



Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO SOBRE LOS EFECTOS DEL  
PATENTADO EN ACEROS MICROALEADOS**  
*(STUDY ABOUT PATENTING EFECTS ON MICROALLOYED STEELS)*

Para acceder al Título de

**GRADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS MIENROS**

Autores: **ALBERTO MONTES CUEVAS**  
**FELIX RUIZ DE SALAZAR ECHEVARRÍA**

Director: **JESÚS SETIÉN MARQUINEZ**  
Septiembre - 2015



## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Presentación y breve historia de la empresa**

#### **1.1.1. Introducción**

#### **1.1.2. Breve historia**

#### **1.1.3. Proceso de fabricación y productos**

## **2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVO DEL ESTUDIO**

## **3. ESTADO DEL ARTE**

### **3.1. Fundamentos teóricos del acero**

#### **3.1.1. Definición del acero**

#### **3.1.2. Características de los aceros**

#### **3.1.3. Elementos aleantes del acero y mejoras obtenidas con la aleación**

#### **3.1.4. Estructura de los metales**

### **3.2. Fundamentos teóricos de ensayos de materiales**

#### **3.2.1. Ensayo de tracción**

#### **3.2.2. Ensayo metalográfico**

#### **3.2.3. Medición de diámetro**

#### **3.2.4. Determinación de gramos de zinc**

### **3.3. Fundamentos teóricos del patentado**

#### **3.3.1. Introducción**

#### **3.3.2. Objetivo del patentado**

#### **3.3.3. Proceso de patentado**

#### **3.3.4. Características metalúrgicas y metalográficas de los aceros patentados**

#### **3.3.5. Instalación de patentado**

#### **3.3.6. Recubrimiento con zinc: Galvanizado**

### **3.4. Artículos de desarrollo científico**

### **3.5. Bibliografía**

## **4. CALIDAD Y MEDIOAMBIENTE**

## **5. DESARROLLO**

### **5.1. Proceso de patentado empleado**

### **5.2. Parámetros a estudiar**

### **5.3. Normativa**

### **5.4. Aceros empleados en el estudio**

## **6. RESULTADOS OBTENIDOS**

### **6.1. Resultados en aceros no microaleados**

### **6.2. Resultados obtenidos en aceros microaleados**

### **6.3. Resultados en aceros microaleados especiales**

## **7. CONCLUSIONES**



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Presentación y breve historia de la empresa

#### 1.1.1. Introducción

Trefilerías Quijano, rebautizada desde el 1 de junio de 2015 como Global Steel Special Products, tras su fusión con otras dos empresas del grupo, está situada en los Corrales de Buelna, Cantabria, y perteneciente al grupo internacional CELSA. Es uno de los primeros productores de alambre y productos derivados del alambre en Europa.

Su gran objetivo es precisamente ese, conseguir un lugar líder en el mercado español y en el mercado internacional, lo cual, con una experiencia de más 130 años de historia, ha logrado.

Trefilerías Quijano ha mantenido a través de los años un esfuerzo continuo de superación, obteniendo en 1995 la certificación de que su Sistema de Aseguramiento de la Calidad está conforme con la Norma ISO 9002.

#### 1.1.2. Breve historia

Global Steel Special Products, es la heredera de aquel taller de puntas que en 1873 creara D. José María Quijano en Los Corrales de Buelna.

En etapas sucesivas se fue integrando en la fabricación de alambre y posteriormente en la de alambrón, ya que en el año 1914 la compañía José María Quijano S.A. estaba presente en todas las aplicaciones del alambre y sus derivados. Paso a paso fue situándose, con espíritu renovador, a la cabeza del mercado mundial del alambre.

En 1988 la Compañía se divide en dos entidades separadas, una para la fabricación del alambrón, en Santander, y la otra, Trefilerías Quijano, fabricando alambres de acero, cordones, alambres para soldadura y derivados del alambre.

Después de más de 130 años, Trefilerías Quijano ha conseguido un lugar líder en el mercado español y en el mercado internacional.

#### 1.1.3. Proceso de fabricación y productos



Trefilerías Quijano, S.A. fabrica alambres por deformación en frío (trefilado), utilizando como materia prima alambión de alto, medio y bajo carbono, que irá transformándose en las distintas etapas de los procesos.

Todo proceso comienza con el paso del alambión por la línea automática de decapado. En ella se produce una limpieza química del óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , también conocido como calamina) que se forma en la laminación en caliente del alambión, y se le da a este un recubrimiento superficial adecuado para su posterior deformación en el proceso de trefilado.

El trefilado es una deformación en frío, normalmente en máquinas múltiples, en las que se va reduciendo el diámetro inicial de la materia prima hasta llegar a un diámetro final en un proceso único, haciendo pasar el alambión por unas herramientas (hileras) de diámetros sucesivamente más pequeños.

Como tratamientos térmicos se utilizarán el patentado y el recocido con objeto de regenerar la estructura del acero para poder seguir trefilando y al mismo tiempo dar al material unas determinadas características mecánicas y estructurales.

En función del tipo de alambión utilizado y de la utilización posterior del alambre fabricado se distinguirán dos secciones claramente diferenciadas: acero duro y estampación.

#### **1.1.3.1. Acero Duro**

En este apartado, se incluyen todos aquellos productos que utilizan como materia prima alambiones de alto y medio carbono. La gama de diámetros a fabricar está comprendida entre 0,50 y 14 mm.

Además de las operaciones de decapado, trefilado y patentado, existe, en algunos casos, un tratamiento de galvanizado que consiste en un recubrimiento de zinc en caliente que se da al alambre para mejorar su resistencia a la corrosión.



Los alambres de acero de alto carbono se fabrican de acuerdo a todas las normas internacionales (DIN, BS, UNE, ASTM, AFNOR...).

Se desarrollan los productos para satisfacer las necesidades de los clientes, empleando su propia tecnología.

A continuación se detalla una relación de los diversos productos que se fabrican mediante la combinación de las diferentes operaciones de decapado, trefilado, patentado y galvanizado, siempre encaminado a conseguir las características requeridas en las normas internacionales o en las propias de los clientes:

Muelles Técnicos. Utilizados para su transformación en todo tipo de muelles mecánicos, los muelles, grises, cobreados y galvanizados, están garantizados por una calidad que les aporta extraordinaria uniformidad tanto en la estructura del acero, como en el acabado superficial, y gran facilidad de transformación.

Alambre para Cables. Es un producto intermedio utilizado en la fabricación de cables de acero para su aplicación en transportes aéreos, pesca de arrastre, minería, ascensores, grúas, etc.

Armado de cables. Alambre de acero de alto carbono destinado principalmente a la armadura de cables submarinos. Su principal característica es la fuerte protección anticorrosión dada por la gruesa capa de zinc, así como la alta resistencia a la rotura.

A.C.S.R. Es un producto intermedio utilizado para la fabricación de conductores eléctricos, cordones y riostras. Partiendo de una moderna tecnología de galvanizado en caliente se consigue un alambre ACSR de muy alta calidad, presente y reconocido en todo el mundo.

Fundas. Alambre de alto carbono especialmente destinado a planear y obtener como producto final "fundas" para el sector del automóvil (conjuntos para frenos, embragues...)

Alambre para aluminizar. Alambre de acero para recubrir con aluminio. Su destino final será la utilización para cables de fibra óptica.

Muelles para colchonería

Alambre para Cribas, Lana de Acero y Remaches

Alambre para atar "balas" Grises y Galvanizados

Alambres para retrefilar

### **1.1.3.2. Acero suave o Estampación**

Usando alambres de alta calidad en instalaciones propias como decape, el horno campana de recocido de la tecnología más avanzada y máquinas de trefilar de última generación, en esta empresa se produce alambre para la fabricación de piezas por estampación y extrusión en frío para las más altas exigencias técnicas de calidad.

Trefilerías Quijano garantiza óptimas condiciones de conformación en frío de sus alambres, debido a su tratamiento térmico con control automatizado del proceso obteniendo unos muy elevados índices de globulización.

Su tecnología está orientada fundamentalmente al suministro de alambre acondicionado, para obtener los más altos rendimientos en la industria dedicada a la fabricación de: fijaciones, tuercas, piezas especiales, etc., por deformación en frío, en máquinas-prensas-estampadoras de alta velocidad, con destino final para la industria de la automoción, naval, construcción, eléctrica, electrodomésticos, etc.

Dispone de los recursos más avanzados:

- Línea de baños: Decapado por ácido clorhídrico, fosfatado de zinc, encalado, boratado o jabón reactivo.

- Tratamiento térmico: Hornos Ebner con atmósfera de hidrógeno, comandados y regulados informáticamente que garantizan la obtención de estructuras esferoidales superiores al 90 % y la ausencia de pérdida de carbono en la superficie (descarburación)



- Trefiladoras: De última generación que aseguran la conformación de las espiras en las dimensiones requeridas y con la tolerancia de diámetro del alambre requerido.

- Humanos: Técnicos y personal productivo con formación permanente e involucrados en que el fin de nuestra empresa es la total satisfacción de los clientes. Los procesos aplicados para el acondicionamiento del alambre se ajustan a los requerimientos de nuestros clientes o a la deformación y productividad necesaria, correspondiendo a:

Trefilado + Recocido

Recocido + Trefilado

Trefilado + Recocido + Trefilado

Recocido + Trefilado + Recocido + Trefilado (Alta deformación)



## 2. PLANTEAMIENTO Y OBJETO DEL PROYECTO

Mediante este estudio, se pretende buscar una mejora para uno de los procesos de fabricación que se llevan a cabo en Trefilerías Quijano, como es el caso del patentado y posterior galvanizado del acero duro (denominando así a aquellos aceros que contienen más del 0,78% de carbono).

Esta mejora consiste en la obtención de un alambre patentado-galvanizado con unas propiedades más óptimas para su uso final, como son, una mayor resistencia a tracción y una estructura metalográfica con menos imperfecciones que las obtenidas hasta ahora. Para llegar a esto, se ha propuesto la utilización de aceros microaleados especiales comparándolo con aceros no microaleados y evitando la problemática de los aceros microaleados normales.

Como estudio, se ha hecho un seguimiento y análisis con tres diámetros de alambre distintos (9 mm; 9,5 mm y 10 mm), utilizando en todos ellos la misma calidad. Se debe tener en cuenta que la composición de dicha calidad puede variar ligeramente en función de cada colada suministrada por el proveedor.

Los parámetros del proceso (temperatura de horno de austenización, temperatura de enfriamiento en plomo y velocidad de recogida de alambre) variarán unos de otros debido a la diferencia de diámetro.

Las muestras estudiadas son identificadas mediante un número de bulto, el cual, va cambiando a medida que el producto avanza en el proceso. De esta manera, el alambión entra en fábrica con un número de bulto, ese material se decapa, y se numera de nuevo, y por último, se patenta y galvaniza, donde se vuelve numerar definitivamente.

Otro dato a destacar en la identificación de cada una de las muestras es la orden de fabricación. Esto es un código numérico generado automáticamente por el sistema y el cual incluye todos aquellos bultos que siendo un mismo producto final, parten de la misma materia prima, incluida la colada.



El proceso del estudio, constará de tres partes:

Decapado del alambrón

Patentado

Galvanizado



### 3. ESTADO DEL ARTE

#### 3.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL ACERO

##### 3.1.1. Definición del acero

Según la norma UNE-EN 10020, es la siguiente:

"Material en el que el hierro es predominante y cuyo contenido en carbono es, generalmente, inferior al 2% y contiene otros elementos. Aunque un limitado número de aceros puede tener contenidos en carbono superiores al 2% este es el límite habitual que separa el acero de la fundición".

##### 3.1.2. Características de los aceros

Mediante ajustes en la composición y diversos tratamientos térmicos, químicos y mecánicos pueden conseguirse aceros con combinaciones de características adecuadas para infinidad de aplicaciones. Seguidamente se comentan someramente algunas de las características de interés tecnológico.

##### Densidad

La densidad media del acero es de 7850 kg/m<sup>3</sup>, algo menor que la del hierro, su principal constituyente. Este elevado valor, que casi triplica el del aluminio, ha conllevado la paulatina sustitución del acero en aplicaciones en las que el peso, y más exactamente el ratio resistencia/peso, es un factor relevante por el incremento del consumo de combustible que conlleva, como en el caso de los vehículos y, en general, partes móviles de maquinaria.

Las mejoras introducidas en el diseño mecánico y en la fabricación del acero han permitido aligerar las estructuras sin merma de su resistencia pero pese a ello, el desarrollo de aleaciones de aluminio ha desplazado al acero en la construcción aeronáutica y en vehículos de todo tipo se vienen introduciendo paneles de fibra de carbono y otros materiales plásticos compuestos. No obstante estos últimos compiten en desventaja frente al acero por su aún elevado precio.



## Dureza

La dureza de los aceros varía entre aquella del hierro y la que puede lograrse mediante elementos de aleación y otros procedimientos entre los cuales quizá el más conocido sea el temple, aplicable a aceros con alto contenido en carbono que permite, cuando es superficial, conservar un núcleo tenaz en la pieza que evite fracturas frágiles.

Aceros típicos con alto grado de dureza superficial son los empleados en herramientas de mecanizado denominados “aceros rápidos”, que contienen cantidades significativas de cromo, wolframio, molibdeno y vanadio. Los ensayos tecnológicos para medir la dureza (resistencia a la penetración) son Brinell, Rockwell y Vickers, entre otros.

## Conductividad eléctrica

El hierro, dado su carácter metálico, es buen conductor de la electricidad; no obstante, su conductividad eléctrica es la sexta parte de la del cobre y la cuarta parte de la del aluminio. Aun así en las líneas aéreas de alta tensión se utilizan conductores de aluminio con alma de acero, proporcionando éste último la resistencia mecánica necesaria para incrementar los vanos entre las torres y optimizar así el coste de la instalación.

## Corrosión

Es el mayor inconveniente de los aceros, ya que el hierro se oxida con suma facilidad, incrementando su volumen y provocando grietas superficiales que posibilitan el progreso de la oxidación hasta que se consume la pieza por completo.

Tradicionalmente los aceros se han venido protegiendo mediante tratamientos superficiales diversos, principalmente el pintado con minio, si bien se han desarrollado aleaciones con resistencia a la corrosión mejorada como los aceros de construcción «Cor-Ten», aptos para intemperie en ciertos ambientes, o los aceros inoxidable empleados en la industria química.



## Dilatación

Al incrementarse la temperatura, la dilatación del acero no es, como se podría imaginar, nada excepcional, pero se da la circunstancia de que el valor de su coeficiente de dilatación ( $\alpha = 0,000012 \text{ K}^{-1}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) es prácticamente igual al del hormigón. Esta coincidencia permite combinar ambos elementos para obtener hormigón armado, material compuesto que al calentarse no sufre tensiones térmicas.

### **3.1.3. Elementos aleantes del acero y mejoras obtenidas con la aleación**

Los elementos de aleación no tienen un tanto por ciento fijo de presencia en todos los aceros, sino que varían para adaptarse a las exigencias, predeterminadas por el uso del producto acabado. Es decir, el acero de partida varía en composición según las mayores o menores exigencias del producto final.

A continuación se pasan a describir los elementos de los que se compone un acero, así como las propiedades que cada uno transmite a éste.

#### Carbono (C)

Este elemento entra en el proceso cedido por el combustible destinado a la fusión de los minerales de hierro en el horno alto (coque). Del horno alto se obtiene un producto denominado arrabio que contiene un porcentaje de carbono variable entre el 3% y el 4%. Esta cantidad de carbono supera los límites marcados para los aceros, que es generalmente inferior a 1,76%. El exceso de carbono se elimina por un procedimiento llamado afinado que consiste en inyectar oxígeno al arrabio fundido para que, por oxidación, se eliminen la mayoría de sus impurezas. De esta forma se elimina el sobrante de carbono, convirtiendo el arrabio en acero con las propiedades características de éstos, que les hacen aptos para su uso en sus aplicaciones determinadas.



La influencia del carbono en las propiedades de los aceros es muy variada, pero la característica principal que el carbono cede al acero y por la que es más conocido es la dureza. El carbono es en exclusiva el elemento que le da dureza a un acero. En el proceso de temple la dureza que alcanza el acero es una cualidad que solamente produce el carbono; otros elementos como el cromo, manganeso, etc. que se puede pensar que endurecen el acero, solo facilitan la templabilidad, sin tener influencia sobre la dureza.

El carbono se encuentra generalmente en los aceros combinado con el hierro, formando carburo de hierro (cementita), que contiene 6,67% de carbono. Es decir, que forma un compuesto químico o sustancia de propiedades perfectamente definidas y diferentes de las del hierro y de las del carbono, su fórmula es  $\text{CFe}_3$ , y está formado por tres partes de hierro y una de carbono. Por tanto, siempre que se hable del carbono en los aceros, hay que recordar que está mayoritariamente en forma de carburo de hierro y que siempre los componentes fundamentales del acero, cualquiera que sea su estado de tratamiento, son el hierro y el carburo de hierro.

### Manganeso (Mn)

Se considera elemento de aleación cuando su presencia está por encima de 1,6% en el acero. Normalmente, los aceros ordinarios y los aceros aleados en los que el manganeso no es elemento fundamental, suelen contener porcentajes de manganeso variables de 0,30 a 0,80%.

Se encuentra en los aceros debido a la ganga de muchas clases de minerales de hierro. Además, se añade voluntariamente como elemento ya que su presencia es útil para neutralizar el azufre, combinándose con él formando sulfuro de manganeso. También es un buen desoxidante, lo cual tiene dos ventajas principales: absorbe el oxígeno contenido en la masa del acero fundido, evitando así la formación de sopladuras, y evita, en parte, que en la solidificación del acero que se desprendan gases que den lugar a porosidades perjudiciales en el material.



El manganeso aporta al acero una resistencia al desgaste diez veces superior al de los aceros ordinarios de la misma resistencia mecánica a la tracción. Además aumenta la resistencia mecánica a la tracción, eleva su límite elástico y mejora la templabilidad de los aceros.

### Silicio (Si)

El silicio se considera como elemento aleado cuando su proporción supera el 5%. Se utiliza mucho como elemento desoxidante.

Las propiedades que el silicio trasmite al acero y que nos resultan más interesantes son, además de la desoxidación que produce en éstos, la mejora del límite elástico y de la resistencia a la tracción. Además, aumenta la templabilidad de un acero cuando el contenido en silicio supera el 0,4%.

Por otra parte, la presencia de silicio en un acero aumenta considerablemente la temperatura crítica inferior utilizada en los tratamientos térmicos.

Los aceros con porcentajes del 1 al 5% en silicio son muy resistentes al desgaste; los que contienen silicio en un porcentaje superior al 5% presentan una elevada resistencia a la oxidación y una alta resistencia al ataque de los ácidos por la capa de sílice formada en la superficie del material.

Debido a todas estas características se emplea el silicio para la producción de aceros de alta elasticidad (porcentajes de 1 al 2%), para la fabricación de chapa magnética (del 1 al 5%) y forma parte también en la composición de algunos aceros inoxidables mejorando su resistencia en caliente (del 0,5 al 2%).

### Fósforo (P)

Aunque en la mayoría de los casos se considera al fósforo como una impureza, tiene algunas aplicaciones en las que mejora las propiedades del acero, sobre todo aleado en proporciones muy pequeñas. El fósforo que contienen los aceros proviene de los minerales de hierro de partida



y no se considera elemento de aleación hasta que su tanto por ciento no supera el 0,05%.

El fósforo en porcentaje mayor al 0,08% produce problemas en los aceros, ya que, al disolverse en la ferrita disminuye la ductilidad, y además forma FeP (fosfuro de hierro). Éste, junto con la austenita y la cementita, forma un eutéctico ternario denominado esteadita, que es sumamente frágil y posee punto de fusión relativamente bajo, por lo cual aparece en bordes de grano, transmitiéndole al material su fragilidad.

Aun así, en porcentajes menores las últimas investigaciones han demostrado que no solo no es perjudicial para el acero sino que aumenta la resistencia del mismo tanto como el carbono. El cromo y el cobre aumentan la tolerancia para el fósforo aumentando la dureza, la resistencia a la tracción y el límite elástico del acero, disminuyendo la tenacidad; además, sobre todo en presencia de cobre, aumenta la resistencia a la corrosión atmosférica.

Sobre la base de estas propiedades el fósforo es empleado como elemento de aleación en aceros denominados de fácil mecanización (en proporciones del 0,06 al 0,12%); además se utiliza para producir una capa superficial que protege al acero de la corrosión por un procedimiento denominado fosfatación.

### Azufre (S)

El azufre que contiene el acero proviene en su mayoría del combustible empleado en la fabricación del arrabio en el horno alto (coque).

El azufre resulta perjudicial para la generalidad de los tipos de acero, ya que con el hierro forma sulfuro, el que, conjuntamente con la austenita, da lugar a un eutéctico cuyo punto de fusión es bajo y que, por lo tanto, aparece en bordes de grano. Cuando los lingotes de acero colado deben ser laminados en caliente, dicho eutéctico se encuentra en estado líquido, lo que provoca el desgranamiento del material; por esta razón el contenido de azufre no debe nunca sobrepasar el 0,05%.



Se controla la presencia de azufre mediante el agregado de manganeso. El manganeso tiene mayor afinidad por el azufre que por el hierro, por lo que, en lugar de FeS, se forma MnS, que tiene alto punto de fusión y buenas propiedades plásticas. El contenido de manganeso debe ser aproximadamente 5 veces la concentración de azufre para que se produzca la reacción.

A pesar de considerarse un elemento perjudicial, su presencia es positiva para mejorar la maquinabilidad en los procesos de mecanizado, por lo que el azufre es empleado como elemento de adición en proporciones de 0,13 a 0,30%, precisamente para hacer agrio el acero y obtener una fácil mecanización.

### Cromo (Cr)

Se considera el cromo como elemento de aleación cuando supera el 0,03% de presencia en el acero; también tiene su origen en chatarras al cromo que formaron parte de la carga del horno.

