contracción del metal.
 - Que su extracción sea fácil y completa (por sacudidas o con martillo neumático).
- **Cajas de moldeo:** son recipientes que contienen la mezcla de arena, catalizador y resina, es decir, son los recipientes que contienen el molde. Dependiendo de la altura necesaria para cubrir el molde, se utilizan dos o más cajas, siendo utilizadas siempre las cajas inferior y superior, mientras que las intermedias

pueden variar, incluso pueden ser innecesarias. Su tamaño es muy diverso porque deben ajustarse al tamaño y forma de los modelos o piezas a obtener, por lo que será necesario tener un gran número de cajas con diversos tamaños en las fundiciones en las que se producen piezas de formas y tamaños variables. Siempre tienen el mismo perímetro, pudiendo variar la altura.

Las cajas están formadas por un bastidor de paredes verticales, provisto de esquinas para sostener el molde (formas: cuadradas, rectangulares, etc.). En su pared vertical interior tienen ondulaciones para fijar y aguantar el molde, se asegura así el manejo y transporte de las cajas cuando contienen el molde. Además, llevan soldadas asas o puños en los que se enganchan normalmente cadenas.

Generalmente, las cajas pequeñas y medianas se fabrican de hierro fundido, y las grandes de acero fundido, pero las pequeñas si se hacen ligeras se fabrican de aluminio.

Para que las cajas encajen/enlacen perfectamente se cepillan y rectifican las caras que van apoyadas unas sobre otras y a veces llevan dos o más escuadras en forma de cuña u horquilla.

Moldeo en arena química

Se denomina moldeo en arena química porque esta se endurece incorporando una mezcla de aglomerante químico a base de resinas y catalizador. Los moldes fabricados con este tipo de arena química endurecida permiten fundir piezas de mayor tamaño y complejidad, peculiaridad que hace de este un proceso idóneo para realizar series de producción que requieren un alto nivel de precisión y, por tanto, mayor valor añadido, lo que redundará en múltiples posibilidades de cara al cliente, ya que puede contar con más opciones de piezas (en forma y tamaño) para muchas y diversas aplicaciones. Además se ayudan con otras herramientas como martillos pisadores neumáticos, paletas, rotalines y otros útiles para ayudar a la compactación y moldeo.



Figura 8 - Moldeo con modelo de madera

Moldear consiste en dejar "huella" en la arena con un modelo.

Una vez que se ha dejado la huella marcada en la arena, se quita el modelo, se colocan los machos (para conformar oquedades interiores), se pintan los interiores con pintura refractaria para que la arena no sintetice (evitando que se incruste en la pieza), se prepara el bebedero y la alimentación (sistema de tubos por donde baja el caldo para llenar el molde) y se cierra la caja con la otra parte de la huella. Una vez hecho esto, se procede al vertido del caldo.



Figura 9 - Modelo de madera



Figura 10 - Pintado del molde después de retirar el modelo

- **Catalizador y Resinas (Aglutinantes):** La mayoría de estos productos desprenden gases (además de otros problemas dañinos para la pieza), por lo que se debe utilizar la menor cantidad posible de aglutinantes.
- **Características del moldeo químico:** Varias son las características que diferencian el moldeo químico de otros tipos de moldeo de arenas, como son el moldeo en verde o el moldeo por presión.
 - Poca reactividad con las impurezas que se encuentran en las arenas.
 - Las emanaciones gaseosas no son peligrosas para el ambiente de trabajo (reparación, colada y desmolde).
 - Preparación y uso, fácil.
 - Larga duración de la arena preparada.
 - Duración y facilidad en el almacenamiento de machos.
 - Permeabilidad suficiente para la evacuación de gases.
 - Buenas características mecánicas de frío.
 - Nula reacción del molde o macho con el metal colado.
 - Fácil el desmolde y la limpieza de utillaje.
 - Fácil recuperación de arenas.
- **Resina Fenólica-Alcalina:** En FAED S.L. se utilizan estas resinas entre todos los tipos existentes (aptas para la fundición). Están especialmente fabricadas para

trabajar con arenas recuperadas en porcentajes que pueden llegar hasta el 80-90%. Es muy similar a la furánica, diferenciándose en que la fenólica tiene el inconveniente de la menor resistencia mecánica pero en cambio tiene un menor coste, no tiene olor, tiene mejor desmoldeado, mejor recuperación de arenas y es insensible al tipo de arena que se utilice.

- **Catalizador:** Se utiliza para que la resina se polimerice creando un molde rígido y duro que permite en el molde la caída de la colada y la solidificación del metal.



Figura 11 - Resinas y catalizadores

El catalizador que se usa con la resina Fenólica-Alcalina es un éster orgánico de glicerina mezclado con propilencarbonato (proporción de éster orgánico 65-75%, proporción de propilcarbonato 25-35%). Se puede tener un mes en su envase.

3. Fusión y colada

Se tienen en cuenta una serie de factores para preparar la carga:

- **Peso teórico de la pieza fundida:** Se calcula a la recepción del modelo de poliestireno para poder cuantificar la carga del horno. Si la pieza se fabrica mediante modelos de madera, el cálculo del peso se realiza mediante cálculo aproximado del volumen.



Figura 12 - Fusión del acero

- **Composición del acero:** existen muchos tipos de aceros, lo cual supone que cada uno tendrá una composición química particular.
- **Estado refractario:** Se debe revisar el estado del revestimiento del horno para localizar posibles fisuras o ataques (antes de su uso). Un refractario suele durar alrededor de 75-85 coladas.
- **Composición de la chatarra:** Identificar la composición química media de la chatarra que se va a emplear.
- **Cálculo de la carga:** Se realizan los cálculos necesarios para obtener el peso de chatarra que se debe introducir en el horno, así como la cantidad de ferroaleaciones.

Se utilizan puentes-grúa y el electro-imán para la carga del horno. La chatarra, que está depositada en contenedores, está formada por conjuntos de piezas y partes metálicas de acero, inservibles y sin ninguna utilidad. Proceden del desguace de automóviles, barcos, puentes, máquinas, electrodomésticos, etc., además de residuos, despuntes, recortes, virutas (entre otros) de la industria metalmeccánica y rechazos de la misma fabricación del acero.

Fusión

Al introducir la chatarra en el horno, se espera a que se produzca el proceso de fusión para que la chatarra vaya reduciendo su tamaño en el interior del horno, después se añaden las ferroaleaciones necesarias hasta completar la composición deseada. Apenas se producen reacciones metalúrgicas durante la fusión y se limitan a la formación de escorias de los óxidos metálicos de la carga y del deterioro del material refractario del horno al ponerse en contacto con la sílice.

Se añade un desescoriente o fundente (carbonato cálcico) que hace la escoria más espesa para que sea fácil su extracción al desescoriar, también ayuda a la formación de una capa protectora del baño. Pasados aproximadamente 120 minutos, una vez todos los compuestos sean caldo, se corta la corriente y se toma del caldo una muestra para analizarla (con espectrómetro), se retira la escoria que se haya formado (flota sobre la superficie del baño en forma de capa espesa relativamente fría que protege al metal de la acción de la atmósfera del horno. La escoria está formada por silicatos de hierro y de manganeso saturados de sílice, principalmente.

Se comprueban los resultados del espectrómetro y de acuerdo con el análisis de porcentajes, y si algún elemento se ha desajustado, se hacen las adiciones de las ferroaleaciones para ajustar la composición. Una vez ajustado, se restablece la corriente.

Pasados pocos minutos después de restablecer la corriente, se comprueba la temperatura con el pirómetro para comprobar que es la correcta (unos 1620°C), si es correcta se corta la corriente y se cuela el acero.

Hornos de inducción eléctrica

El horno de inducción eléctrica utiliza una corriente inducida para fundir la chatarra. Se inyecta corriente de frecuencia alterna y variable a una bobina, la cual contiene una sección de cobre reforzado y alta conductividad colocado en forma helicoidal. La corriente que pasa por la bobina forma un campo electromagnético.

La energía calorífica se consigue por efecto de la corriente alterna y el campo electromagnético que generan corrientes secundarias en la carga. El crisol es cargado con la chatarra, el campo electromagnético penetra la carga y le induce la corriente

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

que lo funde. Una vez fundido, el campo y la corriente inducida agitan el metal (la agitación es producto de la frecuencia suministrada por la unidad de potencia, la geometría de la bobina, densidad, permeabilidad magnética y resistencia del metal fundido).

El horno de inducción está formado por tres elementos básicos:

- El equipo eléctrico
- El crisol
- La estructura metálica

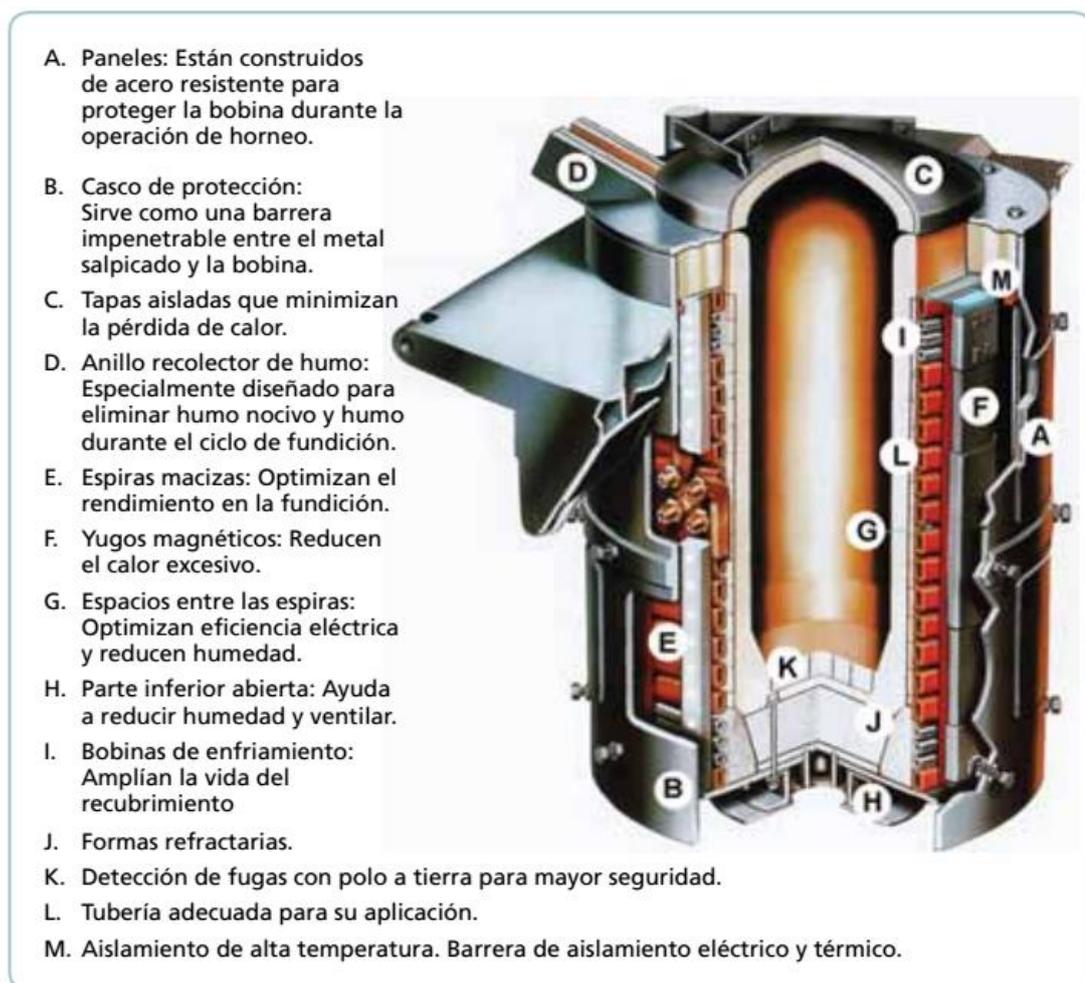


Figura 13 - Horno de inducción

Concretamente se utiliza el horno sin canal, consta de un crisol totalmente rodeado de una bobina de cobre, enfriada por agua, a través de la cual pasa corriente que genera el campo magnético, lo que calienta el crisol y funde el metal en su interior. Se emplean prácticamente con todas las aleaciones ordinarias, su

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

temperatura máxima sólo está limitada por el refractario y la eficacia del aislamiento frente a las pérdidas del calor. Presenta una fuerte acción de agitación electromagnética durante la calefacción por inducción, por lo que tiene excelentes características de mezcla para aleaciones y para agregar nuevas cargas de metal.

En una fundición de acero las instalaciones de potencia son de baja frecuencia (BF) o de media frecuencia (MF). El equipo eléctrico en un horno de baja frecuencia (50Hz en Europa) es un transformador que iguala el voltaje en línea al voltaje del horno, necesitando para ello condensadores. Con una frecuencia tan pequeña, la energía eléctrica se transmite al baño líquido y es necesario mantener siempre una cierta cantidad de metal en el fondo del crisol.

En los hornos de baja frecuencia, el factor de potencia varía en el curso de la fusión, por lo que es necesario un regulador automático para ajustar el reglaje de los elementos de alimentación eléctrica para asegurar en todo momento un factor de potencia cercano a la unidad. Estos hornos están siendo sustituidos por los de media frecuencia porque son más baratos, más compactos, producen mayor potencia y es más fácil trabajar con ellos.

Control de composición

Para realizar el control de la composición química, se recogen una serie de muestras mediante el crisol cuando el proceso de fusión está ya casi completa (antes de realizar la colada). Mediante el crisol se obtienen unas probetas que son analizadas en un espectrómetro.



Figura 14 - Toma de muestra del caldo

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

El espectrómetro realiza una serie de chispazos en la superficie totalmente lisa de los aceros, utilizando Argón con una presión de trabajo de 2,1 bares. Los gases emitidos en estos chispazos son recogidos por el espectrómetro y calibrados por medio de unas curvas patrón que facilita el programa del equipo. Para cada calidad del acero, se debe calibrar previamente el equipo utilizando una curva o estándar tipo, diferente en cada ocasión.



Figura 15 - Probeta analizada en el laboratorio.

Colada

Se le llama así al trasvase del metal líquido del horno a la cuchara y posteriormente a la caja de moldeo para fundir la pieza. La colada del horno de inducción al molde que se utiliza en FAED S.L. es sencilla porque el horno tiene un sistema neumático de basculación y además su parte superior está abierta, por lo que la colada se realiza basculando o volcando el horno y colocando una cuchara delante de éste mediante un puente grúa (pasa el metal líquido del horno a la cuchara). La cuchara se desplaza mediante el puente grúa hasta el molde, se coloca y se procede a la basculación del metal líquido al sistema de colada (bebedero).

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

Es importante calentar la cuchara antes de bascular el metal líquido a ésta, para evitar el deterioro del revestimiento refractario que se produciría por la elevación brusca de la temperatura si se llenase de acero líquido estando la cuchara fría.

Cuchara

Las cucharas son recipientes de chapa revestidos con material refractario, ésta puede tener un orificio en el fondo (buza), que se maneja a voluntad por medio de un juego de palancas, o puede no tener orificio.



Figura 16 - Cuchara

La cuchara antes de su uso es precalentada durante una hora y media o dos horas, de esta manera se evita el deterioro del revestimiento por el cambio drástico de la temperatura, tras lo cual se procede a colar en ella todo el acero líquido del horno. Suelen tener un saliente en la parte superior en forma de pico para realizar el vertido.



Figura 17 - Traslado a la cuchara (del horno).

