

308917  
28



**UNIVERSIDAD PANAMERICANA**

**ESCUELA DE INGENIERIA**

**CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**ANALISIS DE FALLA DE PUNZONES INFERIORES  
PARA FABRICAR TABLETAS PLANAS BISELADAS  
DE 13 MILIMETROS DE DIAMETRO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
AREA : INGENIERIA MECANICA**

**P R E S E N T A**

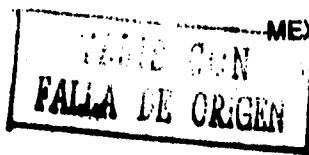
**JOSE MANUEL GONZALEZ SANDOVAL**

**DIRECTOR DE TESIS**

**Ing. Alfredo Gonzalez Ruiz**

**MEXICO, D. F.**

**1996**



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mi hijo y a mi esposa con infinito amor.

A mis padres, por su gran amor y apoyo.

A mis hermanos, con mucho cariño.

Agradezco al Doctor Piotr Rusek y al Ingeniero Ubaldo Márquez por su valiosísima ayuda en la elaboración de esta tesis.

## CONTENIDO

<b>Introducción</b>	10
<b>Capítulo 1. Generalidades</b>	
1.1 Fabricación de tabletas	12
1.1.1 Mezcla inicial	12
1.1.2 Granulación húmeda	13
1.1.3 Granulación seca	13
1.1.4 Mezcla final	14
1.1.5 Tableteado	14
1.2 Funcionamiento de una tableteadora	17
1.2.1 Principio básico de operación	17
1.2.2 Elementos constitutivos	21
1.2.2.1 Grupo motor	21
1.2.2.2 Grupo rotor	22
1.2.2.3 Sistema de lubricación	22
1.2.2.4 Alimentación	24
1.2.2.5 Dosificación	24
1.2.2.6 Grupo compresor principal	26
1.2.2.7 Grupo de presión previa	27
1.3 Manufactura de punzones	31
1.3.1 Partes de un punzón	31
1.3.2 Diseño	31
1.3.3 Formado y maquinado	33
1.3.4 Tratamiento térmico	34
1.3.5 Acabado superficial	34

## **Capítulo 2. Definición del problema**

2.1	Factores que influyen en la vida útil de los punzones	35
2.2	Condiciones de trabajo	36
2.3	Descripción de la falla	39
2.3.1	Características de la tableteadora	42
2.3.2	Características de los punzones	43
2.3.3	Condiciones de operación	43
2.4	Limitaciones de la investigación	45

## **Capítulo 3. Metodología**

3.1	Objetivos que persigue un análisis de falla	47
3.2	Pasos de un análisis	47
3.2.1	Obtención de especificaciones de la pieza y selección de las muestras para analizar	48
3.2.2	Análisis preliminar de la pieza que falló	50
3.2.3	Pruebas no destructivas	50
3.2.4	Pruebas mecánicas	51
3.2.5	Cuidado de las superficies fracturadas	52
3.2.6	Análisis macroscópico	53
3.2.7	Análisis microscópico	53
3.2.8	Selección y preparación de las muestras para análisis metalográfico	54
3.2.9	Análisis metalográfico	54
3.2.10	Determinación del mecanismo de falla	55
3.2.11	Análisis químico	60
3.2.12	Mecánica de la fractura	61
3.2.13	Pruebas bajo condiciones de trabajo similares	61
3.2.14	Análisis de toda la información, formulación de las conclusiones y elaboración del reporte	61

3.3	Procedimiento y material utilizado para la investigación	64
3.3.1	Medición de dimensiones	64
3.3.2	Medición de dureza	65
3.3.3	Análisis macroscópico	65
3.3.4	Análisis químico	66
3.3.5	Análisis metalográfico	66
<b>Capítulo 4. Resultados</b>		
4.1	Dimensiones	68
4.2	Dureza	69
4.3	Composición química	71
4.4	Macrofractografía	73
4.5	Metalografía	77
<b>Conclusiones</b>		82
<b>Apéndice</b>		87
<b>Bibliografía</b>		91

## INTRODUCCIÓN

A pesar del mejoramiento continuo en el diseño de elementos de máquinas y estructurales, de los avances tecnológicos para su manufactura, del desarrollo continuo de mejores materiales, y del cuidado en su instalación, operación y mantenimiento, las fallas siguen ocurriendo. El análisis de fallas es de vital importancia para la Ingeniería ya que busca determinar las causas que las originan, y así evitar que ocurran fallas similares en el futuro. De esta forma, se obtiene información esencial para mejorar el diseño, los procesos de fabricación, y las condiciones de operación de los elementos.