El cromo es un elemento que tiene gran influencia en la velocidad de temple dependiendo de la temperatura a la que se haga la operación; si la temperatura no es suficiente y no lo es tampoco el tiempo de permanencia, el cromo reduce la templabilidad, si tanto el tiempo como la temperatura, son suficientes, el cromo produce una notable mejora en la templabilidad.

El cromo provoca en el acero un aumento de la dureza, formando carburos muy duros y fortaleciendo la ferrita. Aumenta también la resistencia a la tracción, el límite elástico y la tenacidad. Además limita el crecimiento del grano y retarda la descarburación superficial.

Solo o aleado con otros elementos, proporciona a los aceros características de inoxidable y refractarios. Con porcentajes mayores al 5%, el cromo confiere al acero una resistencia elevada a la corrosión.

Por todas estas razones se emplea el cromo en la fabricación de aceros para herramientas de alta elasticidad e indeformables, también



para la fabricación de aceros inoxidables en proporción hasta de un 25% y, por su característica de elemento resistente a la corrosión y a altas temperaturas, en procesos de recubrimiento superficial (cromado).

### Níquel (Ni)

Solo puede ser aportado, al igual que el cromo, como adición voluntaria o por chatarras que lo contengan. Se considera al níquel como elemento de aleación cuando supera el 0,30% en el metal.

El níquel es un gran fortalecedor de la ferrita, evitando el crecimiento del grano en los tratamientos térmicos, lo cual mejora la tenacidad de los aceros brutos de laminación. Además aumenta la resistencia y el límite elástico.

Por ello el níquel se emplea para la obtención de aceros de alta templabilidad y gran dureza, para la obtención de los aceros inoxidables debido a que aumenta la resistencia a la corrosión, y para la fabricación de aceros de muy bajo coeficiente de dilatación.

### Molibdeno (Mo)

Se considera el molibdeno como elemento de aleación cuando supera el 0,08% de concentración en el acero. No proviene de los minerales de hierro, sino que su adición es voluntaria, o en todo caso su procedencia se debe a las chatarras de partida utilizadas en su fabricación.

El molibdeno aumenta la templabilidad del acero cuando se calienta a una temperatura suficiente para conseguir la dilución de los carburos. Se utiliza también en pequeñas proporciones para combatir la fragilidad en el revenido. También aumenta la resistencia a la tracción, el límite elástico y la dureza de los aceros, manteniendo los mismos valores a temperaturas relativamente elevadas.

Por lo tanto el molibdeno se emplea conjuntamente con el cromo para fabricar aceros de gran templabilidad, y sin el cromo para aceros inoxidables y refractarios. Por otra parte, puede sustituir al wolframio en la fabricación de aceros rápidos. También se emplea en algunos aceros



de cementación en proporciones de 0,15 a 0,40%, pues favorece la carburación superficial.

### Aluminio (Al)

Para que el aluminio se considere elemento de aleación debe añadirse en proporciones superiores a 0,1%. Se puede emplear como elemento de aleación en los aceros de nitruración, donde suele tener 1% aproximadamente de aluminio, o como desoxidante en la fabricación de muchos aceros. Todos los aceros aleados de calidad contienen aluminio en porcentajes pequeñísimos, variables generalmente desde 0.001 a 0.008%.

Se utiliza para la desoxidación del acero en el transcurso del afino; se consigue con el aluminio afinar el grano, pues se forman partículas de alúmina que actúan como centros de cristalización.

Pequeños porcentajes de aluminio disminuyen la templabilidad del acero, pero porcentajes mayores restablecen la templabilidad primitiva. Indirectamente influye también en la templabilidad del acero por su acción afinante del grano de la austenita. También en pequeños porcentajes, que es la forma en la que se va a utilizar en los aceros para estampación, mejora la estricción y la resiliencia de los aceros.

Otras características importantes del aluminio son que es el único capaz de modificar sensiblemente el módulo de Young del acero, y que mejora mucho la resistencia a la corrosión del acero en contacto con el aire y con el agua de mar.

### Boro (Bo)

La principal característica de los aceros al boro es la mejora de la templabilidad ocasionada por la adición de una pequeña cantidad de boro. Mientras que algunos metales, como por ejemplo el cromo y el molibdeno, aumentan la templabilidad del acero en relación directa con las cantidades añadidas, el boro debe añadirse en las cantidades óptimas definidas.



La eficacia del boro sobre la mejora de la templabilidad depende de la cantidad de carbono presente en el acero. Así, su efecto crece en relación inversa al contenido de carbono. Los aceros con bajo contenido en carbono presentan buena deformación en frío.

El efecto del temple varía considerablemente, dependiendo de la naturaleza del boro presente en el acero. El boro debe encontrarse en estado metalúrgicamente soluble para mejorar la templabilidad. Si se cambia la naturaleza estructural del acero a causa de un tratamiento térmico incorrecto, el boro puede ser inefectivo. Debe evitarse una temperatura de austenización demasiado elevada y debe evitarse también intervalos de temperatura en los que precipitan ciertos compuestos de boro que fragilizan el acero.

Hay otros elementos de aleación que no son tan habituales en un acero, pero no por ello son menos importantes y prescindibles. A continuación se detallan los más importantes y las características que aportan.

- Cobalto (Co): Mejora la dureza en caliente. El cobalto es un elemento poco habitual en los aceros. Se usa en los aceros rápidos para herramientas y para aceros refractarios. Aumenta sus propiedades magnéticas.

- Nitrógeno (N): Se agrega a algunos aceros para promover la formación de austenita.

- Plomo (Pb): Se encuentra en el acero en forma de pequeñísimos glóbulos, como si estuviese emulsionado. El porcentaje oscila entre 0,15 y 0,30%, debiendo limitarse el contenido de carbono a valores inferiores al 0,5%, ya que dificulta el templeado y disminuye la tenacidad en caliente. El plomo es un buen lubricante de corte; se añade a algunos aceros para mejorar mucho la maquinabilidad.

- Tungsteno o Wolframio (W): Forma con el hierro carburos muy complejos estables y durísimos, soportando bien altas temperaturas. En porcentajes del 14 al 18%, proporciona aceros rápidos, con los que es



posible triplicar la velocidad de corte de los aceros al carbono para herramientas.

- Vanadio (V): Posee una enérgica acción desoxidante y forma carburos complejos con el hierro, que proporcionan al acero una buena resistencia a la fatiga, tracción y poder cortante en los aceros para herramientas.

#### **3.1.4. Estructura de los metales**

Todos los materiales están integrados por átomos, los cuales se organizan de diferentes maneras dependiendo del material que se trate y el estado en el que se encuentra.

Cuando un material se encuentra en forma de gas, sus átomos están más dispersos o desordenados (a una mayor distancia uno de otro) en comparación con los átomos de ese mismo material pero en estado líquido o sólido. Existen materiales en los que sus átomos siempre están en desorden o desalineados aún en su estado sólido, a los que se les llama materiales amorfos; un ejemplo es el vidrio, al que se considera como un líquido solidificado.

En el caso de los metales, cuando estos están en su estado sólido, sus átomos se alinean de manera regular en forma de mallas tridimensionales. Estas mallas pueden ser identificadas fácilmente por sus propiedades químicas, físicas o por medio de los rayos X. Cuando un material cambia de tipo de malla al modificar su temperatura, se dice que es un material polimorfo o alotrópico.

Cada tipo de malla en los metales da diferentes propiedades; no obstante, puede variar aun tratándose del mismo material: por ejemplo, en el caso del hierro aleado con el carbono, se pueden encontrar tres diferentes tipos de mallas: la malla cúbica centrada en el cuerpo (BCC), la malla cúbica centrada en las caras (FCC) y la malla hexagonal compacta (HCP). Cada una de estas estructuras atómicas tiene diferentes números de átomos, como se puede ver en la imagen 1:

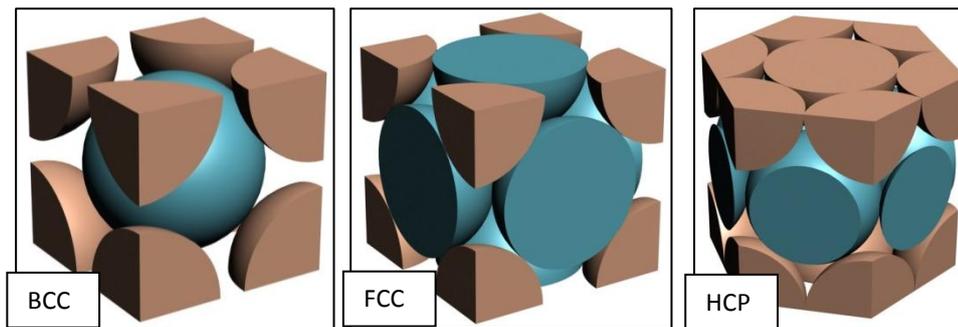


Imagen 1. Estructura de metales. Fuente: <http://ocw.uc3m.es/>

La malla cúbica centrada en el cuerpo es la estructura que tiene el hierro a temperatura ambiente, y se conoce como hierro alfa. Tiene átomos en cada uno de los vértices del cubo que integra a su estructura y un átomo en el centro. También se encuentran con esta estructura el cromo, el molibdeno y el tungsteno.

La malla cúbica centrada en las caras aparece en el hierro cuando su temperatura se eleva a aproximadamente a  $910^{\circ}\text{C}$ , y se conoce como hierro gamma. Tiene átomos en los vértices y en cada una de sus caras, y su cambio es notado, además de por los rayos X, por la modificación de sus propiedades eléctricas, por la absorción de calor y por las distancias intermoleculares. A temperatura elevada, el aluminio, la plata, el cobre, el oro, el níquel, el plomo y el platino son algunos de los metales que tienen esta estructura de malla.

La malla hexagonal compacta se encuentra en metales como el berilio, cadmio, magnesio, y titanio. Es una estructura que no permite la maleabilidad y la ductilidad, es frágil.

Modificar la malla de un metal permite la participación de más átomos en una sola molécula; estos átomos pueden ser de un material aleado como el carbón en el caso del hierro, lo que implica que se puede diluir más carbón en un átomo de hierro. Si se tiene en cuenta que el carbón es el que, en ciertas proporciones, da la dureza al hierro, entonces lo que se hace al cambiar la estructura del hierro es permitir que se diluya más carbón, con lo que se modifican sus propiedades.



## 3.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL ENSAYO DE MATERIALES

### 3.2.1. Ensayo de tracción

#### Introducción

El ensayo a tracción es la forma básica de obtener información sobre el comportamiento mecánico de los materiales. Mediante una máquina de ensayos se deforma una muestra o probeta del material a estudiar, aplicando la fuerza uniaxialmente en el sentido del eje de la muestra. A medida que se va deformando la muestra, se va registrando la fuerza (carga), llegando generalmente hasta la fractura de la pieza. Así pues, el resultado inmediato es una curva de carga frente a alargamiento, que transformados en tensión y deformación, en función de la geometría de la probeta ensayada, aportan una información más general.

Esta práctica tiene el objetivo inmediato de ilustrar, mediante la experiencia, las propiedades mecánicas de los materiales que se derivan a partir de un ensayo a tracción.

Los objetivos añadidos son:

1. Conocer cómo se fijan las condiciones de ensayo, cómo se realiza el ensayo y que información se puede extraer a partir de los datos registrados.
2. Cómo utilizar una máquina de ensayos mecánicos y tener una visión de su potencial, versatilidad y posibilidades para caracterizar mecánicamente los materiales.

#### Fundamentos teóricos

El ensayo de tracción tiene por objetivo definir la resistencia elástica, resistencia última y plasticidad del material cuando se le somete a fuerzas uniaxiales. Se requiere una máquina, prensa hidráulica por lo general, capaz de:

- a. Alcanzar la fuerza suficiente para producir la fractura de la probeta.
- b. Controlar la velocidad de aumento de fuerzas.

c. Registrar las fuerzas, (F) que se aplican y los alargamientos, (L) que se observan en la probeta.

La máquina de ensayo impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionable. La celda de carga, conectada a la mordaza fija, entrega una señal que representa la carga aplicada. Las máquinas están conectadas a un ordenador que registra el desplazamiento y la carga leída. Si representamos la carga frente al desplazamiento obtendremos una curva como la mostrada en la figura 1:

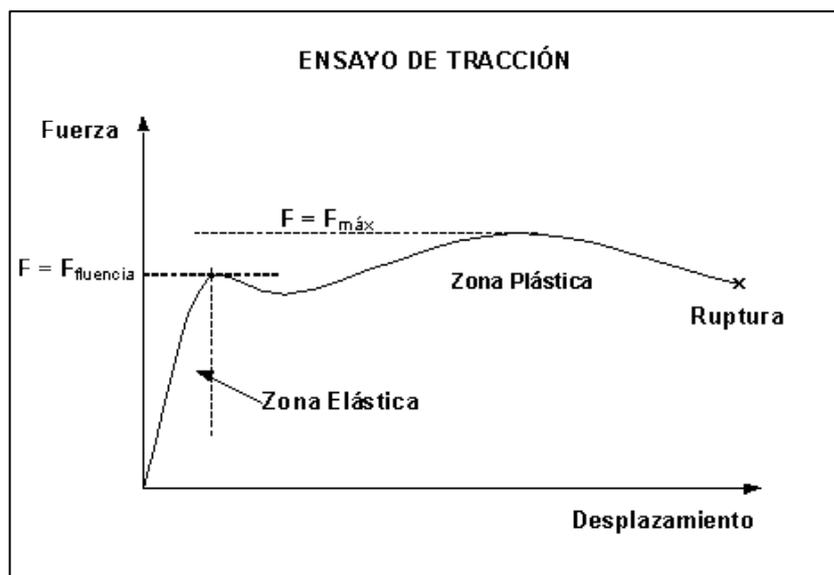


Figura 1. Curva ensayo tracción. Fuente: <http://descom.jmc.utfsm.cl/sgeywitz/sub-paginas/Materiales/Ensayotraccion/Ensayodetraccion.htm>

La probeta a ensayar se sujeta por sus extremos al cabezal móvil de la máquina de ensayos y a la célula de carga, respectivamente. Las mordazas de sujeción deben mantener firme a la muestra durante el ensayo, mientras se aplica la carga, impidiendo el deslizamiento. A su vez, no deben influir en el ensayo introduciendo tensiones que causen la rotura en los puntos de sujeción. Para que el ensayo se considere válido la rotura debe ocurrir dentro de la longitud calibrada, en la parte central de la probeta.

A partir de las dimensiones iniciales de la probeta, se transforman la fuerza en tensión y el alargamiento en deformación, que nos permite caracterizar las propiedades mecánicas que se derivan de este ensayo.

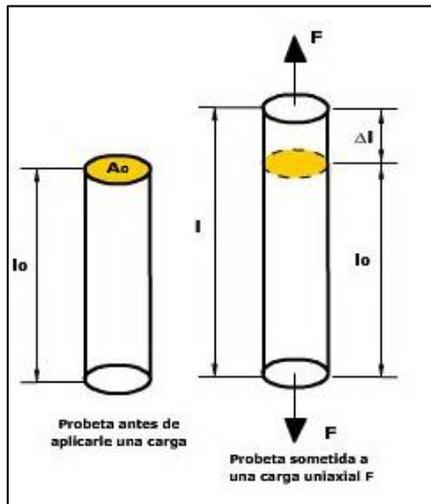


Figura 2. Probeta ensayo tracción. Fuente: educativa.catedu.es

$$\text{Tensión: } \sigma = \frac{F}{A_0}$$

$$\text{Deformación: } \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

De tal forma que la curva típica sería tensión frente a deformación, tal y como se muestra a continuación en la figura, donde D es el límite elástico,  $D_{0L}$  muestra el punto de fractura y la resistencia a tracción ( $\sigma_{max}$ ) está indicada en el punto C. Los insertos circulares representan la geometría de la probeta deformada en varios puntos de la curva.

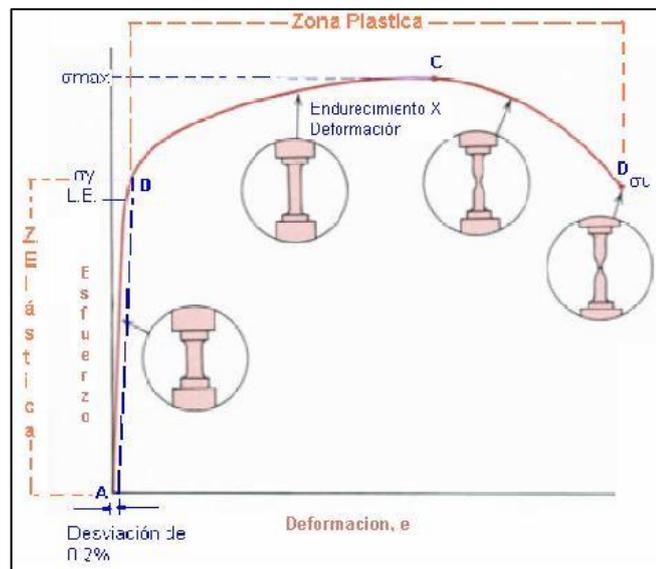


Figura 3. Relación curva tracción-probeta. Fuente: www.aulatecnologia.com

En la curva podemos distinguir dos regiones:

**Zona elástica:** La región a bajas deformaciones (hasta el punto D), donde se cumple la Ley de Hooke:  $\sigma = \varepsilon \times E$  ( $E =$  modulo elástico).



*Zona plástica:* A partir del punto D. Se pierde el comportamiento lineal, el valor de tensión para el cual esta transición ocurre, es decir, se pasa de deformación elástica a plástica, es el Límite de Elasticidad ( $\sigma_y$ ) del material.

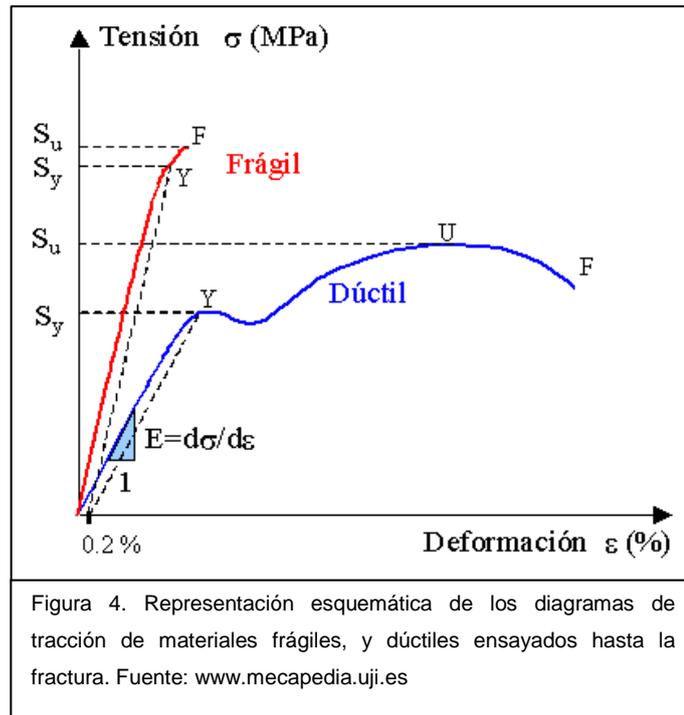
Después de iniciarse la deformación plástica, la tensión necesaria para continuar la deformación en los metales aumenta hasta un máximo (punto C), resistencia a tracción (RT o  $\sigma_{max}$ ), y después disminuye hasta que finalmente se produce la fractura, punto D<sub>σL</sub>. La resistencia a tracción es la tensión en el máximo del diagrama tensión – deformación nominales. Esto corresponde a la máxima tensión que puede ser soportada por una estructura a tracción. Si esta tensión es aplicada y mantenida, se producirá la rotura. Hasta llegar a este punto, toda la deformación es uniforme en la región estrecha de la probeta. Sin embargo, cuando se alcanza la tensión máxima, se empieza a formar una disminución localizada en el área de la sección transversal en algún punto de la probeta, lo cual se denomina estricción, y toda la deformación subsiguiente está confinada en esta zona. La fractura ocurre en la estricción. La tensión de fractura o bien de rotura corresponde a la tensión en la fractura.

### Ductilidad

La ductilidad es otra importante propiedad mecánica. Es una medida del grado de deformación plástica que puede ser soportada hasta la fractura. Un material que experimenta poca o ninguna deformación plástica se denomina frágil. La ductilidad puede expresarse cuantitativamente como alargamiento relativo porcentual, o bien mediante el porcentaje de reducción de área. El alargamiento relativo porcentual a rotura (%EL) es el porcentaje de deformación plástica a rotura, o bien:

$$\%EL = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100$$

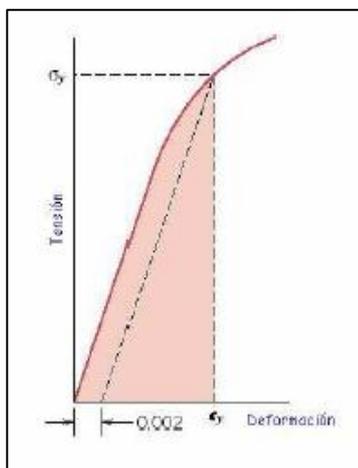
Donde  $l_f$  es la longitud en el momento de la fractura y  $l_0$  es la longitud de prueba original.



### Tenacidad

La tenacidad de un material es un término mecánico que se utiliza en varios contextos. En sentido amplio, es una medida de la capacidad de un material de absorber energía antes de la fractura. La geometría de la probeta así como la manera con que se aplica la carga son importantes en la determinación de la tenacidad.

### Resiliencia



Medida de la capacidad de un material de absorber energía elástica antes de la deformación plástica.

