



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**

*ÁREA DE ENERGÍA, INDUSTRIAS Y  
RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES*

**CARRERA DE INGENIERIA  
ELECTROMECAÁNICA**

**TEMA:**

PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA INCREMENTAR LA  
DURABILIDAD DE LAS CUCHILLAS DE LAS MÁQUINAS  
ENVASADORAS TIPO SACHET DE LA INDUSTRIA  
LOJANA DE ESPECERÍAS (ILE).

Tesis de Grado previa a la  
obtención del título de  
Ingeniero Electromecánico.

**AUTOR:**

*JUAN PABLO JIMÉNEZ LUZÓN.*

**DIRECTOR:**

*ING. GONZALO RJOFRÍO.*

**LOJA – ECUADOR**

**2004**

# CERTIFICACIÓN

**Ing. Gonzalo Riofrío**  
**DIRECTOR DE TESIS**

## **CERTIFICA:**

Que el señor Juan Pablo Jiménez Luzón, egresado de la carrera de Ingeniería Electromecánica desarrolló el trabajo de investigación sobre el tema: "PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA INCREMENTAR LA DURABILIDAD DE LAS CUCHILLAS DE LAS MÁQUINAS ENVASADORAS TIPO SACHET DE LA INDUSTRIA LOJANA DE ESPECERÍAS (ILE)", la misma que ha sido revisada en forma prolija, cumpliendo con las Normas Generales para la graduación en la Universidad Nacional de Loja, para lo cual autorizo su presentación.

Loja, septiembre del 2004

**Ing. Gonzalo Riofrío**  
**DIRECTOR DE TESIS**

# **AUTORÍA**

El integrante de la investigación sobre el tema: “ PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA INCREMENTAR LA DURABILIDAD DE LAS CUCHILLAS DE LAS MÁQUINAS ENVASADORA TIPO SACHET DE LA INDUSTRIA LOJANA DE ESPECERÍAS (ILE)”, se responsabiliza por los contenidos de la presente tesis y asume la autoría de la misma.

Loja, septiembre del 2004

**El autor**

**Juan Pablo Jiménez Luzón**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Deseo expresar  
mi sincero agradecimiento  
a todo el hermano país de Cuba,  
a todas las personas que de una forma desinteresada, ayudaron  
al feliz término de esta investigación, de una forma especial  
al Dr. Alberto Velázquez del Rosario, y a su querida esposa,  
M.Sc. Maritza Mariño Cala.*

**A la Universidad Nacional de Loja, de forma especial al Ing. Gonzalo Riofrío  
director de este trabajo de diplomado por la gran acogida y colaboración en  
el desarrollo de todo el trabajo, a todo el Instituto  
Superior Minero Metalúrgico de Moa, , y en especial al cálido pueblo de Moa,  
y a todas las personas que siempre estuvieron dispuestos a brindar su  
ayuda y enseñanzas para mi formación académica**

**A mis amigos.**

**A mi familia.**

**MUCHAS GRACIAS**

**DEDICATORIA**

**Quiero dedicar el presente trabajo, a mí  
Querida madre Lilia Elena, a mis hermanos, Marisol, Katy, Oscar Leonardo,  
por todo el apoyo recibido durante mis años de estudio.**

**A Héctor, mi padre**

**A mis amigos**

## **RESUMEN**

Se realiza el estudio acerca del desgaste prematuro de las cuchillas de las máquinas envasadoras tipo sachet de la Industria Lojana de Especerías (ILE), en Ecuador. Sobre la base del análisis fractográfico y metalográfico se realiza una caracterización del micromecanismo de desgaste y se determina que el material utilizado para la fabricación de estos accesorios no era el idóneo (acero inoxidable austenítico AISI 304); por lo que se propone un nuevo material (acero inoxidable martensítico 420) con mayores posibilidades de incrementar su dureza, resistencia mecánica y resistencia al desgaste por medio de tratamientos térmicos. Se muestran los resultados de los ensayos metalográficos, mecánicos y análisis estadísticos que argumentan la variante tecnológica propuesta.

## **ABSTRACT**

A study about early wear of knives from packing machines model Sachet at the Industries of Condiments of Loja, in Ecuador. On the base of the fractographic and metallographic analysis a characterization of the wear micromecanism is carried out and it is determined that the material used for the production of these accessories was not the suitable one (austenitic stainless steel AISI 304); according to the results, a new material (martensitic stainless steel AISI 420) with better possibilities of increasing its hardness and to get higher mechanical and wear resistance properties by means of heat treatments is proposed. The results of the metallographic analysis, mechanical tests and analysis statistical are shown in order to argue the technological proposal variant.

## **INDICE.**

INTRODUCCIÓN. . . . .	1
-----------------------	---

### **CAPITULO I. ESTADO DEL ARTE.**

1.1. Historia y desarrollo de la Industria Lojana de Especerías. . . . .	2
1.2. Estructura tecnológica de ILE. . . . .	2
1.2.1. Área de polvos. . . . .	2
1.2.2. Área de pastas. . . . .	3
1.2.3. Área de molinos para polvos. . . . .	3
1.2.4. Área de molinos para pastas. . . . .	4
1.3. El fenómeno de la fricción y el desgaste. . . . .	4
1.4. Marco contextual. . . . .	7
1.4.1. Problematización. . . . .	7
1.4.2. Problema Científico.. . . .	10
1.4.3. Objeto de investigación. . . . .	10
1.4.4. Hipótesis general. . . . .	10
1.4.5. Hipótesis específicas. . . . .	10
1.4.6. Objetivo general. . . . .	11
1.4.6.1. Objetivos específicos. . . . .	11

### **CAPITULO II. MARCO TÉORICO-METODOLÓGICO.**

2.1. Caracterización del equipamiento de ILE. . . . .	12
2.1.1. Máquinas envasadoras Roure. . . . .	12
2.1.1.1. Tolva. . . . .	12
2.1.1.2. Sistema de dosificado. . . . .	13
2.1.1.3. Sistema neumático. . . . .	13
2.1.1.4. Sistema de arrastre. . . . .	13
2.1.1.5. Árbol de Levas. . . . .	14
2.1.1.6. Sistema de accionamiento de las cuchillas. . . . .	14
2.2. Mantenimiento de las envasadoras. . . . .	15
2.3. Tratamientos térmicos convencionales volumétricos. . . . .	15
2.3.1. Recocado. . . . .	15
2.3.2. Normalizado. . . . .	16

2.3.3. Temple.	16
2.3.4. Aspectos prácticos del enfriamiento en el temple.	18
2.4. Revenido.	21
2.4.1. Influencia del revenido en las propiedades mecánicas del acero.	22
2.4.2. Fragilidad del revenido.	23
2.5. Aspectos prácticos del tratamiento térmico.	25
2.5.1. Calentamiento de las piezas.	26
2.5.2. Métodos de calentamiento.	27
2.5.2.1. Introducción de la pieza con el horno a la temperatura de tratamiento seleccionada.	27
2.5.2.2. Introducción de la pieza en el horno a una temperatura superior a la temperatura de tratamiento.	27
2.5.2.3. Introducción de la pieza para ser calentada conjuntamente con el horno.	28
2.5.6. Introducción de la pieza con el horno a una temperatura inferior a la de tratamiento con un calentamiento conjunto posterior hasta esa temperatura.	28
2.6. Aceros aleados.	29
2.6.1. Clasificación de los aceros aleados de acuerdo con su utilización.	30
2.7. Elementos de aleación y su influencia en las propiedades del acero..	31
2.7.1. Aceros aleados con níquel.	31
2.7.2. Aceros aleados con cromo.	32
2.7.3. Aceros aleados con molibdeno.	33
2.7.4. Aceros aleados con wolframio.	34
2.7.5. Aceros aleados con vanadio.	35
2.7.6. Aceros aleados con manganeso.	36
2.8. División de los aceros inoxidables.	37
2.8.1. Aceros austeníticos..	38
2.8.2. Aceros martensíticos.	39
2.8.3. Aceros ferríticos.	40
2.8.4. Aceros dúplex (ferrito-martensíticos).	41
2.9. Tipos de desgaste.	42
2.9.1. Desgaste adhesivo.	43
2.9.1.1. Tipos de desgaste adhesivo.	43



2.9.1.1.1. Desgaste adhesivo por pulido o de fricción por cizallamiento. . . . .	43
2.9.1.1.2. Desgaste adhesivo superficial. . . . .	43
2.9.1.1.3. Desgaste adhesivo profundo. . . . .	44
2.9.2. Desgaste abrasivo. . . . .	45
2.9.2.1. Tipos de desgaste abrasivo. . . . .	47
2.9.2.1.1. Desgaste contacto-abrasivo. . . . .	48
2.9.2.1.2. Desgaste contaminante abrasivo. . . . .	48
2.9.3. Destrucción por impacto. . . . .	50

### **CAPITULO III. TÉCNICA OPERATORIA.**

3. Materiales, métodos experimentales y procedimientos establecidos. . . . .	52
3.1. Selección y preparación de muestras. . . . .	52
3.1.2. Análisis químico. . . . .	53
3.1.3. Análisis microestructural. . . . .	53
3.1.4. Ensayos de dureza. . . . .	54
3.1.5. Análisis metalográfico. . . . .	54
3.2. Selección de los parámetros tecnológicos. . . . .	54
3.3. Selección de los tratamientos. . . . .	55
3.3.1. Tecnología de tratamiento térmico. . . . .	55
3.3.2. Temperaturas tecnológicas de tratamiento. . . . .	55
3.3.3. Velocidad de calentamiento. . . . .	55
3.3.4. Tiempo de permanencia. . . . .	56
3.3.5. Medio de enfriamiento. . . . .	56
3.3.6. Posición de las piezas dentro del horno. . . . .	56
3.3.7. Investigación de la influencia de los parámetros tecnológicos en las propiedades del material. . . . .	57
3.3.8. Análisis de regresión. . . . .	58
3.3.8.1. Formulación de la hipótesis estadística. . . . .	58
3.3.8.2. Representación gráfica de los datos. . . . .	59
3.3.8.3. Análisis de correlación y regresión. . . . .	59
3.3.8.4. Interpretación de los resultados ANOVA y decisión. . . . .	59

### **CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

4.1. Resultados.	60
4.1.1. Análisis químico.	60
4.1.2. Ensayos de dureza.	60
4.1.3. Análisis metalográfico.	60
4.1.4. Ensayos de dureza después del tratamiento térmico.	62
4.1.5. Representación gráfica de los datos.	63
4.1.6. Resultados de la correlación y regresión.	64
4.1.7. Resultados de ANOVA.	64
4.1.8. Interpretación de los resultados ANOVA.	65
4.2. Discusión.	65
4.2.1. Análisis químico.	65
4.2.2. Ensayos de dureza.	66
4.2.3. Análisis metalográfico.	66
4.2.4. Análisis de regresión.	69
4.2.5. Resultados ANOVA.	70
4.3. Propuesta de solución y argumentación a la solución del problema del deterioro de las cuchillas.	70

## **CAPITULO V. ESTUDIO ECONÓMICO Y MEDIO AMBIENTAL**

5.1. Estudio medio ambiental.	72
5.1. Estudio económico.	74
Conclusiones.	76
Recomendaciones.	77
Referencias Bibliográficas.	78
Anexos.	80



## 1. INTRODUCCIÓN

La Industria Lojana de Especerías desde su fundación, ha tratado de estar a la vanguardia en cuanto a producción a nivel de la provincia y a nivel de todo el país. Es por eso que su equipamiento es bastante sofisticado y de gran productividad; permitiéndole alcanzar una producción acorde a la demanda de sus diferentes productos. La infraestructura de ILE está compuesta por cuatro áreas muy importantes y bien definidas, las cuales le permiten un manejo adecuado de sus recursos: el área de polvos, el área de pastas, el área de molinos de polvos y el área de molinos de pastas.

Las máquinas existentes en ILE son de desplazamiento horizontal e inicialmente se adquirieron para el envasado de productos en polvos. Con el surgimiento de la posibilidad y a la vez necesidad de envasar especias en pasta, se ha rediseñado todo el sistema de dosificado del producto y también de arrastre del material de envoltura por uno que permita trabajar con la elaboración de pastas, lográndose una reconvención total de la maquinaria que las convierte prácticamente en universales, a los efectos de ILE.

Hoy en día la Industria Lojana de Especerías, debido a la gran demanda de sus productos, por los años de funcionamiento y la gran cantidad de máquinas existentes, es difícil determinar la vida útil de cada uno de sus componentes y en especial las cuchillas pertenecientes a las máquinas envasadoras. Las cuchillas objeto de investigación se encargan de cortar los sobres con el producto envasado ya sea en polvo, pasta o en granos y por la gran velocidad de trabajo es necesario que sean lo suficientemente resistentes para soportar los cortes por material y por vacío.

En el presente trabajo se exponen los resultados de una investigación realizada para determinar las causas del deterioro prematuro de las cuchillas de la Industria Lojana de Especerías (ILE) y proponer una variante tecnológica que permita elevar las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables aplicados en cuchillería con el empleo de tratamientos térmicos.



## **CAPITULO I. ESTADO DEL ARTE**

### **1.1. Historia y desarrollo de la Industria Lojana de Especerías**

Desde hace muchos años en la ciudad de Loja ha venido funcionando una de las empresas más importantes de la provincia y del Ecuador: la Industria Lojana de Especerías.

La Industria Lojana de Especerías se encuentra ubicada al norte de la ciudad y fue fundada en el año de 1968 por los industriales Sr. Manuel Esteban Godoy Ortega y Blanca Ruiz de Godoy. Inicialmente esta empresa estaba ubicada en el centro de la ciudad de Loja luego fue trasladada al sector de Consacola Km. 1 vía Cuenca, lugar donde radica su casa matriz hoy en día.

Inicialmente toda la planta de ILE contó con pocas máquinas envasadoras, así como pocos molinos. Toda esta maquinaria se ha ido incrementando con el pasar de los años y con la necesidad de mejorar los procesos de envasado de los diferentes productos que allí se elaboran.

Los diferentes tipos de máquinas envasadoras que posee esta empresa son de tecnología Alemana y en algunos casos Argentina; pero la mayoría de las máquinas han sido construidas en el departamento de mecánica de la misma empresa, en el se han diseñado sus máquinas envasadoras, molinos y diferentes tipos de mecanismos para los diferentes requerimientos que la producción necesita.

### **1.2. Estructura tecnológica de ILE**

#### **1.2.1. Área de polvos**

Esta área está destinada al envasado de los diferentes tipos de especias en polvo como son: la savora, el comino, la pimienta, sazoadores, etc. Cuenta con ocho máquinas de producción horizontal por sobres, una de producción vertical por sobres, cuatro envasadoras horizontales tipo Sachet, y dos empacadoras de fundas. Estas máquinas pueden alcanzar una producción óptima de 100 sobres por minuto como máximo y 40 sobres por minuto como mínimo.



Las máquinas envasadoras se encargan de colocar el producto ya procesado en sobres de distinta presentación con capacidades de 3, 5, 25, y 50 gr., dependiendo del formato con que se quiera trabajar dentro de la producción. El proceso de empacado de estos sobres lo realizan las máquinas empacadoras, luego de esto estarán listos para los pasos de bodega y distribución.

### **1.2.2. Área de pastas**

Esta área posee un total de ocho máquinas, de las cuales cuatro son utilizadas para la producción de especias en sobres de manera horizontal al igual que las del área de polvos. Además cuenta con cuatro envasadoras de frascos en producción horizontal. Las máquinas de producción de pastas en sobres pueden brindar un máximo de producción de 90 sobres por minuto y un mínimo de 40 sobres por minuto, en relación con el punto operacional con que se desee trabajar en la máquina.

Las máquinas de producción en frascos garantizan una producción estándar aproximada de 40 frascos por minuto, en dependencia de la cantidad del producto. En esta área se producen productos como el aliño completo, refrito, ajo, y chimichurri. Estos productos tienen una presentación en vasos, frascos y otra en sobres de mayor capacidad.

El envasado para productos en presentación tipo Sachet se produce por máquinas horizontales de gran velocidad, las cuales poseen presentaciones de los productos con sus diferentes pesos como son 30, 25, y 5 gr. En este procedimiento se asegura la calidad de los productos por medio de la supervisión del sellado de los sobres y la forma de llenado de los mismos. De igual manera, se realiza con las diferentes presentaciones en frascos.

### **1.2.3. Área de molinos para polvos**

En esta área ILE cuenta con un total de 7 trituradores y 14 molinos refinadores. Los molinos refinadores cuentan con un sistema para el proceso de refinar el producto triturado anteriormente por medio de la acción de sus dos piedras y una transmisión de movimientos por poleas y bandas. Mientras que los molinos trituradores son un sistema de molienda para el refinado de los productos.



Además de estos equipos, también se cuenta con cuatro molinos de martillos para triturar y refinar los productos traídos directamente de las cosechas.

#### **1.2.4. Área de molinos para pastas**

En este sector la empresa cuenta con varias máquinas, cuyo punto de partida para el proceso de molienda es un molino triturador, cuyos componentes de alimentación y triturado son de material inoxidable. El sistema de alimentación está conformado por un sinfín, además un tambor moledor del producto. Cabe destacar que semejantes a este molino se encuentran cuatro molinos más, los cuales son utilizados para refinar el producto triturado anteriormente.

La maquinaria para esta área es totalmente fabricada en acero inoxidable según las normas sanitarias. A parte de estos molinos también cuenta esta área con 13 tolvas de almacenamiento las cuales están hechas del mismo material al igual que la del resto de la maquinaria.

#### **1.3. El fenómeno de la fricción y el desgaste**

Los mayores problemas de inestabilidad en las operaciones de las máquinas de ILE están dados por el deterioro prematuro de las cuchillas, debido al desgaste que las inhabilita, originado por la fricción.

El cambio inesperado de las cuchillas en horas de trabajo debido al desgaste y la pérdida del filo cortante indica tanto una pérdida para la producción como para toda la empresa. El reafilado de las cuchillas, aunque soluciona en parte las situaciones presentadas, se torna en un problema para la empresa, ya que solamente se les puede reafilar mientras estas poseen espesores mayores de 3 mm. Una vez excedido este espesor o en los límites del mismo, las cuchillas se deforman durante el reafilado, por lo que deben ser remplazadas por otras nuevas.

Muchos autores han investigado los fenómenos de la fricción y los mecanismos de desgaste asociados a estos. La fricción surge como resultado de la interacción física entre cuerpos que se encuentran en rozamiento.



Desde la más remota antigüedad, el hombre tuvo que relacionarse con los procesos de fricción y sus efectos. Una de las primeras aplicaciones fue, sin dudas, el aprovechamiento del calor originado por el frotamiento en la obtención del fuego. Otro problema de importancia práctica lo fue y sigue siendo, el de la fricción durante el transporte de objetos pesados. Sin embargo, las investigaciones científicas comenzaron a finales del siglo XV y principios del siglo XVI.

Martínez, 1990, hace un análisis de los conceptos básicos y el estado del arte de los procesos de desgaste y plantea que la primeras investigaciones sistemáticas sobre el desgaste fueron realizadas por Leonardo da Vinci entre los años 1500-1508. Según Martínez, en unos escritos encontrados en Madrid en 1967, Leonardo describe sus investigaciones sobre el desgaste llevadas a cabo en simples cojinetes de contacto plano. Sin embargo, las investigaciones sobre el desgaste con una base científica fueron llevadas a cabo por Fuchsel, en Alemania, en 1930, lo que constituyó el primer período en la investigación de los procesos de desgaste.

Fuchsel asoció el proceso de desgaste de los metales no lubricados con procesos de deformación acompañados de otro proceso de desprendimiento de partículas deformadas. Posteriormente, esta teoría fue enriquecida por Fink, Mailander y Dies.

Los primeros intentos de vincular el desgaste con las propiedades mecánicas de los materiales se debe a Tonn, quien en 1937 propuso una fórmula empírica para determinar la intensidad del desgaste abrasivo. Los resultados de estas investigaciones sobre el desgaste fueron sistematizados por Siebel, en 1938, al demostrar que debido a la gran variedad de formas existentes, no es posible determinar el desgaste de los materiales por medio de un ensayo aislado y caracterizarlo con una magnitud única.

En 1940, Holm propuso un modelo matemático para calcular el volumen del material desgastado por unidad de recorrido con deslizamiento utilizando por



primera vez teorías e hipótesis que consideraron la naturaleza interatómica del desgaste.

Después de finalizada la segunda guerra mundial, en algunos países más desarrollados y menos desgastados por la confrontación bélica, comienza el denominado segundo período en la investigación del desgaste y sus efectos. A principio de los años 50, algunas de las investigaciones anteriores se repitieron y sistematizaron en algunos países, fundamentalmente, Estados Unidos e Inglaterra. Así, Feng, Burwell y Strang sostuvieron cómo en el proceso de desgaste puede existir transferencia de partículas desde una superficie desgastada a otra. Kerridge demostró, además, que este proceso de traslado puede ir acompañado de procesos de oxidación y que el denominado desgaste “moderado” no es más que el desprendimiento de partículas de óxido de las superficies metálicas.

Burwell clasificó los mecanismos físicos del desgaste en cuatro tipos: desgaste adhesivo, desgaste abrasivo, desgaste corrosivo y desgaste por fatiga superficial. A finales de los 50, tiene lugar la tercera y decisiva etapa en el desarrollo de los métodos de cálculo del desgaste, vinculada con la teoría del desgaste por fatiga de los cuerpos sólidos desarrollada por Kragelskii en 1957, en la URSS. De forma ampliada, esta teoría se publicó en la URSS en 1958; en Estados Unidos, en 1965 y en Inglaterra, en 1968. En esta teoría se introduce el concepto de “ligadura friccional unitaria”, donde ocurre la deformación de un cierto volumen de material en la superficie de los cuerpos rozantes. El estado tensional de este volumen se analiza en dependencia de la carga, la fricción y la configuración geométrica de las microirregularidades.