Están prefabricadas y vienen revestidas por materiales exotérmicos que logran mantener la temperatura del caldo en la cuchara el mayor tiempo posible. El tamaño de la cuchara debe ser proporcional al peso que se quiera colar, ya que no es conveniente realizar varios vertidos al molde porque se pueden producir defectos en la pieza, conocidos como unión fría o separación definida entre el primer vertido y el segundo por diferencia de enfriamientos.

Cuando la cuchara contiene el metal líquido, se desplaza unos pocos metros con el puente grúa hasta el molde, se centra respecto al bebedero y se vierte el líquido. Puede quedar una cantidad de metal líquido sobrante, éste se vierte, se endurece y se introduce en un contenedor que contiene sobrantes del mismo tipo de acero para reutilizar como chatarra.

Después de colar en cada molde, se añade o rellena la parte superior de las mazarotas con polvos exotérmicos (mejora la función de las mazarotas).

Sistema de colada

La entrada del caldo a la pieza (sistema de colada) tiene como misión básica el llenado de la cavidad del molde, aunque también debe evitar turbulencias del flujo líquido, erosión del molde y aspiración de gases. Ha de establecer gradientes

favorables de temperatura, favorecer la entrada del metal y controlar la velocidad de entrada del mismo a la cavidad del molde.



Figura 18 - Traslase de la cuchara al molde

Los componentes de un sistema de colada son los siguientes (se puede prescindir de alguno de ellos):

- **Embudo de colada:** Facilita el llenado y garantiza constancia de flujo, minimiza turbulencias y remolinos, separa y reflota la escoria y la suciedad. Este elemento

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

puede hacerse en el mismo molde o en pieza aparte (de arena de moldeo, de machos o una combinación de ambas). Se le da forma de copa o tronco de cono inverso mediante la ayuda de un casquillo de hierro.

- **Cambios de dirección o sección:** para evitar los fenómenos de turbulencia y aspiración de granos de arena es necesario que estos quiebros sean curvados y sin perfiles rectos.
- **Empalme bebedero - canal:** también da lugar a turbulencias y arrastres de arena que contribuyen a obtener piezas defectuosas pero se minimiza recurriendo al uso de medias cañas, choque o pocillo.
 - **Pocillo:** prolongación de la caña de pequeña longitud. Se llena de metal líquido al verter la colada y una vez lleno su función es servir de amortiguador de la caída del líquido, evitando así el arrastre de arena por colisión directa con el líquido.
- **Bajada del bebedero:** En el moldeo manual suele ser cilíndrica. Se realiza con un tubo o redondo de madera.

4. Desmoldeo y acabados.

Tiempo de enfriamiento

Las cajas deben ir identificadas en todo momento con un código y el tipo de calidad para ser distinguidas, ya que antes del desmoldeo hay que prestar mucha atención a la calidad del acero con que ha sido fundida la pieza.

Normalmente, el desmoldeo se realiza al día siguiente de haber realizado el fundido del acero. Sólo se desmoldeará en caliente cuando el diseño de la pieza lo requiera, para evitar agrietamientos.

Se verificará que no se desmoldean piezas en las que la temperatura es superior a la establecida en las tablas de calidad. Se descubrirán las piezas ligeramente al principio para que se disipe parte del calor y reducir el impacto térmico.

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

Cuando las piezas están muy calientes la deformación por golpes es más acusada, por lo que siempre se tiene cuidado durante el tiempo de contacto de la pieza con la parrilla.

Se debe evitar la exposición de las piezas y las cajas de moldeo a la lluvia, por lo que se transportarán hasta el lugar de almacenamiento.

Hay unos tiempos mínimos de enfriamiento antes del desmoldeo determinados por la calidad y el peso de las piezas, lo cual tiene mucha importancia para evitar posibles defectos (deformaciones, grietas, etc.).

Desmoldeo

Cuando se haya terminado el proceso de solidificación, la pieza ya puede ser manipulada y se procede al desmoldeo de estas piezas.

El desmoldeo consiste en extraer o sacar las piezas del molde y separar las piezas del molde desecho.

Con el puente grúa, se coloca el molde sobre un contenedor. Se le dan unos golpes al molde de arena, produciéndose su agrietamiento y rotura y se retiran las cajas de moldeo. Se termina de romper el molde y se extraen las piezas que forman un conjunto (con puente grúa), quedando en el contenedor los pedazos de arena del molde.



Figura 19 - Pieza desmoldeada

El conjunto de las piezas se lleva al taller de acabados y los restos del molde que están en el contenedor se trasladan a recuperación de arenas. En talleres

mecanizados se realiza con sacudidores (un emparrillado horizontal de vibración neumática, sobre los que se deposita el molde y al conectarse la arena va cayendo para ser recogida y llevada al sistema de recuperación).

Recuperación de arenas

La arena recuperada del desmoldeo es más heterogénea y está agrupada en terrones compactos, sobre todo los que estuvieron más cerca o en contacto con el metal. Es necesario reducir la arena al estado granular, esto se consigue introduciendo los restos en una máquina recuperadora de arenas.

La desterronadora está compuesta por dos cilindros paralelos, pero que no se llegan a poner en contacto. Su superficie puede ser lisa pero normalmente es rugosa. En el caso de que pasen trozos metálicos se pueden separar los cilindros porque están comprimidos elásticamente.

La arena reducida a grano pasa a una cinta transportadora, y se hace pasar por un separador magnético porque suelen quedar restos de metal. Después, la cinta transportadora lleva la arena hasta una criba donde se separan los elementos no ferrosos (terrones quemados y costras).

La máquina hace pasar la arena por un ventilador con el cual se hace una clasificación de la arena al separar los granos gruesos de los granos finos que ya no sirven. Los granos finos son desplazados por tubería a un contenedor, y los gruesos por medio de una turbina pasa a una tolva situada a una cierta altura, para después alimentar al mezclador de arenas.

La arena recuperada se mezcla con la nueva antes de entrar al mezclador, especialmente para garantizar la distribución uniforme del aglutinante en toda la masa, de modo que todos los granos queden recubiertos por igual.

Desmazarotado

Se separan las piezas, el bebedero y las mazarotas. Las piezas de acero requieren para su corte una de las siguientes herramientas: sierra, amoladora con disco abrasivo u oxicorte.

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

Para el corte del bebedero y las mazarotas se utiliza amoladora de disco ayudándose de mazos de grandes dimensiones para arranca dichos elementos. El oxicorte se emplea cuando es necesario realizar cortes a las piezas con un espesor elevado.

Si son debidamente identificados, las mazarotas y bebederos pueden ser reutilizados. La calidad del acero con que han sido fundidos limita el uso para la fusión en otras calidades distintas.

Desbarbado

La pieza, después del desmoldeo, está llena de costras de arena, rebabas e incluso alguna penetración del metal en el molde, por ello es necesario mandar la pieza al taller de rebarba para hacerle una limpieza superficial para dejarla libre de estos materiales. Después se hace el granallado.



Figura 20 - Desbarbado de una pieza

Granallado

Para eliminar la arena que queda adherida en la pieza después del desmoldeo, se emplean dos bolas de hierro o acero (granalla) que se emplean como abrasivo. La granalladora impulsa y lanza mediante un chorro potente de aire a presión la granalla sobre la superficie o zonas de las piezas que necesitan ser limpiadas.

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

En esta empresa, se utiliza una granalladora automática de ganchos, muy apropiada para piezas metálicas. Las piezas se depositan en un gancho giratorio y pasan a una cabina cerrada. Esta máquina admite piezas de tamaño muy pequeño y dificultosas, así como las piezas que requieren un gran cuidado.

También se dispone de una cabina para chorreo manual. Una manguera que debe ser orientada manualmente y de la que sale la granalla. Se utiliza con piezas de mayor tamaño.

5. Tratamientos térmicos.

Para los tratamientos térmicos se dispone de 3 hornos de diferentes tamaños y de tipo resistencia eléctrica.



Figura 21 - Horno de tratamiento térmico

Se realizan cuatro tipos de tratamientos:

Normalizado

Para realizar el normalizado, se calienta la pieza unos 35 °C por encima de la temperatura crítica superior, se mantiene un tiempo, y se enfría en aire estático hasta la temperatura ambiente. Con esto se consigue un acero más duro y resistente que el que se obtiene con un enfriamiento más lento en un horno, después del recocido. Se

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

utiliza para piezas fundidas, forjadas o mecanizadas, y sirve para afinar la estructura y eliminar las tensiones que suelen aparecer al solidificarse, en la forja, etc. La velocidad de enfriamiento es más lenta que en el temple y más rápida que el recocido. Se suele utilizar en aceros al carbono de entre 0,15 - 0,40% de carbono. Las temperaturas del normalizado varían según el porcentaje en carbono, según sea desde 0,50 a 0,10% de carbono, varían desde 840 ° a 935 °C.

Recocido

Es un tratamiento térmico cuyo fundamento es un calentamiento a una temperatura adecuada y con una duración determinada, seguido de un enfriamiento lento de las piezas.

El recocido es de los tratamientos térmicos el primero que se realiza a la piezas. Se lleva a cabo un recocido de ablandamiento para bajar la dureza tras la solidificación y así realizar el mecanizado con mayor facilidad.

La finalidad de este proceso es eliminar estados anormales (constitucionales y estructurales) en los metales y aleaciones, que en general endurecen los materiales y provocan en sus estructuras tensiones. Con el recocido se consigue ablandar los metales y aleaciones haciendo que se puedan trabajar mejor, y así obtener las características solicitadas para realizar el mecanizado.

Revenido

Consiste en calentar el acero (después de haber sido templado) a una temperatura inferior al subcrítico, para enfriarlo generalmente al aire. El objeto del revenido es mejorar la tenacidad (o resiliencia) de los aceros templados, este tratamiento conlleva una disminución de la dureza, la resistencia mecánica y el límite elástico. También se eliminan tensiones internas del material, producidas por el temple.

La temperatura mínima es de 180 °C y el tiempo de mantenimiento a la temperatura de revenido es un mínimo de horas.

Temple

El temple es un proceso de calentamiento y enfriamiento. Se realiza el enfriamiento a una velocidad mínima determinada, generalmente muy rápida, que se denomina velocidad crítica.

Con este tratamiento térmico se consigue transformar toda la masa del acero con el calentamiento en austenita, después gracias a un enfriamiento suficientemente rápido, se transforma la austenita en martensita. En la práctica es imposible conseguir una velocidad de enfriamiento suficientemente rápida en la totalidad de la masa de las piezas, por lo que no se consigue transformar toda la austenita en martensita.

La finalidad del temple es sobre todo aumentar la dureza, la resistencia mecánica y el límite elástico, a costa de una disminución de la resiliencia y el alargamiento de las piezas. Para conseguir un enfriamiento rápido, se genera una corriente de aire forzado con la colocación de ventiladores de gran potencia.

6. Mecanizados.

El mecanizado es un conjunto de operaciones o acabados realizados con herramienta. Se realizan para darle a la pieza las dimensiones exactas. También es un proceso en el cual se usa una herramienta de corte para remover el exceso de material de una parte de trabajo, de tal manera que el remanente sea la forma deseada. Esta acción conlleva a una exposición de la nueva superficie.

La característica común es el uso de la herramienta de corte que forma una viruta, la cual se mueve o quita de la zona de trabajo. Para realizar la operación, se requiere de un movimiento relativo, que se logra en la mayoría de los casos por medio de un movimiento primario (velocidad) y un movimiento secundario (avance).

Cada una de las operaciones de mecanizado es capaz de generar cierta geometría y textura superficial.

FAED S.L. no mecaniza piezas, las envía a talleres especializados o proveen a dichos talleres con piezas de fundición.

1.2. ANÁLISIS DE ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

El presente proyecto ha sido realizado en colaboración con la empresa FAED S.L., por su experiencia en el sector de los aceros. Gracias a los datos recopilados y que se han aportado se ha podido desarrollar este trabajo.

La empresa Fundiciones de Aceros Especiales Dasgoas S.L. (FAED S.L.), fundada en 1996, es una fundición de acero moldeado por gravedad, con gran experiencia en la fabricación de acero moldeado para todo tipo de aplicaciones, siendo el rango de pesos de las piezas desde los pocos kilos hasta los 9000 Kg (9 Tn) de pieza neta. Y contando en sus instalaciones con alrededor de 60 trabajadores.

Es una fundición de todo tipo de aceros y una de las pioneras dentro de la fabricación de piezas de acero moldeado utilizando el proceso de espuma perdida. Los productos ofrecidos son aceros al carbono, aceros de baja aleación, aceros inoxidables martensíticos y austeníticos, dúplex y súper dúplex, acereros refractarios, aleaciones de aceros especiales y altamente aleados, acero moldeado, moldeo de arena, etc. Estos productos siempre se fabrican en base a las diferentes normas internacionales y especificaciones propias del cliente.

Principalmente se dedica al sector de la troquelaría y matricería cuyo destino está centrado sobre todo en la automoción. También se realizan trabajos para más sectores, como es el sector del control de fluidos (bombas y piezas para válvulas), el sector de la generación de energía (turbinas kaplan, francis y pelton, bandas y coronas, etc.), el sector naval (bocinas, trócolas, arbotantes, núcleos...), el sector de la minería y obras públicas y el sector de las plantas siderúrgicas.

FAED S.L. es una empresa en la cual, la adaptación a los nuevos mercados y la búsqueda de métodos de mejora continua han sido una constante. Se apuesta por la innovación con el objetivo de buscar siempre la satisfacción del cliente y ofrecer como producto final la mejor calidad posible.

Se encuentra en el Polígono Industrial de Requejada, que se sitúa a 22 Km de Santander y aproximadamente a 7 Km de Torrelavega.

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

Este proyecto consiste en evaluar el comportamiento de un acero al carbono en cuanto a sus propiedades mecánicas, al someterle a distintos tratamientos térmicos. Para ello, la dureza, tenacidad, resistencia a la tracción, y otros parámetros fueron medidos después de determinados tratamientos térmicos en dicho acero al carbono. Este estudio ha sido realizado en FAED S.L.

Para realizar este estudio se analizan los datos de las distintas propiedades mecánicas obtenidas con probetas de las piezas de dicho acero que fabrican en FAED S.L., para conocer la variación que sufren dichas propiedades mecánicas con las temperaturas de los distintos tratamientos y poder ofrecer al cliente un producto final de calidad, acorde a sus necesidades y con unas propiedades mecánicas que se ajusten a normativa, seguridad y necesidades ambientales.

Son varios los factores que afectan a las propiedades, y éstas no varían de forma constante, por ello es necesario realizar este tipo de estudios, si se quiere fabricar piezas con unas características concretas, y que sean resistentes a las fuerzas, tensiones o esfuerzos que se producen en unas condiciones ambientales que ya se conocen o se suponen.

2. DESARROLLO

2.1. METODOLOGÍA

Este estudio se realiza con un acero aleado, el acero G14NiCrMo10-6 o DIN SEW 685, cuya composición se refleja en la siguiente tabla:

Elementos	% Mínimo - %Máximo
C	0.12-0.16
SI	≤0.2
Mn	0.65-0.70
P	≤0.010
S	≤0.010
Cr	1.30-1.80
Mo	0.45-0.55
Ni	2.70-3.00
Ce	0.05-0.1

Tabla 2 - Composición acero G14NiCrMo10-6

Se trata de un acero bajo aleado con altas propiedades mecánicas y de tenacidad a bajas temperaturas. Es una aleación habitual para piezas de responsabilidad de plataformas offshore petróleo y autogeneración, maquinaria pesada, etc.

2.1.1. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los hornos utilizados para llevar a cabo el temple y el revenido, son de resistencia eléctrica.