$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon$$



### 3.2.2. Ensayo metalográfico

La metalografía es la parte de la metalurgia que estudia las características estructurales o de constitución de los metales y aleaciones, para relacionarlas con las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los mismos. La importancia del examen metalográfico radica en que, aunque con ciertas limitaciones, es capaz de revelar la historia del tratamiento mecánico y térmico que ha sufrido el material. A través de este estudio se pueden determinar características como el tamaño de grano, distribución de las fases que componen la aleación, inclusiones no metálicas como sopladuras, micro cavidades de contracción, escorias, etc., que pueden modificar las propiedades mecánicas del metal. En general a partir de un examen metalográfico bien practicado es posible obtener un diagnóstico y/o un pronóstico. El examen metalográfico puede realizarse antes de que la pieza sea destinada a un fin, a los efectos de prevenir inconvenientes durante su funcionamiento, o bien puede ser practicado sobre piezas que han fallado en su servicio, es decir, piezas que se han deformado, roto o gastado. En este caso la finalidad del examen es la determinación de la causa que produjo la anormalidad. Básicamente, el procedimiento que se realiza en un ensayo metalográfico incluye la extracción, preparación y ataque químico de la muestra, para terminar en la observación microscópica. Si bien la fase más importante de la metalografía es la observación microscópica, la experiencia demuestra que poco se puede hacer si alguna de las operaciones previas se realiza deficientemente. Si la etapa de preparación no se realiza cuidadosamente es posible que se obtenga una superficie poco representativa del metal y sus características. Una preparación incorrecta puede arrancar inclusiones no metálicas, barrer las láminas de grafito en una muestra de fundición, o modificar la distribución de fases si la muestra ha sufrido un sobrecalentamiento excesivo. A continuación se hará una breve descripción de cada uno de los pasos previos a la observación en el microscopio, comenzando por la extracción de la muestra, siguiendo con las distintas fases de preparación de la misma y por último se describe el ataque químico a la muestra y la observación microscópica.



## **A. Extracción de la muestra**

Durante la extracción de la muestra es fundamental considerar el lugar de donde se extraerá la probeta y la forma en que se hará dicha extracción. Se debe tener en cuenta que no es indiferente el lugar de donde se extraerá la muestra, según sea el objetivo del examen. Por ejemplo cuando se trata de una pieza rota en servicio y el objeto del examen es determinar las causas de dicha falla, la probeta debe extraerse, en la medida de lo posible, de la zona puntual donde la pieza ha fallado. Esto permitirá obtener la mayor información posible de las características del material en dicha zona y así obtener mejores conclusiones sobre las posibles causas de la falla. Por ejemplo, si se pretende determinar si un trozo de alambre posee trabajo en frío, causado por algún proceso de trefilado, se deberá observar una cara paralela al eje longitudinal de dicho trozo; por lo tanto la extracción de la muestra estará determinada por esta condición. En síntesis se debe lograr una muestra representativa del material a examinar. En cuanto a la forma de extracción de la probeta se debe tener en cuenta que esta operación debe realizarse en condiciones tales que no afecten la estructura superficial de la misma. Por lo tanto se debe cuidar que la temperatura del material no se eleve demasiado durante el proceso de extracción. La extracción se puede hacer con cierras de corte manual, o en el caso de piezas muy duras con cortadoras sensitivas muy bien refrigeradas.

## **B. Preparación de la muestra**

La preparación de la muestra puede dividirse en tres fases:

- a) Desbaste Grosero
- b) Desbaste Final
- c) Pulido
- a) Desbaste Grosero



El desbaste grosero se practica una vez extraída la probeta con la finalidad de reducir las irregularidades, producidas en la operación de extracción, hasta obtener una cara lo más plana posible. Esta operación puede realizarse con una cinta de desbaste o bien en el caso de materiales no muy duros como aceros sin temprar y fundiciones se puede hacer con lima, aunque aumente algo la distorsión que se produce en la superficie a causa de la fluencia del material. De cualquier manera que se practique el desbaste grosero siempre se debe cuidar que la presión no sea exagerada para que la distorsión no sea muy importante, ni la temperatura de la superficie se eleve demasiado.

#### b) Desbaste Final

La operación de desbaste final comienza con un abrasivo de 150, seguido del 250, 400, para terminar con el 600 o 1000. El desbaste se puede realizar a mano o con desbastadoras mecánicas. Para el caso de desbaste manual el papel abrasivo se coloca sobre una placa plana y limpia y se mueve la probeta longitudinalmente de un lado a otro del papel aplicándole una presión suave; se debe mantener la misma la dirección para que todas las rayas sean paralelas. Durante la operación se debe dejar que una corriente de agua limpie los pequeños desprendimientos de material y a su vez lubrique y refrigere la zona desbastada. El final de la operación sobre un papel está determinada por la desaparición de las rayas producidas durante el desbaste grosero o el papel anterior. Para poder reconocer esto fácilmente se opera de manera que las rayas de un papel a otro sean perpendiculares, es decir se debe rotar 90° la dirección de movimiento de la probeta cada vez que se cambia de abrasivo. Además cada vez que se cambia de abrasivo es conveniente lavar la probeta y enjuagarse las manos para no transportar las partículas desprendidas en el abrasivo anterior, ya que esto puede provocar la aparición de rayas. La presión que se aplica a la probeta no debe ser exagerada ya que esto aumenta la distorsión y además pueden aparecer rayas profundas. La presión debe ir disminuyendo a medida que se avanza en la operación. Si el desbaste se realiza en forma automática las precauciones son las mismas que para el desbaste



manual. En este caso el abrasivo está adherido sobre un disco de 20 cm de diámetro, aproximadamente, que gira a velocidades que pueden oscilar entre 250 y 600 RPM; las velocidades más altas se usan con los abrasivos más gruesos.

Cuando los metales a pulir son demasiado blandos es conveniente impregnar los abrasivos con un lubricante adecuado.

### c) Pulido

El pulido tiene por objeto eliminar las rayas finas producidas en el desbaste final y producir una superficie con características especulares. Esta operación por lo general se realiza en forma mecánica y se utiliza un paño impregnado con partículas de algún abrasivo en solución acuosa. Básicamente, se pueden utilizar dos tipos de paños: con pelo (pana, terciopelo, lanas) y sin pelo (seda natural). Se debe elegir el que más se adapte al tipo de material a examinar. Por ejemplo, el pulido de muestras de fundición se debe realizar con paños sin pelo para evitar el arrancamiento de grafito. En cuanto a los abrasivos pueden ser: pasta de diamante, alúmina, etc. El abrasivo comúnmente utilizado es la alúmina, que es óxido de aluminio en partículas y que comercialmente se obtiene en forma de pastas o soluciones acuosas. Se debe cuidar que la humedad del paño sea la adecuada, es decir, si la humedad es excesiva la acción abrasiva se retardará demasiado y si es escasa la probeta tiende a mancharse. Si bien es muy cierto que cuanto más pulida esté la superficie más clara será la imagen que obtengamos en el ocular, muchas veces no es necesario llegar hasta un pulido perfecto, sino que bastará con que la densidad de rayas en la superficie sea lo suficientemente baja y preferentemente en una sola dirección. Si con un aumento de 500x se pueden distinguir porciones lisas más o menos grandes entre las rayas, entonces el pulido puede darse por terminado. Dado que las zonas rayadas serán más atacadas que las zonas lisas, si la densidad de rayas es muy alta y si a su vez están en dos o más direcciones, el oscurecimiento de las rayas durante el ataque cubrirán los detalles de la estructura del material.



## Distorsión

Es un fenómeno natural que se produce en la superficie durante las operaciones de desbaste y pulido. Los esfuerzos mecánicos que introducen las partículas de abrasivo, sumado al efecto térmico producen la fluencia del metal en la superficie de la muestra. Esta fluencia de metal destruye, al menos parcialmente, el estado cristalino del metal. Dado que la superficie resultante posee una energía libre mayor, sumado a que dicha distorsión solo posee una profundidad de algunas distancias interatómicas, en general este efecto es eliminado luego del ataque químico. En caso que la distorsión no sea eliminada en el primer ataque, serán necesarias 3 o 4 sesiones alternadas de ataque y pulido.

## **C. Ataque Químico**

El ataque químico de la cara que se observará tiene por objetivo poner en evidencia, mediante un ataque selectivo, las características estructurales de la muestra. Al aplicar el reactivo sobre la superficie a observar, las características de la estructura son reveladas como consecuencia de un ataque selectivo de la superficie. Esto se debe a que las distintas fases así como los planos cristalográficos diferentemente orientados poseen diferencias en la susceptibilidad al ataque. En general aquellas regiones de la estructura donde la energía libre del sistema es mayor, como por ejemplo los límites de fases, bordes de grano, etc., son atacadas más rápidamente que las regiones monofásicas o ínter granulares. Los reactivos de ataque por lo general son ácidos orgánicos disueltos en agua, alcohol, glicerina, etc. El grado de ataque de una probeta es función de la composición, temperatura y tiempo de ataque. Para que el ataque sea apropiado es necesario elegir el reactivo de acuerdo a la composición de la probeta, es decir, un reactivo a base de persulfato de amonio es ideal para atacar probetas de cobre y latón, pero no es adecuado para atacar al acero o aleaciones ferrosas. En cambio el nital (solución acuosa o alcohólica de ácido nítrico al 2% o hasta el 5%) es uno de los reactivos más comúnmente usado en aleaciones ferrosas y aceros. En la tabla se encuentran algunos



reactivos con su composición y usos más frecuentes. En general, dado un reactivo, el tiempo de ataque es una variable fundamental, y en general debe ser determinado en forma práctica. Un tiempo de ataque demasiado corto (subataque), no permitirá que el reactivo actúe lo suficiente y por lo tanto no se obtendrá un buen contraste entre las fases, o los bordes de grano aún no habrán aparecido. Por otro lado, un sobre ataque proporcionará una cara oscura con bordes de grano demasiado anchos, resultando dificultoso una distinción clara de las proporciones de cada una de las fases. En este sentido la experiencia indica que en el caso de no conocer el tiempo de ataque adecuado, es conveniente comenzar con secciones acumulativas de ataques de corta duración y observaciones microscópicas hasta lograr el contraste apropiado. En el caso que se produjese un sobre ataque será necesario pulir la probeta en el abrasivo más fino y también en el paño antes de atacar nuevamente durante un tiempo menor.

#### Métodos de ataque.

Antes de realizar el ataque se debe limpiar y desengrasar con alcohol la cara de la muestra a atacar y luego se debe secar con aire caliente. Los modos de ataque principalmente son dos: uno sumergiendo la probeta en el reactivo con la cara que se observará hacia arriba y el otro es mojando un algodón con el reactivo y frotar la cara de la probeta. Transcurrido el tiempo de ataque se debe tomar la probeta y lavar con agua o alcohol e inmediatamente se debe secar con aire caliente. En el caso que se lave con agua es conveniente enjuagar rápidamente la probeta con alcohol y luego secarla con aire, esto previene la formación de manchas de óxido. La muestra se debe manipular en todo momento con pinzas por dos razones fundamentales: para no tener inconvenientes con el reactivo y para no tocar la muestra con las manos ya que esto manchará la superficie de la misma.

Nombre del reactivo	Composición		Aplicaciones
	Componentes	Cantidad	
Ácido nítrico(nital 2%)	Ácido nítrico	2 cm <sup>3</sup>	Aceros, Hierros, Fundiciones
	Alcohol	100 cm <sup>3</sup>	
Ácido Pírico (Picral)	Ácido pírico	4 g	Aceros de baja aleación
	Alcohol	100 cm <sup>3</sup>	
Ácido clorhídrico	HCl concentrado	1 cm <sup>3</sup>	Aceros templados
	Agua	100 cm <sup>3</sup>	
Reactivo de Bolton	Ácido pírico	6 g	Fundiciones
	Alcohol etílico	78 cm <sup>3</sup>	
	Ácido nítrico	2 cm <sup>3</sup>	
	Agua	20 cm <sup>3</sup>	
Ácido Nítrico concentrado	Ácido nítrico concentrado	50 cm <sup>3</sup>	Latones $\alpha + \beta$
Persulfato de amonio	Persulfato de amonio	10 g	Cobre y sus aleaciones
	Agua	100 g	
Cloruro férrico ácido	Cloruro férrico	5 g	Cobre, zinc y sus aleaciones
	Agua	5 cm <sup>3</sup>	
	Ácido clorhídrico	30 cm <sup>3</sup>	
	Alcohol isoamilico	30 cm <sup>3</sup>	
	Alcohol 96°	30 cm <sup>3</sup>	
Ácido Nítrico	A) Diluido en concentraciones de 0; 5; 1 y 10%		Zinc y eutéctico Zn-Al
	B) Ácido nítrico diluido en alcohol		
Ácido fluorhídrico	Ácido fluorhídrico	5 ml	Aluminio
	Agua	99,5 ml	

Tabla 1. Reactivos para ataque químico y aplicaciones para ensayo metalográfico. Fuente: <https://materiales.wikispaces.com>

### 3.2.3. Medición de diámetro

Este tipo de comprobación se realiza por medio de un micrómetro digital, se trata de un ensayo de autocontrol muy sencillo y consiste en ir aproximando las dos patillas que tiene el micrómetro hasta ponerse en contacto con el alambre.

Se comprueban 3 medidas en diferentes posiciones de la varilla, y se calcula la media de los valores. Comprobando que no haya una gran distorsión entre ellas.



Imagen 2. Micrómetro para medición de diámetro.

### 3.2.4. Determinación de gramos zinc

Para la realización de este ensayo, se corta un trozo, de unos 10 cm de largo, se pesa en una báscula, a continuación, se sumerge en ácido clorhídrico y se espera a que cese el burbujeo (es el indicador de que se ha eliminado toda la capa de zinc), se limpia y seca la muestra, se vuelve a pesar y por último se mide el diámetro.



Imagen 3. Báscula para pesar muestras de acero.

Aplicando la siguiente fórmula, se obtienen los gramos de zinc:

$$\frac{1950 * \phi_{final} * diferencia\ de\ peso}{peso\ final\ sin\ zinc}$$

## 3.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL PATENTADO

### 3.3.1. Introducción

El trefilado modifica profundamente las características del alambre de tal manera que llega un momento (después de una determinada reducción) en que no puede continuarse el trefilado. Para hacer posibles posteriores elaboraciones, el alambre debe ser tratado térmicamente a fin de obtener una mejora en la maleabilidad y ductilidad del mismo por transformación de su estructura metalográfica.



El tratamiento térmico al que deben ser sometidos los laminados y los alambres trefilados de aceros duros o semiduros reúnen unas características especiales y es denominado con la palabra "PATENTADO".

#### Breve historia del patentado.

Hasta hace apenas algo más de cien años el redondo de acero se laminaba en trenes con castilletes de tres cilindros que producían varillas rectas de una longitud aproximada de 4,5 metros y de diámetros comprendidos entre 12 y 13mm. Aún no había sido descubierto el hecho de que la varilla, una vez reducida a una sección determinada, podía agarrarse por la punta con unas tenazas y ser introducida, haciéndola girar 180 grados a través de la pasada siguiente.

Este descubrimiento, que tuvo lugar en Bélgica en 1.860, dio origen al tren "looping" con el cual ya se conseguían laminados de 100 metros de longitud arrollado en piezas de hasta 25Kg de peso. Así pues, hasta que no se introdujo el tren "looping", los aceros duros se laminaban a partir de aceros forjados en los que había sido introducido carbono por "cementación"

Este proceso consistía en calentar las barras hasta el rojo, manteniéndolas en contacto con carbón de madera, en ollas refractarios lo más herméticos posible para evitar la entrada de aire, Después de este calentamiento, las barras eran recalentadas y "martilladas" (forjadas) y finalmente arrolladas.

Los rollos así obtenidos se refileaban posteriormente con lo que se obtenían alambres duros, cuyo destino principal, era la construcción de pianos (de aquí la denominación de "cuerda de piano" que aun actualmente se asigna a muchos de los alambres de alta resistencia).

Pero este laminado cementado era muy difícil de trefilar debido a su dureza y a su fragilidad. En el año 1.854, cuando HORSFALL y MILLS, en Birmingham (Inglaterra) "patentaron" un procedimiento de tratamiento térmico para los laminados y los alambres, con el que conseguían un trefilado más fácil. En aquellos momentos, ese proceso produjo un gran impacto sobre la industria de Trefilería. Tan decisivo, que aún hoy se aplica



el nombre de "PATENTADO" a este tratamiento térmico utilizado para los aceros duros y semiduros.

### **3.3.2. Objeto del patentado**

El patentado tiene por objeto aumentar considerablemente la capacidad de trefilado de un alambre sin llegar a un punto tal en el que la fragilidad del material impida seguir estirándolo

Cuando con el estire se alcanza dicho punto de fragilidad, el tratamiento térmico puede volver a repetirse, y así, alternando los trefilados y los patentados, un acero duro puede ser reducido de sección tanto cuanto se desee.

El proceso consiste en calentar el laminado o el alambre a una temperatura comprendida entre los 850°C y 1.050°C, enfriándolo a continuación bruscamente en plomó, en sales fundidas o en una corriente forzada de aire.

#### **3.3.2.1. Modificación de la estructura por el patentado**

La estructura microscópica del alambre resulta fuertemente modificada con este tratamiento térmico, transformándose en una estructura más o menos homogénea a la que generalmente se la designa con el nombre de SORBITA. La idea principal es que el tratamiento del "Patentado" distribuye el carbono, que forma parte de la composición del metal, por todo el acero en forma de finísimas láminas de carburo de hierro llamado cementita.

#### **3.3.2.2. Efectos 'del "Patentado"**

Los cambios en la estructura microscópica repercuten, considerablemente en las características mecánicas de los alambres y particularmente sobre las propiedades que tienen los alambres después de ser trefilados.



A continuación se presentan unos cuadros tomados de M. Bonzel, que muestran los efectos que tiene el Patentado sobre las características mecánicas.

En estos dos primeros cuadros se presentan los resultados obtenidos en los ensayos efectuados sobre un laminado de acero duro, antes y después de patentarlo y cuya composición es la siguiente:

- Carbono: 0,740%
- Manganeso. 0,680%
- Silicio: 0,210%
- Azufre: 0,022%
- Fosforo: 0,020%

<b>Redondo laminado en bruto</b>							
Nº pasadas	bruto	1	2	3	4	5	6
Diametro (mm)	5	4,24	3,7	3,39	2,87	2,51	2,1
Resistencia Total (kg)	2000	1820	1610	1300	1030	900	650
Resistencia unitaria (kg/mm2)	102	128	150	144	162	182	188
Alargamiento (%)	15						
Estricción(%)	36	28	18	19	17	13	4,5
Nº Flexiones		3	7	4	5	5	10

<b>Redondo patentado al plomo</b>							
Nº pasadas	bruto	1	2	3	4	5	6
Diametro (mm)	4,87	4,29	3,75	3,34	2,95	2,47	2,1
Resistencia Total (kg)	2520	2275	1850	1620	1190	950	780
Resistencia unitaria (kg/mm2)	136	157	167	174	174	198	225
Alargamiento (%)	11						
Estricción(%)	23	26	33,5	31	41	35	45
Nº Flexiones		10	12	11	24	12	14
Tª horno: 950°C; TªPb: 520°C; Velocidad de paso: 4,50m/min							

En los dos cuadros siguientes se presentan los resultados obtenidos en los ensayos efectuados sobre un laminado de acero semiduro, antes y después de patentarlo y cuya composición es:

- Carbono: 0,40%
- Manganeso. 0,68%
- Silicio: 0,25%
- Azufre: 0,026%

- Fosforo: 0,020%

Redondo laminado en bruto						
Nº pasadas	bruto	1	2	3	4	5
Diametro (mm)	4,8	4,1	3,39	2,9	2,39	2,13
Resistencia Total (kg)	1380	1255	1010	785	550	460
Resistencia unitaria (kg/mm <sup>2</sup> )	76,5	95	112	119	123	130
Alargamiento (%)	25					
Diametro de ruptura (mm)	3,25	3,1	2,6	2,35	1,9	1,75
Sección de ruptura (mm <sup>2</sup> )	8,8	7,5	5,3	4	2,8	2,4
Estricción(%)	51	43	41	39	38	33
Nº Flexiones		7	9	6	8	13

Redondo patentado al plomo						
Nº pasadas	bruto	1	2	3	4	5
Diametro (mm)	4,7	4,09	3,38	2,85	2,4	2,12
Resistencia Total (kg)	1685	1380	104	790		495
Resistencia unitaria (kg/mm <sup>2</sup> )	96	106	116	124		140
Alargamiento (%)	16,5					
Diametro de ruptura (mm)	3,45	2,9	2,45	2,05		1,55
Sección de ruptura (mm <sup>2</sup> )	9,3	6,6	4,7	3,3		1,9
Estricción(%)	46	49	47	48		45
Nº Flexiones		11	19	10		17
T <sup>a</sup> horno: 1010°C; T <sup>a</sup> Pb: 520°C; Velocidad de paso: 3m/min						

### 3.3.3. Proceso de patentado

El proceso de "Patentado" más conocido como "Patenting". Se utiliza para tratar térmicamente todos los aceros con porcentajes de carbono comprendidos entre 0,3 y el 0,9.

Es un procedimiento utilizado estrictamente para facilitar el trefilado y solo en muy pocas ocasiones se utiliza como operación final.

El proceso del patentado lo componen dos operaciones fundamentales:

- Calentamiento del alambre en el Horno.
- Enfriamiento brusco en aire, plomo o sales.

#### 3.3.3.1. Calentamiento en el Horno

Cuando el laminado o el alambre, atraviesa el horno es calentado hasta un grado que dependerá de tres factores principalmente:



1. Cantidad de calor que aporta el Horno por unidad de superficie del alambre en la unidad de tiempo.
2. Tiempo de permanencia del material dentro del Horno.
3. Sección transversal que tenga el laminado o el alambre.