Hoy en día, la teoría del desgaste por fatiga mantiene una amplia vigencia. No obstante, ha recibido importantes aportes por parte de Rosseanu y Bayer, en los Estados Unidos; Endo, Fukuda, Tgata y Takamia, en Japón y Polzer, en Alemania.

A escala industrial, el fenómeno del desgaste también ha sido tratado con regularidad. Mariño, 1999, estudió y estableció el mecanismo del desgaste de





martillos de trituradoras de mineral laterítico fabricados de acero alto al manganeso, haciendo énfasis en el micromecanismo de desgaste que rige el deterioro de estos elementos en presencia de abrasión y cargas de impacto. Mariño, 1999, estableció también un mecanismo de microdesgaste de martillos de trituradoras de mineral fabricados de acero alto al manganeso que operan bajo condiciones de abrasión e impactos fuertes. Por su parte, Torres, 2002, investigó el mecanismo de desgaste de elementos fabricados con aceros altos al manganeso, pero recargados mediante soldadura y tratados térmicamente.

El desgaste de cuchillas de máquinas que operan bajo el mismo principio y regímenes similares a los de ILE, aunque se conoce que ha sido investigado, ha sido tratado muy poco en la literatura consultada, la que se remite solamente al establecimiento de los fundamentos generales del desgaste. Henry, 2000, hace un análisis de casos de daños superficiales de cuchillas de cocina, estableciendo que los mismos son originados por la erosión y el deterioro por fracturas frágiles. Sin embargo, hasta el momento no se ha investigado el fenómeno del desgaste de la cuchillería de la maquinaria de ILE, lo que constituye uno de los propósitos del presente trabajo, conjuntamente con la búsqueda de una alternativa tecnológica para minimizar los efectos del mismo.

#### **1.4. Marco contextual**

##### **1.4.1. Problematización**

Las cuchillas objeto de investigación, se encargan de cortar los sobres con producto ya envasado, el cual puede ser en polvo, pasta o en granos y por la gran velocidad de trabajo en las que se desarrollan diariamente estas máquinas, hoy en día las cuchillas de todas estas máquinas deben ser lo suficientemente resistentes para soportar los embates producidos por el largo período de trabajo.

Originalmente esta máquina Roure es de fabricación Alemana, diseñada especialmente para el envasado de los productos en polvo. Pero cabe indicar que a este tipo de envasadoras se las rediseñó en el departamento de mecánica de la empresa; de esta forma se cambio todo el sistema envasador por uno que permitiera el envasado de diferentes productos en pasta.



Estas cuchillas se colocan por pares en cada máquina. Se debe indicar que son de dos formas: una es en forma de escuadra y la otra en forma de tijera de peluquero. Varían su longitud y tamaño dependiendo de la máquina en la que estén colocadas; así como la diferente presentación del producto a envasar.

El sistema que produce su movimiento y su condición de trabajo está dado por dos semi-engranajes montados a dos ejes fijos que actúan como pieza móvil debido que se encuentran sujetos a dos rodamientos independientes. Dicho movimiento parte desde la transmisión que le brinda el árbol de levas de la máquina, A su vez la leva, conjuntamente con sus rodamientos y la palanca, se encuentran sujetas y brindan un movimiento igual al de una tijera de peluquero puesta en una posición vertical.

El mecanismo de cuchillas trabaja aproximadamente bajo un régimen de 64 cortes por minuto como mínimo y un máximo de 90 cortes por minuto. Por lo general, estas cuchillas tienen un tiempo de vida útil de aproximadamente 15 días remitido a ocho horas de trabajo diarias en las mejores condiciones. Lo que significa que efectúen 460800 cortes por ciclo de trabajo. En esta empresa se cuenta con 13 máquinas de estas características, y cada una de estas máquinas contiene un par de cuchillas, tornándose el reafilado un problema por la cantidad, así como la reposición de las mismas. Esto implica horas de trabajo en el personal, costo de material y energía aplicados para este proceso.

Estas cuchillas son hechas de acero inoxidable austenítico AISI 304 de una plancha de 6 mm de espesor, convirtiéndose también en una molestia su reafilado, indicando que solamente se les puede reafilar hasta que estas tengan un espesor mínimo de 3 mm; pasado este espesor o en este espesor las cuchillas empiezan a perder forma, adquiriendo deformaciones cóncavas o convexas producto del esfuerzo de la carga aplicada por la piedra para rectificado de superficies en el momento del reafilado; por lo que deben ser remplazadas por unas nuevas.



El procedimiento para el sistema de reafilado de las cuchillas, se realiza en una rectificadora para planchas, cuchillas y diferentes tipos de materiales. Dicha rectificadora es de desplazamiento horizontal y vertical al tiempo de su trabajo, la cual cuenta con una piedra de abrasión fija especial para este procedimiento; un sistema de enfriamiento por adición de refrigerante a la superficie del material rectificado y un magneto de alta potencia, el cual asegura fijamente la pieza a la superficie del mismo, dejando listo para el rectificado. Además se posee una plancha de acero negro para poder sujetar las cuchillas no magnéticas (AISI 304) a dicha plancha y esta a su vez al magneto de la rectificadora. Este procedimiento se realiza en norma, según los siguientes pasos.

1. Limpieza de la cuchilla y enderezado de la misma.
2. Limpieza de la plancha de acero negro (actúa como portadora de cuchillas).
3. Limpieza y nivel del magneto.
4. Rectificado de la superficie de la piedra.
5. Puesta de la cuchilla en el magneto.
6. Calibración de desplazamientos horizontales y verticales de la máquina.
7. Calibración de profundidad para la piedra con la que se va a rectificar la superficie del material.
8. Encendido y adición de refrigerante.

El reafilado se realiza dando una profundidad máxima de 0,2 milímetros. Dichas cuchillas son elaboradas en el departamento de mecánica en la misma empresa.

Sin embargo, el acero AISI 304 (Fe/Cr18/Ni10) pertenece a la clase de aceros austeníticos. Es decir, su microestructura es austenítica (red cúbica centrada en las caras), amagnética; aunque en estado recocido puede presentar pequeñas franjas de carburos en los límites de los granos. Por su bajo contenido de carbono ( $< 0,15$ ) este material no es endurecible por tratamientos térmicos. Sólo puede endurecerse por deformación en frío, consiguiéndose valores de dureza de hasta 40 HRC. Cuando se aplican grados de deformación elevados con estos valores de dureza, todavía no se satisfacen los requerimientos para el corte de los sobres, por lo que se requiere buscar otra alternativa para resolver el problema planteado.



Es importante señalar que al diseñar una tecnología de tratamiento térmico para una pieza cualquiera, se debe atender una serie de parámetros y factores que son de obligatorio cumplimiento para que, además de asegurar obtener las propiedades deseadas, garanticen que los defectos que puedan producirse en las piezas sean reducidos al mínimo, así como la utilización racional de la instalación empleada en dicho proceso.

Al final de esta investigación se propone una variante tecnológica para la obtención de cuchillas más resistentes y duraderas que garanticen el trabajo estable y continuo de las máquinas envasadoras de ILE. Con esta variante, se garantiza dar mayor eficiencia en la producción y ganar horas de producción por paros inesperados debido a cambio de cuchillas. De ser aplicable y con muy buenos resultados será puesto en práctica para otros mecanismos que beneficien de alguna manera la dureza, resistencia, y vida útil de la maquinaria de ILE.

#### **1.4.2. Problema científico**

Diseño de una tecnología que permita elevar las propiedades mecánicas de los aceros inoxidable, provoca un limitado conocimiento y poco aprovechamiento de todas sus propiedades.

#### **1.4.3. Objeto de investigación**

El objeto de investigación lo constituye el fenómeno del desgaste de las cuchillas de las máquinas envasadoras de ILE y la búsqueda de una propuesta tecnológica para minimizar los efectos del mismo.

#### **1.4.4. Hipótesis General**

El estudio de las causas y el fenómeno del desgaste de las cuchillas de las máquinas de ILE permitirán establecer una variante tecnológica para aumentar las propiedades mecánicas de las mismas, logrando así aumentar resistencia y durabilidad, aplicados en el trabajo de las máquinas envasadoras tipo Sachet.

#### **1.4.5. Hipótesis Específicas**

- Las causas del desgaste y deterioro prematuro de las cuchillas de las máquinas envasadoras de ILE están asociadas a una inadecuada selección



del material y de una variante tecnológica para elevar sus propiedades mecánicas.

- El incremento de la durabilidad de las cuchillas reportará aumentos en la producción y la disminución de las pérdidas económicas de la empresa ILE.

#### **1.4.6 Objetivo General**

- Diseñar una variante tecnológica que permita incrementar las propiedades mecánicas y la durabilidad de las cuchillas de las máquinas envasadoras de ILE.

##### **1.4.6.1. Objetivos Específicos**

- Investigar las causas del deterioro prematuro de las cuchillas de acero inoxidable de las máquinas envasadoras tipo Sachet de ILE.
- Seleccionar, teniendo en cuenta criterios técnico-económicos, un material adecuado para fabricar cuchillas con las características requeridas.
- Seleccionar un mecanismo de endurecimiento y diseñar la variante tecnológica para elevar las propiedades mecánicas de las cuchillas a partir del material seleccionado.
- Realizar una valoración del efecto técnico-económico y social de la variante propuesta.



## **CAPITULO II. MARCO TEÓRICO-METODOLÓGICO**

### **2. 1. Características del equipamiento de ILE**

#### **2.1.1. Máquinas envasadoras Roure**

Las máquinas envasadoras Roure de fabricación Alemana, originalmente son consideradas como unas de las más exitosas en cuanto al envasado de productos alimenticios. La empresa creadora de estas máquinas la Roure, posee una gran variedad en cuanto se refiere a diferentes tipos de envasadoras subdivididas en máquinas de desplazamiento horizontal y vertical; las cuales poseen un mecanismo de acción para envasado bastante práctico, lo cual hace que sean más comerciales, (ver Anexo No.1).

Las máquinas existentes en ILE son de desplazamiento horizontal en su mayor parte. Inicialmente estas fueron adquiridas con un mecanismo que le permitiera envasar productos en polvo, sin embargo surgió la necesidad de envasar productos en pasta; provocando que se deba cambiar el sistema de dosificado, arrastre del material y de envoltura, por uno que permitiera trabajar con la elaboración de productos en pasta; su parte interna mantiene un eje de movimientos brindado por un moto reductor de 1.5 Hp, el cual transmite todos los movimientos a los demás mecanismos. A continuación, se explicarán más detalladamente las características de los principales componentes de las máquinas Roure.

##### **2.1.1.1. Tolva**

En este componente, perteneciente al Sistema de alimentación y empaque, es donde se deposita todo el producto que se va a envasar, el producto a depositar es en pasta y puede ser de diferentes características según lo determine el departamento de producción. Esta tolva está fabricada de acero inoxidable austenítico AISI 304 el cual asegura una gran resistencia ante la corrosión garantizando la esterilización de los alimentos (ver Anexo No.1).



#### **2.1.1.2. Sistema de dosificado**

Este mecanismo se encarga de introducir en la bolsa la cantidad correcta de producto en pasta; todo este mecanismo está compuesto por diferentes componentes como son:

- Bomba
- Cilindros neumáticos
- Tolva
- Pistón
- Caja de centrado
- Excéntrica
- Boquilla de anti goteo

El accionamiento armónico de todos estos componentes generan la dosificación y la cantidad exacta del producto. Dicho movimiento es transmitido por el árbol de levas; al mismo tiempo por sensores inductivos que dan la señal a las electroválvulas proporcionando la conmutación a los cilindros neumáticos que accionan todo el mecanismo de dosificado (ver Anexo No.1).

#### **2.1.1.3. Sistema neumático**

Este sistema es el encargado de recibir las señales eléctricas brindadas por los sensores ubicados en diferentes componentes de las máquinas. Cuando las electroválvulas reciben esta señal se acciona el sistema neumático de la máquina que brinda diferentes movimientos aplicados a cada uno de los mecanismos (ver Anexo No.2).

#### **2.1.1.4. Sistema de arrastre**

Básicamente está compuesto por dos partes esenciales:1) el arrastre anterior, y 2) el arrastre posterior; pero también está accionado por otro mecanismo llamado desbobinador. Todo en conjunto origina un desplazamiento horizontal del material de envoltura del producto; además posee una parte neumática compuesta por dos cilindros de este tipo, los cuales actúan de sujetadores, llamándose pinzas de arrastre, permitiendo en una manera coordinada y precisa el avance del material hacia las cuchillas (ver Anexo No.1).



#### **2.1.1.5. Árbol de Levas**

Este mecanismo es el más grande de la máquina y está compuesto por:

- Mecanismo de palancas
- Sistema de muelles y resortes
- Rodamientos
- Moto reductor

El árbol de levas es el encargado de transmitir todos los movimientos a todos los demás mecanismos ubicados en la parte anterior de la máquina, el movimiento de las levas en forma circular y la acción a las palancas con los rodamientos. En sentido general, cumple la función de brindar un movimiento sincronizado de todos sus mecanismos (Ver Anexo No.3).

#### **2.1.1.6. Sistema de accionamiento de las cuchillas**

Este sistema, perteneciente al mecanismo de corte, está compuesto por un par de cuchillas, dos medios engranajes, un brazo y un mecanismo de leva. La leva, a través de su perfil, es la que brinda el movimiento de impulso y corte hacia las cuchillas que están sujetas al mecanismo de corte, transmitiendo el movimiento y la acción de corte semejante a unas tijeras de peluquero en posición perpendicular. El sistema de trabajo de las cuchillas realiza la acción de corte, lo que propicia que los sobres ya sellados se dividan de una manera unitaria para su empacamiento.

Durante su fabricación son sometidas a varias operaciones como son: corte, punzonado, rebabado, planicidad, marcaje, varias operaciones de fresado, enderezado, y rectificado (Ver Anexo No.4).

Estas cuchillas deben poseer una alta calidad de fabricación, fundamentalmente de sus propiedades mecánicas, ya que en sus condiciones de trabajo éstas juegan un papel fundamental. Estas propiedades se conseguirían en gran medida con un tratamiento térmico óptimo. Una cuchilla de baja dureza dura poco debido a la deformación plástica y el desgaste del filo, pero una de dureza muy alta entonces posee elevada fragilidad; por lo tanto es de gran importancia garantizar





el necesario compromiso de las propiedades de las cuchillas mediante un régimen de tratamiento térmico que garantice las propiedades requeridas, como es el caso de su resistencia en condiciones de cargas dinámicas, suficiente plasticidad, alto límite de elasticidad y fatiga.

## **2.2. Mantenimiento de las envasadoras**

Debido al largo tiempo de vida de las máquinas envasadoras Roure así como el alto período de trabajo que desempeñan, se realizan operaciones de mantenimiento constante y se acostumbra a hacerlo con una frecuencia semanal. Este consiste en limpiar todo el sistema de alimentación y empaque, y la limpieza del árbol de levas. Esto implica no sólo la limpieza sino una revisión del estado de las piezas que componen la máquina, así como la lubricación y engrase de sus componentes; de manera que estas máquinas queden puestas a punto para trabajar al día siguiente.

## **2.3. Tratamientos térmicos convencionales volumétricos**

### **2.3.1. Recocido**

Se le llama así al tratamiento que se confiere a un acero al calentarlo a una temperatura algo inferior a  $A_{c1}$ , o superior a  $A_{c1}$  o  $A_{c3}$ , seguido de un mantenimiento de ésta y un posterior enfriamiento que garantice la aparición de una estructura de equilibrio.

Esta estructura debe estar compuesta por perlita, en ocasiones acompañada de fases en exceso como son la ferrita y la cementita en los aceros hipo o hipereutectoides respectivamente, o bien de carburos o compuestos intermetálicos, en otros.

La dureza alcanzada después del recocido deberá oscilar entre 130-250 HB, en dependencia del tipo de acero.

En general, el recocido se lleva a cabo:

- a) Para eliminar un sobrecalentamiento que haya provocado la aparición de estructuras indeseables, como la *Widmanstaetten*.
- b) Para esferoidizar la cementita.



- c) Para homogeneizar una estructura.
- d) Para mejorar un acero deformado en frío o propiciar la maquinabilidad de un acero.
- e) Para eliminar defectos estructurales posteriores a un proceso de soldeo.

### **2.3.2. Normalizado**

Se llama normalizado al proceso en que un acero es calentado hasta una temperatura superior en 50 o 60 °C a  $A_{c3}$  en los aceros hipoeutectoides, y superiores en 50-60 °C a  $A_{c1}$  en los aceros hipereutectoides, es mantenido a estas temperaturas y enfriado posteriormente al aire, alcanzando una estructura de tipo sorbítica a causa de una velocidad de enfriamiento mayor que en el recocido.

El normalizado se lleva a cabo en los aceros al carbono y aleados y en estos últimos, como en el caso del recocido, es seguido de un revenido alto con el fin de eliminar la austenita retenida y mejorar las propiedades mecánicas.

Los objetivos del normalizado son, entre otros:

- a) Modificar la estructura granular gruesa en lingotes y piezas fundidas, así como eliminar la estructura Widmanstaetten;
- b) Disminuir las tensiones producidas después de un proceso de forja, aumentando las propiedades mecánicas, en especial las plásticas del material.
- c) Preparar la estructura de un metal con el fin de recibir un tratamiento posterior de temple y revenido.

### **2.3.3. Temple**

Se llama así a la operación que consiste en calentar el acero a una temperatura superior a  $A_{c3}$ , (si es, hipoeutectoide) y superior a  $A_{c1}$  (si es hipereutectoide), con un mantenimiento a esta temperatura y un posterior enfriamiento con una velocidad tal que asegure la transformación martensítica en el material. Después del temple cambia significativamente la microestructura, las propiedades mecánicas (resistencia, dureza, tenacidad), las propiedades químicas (homogeneidad, resistencia a la corrosión), y las propiedades físicas (permeabilidad magnética, fuerza cohercitiva) del acero.



En virtud de que el cumplimiento del objetivo planteado en el presente trabajo ha de cumplirse utilizando procesos de temple, a continuación se realizará un análisis más detallado de este tipo de tratamiento para establecer algunos fundamentos necesarios a comprender y a aplicar durante las operaciones que por su similitud con las operaciones que incluyen la propuesta tecnológica del trabajo, son necesarias de análisis (Ver Anexo No.5).

En los procesos de temple se consiguen diferentes velocidades de enfriamiento, en dependencia del medio utilizado, sin embargo, conviene aplicar la mínima velocidad de temple en el intervalo de temperaturas entre 300 y 200 °C, por ser este donde ocurren las transformaciones martensíticas durante el temple. Así se obtendría una pieza con el mínimo de tensiones residuales y por lo tanto, se disminuye la posibilidad de agrietamiento. En la Tabla No.1. se muestran las velocidades de enfriamiento para diferentes medios en diferentes rangos de temperatura

**Tabla No.1.** Velocidades de enfriamiento en diferentes medios para diferentes rangos de temperatura

Medio de enfriamiento	Velocidad de enfriamiento (°C/seg) en intervalo de temperatura	
	650-550 °C	300-200 °C
Agua a 18 °C	600	270
25 °C	500	270
50 °C	100	270
75 °C	30	200
Solución en agua a 18 °C de		
10 % de NaOH	1 200	300
10 % de NaCl	1 100	300
Agua destilada	250	200
Agua jabonosa a 18 °C	30	200
Aceite mineral de máquina	150	30
Aceite de transformador	120	25
Emulsión de agua en aceite	70	200
Aleación de 75 % de Sn +		
25 % de Cd (tf = 175 °C)	450	50
Mercurio	500	130
Sal fundida con 10 % de agua	315	-
Placa de hierro	35	15
Placa de cobre	60	30



#### **2.3.4. Aspectos prácticos del enfriamiento en el temple**

El medio de enfriamiento ideal sería aquel que produjera una velocidad de enfriamiento enérgica en la zona de 650-500 °C y un enfriamiento menos enérgico en la zona de transformaciones martensíticas (entre 300 y 200 °C). Sin embargo, en la práctica, no se encuentra un medio que reúna estas cualidades. Para cumplir con este régimen de enfriamiento se usan dos medios distintos que presenten regímenes de enfriamiento diferentes a distintas temperaturas.

Uno de los métodos más usados es temple en dos medios, consistente en el enfriamiento en agua y aceite (en ese orden). Primeramente en el agua, que como se observa en la Tabla No.1. presenta un enfriamiento enérgico en la zona entre 650 y 500 °C y unos segundos después en aceite, el que posee características de enfriamiento lento en la zona de 300-200 °C. Con esto se logra un régimen de enfriamiento similar al analizado para un medio ideal.

La dificultad de este método estriba en el momento de pasar la pieza del agua al aceite, ya que una demora en el agua puede originar la transformación martensítica con una velocidad de enfriamiento enérgica y no eliminar las tensiones internas; por otra parte, pasar la pieza al baño de aceite antes de tiempo, puede provocar la aparición del conglomerado ferrito-cementítico con la consiguiente disminución de dureza.

Varias reglas prácticas son aplicables; sin embargo el mejor control consiste en probar varias piezas con diferentes tiempos de mantenimiento en uno y otro medio, hasta encontrar el régimen óptimo. Esto sólo es posible cuando se va a tratar un número grande de piezas. Si por el contrario, el número de piezas a tratar es muy pequeño o se quiere tratar sólo una, puede tomarse como norma pasar la pieza al aceite cuando no se sientan vibrar las tenazas del soporte con que se introdujo la pieza en el agua. Esto es señal de que el agua alrededor de la pieza ha cesado de ebullición. Otra regla a aplicar es mantener la pieza en el agua a razón de 1 seg. Por cada 5 o 6 mm de espesor de la pieza tratada.