Las piezas han sido sometidas a temperaturas de temple de 880°C, 920°C. Después se someten a un enfriamiento rápido ya sea enfriando en agua, o utilizando ventiladores de gran potencia que generan una corriente de aire forzado.

Después de haber sido templado, se vuelve a calentar el acero para aplicar revenido que produce cambios en la estructura interna del material. Las temperaturas del revenido que se han aplicado son: 475°C, 525°C, 575°C y 625°C, y normalmente se mantienen un mínimo de 2 horas. Después se dejan enfriar al aire.

Los cambios de temperatura a los que se somete al acero, provoca variaciones en sus propiedades que se analizarán mediante ensayos físicos, y cuyos resultados permitirán extrapolar datos mediante las ecuaciones obtenidas de su estudio.

2.1.2. ENSAYOS FÍSICOS

Los métodos utilizados para obtener los valores de los parámetros bajo estudio, son:

- Para el valor de la dureza: ensayo de dureza Brinell.
- Para los parámetros de límite elástico, resistencia a tracción, estricción y alargamiento: ensayo de tracción.
- Tenacidad o resistencia a la fractura: impacto Charpy.

Ensayo de dureza

El ensayo de dureza es el más extendido de los ensayos mecánicos convencionales. Es una medida de la resistencia que presentan los materiales a ser deformados por otro cuerpo más duro. Hay varios ensayos para determinar la dureza: Brinell, Vickers, Rockwell y Knoop. Se diferencian principalmente en el tipo de material y forma del cuerpo penetrador.

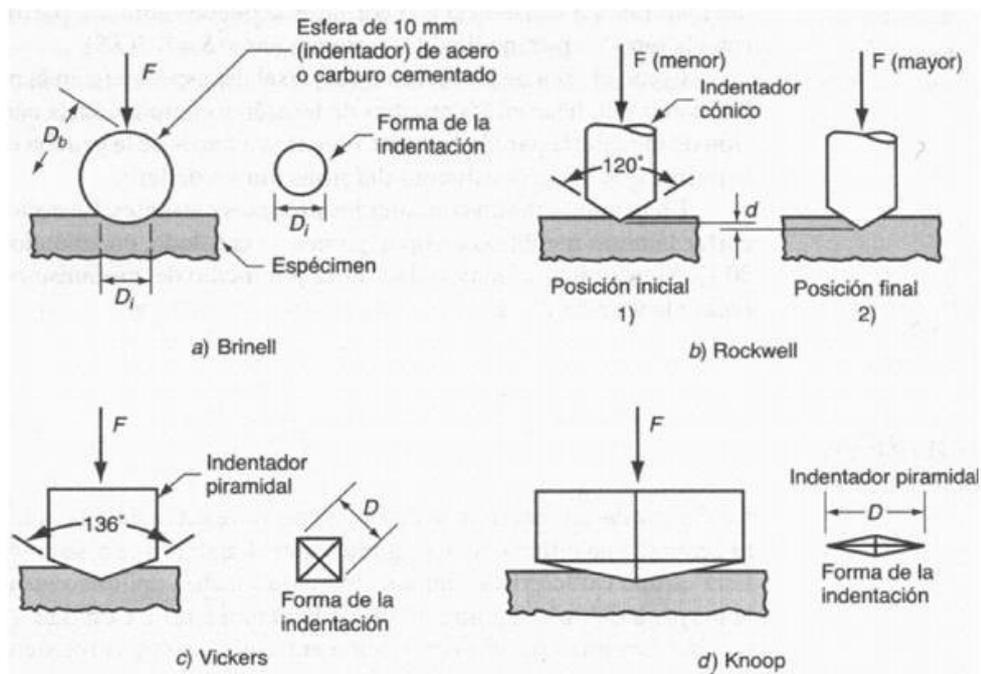


Figura 25 - Diferentes penetradores ensayo de dureza

En FAED S.L. se emplea el método de Brinell para medir la dureza.

El ensayo de dureza Brinell consiste en comprimir una bola de acero templado (muy duro), de un diámetro determinado, en este caso 10mm, contra el

material a ensayar, por medio de una carga y un tiempo determinado. Se mide el diámetro de la huella y se procede a calcular la dureza del material.



Figura 26 - Ensayo de dureza

Aunque existe una fórmula para calcular la dureza por este método, se utilizan tablas que relacionan la carga citada y el diámetro de la huella (éste último valor, se mide con una lupa provista de un retículo graduado o con la ayuda de un microscopio).

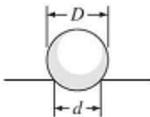
Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador		Carga	Fórmula del número de dureza
		Vista lateral	Vista en planta		
Brinell	Esfera de 10 mm fabricada de acero o carburo de wolframio			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$

Figura 27 - Características dureza Brinell

Es importante que el indentador o penetrador no sufra deformaciones residuales durante el ensayo de medición.

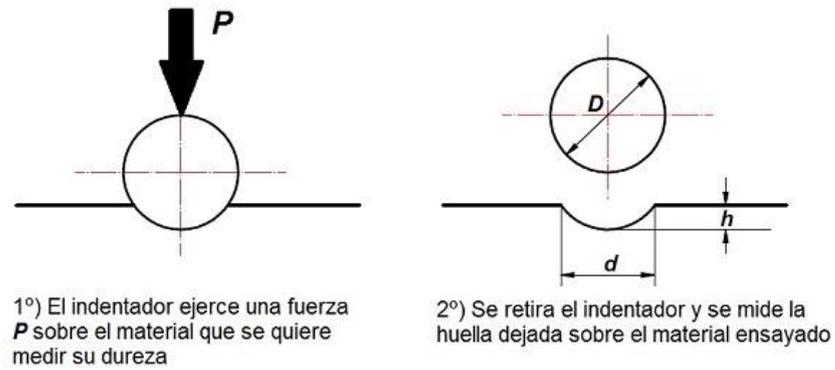


Figura 28 - Huella ensayo dureza

Cuanto mayor es la huella producida en el ensayo, menor es la dureza del material.

Ensayo de tracción

El ensayo de tracción mide la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada.

Este ensayo consiste en aplicar a una probeta (con diámetro y longitud conocidos), una fuerza que se conoce como carga. Esta carga es una fuerza axial de tracción creciente, es decir, en dirección a su eje longitudinal, y se aplica hasta que se rompe.

Las probetas constan de una parte central calibrada, ensanchándose en sus extremos llamados cabezales, donde son sujetas por las mordazas de la máquina de tracción.

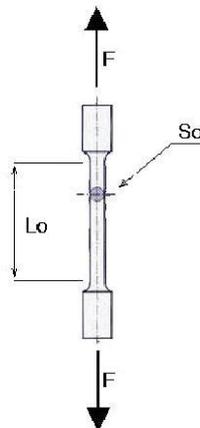


Figura 29 - Probeta ensayo de tracción

Estas máquinas están provistas de dispositivos capaces de registrar la carga aplicada en cada carga. Sobre la parte central de la probeta, se coloca un dispositivo capaz de medir el alargamiento sufrido por el material en cada instante (extensómetro).

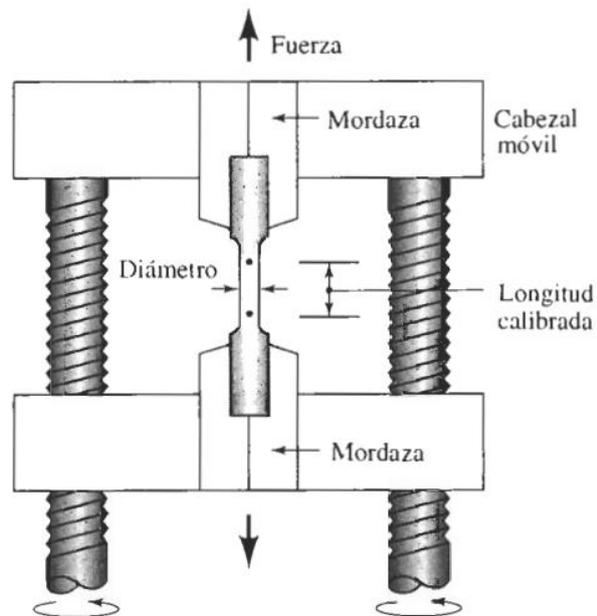


Figura 30 - Esquema ensayo de tracción

El ensayo se acaba, cuando la probeta se rompe.

En la aplicación de este ensayo se obtienen varios parámetros:

- Resistencia a la tracción
- Límite elástico
- Alargamiento
- Estricción

Las probetas son enviadas a servicios externos de verificación para obtener estos valores, no realiza este ensayo en sus instalaciones.

Ensayo de choque o Charpy

La prueba de impacto o de choque determina la tenacidad de un metal, que es una medida de la cantidad de energía que un material puede absorber antes de

fracturarse. Este parámetro es importante para saber la capacidad que tiene un material de soportar un impacto sin que se produzca la fractura.

Este ensayo consiste en colocar una probeta Charpy con muesca en V a lo largo junto a los brazos paralelos de la máquina. A continuación, se suelta el péndulo pesado desde una altura determinada, el cual golpea a la probeta en su trayectoria descendente, fracturándola. Conocida la masa del péndulo y la diferencia entre las alturas inicial y final se determina la energía presente en el proceso de fractura.

La energía consumida para romper la probeta, es conocida como resiliencia. En general, resiliencias bajas indican propensión del material a ser más frágil bajo cargas dinámicas.

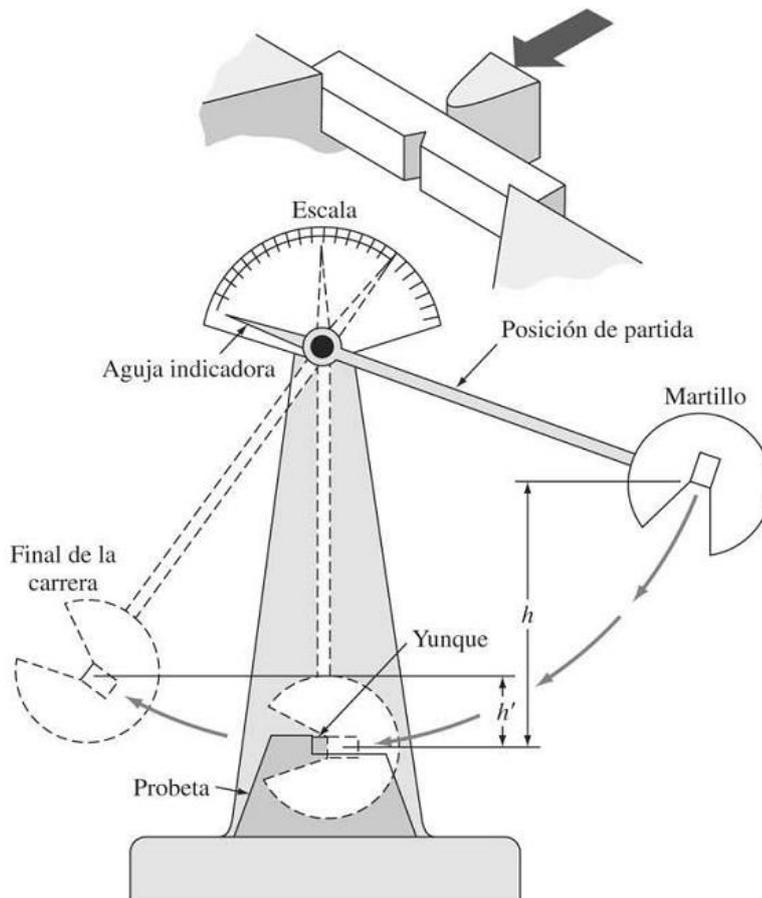


Figura 31 - Esquema de un aparato estándar para la prueba de impacto

Los valores que se obtienen son una buena referencia para juzgar en muchos casos el posible comportamiento de los metales.

2.2. RESULTADOS

Los resultados obtenidos al realizar los ensayos, se muestran en la siguiente tabla:

Temple °C Enfriado	Revenido °C	Dureza HB	Límite elástico Mpa	Resistencia a tracción Mpa	Elongación %	Estricción %	Tenacidad J
880 Agua	475	390,5	1123,24	1293,785	5,25	12,545	7,35
	525	361	958,865	1103,05	8,9	45,145	23,9
	575	302	822,2	973,49	14,7	36,435	31,1
	625	265,5	696,555	854,815	15,65	36,66	39
920 Agua	475	388	1108,33	1248,79	7,35	18,625	8,15
	525	326	918,505	1084,61	9,15	25,5	10,575
	575	332,5	816,13	964,59	13,8	25,79	17,65
	625	241	672,42	833,02	16,7	38,1	46,25
880 Aire	475	375,5	1022,555	1263,4	9,85	19,06	4,85
	525	331	886,74	1116,78	9,95	26,805	10,8
	625	265	699,415	879,495	15	40,975	27,75
920-940 Aire	475	375	1049,245	1254,9	7,1	13,715	5,55
	525	272,5	717,79	908,315	13,65	37,005	18,2
	575	290,5	749,79	902,625	14,95	42,515	37,7
	625	248	717,515	870,465	13,3	32,485	33,85

Tabla 3 - Resultados ensayos físicos

Se han realizado varias pruebas de cada caso reflejado, y aquí se muestra la media de los valores obtenidos en las repeticiones. (Tablas completas en Anexo I).

Con los datos de la tabla anterior, se han generado las gráficas que se muestran a continuación. En ellas se puede observar cómo ha cambiado cada una de las propiedades mecánicas estudiadas en relación a la temperatura de revenido a la que se somete el material.

De estas gráficas, también es posible la obtención de la línea de tendencia y la ecuación que las representa en cada caso, para que sea posible extrapolar datos

cuando sea necesario predecir el comportamiento de estas propiedades en el acero que se estudia.

➤ **Temple a 880°C y enfriado en agua**

Este material ha sido sometido previamente a un tratamiento térmico de 880°C de temperatura y se ha enfriado en agua. Posteriormente, se somete a otro tratamiento térmico, el revenido.

Los resultados muestran la variación de las propiedades de estos materiales según se aplique el revenido a temperaturas de 475^a, 525°C, 575°C y 625°C.

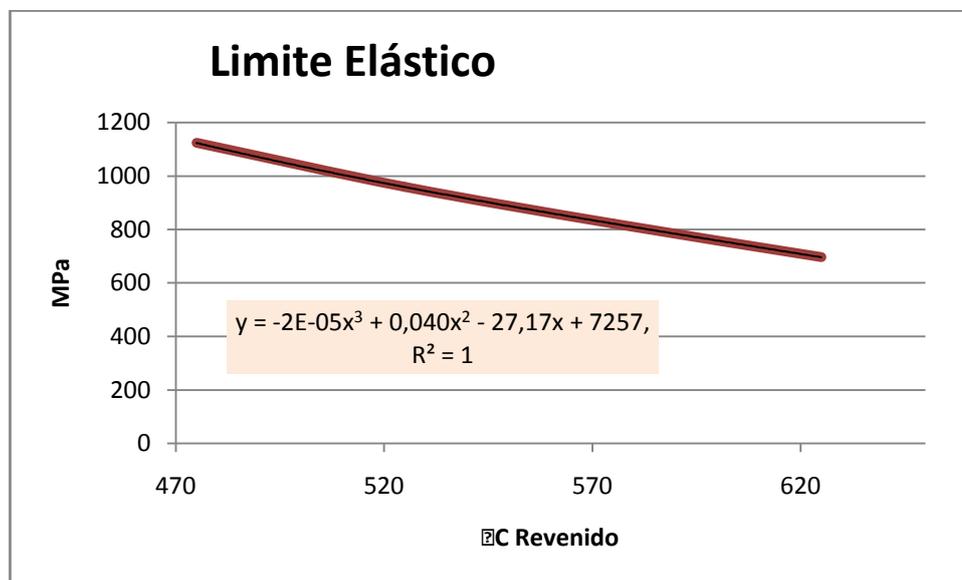


Figura 32 - Límite elástico - T^a Revenido (TTT 880°C - Agua)

Se puede observar que el límite elástico disminuye de forma progresiva. En cada caso, cuanto mayor es la temperatura a la que se aplica el revenido a la pieza, el límite elástico es menor. Llegando a reducirse desde 1123Mpa que se obtienen a 475°C hasta 696,5Mpa.