#### 3.3.3.1.1. La velocidad de transferencia del calor por el Horno al alambre.

La velocidad de transferencia del calor por el Horno al alambre es principalmente función de tres variables:

Temperatura del horno: En principio, cuanto más caliente se encuentre el Horno, más rápido será el calentamiento.

La capacidad de absorción de calor que posea la superficie del alambre o del laminado: Por ejemplo, la cascarilla gris oscura del laminado absorberá el calor con más facilidad que el alambre estirado; y un alambre estirado con una capa de color oscuro que le recubra, se calentará más fácil y rápidamente que un alambre estirado de superficie brillante. En general, se puede admitir que, dada una temperatura constante en un determinado horno, y un mismo estado y tipo de superficie en el laminado o en el alambre, la cantidad de calor absorbida por unidad de superficie y en la unidad de tiempo es constante.

El diámetro del alambre: Cuanto más grande sea el diámetro del alambre o del laminado, el calentamiento será más lento y por lo tanto el tiempo de calentamiento del hilo será menor cuanto menor sea el grosor de éste. Esto nos lleva a la conclusión de que la velocidad de calentamiento es inversamente proporcional, prácticamente, al diámetro del hilo.

#### 3.3.3.1.2. Tiempo de permanencia del alambre en el Horno

En el caso particular de cada Horno, el tiempo de calentamiento y, por lo tanto, de permanencia en el Horno, deberá ser determinado



experimentalmente, ya que casi siempre existen discontinuidades en las temperaturas de las diferentes secciones del Horno.

Un método recomendable es, determinar las diferentes resistencias a la tracción del alambre al ir variando la velocidad de paso. Cuando la velocidad es muy alta (si el grano está recuperado) la Resistencia será baja.

Cuanto mayor sea la velocidad, menor será la resistencia del alambre. Al ir disminuyendo la velocidad de paso, la resistencia a la tracción irá aumentando, hasta un máximo a partir del cual al seguir disminuyendo la velocidad, comenzará a disminuir lentamente la Resistencia debido a que el tamaño de grano del alambre se va haciendo cada vez más grande. Esa velocidad de paso a la cual la resistencia del alambre es la mayor es precisamente la máxima velocidad permisible.

Este método, sin embargo, debe completarse con un estudio metalográfico con el fin principal de comprobar si quedan carburos en forma de láminas gruesas sin disolver, o granos estirados sin recuperar, en cuyas circunstancias la velocidad de paso debería ser disminuida.

#### Cálculo de la velocidad en función del diámetro del alambre.

Una vez que, siguiendo el método descrito anteriormente se conoce la velocidad ideal para un diámetro determinado, las velocidades para los restantes diámetros pueden ser estimadas aplicando la fórmula:

$$d * v = k$$

d = diámetro del alambre

v = velocidad en m/min

k = constante del horno



Los cálculos basados en la fórmula anterior nos llevan a la conclusión de que el tonelaje que pasa a través del Horno aumenta en proporción directa con el diámetro del alambre

Cálculo de la velocidad de paso, cuando el tonelaje que produce el horno es constante.

La máxima cantidad de alambre que puede calentar un horno, depende de la potencia de calentamiento que posea el horno (número y potencia de las resistencias eléctricas o de los mecheros instalados). Así pues, la fórmula anterior no es válida cuando se alcanza la máxima capacidad del horno; y se pasa en este caso a ajustar la velocidad, manteniendo constante el tonelaje.

La fórmula empírica que se puede utilizar para calcular la velocidad de paso a tonelaje constante es:

$$R = 0,37 * d^2 * v$$

R= rendimiento del horno en Kg/hora

d= diámetro del hilo en mm

v= velocidad de paso en m/min

Velocidad de paso para diámetros muy pequeños.

Cuando el diámetro del hilo es muy pequeño, tampoco se puede utilizar la primera fórmula analizada. En estos casos se presentan unas limitaciones a la velocidad motivada por problemas en los argadillos o bien porque la carga total de tracción desde la bancada resulte demasiado grande respecto a la resistencia del alambre caliente, con lo que se producen demasiadas roturas. En estos casos hay que reducir las velocidades de paso y, si es posible, al mismo tiempo reducir la temperatura del horno a fin de evitar sobrecalentamientos de los alambres.

Todo lo expuesto en los tres apartados anteriores, queda reflejado en el gráfico que se muestra a continuación donde se analiza la

relación entre la velocidad del alambre, diámetro del mismo y producción por hora, de un horno con posibilidad de tratamiento de 20 hilos a la vez y una máxima capacidad de tratamiento (Rendimiento máximo de 1.800Kg/hora, que representan 90kg por hora y alambre.

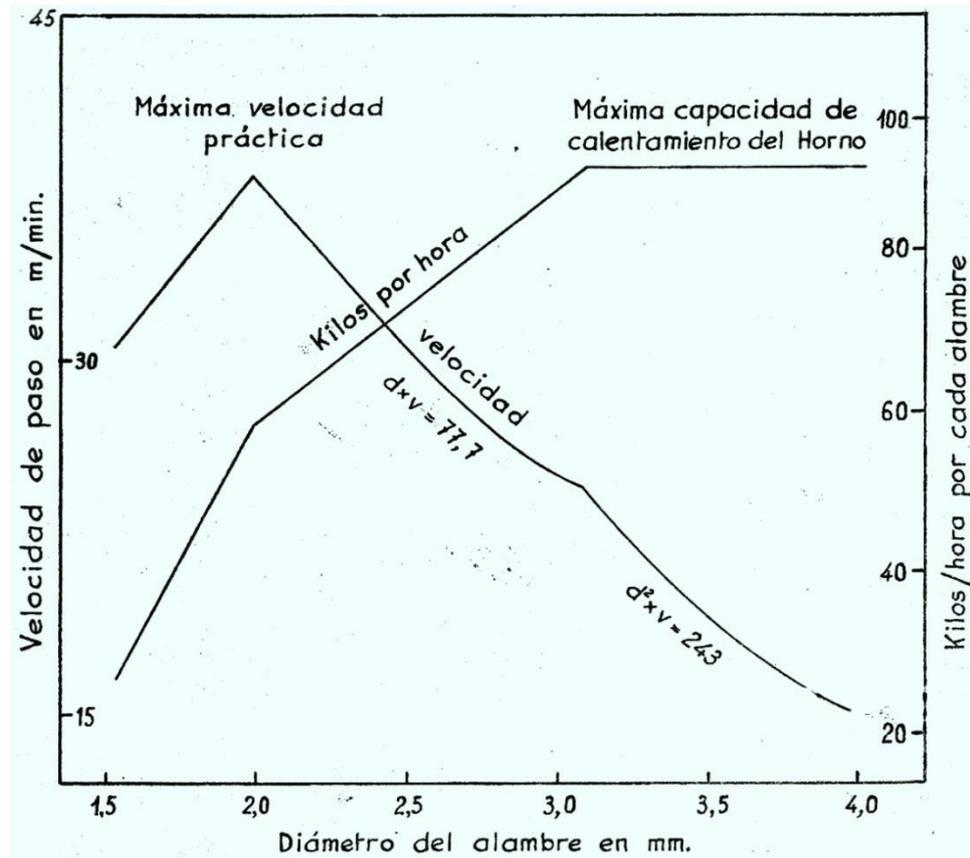


Gráfico 1. Relación velocidad de paso, diámetro y capacidad de calentamiento del horno. Fuente: libro tecnología del patentado.

El gráfico está basado en la información que da el horno al tratar un alambre de 3,05mm de diámetro a 930°C, con una velocidad de paso de 25,5 m/min.

Así pues en la constante del horno es:

$$K = d * v = 3,05 * 25,5 = 77,77$$

y el máximo rendimiento de 90kg/hora por hilo tienen lugar cuando el cuadrado del diámetro multiplicado por la velocidad es 243.

$$R = 0,37 * d^2 * v \Rightarrow d^2 * v = 90/0,37 = 243$$



También se aprecia en la figura que la máxima capacidad del horno se alcanza cuando el diámetro del alambre es aproximadamente igual a 3,1mm. y que por encima de este diámetro la velocidad debe reducirse aún más que anteriormente para mantener la temperatura del alambre.

Respecto a las velocidades, más bajas que las calculadas que hay que adoptar para diámetros más pequeños, se puede apreciar en el gráfico, que las velocidades descienden más deprisa por debajo de los 2mm de diámetro. Y para evitar sobrecalentamientos, en alambres de diámetro menor de 2mm, al reducir la velocidad será necesario también descender la temperatura del horno.

Para poder alcanzar las velocidades que se indican en el gráfico, el horno debe tener una gran potencia calorífica y el alambre abandonar el horno mucho antes de alcanzar la alta temperatura que tienen sus secciones.

Conocida la velocidad básica para un determinado diámetro de alambre, en cualquier tipo de horno, la velocidad correspondiente a los restantes diámetros debe ser determinada siguiendo los procedimientos explicados anteriormente.

Un procedimiento de calentamiento muy comúnmente empleado es elevar lo más rápidamente posible la temperatura del hilo y mantenerle a la máxima temperatura, estable al menos durante la última cuarta parte de la longitud total del horno.

#### 3.3.3.1.3. Grado de calentamiento en función de la sección transversal del laminado o del alambre.

El calor que atraviesa la superficie en dirección al núcleo de hilo necesita un tiempo, que será mayor cuanto mayor sea el radio. Así pues, a mayor diámetro necesitaremos mayor tiempo de calentamiento para conseguir una homogenización de la estructura (grano recuperado, totalmente austenizado y de tamaño homogéneo). Por ello, cuanto más grueso sea el alambre, la



velocidad de paso deberá ser menor, si se quiere que el calentamiento sea correcto.

En los alambres o laminados de mucha sección transversal existe el peligro de que la temperatura de sus capas superficiales sea muy superior a la de sus partes centrales, con lo que las estructuras metalográficas y las características mecánicas serán distintas en la parte externa y en el núcleo.

### 3.3.3.2. Enfriamiento brusco

El carbono que forma parte de la composición del acero durante el calentamiento en el horno se distribuye entre el hierro en forma de solución sólida.

Cuando tiene lugar el enfriamiento, el carbono se separa en láminas microscópicas de carburo de hierro (cementita).

Durante el patentado tiene lugar un enfriamiento brusco a una temperatura constante inmediatamente después de salir el alambre caliente (por encima de los 850°C) del horno. El objeto de este enfriamiento brusco es controlar lo mejor posible aquella separación en láminas finas.

El método más comúnmente empleado para efectuar enfriamiento controlado consiste en introducir el laminado o el alambre inmediatamente después de salir del horno de calentamiento en un baño de plomo fundido mantenido a una temperatura determinada comprendida entre los 400 y 650°C.

Con este procedimiento, la resistencia a la tracción del alambre tratado puede ser variada a voluntad, cambiando la temperatura del baño de plomo

El tiempo de permanencia dentro del plomo ha de ser el necesario para que los carburos disueltos en la masa de hierro salgan de la solución y se concentren en finísimas láminas, por ello es necesario que la caldera que contiene el plomo tenga la longitud suficiente para que el hilo



permanezca dentro de ella el tiempo necesario, que generalmente no suele ser superior a los 10 segundos.

La caldera de plomo, va provista de un "rodillo sumergidor" en cada uno de sus extremos, con el fin de mantener el hilo por debajo de la superficie del plomo. Estos rodillos se deben poder accionar y elevar desde fuera del baño; y éste, a su vez, debe aislarse térmicamente del medio ambiente, cubriendo la superficie con dispositivos mecánicos o productos (como el carbón de madera, la termita, el cok, etc.) que eviten al máximo posible la oxidación del plomo y las pérdidas de calor.

### Factores que influyen en el enfriamiento

Al igual que en el proceso de calentamiento en el horno, durante el enfriamiento del alambre o del laminado en la caldera de plomo fundido, también se ve influido principalmente por tres factores:

1. Capacidad de enfriamiento de la caldera: Será mayor cuanto más grande sea la masa de plomo y más baja la temperatura.
2. Tiempo de inmersión: El tiempo de permanencia del hilo dentro del baño influirá en que se homogenice mejor o peor la estructura del material patentado. Este tiempo de permanencia será función de la velocidad de paso y de la distancia entre los rodillos sumergidos.
3. Sección transversal del hilo: Cuanto mayor sea la sección transversal del laminado o del alambre, y por lo tanto su diámetro, más peligro habrá de que el núcleo del hilo tarde más en enfriar que las capas superficiales, con lo que las estructuras resultantes no serán las mismas en todos los puntos de su sección transversal.

El enfriamiento brusco del patentado se efectúa generalmente, como hemos dicho, en un baño de plomo fundido, pero el mismo fenómeno podemos producirlo haciendo atravesar el alambre o el laminado por el interior de un baño de sales fundidas mantenido a temperaturas comprendidas dentro del intervalo que se especificaba para el baño de plomo.

Otro procedimiento utilizado para patentar alambres, es efectuar el enfriamiento del hilo sometiendo a éste a una corriente de aire a presión inmediatamente después de salir del horno de calentamiento.

### 3.3.4. Características metalúrgicas y metalográficas de los aceros patentado

El procedimiento del "patentado" se emplea para el tratamiento térmico de los laminados o alambres de aceros duros al carbono, que contengan porcentajes de éste comprendidos entre el 0,3 y 0,9. El fin principal del proceso es facilitar el trefilado posterior del material. Casi nunca es un procedimiento utilizado como tratamiento final.

Cuanto mayor porcentaje de carbono contenga el acero, mayor será su resistencia a la rotura, pero al mismo tiempo menor será su ductilidad y por consiguiente más dificultoso su trefilado.

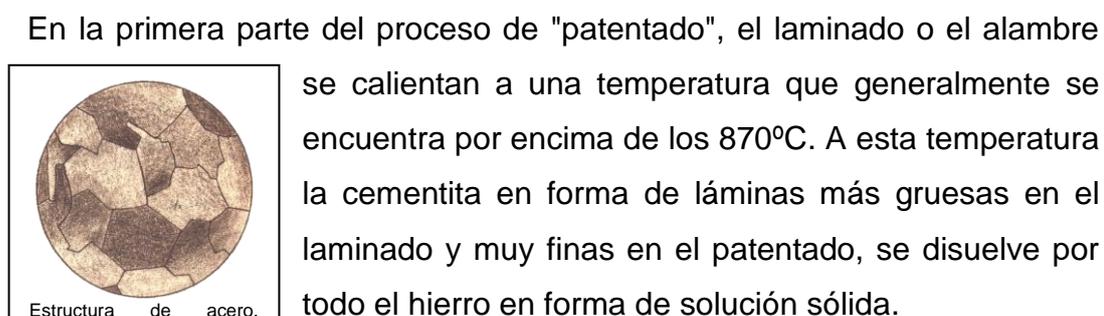
El carbono se encuentra en el acero, a la temperatura ordinaria, en forma de carburo de hierro (cementita). Este compuesto tiene una elevada dureza, una gran fragilidad y muy poca ductilidad.



En el laminado, el carbono se encuentra formando láminas relativamente gruesas y grandes de cementita.

Cuando una estructura del tipo de la figura se pretende deformar por trefilado se vuelve frágil después de una o dos pasadas.

El "patentado" convierte la microestructura del acero en otra que ya puede ser trefilada a través de seis o más hileras sin que aparezca la fragilidad.



En la primera parte del proceso de "patentado", el laminado o el alambre se calientan a una temperatura que generalmente se encuentra por encima de los 870°C. A esta temperatura la cementita en forma de láminas más gruesas en el laminado y muy finas en el patentado, se disuelve por todo el hierro en forma de solución sólida.

Esta solución sólida recibe el nombre de AUSTENITA. A este proceso por el cual el carbono se distribuye homogéneamente por toda la masa de hierro se le denomina austenización.

Siguiendo el proceso de "patentado", el laminado o el alambre son enfriados a temperaturas comprendidas en el intervalo 700°C a 400°C. Al producirse este enfriamiento vuelven a aparecer las láminas de cementita. Cuanto más baja sea la temperatura de enfriamiento más finas y delgadas



Estructura de laminado patentado de un acero de C0,75% (x1000)

serán las láminas de cementita. Como se puede observar en la figura, que apenas son perceptibles las láminas, a pesar de que representan esquemáticamente una vista de un corte de superficie plana efectuado en un laminado, observado al microscopio a 1.000 aumentos, después de haber sido

bien pulido y atacado.

#### 3.3.4.1. Relación entre la estructura metaloráfica y la resistencia a la tracción.

Las láminas de cementita que son muy finas, a pesar de estar constituidas por un material muy frágil, pueden ser dobladas sin que se rompan y esto es posible precisamente por su extremada delgadez.

En el material que ha sido patentado, las láminas de carburo son muy finas razón por la cual ese material puede ser estirado con relativa facilidad.

Cuanto mayor sea la fineza de las láminas, mayor será la resistencia del material y mayor también su ductilidad.

La Resistencia a la tracción de un laminado o de un alambre que han sido patentados, no sólo depende de la temperatura a la que se forman las láminas de carburo, sino también de la cantidad de láminas, que suele estar muy relacionada con el porcentaje de carbono del material patentado.



No obstante, el problema no es tan sencillo, ya que alambres con el mismo contenido en carbono y que han sido patentados a una misma temperatura de plomo, no siempre tienen la misma resistencia.

En general, a una constante temperatura del plomo, la resistencia aumenta al elevarse el contenido en carbono.

En cambio, para un mismo porcentaje de carbono, la resistencia por unidad de superficie varía con la temperatura del plomo en forma tal que la máxima resistencia (que coincide con la óptima capacidad de trefilado) se obtiene a una determinada temperatura para cada calidad de alambre. Y así tendremos que:

Si vamos descendiendo la temperatura del baño por debajo de aquella temperatura óptima, la resistencia desciende también hasta que comienza a aumentar a temperaturas del plomo muy bajas donde ya se forman unas estructuras, que si bien son muy duras, son también de poca o ninguna aptitud para ser trefiladas.

A temperaturas del plomo por encima de aquella temperatura óptima, la resistencia del alambre va disminuyendo a medida que la temperatura del baño aumenta.

En la siguiente gráfica, se representa según CAHILL y JAMES, fenómeno descrito anteriormente para el caso de un laminado de aproximadamente 11mm. de diámetro y un contenido de carbono comprendido entre 0,85 y 0,90.

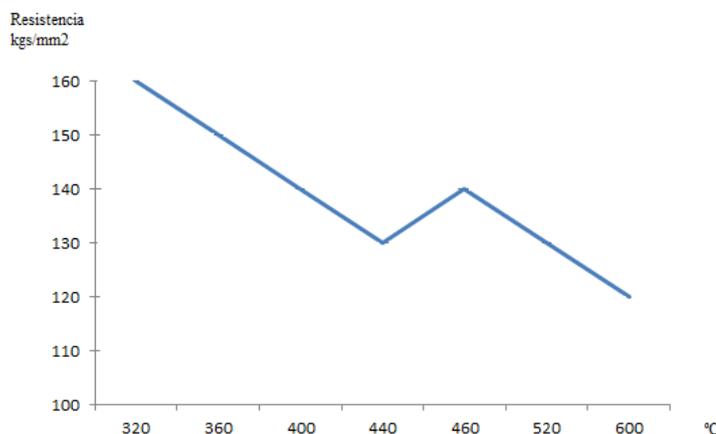


Gráfico 2. Gráfica Cahill-James.



El hábito de la curva representada es similar al que presentan todas las curvas. "Resistencia/temperatura del plomo" de todo tipo de acero duro. Únicamente variará la situación del punto de inflexión correspondiente a la temperatura de plomo óptima, a la cual se debe "patentar" para conseguir la mejor aptitud de trefilado y la resistencia a la rotura más elevada.

En general, se puede admitir que, la situación del punto de inflexión (que se corresponde con la que hemos denominado "temperatura óptima"), estará más o menos desplazada hacia temperaturas de baño bajas según el diámetro del laminado o alambre, y dependiendo también del porcentaje de manganeso, de tal forma que:

Con diámetros de hilo gruesos, la situación se corresponderá con temperaturas de caldera bajas.

Cuanto más pequeño sea el porcentaje de manganeso, también el punto de inflexión se encontrará más desplazado hacia temperaturas bajas.

La principal razón por la que varía la resistencia después de distintos tratamientos de aceros con el mismo porcentaje de carbono, es la variación en la distancia entre las láminas de cementita. El espacio más o menos grande (relleno de hierro puro principalmente) que queda entre láminas, depende de la velocidad de difusión del carbono que está disuelto en el hierro hacia la formación de las láminas de carburo. Dicha velocidad de difusión depende principalmente de la temperatura a que tiene lugar la transformación.

Además hay que tener en cuenta que el manganeso, silicio, fósforo, cromo, níquel, cobre y otros elementos presentes en el acero afectan a la velocidad de difusión del carbono disuelto hacia las láminas y por lo tanto al espacio o distancia entre ellas.



### 3.3.4.2. Diagramas de transformación isotérmica de la Austenita

#### 3.3.4.2.1. Obtención

Estas curvas se obtienen calentando una serie de muestras (de dimensiones pequeñas) de un determinado acero al carbono por encima del punto crítico a fin de conseguir que todo el carbono se encuentre disuelto en el hierro formando una "solución sólida" con lo que el acero ya se puede considerar austenizado. Aquel punto crítico varía con la composición del acero.

Una vez el acero tiene estructura de austenita, las curvas se determinan estudiando el proceso de transformación de esa estructura austenítica a diferentes temperaturas constantes. Para ello, después de calentadas las muestras por encima de su punto crítico, se las enfría en baños de sales o metal fundido a una determinada temperatura y se las mantiene a esa temperatura constante durante diferentes tiempos. A continuación las muestras se enfrían bruscamente en agua con lo cual se detiene la transformación del acero, observándose la estructura correspondiente a cada transformación al microscopio.

Así tendremos que con tiempos muy pequeños la transformación aún no ha comenzado, con tiempos mayores la transformación es incompleta y con tiempos mucho más grandes la transformación estructural habrá terminado totalmente.