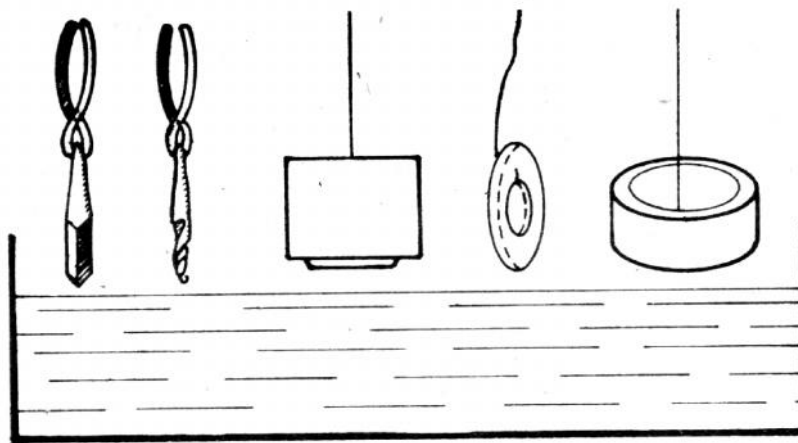
En el temple de piezas de gran sección, es muy usado el método de enfriamiento interrumpido. Este método consiste en introducir la pieza en el baño



(generalmente con un diferencial o equipo similar) durante algunos minutos y entonces volverla a sacar al aire, repitiendo esta operación algunas veces. De esta forma se logra, al sacar la pieza al aire, que la parte central de esta pierda calor lentamente hacia la superficie que ha sido más violentamente enfriada, y se obtenga un equilibrio gradual de temperatura. De esta forma las tensiones internas se ven notablemente disminuidas.

Con el fin de aliviar las tensiones internas, es de gran importancia la forma en que las piezas son introducidas en el baño. Con la ayuda de la Fig.No.1. se recomiendan las siguientes reglas generales:

- a) Las piezas formadas por secciones de diferentes dimensiones, deben ser sumergidas en el baño, introduciendo la sección mayor primero.
- b) Las piezas largas y finas deben ser sumergidas en forma estrictamente vertical, con el fin de evitar que se pandeen.
- c) Las piezas finas de forma circular (como discos) deben ser introducidas con el canto perpendicular al baño.



**Fig. No.1.** Forma correcta de Introducir diferentes piezas en el medio de enfriamiento.

- d) Las piezas gruesas de forma circular deben introducirse con su eje perpendicular a la superficie del baño.
- e) Las piezas con superficies cóncavas deben ser introducidas con la concavidad hacia arriba de no ser así, se formaría una capa de vapor en esta parte, que



evitaría que esta zona se templara adecuadamente.

Además de cumplir estas reglas, deben taponarse con asbesto los agujeros pequeños que aparezcan en las piezas a templar. A pesar de seguirse estas reglas, generalmente aparecen distorsiones en las piezas que pueden ser eliminadas después del tratamiento en prensas o equipos similares o con la utilización de dispositivos como mordazas para impedir el alabeo de las piezas, sobre todo, aquellas de secciones pequeñas, como las cuchillas de ILE.

Es necesario considerar, además, los defectos más comunes que puedan aparecer después de las operaciones de temple para establecer medidas de control que permitan evitar su aparición o minimizarlos. En la Tabla No.2. se muestra un resumen de los defectos más comunes que se producen en el temple de un acero, sus posibles formas de detección, posibles causas y soluciones.

**Tabla No.2.** Resumen de los defectos más comunes que se producen en el temple de un acero señalando su detección, causas y soluciones

<b>Defectos</b> <b>(1)</b>	<b>Detección</b> <b>(2)</b>	<b>Causas</b> <b>(3)</b>	<b>Soluciones</b> <b>(4)</b>
Grietas	Inspección visual y detector de grietas de diferentes tipos	Tensiones causadas estructuradas por cambios estructurales	Es irreparable. Medios preventivos: 1) Usar temple en dos medios 2) Evitar ángulos agudos y cambios de sección violentos
Baja dureza	Ensayo de dureza	Temperatura de temple baja, o poco mantenimiento o poca velocidad de enfriamiento.	Debe normalizarse la pieza y ser tratada de nuevo correctamente.
Fragilidad, estructura granular grosera	Inspección visual en fractura. Ensayo de Impacto	Alta temperatura de temple o mantenimiento muy prolongado	Normalizar la pieza y tratarla correctamente
Puntos blandos	Ensayo de dureza en varios puntos	Enfriamiento inadecuado descarburación contaminación del acero con escoria. Contacto entre pieza	El efecto es corregible excepto en el caso de descarburación. Proceder igual que los casos anteriores
Deformación	Control de dimensiones	Transformaciones estructurales o información incorrecta en el medio de enfriamiento.	Es irreparable. Para prevenirlo debe prepararse el acero y dar tratamiento adecuado.
Oxidación o descarburación	Inspección, en el caso de oxidación y ensayo de dureza en el de descarburación	Reacción entre la atmósfera y el acero	Si la profundidad es mayor que la permisible para ser rectificad el defecto, es irreparable. Para prevenirlo; debe usarse atmósfera controladas o baños de sales.



Tabla No. 2. Continuación.../

(1)	(2)	(3)	(4)
Grano grosero. Fractura en forma de hojuelas características en acero de corte rápido con diámetros superiores a 12 mm.	Inspección visual. Ensayo de impacto.	Recocido a altas temperaturas. Temple repetido omitiendo el recocido intermedio.	Corrección: 1) Calentar a 1140 hasta 1600 °C manteniéndola 3 a 8 min, enfriar a 800-720 °C manteniéndola 15 – 30 min enfriar al aire. 2) Repetir la operación anterior. 3) Normalizar. 4) Temple y revenido

## 2.4. Revenido

Se llama así al tratamiento térmico que consiste en calentar un acero templado hasta temperaturas inferiores a  $A_{c1}$ , mantenerlo a esa temperatura y enfriarlo al aire (siempre que el acero no presente tendencias a la fragilidad del revenido, en cuyo caso se enfriará en un medio más energético).

Después del temple, los aceros presentan un cierto estado tensional a causa de las transformaciones martensíticas, que son indeseables. Por otra parte, la estructura no es homogénea, por tener el acero alguna austenita retenida; además, la dureza puede no alcanzar su máximo valor y el acero presentarse muy frágil. La microestructura de los aceros hipoeutectoides está compuesta de martensita y austenita retenida, y la de los hipereutectoides, de martensita, cementita y otros carburos y austenita retenida.

La estructura del acero templado es metaestable y tiende a variar con el tiempo, lo que provoca, en ocasiones, la aparición de grietas como resultado de las transformaciones. Es por ello que el revenido es una operación obligada para los aceros templados, y debe ejecutarse inmediatamente después del temple.

El objetivo fundamental del revenido es obtener una microestructura y propiedades óptimas para el funcionamiento de la pieza. Como consecuencia del revenido ocurre, además, una disminución de las tensiones en el material, una estabilización de la estructura, sus medidas y propiedades.

El proceso durante el cual un material con estructura metaestable tiende a buscar una estructura estable, es llamado envejecimiento. Si este proceso es provocado



aumentando la energía interna del material, el proceso se llama *envejecimiento artificial*. Si por el contrario, el proceso ocurre espontáneamente, se llama *envejecimiento natural*. El concepto de revenido y envejecimiento artificial en ocasiones coinciden, aunque por lo general, se llama envejecimiento al tratamiento de este tipo que se realiza sobre las aleaciones no ferrosas.

#### 2.4.1. Influencia del revenido en las propiedades mecánicas del acero

Las transformaciones estructurales que se llevan a cabo en los aceros durante el revenido son acompañadas de una variación en sus propiedades mecánicas. A medida que aumenta la temperatura del revenido, la dureza disminuye, sólo en los aceros con altos porcentajes de carbono se observa un ligero aumento en la dureza a 100 °C, lo que se explica por la transformación de la austenita retenida en martensita.

Igualmente, durante el revenido, varían la resistencia mecánica y la plasticidad de los aceros. En la Tabla No.3. Se dan algunos valores al respecto.

**Tabla No.3.** Propiedades mecánicas del acero AISI 420 después de un temple en agua a 850 °c y un revenido a diferentes temperaturas

Temperatura de revenido	HB	$\tau_b$ (Kg / mm <sup>2</sup> )	$\tau_{un}$ (Kg / mm <sup>2</sup> )	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	$a_k$ (Kg-m/cm <sup>2</sup> )
250	532	120	140	3	6	1
400	504	100	120	6	20	2
550	475	60	80	12	45	6
650	466	45	65	^	55	10

Como se puede observar en la tabla No.3, a medida que aumenta la temperatura de revenido, disminuye la resistencia del acero y aumenta la plasticidad y resistencia al impacto. Sin embargo, en los aceros al carbono en el intervalo entre 200 y 400 °C ocurre una disminución en la resistencia al impacto llamada fragilidad de primer género (irreversible) y en los aceros aleados -especialmente con cromo, manganeso y níquel- aparece también una disminución de la resistencia al impacto en intervalos entre 400 y 600 °C, seguidos de un enfriamiento al aire, lo que se conoce como fragilidad de segundo género (reversible). A continuación, se analizarán ambos fenómenos.





#### **2.4.2. Fragilidad del revenido**

Como quiera que la temperatura de revenido está siempre por debajo del punto crítico Ac1 (721 °C), es de esperar que desde la temperatura de revenido, no se produzca durante el enfriamiento una modificación de la estructura independientemente de la velocidad a la que tenga lugar este enfriamiento. Con miras a una eliminación lo más elevada posible de las tensiones en las piezas, es conveniente realizar un enfriamiento lento. Pero en la práctica se ha visto muchas veces que por un enfriamiento lento desde la temperatura de revenido se obtienen tenacidades en el acero en particular, resiliencias, mucho más bajas que en los enfriados rápidamente, por ejemplo, en agua. No obstante, los aceros enfriados de esta forma acusan también disminución de la resiliencia si la temperatura de revenido ha estado en un determinado intervalo de temperaturas de 450 a 600 °C. Los aceros que experimentan semejantes disminuciones de tenacidad en el enfriamiento lento o después del revenido a determinadas temperaturas, se dice que son propensos a la «fragilidad de revenido».

En la fragilidad debida al revenido es importante que pueda volver a eliminarse por revenidos a temperaturas por debajo de 721 °C, por ejemplo a 600 °C, seguidos de enfriamiento rápido. De todos modos, si desde esta temperatura de revenido se enfría lentamente, volvería a aparecer la fragilidad de revenido. A temperaturas más altas, pero todavía por debajo de Ac1, por ejemplo 700 °C, y a medida que sube la temperatura cada vez se pone menos de manifiesto el fenómeno de fragilidad, es decir, que se enfríe despacio o de prisa, las resiliencias no serán ya tan diferentes. En este caso ya no se puede hablar de una típica fragilización por revenido con enfriamiento lento.

La fragilidad de revenido no es, sin embargo, una acritud general del acero. Hay que tener en cuenta que, durante el ensayo estático de tracción, por lo regular no influye en los valores tecnológicos tales como resistencia a la tracción y límite de fluencia, así como en los valores de deformabilidad plástica expresada por el alargamiento y la estricción. De todos modos, esto es válido únicamente cuando los valores proceden de los ensayos de tracción corrientes realizados a temperatura ambiente. Pero si se hace el ensayo a temperaturas más bajas,



puede producirse también en este caso una disminución del alargamiento o la estricción si la carga es aplicada a poca velocidad (ensayo estático). Pero a temperatura ambiente existe una notable diferencia en el trabajo admitido en el ensayo de tracción, independientemente de que la carga se aplique lentamente (trabajo admitido alto) o bruscamente (bajo).

La fragilidad de revenido o la propensión a la misma depende sensiblemente de la composición del acero. En aceros al carbono la fragilidad máxima adquirida es, a veces, muy pequeña y depende sustancialmente del contenido en fósforo. En los aceros aleados depende principalmente del contenido en manganeso y fósforo, así como de cromo. El níquel no tiene efecto fragilizante, pero en este caso hay aumento de fragilidad cuando existe manganeso y cromo al mismo tiempo. El vanadio es, desde luego, el de mayor efecto. Este se manifiesta acusadamente, sobre todo, en los aceros aleados al manganeso-vanadio. Por adiciones de molibdeno en contenidos de 0,2 hasta aproximadamente 0,5%, así como de volframio en contenidos de más del 1 %, se reduce considerablemente la fragilidad de revenido del acero.

En los aceros manganeso-vanadio muy susceptibles, un contenido del 0,2% de molibdeno tiene ya un efecto muy favorable en la disminución de la fragilidad de revenido. Sin embargo, a altas temperaturas de revenido se puede observar también, en el caso de los aceros aleados con molibdeno o con volframio, fragilización cuando el tiempo de tratamiento es muy largo. Así, pues, por adición de estos elementos de aleación no se produce una eliminación propiamente dicha de la propensión a la fragilidad de revenido, sino únicamente un desplazamiento de esta propensión hacia tratamientos con temperaturas más altas y tiempos más prolongados. En los tratamientos de revenido corrientes, la adición de molibdeno (o de volframio) no supone en la práctica una seguridad suficiente contra la fragilidad de revenido.

Como quiera que también el nitrógeno favorezca probablemente la propensión a la fragilidad de revenido, el procedimiento de elaboración de acero tiene que ejercer cierta influencia, naturalmente en combinación con el contenido de fósforo,



así como en los demás elementos concomitantes (manganeso y vanadio, molibdeno y cromo procedentes de la chatarra). No obstante, el proceso que motiva en el material durante el enfriamiento lento desde la temperatura de revenido y provoca la fragilidad, todavía no se conoce exactamente. Para evitar la fragilidad de revenido puede tomarse en la práctica las siguientes medidas:

1. Si se trata de aceros susceptibles al revenido, debe evitarse las temperaturas de revenido en la zona de fragilidad, siempre que esto sea compatible con los valores tecnológicos requeridos.
2. Los tiempos de austenización en las proximidades de la zona peligrosa deben ser lo más cortos posible.
3. A temperaturas de revenido por encima de la zona peligrosa, debe acelerarse el enfriamiento desde la temperatura de revenido, incluso enfriando en agua.
4. Si se emplean aceros aleados con manganeso o con manganeso-cromo, se dará preferencia a calidades a las que se les ha añadido molibdeno.

### **2.5. Aspectos prácticos del tratamiento térmico**

En dependencia de la forma de las piezas, la posición de estas dentro del horno es variable. El objetivo fundamental que se persigue con esta variación en la posición de unas piezas con respecto a otras, es mejorar las condiciones de transferencia de calor, disminuyendo el tiempo de calentamiento y aumentando notablemente la productividad del proceso.

La disposición está en función de la forma de la pieza y del número de ellas. Si la pieza tratada es una sola, debe ser colocada sobre un soporte metálico, ya que de esta forma se aprovecha la conductividad térmica del metal de soporte, que es superior a la del piso de la cámara del horno. Con ello se consigue disminuir el tiempo de calentamiento a un mínimo.

Este sistema se emplea cuando la pieza descansa sobre un área determinada. Si, por el contrario, el contacto de la pieza con el horno se establece en una línea o un punto, no es necesario emplear el soporte metálico, ya que este no influye en el tiempo de calentamiento. Por otra parte, si la pieza es un rectángulo, deberá



colocarse con el lado menor (de menor área) en contacto con el soporte metálico.

A continuación se analizará la disposición en el caso de que el número de piezas tratadas sea mayor que la unidad.

Si la forma de las piezas es la de un rectángulo o un cilindro, el calentamiento más rápido se produce cuando la distancia entre las piezas es dos veces el ancho o diámetro de estas; sin embargo, aunque esta distancia es 0,5 veces el ancho o diámetro, el tiempo de calentamiento aumenta en un 25 o 40 % respectivamente. Es esta la distribución más recomendable, ya que también el número de piezas a tratar aumenta como resultado de la ganancia de espacio en el horno, y este compensa con creces el aumento de tiempo producido. Si las piezas tratadas fueran esféricas, la separación de las piezas puede ser reducida a cero.

### **2.5.1. Calentamiento de las piezas**

Las piezas al ser calentadas en un medio cualquiera, se ven sometidas a diferentes regímenes térmicos. Estos regímenes pueden ser más o menos violentos en dependencia del medio de calentamiento utilizado. Este medio podría ser una atmósfera gaseosa que a su vez sea calentada por una combustión de gases, por resistencia eléctrica o un medio líquido cualquiera.

Las piezas calentadas se pueden introducir en los medios de calentamiento en formas diferentes, en dependencia de las cuales, las tensiones Internas que se producen en el material, debidas a cambios volumétricos al variar las estructuras, así como a los gradientes de temperatura que se producen en distintos puntos de la pieza en cuestión, pueden ser mayores o menores. Estas tensiones internas creadas pueden llegar a ser tan grandes que causen deformaciones, grietas o rotura en las piezas; de ahí la importancia de seleccionar un régimen óptimo que satisfaga esta condición y permita optimizar el tiempo de calentamiento.

Por otra parte, la forma en que se calienta la pieza es función también de lo que se puede llamar la fuente de calor, o sea, la forma en que el calor necesario es generado. Esto hace que la forma en que se produce la transferencia de calor del medio a la pieza varíe, lo cual tiene ciertas implicaciones en el tiempo de



calentamiento

## **2.5.2 Métodos de calentamiento**

Las piezas pueden ser introducidas en los hornos en formas variadas para obtener gradientes de temperatura tales que no provoquen grandes tensiones en ellas y para lograr un tiempo mínimo adecuado de calentamiento. El sistema utilizado dependerá de muchos factores que son, entre otros, la conductividad térmica del material (que a su vez es función de su composición química), la conductividad térmica del medio, la forma, tamaño y complejidad de la pieza, etcétera.

### **2.5.2.1. Introducción de la pieza con el horno a la temperatura de tratamiento seleccionada**

En este tipo de calentamiento, el horno está a la temperatura deseada y en ése momento se introduce la pieza en él. Esta forma de calentamiento se lleva a cabo tanto en hornos de cámara como en hornos de baños de sales; se utiliza para aceros al carbono y aceros de baja y media aleación que no presenten una conductividad térmica muy baja. Además, las piezas para ser tratadas según este régimen tecnológico, no deben presentar gran complejidad en su configuración.

El tiempo de calentamiento empleado con este sistema es mínimo, aunque en la pieza aparecen gradientes térmicos grandes y de ahí que se emplee sólo en los casos antes citados. Además, desde un punto de vista tecnológico, este sistema presenta algunas ventajas, como son una menor oxidación y descarburización de la pieza, un menor crecimiento del grano y una mayor productividad y menor consumo de energía en el horno.

### **2.5.2.2. Introducción de la pieza con el horno a una temperatura superior a la temperatura de tratamiento**

En este sistema de calentamiento se disminuye notablemente el tiempo empleado en la operación. Los hornos en que generalmente se utiliza este tipo de calentamiento son los hornos de sales, con un control adecuado de temperatura que permita, después de introducir la pieza, disminuirla progresivamente hasta alcanzar temperatura de tratamiento deseada. Los gradientes térmicos que se



producen en este sistema son superiores a los del sistema anterior, de ahí que los aceros utilizados deben ser sólo los aceros al carbono y de muy baja aleación y las piezas de una configuración muy simple.

### **2.5.2.3. Introducción de la pieza para ser calentada conjuntamente con el horno**

En este sistema el tiempo de calentamiento es superior al de los sistemas explicados, sin embargo, el gradiente térmico es ínfimo, por ello es que este sistema prefiere para aquellas piezas de grandes masas, configuraciones muy complejas y fabricadas de acero con una conductividad térmica muy baja, como son los aceros altamente aleados.

Al aumentar el tiempo de calentamiento empleado, se incrementan los costos operacionales, debido a un mayor gasto de energía y a una disminución de la productividad en el equipo.

### **2.5.6. Introducción de la pieza en el horno a una temperatura inferior a la de tratamiento, con un calentamiento conjunto posterior hasta esa temperatura**

Este sistema es conocido como calentamiento escalonado. Debido a que las piezas, al ser calentadas, presentan una peligrosidad mayor de rotura por tensiones internas en la zona de los esfuerzos elásticos. No es conveniente que se produzca un gradiente térmico muy grande en ella cuando estos esfuerzos tienen lugar, ya que pudieran provocarse grietas u otros defectos. Por ello en algunas piezas de configuración compleja, de grandes cambios de sección de aceros al carbono o aleados puede utilizarse este sistema de calentamiento que si bien no es el que provoca los gradientes térmicos más bajos, si los disminuye, a la vez que acorta el tiempo total empleado con relación al sistema visto anteriormente.

Debe tenerse presente que en la zona entre 500 y 600°C es donde el acero presenta mayor peligrosidad de rotura por calentamiento, ya que presenta grandes propiedades elásticas y un decrecimiento notable en sus esfuerzos últimos de rotura y fluencia.



## 2.6. Aceros aleados

Se da el nombre de aceros aleados a los aceros que además de los cinco elementos: carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre, contienen también cantidades relativamente importantes de otros elementos como el cromo, níquel, molibdeno, etc., que sirven para mejorar alguna de sus características fundamentales. También puede considerarse aceros aleados los que contienen alguno de los cuatro elementos diferentes del carbono que antes se han citado, en mayor cantidad que los porcentajes que normalmente suelen contener los aceros al carbono y cuyos límites superiores suelen ser generalmente los siguientes: Si=0.50%; Mn=0.90%; P=0.100% y S=0.100%.