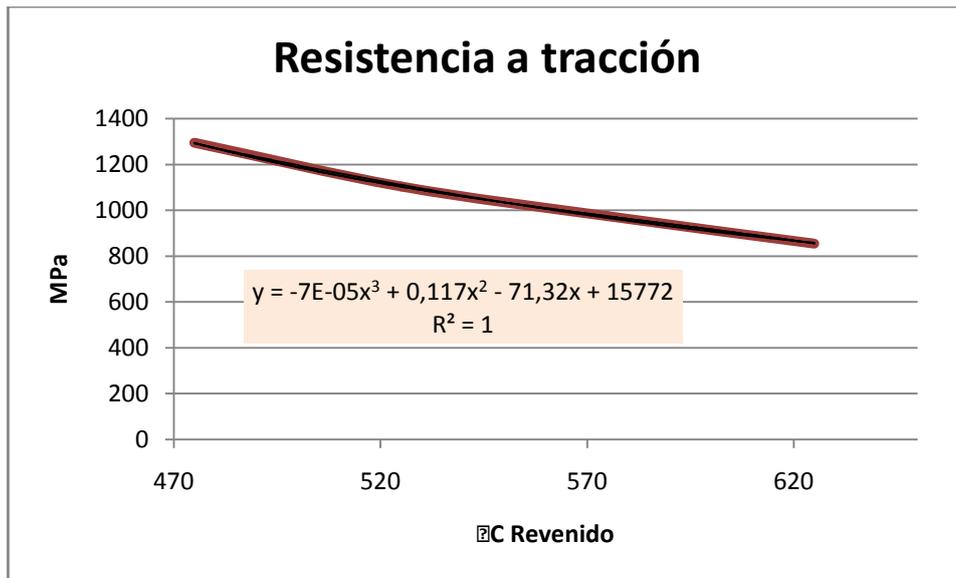


Figura 33 - Resistencia a la tracción - Tª Revenido (TTT 880°C - Agua)

La resistencia a la tracción también se ve afectada por el revenido, sufriendo una disminución cada vez mayor, cuanto más alta es la temperatura a la que se aplica el revenido.

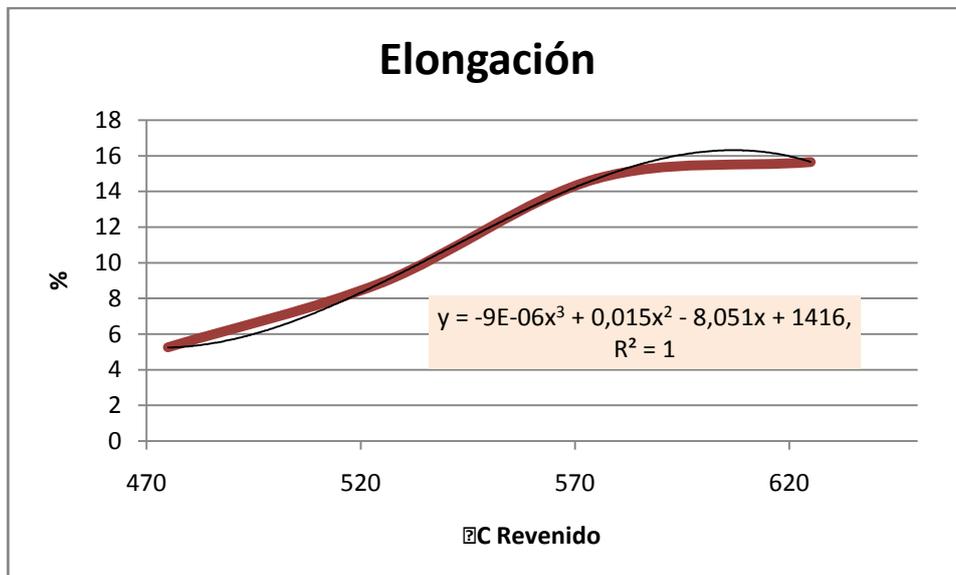


Figura 34 - Elongación - Tª Revenido (TTT 880°C - Agua)

En esta gráfica se observa como el alargamiento que sufre una pieza sometida a una fuerza exterior de tracción, aumenta después de tratar el material que está bajo estudio a revenido. A mayor temperatura de revenido, mayor es el porcentaje de alargamiento, aunque esta vez no aumenta de forma regular sino que a temperaturas más altas este valor casi no varía.

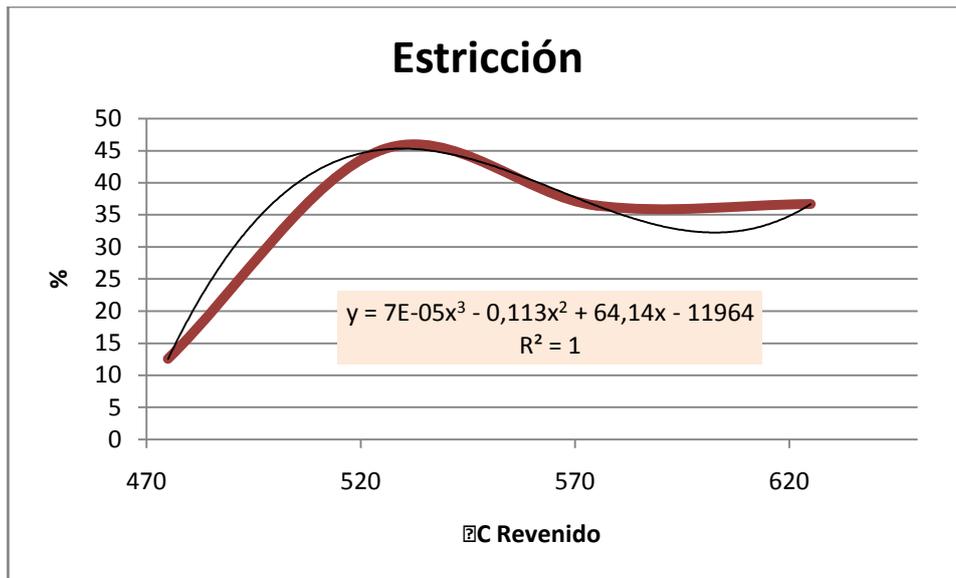


Figura 35 - Estricción - Tª Revenido (TTT 880°C - Agua)

La estricción, o reducción de área se ve afectada por el revenido de forma irregular, ya que no aumenta de forma lineal sino que aumenta a 475°C y 525°C rápidamente. Es a 525°C donde se consigue el valor más alto, 45,15%, se produce una mayor reducción de área. Para temperaturas más altas de revenido, disminuye dando dos valores muy similares, alrededor de 36,5% de estricción.

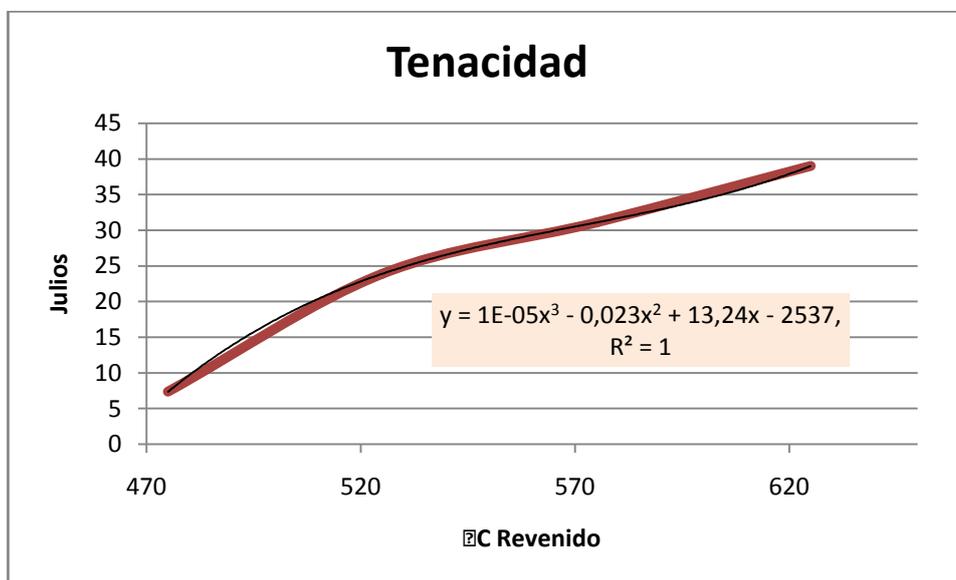


Figura 36 - Tenacidad - Tª Revenido (TTT 880°C - Agua)

Como todas las propiedades que se estudian en este proyecto, la tenacidad sufre variaciones según la temperatura a la que se le aplique el revenido a la pieza.

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

En este caso, su valor aumenta desde un 7,35J a 39J. Aumentan estos valores, al aumentar la temperatura de revenido.

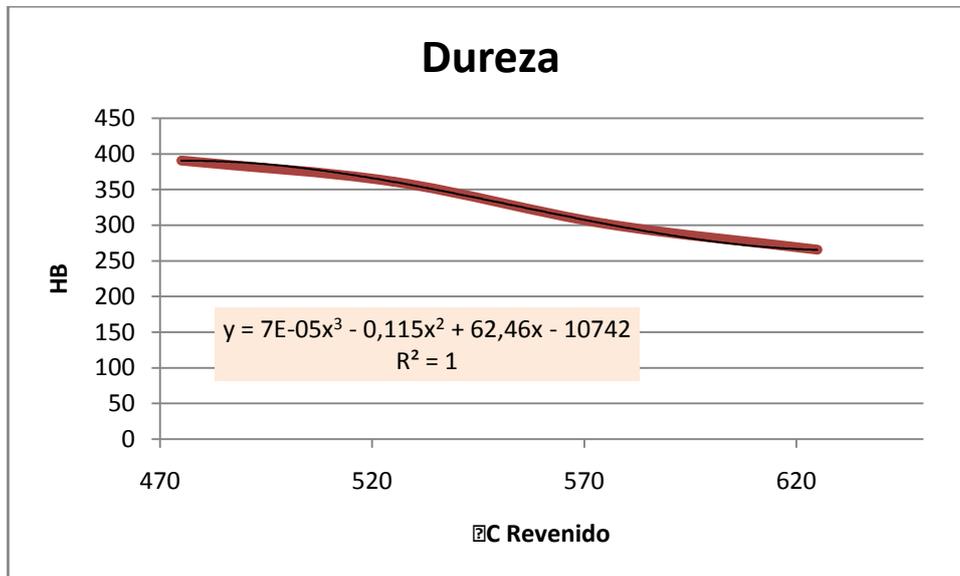


Figura 37 - Dureza - Tª Revenido (TTT 880°C - Agua)

Someter a las piezas a revenido, afecta a los valores de dureza disminuyendo éstos. Al aplicar temperaturas más altas de revenido, la dureza disminuye, llegando a variar estos valores desde 390,5Mpa hasta 265,5Mpa.

➤ **Temple a 920°C y enfriado en agua.**

Este material ha sido sometido previamente a un tratamiento térmico de 920°C de temperatura y se ha enfriado en agua. Posteriormente, se somete a otro tratamiento térmico, el revenido.

Los resultados muestran la variación de las propiedades de estos materiales según se aplique el revenido a temperaturas de 475ª, 525°C, 575°C y 625°C.

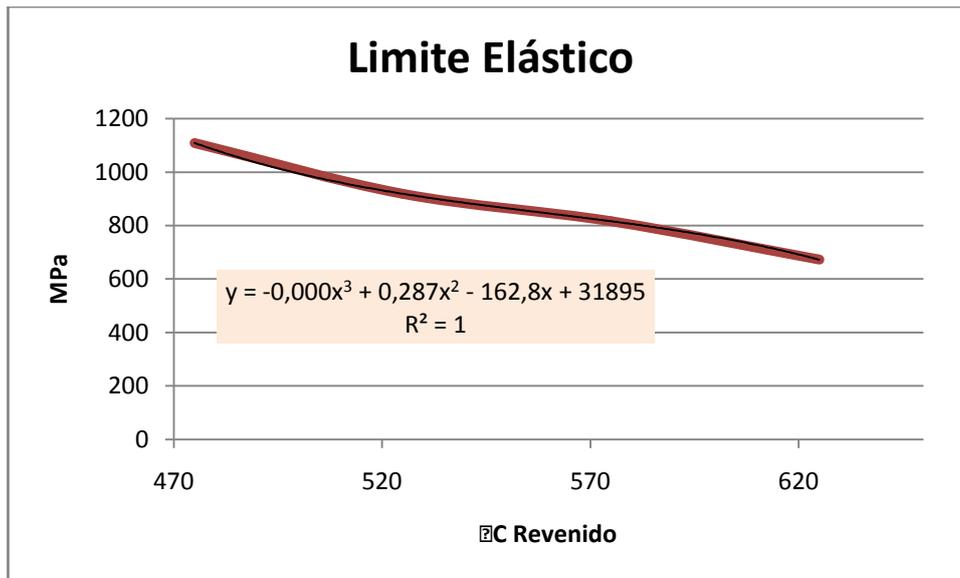


Figura 38 - Límite elástico - Tª Revenido (TTT 920°C - Agua)

Se observa que el límite elástico disminuye al aplicar el revenido. Cuanto mayor es la temperatura a la que se aplica el revenido a la pieza, el límite elástico es menor. Llegando a reducirse desde 1108Mpa que se obtienen a 475°C hasta 672Mpa.

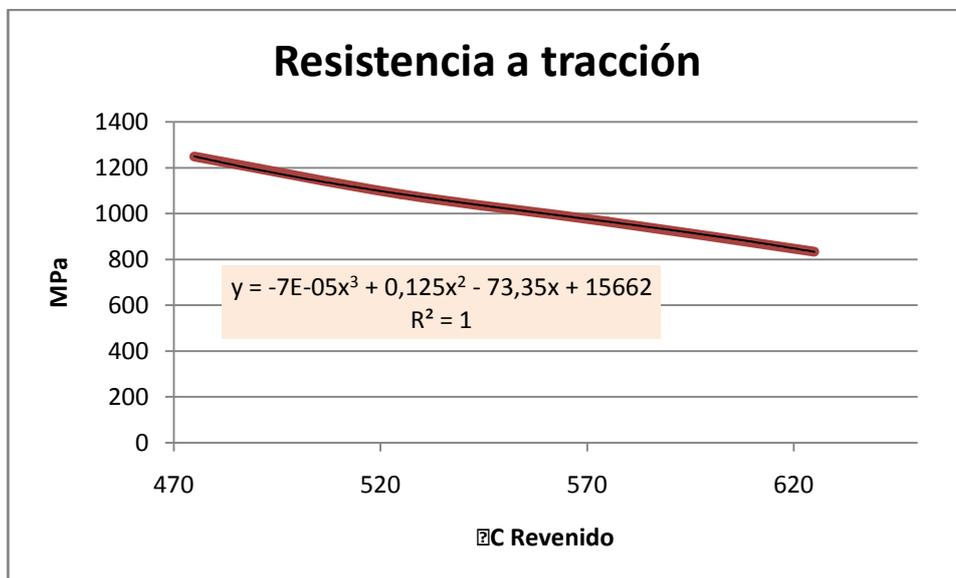


Figura 39 - Resistencia a tracción - Tª Revenido (TTT 920°C - Agua)

La resistencia a tracción disminuye, según los resultados obtenidos. Y disminuye cada vez más al aplicar a este material temperaturas de revenido más altas. A 475°C se obtiene un valor de 1248Mpa y se reduce hasta obtener a 625°C un valor de 833Mpa.