En general, se dice que una falla ocurre cuando las condiciones de un elemento son tales que éste ya no funciona correctamente, lo cual implica que no necesariamente debe ocurrir una fractura, también incluye situaciones de corrosión y desgaste. Sin embargo, en la presente tesis se hará mayor énfasis en el fenómeno de la fractura.

Un análisis de falla puede definirse como el estudio de la pieza que falló y de las condiciones en que ocurrió, para determinar las causas que la originaron. En nuestro caso particular, se investigarán las causas que provocaron la falla de un juego de punzones inferiores para fabricar tabletas planas biseladas de 13 mm de diámetro, y establecer las medidas correctivas para evitar fallas similares en el futuro.

En el capítulo uno se da una breve explicación del proceso para fabricar tabletas, así como el funcionamiento de las máquinas tableteadoras, con el objetivo de familiarizar al lector con el caso.

En el capítulo dos se hace una presentación del problema a resolver en la que se describe la apariencia de la falla y las condiciones en las que ocurrió. También se mencionan las limitaciones de la investigación y los problemas que se enfrentaron para su desarrollo.

En el capítulo tres se expone la metodología aplicada para llevar a cabo el análisis, se da una pequeña introducción al análisis de fallas, explicando brevemente en qué consiste cada uno de los pasos que se siguen en un análisis típico. En este capítulo se hace una corta descripción de las fallas más comunes y su apariencia, para tener una referencia que nos ayude a identificar el tipo de fractura que ocurrió en los punzones. Asimismo, se describen los análisis que se practicaron en nuestro particular caso, mencionando el material y equipo empleado.

Por último, el capítulo cuatro presenta los resultados de los análisis realizados, aportando la evidencia que justifica las conclusiones a las que se llegaron. En las conclusiones se mencionan las causas que originaron la falla, se describe la secuencia en que se desarrolló la fractura, se hacen las recomendaciones pertinentes para evitar fallas similares y también algunas sugerencias tanto para los fabricantes de punzones como los de tabletas.



## **CAPÍTULO UNO GENERALIDADES**

### **1.1 FABRICACIÓN DE LAS TABLETAS**

En general, un medicamento está constituido por un principio activo y por excipientes. El principio activo es el elemento que causa una reacción deseada en el organismo. Por otra parte, los excipientes tienen varias funciones, una de las principales es la de controlar la velocidad a la que ocurrirá dicha reacción y el lugar donde el organismo debe absorber el principio activo. También funcionan como material de relleno, como lubricantes, aglutinantes, etcétera.

En una tableta, los excipientes y el principio activo forman una estructura que permite la desintegración adecuada de la tableta, es decir, que el principio activo se libere en el organismo en el lugar deseado y a la velocidad necesaria.

El proceso de fabricación varía según la formulación del producto y de sus características. Pero en general, como puede observarse en los dos diagramas de flujo (Figuras 1.1 y 1.2), se distinguen los siguientes pasos:

#### **1.1.1 Mezcla inicial**

En este paso se busca obtener una mezcla homogénea en la que las materias primas (excipientes y principio activo) estén bien distribuidas. Los excipientes que se agregan

en esta etapa son principalmente aglutinantes, material de relleno y lubricantes.

Después de la mezcla inicial, el proceso puede seguir dos caminos diferentes dependiendo del tipo de materias primas: granulación seca o granulación húmeda.