Los elementos de aleación que más frecuentemente suelen utilizarse para la fabricación de aceros aleados son: níquel, manganeso, cromo, vanadio, wolframio, molibdeno, cobalto, silicio, cobre, titanio, circonio, plomo, selenio, aluminio, boro y niobio.

La influencia que ejercen estos elementos es muy variada y empleados en proporciones convenientes, se obtiene aceros con ciertas características que, en cambio, no se pueden alcanzar con los aceros ordinarios al carbono.

Utilizando aceros aleados es posible fabricar piezas de gran espesor, con resistencias muy elevadas en el interior de las mismas. En elementos de máquinas y motores se llegan a alcanzar grandes durezas con gran tenacidad de esta forma es posible fabricar mecanismos que mantengan elevadas resistencias, aún a altas temperaturas. Hay aceros inoxidable que sirven para fabricar elementos decorativos, piezas de maquinas y herramientas, que resisten perfectamente a la acción de los agentes corrosivos. Es posible preparar troqueles de formas muy complicadas que no se deformen ni agrieten en el temple.

En los aceros aleados hay tendencia de ciertos elementos a disolverse en la ferrita o formar soluciones sólidas con el hierro alfa y otros, que en cambio, tienen tendencia a reaccionar químicamente con el carbono u otros elementos presentes



en la aleación para formar carburos u otros compuestos.

Los elementos de aleación también ejercen influencia en los diagramas de equilibrio de los aceros a través de las siguientes formas: elevación o descenso de las temperaturas críticas de los diagramas de equilibrio y las temperaturas Ac y Ar correspondientes a calentamientos y enfriamientos relativamente lentos, modificaciones en el contenido de carbono del acero eutectoide, tendencia a ensanchar o disminuir los campos austeníticos o ferríticos correspondientes a los diagramas de equilibrio, y otras influencias también relacionadas con el diagrama hierro-carbono, como la tendencia a grafitizar el carbono, a modificar el tamaño del grano, etc.

Otra de las influencias de los elementos aleantes del acero es sobre el incremento de la templabilidad y a retardar el ablandamiento que se produce en el revenido.

Existen otras influencias diversas, como mejoras en la resistencia a la corrosión, resistencia al calor, resistencia a la abrasión, etc., las cuales se deben directa o indirectamente a alguna de las variaciones o fenómenos citados anteriormente.

### **2.6.1. Clasificación de los aceros aleados de acuerdo con su utilización**

En sentido general, los aceros suelen clasificarse en tres grandes grupos, según su utilización:

#### **Aceros en los que tiene una gran importancia la templabilidad:**

1. Aceros de gran resistencia
2. Aceros de cementación
3. Aceros de muelles
4. Aceros indeformables

#### **Aceros de construcción:**

1. Aceros de gran resistencia
2. Aceros de cementación
3. Aceros para muelles
4. Aceros de nitruración
5. Aceros resistentes al desgaste





6. Aceros para imanes
7. Aceros para chapa magnética
8. Aceros inoxidables y resistentes al calor

#### **Aceros de herramientas:**

1. Aceros rápidos
2. Aceros de corte no rápidos
3. Aceros indeformables
4. Aceros resistentes al desgaste
5. Aceros para trabajos de choque
6. Aceros inoxidables y resistentes al calor.

En estas clasificaciones se señalan los aceros aleados de uso más corriente clasificados en tres grupos. Se señalan los dos grupos clásicos de aceros de construcción y de herramientas, y además otro grupo en el que se destaca la importancia de la templabilidad, y en el que se incluyen los aceros de gran resistencia, aceros para muelles, aceros de cementación, etc., que aún perteneciendo a los otros dos grupos, interesa destacar por separado por la gran importancia que en ellos tiene la templabilidad.

### **2.7. Elementos de aleación y su influencia en las propiedades del acero**

#### **2.7.1 Aceros aleados con níquel**

El níquel es un elemento de extraordinaria importancia en la fabricación de aceros inoxidables y resistentes a altas temperaturas, en los que además de cromo se emplean porcentajes de níquel variables de 8 a 20%.

Una de las ventajas más grandes que reporta el empleo del níquel es evitar el crecimiento del grano en los tratamientos térmicos, lo que sirve para producir en ellos gran tenacidad. El níquel, además, hace descender los puntos críticos y por ello los tratamientos pueden hacerse a temperaturas ligeramente más bajas que la que corresponde a los aceros ordinarios. Experimentalmente se observa que con los aceros aleados con níquel se obtiene para una misma dureza, un límite de elasticidad ligeramente más elevado y mayores alargamientos y resistencias que con los aceros al carbono o de baja aleación. En la actualidad se ha restringido



mucho su empleo; pero sigue siendo un elemento de aleación indiscutible para los aceros de construcción empleados en la fabricación de piezas para máquinas y motores de gran responsabilidad destacándose, sobre todo, en los aceros al cromo-níquel y al cromo-níquel-molibdeno.

Los aceros al níquel más utilizados son los siguientes:

a) Aceros al níquel con 2, 3 y 5%. Con 0.10 a 0.25% de carbono se utilizan para cementación, y con 0.25 a 0.40% de carbono para piezas de gran resistencia.

b) Aceros cromo-níquel-molibdeno con porcentajes de níquel variables desde 1 a 5%; con bajos porcentajes de carbono (0.10 a 0.22%) se emplean para cementación y con porcentajes de 0.25 a 0.40% de carbono se emplean para piezas de gran resistencia. En estos aceros los porcentajes de estos elementos aleados suelen estar en relación aproximada de 1% de cromo y 3% de níquel.

c) Aceros de media aleación al níquel-molibdeno y al níquel-manganeso. Se suelen emplear para piezas de gran resistencia y para piezas cementadas con porcentajes de carbono variables de 0.25 a 0.40% en el primer caso y de 0.10 a 0.25% en el segundo, variando el contenido en níquel de 1 a 2%, el de manganeso de 1 a 1.5% y el molibdeno de 0.15 a 0.40%.

d) Aceros inoxidables y resistentes al calor al cromo-níquel, con 8 a 25% de níquel que son de estructura austenítica.

e) Otros aceros de menor importancia son los aceros al cromo-níquel para estampado en caliente y para herramientas.

### **2.7.2. Aceros aleados con cromo**

El cromo es uno de los elementos especiales más empleados para la fabricación de aceros aleados, usándose indistintamente en los aceros de construcción, en los de herramientas, en los inoxidables y los de resistencia en caliente. Se emplea en cantidades diversas desde 0.30 a 30% según los casos y sirve para aumentar la dureza y la resistencia a la tracción de los aceros, mejora la templabilidad,



impide las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste y la inoxidableidad cuando se añade en cantidades superiores al 12%.

Los aceros con cromo de mayor utilidad son:

- a) Aceros de construcción, de gran resistencia mecánica de 0.50 a 1.50% de cromo y 0.30 a 0.45% de carbono, aleados según los casos, con níquel y molibdeno para piezas de gran espesor, con resistencias variables de 70 a 150 Kg/mm<sup>2</sup>.
- b) Aceros de cementación con 0.50 a 1.50% de cromo y 0.10 a 0.25% de carbono, aleados con níquel y molibdeno.
- c) Aceros de nitruración cromo-aluminio-molibdeno.
- d) Aceros para muelles cromo-vanadio y cromo-silicio.
- e) Aceros de herramientas con 0.30 a 1.50% de cromo y 0.070 a 1.50% de carbono. En ellos el cromo mejora la penetración de temple, la resistencia al desgaste, permite el temple en aceite y evita deformaciones y grietas.
- f) Aceros indeformables con 5 a 12% de cromo.
- g) Aceros rápidos y de trabajos en caliente.
- h) Aceros inoxidables martensíticos con 12 y 17% de cromo, aceros austeníticos con 14 a 25% de cromo en cantidades de níquel variables de 8 a 25% y aceros inoxidables con 27% de cromo.

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

### **2.7.3 Aceros aleados con molibdeno**

El molibdeno mejora notablemente la resistencia a la tracción, la templabilidad y la resistencia al creep de los aceros. Añadiendo solo pequeñas cantidades de molibdeno a los aceros al cromo-níquel, se disminuye o elimina casi



completamente la fragilidad, que se presenta cuando estos aceros son revenidos en la zona de 450° a 550°C.

El molibdeno aumenta también la resistencia de los aceros en caliente y reemplaza al wolframio en la fabricación de los aceros rápidos, pudiéndose emplear para las mismas aplicaciones aproximadamente una parte de molibdeno por cada dos de wolframio.

El molibdeno se disuelve en la ferrita, pero tiene una fuerte tendencia a formar carburos. Es un potente estabilizador de los carburos complejos y tiende a retardar el ablandamiento de los aceros durante el revenido.

Los aceros al molibdeno más utilizados son:

- a) Aceros de manganeso-molibdeno, cromo-molibdeno y cromo-níquel-molibdeno de bajo contenido de carbono para cementación, y de 0.15 a 0.40% de carbono para piezas de gran resistencia.
- b) Aceros rápidos con 6 a 10% de molibdeno; son de utilización relativamente parecida a los aceros rápidos al wolframio, pero en ellos el wolframio es sustituido por el molibdeno.
- c) Aceros de 0.50 a 6% de molibdeno que se emplean principalmente para construcciones metálicas, tuberías e instalaciones en refinerías de petróleo, en las que alcanzan temperaturas de 100° a 300°C y deben resistir bien el efecto de esos calentamientos relativamente moderados.

#### **2.7.4 Aceros aleados con Wolframio (tungsteno)**

El Wolframio es un elemento muy utilizado para la fabricación de aceros de herramientas, empleándose en especial en los aceros rápidos, aceros para herramientas de corte y aceros para trabajos en caliente. Sirve para mantener la dureza de los aceros a elevada temperatura y evitan que se desafilen o ablanden las herramientas, aunque lleguen a calentarse a 500° o 600°C. También se usa para la fabricación de aceros para imanes.



El wolframio se disuelve ligeramente en la ferrita y tiene una gran tendencia a formar carburos de gran estabilidad.

Los aceros más utilizados de wolframio son:

- a) Los aceros rápidos con 18% de wolframio y cantidades variables de cromo, vanadio y molibdeno y 0.701% aproximadamente de carbono.
- b) Aceros para trabajos en caliente con 9 a 15% de wolframio y 0.30 a 0.40% de carbono. Para algunos usos de menos responsabilidad se emplean aceros de más baja aleación con 1 a 5% de wolframio.
- c) Aceros para la fabricación de herramientas varias con 1 a 14% de wolframio y otros elementos: cromo, manganeso, vanadio, etc., que se emplean para trabajos de corte.
- d) Aceros inoxidables al cromo-níquel con wolframio, de gran resistencia mecánica a elevada temperatura.

#### **2.7.5. Aceros aleados con vanadio**

El vanadio se emplea principalmente para la fabricación de aceros de herramientas, tiende a afinar el grano y a disminuir la templabilidad. Es un elemento desoxidante muy fuerte y tiene una gran tendencia a formar carburos.

El vanadio tiene una gran tendencia muy fuerte a formar carburos. Por esta razón, basta con añadir pequeñas cantidades y pocos aceros, excepto los de herramientas, contienen más de 0.02% de vanadio. Una característica de los aceros con vanadio es su gran resistencia al ablandamiento por revenido.

Los aceros con vanadio más utilizados son:

- a) Aceros rápidos que suelen contener de 0.50 a 1% de vanadio.
- b) Aceros de herramientas de diversas clases. Para troqueles indeformables, etc., que suelen tener de 0.10 a 0.30% de vanadio.



c) Aceros para muelles al cromo-vanadio.

### **2.7.6 Aceros aleados con manganeso**

El Manganeso está presente prácticamente en todos los aceros debido, principalmente, a que se añade para neutralizar la perniciosa influencia del azufre y del oxígeno, que siempre suelen contener los aceros cuando se encuentran en estado líquido en los hornos durante los procesos de fabricación. El manganeso actúa también como desoxidante y evita, en parte, que en la solidificación del acero se desprendan gases que den lugar a porosidades perjudiciales en el material.

Si los aceros no tuvieran manganeso, no se podrían laminar ni forjar, porque el azufre que suele encontrarse en mayor o menor cantidad en los aceros, formaría sulfuros de hierro, estos sulfuros son cuerpos de muy bajo punto de fusión (981°C aprox.) que funden a las temperaturas de trabajo en caliente (forja o laminación), y al encontrarse contorneando los granos del acero crean zonas de debilidad y las piezas y barras se abren en esas operaciones de transformación.

Los aceros ordinarios y los aceros aleados en los que el manganeso no es elemento fundamental, suelen contener generalmente porcentajes de manganeso variables de 0.30 a 0.80%.

Los aceros al manganeso de uso más frecuente son:

- a) Aceros al manganeso de gran resistencia, que generalmente pertenecen al grupo de aceros de media aleación, en los que al emplearse el manganeso en cantidades variables de 0.80 a 1.60%, con contenidos en carbono de 0.30 a 0.5%, se consigue mejorar la templabilidad y obtener excelentes combinaciones de características mecánicas aún en piezas de cierto espesor.
- b) Aceros indeformables al manganeso con 1 a 3% de Mn y 1% de carbono, aproximadamente, en los que la presencia de un alto porcentaje de manganeso hace posible el temple con simple enfriamiento en aceite o al aire, con lo que las deformaciones de las herramientas son muy pequeñas.



- c) Aceros austeníticos al manganeso con 12% de Mn y 1% de carbono aproximadamente, que a la temperatura ambiente son austeníticos y tienen gran resistencia al desgaste empleándose, principalmente, para cruzamientos de vías, mordazas de maquinas trituradoras, excavadoras, etc.

## **2.8. División Aceros Inoxidables**

Tal como el nombre lo indica, los aceros inoxidables son más resistentes a la corrosión y a las manchas que los aceros al carbono y de baja aleación. Este tipo de resistencia superior a la corrosión se produce por el agregado del elemento cromo a las aleaciones de hierro y carbono.

La mínima cantidad de cromo necesaria para conferir esta resistencia superior a la corrosión depende de los agentes de corrosión. El Instituto Norteamericano de Hierro y Acero (cuyas siglas en inglés son: AISI) ha elegido el 10 por ciento de cromo como la línea divisoria entre aceros aleados y aceros inoxidables, mientras que otros establecen ese límite entre el 10,5% y el 11%. La mayoría de ellos están disponibles en sus formas principales tales como planchas, barras, flejes hojas, planchuelas y tubos.

Según el estado del arte establecido por Velázquez, 2002, en 1912 Harry Brearley, Jefe de Laboratorio Brown-Firth Research en Inglaterra, mientras estaba intentando desarrollar aceros que fueran resistentes a la suciedad y a la corrosión que se producía en los tambores de los revólveres, informó que una composición de un 12,8 por ciento de cromo y 0,24 por ciento de carbón era muy resistente a la corrosión.

Sin embargo, se plantea que oficialmente las aleaciones austeníticas de níquel-cromo-hierro fueron desarrolladas en Alemania durante los años 1909-1912 por Benno Strauss y Edward Maurer (Velázquez, 2002). Los trabajos posteriores realizados por Strauss y otros más recientes condujeron a los aceros versátiles de 18 por ciento de cromo, 8 por ciento de níquel popularmente llamados 18-8 que son tan ampliamente utilizados en la actualidad.



La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable es debida a una delgada película de óxido de cromo que se forma en la superficie del acero. A pesar de ser sumamente delgada ésta película invisible y fuertemente adherida al metal, lo protege contra los distintos tipos de corrosión, renovándose inmediatamente cuando es dañada por abrasión, corte, maquinado, etc.

Las principales ventajas del acero inoxidable son:

- Alta resistencia a la corrosión
- Alta resistencia mecánica
- Apariencia y propiedades higiénicas
- Resistencia a altas y bajas temperaturas
- Buenas propiedades de soldabilidad, mecanizado, corte, doblado y plegado
- Bajo costo de mantenimiento
- Diferentes terminaciones de moderno y agradable aspecto es 100% reciclable.

Como consecuencia del agregado de los elementos cromo, níquel, molibdeno, titanio, niobio y otros, se clasifican distintos tipos de acero inoxidable, cada uno con diferentes propiedades:

1. Aceros inoxidables Austeníticos
2. Aceros inoxidables Ferríticos
3. Aceros inoxidables Martensíticos
4. Aceros inoxidables Dúplex

### **2.8.1. Aceros austeníticos**

Pertenecen a este grupo los aceros inoxidables al cromo-níquel y al cromo-níquel-manganeso, y responden, entre otros, a los tipos 201, 202, 301, 302, 304, 309 y 316. Todos estos aceros son austeníticos, especialmente no magnéticos en estado de recocido y no se endurecen por tratamiento térmico, siendo el contenido total de níquel y cromo por lo menos de un 23%. Se trabajan en





caliente con toda facilidad y pueden trabarse en frío, teniendo siempre presente que con este tipo de trabajo se endurecen rápidamente. Son muy resistentes al choque y difíciles de mecanizar, salvo que contengan azufre y selenio. Estos aceros se caracterizan por ser, de todos los inoxidables, los que presentan mayor resistencia mecánica y a la formación de cascarilla a temperaturas muy elevadas. Asimismo la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables austeníticos es generalmente mayor que la de los aceros martensíticos o ferríticos.

En los aceros inoxidables austeníticos se presenta un fenómeno de corrosión intergranular durante su calentamiento a temperaturas comprendidas entre 420 y 870 °C, ocasionado por la precipitación de carburos en las uniones de cristales. Esta disminución de la resistencia a la corrosión puede evitarse utilizando en cada caso el tipo de acero inoxidable más adecuado o sometiendo al material a un tratamiento térmico apropiado para “estabilizar” la estructura e impedir la precipitación de carburos en los contornos de grano o en sus proximidades.

Estos tipos de aceros son utilizados para la construcción de equipos para la industria química y de la alimentación, utensilios de cocina y aparatos domésticos que no requieren soldaduras en las zonas sometidas a corrosión fuerte. Además admite pulidos con acabados a espejo, por lo que también se usa para ornamentación.

### **2.8.2. Aceros martensíticos**

Son aceros al cromo que suelen contener de 11,5 a 18% de este elemento. Entre los aceros pertenecientes a este grupo se pueden indicar los tipos 403, 410, 416, 420, 440A, 501, 502, siendo todos ellos, los tipos 410, 416 y 420, los más utilizados.

Este tipo de aceros magnéticos, pueden trabajarse en frío sin ninguna dificultad (sobre todo los de bajo contenido de carbono), son de fácil mecanización, presentan buena tenacidad, resisten bien la acción corrosiva de los agentes atmosféricos y de algunos agentes químicos, y se trabajan fácilmente en caliente. La máxima resistencia a la corrosión la alcanzan estos aceros cuando se templean



a las temperaturas recomendadas. Poseen gran dureza cuando se los enfría rápidamente una vez austenizados.

**Composición:**

A. 12 - 14 % de cromo, 0,20 – 0,50% de carbono

Se utilizan principalmente en cuchillería.

B. 16-18% de cromo, 0,60-1; 20% de carbono

Por temple adquieren grandes durezas

Resistentes a la corrosión y al desgaste

Frecuentemente los aceros de este tipo son utilizados para la fabricación de: utensilios domésticos, grifería, ornamentación, cubertería, cuchillería, instrumental quirúrgico, etc.

**2.8.3. Aceros ferríticos**

Este grupo está integrado por los aceros pertenecientes a los tipos 405, 430 y 446. Son aceros al cromo y se caracterizan por no ser tratados térmicamente como los aceros ordinarios, ya que no admiten el temple. Son magnéticos y pueden trabajarse tanto en frío como en caliente, presentando su máxima ductilidad, resistencia a la corrosión y menor dureza posible en estado recocido. Estos aceros presentan a temperaturas elevadas una resistencia menor que los aceros martensíticos; pero su resistencia a la formación de cascarilla y a la corrosión generalmente es mejor. Su estructura es ferrítica a cualquier temperatura (se convierte en estructura austenítica en el calentamiento). El grano no se regenera.

**Composición:**

A. 15-18% de cromo y una máxima de 0,12% de carbono

Resistencia a la corrosión superior a la de los martensíticos

B. 20-80% de cromo y una máxima de 0,35% de carbono

C. Aceros al cromo-aluminio hasta un 4% más resistentes a la oxidación

Son difíciles de soldar y se usan en embutición profunda por su gran ductilidad.



#### 2.8.4. Acero dúplex (ferrito – martensítico)

Estos aceros generalmente presentan alrededor de 13 % de Cr y en algunas ocasiones, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, son aleados con otros elementos tales como el molibdeno, níquel y volframio en cantidades no mayores a un 2 - 3 %. El porcentaje de carbono en estos aceros es variable, y mientras este aumenta, las propiedades mecánicas del acero también aumentan, no así su resistencia a la corrosión y su estabilidad química, ya que al aumentar el porcentaje de carbono hay mayor tendencia a la formación de carburos que, al precipitar y presentarse en la estructura, tienden a la formación de micropares galvánicos que producen la corrosión del acero.