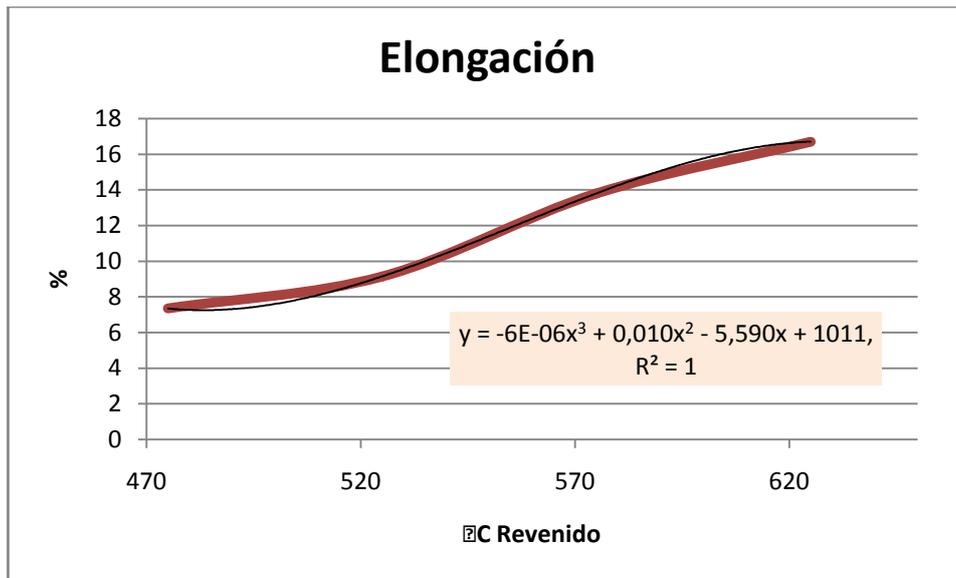


Figura 40 - Elongación - Tª Revenido (TTT 920°C - Agua)

En este caso, los valores de alargamiento que se obtienen después de tratar el material con varias temperaturas de revenido aumentan al aumentar la temperatura de este tratamiento térmico. Desde un 7,35% que se obtiene con un revenido de 475°C hasta un 16,7% al someterlo a temperaturas de 625°C.

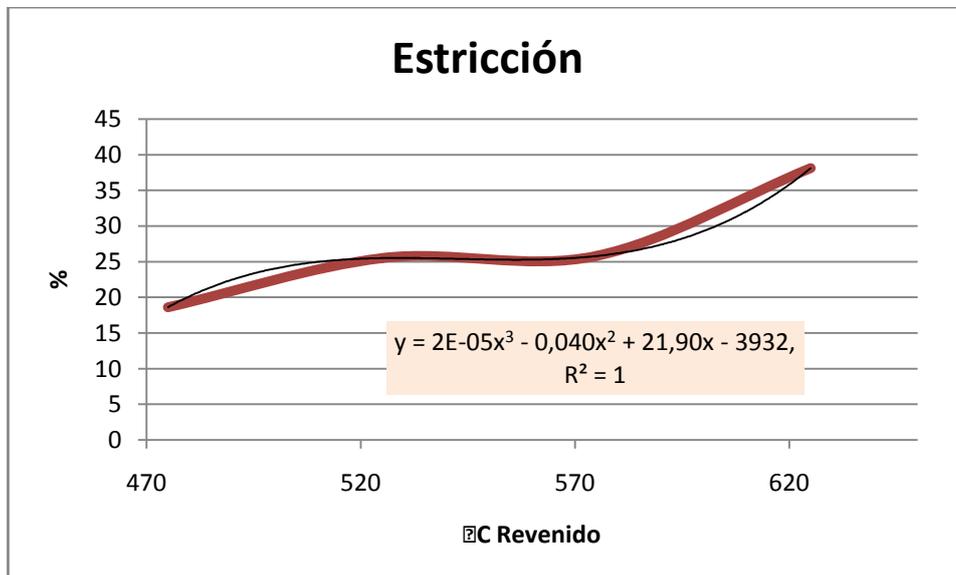


Figura 41 - Estricción - Tª Revenido (TTT 920°C - Agua)

Tras el revenido, al someter las probetas a pruebas de tracción, el área reducida aumenta. Se observa mayor variación en las pruebas con temperaturas de revenido de 475°C y 625°C, ya que con las temperaturas intermedias, los valores de

estricción permanecen estables, similares. Es de 475°C a 525°C donde aumenta el porcentaje y con el revenido a 625°C.

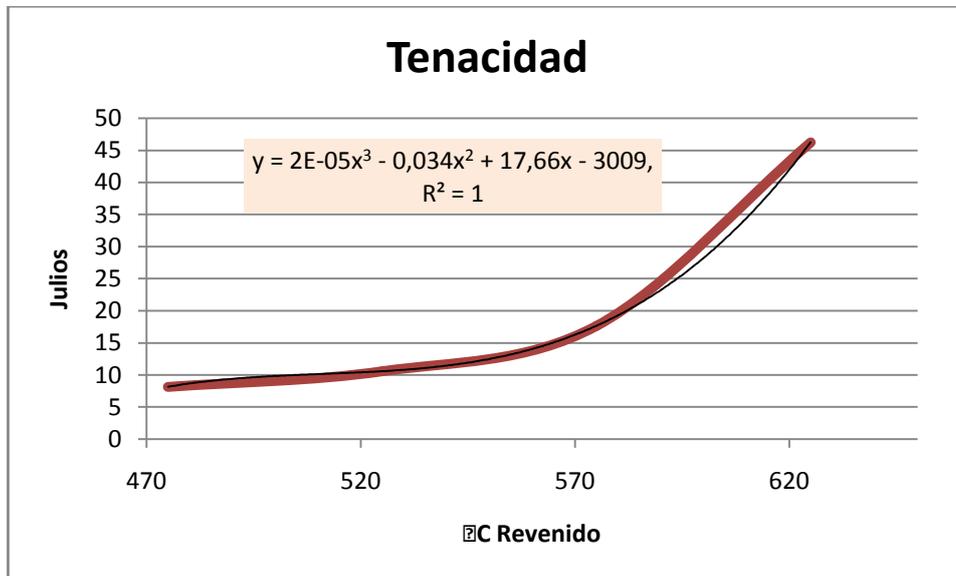


Figura 42 - Tenacidad - Tª Revenido (TTT 920°C - Agua)

Las pruebas realizadas de impacto Charpy nos muestran que la tenacidad aumenta al someter a las piezas a una mayor temperatura de revenido pero, en este caso, a 425°C y 525°C aumenta lentamente sufriendo un aumento mayor a 575°C y 625°C donde obtiene un mayor valor de impacto.

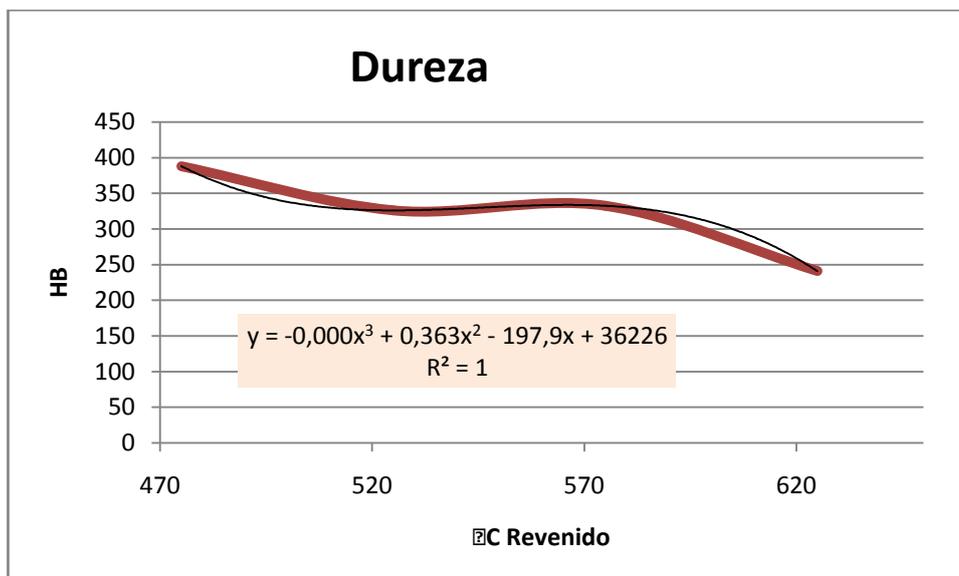


Figura 43 - Dureza - Tª Revenido (TTT 920°C - Agua)

En general, la dureza sufre una disminución de su valor de resistencia a las fuerzas externas al aumentar la temperatura a la que se aplica el revenido, pero de

forma irregular, ya que a 525°C y 575°C los valores obtenidos son similares, incluso aumenta un poco a 575°C. Con las pruebas realizadas a probetas sometidas a un revenido de 625°C se vuelve a observar una disminución.

➤ **Temple a 880°C y enfriado con aire**

Este material ha sido sometido previamente a un tratamiento térmico de 880°C de temperatura y se ha enfriado con aire. Posteriormente, se somete a otro tratamiento térmico, el revenido.

Los resultados muestran la variación de las propiedades de estos materiales según se aplique el revenido a temperaturas de 475^a, 525°C, 575°C y 625°C.

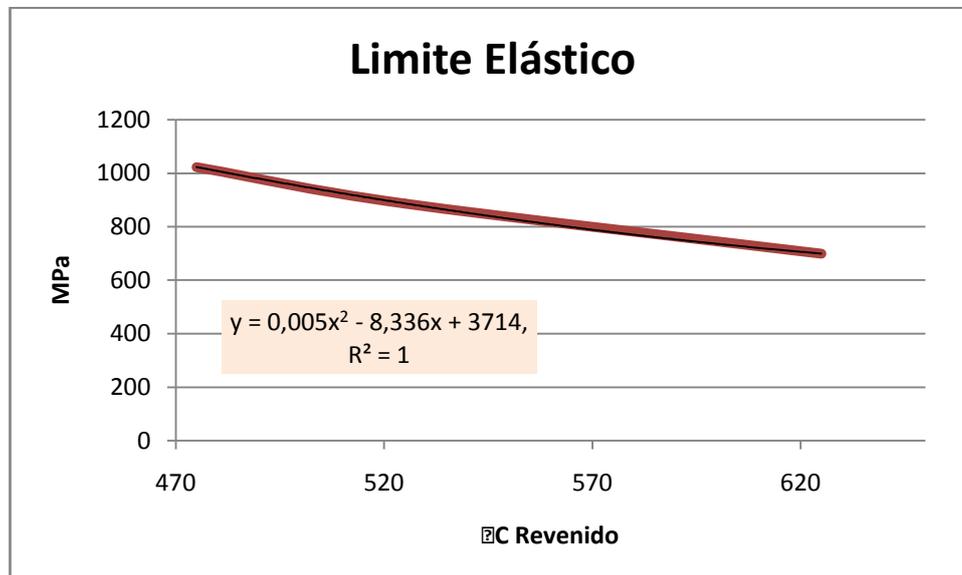


Figura 44 - Límite elástico - Tª Revenido (TTT 880°C - Aire)

Se observa en esta gráfica, una ligera similitud a las dos anteriores en los que se estudia el límite elástico para piezas tratadas previamente a 880°C y 920°C enfriadas al agua.

Los valores del límite elástico disminuyen también al aumentar la temperatura del revenido, obteniendo una modificación en esta propiedad desde los 1022Mpa (a 475°C) hasta los 699Mpa (a 625°C).

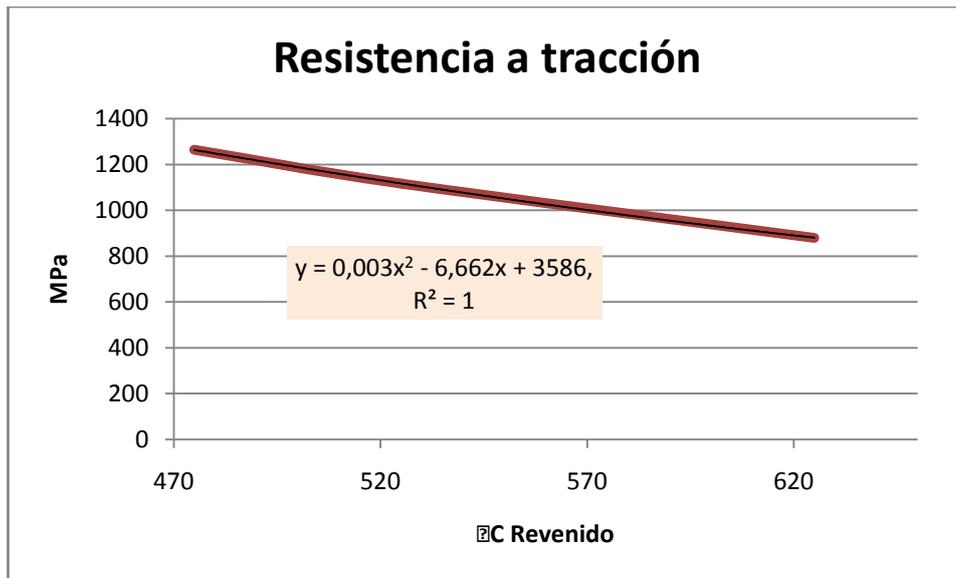


Figura 45 - Resistencia a tracción - Tª Revenido (TTT 880°C - Aire)

Como en el caso anterior, la gráfica de resistencia a tracción es muy similar a la de las probetas que han sufrido un tratamiento previo de 880°C y 920°C con enfriamiento en agua.

Se obtienen resultados en los que los valores que se obtienen, nos muestran una variación de 1263Mpa (probeta con revenido a 475°C) hasta 879Mpa (probeta con revenido a 625°C).

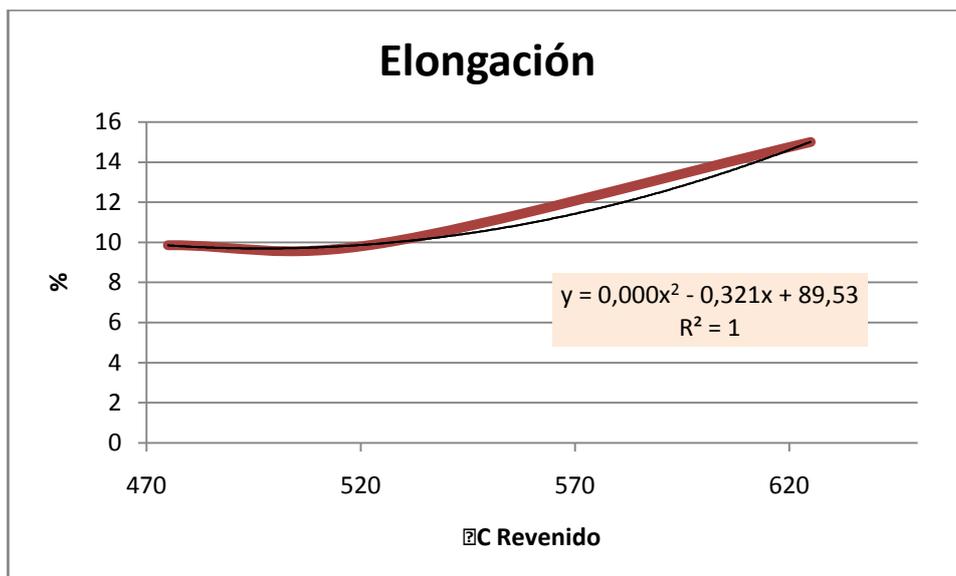


Figura 46 - Elongación - Tª Revenido (TTT 880°C - Aire)

Después de pasar por el tratamiento de revenido, se consigue un aumento del alargamiento de la probeta cuando se somete a ésta a ensayos de tracción,

exceptuando la diferencia entre el revenido a 475°C y el de 525°C que aunque apenas apreciable, disminuye algo. Con las probetas de 575°C y 625°C se obtienen resultados en los que se observa claramente, como se produce un aumento en la elongación con el aumento de la temperatura.