Ensayando y observando estructuras a diferentes temperaturas de enfriamiento se van determinando los diferentes puntos de las curvas donde comienza y acaba la transformación para cada temperatura.

#### 3.3.4.2.2. Origen de estos diagramas y modo de interpretarlos

Todos estos diagramas fueron ideados por Bain y Davenport, investigadores del "United States Steel Research Laboratory" que los denominaron CURVAS DE LA "S" por su característica forma. Posteriormente otros investigadores les asignaron el nombre de "Diagramas o Curvas TTT" (Temperatura, Tiempo, transformación).

A continuación se representa la Curva TTT de un acero al carbono con 0,88 % de carbono aproximadamente.

(Este diagrama es orientativo y no totalmente exacto, ya que para representar correctamente el diagrama correspondiente a un acero habría que precisar, entre otras cosas, su composición química. Si la composición varía, también variará el diagrama hasta adquirir formas que no se parecerán en casi nada a la curva que se representa).

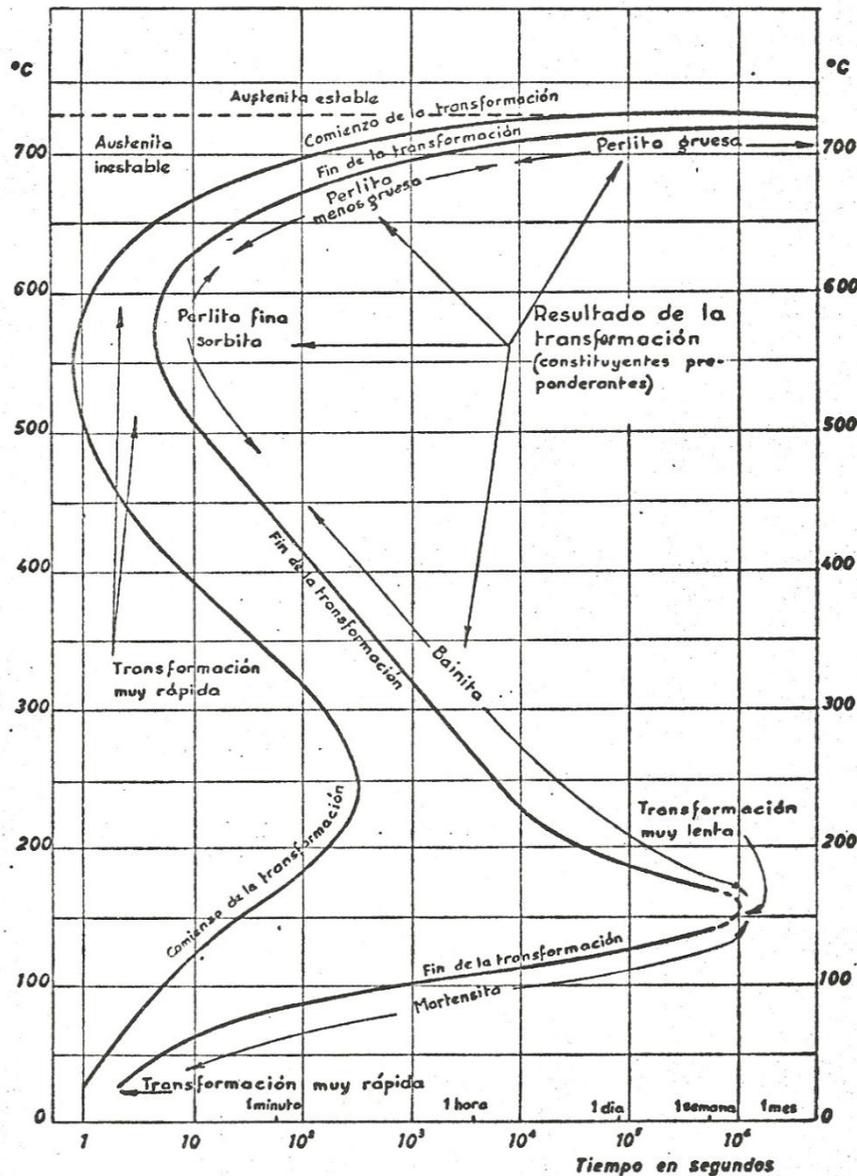


Figura 5. Diagrama TTT.



A unos 700° C la transformación comienza hacia los 2,5 minutos y termina después de unos 45 minutos. A esta temperatura las placas de cementita son gruesas y toscas y la dureza correspondiente a esta estructura (con grandes espacios interlaminares) es baja. La estructura obtenida es igual o similar a la típica que se presenta al observar al microscopio el corte de un redondo grueso laminado en caliente.

A 650° C, la transformación comienza hacia los 5 segundos y termina después de unos 30 segundos. Las placas de cementita son mucho más finas que a 700° C, y el acero tiene más dureza.

La transformación más rápida tiene lugar hacia los 550° C. Comienza antes de 1 segundo y termina después de 5 segundos. A esta temperatura las láminas de carburo de hierro (cementita) son tan delgadas que no pueden observarse y diferenciarse con un microscopio óptico.

Por debajo de los 500° C la transformación vuelve a ser más lenta y comienza a formarse un nuevo constituyente (en proporción mayor cuanto más baja sea la temperatura). Este nuevo constituyente, de apariencia acircular (grupos de agujas) recibe el nombre de Bainita. Las estructuras bainíticas, aunque pueden ser trefiladas, no son recomendables, en general, porque su ductilidad es baja.

3.3.4.2.3. Estructuras que se originan en la transformación de la austenita según las diversas temperaturas a que tiene lugar.

En general, se designa con el nombre genérico de perlita la estructura cuyos cristales están formados por láminas de cementita y espacios interlaminares de ferrita (hierro puro). Esta estructura es la que presentan todos los aceros altos en carbono después del patentado en plomo a temperaturas de 500°C y superiores.



Sin embargo el nombre de “perlita laminar” se reserva únicamente para las estructuras de perlita cuyas láminas son observables al microscopio óptico. Esta estructura se suele obtener cuando el enfriamiento se hace a temperaturas superiores a los 600°C.

En cambio, cuando las láminas de cementita son tan finas que no pueden ser observadas al microscopio óptico, esta perlita fina es designada con el nombre de Sorbita. Esta estructura sorbítica es la óptima para el trefilado y la que se busca obtener siempre en el patentado de un laminado o un alambre.

#### Influencia en el enfriamiento del diámetro del hilo.

Existe una influencia grande del grosor del alambre en la estructura originada en el patentado. El intercambio de calor entre el alambre y el baño de plomo es muy fácil y rápido cuando el grosor de aquél es pequeño. Pero cuando el hilo tiene una sección transversal grande, la temperatura del alambre no desciende tan rápidamente, siendo tanto más lento el descenso cuanto más en el núcleo se encuentre un determinado grano. Por ello, para obtener una estructura de tipo sorbitica en alambres o laminados gruesos es preciso utilizar baños con temperaturas desde 490°C hasta 450°C. con las cuales se obtiene una velocidad de enfriamiento similar a la obtenida a 500-550°C en con hilos mas finos.

Todo lo anteriormente expuesto se refiere a aceros con porcentajes de carbono entre 0,86 y 0,90, con los cuales las curvas TTT son prácticamente las representadas en la figura anterior. Cuando los aceros son más suaves, estas curvas van difereñeiándose de las de la figura y las temperaturas a las que se obtienen estructuras de Perlita laminar, sorbita o de tipo báltico no son ya las mismas que las descritas anteriormente.



### 3.3.5. Instalación de patentado

Una instalación de patentado consta fundamentalmente de cuatro partes bien diferenciadas:

1. Argadillos
2. Horno de calentamiento al paso
3. Caldera de enfriamiento
4. Banco de boninas arrolladoras.

#### 3.3.5.1. Argadillos

El alambre o el laminado, en rollos es colocado en tantos argadillos como hilos van ser tratados simultaneamente en la instalación.

Según la naturaleza de ésta, el tamaño de los rollos y el diámetro del alambre variarán el tipo y tamaño de los argadillos.

El conjunto de argadillos debe disponer de "peines distribuidores" que dirijan los hilos hacia la entrada del horno por caminos prácticamente paralelos.

Por otra parte, es interesante que cada argadillo disponga de sistema individual y regulable de frenado, a fin de mantener una velocidad de giro constante, con lo que el tratamiento se mantendrá uniforme.

Hay que tener en cuenta además, que la disposición y la concepción de los argadillos debe ser la más idónea posible para que las "pegas" (enganche de la "cola" con la "punta" del siguiente rollo) se puedan efectuar con facilidad, sin alterar la velocidad de paso de los alambrea.

#### 3.3.5.2. Hornos de calentamiento al paso

Estos hornos están contruidos de forma tal que los hilos se calientan a medida que van "pasando" a traves de ellos. Este calentamiento tiene lugar de una forma progresiva y continua desde la temperatura ambiente que poseen los hilos al entrar en el horno hasta una temperatura cercana a la que éste tiene cuando el alambre sale de él.



Dentro del horno todos los alambres de un mismo diámetro deben pasar a la misma velocidad y seguir unas trayectorias lo mas rectilneas y paralelas posible. La velocidad de paso constante ha de ser una cuestión a cuidar con especial atención, impidiendo que haya detenciones o tirones bruscos en los enganches de un rollo con el siguiente.

Para obtener un buen tratamiento es necesario que todos los alambree sean de la misma calidad y del mismo diámetro. Cuando el diámetro del alambre varia, la velocidad de paso debe también variar

#### 3.3.5.2.1. Sistemas de calentamiento de los hornos

Todos los sistemas, que son muy variados y diversos, pueden agruparse en dos grandes tipos:

1. Hornos calentados por combustión de gases o aceites
2. Hornos calentados eléctricamente.

Los hornos calentados por productos combustibles se construyen generalmente con mecheros repartidos a lo largo de las paredes laterales del horno (existen otros sistemas en los que los quemadores o gasificadores principales se encuentran situados en el centro o cerca de la entrada del horno).

Los Hornos calentados eléctricamente suelen tener las resistencias distribuidas por toda su longitud.

En todos los casos, la temperatura de los hornos (divididos en varias zonas o secciones) se mide y controla por medio de pirómetros y reguladores colocados en posiciones tales que aprecian individualmente el estado de cada sección.

Existen también hornos cuyo sistema de calentamiento está formado por una caldera de plomo fundido. Tienen las ventajas de su corta longitud y sobre todo la de que no oxidan el alambre. Sin embargo, su funcionamiento presenta una serie de inconvenientes, que los hacen poco recomendables. El principal de estos inconvenientes, está en la



corta vida de las calderas de plomo debido a la alta temperatura a que hay que mantener el plomo y el consiguiente ataque destructivo que producen sobre las calderas los óxidos de plomo formados.

#### 3.3.5.2.2. Cálculo del tiempo necesario para calentar un alambre desde la temperatura ambiente hasta una determinada temperatura en horno de calentamiento al paso.

Por lo que hemos dicho hasta ahora se comprende que para que una instalación de patentar funcione correctamente es necesario que previamente se haya evaluado y comprobado experimentalmente el tiempo necesario para que el alambre haya alcanzado la temperatura de austanización y haya permanecido a dicha temperatura lo suficiente para que se disuelva el carbono en el hierro.

El tiempo necesario será mayor cuanto más próximas estén la temperatura del horno y la que se desea obtener en el alambre. (Por ello es necesario, en la práctica, que la temperatura del horno sea sensiblemente superior a la que se quiere que alcance el hilo).

Los cálculos teóricos se determinan a partir de una serie de leyes termodinámicas. No obstante se deben considerar unos principios básicos para poder evaluar el tiempo necesario de permanencia del alambre.

La cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un alambre hasta un determinado punto (T) es directamente proporcional a la superficie del hilo, y como a su vez, esta superficie del alambre es proporcional a su diámetro, tenemos:

$$Q = K_1 * S = K_2 * d$$

donde,

Q: cantidad de calor.

K1 y K2: Constantes



S: superficie del alambre

D: diámetro.

Por otra parte, la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura del alambre hasta una determinada temperatura (T), será también proporcional al peso de dicho alambre y a dicha temperatura. Tendremos entonces que,

$$Q = K_3 * \text{Peso} * K_2 * T$$

y como el peso del alambre es proporcional al volumen por unidad de longitud y a la velocidad de paso. Tendremos que la anterior expresión podrá expresarse también así:

$$Q = K_4 * \pi * d^2 * v * T$$

donde,

T: temperatura a alcanzar en el alambre

v: velocidad de paso a través del horno

Igualando las cantidades de calor obtenidas anteriormente se tendrá:

$$K_2 * d = K_2 * \pi * d^2 * v * T$$

si consideramos que la temperatura (T) es constante y despejamos v.

$$\frac{K}{d} = v$$

Lo que nos indica que la velocidad de paso es inversamente proporcional al diámetro del alambre.

Por lo tanto, conociendo el diámetro del alambre, se puede saber el orden de valor de la velocidad de paso, suponiendo que el calor



absorbido por los hilos por unidad de superficie sea siempre el mismo.

### Evaluación del tiempo de permanencia del alambre dentro del Horno.

Los principios básicos anteriormente expuestos son aplicables, en general, cuando la capacidad de calentamiento del horno es suficiente para elevar y mantener la temperatura de los alambres por encima de los puntos críticos que en los aceros al carbono utilizados comúnmente en trefilaría, suelen estar comprendidos entre los 725°C y los 825°C.

Por otra parte, las fórmulas obtenidas y los cálculos a que conducen son esquemáticos y se fundan en los principios básicos expuestos que son elementales. Los cálculos rigurosos, que no expondremos aquí, son mucho más complejos y en ellos influyen muchas más variables.

De todas formas con estos fundamentos como base, y sabiendo la longitud del horno, podremos evaluar el tiempo mínimo de permanencia del alambre dentro de este.

En el siguiente gráfico, se representa el tiempo necesario para calentar alambres redondos de acero hasta diferentes temperaturas (TCA) en un horno cuyas temperaturas (TH) son variables, pero siempre superiores a un incremento de temperatura ( $\Delta$ ) a la temperatura de patentado que se pretende conseguir en los alambres.

Las curvas de esta figura son las que resultan de aplicar las fórmulas teóricas de transmisión de calor, que se ha supuesto se verifica solamente por radiación, y han sido calculadas y trazadas teniendo como base el poder absorbente del alambre respecto al calor por unidad de superficie, que es mayor cuanto más altas sean las temperaturas del horno y del alambre.

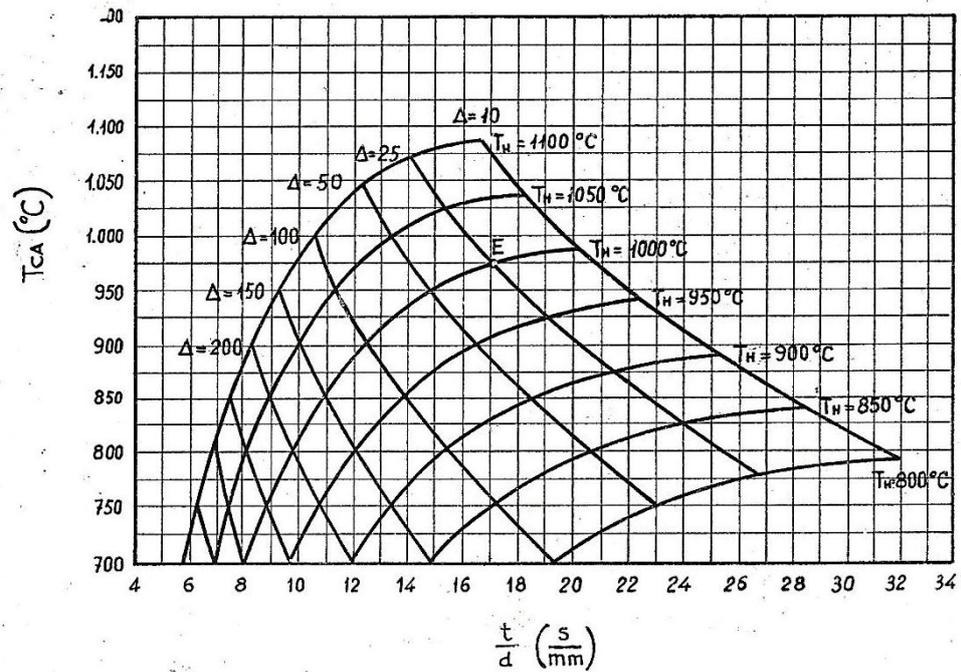


Gráfico 3. Tiempo necesario para calentar alambres redondos de acero hasta diferentes temperaturas (TCA) en un horno cuyas temperaturas (TH) son variables.

En ordenadas vienen dadas las temperaturas que se espera obtener en los alambres

En abscisas los coeficientes correlativos de tiempos dividido por el diámetro (t/d). El tiempo expresado en segundos y el diámetro del alambre en mm.

Si suponemos un horno de 16 metros de longitud, cuya temperatura en todas las secciones es de 1.000°C y por el que ha de pasar un alambre de 5 mm. de diámetro que queremos calentar a 975°C, tendremos, que trazando una paralela al eje de abscisas por el punto 975°C del eje TCA, cortará a la curva TH en un punto E, por el que trazando la perpendicular al eje de tiempos, obtendremos un valor para la razón t/d igual a 17,2.

Como el diámetro es de 5 mm, el tiempo necesario será.

$$t/5 = 17,2 \Rightarrow t = 86,0 \text{seg}$$

La velocidad de paso será,



$$v = 16\text{m}/86\text{seg} = 0,186\text{m}/\text{seg} = 11,2\text{m}/\text{min}$$

Pero si para garantizar que el carbono se ha disuelto homogéneamente por toda la austenita pretendemos que el alambre permanezca a la temperatura de 975°C durante los últimos 4 metros de horno, lo que exigiría llegar a dicha temperatura cuando el hilo hubiera atravesado el 0,75 % de la longitud total del horno, entonces tenemos:

$$v = 0,186 * 0,75 = 8,4\text{m}/\text{min}$$

Estos valores que se obtienen con las curvas TTT, tienen un fundamento teórico. En general, se ha comprobado que los tiempos de calentamiento comprobados experimentalmente coinciden con los obtenidos según el gráfico siempre que TCA sea superior a 900°C. Para temperaturas inferiores, experimentalmente se obtienen tiempos de calentamiento superiores a los calculados según el gráfico.

#### 3.3.5.3. Caldera de Enfriamiento

Generalmente las calderas de enfriamiento en plomo fundido tienen un perfil longitudinal trapezoidal. Sus paredes deben ser gruesas, puesto que no deben deformarse ni por el peso ni por el calentamiento.

Como ya hemos dicho anteriormente, dentro de la caldera van instalados unos cilindros sumergidos que mantienen los alambres dentro del baño de plomo. Los cilindros van sujetos a unos dispositivos que permiten regularizar la posición de aquellos dentro del baño. Asimismo deben poder ser recambiables fácilmente.



El calentamiento de la caldera y el mantenimiento de la temperatura conveniente en la misma se consiguen generalmente con cámaras y circuitos de combustión que la rodean exteriormente.

Cuando por el aporte de calor de los hilos que salen del horno, la temperatura se eleva por encima de lo previsto, es preciso disponer de dispositivos de refrigeración.

Existen dos sistemas principales de refrigeración de calderas.

1. Refrigeración exterior: Soplando aire frío por circuitos que rodean las paredes exteriores de la caldera
2. Refrigeración interior: por medio de haces de tubos, colocados en el interior de la caldera, por el interior de los cuales circula aire

El calentamiento de la caldera debe ser controlado por pirómetros registradores. Modernamente, y para mantener una temperatura homogénea en toda la masa del baño, se utilizan sistemas de recirculación del plomo fundido.

Cabe destacar también, que la superficie del plomo debe ser recubierta de materiales o dispositivos que impidan al máximo la oxidación del plomo y la pérdida de calor.

#### 3.3.5.3.1. Arrastre del plomo por los alambres

Aparte de la pérdida de plomo por oxidación, siempre existe una pérdida más o menos elevada motivada por la oxidación de los alambres del horno.

Por una parte, la entrada de la caldera, se forman unas masas de óxidos de hierro, de plomo y de plomo fundido, que dificultan el buen funcionamiento de la instalación, lo que obliga a retirarlas, ocasionándose con ellos una pérdida considerable de plomo metálico.

Por otra parte, los óxidos de hierro que recubren el alambre, arrastran adheridos a ellos cantidades variables de plomo fundido,

que después, al salir de la caldera, se solidifica y ocasiona graves inconvenientes en las operaciones posteriores del trefilado y de los recubrimientos superficiales.

Este arrastre es tanto mayor, cuanto mayor sea el diámetro del alambre, y mayor también cuanto más alta sea la carburación, ya que el agrietamiento que se produce en las “cascarillas” es mayor en los aceros duros que en los acero suaves, y las grietas favorecen el arrastre del plomo.

### 3.3.5.3.2. Dependencia del enfriamiento del alambre en la caldera de plomo respecto a la temperatura del baño y al diámetro del hilo.

En la siguiente figura se representan unas curvas para distintas temperaturas del baño con 50°C de diferencia, entre las cuales es fácil interpolar curvas correspondientes a otras temperaturas. Estas curvas han sido calculadas tomando como base una temperatura del alambre al entrar en la caldera de plomo de 925°C.