A continuación se relaciona una serie de aceros que presentan estructuras ferrito-martensíticas, según la norma rusa GOST:

Marca	C	Cr	Estructura
1 X 13	0,05-0,14	12-12	Ferrito-martensítica
2X13	0,16-0,24	12-14	Martensítica
3X13	0,25-0,34	12-14	Martensítica
4X13	0,35-0,45	12-14	Ferrítica
X17	0,05-0,12	16-18	Ferrítica
9X18	0,90-1,00	17-19	Martensita de carburos

El acero 1 X 13 se somete a temple y revenido con el fin de aumentar sus propiedades mecánicas. Después de un temple a 1 050-1 100 °C y enfriarlo en aceite, y un revenido a 600-650 °C se obtiene una resistencia de 80 kg/mm<sup>2</sup> y una elongación de un 15 %. Este acero se usa como Inoxidable con bastantes buenas propiedades mecánicas.

Los aceros martensíticos 2X13, 3X13 y 4X13 se templan a 980-1 000 °C enfriado en aceite y con un revenido a 200-250 °C. En estos aceros no debe darse un revenido alto para evitar la transformación de la martensita a un producto ferrito - perlítico que hace disminuir notablemente la resistencia a la corrosión al no ser la estructura homogénea. Estos aceros con el tratamiento antes mencionado



presentan durezas entre 30 y 50 HRC.

El deterioro de estos materiales puede estar ocasionado por disímiles factores, condiciones de trabajo y de cargas como pueden ser: altas temperaturas, corrosión, fatiga y esfuerzos mecánicos varios, entre los que se encuentra el desgaste.

El desgaste de elementos fabricados de aceros inoxidables constituye, por sus efectos técnico-económicos, un foco de atracción de científicos e investigadores debido, esencialmente, a la buena combinación de propiedades mecánicas en un importante intervalo de condiciones. Es por ello que a continuación, se hace análisis pormenorizado del fenómeno del desgaste y sus efectos nocivos sobre las partes y componentes de elementos de máquinas.

## 2.9. Tipos de Desgaste

La existencia de una o mas formas de mecanismos de desgaste da lugar a diferentes tipos de desgaste en los elementos de máquinas. En este sentido, se puede plantear que aún no existe una forma única de designación y clasificación de los tipos de desgaste; por lo que según Martínez, 1990, se puede mencionar algunos tipos de ellos. Entre los más comunes y su incidencia en la industria según estudios realizados por Eyre es la siguiente:

- |                                      |      |
|--------------------------------------|------|
| • Desgaste abrasivo.                 | 50 % |
| • Desgaste adhesivo.                 | 15 % |
| • Desgaste mecánico-corrosivo.       | 5 %  |
| • Desgaste erosivo.                  | 8 %  |
| • Desgaste por oxidación dinámica.   | 8 %  |
| • Desgaste por fatiga y otros tipos. | 14 % |

Es necesario aclarar que en la práctica pueden coexistir dos o más tipos de desgaste y que en determinados momentos uno se puede transformar en otro.



### **2.9.1. Desgaste Adhesivo.**

La naturaleza del desgaste hace que el desgaste adhesivo esté siempre presente en mayor o menor grado en las uniones de rozamiento. En la práctica de ingeniería se conoce también con los nombres de: desgaste por frotamiento, rayado adhesivo, gripado, agarrotamiento o agripamiento. Tales denominaciones se deben a la intensidad del desgaste, estados de las superficies desgastadas y tipos de elementos de máquina.

El desgaste adhesivo está presente en los siguientes elementos de máquinas: cojinetes de deslizamiento; transmisiones por engranes y tornillo sin-fin, guías de deslizamiento, levas, grupos pistón-aro-cilindro, etc. Los factores que definen el desgaste adhesivo son:

- Condiciones de lubricación (seco o lubricado), abastecimiento de lubricante, y calidad del lubricante.
- Compatibilidad metalúrgica (solubilidad mutua) de los materiales de la unión tribológica.
- Microgeometría superficial.
- Condiciones de trabajo: carga, velocidad y temperatura.

#### **2.9.1.1. Tipos de Desgaste Adhesivo.**

##### **2.9.1.1.1. Desgaste adhesivo por pulido o de fricción por cizallamiento**

Se produce cuando la unión adhesiva falla por la interfase no produciéndose prácticamente transferencia de metal y la superficie desgastada aparece pulida. Se presenta en materiales de alto grado de incompatibilidad metalúrgica.

##### **2.9.1.1.2. Desgaste adhesivo superficial**

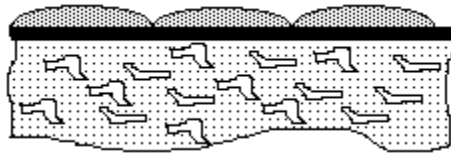
Es característico de pares metálicos con poca compatibilidad metalúrgica sometidos a altas velocidades de deslizamiento (aceros  $V = 3 - 4$  m/s), grandes presiones de contacto y altas temperaturas superficiales ( $T = 1500$  °C). Se produce durante la fricción seca en superficies contaminadas (capas de óxido) y durante la lubricación límite, en este caso son necesarios altas presiones que



destruyen la película límite (carga crítica del lubricante).

El desgaste adhesivo superficial se caracteriza por presentar una superficie con rayas o surcos pocos profundos en dirección del movimiento. (Fig.No.2). con los siguientes parámetros.

- Profundidad de la capa destruida  $h \leq 100 \mu\text{m}$ .
- Tamaño de la partícula de desgaste  $d = 2 - 20 \mu\text{m}$ .
- Razón de desgaste.  $W' = 1 - 5 \mu\text{m}/\text{h}$
- Coeficiente de desgaste  $k = 10^{-4} - 10^{-6}$
- Densidad de energía aparente  $e^* = 10^6 - 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}/$
- Intensidad lineal del desgaste  $lh = 10^{-9} - 10^{-5}$
- Tensión de rotura de la unión  $\tau_{\eta} = 10^3 - 10^{-2} \text{ Mpa}$



**Fig.No.2.** Modelo físico de la superficie desgastada durante el gripado.

### 2.9.1.1.3. Desgaste adhesivo profundo

La ausencia de capa de óxido superficial, superficies pobremente lubricadas; la existencias de superficies no contaminadas; la igualdad de la microgeometría superficial y de composición química; la compatibilidad metalúrgica; las velocidades lentas (aceros  $V < 1\text{m/s}$ ); las altas presiones que superan el límite de fluencia (deformaciones plásticas) son los factores que propician el surgimiento del desgaste adhesivo profundo o atrancamiento.

Este desgaste se caracteriza por presentar una superficie desgastada con surcos profundos. (Fig.No.3). con los siguientes parámetros:



- Profundidad de la capa destruida.  $h \leq 500 \mu\text{m}$ .
- Tamaño de la partícula de desgaste  $d = 20 - 200 \mu\text{m}$ .
- Razón de desgaste  $W' = 5 - 15 \mu\text{m/h}$ .
- Coeficiente de desgaste  $k = 10^{-2} - 10^{-4}$ .
- Densidad de energía aparente  $e^* = 10^4 - 10^1 \text{ N-m/}$
- Intensidad lineal del desgaste  $lh = 10^{-7} - 10^{-3}$
- Tensión de rotura de la unión  $\tau_n = 10^3 - 10^2 \text{ MPa}$



**Fig.No.3.** *Modelo físico de la superficie del desgaste*

### **2.9.2. Desgaste Abrasivo.**

Es el desgaste producido por partículas abrasivas que se deslizan sobre la superficie metálica, produciendo desprendimiento del material, dislocaciones de cristales y rayaduras profundas. Este desgaste se pone de manifiesto fundamentalmente en equipos agrícolas, de construcción y minería. En una estructura determinada, la intensidad del desgaste por abrasión depende de la forma, dureza y tamaño de los granos o partículas abrasivas.

La velocidad de desgaste depende del grado de penetración del abrasivo en la superficie y por lo tanto es función de la dureza superficial del material. La dureza, la tenacidad y sobre todo la rugosidad de las partículas abrasivas, acentúan la abrasión; mientras que la fragilidad de estas atenúa el efecto

Si la dureza del abrasivo es muy superior a la dureza de la superficie, el desgaste es fuerte. Si el abrasivo es más blando la velocidad de desgaste es lenta. Por último, cuando las durezas son similares un leve cambio del valor de una de ellas



puede aumentar considerablemente el desgaste.

Otros factores que afectan el desgaste abrasivo son: temperatura, cargas que actúan sobre la superficie de trabajo, condiciones ambientales como la humedad, y el grado de compactación de las partículas. Se considera que todo desgaste abrasivo del material es un agrietamiento por fragilidad, como resultado de actos de deformación plástica y endurecimiento que se repiten cíclicamente

El proceso de desgaste abrasivo en condiciones reales, se realiza siempre con la colaboración no solamente de los granos abrasivos, sino también del medio exterior, de una composición química controlada (en el caso de los medios lubricantes) o no controlada (en el caso de la atmósfera).

El metal deformado plásticamente, al reaccionar con el oxígeno contenido en la atmósfera y en los medios lubricantes, forma estructuras de capas secundarias, que se diferencian del metal original por sus estructuras y propiedades de resistencia. La actuación de las presiones produce la destrucción de estas capas y el descubrimiento consecutivo de nuevas superficies del metal puro. Este fenómeno se conoce con el nombre de desgaste oxidante.

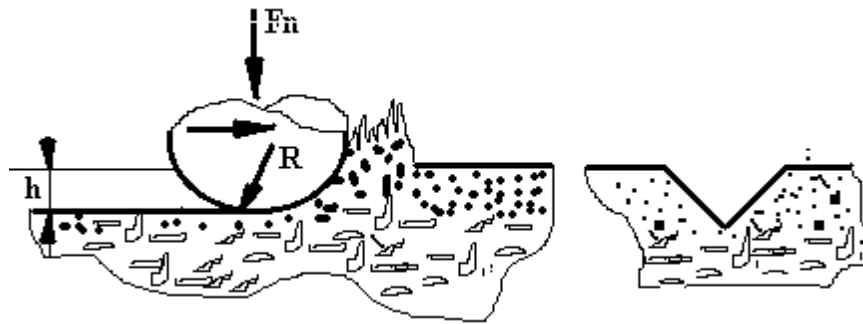
En el desgaste abrasivo influye la dureza y la tenacidad del material. La tenacidad será la resistencia que opone a la rotura el material deformado. El desgaste abrasivo depende también del coeficiente de fricción y la fuerza de unión adhesiva entre las partículas de la superficie del metal y las partículas abrasivas. Para mayores valores del coeficiente de fricción más fácil será el proceso de microcorte.

A manera de resumen puede decirse que el grado de abrasión es reflejado mayormente por la naturaleza de las partículas abrasivas, su forma, su tamaño y dureza y por el grado de humedad en la superficie. Otros factores determinantes incluyen la presión o el impacto aplicado por la partícula abrasiva, el ángulo de incidencia con la superficie y la velocidad relativa de las partículas abrasivas en relación con la superficie de desgaste.





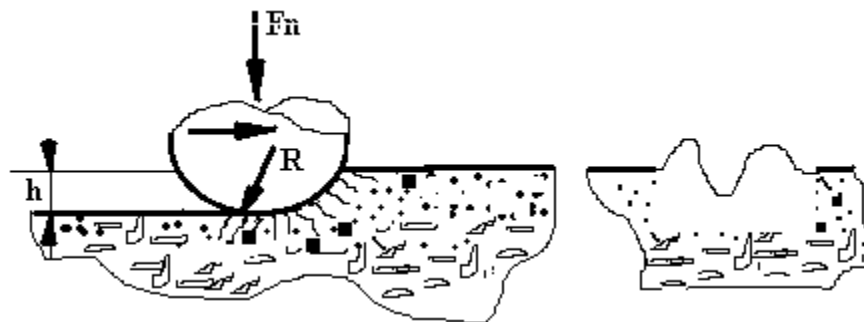
a) Mecanismo de microcorte.- Si la penetración de la aspereza o partícula abrasiva pasa sobre cierto valor crítico; si la dureza de las partículas abrasivas es superior a la del material y si se sobrepasa el límite de rotura del material se produce el microcorte de las capas superficiales; generando partículas de desgaste como se muestra en la.(Fig.No.4).



**Fig.No.4.** Mecanismo de microcorte.

$$h/R > 0.1 \quad \sigma_c > \sigma_{rot} \quad H_a > H_m$$

b) Mecanismo de deformación plástica (macrodeformación).- Si las tensiones de contacto son inferiores al límite de rotura; si el grado de penetración está por debajo del valor crítico se produce las deformaciones plásticas trayendo como consecuencia el rayado o raspado de las superficies en dirección arbitraria. En este caso no se genera partículas de desgaste. (Fig.No.5).



**Fig.No.5.** Mecanismo del rayado abrasivo.

$$h/R \leq 0.1 \quad \sigma_y < \sigma_c < \sigma_{rot} \dots\dots(2)$$

### 2.9.2.1. Tipos de desgaste abrasivo.

En dependencia del elemento abrasivo, su grado de libertad, el tipo de unión de



rozamiento, la relación de dureza abrasivo-material, etc., se presentan diferentes tipos de desgaste abrasivo.

En la vida práctica son cinco los mecanismos de desgaste que aparecen en pares sólido - sólido, ellos son: desgaste adhesivo, abrasivo, por fatiga superficial, corrosivo mecánico y desgaste por frotamiento. Por ser uno de los factores destructivos que más afectan a los elementos de las máquinas (incluyendo los depósitos de soldadura) será estudiado en este acápite el desgaste abrasivo.

#### **2.9.2.1.1. Desgaste contacto-abrasivo.**

Básicamente se produce por dos efectos como son: por microcorte y por deformaciones plásticas del material.

#### **2.9.2.1.2. Desgaste contaminante-abrasivo.**

En masa abrasiva; con dos formas, la mecánico-química y la mecánica.

Desgaste contacto-abrasivo por microcorte.

Se produce cuando las asperezas penetran en el cuerpo blando una magnitud superior a un valor crítico.

$$\frac{h}{R} > \frac{1}{2} \left( 1 - 2 \frac{\tau_n}{\sigma_{rot}} \right) \quad (1)$$

Se caracteriza por la generación de partículas de desgaste en forma de limallas o virutas. (Fig.No.3).

$$k = 2 \cdot 10^{-1} - 10^{-3}$$

$$lh = 10^{-7} - 10^{-2}$$

$$e^* = 10^3 - 10 \text{ N-m/mm}^3$$

$$\tau_n = 10^3 - 10^{-2} \text{ MPa}$$

#### Desgaste contacto-abrasivo con deformaciones plásticas.

Se produce cuando  $h/R$  no cumple la relación establecida en la expresión (1).

Se caracteriza por el rayado de la superficie, sin desprendimiento de partículas de desgaste (Fig.No.4).

En este caso:



$$l_h = 10^{-9} - 10^{-4};$$

$$e^* = 10^5 - 10^2 \text{ N-m/mm}^3;$$

$$\tau_n = 10^3 - 10^{-2} \text{ MPa}$$

En este tipo de desgaste pueden observarse principalmente tres regímenes en dependencia de las durezas de los materiales interactuantes:

- **Régimen débil**, cuando la dureza del abrasivo es menor que la del metal.
- **Régimen de transición**, cuando la dureza del abrasivo es aproximadamente igual a la del metal.
- **Régimen severo**, cuando la dureza del abrasivo es mayor que la del metal.

Se ha demostrado experimentalmente y teóricamente que la dureza del material está correlacionada con el grado de abrasión. Según Krushchov. Realizó un gran número de pruebas y encontró una relación inversa entre el grado de abrasión y la dureza de recocido para materiales puros. Él también probó aceros de durezas variadas. Las durezas fueron linealmente inversas con relación al desgaste abrasivo, excepto que ellas tienen declinaciones con respecto al desgaste diferente a las que muestran los materiales puros.

La microestructura es también importante. La austenita y la bainita de igual dureza son más resistentes a la abrasión que la ferrita, la perlita o la martensita. Esto es porque la austenita tiene mayor capacidad de endurecerse por deformación y ductilidad. El empleo de elementos de aleación ha sido frecuentemente utilizado para mejorar el comportamiento de un material. Esas adiciones pueden tener lugar lo mismo de forma sustitucional que por inserción. La adición del carbono al hierro es un buen ejemplo de cómo una solución sólida por inserción es utilizada para elevar la resistencia a la abrasión.

Adicionalmente a las propiedades de un material las condiciones ambientales afectan el desarrollo del desgaste abrasivo. Como fue establecido anteriormente las pérdidas por abrasión no son intrínsecas a un solo material. Existen factores ambientales que afectan las pérdidas por abrasión. Entre ellos están: el tipo de abrasivo y sus características, las temperaturas, la velocidad de contacto, la carga



de abrasivo en el material, la humedad y el efecto corrosivo. Los aceros aleados, no son diseñados para resistir el efecto de desgaste abrasivo intenso. No obstante estas aleaciones son usadas algunas veces como material resistente al desgaste abrasivo bajo condiciones ligeras. Se usan a veces para condiciones de desgaste combinadas de abrasión ligera e impacto (particularmente cuando se requiere de muchas capas y maquinado). Dentro de esta categoría se encuentran los aceros de baja aleación y aceros austeníticos al Mn y al Mn-Cr.

La función primaria de las aleaciones de abrasión metal-tierra y las que posean carburos de wolframio es la resistencia a la abrasión. Las aleaciones de abrasión metal-tierra están constituidas por hierros blancos con altos porcentajes de cromo en los que los carburos de cromo se forman durante la solidificación de la aleación, éstas poseen alta resistencia al deslizamiento y a la ruptura, en una moderada escala, mientras que los carburos de wolframio son usados bajo condiciones extremas de deslizamiento y corte.

Para las aleaciones de abrasión metal-tierra los hierros de alto contenido de cromo van acompañados de un alto rango de composiciones, el cromo, puede variar entre aproximadamente el 6 y el 35% en masa. Otras adiciones posibles a la aleación incluyen Mo, Mn y Si. El contenido de carbono es un buen indicador de la resistencia a la abrasión para esta clase de materiales.

### **2.9.3. Destrucción por impacto.**

Este tipo de destrucción se produce por la transferencia de energía cinética de un cuerpo simple sobre una superficie de extensión apreciable. Produce deformación superficial y subsuperficial del material que altera su forma y dimensión lo que puede devenir en la fractura por fatiga debido a los impactos repetidos.

Este surge como resultado de contactos de cuerpos generalmente metálicos (aunque no se excluyen rocas, minerales u otras sustancias), que acompañados de determinada velocidad, originan choques intermitentes contra la pieza. Se pueden clasificar para facilitar el análisis de su acción y con ello seleccionar la mejor forma



de combatirlos y aminorar su efecto en ligeros, medios y altos impactos.

- **Impacto ligero:** La energía cinética es absorbida por una deformación elástica del metal base que recobra su dimensión pudiendo dar lugar a deformaciones plásticas a muy largo plazo. Las aleaciones recomendadas para soportar este tipo de impacto son los aceros inoxidables austeníticos y los bronce al aluminio.
- **Impacto medio:** Produce deformaciones plásticas a corto plazo e inclusive trituración y desprendimientos superficiales a corto plazo. Se recomienda usar en este caso aceros con estructura martensítica (templados y revenidos).
- **Altos impactos:** Produce deformaciones plásticas de gran magnitud de manera instantánea y fracturas a corto plazo. Las aleaciones recomendadas para trabajar en esas condiciones son los aceros austeníticos al alto manganeso.



## CAPITULO III. TÉCNICA OPERATORIA

### 3. Materiales, métodos experimentales y procedimientos establecidos

#### 3.1. Selección y preparación de muestras

Se analizaron muestras de 8 cuchillas (10.22 % del total de cuchillas en operación en todas las máquinas).

Las operaciones de corte se realizaron con una cortadora de metales aplicando refrigeración intensa con emulsión refrigerante para evitar transformaciones adicionales en la estructura producto del calentamiento durante el corte. Las muestras, debidamente marcadas, se sometieron a procesos de preparación para su posterior caracterización. Se obtuvieron, además, seis probetas de acero AISI 304, 420 para aplicar tratamientos térmicos y ensayos metalográficos, cumpliendo lo establecido por la norma ASTM E 139.

La preparación de las muestras para la caracterización metalográfica se realizó según los procedimientos establecidos en las normas NC 10-56:86 y ASTM E3-95.

Durante el pulido se emplearon máquinas herramientas, pulidoras de laboratorio, técnicas de pulido manual y pulido electrolítico. Para garantizar un correcto pulido de la superficie sin redondeo en los bordes, las muestras se montaron sobre bakelita y resina epoxídica. El ataque químico se aplicó utilizando soluciones electrolíticas disueltas en agua o alcohol, según lo establecido por la norma ASTM E 407-93 y los procedimientos expuestos por Kehl, 1994, Greaves y Wrighton, 1996 y Bilmes 2000.

Las operaciones de clasificación, preparación y pulido de las muestras se realizaron siguiendo la secuencia de operaciones que se describe a continuación:

1. **Cepillado:** Se aplicó el cepillado en dos caras aproximadamente paralelas en una Máquina cepilladora
2. **Rectificado:** Horizontal 6T-82-1 con refrigeración continua. Se designó una de las caras para el pulido y ataque y la otra para el análisis químico.
3. **Pulido:** Las muestras analizadas en los laboratorios del ISMM y el ISPJAE se



pulieron en una Pulidora Metalográfica modelo Rathenow-43 empleando papel abrasivo de las series 350, 500, 600 y 800, paños de fieltro y una solución de pasta abrasiva de diamante con granulometría de 3  $\mu\text{m}$ .