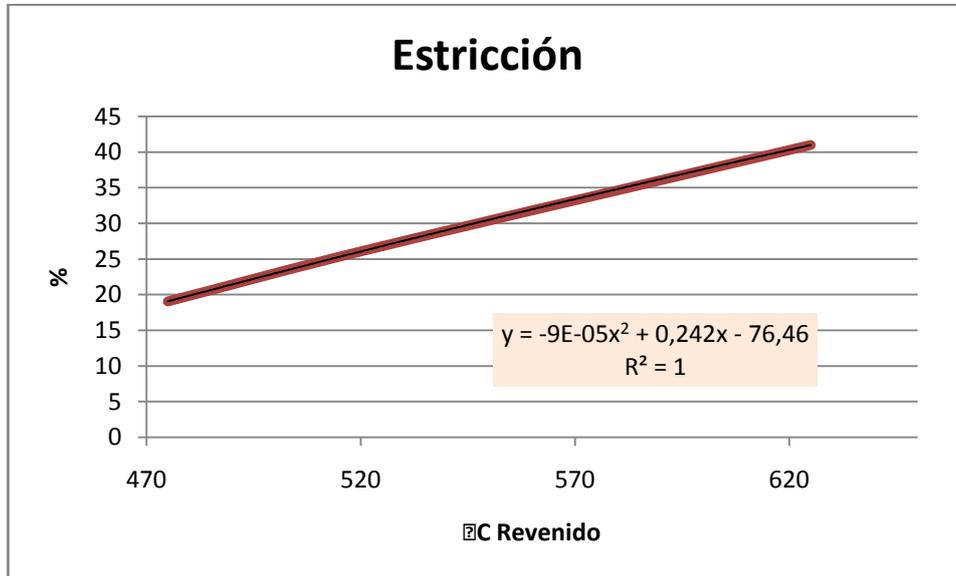


Figura 47 - Estricción - Tª Revenido (TTT 880°C - Aire)

Esta prueba, como ya se sabe, nos muestra que someter a estos materiales a un tratamiento térmico de revenido, provoca que la estricción o el porcentaje de área reducida en estos ensayos, aumenta. En este caso en concreto, se obtiene un aumento casi constante que va desde un 19% de estricción a 475°C hasta el 41% a 625°C.

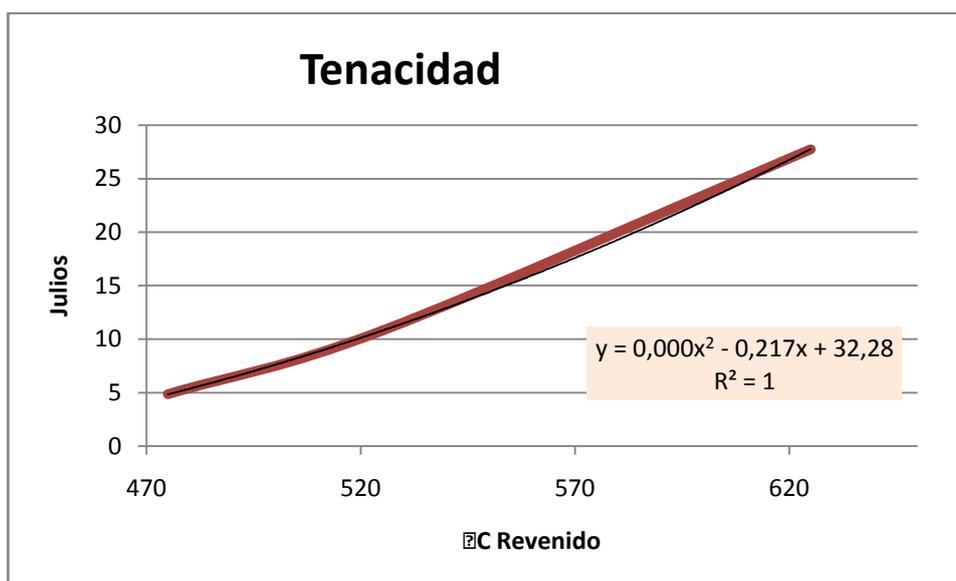


Figura 48 - Tenacidad - Tª Revenido (TTT 880°C - Aire)

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

La gráfica muestra los resultados que nos ofrece el impacto de Charpy. La tenacidad de las muestras aumentacuanto mayores son las temperaturas a las que se aplica el revenido. Valores de tenacidad que van desde 4,85J hasta 27,75J.

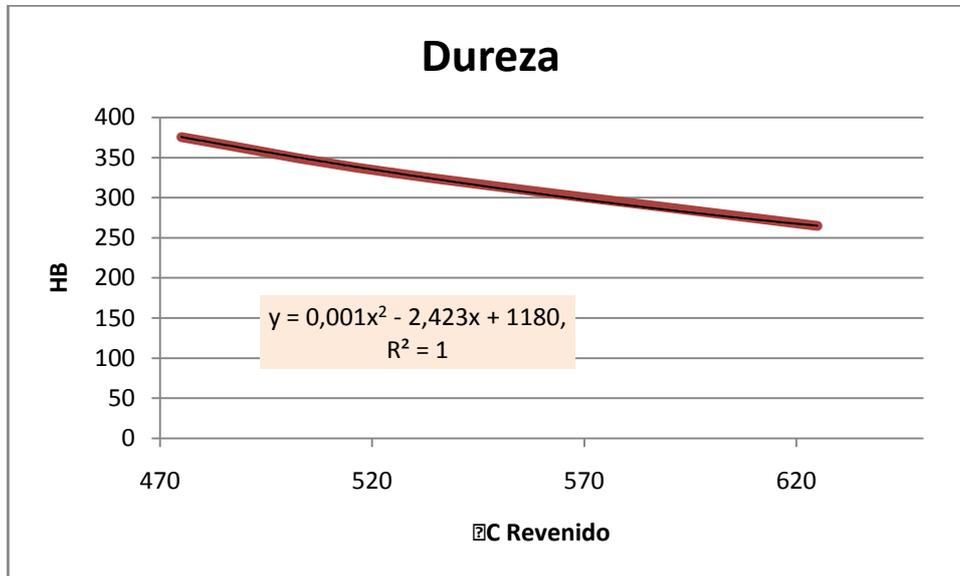


Figura 49 - Dureza - Tª Revenido (TTT 880°C - Aire)

La dureza disminuye de forma casi constante al aumentar la temperatura a la que se aplica el revenido. En las probetas sometidas a los tratamientos previos de temperaturas de 880°C, 920°C (enfriadas al agua) y ésta, los resultados obtenidos son similares.

➤ **Temple a 920-940°C y enfriado al aire.**

Este material ha sido sometido previamente a un tratamiento térmico de 920°C de temperatura y se ha enfriado con aire. Posteriormente, se somete a otro tratamiento térmico, el revenido.

Los resultados muestran la variación de las propiedades de estos materiales según se aplique el revenido a temperaturas de 475^a, 525°C, 575°C y 625°C. Se observará a continuación, que son estos resultados los que más difieren de los anteriores casos vistos.

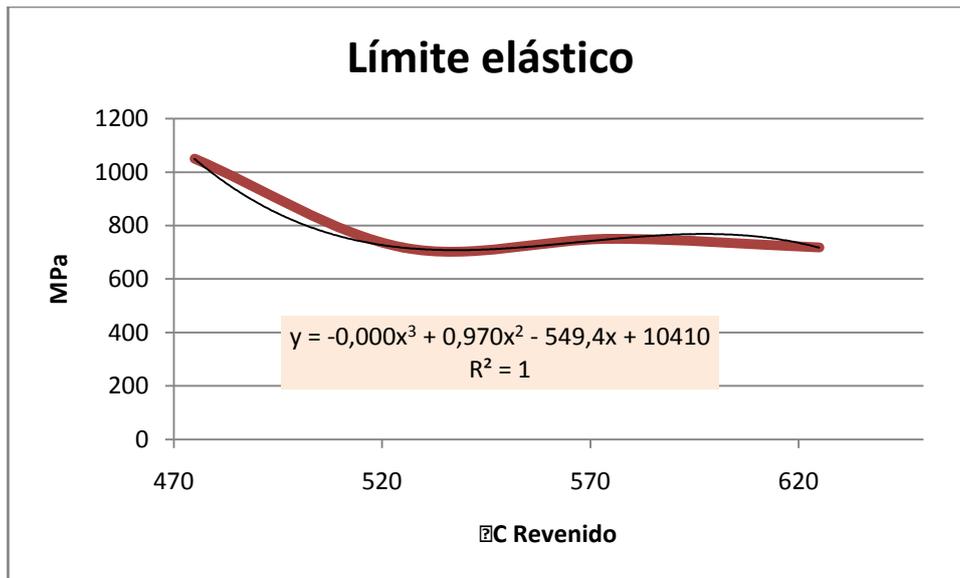


Figura 50 - Límite elástico - Tª Revenido (TTT 920°C - Aire)

En los tres casos anteriores, el límite elástico disminuía al utilizar un revenido de mayor temperatura, en este caso también pero esta gráfica no disminuye de manera aparentemente constante sino que disminuye más rápido de 475°C hasta 525°C, aumenta ligeramente a 575°C y vuelve a disminuir a 625°C, obteniendo este último un valor similar aunque algo más bajo que el conseguido a 525°C. Los valores de las 3 últimas temperaturas de revenido, son bastante parecidos.

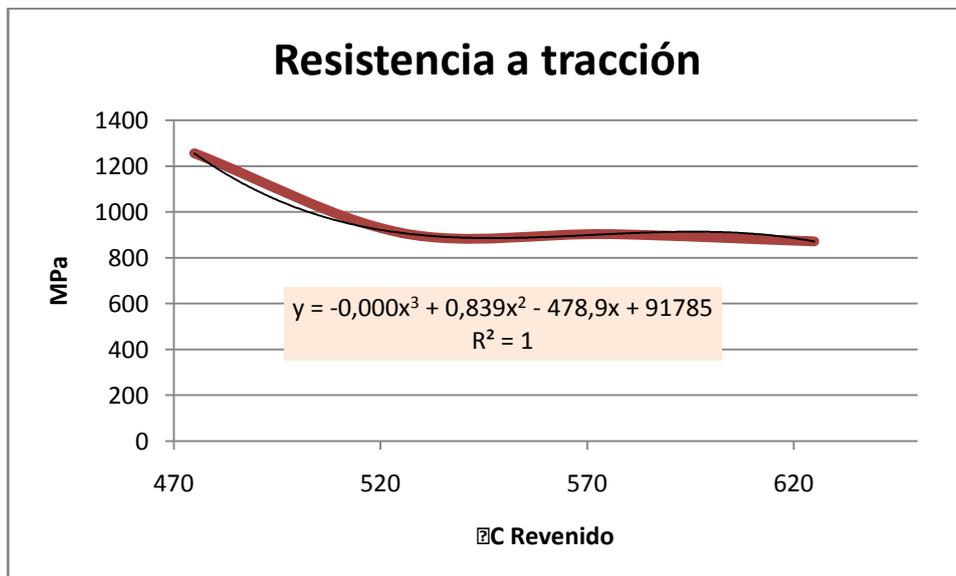


Figura 51 - Resistencia a tracción - Tª Revenido (TTT 920°C - Aire)

Con la resistencia a tracción, pasa algo similar al límite elástico. Disminuye más rápido de 475°C a 525°C, variando muy poco en el resto de temperaturas.

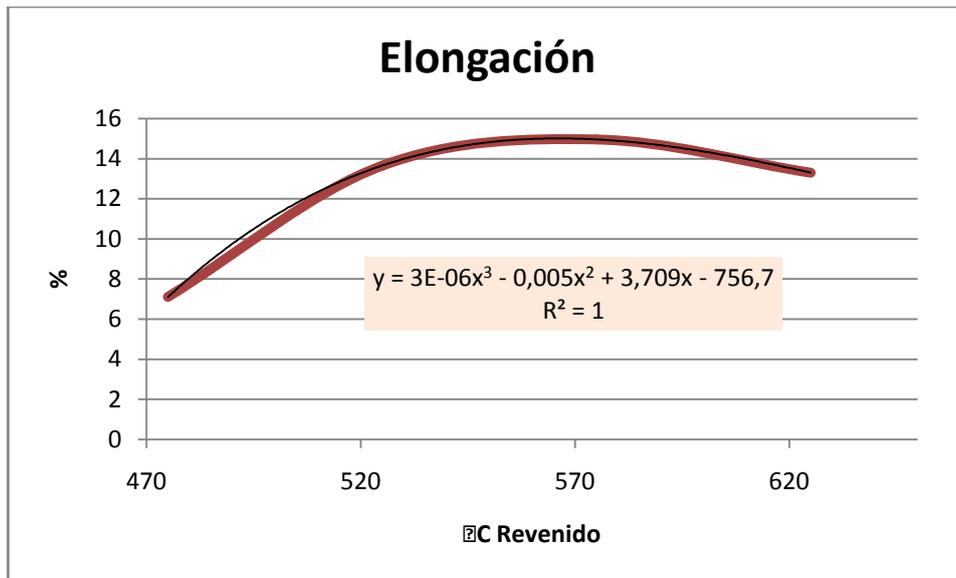


Figura 52 - Elongación - Tª Revenido (TTT 920°C - Aire)

La gráfica que se puede observar en este apartado, difiere bastante de las 3 anteriores en las que se ha estudiado el porcentaje de elongación. Ésta muestra una gráfica parabólica aumentando el valor de alargamiento de 475°C a 525°C, dando un resultado similar a 575°C y disminuyendo ligeramente a 625°C.

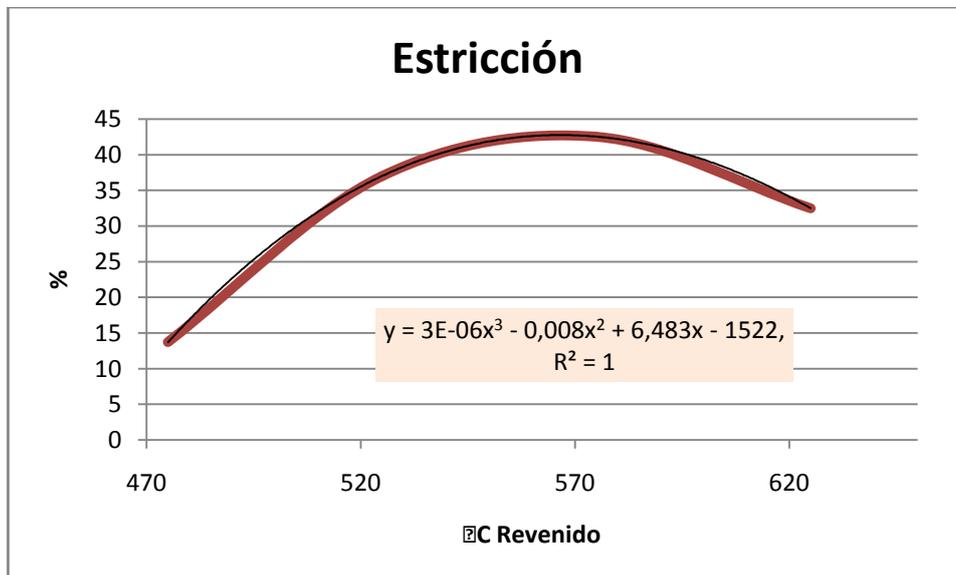


Figura 53 - Estricción - Tª Revenido (TTT 920°C - Aire)

Los resultados de la estricción, muestran una variación parecida a la elongación. Es una gráfica parabólica que aumenta el porcentaje en que se reduce el área de la probeta en las temperaturas más bajas, aumentando ligeramente el valor a 575°C y disminuyendo de forma apreciable a 625°C.