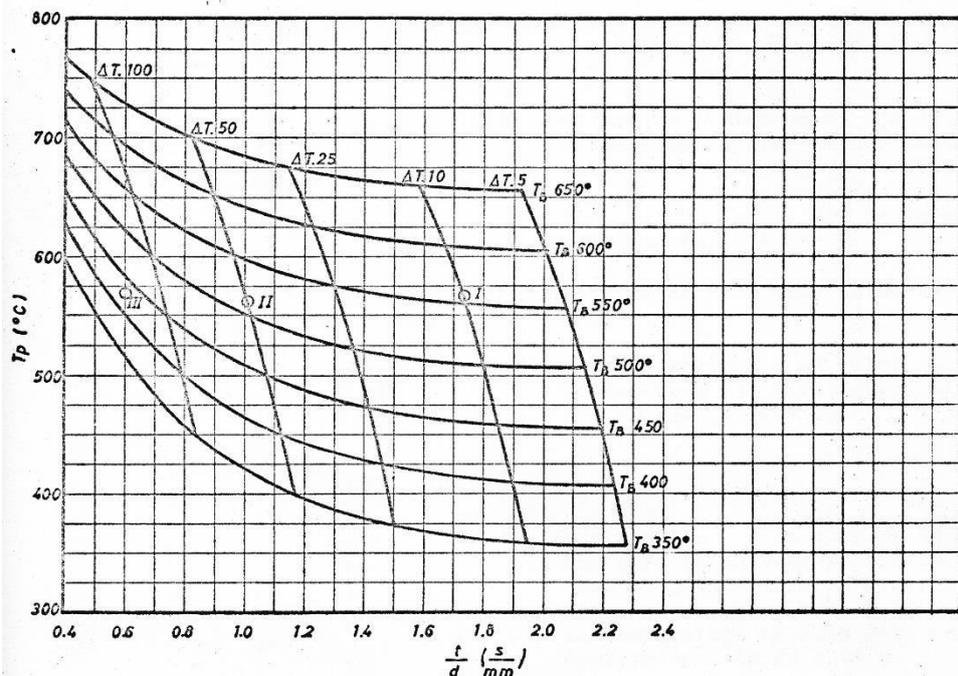


Figura 7. Representación unas curvas para distintas temperaturas del baño con 50°C de diferencia



En ordenadas vienen dadas las temperaturas a las que se desea que ocurra la transformación. (Se han simbolizado con la letra  $T_p$  que quiere indicar la temperatura del patentado).

En abscisas figuran los cocientes correlativos de tiempos divididos por diámetro ( $t/d$ ). El tiempo expresado en segundos y el diámetro del alambre en mm.

Un detalle interesante que nos da este gráfico es el de que en todas las temperaturas del baño desde 350°C hasta los 650°C, el tiempo de enfriamiento necesitado por el alambre es casi igual para aproximarse a 10°C de la temperatura del baño.

Supongamos que por la curva de la “S” hemos deducido que el tiempo mínimo de permanencia de un determinado acero a la temperatura de transformación completa de su estructura es de 6 segundos y que dicha temperatura de transformación es de 570°C.

- I) Si suponemos que el diámetro del alambre es el de 3,45 mm, tendremos que:

$\frac{6}{3,45} = 1,73$  valor que tomado en el eje de abscisas hasta cortar la horizontal corresponde a 570°C del eje  $T_p$ , nos da, extrapolando, una temperatura de caldera  $T_B$  de aproximadamente 565°C.

- II) Si suponemos que el diámetro es de 5,88 mm, entonces:

$\frac{6}{5,88} = 1,02$  que nos llevará a un valor de la temperatura de plomo de unos 520°C.

- III) Supuesto, por fin, un diámetro del hilo de 10 mm:

$\frac{6}{10} = 0,6$  que nos lleva a la conclusión de que para garantizar un tiempo mínimo de permanencia de 6 segundos del alambre en el baño a 570°C, la temperatura de éste debe ser de 430°C.

Los valores calculados con esta gráfica son aproximados y sirven de normativa en cuanto a la temperatura del baño. Sin embargo, estos



valores, pueden, y suelen, acusar sensibles desviaciones respecto a los obtenidos experimentalmente, particularmente en alambres de gran sección.

Hay también que considerar que el tiempo de transformación varía para un mismo acero con la temperatura a la que tiene lugar esa transformación, y para una determinada temperatura, con la distinta composición del acero.

#### 3.3.5.4. Banco de recogida del alambre patentado

Suelen estar compuestos de:

- Rodillos y guías
- Poleas-tensoras
- Bobinas de recogida
- Motor
- Variador de velocidades

#### Características principales de funcionamiento

La tracción sobre cada hilo debe ser uniforme, sin producir variaciones en la velocidad de arrastre, una vez fijada esta.

Las velocidades de recogida deben estar escogidas de acuerdo con la capacidad de calentamiento del horno y los diámetros del alambre.

Debe cuidarse de que el diseño y el funcionamiento de los rodillos guías de las poleas tensoras y de las bobinas sea lo más apropiado posible para evitar malos pliegues o tirones bruscos.

La construcción general del banco y de todos sus mecanismos debe ser sólida y muy resistente.

En bancos correspondientes a instalaciones de gran capacidad es conveniente disponer de secciones distintas, cada una de las cuales disponga de bobinas con una velocidad de giro independiente de la de las otras secciones.



### 3.3.6. Características mecánicas y metalográficas obtenidas por el patentado

#### 3.3.6.1. Influencia de la temperatura sobre las características mecánicas y metalográficas

##### Alambres patentados y no trefilados

No se dan grandes variaciones en la resistencia por  $\text{mm}^2$  de los alambres patentados al plomo cuando la temperatura del horno está comprendida entre  $900^\circ$  y  $1.000^\circ$  C. Por el contrario, la resistencia va descendiendo mucho a medida que la temperatura del horno va disminuyendo hacia los  $800^\circ$  C. Supuesta fija la temperatura del horno en los  $930^\circ$  C, la resistencia  $\text{mm}^2$  es influida por la temperatura de la caldera de forma tal que aquella va siendo menor cuanto más se eleva la temperatura del baño a partir de la temperatura óptima.

Alargamiento y estricción:

A mayor temperatura del horno, menores serán los porcentajes de alargamiento y estricción.

La temperatura de la caldera no parece influir en estas características siempre que esté comprendida entre los  $400^\circ$  y los  $500^\circ$  C; pero a partir de los  $500^\circ$ , según va aumentando la temperatura va creciendo el % de alargamiento y disminuyendo el % de estricción.

Flexiones:

Los mejores resultados en cuanto a flexiones se obtienen cuando la temperatura que han alcanzado los hilos en el horno ha sido lo más baja admisible. La temperatura del plomo no está demostrado que tenga demasiada influencia en las flexiones del material patentado.

Torsiones:

Como tónica general, se puede admitir que el número de torsiones aumenta cuanto menor sea la temperatura del horno y mayor la temperatura de la caldera.

Estructura metalográfica:



El tamaño de los granos crece en función del aumento de la temperatura del horno, pero el tipo de estructura no sufre variaciones apreciables cuando varía la temperatura de calentamiento del alambre.

Si el tratamiento está bien hecho, la estructura metalográfica debe ser siempre sorbitica (láminas de cementita muy finas) sin embargo el grosor de las láminas y la distancia entre ellas aumenta más cuanto mayor sea la temperatura de la caldera de plomo (disminuyendo la resistencia a la tracción y a la vez la ductilidad). Sin embargo, la temperatura de la caldera no influye para nada en el tamaño de grano.

#### Alambres patentados y después trefilados

Resistencia por mm<sup>2</sup>:

En las gráficas de las figuras 8 y 9 se representa la variación de la resistencia en función de la reducción de sección por trefilado.

En las curvas de la figura 8, se pueden observar las diversas resistencias que tienen los alambres después del patentado a diferentes temperaturas del horno, supuesta constante la temperatura de la caldera. En las de la figura 9, se muestran las resistencias variables según las diferentes temperaturas de la caldera.

Todas estas curvas de resistencia en función de la reducción de sección permanecen sensiblemente paralelas unas a otras, distanciadas siempre aproximadamente en la misma cantidad de kilos que con la reducción cero que corresponde a la resistencia en patentado.

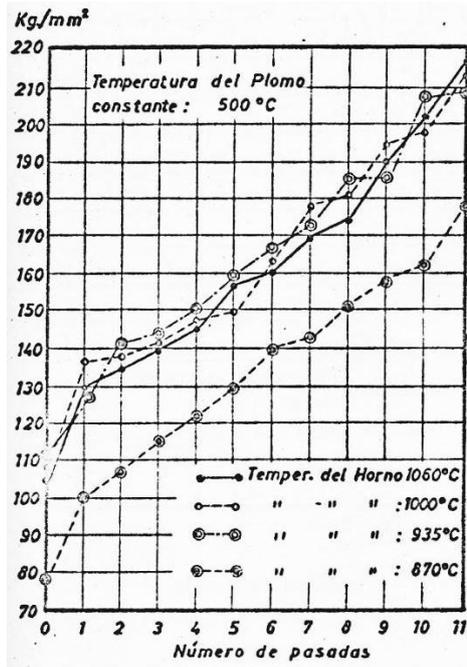


Figura 8

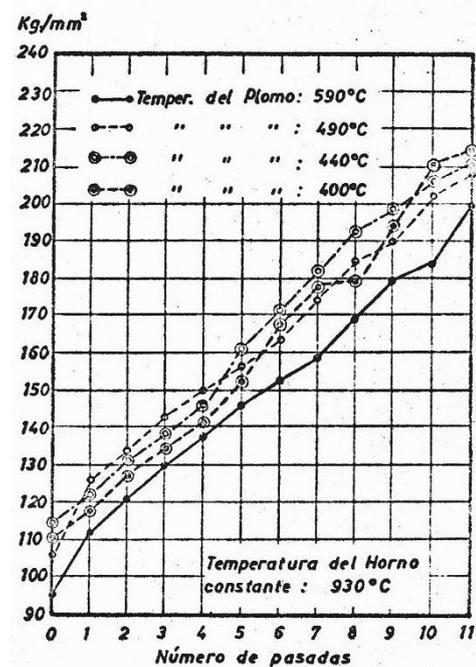


Figura 9

Figura 8. Variación de la resistencia a la tracción de alambres de acero duro patentados al plomo en función de la reducción de sección por trefilado para diferentes temperaturas de horno.

Figura 9. Variación de la resistencia a la tracción de alambres de acero duro patentados al plomo en función de la reducción de sección por trefilado para diferentes temperaturas del plomo.

### Flexiones:

Supuesta la temperatura del plomo constante, cuando el calentamiento en el horno se hace por debajo de los 850°C el número de flexiones desciende rápidamente a medida que transcurre el trefilado. Lo ideal es calentar el alambre entre las temperaturas de 900 y 935°C siempre que el % de deformación total que se le dé posteriormente no sea superior a 85% (ver figura 10).

En la figura 11), se puede apreciar que la temperatura de la caldera no influye claramente en el número de flexiones, dependiendo éste bastante del grado de deformación posterior al patentado.

Únicamente, puede afirmarse que con la caldera a temperatura muy alta (superior a 570°C), si bien en patentado el material resiste un número de flexiones igual al obtenido con otras temperaturas de caldera,

en cuanto se le somete a una pequeña deformación desciende mucho el número de flexiones.

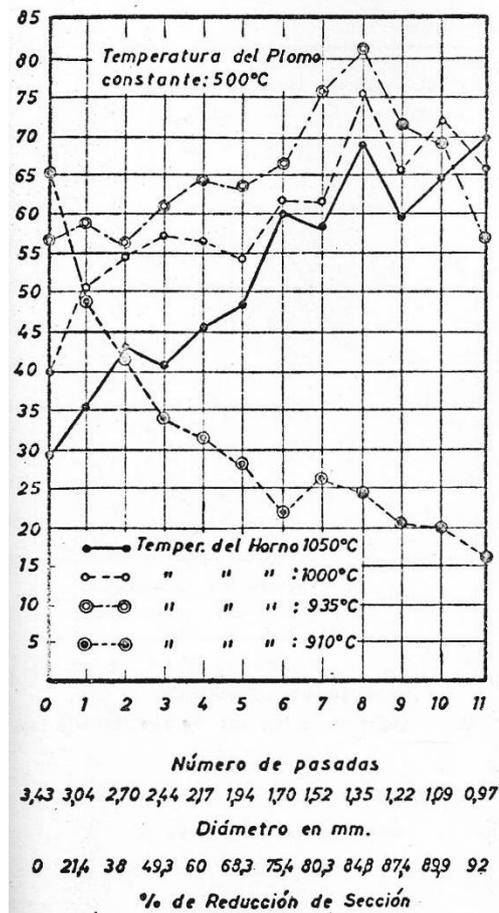


Figura 10

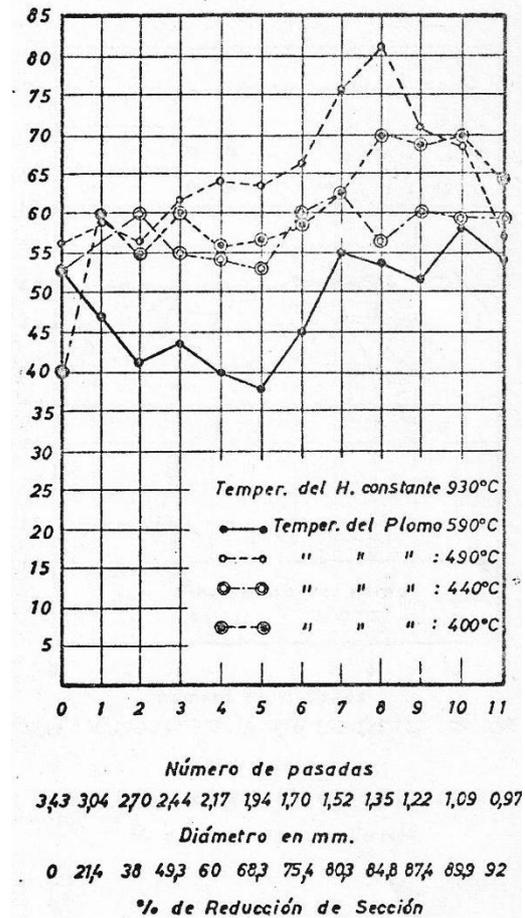


Figura 11

### Torsiones:

Los resultados en cuanto a número de torsiones son muy poco dispares después de diferentes tratamientos de patentado.

En general, se puede afirmar que el número de torsiones aumenta cuando el tratamiento, tanto en el horno como en la caldera, se efectúa a temperaturas altas (ver figuras 12 y 13).

Si el calentamiento en el horno se ha efectuado a temperaturas muy bajas (entre 800° y 820° C) el número de torsiones en patentado es alto; pero comienza rápidamente a bajar en cuanto se reduce la sección por encima del 40%.

En general, como se observó también en el número de flexiones, el calentamiento en el horno a temperaturas bajas, da lugar a una merma muy grande de características mecánicas en cuanto comienza a reducirse la sección transversal por trefilado.

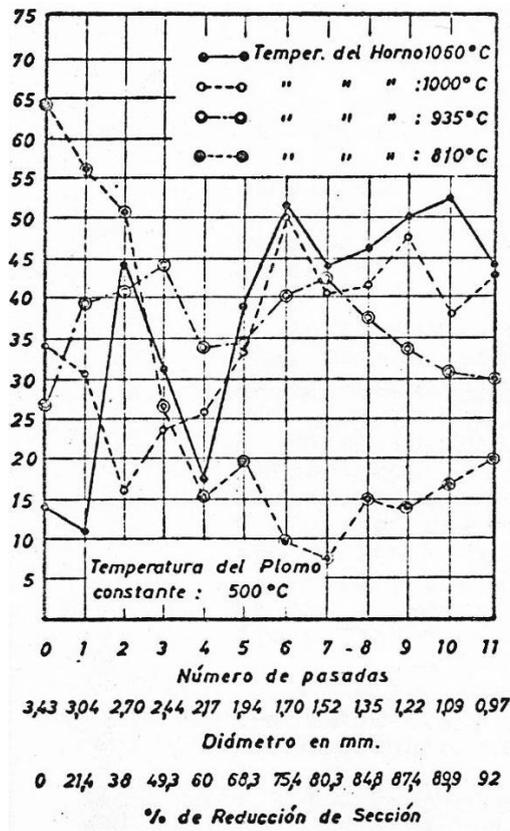


Figura 12

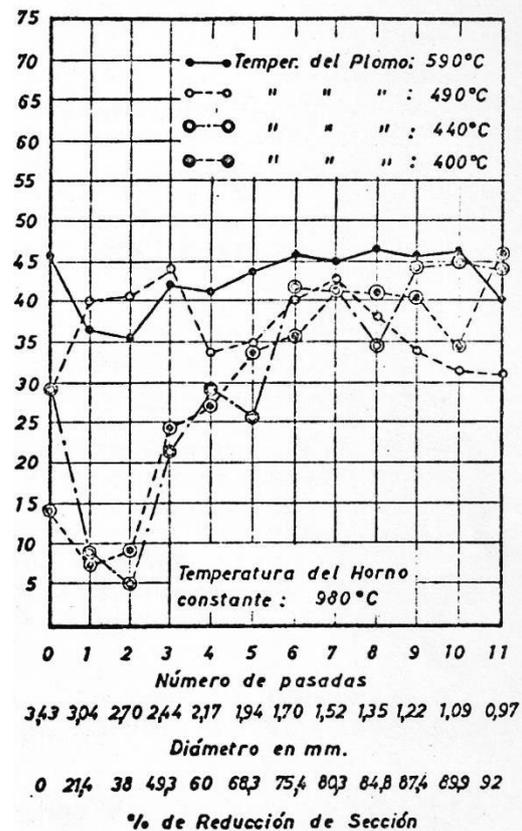


Figura 13

Conclusiones resumidas del estudio de los apartados 2.1.1 y 2.1.2

La influencia de la temperatura del horno y de la caldera en las características mecánicas de los alambre, ha sido considerada en los anteriores apartados siguiendo las deducciones obtenidas por los investigadores alemanes Pomp y Lindezbzberg que estudiaron y ensayaron aceros duros con porcentajes de carbono del orden del 0,6%.

Estos estudios, de los más antiguos sobre la materia, siguen teniendo vigencia y se hicieron todos ellos sobre alambres patentados a diámetro de 3,43 mm.



Posteriormente han seguido desarrollándose muchas investigaciones a este respecto por otros autores, utilizando materiales de otras composiciones y patentados a diversos diámetros, cuyos resultados no están en contradicción manifiesta con los obtenidos por los sabios alemanes y que quedan reflejados en los gráficos que se han representado en las figuras 8, y 9, 10a y 10b, 11a y 11b.

Por ello, como resumen de todo lo comentado en los apartados anteriores se pueden admitir las siguientes conclusiones:

Para obtener buenos resultados en cuanto a resistencia/mm<sup>2</sup> tanto en material patentado como en el trefilado después de patentar, es necesario mantener la temperatura de salida en el horno por encima de los 900°C.

La temperatura del plomo afecta mucho a las características del alambre cuando nos salimos fuera de la “nariz” de la curva de la “S”, esto es, por encima de los 570°C o por debajo de los 440°C. Con temperaturas de caldera altas obtendremos estructuras del tipo perlita laminar (perlita de láminas de cementita gruesa) con poca ductilidad. Por debajo de 440° C comienzan a aparecer estructuras del tipo bainítico que son duras, pero frágiles.

Como también se ha dicho, este intervalo de temperaturas es aproximado, ya que la curva de la “S” varía de unos materiales a otros y además el diámetro del alambre tendrá mucha influencia en la velocidad y estructura de enfriamiento como volveremos a comentar más adelante. Para obtener buenos resultados en cuanto a flexiones y torsiones en alambres trefilados después de patentados, la temperatura de horno en la salida al menos, se debe mantener por encima de los 850° C.



### 3.3.6.2. Influencia del diámetro del alambre sobre las características mecánicas y estructurales del alambre

A temperaturas fijas de horno y caldera, cuanto menor es el diámetro del alambre, mayor es la resistencia/mm<sup>2</sup> que se obtiene por patentado, supuesta también una misma composición química del hilo a medida que el diámetro del alambre es menor, el intercambio de calor es más fácil, la velocidad de enfriamiento mayor y como consecuencia la distancia interlaminar en la sorbita formada se hace más pequeña con el consiguiente endurecimiento de la estructura, cuanto más disminuya el diámetro, mayor será la tendencia a realizarse la transformación a una temperatura constante y además muy próxima a la temperatura del baño de plomo.

### 3.3.6.3. Influencia de la naturaleza del baño de enfriamiento sobre las características de los alambres

La naturaleza del baño o caldera de enfriamiento suele, ser de plomo fundido. Pero también se decía, que existen algunas instalaciones que en vez de plomo utilizan unas sales fundidas.

Los resultados, en cuanto a las características obtenidas en los alambres patentados por uno u otro procedimiento de enfriamiento (plomo o sales), así como la velocidad de paso para cada tipo de alambre, suelen ser tan parecido que podemos considerarlos como idénticos.

Las estructuras obtenidas con ambos sistemas puede afirmarse que son también prácticamente idénticas.

La conveniencia de adoptar uno u otro tipo de enfriamiento debe ser estudiada en función de factores ajenos al producto mismo, como son la corrosión sobre la caldera, la toxicidad, las lesiones sobre la piel, el precio, el costo del tratamiento etc.

Nosotros nos inclinamos sin embargo en favor del enfriamiento en plomo, sobre todo por los inconvenientes que surge en el tratamiento



con sales. La limpieza de las calderas con sales (los óxidos de hierro son más densos que las sales fundidas y se depositan en el fondo del baño) y los sobrecalentamientos locales que se producen por depósitos de posos y óxidos en zonas angulosas de la caldera que normalmente provocan perforaciones de ésta.

#### Otro sistema de enfriamiento en patentado se consigue por medio de aire soplado

Generalmente todo sistema de patentado al aire utiliza dos secciones de enfriamiento.

- Enfriamiento brusco por aire soplado.
- Conservación de una temperatura de enfriamiento en atmósfera de aire caliente

En los patentados al aire se debe obtener una estructura también sorbítica como la que se consigue con los enfriamientos en plomo o sales, así como las características mecánicas similares a las obtenidas con estos sistemas.