4. **Limpieza, lavado y secado:** Después de la adecuada preparación de las superficies, las probetas se lavan con acetona para eliminar restos de grasa, polvo y pasta de pulir cuidando no frotar la superficie pulida. Posteriormente se limpian con etanol absoluto para eliminar cualquier vestigio de humedad.
5. **Ataque de las superficies a investigar:** Inmediatamente después de la limpieza, se procedió a realizar el ataque de las superficies a investigar. Se emplearon las técnicas de ataque manual por inmersión y ataque electroquímico según ASTM E262-Practice A. En los laboratorios del ISMM y el ISPJAE se aplicó el ataque por inmersión de las muestras durante 5 segundos con los reactivos de Marble en el Anexo No.6. se muestra la composición de los reactivos empleados.
6. **Limpieza y secado:** Después de atacadas, las superficies de las muestras se lavan con agua destilada y posteriormente en alcohol para finalmente secarlas en aire caliente.

### 3.1.2. Análisis químico

Se comprobó la composición química de las muestras para verificarlas con los estándares y establecer su correspondencia con la aleación a investigar. El análisis químico se realizó empleando un Espectrómetro de Masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón en el Laboratorio del Taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel.

### 3.1.3. Análisis microestructural

Para la caracterización microestructural de las muestras se utilizaron las técnicas de microscopía óptica, siguiendo las normas y procedimientos establecidos por Amelinckx et al., 1997 y Golstein et. Al 1997.



#### **3.1.4. Ensayos de dureza**

Se realizaron tres ensayos de dureza en tres puntos diferentes de cada muestra en un durómetro Rockwell del tipo SNIZU P01 modelo 2018 TP, utilizando la escala Rockwell B.

#### **3.1.5. Análisis Metalográfico**

Se realizaron análisis metalográficos y fractográficos a las muestras para conocer la microestructura del material. Se prepararon muestras metalográficas en una pulidora mecánica

La caracterización microscópica se realizó utilizando microscopios ópticos METAM-P1 con cámara digital acoplada SAMSUNG Digimax 201. Se utilizaron aumentos desde 100x hasta 1 200x, en dependencia de las características metalográficas y zonas de interés a analizar.

Teniendo en cuenta el análisis realizado al cumplir los datos ofrecidos en la Tabla No.5. y la (fig.No.3). se pueden emitir criterios.

Para poder incrementar la durabilidad de las cuchillas de las maquinas envasadoras de (ILE). Las cuales requieren de un material inoxidable y de gran dureza, el cual permita una mayor producción y a la vez tener un largo periodo de trabajo.

En este caso después de haber analizado el material de acero inoxidable AISI 304 el cual es empleado hoy en día para la elaboración de las cuchillas, se pudo comprobar que no es el material adecuado por su composición química el cual no es recomendado para su trabajo, el cual es la acción de cortar sobres de polietileno. Sin embargo en nuestra investigación luego de los análisis químicos pertinentes, necesarios y luego de haber aplicado una nueva tecnología en el tratamiento térmico a los aceros inoxidables; recomendamos el acero inoxidable AISI 420 de carácter martensítico el cual alcanza una dureza superior por medio de la aplicación de temple + revenido.





### **3.3. Selección de los tratamientos.**

#### **3.3.1. Tecnología de tratamiento térmico.**

Para la tecnología de tratamiento térmico se establece la siguiente secuencia:

1. Selección del tratamiento térmico a aplicar: Temple + Revenido

El objetivo del temple es obtener una estructura martensítica de elevada dureza, seguido de un revenido para aliviar las tensiones residuales producto de los procesos de temple y regular los valores de dureza requeridos.

2. Parámetros tecnológicos a emplear.

- Temperatura tecnológica de tratamiento.
- Velocidad de calentamiento.
- Tiempo de permanencia.
- Medio de enfriamiento
- Velocidad de enfriamiento.
- Posición de las piezas dentro del horno.

#### **3.3.2. Temperaturas tecnológicas de tratamiento.**

Según la bibliografía consultada ([http://www.interlloy.com.au/420\\_Martensitic\\_Stainless\\_Steel\\_Bar.htm](http://www.interlloy.com.au/420_Martensitic_Stainless_Steel_Bar.htm), 3 Mayo 2004), la temperatura crítica del acero AISI 420 se encuentra entre 1020°C y 1060°C. El temple desde estas temperaturas, proporciona una óptima resistencia a la corrosión; sin embargo, el temple desde 980°C garantiza una mejor combinación de resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas. El revenido de estos materiales se puede aplicar, en dependencia del estado tensional a que están sometidos, a diferentes temperaturas, desde 150°C hasta 600°C; pero debe evitarse el revenido en el rango de temperaturas entre 400°C y 500°C debido a la propensión del material a la fragilidad de revenido.

#### **3.3.3. Velocidad de calentamiento.**

Con el fin de minimizar los gastos de energía y ganar en productividad, se requiere de velocidades de calentamiento de la pieza conjuntamente con el horno.



### 3.3.4. Tiempo de permanencia

De todos estos parámetros, es preciso calcular el tiempo de permanencia  $T_p$ , para controlar adecuadamente el mismo, evitando que puedan aparecer defectos como consecuencia de un tiempo prolongado o insuficiente.

El tiempo de permanencia depende de la forma y dimensiones de las piezas, entre otros. El tiempo de permanencia se puede determinar en forma práctica o mediante la utilización de fórmulas empíricas. Estas fórmulas se basan en un factor que multiplica una dimensión determinante (longitud o diámetro), que será siempre el espesor mínimo de la pieza a través del cual hay transferencia de calor.

$$T_p = k.D \quad (2)$$

K = Coeficiente que tiene en cuenta el tipo de tratamiento térmico, la composición química de la pieza y el tipo de horno.

Para el temple de los aceros aleados, K = 1,6 y para el revenido, es K = 2

D = Dimensión determinante de la pieza.

En el caso de las cuchillas, es el espesor  $e = 6$  mm.

### 3.3.5. Medio de enfriamiento.

Como se apuntó anteriormente, el enfriamiento está en correspondencia con el tipo de tratamiento térmico a aplicar. En este caso, dada la presencia de elevados contenidos de elementos de aleación, la posición de la línea Ms y el desplazamiento de las curvas cinéticas de la transformación austenítica hacia la derecha en el diagrama TTT, se recomienda realizar el enfriamiento en aceite para garantizar la presencia mínima de tensiones estructurales y térmicas durante las operaciones y por tanto, disminuir la probabilidad de agrietamiento durante el temple. El enfriamiento en los revenidos se realizará, como está establecido, al aire.

### 3.3.6. Posición de las piezas dentro del horno.

En dependencia de la forma de la pieza, la posición de estas dentro del horno es variable. El objetivo fundamental que se persigue con esta variación en la posición



de unas piezas con respecto a otras, es mejorar las condiciones de transferencia de calor, disminuyendo el tiempo de calentamiento y aumentando notablemente la productividad del proceso.

La disposición está en función de la forma de la pieza y del número de ellas. Se recomienda utilizar un horno con soporte metálico para aprovechar la conductividad térmica del metal de soporte, que es superior al del piso de la cámara del horno. Con ello se consigue disminuir el tiempo de calentamiento a un mínimo. Como las piezas a tratar son planas y de pequeño espesor, la separación entre ellas puede ser reducida a un mínimo.

### **3.3.7. Investigación de la influencia de los parámetros tecnológicos en las propiedades del material**

Se investigó la influencia de los parámetros tecnológicos establecidos en los epígrafes 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4, 3.3.5 y 3.3.6 en las propiedades resultantes del material. Las temperaturas de revenido seleccionadas estuvieron en correspondencia con la disponibilidad del material utilizado, que dicho sea de paso, fue bastante escaso y difícil de conseguir. No obstante, se gestionó una lámina de Acero AISI 420 de 6 mm de espesor, con las que se fabricaron 7 juegos de muestras para analizar 7 situaciones diferentes, incluyendo una sin revenir. Los ensayos se realizaron bajo las condiciones detalladas en la Tabla No.4.

**Tabla No.4.** Parámetros tecnológicos para la realización de los ensayos

Temperatura de temple	980 °C
Velocidad de calentamiento	Mínima: calentamiento conjuntamente con el horno
Tiempo de permanencia en el temple	6 min
Medio de temple (enfriamiento)	Aceite
Temperaturas de revenido	150°C, 200°C, 420°C, 500°C, 550°C y 600°C
Tiempo de permanencia en el revenido	10 min

Después de aplicado el temple y revenido a cada una de las temperaturas establecidas, se realizaron ensayos de dureza para comprobar la efectividad de los tratamientos térmicos aplicados. Para garantizar una mayor fiabilidad en las mediciones, cada uno de los ensayos se replicó tres veces, obteniendo como



valor final el promedio de las mediciones.

### 3.3.8. Análisis de regresión

Mediante el análisis de regresión se estudió la dependencia de la dureza de las cuchillas con relación a las diferentes temperaturas de revenido aplicadas. La metodología empleada para el análisis de regresión fue la siguiente:

1. Formulación de la hipótesis estadística.
2. Representación gráfica de los datos.
3. Análisis de correlación y regresión.
4. Interpretación de los resultados ANOVA y decisión.

#### 3.3.8.1. Formulación de la hipótesis estadística

El problema que se intenta resolver con la prueba de hipótesis estadística puede enunciarse de la siguiente manera: *¿es cierto resultado u observación compatible con determinada hipótesis?* el término “compatible” significa **suficientemente cerca del valor hipotético**, de manera que se pueda aceptar la hipótesis enunciada inicialmente.

En este caso, la hipótesis enunciada se conoce como *hipótesis nula* y generalmente se prueba contra una teoría o *hipótesis alterna*. La teoría de la prueba de la hipótesis se ocupa de desarrollar reglas o procedimientos para decidir si se acepta o se rechaza la hipótesis. Para los cuatro casos analizados se establece como hipótesis:

$$H_0: B_j = 0 \forall j$$

$$H_1: \text{Algún } B_j \neq 0$$

Donde:

$H_0$  = Hipótesis nula

$H_1$  = Hipótesis alternativa

$B_j$  = Coeficientes del modelo de regresión.

El criterio de decisión estableciendo un nivel de significancia para  $\alpha = 0.05$  como



valor límite sería:

Se rechaza  $H_0$  si:  $P < 0.05$ .

Donde:

$P$  = Probabilidad de aceptar la hipótesis  $H_0$  (rechazar los modelos).

Con la hipótesis formulada se comprueba si las variaciones de los valores de dureza con las temperaturas de revenido están explicadas por los modelos obtenidos o se deben a la influencia de los errores aleatorios.

### **3.3.8.2. Representación gráfica de los datos**

Para ello, se utilizaron las herramientas de análisis estadístico que proporciona el software Excel. La representación gráfica de los datos se realizó empleando diagramas de dispersión y tomando como funciones objetivo los modelos de regresión que ofrece el Excel.

### **3.3.8.3. Análisis de correlación y regresión**

Con la utilización de las herramientas del Excel se procesaron los datos para realizar el análisis de correlación y regresión para los rangos de entrada y salida establecidos a partir del establecimiento e interpretación de los valores del coeficiente de determinación  $R^2$ , el establecimiento de la significancia de los coeficientes del modelo y la comprobación de la adecuación del modelo por el estadígrafo  $F$  de Fisher.

### **3.3.8.4. Interpretación de los resultados ANOVA y decisión**

Por último, se realiza la interpretación de los resultados del análisis operativo de varianza (ANOVA). El ANOVA permite definir la influencia de los factores no incluidos en los experimentos en los resultados obtenidos a través de la comparación del promedio de los cuadrados de los residuos (SCE) con el promedio de los cuadrados de la regresión (SCR) y finalmente, se toma la decisión de aceptar o no la hipótesis estadística planteada.



## CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Resultados

#### 4.1.1. Análisis químico

Los resultados del análisis químico se muestra en la Tabla No.5. como se observa, la composición química de las muestras se corresponde con la del acero AISI 304 perteneciente al grupo de los aceros inoxidables austeníticos.

**Tabla No.5.** Composición química (%) de las muestras de las cuchillas desgastadas.

C	Si	Mn	S	Cr	P	Ni	Ti	Al	Mo	Fe
0,043	0,41	1,1	0,033	18,8	0,037	9,84	0,002	0,003	0,003	Bal.

#### 4.1.2. Ensayos de dureza

En la Tabla No.6. se exponen los resultados promedio de los valores de dureza obtenidos de los ensayos practicados.

**Tabla No.6.** Valores promedio de dureza.

Escala de dureza	Valores de dureza							
	1	2	3	4	5	6	7	8
HB	192	199	210	199	198	200	198	194

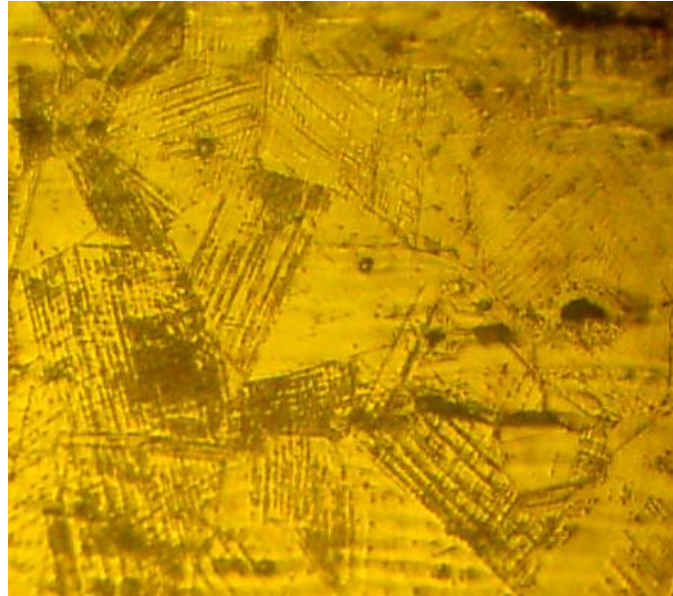
#### 4.1.3. Análisis Metalográfico

En la micrografía de la Fig.No.1. aparece la microestructura típica de las muestras analizadas. El ataque con reactivo de Marble reveló que el material con que están fabricadas las cuchillas está constituido por una matriz austenítica con bandas de maclaje que evidencian la aplicación de grados de deformación considerables durante la laminación del semiproducto con que están fabricadas las cuchillas. Lo que se corresponde perfectamente con el acero AISI 304. Se puede observar, además, la presencia de algunas inclusiones en la matriz metálica.

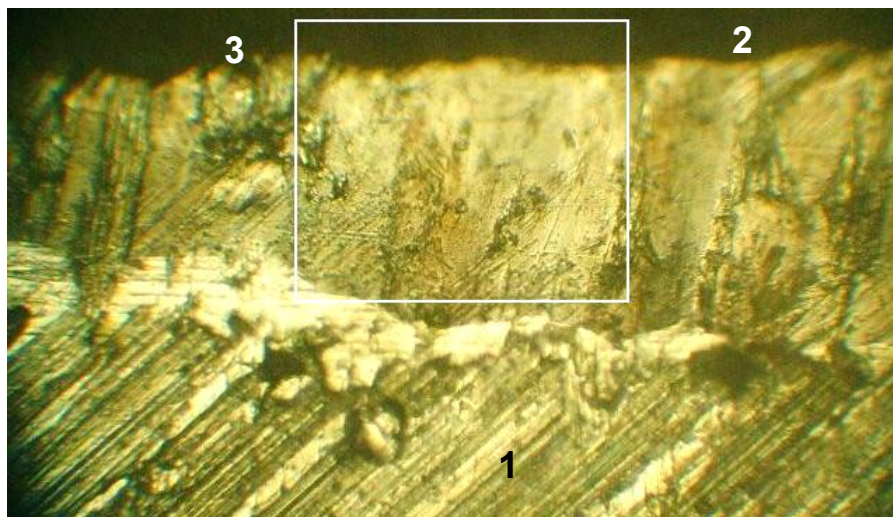
En la micrografía de la Fig.No.6. Se representa el relieve de la zona del filo de las cuchillas desgastada por la fricción mostrando tres zonas morfológicamente



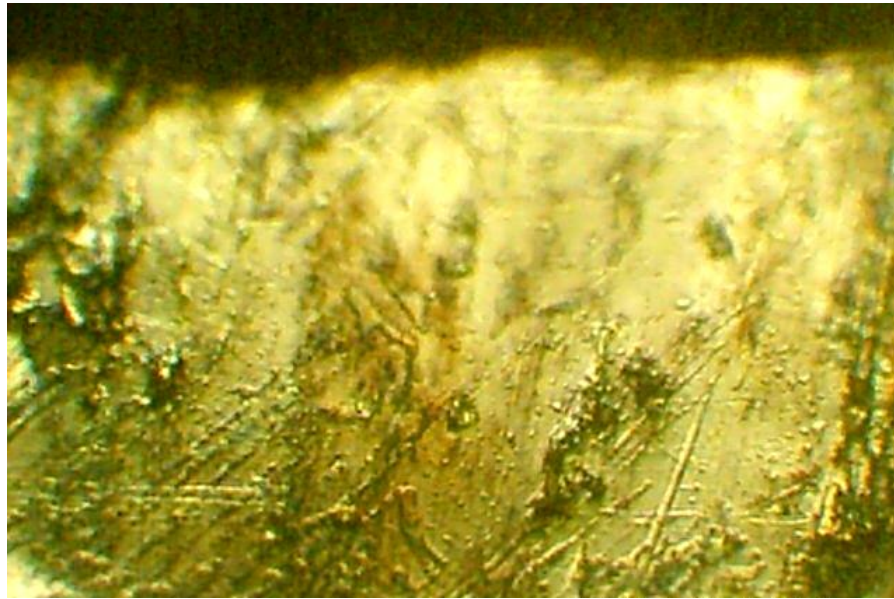
diferenciables y un detalle ampliado representado en la micrografía de la Figura 8.



**Fig.No.6.** Micrografía representativa de la microestructura del material. 500x



**Fig.No.7.** Vista general del micro relieve de la zona del filo de las cuchillas. 507x



**Fig.No.8.** Detalle ampliado de la Figura 2, 1000x

Como se observa en el detalle ampliado mostrado en la Fig.No.7. En la zona desgastada también existe planos de desgaste y fractura con microrelieves perfectamente diferenciables y superficies de fracturas diferentes.

#### **4.1.4. Ensayo de dureza después del tratamiento térmico**

En la Tabla.No.7. Se dan los valores tomados de los ensayos de dureza, aplicados a cada una de las muestras, luego de haber aplicado el tratamiento térmico del temple a 980 °C y el revenido a diferentes temperaturas. En la (fig.No.9). se detalla la interpretación gráfica de los resultados de dureza mencionados en la tabla anterior.

**Tabla.No.7.** Valores de los ensayos de dureza para el revenido después del temple.

Temperatura de revenido °C	Dureza, HRC	
	Temple a 980 °C	Temple a 1060 °C
27	55	50
150	55	48
200	53	46
420	58	51
500	50	48
550	38	35
600	33	31



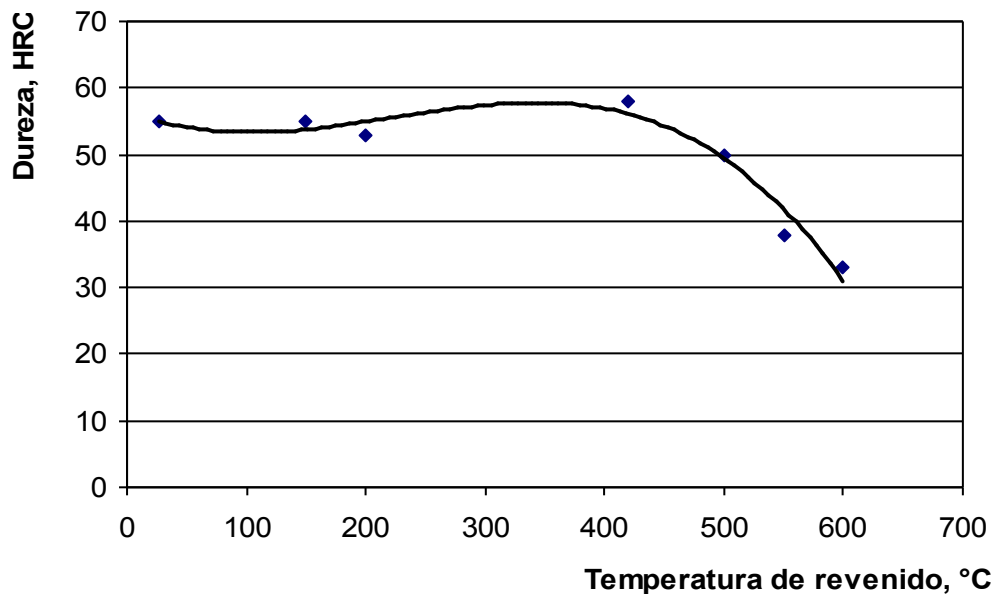


A continuación en la Tabla No.7. también se exponen los resultados de los ensayos de dureza aplicados a cada una de los ejemplares, después de aplicado el tratamiento de temple a 1060 °C y la comparación de su dureza después del proceso de revenido a diferentes temperaturas.

De los resultados alcanzados luego de haber aplicado el tratamiento térmico de temple + revenido a diferentes escalas de temperatura, permiten observar una clara diferencia en cuanto a la dureza alcanzada para la temperatura de 980 °C en comparación con 1060 °C. Y luego los valores de dureza comparando con los diferentes rangos de temperatura.

#### 4.1.5. Representación gráfica de los datos

La (fig.No.9). representa gráficamente las dependencias polinomiales entre las variables, cuya expresión matemática se ajusta a un modelo polinomial del tipo  $y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$



**Fig.No.9.** representación gráfica del comportamiento de la dureza en relación a la variación de las temperaturas de revenido.



#### 4.1.6. Resultados de la correlación y la regresión

Las estadísticas de la regresión se muestran en la Tabla No.8. como se observa, los valores del coeficiente de correlación múltiple (R) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) sugieren que la curva de regresión obtenida se ajusta muy bien a los datos analizados.