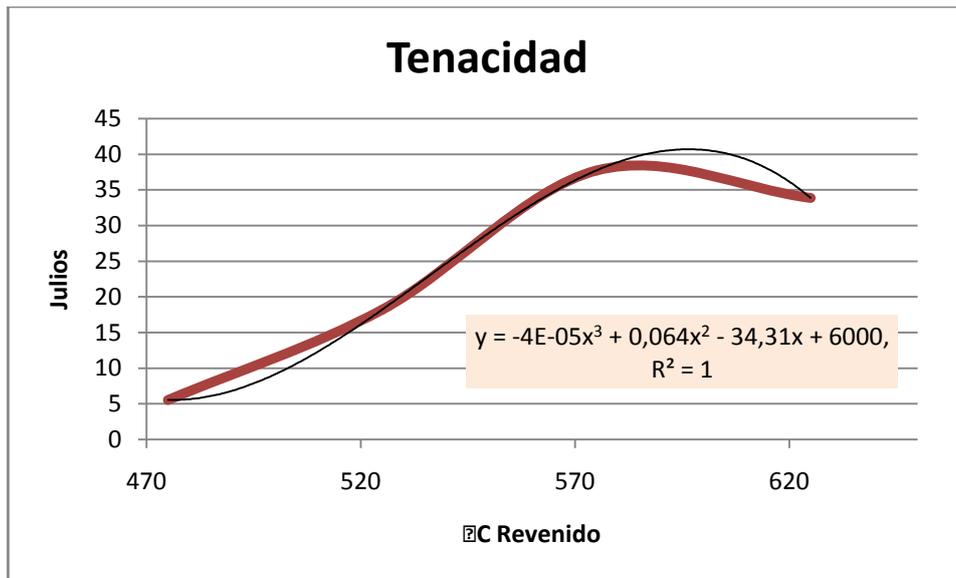


Figura 54 - Tenacidad - Tª Revenido (TTT 920°C - Aire)

La tenacidad y los valores que nos ofrecen las pruebas de impacto Charpy no son una excepción, la gráfica también se dibuja de forma diferente a los anteriores. Los valores obtenidos con probetas a las que se las aplicó un revenido a 475°C, 525°C y 575°C aumentan, sólo disminuye el último resultado de esta prueba, la que se realiza a las probetas que han sufrido un revenido de 625°C.

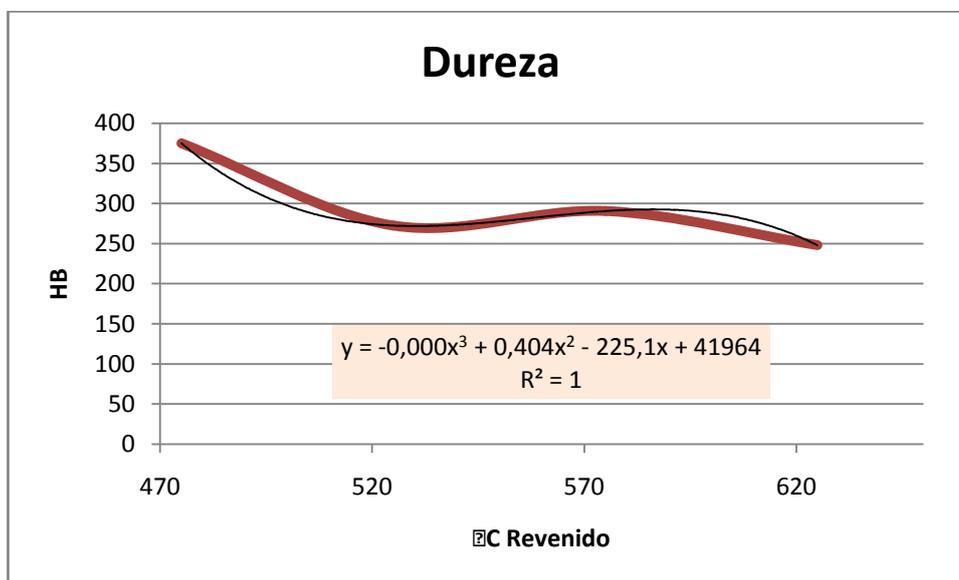


Figura 55 - Dureza - Tª Revenido (TTT 920°C - Aire)

Esta gráfica es la excepción. Las probetas utilizadas en esta prueba, arrojan datos no tan diferentes a las gráficas anteriores en las que se han realizado el mismo ensayo.

3. CONCLUSIONES

Se puede observar con los resultados obtenidos que aplicar un tratamiento térmico, como es el revenido puede mejorar algunas de las propiedades de este material, y que según los valores que se busquen, será necesario utilizar temperaturas de revenido concretas, más altas o más bajas. Pero estos resultados están vinculados también a las temperaturas que ha sufrido primero el acero y el tipo de enfriamiento, o mejor dicho si sufre un enfriamiento más lento o rápido.

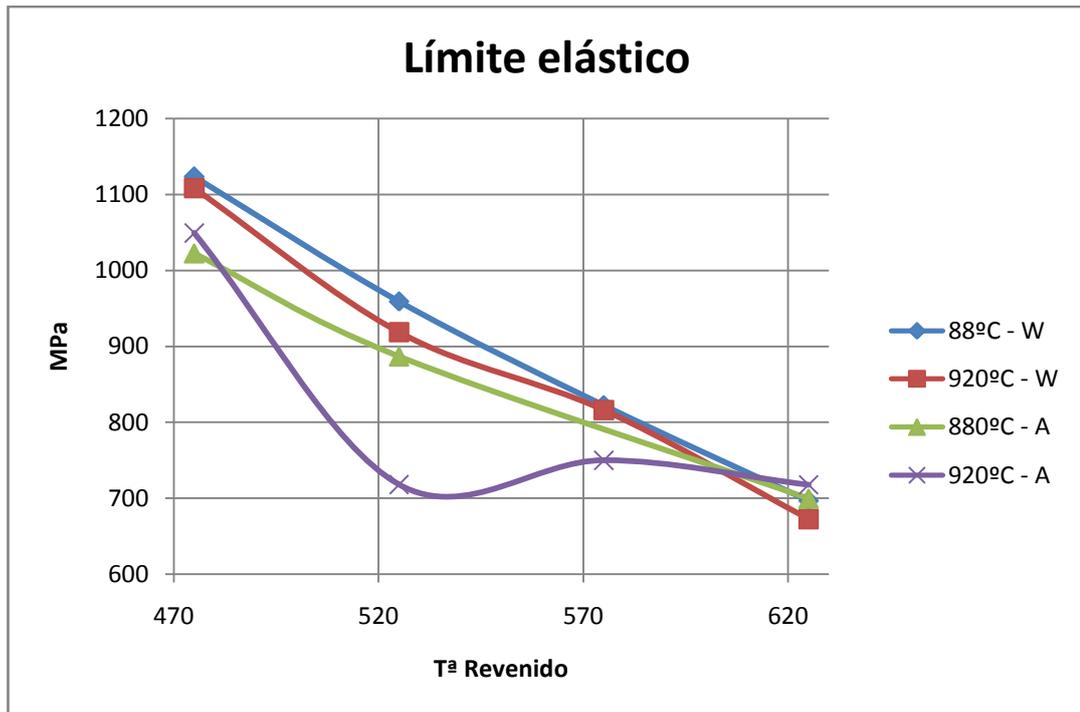


Figura 56 - Límite elástico (comparación)

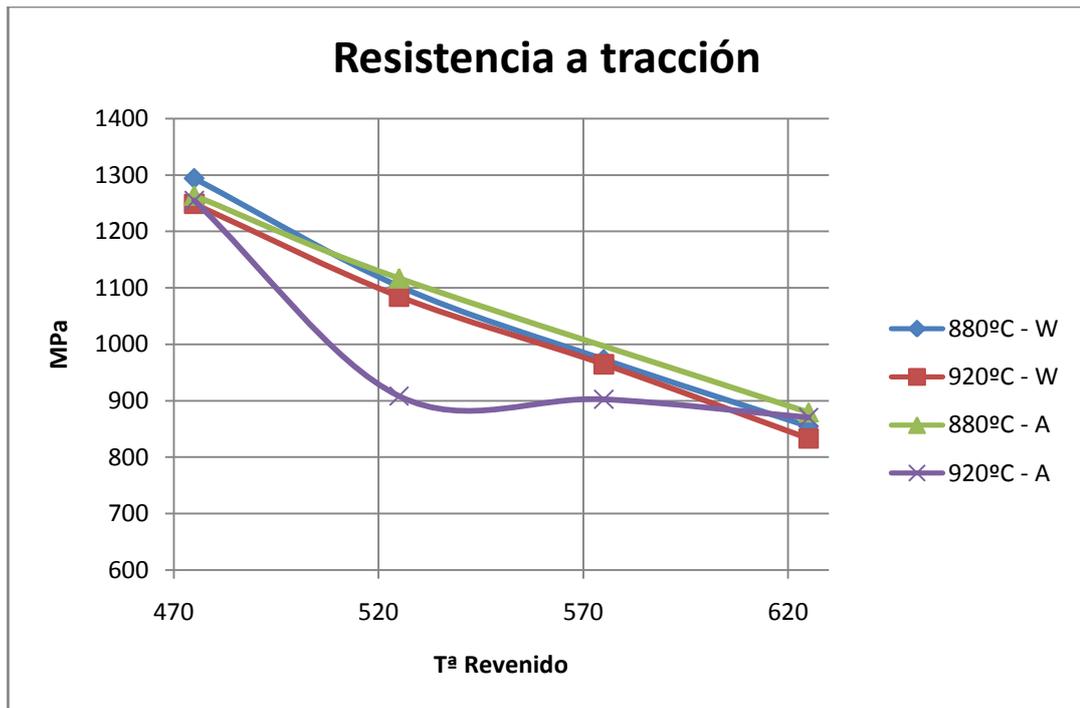


Figura 57 - Resistencia a tracción (comparación)

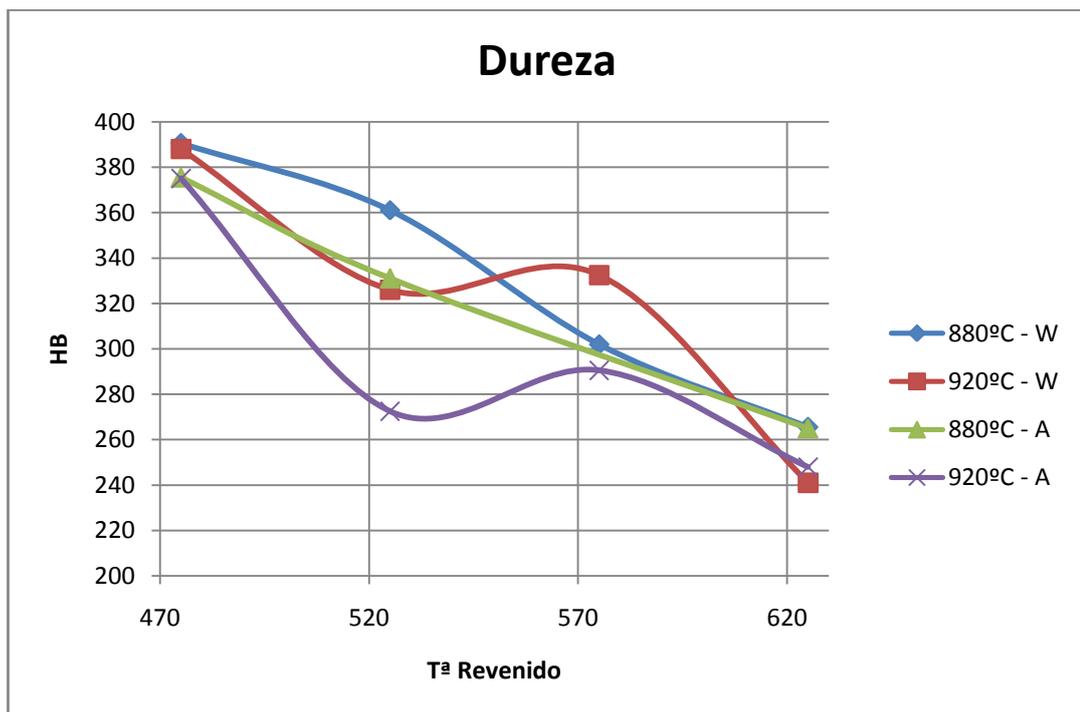


Figura 58 - Dureza (comparación)

En general, aplicando el revenido, se demuestra que los valores del límite elástico, la resistencia a la tracción y la dureza son valores que disminuyen. Lo que implica que se modifica a un material algo más blando, es más fácil la penetración en la superficie de éste, se producen ralladuras, abrasiones con mayor facilidad.

Además, al ser el límite elástico menor, se producirán antes deformaciones permanentes ante una fuerza externa, y también se romperá o sufrirá una fractura con cargas o fuerzas menores que antes de aplicar el revenido.

La razón por la que hay una disminución de la dureza después del revenido, es porque se eliminan las tensiones internas producidas por el temple.

Se puede observar en las dos líneas de tendencia que reflejan los resultados obtenidos de la dureza para los materiales que han sido tratados previamente a temperaturas de 920°C, que su respuesta a 575°C de revenido es un aumento de la dureza, esto se debe a una precipitación de carburos secundarios a alta temperatura (precursor de fragilidad KRUPP). Se aprecia más marcado en muestras templadas a mayor temperatura dada la mayor solubilidad de carburos. Los elementos aleantes que contiene este acero refuerza la ferrita a esta temperatura causando un endurecimiento, a esto se le llama dureza secundaria.

También se debe prestar especial atención a las curvas de las muestras que han sido sometidas a 920-940°C y se han enfriado con aire forzado (es decir, un enfriamiento algo más lento). Estas estructuras pueden presentar perlita gruesa, que es menos dura y más dúctil.