Sin embargo, en los patentados al aire de alambre muy fino puede existir el peligro de que se produzca un enfriamiento tan fuerte que la transformación de la estructura conduzca a un estado martensítico, o al menos bainítico, estructuras de gran dureza, pero frágiles. Este Peligro puede ser evitado utilizando para estos patentados al aire aceros de bajo porcentaje en manganeso y en carbono, de todas formas, esta circunstancia demuestra que el patentado al aire (sobre todo de diámetros finos) es sólo recomendable en circunstancias bien estudiadas y siempre que además se Posea una elevada dosis de conocimiento y experiencia, ya que la zona de temperatura a la cual tiene lugar la transformación de la estructura es más incontrolable que con los otros procedimientos.

#### 3.3.6.4. Influencia del tamaño de grano sobre las características obtenidas en alambres patentados



Uno de los factores que influyen en la velocidad (y por lo tanto en el tiempo) de la transformación estructural por enfriamiento de un alambre es el tamaño de grano, cuanto mayor es el tamaño de grano más lenta es la transformación, así, un alambre de 0,85% de carbono que ha sido calentado en el horno solamente hasta 885° C (tamaño de grano pequeño) se transforma a doble velocidad, al enfriarlo a 550° C, que el mismo alambre al enfriarlo a la misma temperatura cuando ha sido calentado en el horno por encima de los 1.000° C (tamaño de grano muy grande).

Por otra parte, cuando la transformación es más rápida, ocurre que la temperatura a que tiene lugar es también más baja y por ello mayor la resistencia/mm<sup>2</sup> obtenida en el producto patentado, además, el tamaño de grano, que se conserva después de la transformación, influye en la fragilidad del material de forma que un alambre será menos frágil cuanto menor sea el tamaño de grano.

#### 3.3.6.5. Influencia de la composición química del metal sobre las características que se obtienen en el patentado

El punto de transformación sorbíticos de un acero varía de acuerdo con la composición química del mismo, y por lo tanto supuestas fijas las variables principales del patentado, el grado de endurecimiento que sufre un alambre o un laminado al ser patentado es función de su composición química.

El elemento que más influye en la resistencia de un alambre de acero es el carbono. A mayor contenido en carbono, mayor será la resistencia por mm<sup>2</sup> que se obtiene en el patentado, a igualdad de las demás circunstancias.

A título indicativo, y como ejemplo, transcribimos a continuación el cuadro 1, en el que se especifican las resistencias que deben obtenerse en los alambres inmediatamente después de ser patentado en función de su carburación según las normas DIN. Los valores de este cuadro



pueden variar por la influencia de los porcentajes de los restantes elementos que entran a formar parte de la composición del acero (sobre todo el manganeso).

Porcentaje de carbono	Resistencia en Kg/mm <sup>2</sup>
0,25 - 0,3	62 - 69
0,3 - 0,35	69 - 76
0,35 - 0,4	76 - 83
0,4 - 0,45	83 - 90
0,45 - 0,5	90 - 96
0,5 - 0,55	96 - 102
0,55 - 0,6	102 - 108
0,6 - 0,65	108 - 114
0,65 - 0,7	114 - 120
0,7 - 0,75	120 - 126
0,75 - 0,8	126 - 132
0,8 - 0,85	132 - 137
0,85 - 0,9	137 - 142
0,9 - 0,95	142 - 147
0,95 - 1	147 - 152

Cuadro 1. Relación entre porcentaje de carbono y la resistencia teórica en *kg/mm<sup>2</sup>*

### 3.3.6.6. Influencia de los restantes elementos que forman parte de la composición química del acero en las características de material patentado

Si bien es verdad que el contenido en carbono influye preponderantemente en las características obtenidas con el tratamiento, los otros elementos químicos también influyen en aquellas características. El porcentaje de manganeso sobre todo, debe tenerse muy en cuenta.

A medida que se eleva el porcentaje de manganeso aumenta el tiempo de transformación, en general, se puede afirmar que las curvas de la “S” de un acero varían mucho también cuando el acero posee cantidades apreciables de cromo, níquel o cobre. Estas impurezas suelen aplanar y hacer descender la “nariz” de las curvas de la “S” modificando las duraciones de transformación de una forma apreciable.



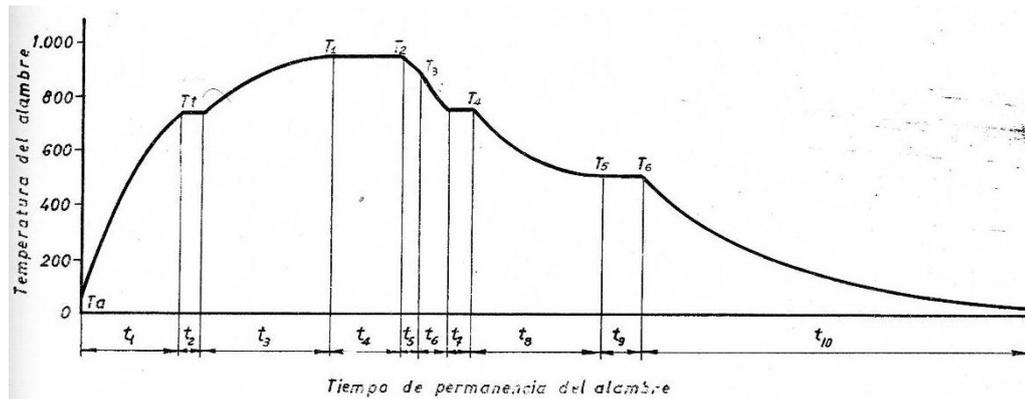
### 3.3.7. Procesos de calentamiento y enfriamiento en el patentado del alambre

Más de acuerdo con la realidad estaría un gráfico como el que se representa a continuación tomado de W.Mallach, en el que se aprecia cómo el alambre entra en el horno a la temperatura del ambiente ( $T_a$ ) y alcanza, una vez transcurrido el tiempo  $t_1$  la temperatura de transformación de la estructura austenizada. Esta transformación de la estructura durante el calentamiento es un proceso endotérmico, por este motivo se necesita el tiempo  $T_2$  para, aportar el calor de transformación. Hasta qué punto varía la temperatura de transformación del alambre ( $T_t$ ) durante el tiempo  $t_2$  depende de la proporción entre la transmisión de calor del horno al alambre y el calor necesario para transformar la estructura.

Con la posterior aportación de calor, sube la temperatura del alambre durante el tiempo  $t_3$  hasta aproximarse asintóticamente a la temperatura del horno.

El tiempo de compensación  $t_4$ , sigue a continuación, al final del cual el hilo abandona el horno a la temperatura  $T_2$ . En el paso hasta el baño de plomo, durante el tiempo  $t_5$ , se verifica un descenso de la temperatura hasta la  $T_3$ .

Como el intercambio de calor en el baño de plomo es muy bueno, la temperatura del alambre baja rápidamente, durante el tiempo  $t_6$ , hasta  $T_4$ , al llegar a este punto, y durante el tiempo  $t_7$  se produce la transformación exotérmica de la austenita en sorbita. Después de concluida la transformación de la estructura, la temperatura del alambre se va aproximando asintóticamente a la del baño de plomo ( $T_5$ ). A continuación el alambre abandona el baño a la temperatura  $T_6$  (después de transcurrido el tiempo de equilibrado  $t_9$ ), y se va enfriando durante  $t_{10}$  hasta la temperatura ambiente.



### 3.4. ARTICULOS DE DESARROLLO CIENTIFICO

No se han encontrado artículos relacionados con el efecto del patentado sobre los aceros microaleados objeto del estudio.

Se han realizado consultas con profesionales de más de 20 años de experiencia en el campo, concluyendo lo siguiente.

Para conseguir las resistencias requeridas en el producto final evitando la utilización de aceros microaleados, deberíamos partir de un diámetro de alambón mayor. Lo cual implica por un lado, cambiar todas las partes mecánicas del horno que hemos estudiado en este proyecto, de manera que te permita recoger y pasar por él, diámetros mayores de 10mm. Siendo necesario para ello, una gran inversión económica.

Y por otra parte y además de lo anterior, el aumento de dicho diámetro implicaría variar todos los parámetros del horno de patentar. Esto sería la parte más compleja, ya que se necesitan varios años de pruebas y experiencia, para conseguir el diagrama ttt óptimo del horno.

Para evitar una variación de diámetro que implicaría todo lo expuesto anteriormente, la única opción es realizar el patentado de microaleados, para lo cual y después de haber realizado varias pruebas de sabe que el comportamiento del alambre tras el patentado es aleatorio, no rigiéndose por ninguna norma estudiada y conocida.



Por ello, y como vamos a ver en este estudio, hemos conseguido aumentar la resistencia del alambroón sin aumentar el diámetro, utilizando una calidad de acero microaleado especial para este proceso.

En el anexo 2 se incluyen artículos encontrados referentes al efecto de microaleantes en el acero, aunque no se corresponda exactamente con nuestros estudios realizados, en ellos se puede ver la influencia de distintos elementos dentro del acero.

### 3.5. BIBLIOGRAFÍA

- Libro “Tecnología del patentado”
- [ocw.unican.es](http://ocw.unican.es)
- [es.wikipedia.org](http://es.wikipedia.org)
- [descom.jmc.utfsm.cl/sgeywitz/subpaginas/Materiales/Ensayotraccion/Ensayodetraccion.htm](http://descom.jmc.utfsm.cl/sgeywitz/subpaginas/Materiales/Ensayotraccion/Ensayodetraccion.htm)
- [www.aulatecnologia.com](http://www.aulatecnologia.com)
- [www.mecapedia.uji.es](http://www.mecapedia.uji.es)
- <https://materiales.wikispaces.com>
- Google académico
- Scopus



#### 4. Calidad y medio ambiente

##### Sistema de calidad

El Sistema de Calidad está perfectamente definido y representado en dos áreas, una el Sistema de Calidad con todo lo que implica: el mantenimiento de las normas, procedimientos, calibraciones, equipos de control, auditorías, certificaciones, etc., y otra centrada en el Control de la Producción Diaria.

El Control de la Producción comienza con el aseguramiento de la calidad de las materias primas que intervienen en nuestro proceso productivo, como alambrón, zinc, embalajes, lubricantes y fosfatantes.

Posteriormente continúa con un control exhaustivo del proceso, mediante control de baños de preparaciones superficiales, verificaciones de los parámetros de medición de las máquinas e instalaciones de tratamientos térmicos, patentado, recocido y galvanizado.

Asimismo, son realizadas las mediciones y valoraciones propias de autocontrol, como diámetro, aspecto, superficie, color, brillo y conformación de los alambres y los ensayos preceptivos del Departamento de Control de Calidad de características mecánicas de tracción, flexión, torsión, relajación, fatiga y de recubrimiento (capas de fosfato, galvanizado).

##### Medios del Departamento de Control de Calidad

El Departamento de Control de Calidad posee los medios humanos y materiales suficientes para el desarrollo de todas las tareas y trabajos inherentes a la calidad.

Dispone de diversos módulos para realización de los ensayos, destacando un laboratorio central de ensayos, básicamente para todos los ensayos de planta y de un laboratorio específico para el alambrón y alambre para la estampación. Dispone de diversas máquinas de tracción para ensayos de alambres y cordones. Algunas de ellas informatizadas con captación de datos (transductores de fuerza y deformación con medición mediante láser).

Máquina para ensayo de recalado, relajación y corrosión.



Microscopio estereoscópico para examen microscópico.

Espectrómetro para comprobación de composición química de coladas.

Laboratorio químico para valoraciones de baños del decape e instalaciones, y determinación de espesores de capa.

#### Gestión de residuos generados en producción

- Chatarra

Dependiendo de su estado, calidad y cantidad, o bien son depositadas en contenedores para su posterior tratamiento por una empresa externa, o bien, almacenadas en fábrica para un futuro uso. La empresa posee un punto limpio propio.

- Polvo

Constantes barridos y deposición en contenedores tanto por personal de limpieza como por los propios operarios para que el puesto de trabajo se encuentre en un estado óptimo.

- Productos químicos

Las zonas donde se encuentran los depósitos con químicos están correctamente diseñadas para que cualquier fuga o vertido llegue, mediante canalizaciones, a una estación depuradora ubicada dentro del recinto de la fábrica.

- Restos zinc y plomo

Introducidos en distintos contenedores para después ser transportados y tratados por una empresa externa.

#### Certificaciones

El organismo más importante en España en certificación tanto de "Sistemas de Calidad" (ER-Empresa Registrada), como de producto, tiene acreditada a Trefilerías Quijano, S.A.

Trefilerías Quijano está en posesión del Registro de Empresa de AENOR (certificado nº ER 0187/2/95) que acredita que es conforme a las exigencias de la Norma Española UNE-EN-ISO 9002:1994 para la: "Producción de



alambres de acero suave y acero duro, cordones y cables de acero y derivados de alambres de acero".

También posee la marca de producto "N" para la fabricación de alambres y cordones para armaduras de hormigón pretensado.

Esto significa que organismos acreditados realizan periódicamente toma de muestras y los ensayos correspondientes en laboratorios externos, lo cual es un índice y garantía de la idoneidad de estos productos.

Periódicamente se realizan ensayos de contrastación de nuestros productos con organismos o departamentos de investigación de universidades que como es lógico proporcionan un alto valor añadido al artículos.

## 5. DESARROLLO

### 5.1. Proceso de patentado empleado

El alambroón proveniente de la acería es sometido a un primer tratamiento, el decapado, que consiste en la eliminación de las capas de óxido (calamina) que traen consigo los productos laminados en caliente (alambroón), y es absolutamente necesario antes de aplicar cualquier clase de recubrimiento.



Fotografía 1. Instalación de decapado.

El baño de decapado está compuesto de tres elementos principalmente:

1. De la sustancia puramente decapante. En nuestro caso utilizaremos como sustancia decapante el ácido clorhídrico (HCl) por una serie de ventajas que le hacen más útil para nuestro proceso que otras sustancias como por ejemplo el ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).
2. De agentes inhibidores de la acción del ácido sobre el metal objeto de decapado.
3. De agentes espumantes.

#### Ácido clorhídrico

La cascarilla de óxidos, que se forma en la superficie del acero, se agrieta durante el laminado. Estas grietas son de vital importancia en el proceso de eliminación de la cascarilla pues permiten el paso de ácido hacia el interior del óxido.



El ácido clorhídrico tiene un doble efecto en el proceso de eliminación del óxido; un efecto de dilución y un efecto de desprendimiento de la cascarilla por formación de hidrógeno, que se produce en el interior de las grietas al atacar el ácido al metal base y que por presión consigue desprender la corrosión de la superficie del acero.

El proceso de eliminación de la cascarilla por presión del hidrógeno se produce en los tres primeros minutos de inmersión en el baño con un coeficiente de eliminación del 80%, mientras que para la eliminación del resto se requieren periodos de tiempo más prolongados, pues sólo actúa el proceso de dilución.

### Inhibidores

En el decapado los rollos se introducen en baños de ácido cuyas temperaturas oscilan, entre la ambiente y los 93°C. El ácido clorhídrico ataca principalmente a la capa más interna de la cascarilla así como a la superficie del acero. Por efecto del ataque se libera hidrógeno que hace estallar las capas externas de la cascarilla, como hemos dicho en el apartado dedicado al ácido.

Si la solución ácida se utilizara sin inhibidores ocurriría lo siguiente:

El ataque sería rápido, dependiendo naturalmente, de la temperatura y concentración del baño.

Ocurrirían grandes desprendimientos de hidrógeno, con las consiguientes pérdidas de ácido y malas condiciones del puesto de trabajo.

Desaparecerá la cascarilla; sin embargo, el ataque sobre el acero será muy severo.

Se consumirá una considerable cantidad de ácido.

Pueden ser afectadas las propiedades físicas del acero.

En resumen, los agentes inhibidores hacen del decapado un proceso económico y utilizable. Ellos reducen drásticamente la cantidad de hidrógeno



desprendido, disminuyen el consumo de ácido, evitan el sobredecapado, y permiten un desprendimiento correcto de la cascarilla.

Los principales agentes inhibidores son los aldehídos, piridinas, pirrolidinas, quinoleínas, aminas etoxiladas, keto-derivados de rosinaminomercaptanos, tiocianatos...

### Agentes espumantes

Los agentes espumantes se han usado desde antiguo en los baños de decapado con dos principales objetivos:

- 1) Reducir humos y pérdidas de ácido.
- 2) Disminuir la evolución de vapor.

#### • Baño de fosfatado:

El uso del fosfatado como ayuda para el estire no se deba a su bajo precio; el fosfatado es más caro que el encalado y boratado. Su utilización es debida a la gran mejora que introduce en las operaciones de trefilado, las cuales llegan a compensar las diferencias de precio. Con el fosfatado pueden aumentarse las velocidades de trefilado, creciendo la duración de las hileras. También la superficie de acabado del alambre es más perfecta y su resistencia a la corrosión crece.

Básicamente hay tres tipos de fosfatos; de hierro, de manganeso y de zinc.

El fosfato de zinc se emplea como ayuda para el trefilado. Los fosfatos de hierro y manganeso una vez probados se ha comprobado que su rendimiento en el trefilado es menor.

Los baños de fosfatado bien preparados son de operación simple, ha de mantenerse la temperatura correcta, el nivel de agua, tiempos suficientes de inmersión y eliminación de los lodos que se depositan en el fondo de la cuba.



El baño de fosfatado trabaja a una temperatura de entre 70°C y 80°C. El principal constituyente del baño es el fosfato primario de zinc con aceleradores del tipo nitrato-nitrito.

Para la preparación de un baño nuevo, es indispensable que el depósito o cuba en el cual se va a realizar esté completamente libre de suciedad.

• Baño de boratado:

La utilización del bórax como recubrimiento superficial protector para la industria del alambre es relativamente reciente. Su alcalinidad neutraliza cualquier resto de acidez presente en los alambres aún después del lavado.

Protege al alambroón de la oxidación y tiene buenas propiedades lubricantes.

En la práctica se utiliza en concentraciones de 280 a 700 gramos de pentahidrato de bórax por 3.78 litros de agua, y se opera a una temperatura de 93°C. El alambre debe permanecer en el baño el tiempo suficiente para alcanzar la temperatura del mismo. El calor absorbido por el alambre es suficiente para secar el bórax. Sin embargo, es normal estufar a 290-320°C durante 15 minutos.

El proceso llevado a cabo es el siguiente:

POS 1	POS 2	POS 3	POS 4	POS 5	POS 7	POS 8	POS 10	POS 11	POS 13	POS 14	POS 18	POS 20	POS 21	POS 22
ÁCIDO	ÁCIDO	ÁCIDO	ÁCIDO	LAVADO	LAVADO	ACTIVADO	NO FOSFATO	FOSFATO	LAVADO	PASIVADO	BÓRAX	CAL	SECADOR	SECADOR

Ya decapado el material, llega a la zona de patentado, donde los rollos se cargan en argadillos y están listos para patentar.



Fotografía 2. Rollos cargados en argadillos antes de ser patentados.

El primer paso del patentado es la austenización del material, esto se realiza en el horno de austenización, el horno se compone de cuatro zonas, las cuales están a distintas temperaturas y cuya finalidad es que se realice el cambio de estructura correctamente, las temperaturas a las que se trabajaron fueron:

Zona 1: 895°C

Zona 2: 900°C

Zona 3: 880°C

Zona 4: 890°C



Fotografías 3 y 4. Horno de austenización.

Después de la austenización, llega el enfriamiento en la caldera de plomo, esto se hace a una temperatura de  $485^{\circ}\text{C}$  para así, tal y como indica el diagrama TTT, obtener la estructura sorbítica buscada.

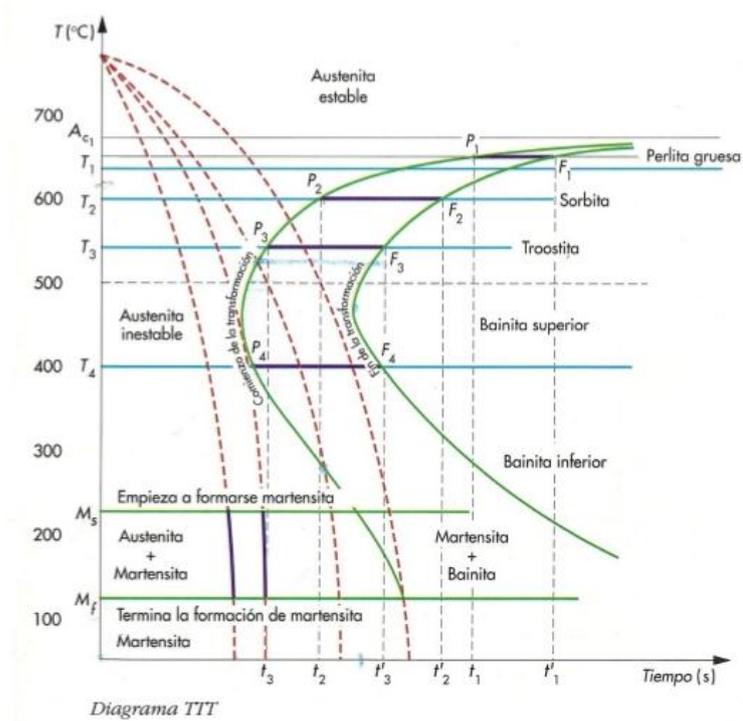


Figura 1. Diagrama TTT.



Fotografía 5. Caldera de plomo.

A continuación el alambre llegará a la zona de segundo decapado, con el objetivo de eliminar todo el residuo que se forma en los procesos anteriores, y así se galvanice correctamente el acero, se realiza en un baño de ácido clorhídrico a una temperatura que puede oscilar entre los 60°C y los 70°C.



Fotografía 6. Entrada cuba de ácido clorhídrico.

A la salida del baño de ácido, el alambre pasa por la zona del baño de mordiente, donde con la mezcla de un agente químico (cloruro de zinc y amonio) y agua, hace que el zinc se adhiera a la superficie del acero. Como complemento a este proceso, le sigue el secado.