**Tabla No.8.** Estadísticas de la regresión

Coeficiente de correlación múltiple	0,96112274
Coeficiente de determinación $R^2$	0,92375692
$R^2$ ajustado	0,88563538
Error típico	3,22854745
Observaciones	7

#### 4.1.7. Resultados del ANOVA

Se realizó un primer análisis operativo de varianza donde se obtuvo como resultado la no significancia de los coeficientes  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$ , por lo que tuvo que realizarse un segundo análisis mediante la aplicación del método denominado “paso a paso hacia atrás”. Para ello, se asumió que todos los coeficientes y las variables (determinadas por sus respectivos coeficientes  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  y  $b_3$ ) se incluyen en el modelo y se repitió el análisis eliminando, en su orden sucesivo, las variables menos significativas. En este caso, se comenzó eliminando la variable  $X_1$  por ser el coeficiente  $b_1$  el que poseía mayor probabilidad de no incluirse en el modelo.

Al repetir los análisis, se obtuvieron los resultados ANOVA de las Tabla No.9.y No.10. Como se puede observar en la Tabla No.9. El término independiente (intercepto) y las variables de la posible ecuación de regresión  $X_1$  y  $X_2$  se encuentran dentro de los límites inferior y superior del intervalo de confianza, lo que indica que los mismos son significativos (no hay cambios de signo). Como se apuntó anteriormente, la variable  $X_1$ , al no ser significativa, se excluye del modelo.

Después de determinar los coeficientes de la ecuación de regresión y su significancia, se comprueba la adecuación del modelo Para ello, se comprueba la significancia de los coeficientes del modelo.



**Tabla No.9.** Resultados de la regresión del segundo ANOVA para los coeficientes

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepto	52,3793088	2,39215031	21,8963284	2,57.10 <sup>-5</sup>	45,737621	59,0209966
X <sub>2</sub>	0,00019263	6,69.10 <sup>-5</sup>	2,87547407	0,045219	6,633.10 <sup>-6</sup>	0,00037863
X <sub>3</sub>	-4,1593.10 <sup>-7</sup>	1,122.10 <sup>-7</sup>	-3,70581328	0,02073	-7,275.10 <sup>-7</sup>	-1,0431.10 <sup>-7</sup>

**Tabla No.10.** Resultados de la regresión del segundo ANOVA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados (Varianza)</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	505,163068	252,581534	24,23	0,00581
Residuos	4	41,6940745	10,4235186		
Total	6	546,857143			

La adecuación del modelo se comprueba con el valor crítico del estadígrafo *F* de Fisher, el que es mucho menor que el estadístico por tabla.

#### 4.1.8. Interpretación de los resultados ANOVA

De la Tabla No.10. Se comprueba que el promedio de los cuadrados de los residuos (SCE) no es excesivamente grande en comparación con el promedio de los cuadrados de la regresión (SCR); mientras que de la Tabla No.9. se comprueba que las probabilidades de aceptar  $H_0$  son menores que el nivel de significancia establecido ( $P = 0,05$ ) para el valor del intercepto y los coeficientes de las variables  $X_2$  y  $X_3$ , por lo que el modelo estadístico

$D = 52,3793088 + 0,00019263 T^2 - 4,1593 \times 10^{-7} T^3$  explica adecuadamente el comportamiento de la dureza del material al variar la temperatura de revenido.

## 4.2. Discusión

### 4.2.1. Análisis químico

El acero austenítico del tipo AISI 304 se caracteriza por ser especialmente no magnético en estado de recocido y no se endurece por tratamiento térmico. Se trabaja en caliente con toda facilidad y puede trabarse en frío, teniendo siempre presente que con este tipo de trabajo se endurecen rápidamente consiguiéndose valores de dureza de hasta 30 HRC (Wegst, 1995).



#### **4.2.2. Ensayos de dureza**

Como se observa en la Tabla No.6. los valores de dureza de las cuchillas del AISI 304 oscilan entre 192-210 HB, correspondiéndose con las propiedades del material en estado de laminación (recocido). Estos valores de dureza no satisfacen las exigencias requeridas para el corte y funcionamiento estable de las cuchillas de las máquinas envasadoras de ILE, por lo que se requiere buscar otra alternativa para resolver el problema planteado.

Para el caso del acero AISI 420, se obtiene óptimos valores de dureza como resultado de haber aplicado una temperatura de 980 °C, y un revenido medio de 420 °C. Sin embargo, este no se lo puede tomar como la mejor dureza obtenida, pues en este rango de temperaturas de revenido, el incremento de la dureza va a acompañado con un importante descenso de la tenacidad, según lo expuesto en [http://www.interlloy.com.au/420 Martensitic Stainless Steel Bar.htm](http://www.interlloy.com.au/420%20Martensitic%20Stainless%20Steel%20Bar.htm), 3 Mayo 2004. Como se observa, existe una disminución de los valores de dureza para temperaturas de temple a 1060 °C, aunque para esta temperatura de temple se reporta una mejor resistencia a la corrosión.

Al templar el material a una temperatura de 980 °C, y luego un revenido bajo a 200 °C, es en donde se consigue la mejor combinación entre la resistencia a la corrosión y sus propiedades mecánicas. Sin embargo luego del análisis realizado a todas las muestras se determinó que el valor de dureza optimo es 52 HRC el cual concuerda con la recomendación de la firma Interlloy.

#### **4.2.3. Análisis metalográfico**

A partir del análisis fractográfico se pudo establecer el mecanismo de desgaste para la zona del filo de las cuchillas de acero inoxidable AISI 304.

En la zona del filo de las cuchillas desgastada por la fricción (Fig.No.7). se puede distinguir perfectamente tres regiones delimitadas por el cambio de dirección de las micro-huellas de maquinado y el desgaste. La parte indicada con el número 1, se corresponde con las huellas de maquinado resultantes del afilado de las cuchillas; mientras la indicada con el número 2, representa el filo en forma de



diente de sierra originado por el desgaste irregular al entrar en contacto las cuchillas y la señalada con el número 3 se corresponde con la superficie de corrosión desgarrada por los efectos de la abrasión.

En el detalle ampliado, los planos de desgaste y fractura muestran microrelieves característicos de las superficies de fracturas dúctiles, con existencia de zonas abundantes de micro-deformaciones plásticas producto de la baja dureza del material. En este caso, el daño más significativo en la superficie del filo está determinado por la deformación plástica (cambio en la forma sin fractura) y el daño de la superficie que involucra pérdida de material; es decir, la pérdida por desgaste que origina las microhuellas y el microrelieve característico con rugosidad direccional definida por surcos y rayaduras.

Sin embargo, el deterioro de las cuchillas utilizadas en la maquinaria de ILE también está determinado por los efectos ocasionales de la corrosión, pues estas también están sometidas a la acción de agentes moderadamente agresivos cuando se envasan sazónadores en forma de pasta. En este caso, el deterioro del filo es originado principalmente por la combinación del desgaste abrasivo y corrosivo. En las zonas más cercanas al filo (Fig.No.7, detalle Fig.No.8), se puede observar un microrrelieve con aspectos típicos de roturas frágiles, resultado de la acción combinada del desgaste y la corrosión.

Cuando la capa de óxido protectora del metal base es eliminada por la fricción entre los filos cortantes de las cuchillas, la matriz metálica queda expuesta a la acción de los agentes químicos provenientes de los sobres de especerías, principalmente del aliño y el refrito que contienen considerables cantidades de cloruro de sodio y ácido cítrico.

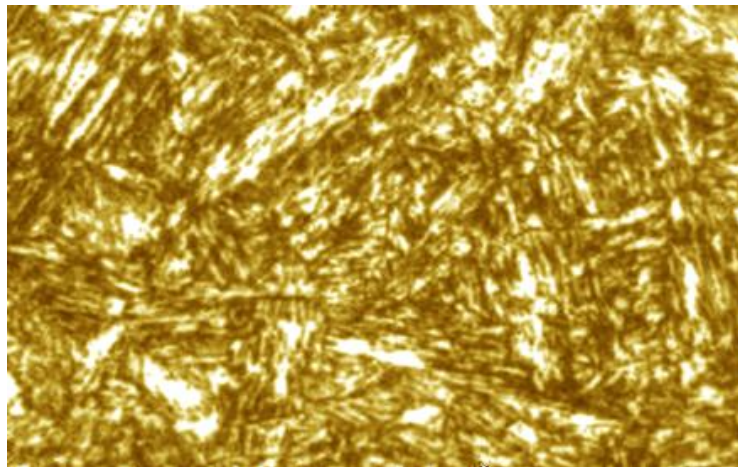
Durante la fricción ocurren procesos que traen como consecuencia la formación del tercer cuerpo. Este tercer cuerpo no es más que los productos del desgaste debidos a la interacción químico-física de las finas capas superficiales y el medio circundante. La formación de estos tipos de capas se puede confirmar debido a la presencia de capas de óxido durante el proceso de desgaste.



El ciclo de desgaste y remplazamiento de la capa del óxido continúa mientras hay contacto mecánico entre las cuchillas, de manera que el proceso de formación del óxido y su eliminación se favorece por los efectos de los reactivos en forma de disolución química. Por su parte, la fractura quebradiza ocurre cuando las tensiones de tracción concentradas en las pequeñas protuberancias formadas como resultado de la corrosión, debilitan los picos de las micro-asperezas y exceden las tensiones de la fractura del material.

Este mecanismo de desgaste incluye los fenómenos de cizallamiento, formación de fragmentos, rasgado y la fractura quebradiza acentuados por los efectos de la corrosión que normalmente actúa de forma combinada.

En el caso de las probetas de AISI 420, la microestructura típica resultante después del tratamiento térmico doble de temple y revenido aparece en la (fig.No.10).



**Fig.No.10.** Microestructura típica de martensita + austenita residual del acero AISI 420 después del tratamiento térmico doble de temple + revenido. 200x

En sentido general, se pueden resumir la aparición de varias estructuras en dependencia de los ciclos térmicos aplicados durante los tratamientos:

**Estructura final del temple:** Martensita + Carburos  $M_{23}C_6$

**Estructura final del revenido bajo (150°C):** Martensita revenida + Carburos



$M_{23}C_6$  + ferrita + Austenita residual

**Estructura final del revenido medio (420°C):** Martensita revenida + Carburos  $M_{23}C_6$  + Austenita

Las estructuras después del temple y el revenido bajo presentan rasgos similares en cuanto a la morfología de las fases constituyentes. Estas microestructuras están formadas por agujas de martensita sobre una matriz de austenita en el caso del temple y agujas de martensita revenida sobre la matriz también austenítica en el caso del revenido, como se observa en la Fig.No.10.

Según la firma proveedora de este material: la Interlloy Pty Ltd., la aplicación del temple desde temperaturas superiores a 980 °C (1020 °C-1060 °C), hubiera garantizado una mejor resistencia a la corrosión, pero la combinación de una buena dureza, una adecuada tenacidad y una resistencia a la corrosión óptima se logra cuando la temperatura de temple es de 980 °C. Por otra parte, la aplicación de bajas temperaturas de revenido garantiza la ocurrencia de un alivio de tensiones residuales conservándose los altos límites de dureza, mientras que temperaturas de revenido altas provocan una disminución considerable de la dureza. Debido a que el acero es propenso a la fragilidad de revenido, se debe evitar la aplicación del revenido a temperaturas en el rango entre 400 °C - 580 °C.

Se debe significar que se experimentó un incremento en la dureza de las cuchillas revenidas en relación con las templadas como se muestra en la Tabla No.7. lo que se atribuye a la transformación de cierta cantidad de austenita retenida durante el calentamiento del revenido. Se pudo apreciar, además, la excelente templabilidad del material, a pesar de las pequeñas secciones de la pieza.

#### **4.2.4. Análisis de regresión**

Los signos positivos de los coeficientes representan una influencia positiva de los valores de temperatura sobre los valores de dureza. Los valores de los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) sugieren que las líneas de regresión obtenidas se ajustan muy bien a las deformaciones analizadas.



#### 4.2.5. Resultados ANOVA

Las tablas ANOVA No.9 y 10. Muestran el resumen de los análisis operativos de varianza. Como se observa, en todos los casos el promedio de los cuadrados de los residuos (SCE) “no es excesivamente grande” en comparación con el promedio de los cuadrados de la regresión (SCR); por lo tanto, los factores no incluidos en los experimentos no tienen marcada influencia sobre los resultados. Por otra parte, como las probabilidades de aceptar  $H_0$  son menores que el nivel de significancia establecido ( $P = 0,05$ ) para el valor del intercepto y los coeficientes de las variables  $X_2$  y  $X_3$ , se puede plantear que el modelo estadístico-experimental obtenido describe adecuadamente el comportamiento de la dureza con la variación de las temperaturas de revenido.

#### 4.3. Propuesta de solución y argumentación a la solución del problema del deterioro de las cuchillas

Sobre la base de los resultados de los análisis, se deduce que el acero AISI 304 utilizado para la fabricación de las cuchillas no es el idóneo, por lo que se impone la búsqueda y propuesta de una variante tecnológica que satisfaga los requerimientos para las cuchillas utilizadas en las máquinas de ILE.

En este caso, se propone utilizar el acero AISI 420, con la composición química mostrada en la Tabla No.11.

**Tabla No.11.** Composición química (%) del material de las nuevas cuchillas.

C	Si	Mn	Ni	Cr	S	P	Ti	Al	Fe
0,21	0,94	0,83	0,96	13,3	0,021	0,032	> 0,01	> 0,03	Bal.

Este es un acero martensítico inoxidable al cromo con contenido medio de carbono de propósito general. Se caracteriza por poseer buena resistencia mecánica y a la corrosión en ambientes atmosféricos, domésticos e industriales, es capaz de resistir los embates de la corrosión originada por la presencia del cloruro de sodio y el ácido cítrico presentes en los aliños y el refrito procesados en ILE, tiene amplias posibilidades de aumentar la dureza por tratamiento térmico para minimizar las posibilidades de desgaste entre los filos de las cuchillas. Es





además, resistente al amoníaco, a la sangre, al ácido carbónico, aceite crudo, soluciones de detergente, agua fresca, ácido nítrico, ácidos de alimentos, vapor, vinagre y muchos productos de petróleo, combinado con una buena y razonable resistencia al impacto cuando se encuentra en estado de temple y revenido.

Como se ha observado, debido a su excelente templabilidad, es capaz de endurecerse hasta valores de dureza de 55 HRC, en dependencia del contenido de carbono y el tamaño de la sección. Es un material magnético y maquinable en todas las condiciones. Por lo tanto, la nueva propuesta de solución se resume en la Tabla No.12.

**Tabla No.12.** Variante tecnológica para incrementar la durabilidad de las cuchillas de ILE

Material	AISI 420
Temperatura de temple	980 °C
Velocidad de calentamiento	Mínima: calentamiento conjuntamente con el horno
Tiempo de permanencia en el temple	6 min
Medio de temple (enfriamiento)	Aceite
Temperaturas de revenido	150 - 200°C
Tiempo de permanencia en el revenido	10 min
Instalación para el temple	Horno eléctrico de cámara



## **CAPITULO V. ESTUDIO ECONÓMICO Y MEDIO AMBIENTAL**

### **5.1. Estudio medio ambiental**

La especie humana en el decursar de los años ha introducido cambios severos en el aire, el suelo, el agua y en su sistema de interacción con otras criaturas vivientes que conforman el entorno.

La protección del medio ambiente se ha convertido, en los últimos años, en una de las cuestiones que más inquietan a la humanidad. Los grandiosos medios técnicos que dispone el hombre para explotar las riquezas naturales, el acelerado desarrollo de la economía y el crecimiento de la población han dado lugar a consecuencias indeseables para la humanidad tales como: el agotamiento de los recursos naturales, la contaminación ambiental, los ruidos, la pérdida de los valores estéticos del medio circundante y la merma acelerada del fondo genético, entre otros. No es por lo tanto causal de las organizaciones científicas, sociales, políticas, los estados y gobiernos de muchas partes del mundo el que se hayan preocupado por tomar medidas que de una forma u otra, están dirigidas a garantizar el uso racional de los recursos naturales y la protección del medio ambiente (Letayr, 1996).

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo en su entorno laboral y su labor específica (oficio o profesión) pues en este medio donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentran el polvo industrial, el ruido, etc. Los cuales se forman en los procesos metalúrgicos tales como calcinación, tostación o calentamiento, molienda, procesos de tratamiento térmico y de fabricación de piezas entre otros.

El hecho que el desgaste de las cuchillas sea muy periódico implica la realización de tareas de mantenimiento en ciclos muy cortos que generan riegos de contaminación para el producto que se envasa en este tipo de maquinarias.

Sin embargo cabe indicar que en ILE. al implementar un área destinada a tratamiento térmico se debe tener en consideración todas las normas medio ambientales, así como de seguridad industrial para evitar accidentes



personales y la contaminación al ambiente, considerando que sea de producción limitada, por tratamiento térmico para cuchillas.

Partiendo de este concepto valoraremos los aspectos más significativos que desde el punto de vista ambiental se aprecian en nuestro objeto de investigación. Este proceso no produce el desprendimiento de gases tóxicos por medio de enfriamiento como ocurre en algunas instalaciones de este tipo, solamente se envía al ambiente una cierta cantidad de calor que se desprende por la transferencia del mismo a través de las paredes del horno.

El calor que reciben los operarios al extraer las piezas al salir del horno, no es significativo ya que se posee de un ventilador potente, situado de forma tal que el calor recibido sea el mínimo.



## 5.2. Estudio económico

### 5.2.1. Valoración económica de los elementos de los productos sin la aplicación de la variante del tratamiento térmico.

#### 5.2.1.1. Costos de los elementos de fabricación de las cuchillas.

- Materiales directos: 151,60 USD/año  
Acero inoxidable AISI 304 dos platinas de ¼" x 1"x 6m
- Mano de obra directa:
  - Salario del oficial I: 1,60 USD/h

**Valor total: 1,60 USD**

Pero las cuchillas son remplazadas 25 al año, por lo tanto:

**TOTAL = 64 USD/año (40 horas de trabajo)**

- Costos indirectos de fabricación:
  - Por concepto de energía consumida: 671,4 USD/año
  - Consumo de otros materiales: 100 USD/año

El costo total de los elementos de fabricación de todas las cuchillas asciende a: 987 USD/año.

#### 5.2.1.2. Costos de mantenimiento

- Mano de obra directa:  
Salario del mecánico I: 3 USD/h

Valor Total: 3USD MN

Pero las cuchillas son reafiladas 384 veces al año, por tanto:

Horas al año por cambio de cuchillas =  $384 \times 0,5h = 192h/año$  por este procedimiento

Costo Total =  $192h/año \times 3USD = 576 USD/año$

#### 5.2.1.3. Costos de los elementos de los productos sin la aplicación de la variante del tratamiento térmico



En este caso se deben tener en cuenta los costos de los elementos de fabricación de las cuchillas y los costos de mantenimiento. El costo total de los elementos de los productos sin la aplicación de la nueva propuesta tecnológica es de: 1563 USD/año.

### **5.3. Valoración económica de costos de los elementos de los productos con la aplicación de la nueva variante tecnológica**

#### **5.3.1. Costos de los elementos de fabricación de las cuchillas**

- Materiales directos: 155,40 USD/año  
Acero inoxidable AISI 420 dos platinas de ¼" x 1"x 6m
- Mano de obra directa:
  - Salario del oficial I: 1,60 USD/h

Valor Total = (1,60) = 1,60 MN

Pero las cuchillas serán remplazadas 12.5 veces al año, por tanto:

TOTAL = 32 USD/año.

- Costos indirectos de fabricación:
  - Por concepto de energía consumida: 335,7USD/año
  - Consumo de otros materiales: 100 USD/año

El costo total de los elementos de fabricación de los martillos asciende a:  
623.1 USD/año

#### **5.3.1.1. Costos de mantenimiento**

- Mano de obra directa:
  - Salario del mecánico I: 3 USD/h

Pero las cuchillas serán reafiladas 192 veces al año, por tanto:

Horas al año por cambio de cuchillas = 192 x 0,5h = 96h/año por este procedimiento

288 USD/año.

Se debe indicar que el resultado de esta valoración económica es el resultado de haber puesto ya en prueba la nueva tecnología propuesta para el problema



planteado dentro de la Industria Lojana de Especerías. Cuyos resultados nos permiten sustentar aun mas la validez de la investigación.

En este caso se deben tener en cuenta los costos de los elementos de fabricación de las cuchillas, los costos de mantenimiento y los de tratamiento térmico. El costo total de los elementos de los productos con la aplicación del tratamiento térmico es de: 911.1 USD/año.

Sin embargo con este tipo de cuchillas cabe mencionar que se disminuirá a la mitad la cantidad de paros en las envasadoras por cambio de cuchillas, lo que reportara de manera significativa un aumento en la producción de sobres remitido al a producción mensual y anual.



## CONCLUSIONES

1. El acero AISI 304 no satisface las exigencias funcionales para la fabricación de cuchillería de las máquinas de ILE.
2. De los análisis de los resultados, se deduce que los valores satisfactorios de dureza alcanzados por el tratamiento térmico doble de temple desde 980°C + revenido bajo garantizan el necesario compromiso entre la resistencia mecánica y una aceptable resistencia a la corrosión, lo que convierten al AISI 420 en un material adecuado para la fabricación de las cuchillas de las máquinas envasadoras de ILE.
3. Los ensayos realizados permitieron diseñar una variante tecnológica para dar solución al problema del deterioro de las cuchillas de la maquinaria de ILE.
4. La variante tecnológica propuesta, además de resultar económicamente favorable, soluciona un problema tecnológico, y es ecológicamente factible.