### **1.1.2 Granulación húmeda**

Utilizando el mismo mezclador u otro equipo, se agrega algún aglutinante como agua, almidón, gelatinas especiales, que combinado con la acción mecánica del agitador del equipo, provocan que las partículas del principio activo se adhieran a los excipientes para formar el gránulo deseado. Es importante que las materias primas sean inertes al aglutinante.

Posteriormente, se lleva a cabo un proceso de secado para quitar el agua de la "mezcla húmeda" que se había obtenido. En caso de que el producto tienda a formar aglomerados, puede aplicarse un malleo o tamizado previo al secado para obtener un tamaño de partículas uniforme, ya que dichos aglomerados sólo secarían en su parte exterior, permaneciendo el interior húmedo.

Una vez seco el granulado, si se desea obtener un tamaño de grano más pequeño, se tamiza hasta obtener el tamaño buscado.

### **1.1.3 Granulación seca**

Si las materias primas son sensibles al agua y al calor, deberá aplicarse el proceso conocido como granulación seca. En este proceso también se utilizan aglutinantes pero son de tipo cera.

La granulación seca consiste en pasar la mezcla a través de un par de rodillos para compactarla y aglutinarla hasta lograr la relación buscada entre gránulos y polvos finos.

Después de que la mezcla es compactada, se hace pasar por un tamizador para ajustar el tamaño de partícula.

#### **1.1.4 Mezcla final**

Tanto en el proceso de granulación húmeda como en el de granulación seca, es necesario efectuar una mezcla final en la que se agregan otros excipientes, cuya finalidad es la lubricación entre las partículas del granulado (lubricantes polvo-polvo), así como entre las partículas y la tolva de alimentación de las tableteadoras (lubricantes polvo-metal).

El producto semiterminado antes de ser tableteado recibe el nombre de granulado.

#### **1.1.5 Tableteado**

El proceso de tableteado busca compactar el granulado hasta obtener el peso, dureza y dimensiones de la tableta, mediante fuerzas de compresión.

Es importante tener el tamaño de grano y la relación de gránulos y polvos finos correctos, ya que de esto dependerá la apariencia de la tableta y que las fuerzas de compresión no sean elevadas. Si tenemos un tamaño de grano muy grande y pocos polvos finos, la tableta será porosa y se necesitarán mayores fuerzas de compresión para lograr una buena apariencia. Por otro lado, si la cantidad de polvos finos es alta, la tableta tenderá a desmoronarse.