Fotografía 7. Entrada de alambre en cuba de mordiente.

El anteúltimo paso es el del galvanizado, el acero proveniente del baño de mordiente, es sumergido en una caldera de zinc fundido.



Fotografía 8. Entrada de alambre a caldera de zinc.

La caldera se encuentra a  $445^{\circ}\text{C}$ . Nada más salir del baño, el material es escurrido mediante carbón, para obtener un acabado liso y sin restos de trozos de zinc.



Fotografía 9. Salida de alambre de caldera de zinc.

Superada la caldera de zinc, el alambre llega a la zona de lavado y enfriamiento, consiste en sumergir el alambre en una mezcla de agua y jabón, con el fin de eliminar toda suciedad indeseable en el material final y

enfriar el material hasta una temperatura cercana a la ambiente para evitar posibles complicaciones.



Fotografía 10. Zona enfriamiento alambre.

Ya por último, el alambre ya patentado y galvanizado llega a los bancos de recogida, que giran a una velocidad determinada dependiendo del diámetro, a más diámetro menos velocidad y viceversa, donde una vez terminado el proceso, el rollo de alambre es flejado y ya está preparado para ser enviado al cliente.





Fotografías 11 y 12. Producto final.

## 5.2. Parámetros a estudiar

Los ensayos fueron elaborados a partir de muestras cortadas en la instalación del patentado, se analizaron, pruebas en alambre patentado sin galvanizar, alambre patentado galvanizado y alambre sin patentar ni galvanizar.

Los parámetros a estudiar fueron:

1. Estructura metalográfica
2. Resistencia a tracción
3. Determinación de gramos de zinc
4. Medición de diámetro

La tabla que nos dará la valoración final, a falta de completarla con los resultados, sería:

Patentado sin galvanizar			Patentado galvanizado		
BULTO	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	GRAMOS ZN
1					
2					
3					
4					



### 5.3 Aceros empleados en el estudio

En el estudio ha sido dividido en dos tipos de aceros, por un lado aceros no microaleados y por otro lado aceros microaleados.

#### 1. Aceros no microaleados

Dentro de este grupo se ha empleado un acero duro, esto es un acero con un porcentaje de carbono superior al 0,78%.

Como veremos en el desarrollo de las pruebas el principal problema de esta calidad es la resistencia mínima, a la cual, tras el proceso de patentado no llegaba al mínimo exigido.

En este caso la resistencia ( $\text{Kg/mm}^2$ ) y el rango de composiciones (%) del material de partida, son los siguientes:

	MIN	MÁX
<b>RESISTENCIA</b>	112	122
<b>CARBONO</b>	0,8	0,83
<b>MANGANESO</b>	0,5	0,7
<b>SILICIO</b>	0,15	0,3
<b>FOSFORO</b>		0,02
<b>AZUFRE</b>		0,025
<b>CROMO</b>		0,05
<b>NÍQUEL</b>		0,05
<b>MOLIBDENO</b>		0,02
<b>COBRE</b>		0,1
<b>ESTAÑO</b>		0,02
<b>ALUMINIO</b>		0,01
<b>NITROGENO</b>		0,008

#### 2. Aceros microaleados

En este segundo grupo se encuentran aceros con un porcentaje de carbono superior también al 0,78%, pero en este caso con un mayor contenido en aluminio para mejorar el afine del grano e incluyendo vanadio que aumentará la resistencia.

Originalmente esta calidad microaleada incluye también mayor contenido en cromo que aumentaría también la resistencia, pero este afecta al proceso de patentado, de manera que se ha utilizado una

segunda calidad que definiremos como microaleada especial con menor contenido en cromo.

A continuación se indican resistencia (Kg/mm<sup>2</sup>) y el rango de composiciones (%) del material de partida.

MICRLOLEDADO			MICROALEADO ESPECIAL		
	MIN	MÁX		MIN	MÁX
RESISTENCIA	119	129	RESISTENCIA	120	133
CARBONO	0,8	0,083	CARBONO	0,82	0,85
MANGANESO	0,6	0,7	MANGANESO	0,6	0,8
SILICIO	0,15	0,3	SILICIO	0,15	0,3
FOSFORO		0,02	FOSFORO		0,02
AZUFRE		0,025	AZUFRE		0,025
CROMO	0,15	0,3	CROMO		0,1
NÍQUEL		0,05	NÍQUEL		0,05
MOLIBDENO		0,02	MOLIBDENO		0,02
COBRE		0,1	COBRE		0,1
ESTAÑO		0,02	ESTAÑO		0,02
ALUMINIO	0,035	0,06	ALUMINIO	0,02	0,05
NITROGEO		0,008	NITROGEO		0,008
VANADIO	0,06	0,09	VANADIO	0,06	0,09

### 5.3. Normativa

Las propiedades exigidas sobre el producto final son las siguientes:

	MINIMO	MÁXIMO
TOLERANCIA DIAMETRO (mm)	-0,1	+0,25
RESISTENCIA (Mpa)	1270	1310
GRAMOS Zn (g/m2)	360	
CARBONO (%)	0,8	0,84

Con objeto de conseguir las especificaciones marcadas, se ha aplicado la norma UNE-EN ISO 16120 Alambroón de acero no aleado para la fabricación de alambre. Que se adjunta en el Anexo 1.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Resultados en aceros no microaleados

En primer lugar se realizaron las pruebas de aceros no microaleados.

En el apartado anterior “Desarrollo” se indican las especificaciones de esta calidad, y a continuación se incluyen los resultados obtenidos.

Dividimos en 9mm; 9,5mm y 10mm. Y para cada uno de ellos se indicará la resistencia inicial y composición de la colada y los resultados obtenidos.

Requisitos de tolerancias exigidos por cliente:

	MINIMO	MÁXIMO
TOLERANCIA DIAMETRO (mm)	-0,1	+0,25
RESISTENCIA (Mpa)	1270	1310
GRAMOS Zn (g/m2)	360	
CARBONO (%)	0,8	0,84

#### DIÁMETRO 9mm

Resistencia inicial: 1138 MPa

Composición:

ELEMENTO	(%)
CARBONO	0,82
MANGANESO	0,6
SILICIO	0,21
FOSFORO	0,007
AZUFRE	0,022
CROMO	0,041
NÍQUEL	0,039
MOLIBDENO	0,004
COBRE	0,049
ESTAÑO	0,004
ALUMINIO	0,001
NITROGENO	0,007
VANADIO	-

Resultados obtenidos:

Patentado sin galvanizar			Patentado galvanizado		
BULTO	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	GRAMOS ZN
1	8,9	1266	8,91	1264	400
2	9,12	1260	9,21	1261	402
3	8,95	1256	9,05	1262	412
4	9,15	1261	9,24	1265	425

### DIÁMETRO 9,5mm

Resistencia inicial: 1148 MPa

Composición:

ELEMENTO	(%)
CARBONO	0,82
MANGANESO	0,65
SILICIO	0,30
FOSFORO	0,007
AZUFRE	0,020
CROMO	0,040
NÍQUEL	0,031
MOLIBDENO	0,008
COBRE	0,052
ESTAÑO	0,003
ALUMINIO	0,002
NITROGENO	0,007
VANADIO	-

Resultados obtenidos:

Patentado sin galvanizar			Patentado galvanizado		
BULTO	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	GRAMOS ZN
1	9,45	1250	9,48	1252	402
2	9,5	1262	9,56	1260	415
3	9,62	1256	9,64	1261	431
4	9,54	1257	9,58	1254	414

**DIÁMETRO 10mm**

Resistencia inicial: 1148 MPa

Composición:

ELEMENTO	(%)
CARBONO	0,81
MANGANESO	0,62
SILICIO	0,21
FOSFORO	0,007
AZUFRE	0,020
CROMO	0,048
NÍQUEL	0,036
MOLIBDENO	0,01
COBRE	0,042
ESTAÑO	0,004
ALUMINIO	0,005
NITROGENO	0,008
VANADIO	-

Resultados obtenidos:

Patentado sin galvanizar			Patentado galvanizado		
BULTO	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	GRAMOS ZN
1	10,08	1269	10,19	1265	441
2	9,98	1270	10,08	1272	435
3	9,92	1260	9,98	1262	438
4	10,12	1271	10,15	1270	425

**6.2. Resultados en aceros microaleados**

A continuación se indican los resultados en los aceros microaleados.

Igual que para el caso anterior, en el apartado anterior “Desarrollo” se indican las especificaciones de esta calidad.

Dividimos también en 9mm; 9,5mm y 10mm. Y para cada uno de ellos se indicará la resistencia inicial y composición de la colada y los resultados obtenidos.

**DIÁMETRO 9mm**

Resistencia inicial: 1265 MPa

Composición:

ELEMENTO	(%)
CARBONO	0,82
MANGANESO	0,67
SILICIO	0,21
FOSFORO	0,008
AZUFRE	0,003
CROMO	0,245
NÍQUEL	0,04
MOLIBDENO	0,005
COBRE	0,084
ESTAÑO	0,01
ALUMINIO	0,051
NITROGENO	0,007
VANADIO	0,082

Resultados obtenidos:

Patentado sin galvanizar			Patentado galvanizado		
BULTO	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	GRAMOS ZN
1	9,12	1308	9,22	1310	425
2	9,18	1312	9,21	1311	409
3	9,22	1305	9,27	1304	401
4	9,05	1297	9,1	1299	416

### DIÁMETRO 9,5mm

Resistencia inicial: 1216 MPa

Composición:

ELEMENTO	(%)
CARBONO	0,81
MANGANESO	0,665
SILICIO	0,202
FOSFORO	0,008
AZUFRE	0,004
CROMO	0,215
NÍQUEL	0,036
MOLIBDENO	0,005
COBRE	0,061
ESTAÑO	0,01
ALUMINIO	0,042
NITROGENO	0,006

VANADIO 0,080

Resultados obtenidos:

Patentado sin galvanizar			Patentado galvanizado		
BULTO	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	GRAMOS ZN
1	9,52	1318	9,61	1316	380
2	9,61	1312	9,65	1308	385
3	9,58	1288	9,66	1291	412
4	9,47	1305	9,57	1311	396

DIÁMETRO 10mm

Resistencia inicial: 1216 MPa

Composición:

ELEMENTO	(%)
CARBONO	0,81
MANGANESO	0,665
SILICIO	0,202
FOSFORO	0,008
AZUFRE	0,004
CROMO	0,215
NÍQUEL	0,036
MOLIBDENO	0,005
COBRE	0,061
ESTAÑO	0,01
ALUMINIO	0,042
NITROGENO	0,006
VANADIO	0,080

Resultados obtenidos:

Patentado sin galvanizar			Patentado galvanizado		
BULTO	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	GRAMOS ZN
1	10,08	1305	10,12	1308	421
2	9,98	1300	10,06	1304	417
3	9,92	1297	10	1295	397
4	10,12	1313	10,19	1314	412



### 6.3. Resultado en aceros microaleados especiales

En este último caso analizamos los resultados obtenidos de los aceros microaleados denominados para este proyecto especiales y que se diferencian de los normales, como hemos dicho en apartados anteriores, en que se disminuye el contenido en cromo.

Como en los dos casos anteriores, en el apartado de “Desarrollo” se indican las especificaciones de esta calidad.

Dividimos también en 9mm; 9,5mm y 10mm. En este caso, la colada será la misma para todos los diámetros y por ello la composición y resistencia inicial son la misma.

Resistencia inicial: 1256 MPa

Composición:

ELEMENTO	(%)
CARBONO	0,832
MANGANESO	0,66
SILICIO	0,259
FOSFORO	0,008
AZUFRE	0,004
CROMO	0,029
NÍQUEL	0,025
MOLIBDENO	0,002
COBRE	0,032
ESTAÑO	0,004
ALUMINIO	0,025
NITROGENO	0,0069
VANADIO	0,079

#### DIÁMETRO 9mm

Patentado sin galvanizar			Patentado galvanizado		
BULTO	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	GRAMOS ZN
1	8,87	1276	8,95	1275	422
2	8,974	1274	9,054	1303	445
3	9,027	1308	9,107	1309	470
4	8,92	1303	9	1303	419

DIÁMETRO 9,5mm

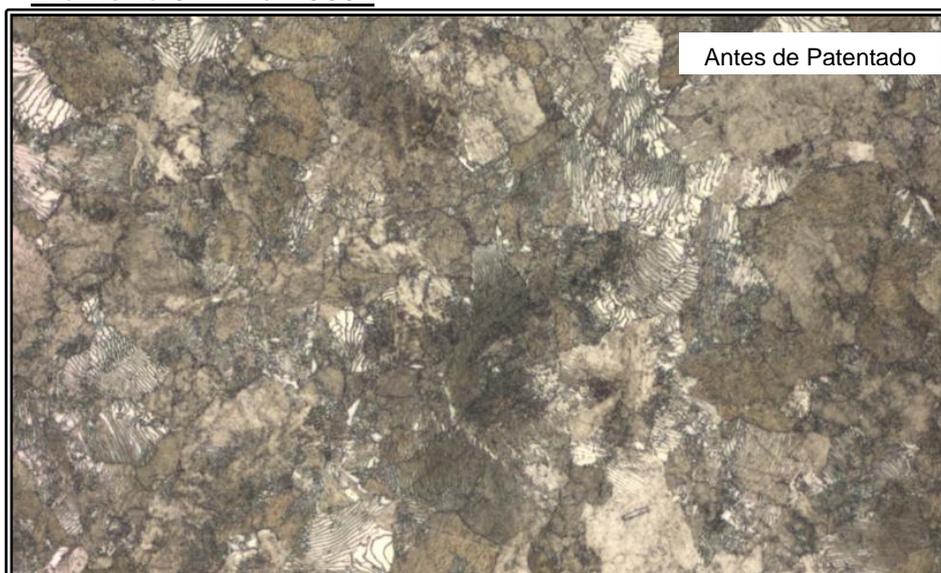
Patentado sin galvanizar			Patentado galvanizado		
BULTO	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	GRAMOS ZN
1	9,418	1274	9,498	1273	391
2	9,434	1292	9,514	1309	430
3	9,46	1276	9,54	1281	432

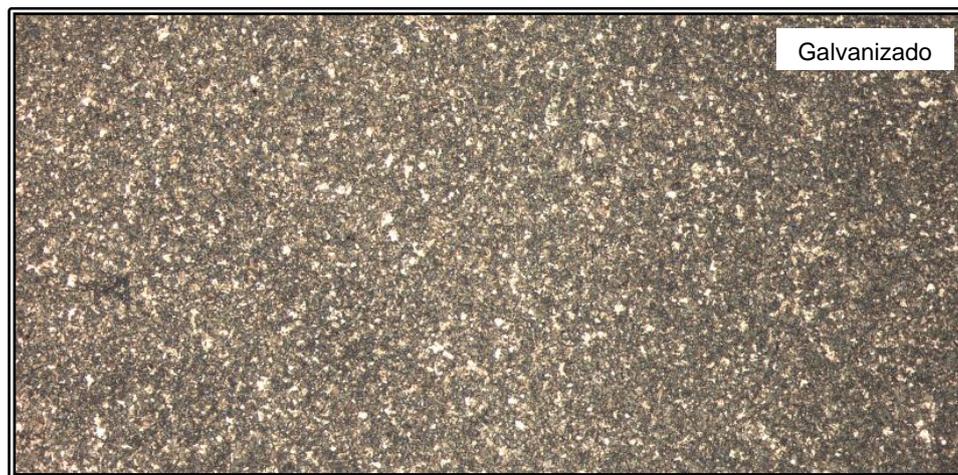
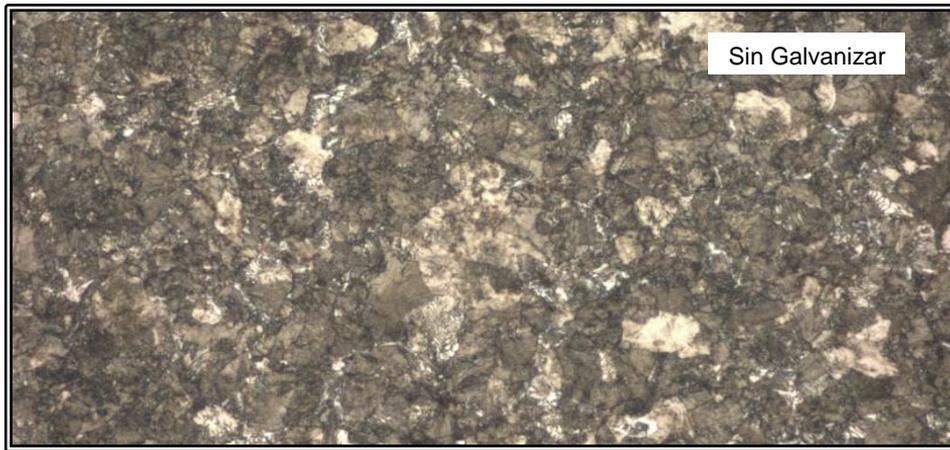
DIÁMETRO 10mm

Patentado sin galvanizar			Patentado galvanizado		
BULTO	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	DIÁMETRO	RCIA (Mpa)	GRAMOS ZN
1	9,983	1284	10,063	1283	393
2	9,861	1272	9,941	1277	384
3	9,946	1271	10,026	1275	443
4	9,953	1273	10,033	1273	403

A continuación se muestran las imágenes tomadas en el análisis metalográfico:

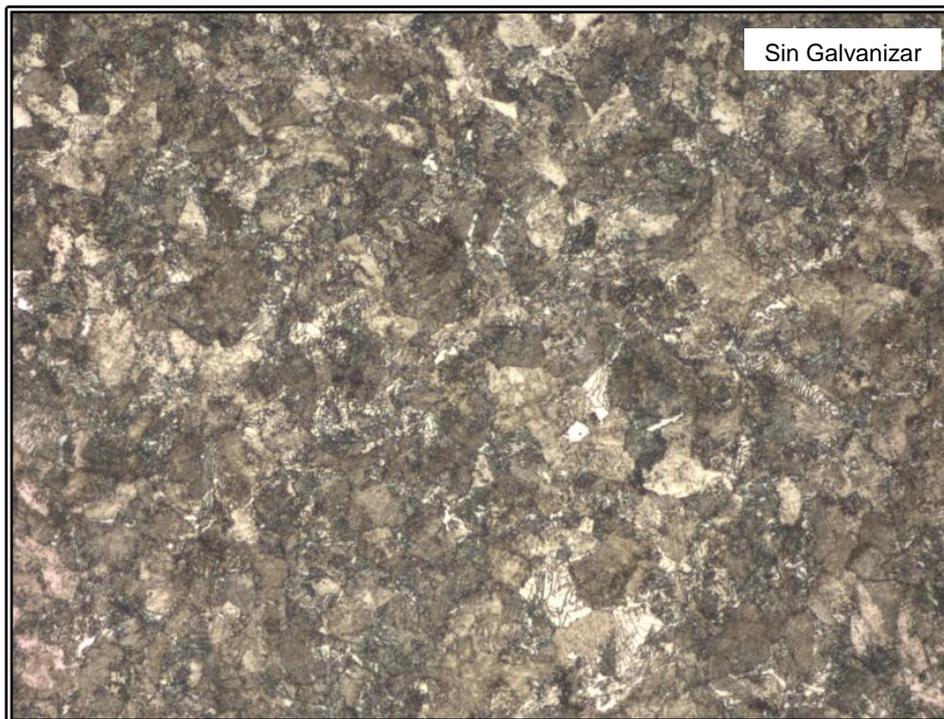
Diámetro 9 mm a 1000x





La muestra identificada como antes de patentado con un tamaño de grano mayor y la perlita más grosera. En las muestras con y sin galvanizado se puede observar una perlita resoluble más fina.

Diámetro 9,50 a 1000x



Muestras sin galvanizar y galvanizadas, muy similares. No se observa casi nada de ferrita y poca perlita resoluble y bastante fina.

Diámetro 10 mm a 1000x



En las dos muestras se observa una estructura similar, con poca perlita resoluble y bastante fina.

## 7. CONCLUSIONES

Requisitos de tolerancias exigidos por cliente:

	MINIMO	MÁXIMO
TOLERANCIA DIAMETRO (mm)	-0,1	+0,25
RESISTENCIA (Mpa)	1270	1310
GRAMOS Zn (g/m2)	360	
CARBONO (%)	0,8	0,84

Cuadro resumen con los resultados obtenidos en cuanto a resistencia (MPa) se refiere:

DIÁMETRO	NO MICROALEADO	MICROALEADO	MICROALEADOS ESPECIALES
9	1262 MPa	1305 MPa	1298 MPa
9,5	1257 MPa	1307 MPa	1288 MPa
10	1267 MPa	1304 MPa	1277 MPa

Como consta en el apartado anterior de “Resultados”, tanto en no microaleados como en microaleados, hay algunos valores que se salen fuera de la tolerancia permitida por el cliente, en cambio, con los microaleados especiales, se obtienen unos resultados más equilibrados y todos se encuentran dentro del rango de tolerancia.

Por tanto, y como hemos explicado en la parte final del apartado “Estado del arte” de este estudio. Se puede afirmar, que con la aplicación de estos microaleados especiales, hemos cumplido con las expectativas iniciales por las cuales se realizó este estudio.

Cabe destacar la importancia de los microaleantes gracias a los cuales se han obtenido tales resultados:

- Cromo: Limitando la presencia de este aleante, aumenta la profundidad del endurecimiento y mejora la resistencia al desgaste y corrosión.
- Cobre: mejora significativamente la resistencia a la corrosión atmosférica.



- Aluminio: actúa como un desoxidante para el acero fundido y produce un acero de grano fino.
- Carbono: influye directamente en la dureza del acero.
- Vanadio: Imparte dureza y ayuda en la formación de granos de tamaño fino. Aumenta la resistencia a los impactos (resistencia a las fracturas por impacto) y también la resistencia a la fatiga.