## **RECOMENDACIONES**

1. Proponer a la Industria Lojana de Especerías la introducción de los resultados obtenidos en este trabajo para dar solución al problema del deterioro de las cuchillas de la maquinaria de ILE.
2. Estudiar la posibilidad de empleo de nuevos dispositivos aplicados a maquinarias de este efecto para el corte de los sobres tipo Sachet.
3. Generalizar los resultados de esta investigación para las industrias alimenticias que radican en la ciudad de Loja, donde se utilizan estos componentes que operan bajo regímenes similares a cargas de trabajo prolongadas en el tiempo.
4. Desarrollar un estudio de factibilidad económica y tecnológica que permita determinar la variante óptima a utilizar para el empleo de tratamientos térmicos aplicados a diferentes dispositivos de la maquinaria disponible dentro de la empresa, lo que posibilitará un aumento considerable en la producción.





## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Proyecto

1. Avner, S.: Introducción a la metalurgia física. Editorial.
2. ASM Metals Reference Handbook, Second Edition. Ohio: American Society for Metals, 1984
3. Bedoez, J. y J. Gordon: Introduction to stainless steels. Hitchin, ASM International, 1999.
4. Bilmes, P.: El de falla de una estructura de acero inoxidable AISI 310 de un horno de tratamientos térmicos. En: Memorias del IV Taller Científico Internacional TECNOMAT' 2000. C. Habana, 2000
5. Brown, R.: How to select the right stainless steel. En: Advanced materials and processes. Vol. 145 (4) April, 1994. Pags, 20-24.
6. Greaves, R. H. y H. Wrighton: Metalografía Microscopía Práctica, Sexta Edición. Bilbao: Ediciones URMO, 1996.
7. [http://www.interlloy.com.au/420 Martensitic Stainless Steel Bar.htm](http://www.interlloy.com.au/420_Martensitic_Stainless_Steel_Bar.htm), 3 Mayo 2004.
8. Henry, M: Knife materials and wear: summary. En: Restaurant & Catering Australia magazine, November 2000.
9. Mariño, M: Estudio del deterioro por abrasión e impacto de los martillos de las trituradoras de sínter de Níquel + Cobalto de la Che Guevara. Tesis presentada en opción al título de Master en Ciencias. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 1999.
10. Martínez, F. y J. Gordon: Teoría y Tecnología del Tratamiento Térmico. Editorial Pueblo y Educación, C. Habana, 1985.
11. Martínez, J. y F. Martínez: Teoría y práctica del rozamiento. Editorial Pueblo y Educación. C. Habana, 1990.
12. Normas Internacionales:  
ASTM 3-95. Preparation of Metallographic Specimens.  
ASTM 139. Practice for conducting Creep, Creep-Rupture and Stress Rupture Tests of Metallic Materials.  
ASTM E 407-93. Microetching Metallographic Specimens.
13. Normas Cubanas:  
NC 10-56:86. Metalografía. Microestructura de Metales de aleaciones duras. Métodos de ensayo.



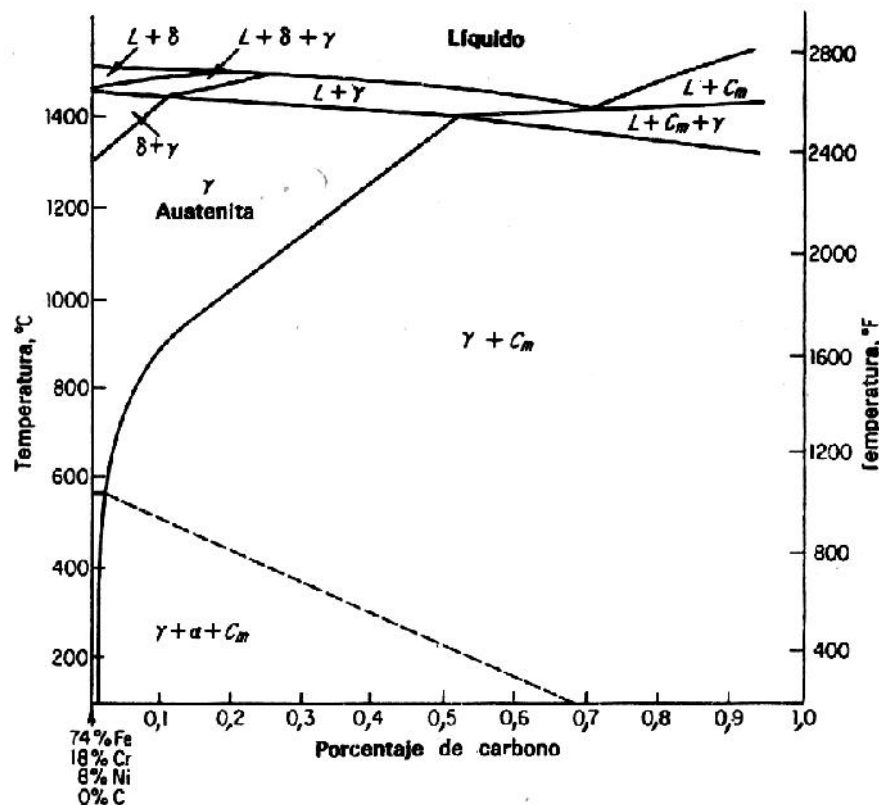
14. Rodríguez H.: Metalurgia de la soldadura. Editorial Pueblo y Educación. C. Habana, 1980.
15. Torres, Eduardo: Influencia del Cr y Ni en las propiedades mecánicas y funcionales de los dispositivos de soldadura del acero austenito al alto manganeso. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad de Matanzas Martha Abreu 2002.
16. Wegst, C.: Key to steel. Marbach, Wegst GmbH, 1995.



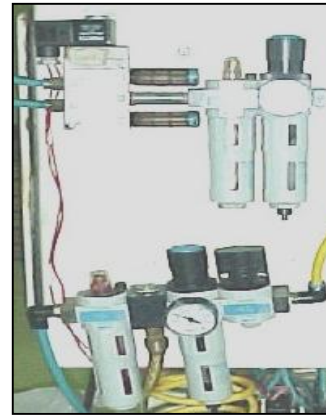
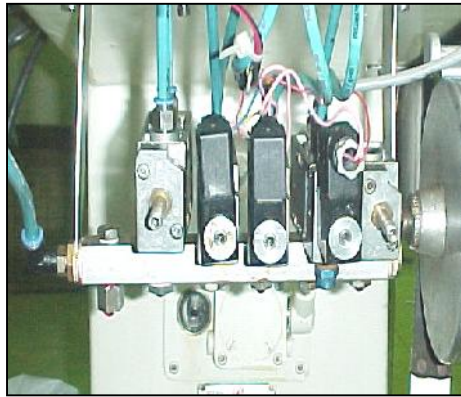
# ANEXOS

## BIBLIOGRAFIA

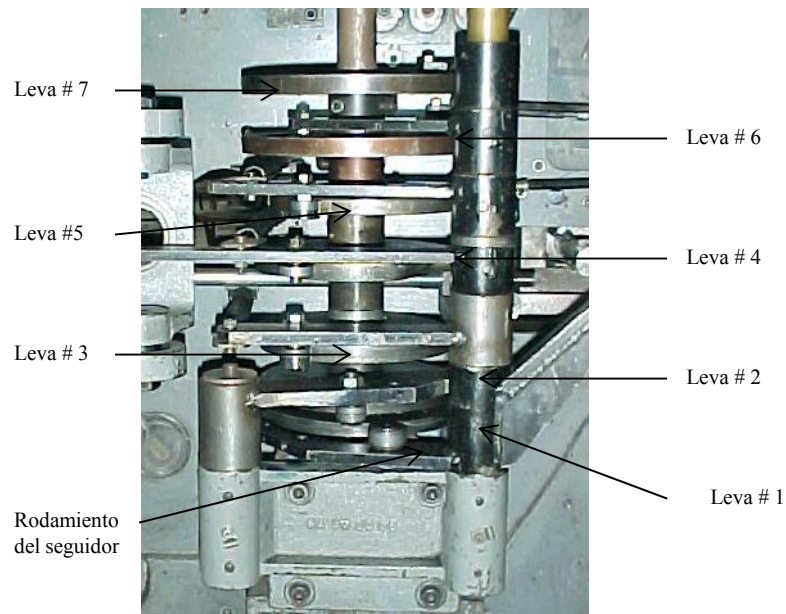
1. Avner, S.: Introducción a la metalurgia física. Editorial
2. Bedoez, J. y J. Gordon: Introduction to stainless steels. Hitchin, ASM International, 1999.
3. Brown, R.: How to select the right stainless steel. En: Advanced materials and processes. Vol. 145 (4) April, 1994. Pags, 20-24
4. [http://www.interlloy.com.au/420 Martensitic Stainless Steel Bar.htm](http://www.interlloy.com.au/420_Martensitic_Stainless_Steel_Bar.htm), 3 Mayo 2004.
5. Mariño, M: Estudio del deterioro por abrasión e impacto de los martillos de las trituradoras de sínter de Níquel + Cobalto de la Che Guevara. Tesis presentada en opción al título de Master en Ciencias. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 1999.
6. Martínez, F. y J. Gordon: Teoría y Tecnología del Tratamiento Térmico. Editorial Pueblo y Educación, C. Habana, 1985.
7. Martínez, J. y F. Martínez: Teoría y práctica del rozamiento. Editorial Pueblo y Educación. C. Habana, 1990.
8. Henry, M: Knife materials and wear: summary. En: Restaurant & Catering Australia magazine, November 2000.
9. Rodríguez H.: Metalurgia de la soldadura. Editorial Pueblo y Educación. C. Habana, 1980.
10. Torres, E.:
11. Wegst, C.: Key to steel. Marbach, Wegst GmbH, 1995.



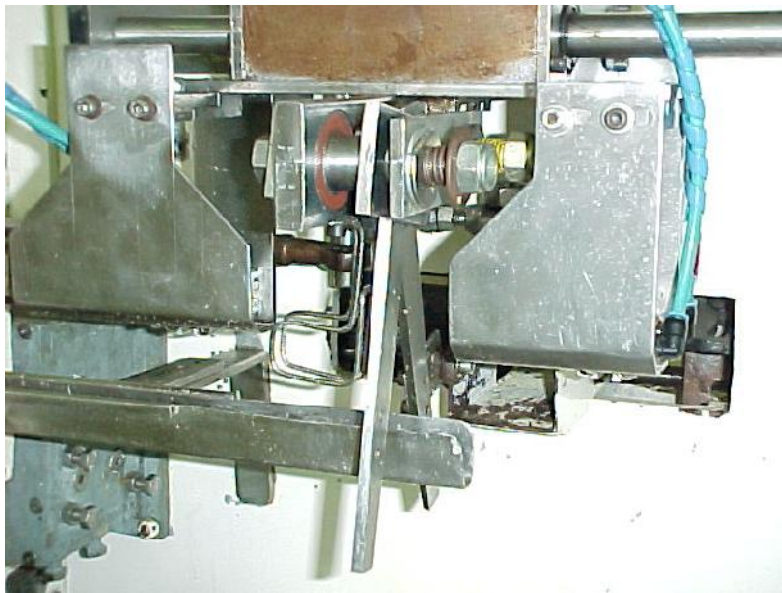
**Anexo No.1.** Digrama a escala máquinas envasadoras Roure.



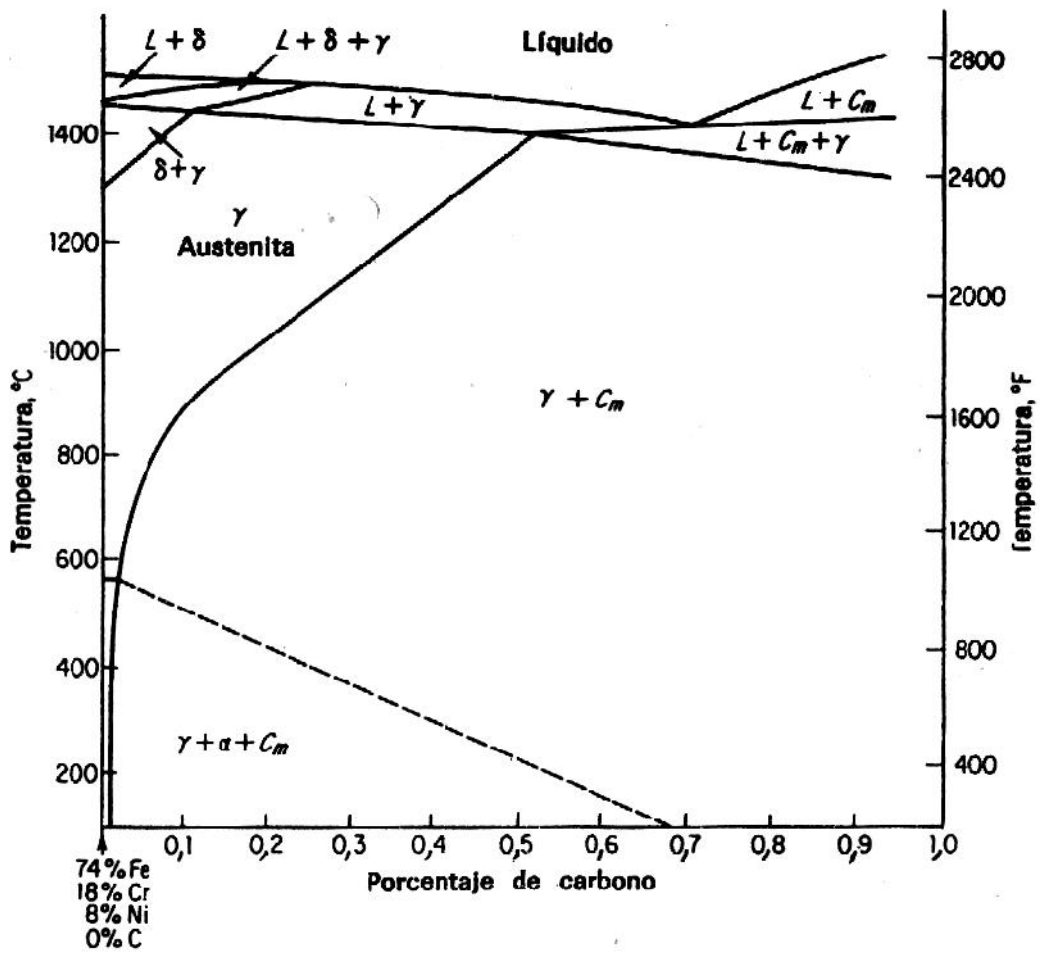
**Anexo No.2.** Sistema neumático de las máquinas envasadoras Roure.



**Anexo No.3.** Árbol de levas. Dispositivo mecánico motriz de todos los movimientos de las envasadoras Roure.



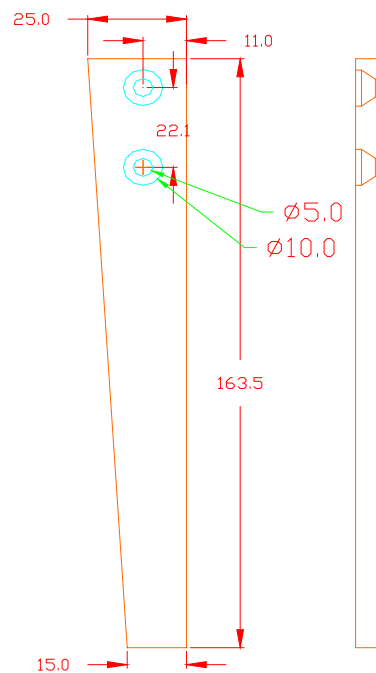
Anexo No.4. Sistema de accionamiento de las cuchillas.



Anexo No.5. Diagrama Fe, Cr, Ni, C

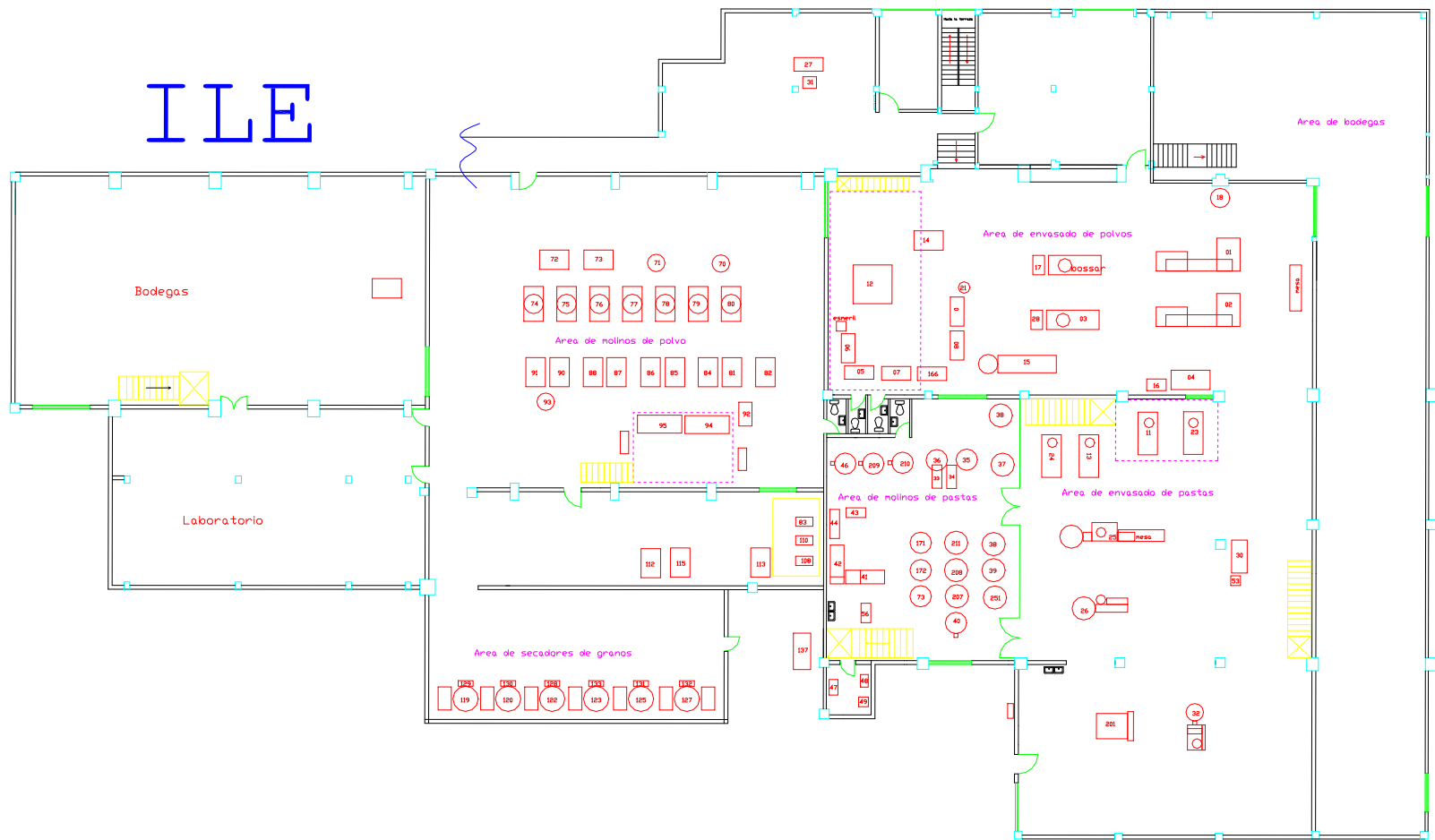
DESIGNACIÓN	COMPOSICIÓN
Glyceregia	Solución de 10ml. HNO <sub>3</sub> + 30ml. HcL + 30ml. glicerol
Reactivo Marble	Solución de 10gr. de CuSO <sub>4</sub> + 50ml. De HcL en 50ml. de agua destilada.
Reactivo Vilella	Solución de 1gr. de ácido pícrico + 5ml. HcL en 100ml de etanol absoluto.
Reactivo Beraha II	Solución de 48gr. de difluoruro de amonio + 400ml. de ácido hidrociorhídrico concentrado en 800ml. de agua destilada.
Recativo Beraha III	Solución de 50gr. de difloruro de amonio + 400ml. de ácido hidrociorhídrico concentrado en 600ml. de agua destilada.
LB I	Solución de 20gr. de difloruro de amonio + 0.5gr. de bisulfito de potasio en 10ml. de agua destilada.

**Anexo No.6.** Composición de los reactivos empleados para el ataque químico de las muestras según ASTM E262-practice A



**Anexo No.7.** Diagrama a escala del tipo de cuchillas empleados actualmente en las máquinas.





Anexo No.8. Diagrama a escala de las diferentes áreas de producción de ILE.



## Anexo No.9

### SIMBOLOGIA

---

---

**B<sub>j</sub>**.- coeficientes del modelo de regresión

**C°**.- grados centígrados.

**D**.- dimensión determinante de la pieza (mm).

**d**.- tamaño de la partícula de desgaste. (um).

**e**.- espesor de la pieza. (mm).

**e \***.-densidad de energía aparente. (N-m/)

**h**.- profundidad de capa destruida. (um).

**H<sub>0</sub>**.- hipótesis nula

**H<sub>1</sub>**.- hipótesis alternativa

**I<sub>h</sub>**.- intensidad lineal de desgaste. (mm).

**K**.- coeficiente de desgaste

**k**.- coeficiente del tipo de tratamiento térmico

**T<sub>p</sub>**.- tiempo de permanencia. (m).

**σ<sub>n</sub>**.- tensión de rotura de la unión. (Mpa).

**W'**.- razón de desgaste. (um/h).