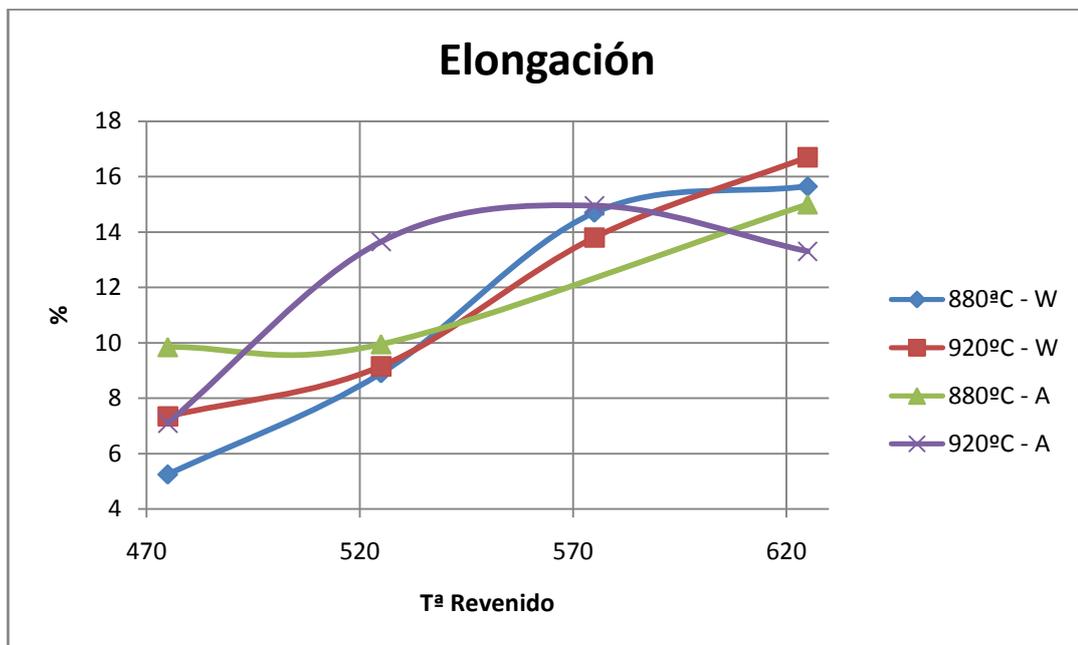


Figura 59 - Elongación (comparación)

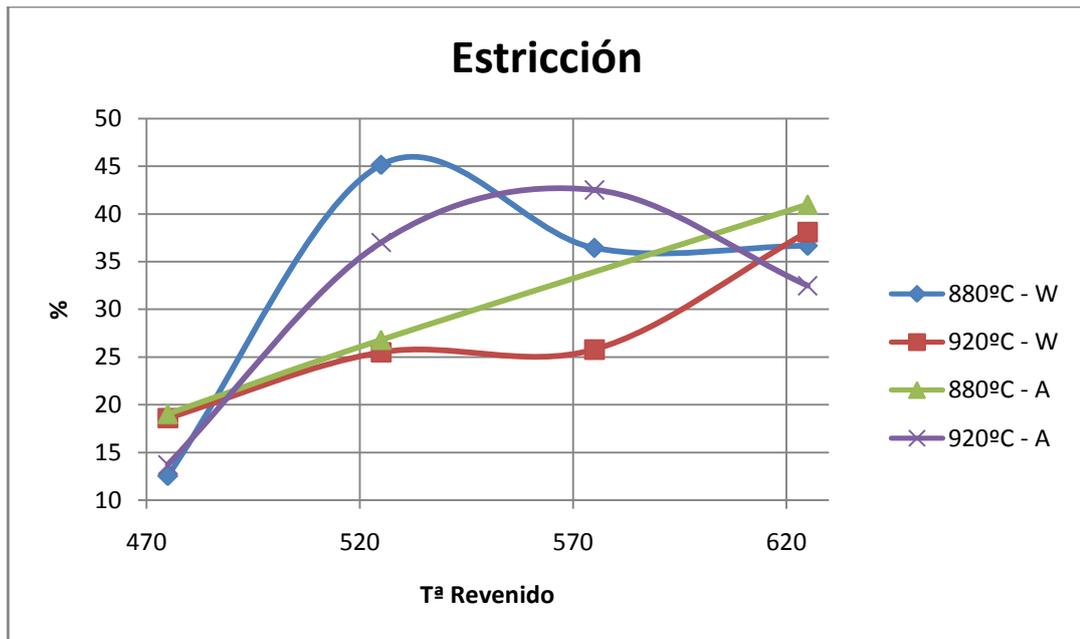


Figura 60 - Estricción (comparación)

Otras propiedades mecánicas aumentan, como son la estricción y la elongación, por lo que este acero se deforma más cuando está sometida a fuerzas externas.

La estricción aumenta de forma más constante con un temple realizado a 880°C y un enfriado lento, pero el mayor porcentaje de reducción de área se consigue con un temple a 880°C, enfriado rápido (al agua) y luego aplicarle un revenido a 525°C. Y los valores más pequeños se consiguen con temperaturas muy bajas de revenido.

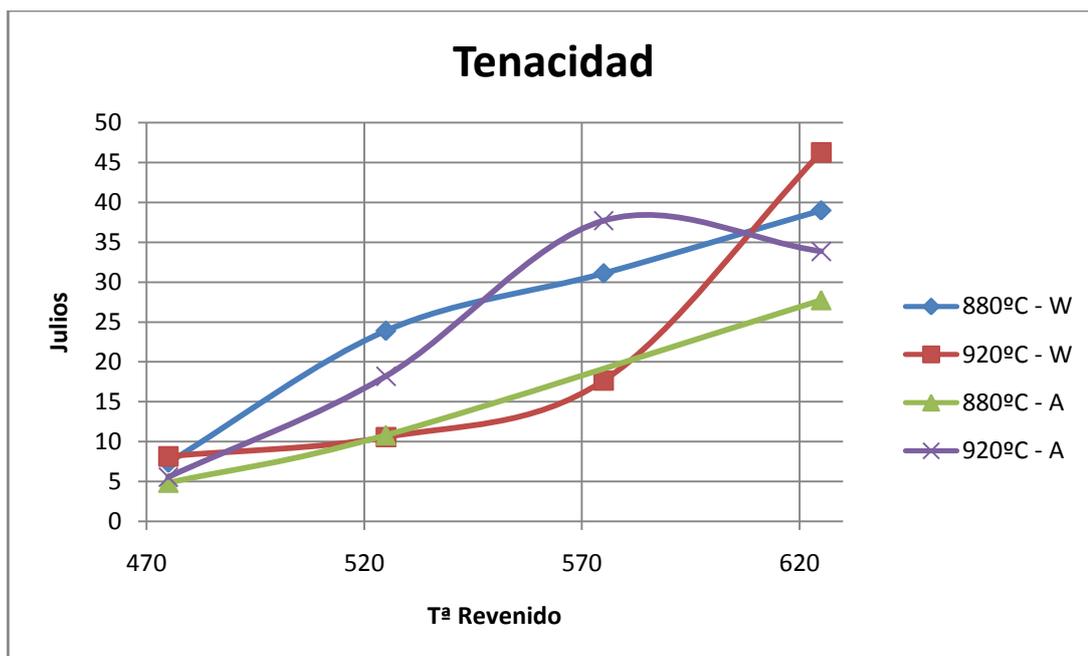


Figura 61 - Tenacidad (comparación)

La tenacidad, que nos mide la resistencia del material ante un impacto, aumenta su valor. Por lo tanto, este acero después de ser sometido a revenido, se obtiene un material que absorbe más energía, se vuelve más dúctil, puede sufrir más deformaciones antes de romperse.

Al aumentar su ductilidad, estos materiales sufren primero una acusada deformación, conservando aún una cierta reserva de resistencia, será necesario que la fuerza aplicada siga aumentando para que se provoque la rotura.

Al disminuir su fragilidad, es más difícil que las piezas fabricadas con este material se rompan de forma imprevista o repentina, ya que primero presentarán una deformación plástica visible.

La variación de las propiedades mecánicas que sufre el acero, está relacionado con los cambios estructurales que sufre al efectuarle los tratamientos térmicos.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASKELAND, D.R. 1998. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. 3ª ed. México: International Thompson Editores
- [2] ELZUNCE, F.J. 2001. *Apuntes de aceros y fundiciones*. Universidad de Oviedo.
- [3] GONZÁLEZ CRESPO, D. 2010. *Influencia de la composición química en la resistencia del acero GX4CrNi13/4*. C. RODRÍGUEZ-REGATILLO. Director. Proyecto fin de carrera, Universidad de Cantabria.
- [4] GUALDA CONTRERAS, I. 2012. *Desoxidación del acero en horno eléctrico*. M. J. RIVERO MARTÍNEZ. Director. Proyecto fin de carrera, Universidad de Cantabria.
- [5] SETIÉN, J. 2003. *Fundamentos de ciencia y tecnología de materiales*. Santander: Universidad de Cantabria.
- [6] SHACKELFORD, J.F. 2005. *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. 6ª ed. Prentice Hall
- [7] SMITH, W. F. 2006. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 4ª ed. McGraw Hill.
- [8] ROSELL GONZÁLEZ, J.V.; ROMERO CAMACHO, R.; TORRES, S.I. 2013. *Tratamientos térmicos de los metales base y de las uniones soldadas*. Cesol
- [9] TRATERIBER. *Temple y revenido*. En GRUPO TRATERIBER [Sitio web]. Madrid. [Consulta: 10 agosto 2016]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.trateriber.es/pdf/Temple-Revenido.pdf>

5. ANEXO I

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

ENSAYO DE TRACCIÓN / TENSION TEST									
REQUERIDO / REQUIRED					>700	>800	>15		
Nº Colada / Heat	N	T	R	DUREZA		Límite Elástico Unitario / Yield Strength (0,2) (Mpa)	Resistencia a la tracción / Tensile strength (Mpa)	Alargamiento / Elongation (%)	Estricción / Reduction of area (%)
				P.IM.	P.IM.				
5 AI		W880	475	375	588	1123,85	1292,27	7,2	20,49
5 AI		W880	475	401	380	1122,63	1295,3	3,3	4,6
B5-N		880W	525	370	352	984,61	1132,45	8	67,97
B5-N		880W	525	--		933,12	1073,65	9,8	22,32
6C-E		880W	575	302		837,19	984,52	12,8	31,62
6C-E		880W	575	--		807,21	962,46	16,6	41,25
D6-R		W880	625	--		709,09	869,07	16,3	33,9
D6-R		W880	625	269	262	684,02	840,56	15	39,42
7 AS		920W	475	401	388	1113,97	1238,98	6,7	12,36
7 AS		920W	475	388	366	1102,69	1258,6	8	24,89
B7-O		920W	525	343	323	929,09	1083,71	10,9	23,68
B7-O		920W	525	345	329	968,09	1097,87	7,5	27,17
B3-H		920W	525	339	311	901,83	1085,51	10	23,83
B3-L		920W	525	307	309	907,92	1074,51	8,3	32,92
8C-V	POROS	920W	575	--		POROS	POROS	--	--
8C-V		920	575	339	326	816,13	964,59	13,8	25,79
D8-P		W920	625	248		669,01	831,23	17,5	40,45
D8-P		W920	625	241	235	675,83	834,81	15,9	35,75

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

A1G		880 A	475	363	388	1036,88	1272,9	9,8	17,19
A1G		880 A	475	361	388	1008,23	1253,9	9,9	20,93
B1-M		880 A	525	327	341	838,34	1087,19	8,8	22,75
B1-M		880 A	525	329	333	935,14	1146,37	11,1	30,86
2D-Q		880A	625	277	362	646,75	831,49	19	47,23
2D-Q		880A	625	248	253	651,43	833,06	15,2	38,09
2C-M		880A	625	--		747,4	925,93	12,8	40,35
2C-V		880A	625	--		759,25	938,42	14,8	41,6
A3H		920A	475	352	375	1081,46	1237,66	6,6	16,65
A3H		920A	475	388	375	1017,03	1272,14	7,6	10,78
4C-T		920A	575	--		712,19	904,38	15,9	40,2
4C-T		920A	575	262	260	709,24	898,84	13,1	34,47
4C-V	POROS	920A	575	786	271	POROS	POROS	--	--
4C-V		920A	575	288	285	POROS	POROS	--	--
4D-W		920A	575	274	265	723,39	912,25	14,2	39,54
4D-W		920A	575	282	263	735,91	919,31	11,8	29,51
X		920A	600	--		727,94	884,49	15,1	50,11
X		920A	600	--		730,56	884,89	15,6	44,96
M		940A	600	295	286	769,02	920,36	13,2	34,67
M		940A	600	--		792,22	945,36	14,8	40,07
S		940A	625	241	248	718,96	874,1	14,8	46,67
S		940A	625	248	255	716,07	866,83	11,8	18,3

Tabla 4 - Tabla completa de resultados (Ensayos de tracción y dureza)

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

ENSAYO DE IMPACTO / IMPACT TEST (J)									
REQUERIDO					KV	>42J (-20°C)(un valor32J)			
Nº Colada / Heat	N	T	R	Estricción	Temperatura (°C)	Valor (J)			
				Reduction of area (%)					Valor imp.
5 AI		W880	475	20,49	-20	6,4	12,1	8,7	8,7
5 AI		W880	475	4,6	-20	5,3	6	6,2	6
B5-N		880W	525	67,97	20	23,9	14,3	24,8	23,9
B5-N		880W	525	22,32	--	--	--	--	
6C-E		880W	575	31,62	20	33,9	34,5	31,7	33,9
6C-E		880W	575	41,25	-20	28,3	29,2	23,5	28,3
D6-R		W880	625	33,9	20	41	45,3	45,9	45,3
D6-R		W880	625	39,42	-20	26,2	32,7	40,7	32,7
7 AS		920W	475	12,36	20	9	8	11,4	9
7 AS		920W	475	24,89	-20	8,7	4,9	7,3	7,3
B7-O		920W	525	23,68	20	18,3	17	10,9	17
B7-O		920W	525	27,17	-20	8,5	9,9	7,6	8,75
B3-H		920W	525	23,83	20	7,1	17,2	12,4	12,4
B3-L		920W	525	32,92	-20	4	6,2	3,6	4
8C-V	POROS	920W	575	--	20	13,5	21,4	15,3	15,3
8C-V		920	575	25,79	-20	21,4	18,2	20	20
D8-P		W920	625	40,45	20	45,9	43,8	4,7	43,8
D8-P		W920	625	35,75	-20	54,6	48,7	41,7	48,7

Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado

A1G		880 A	475	17,19	20	4,6	5,5	6,7	5,5
A1G		880 A	475	20,93	-20	4,2	3,1	9,5	4,2
B1-M		880 A	525	22,75	20	11,9	13,1	8	11,9
B1-M		880 A	525	30,86	-20	6,9	17,6	9,7	9,7
2D-Q		880A	625	47,23	-20	17,1	22,5	27,6	22,5
2D-Q		880A	625	38,09	20	27,3	33,6	33	33
2C-M		880A	625	40,35	--	--	--	--	
2C-V		880A	625	41,6	--	--	--	--	
A3H		920A	475	16,65	-20	5,3	4,2	3,3	4,2
A3H		920A	475	10,78	20	6,9	8,5	4,9	6,9
4C-T		920A	575	40,2	20	26,6	23,7	19,3	23,7
4C-T		920A	575	34,47	-20	9,7	14,9	17,7	14,9
4C-V	POROS	920A	575	--	-20	14	15,6	15,3	15,3
4C-V		920A	575	--	20	21,1	29,7	19,5	21,1
4D-W		920A	575	39,54	20	19,5	23,9	22,15	22,15
4D-W		920A	575	29,51	-20	12,8	12,8	13	12,8
X		920A	600	50,11	20	51,2	46,2	42,9	46,2
X		920A	600	44,96	-20	40,5	33,7	32,8	33,7
M		940A	600	34,67	-20	45,6	35,3	41,7	41,7
M		940A	600	40,07	-20	28,5	43,5	24	28,5
S		940A	625	46,67	-20	28,3	39,4	28	28,3
S		940A	625	18,3	-20	39,4	37,9	44,4	39,4

Tabla 5 - Tabla completa de resultados (Ensayos de impacto)