## DIAGRAMA DE FLUJO FABRICACION DE TABLETAS GRANULACION HUMEDA

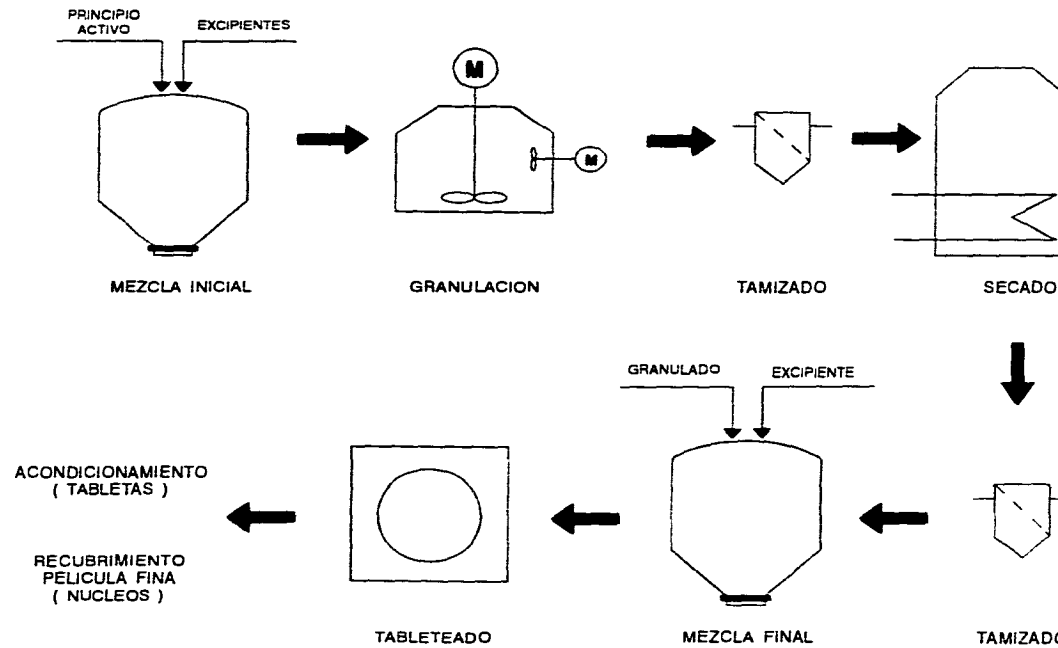


Figura 1.1

## DIAGRAMA DE FLUJO FABRICACION DE TABLETAS GRANULACION SECA

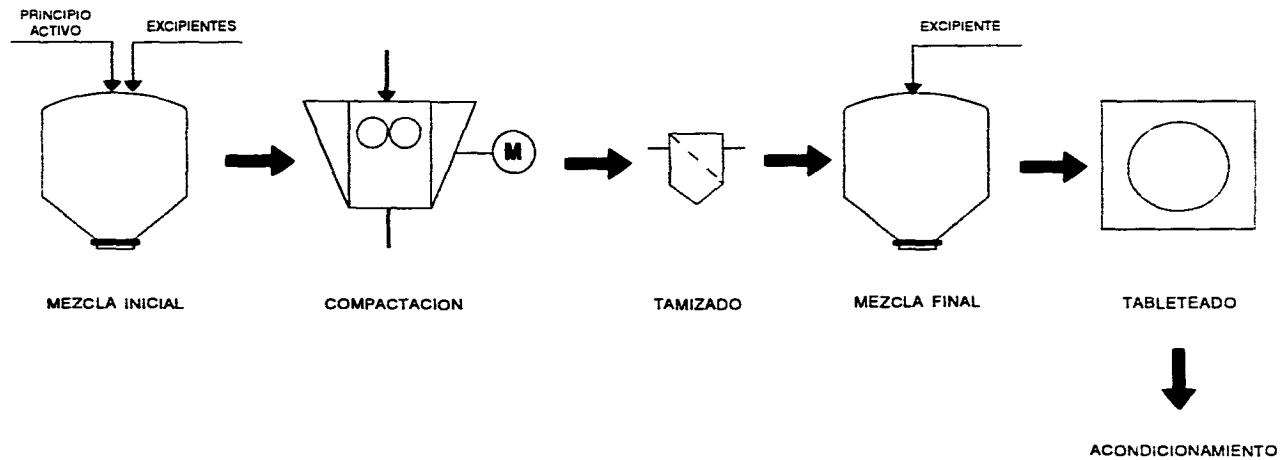


Figura 1.2

Como puede verse en la Figura 1.1, en algunas tabletas en particular se aplica algún recubrimiento de película fina. Este recubrimiento evita que los ácidos del estómago desintegren la tableta en este lugar, permitiendo que la tableta sea desintegrada y absorbida en el intestino.

Por último, una vez fabricadas las tabletas, éstas pasan por los procesos de acondicionamiento, esto es, la secuencia de procesos de empaque hasta tener el producto en su presentación final.

## **1.2 FUNCIONAMIENTO DE UNA TABLETEADORA**

### **1.2.1 Principio básico de operación**

La función de una tableteadora consiste en comprimir el granulado hasta obtener los valores deseados de altura, peso y dureza de las tabletas, aplicando fuerzas de compresión a punzones superiores e inferiores para compactar el granulado dentro de una matriz. La forma de la tableta dependerá de la forma de la matriz y de la cara de los punzones.

Las primeras tableteadoras fueron prensas de tornillo en las que el granulado se alimentaba a una sola matriz y que al aplicar una fuerza sobre un punzón, se compactaba el granulado hasta formar la tableta.

Desde la aparición de las prensas rotativas, todas las tableteadoras funcionan con el mismo principio. Las matrices giran con el plato portamatrices, conjuntamente, los punzones giran pero describiendo una trayectoria oscilatoria, ya que permiten la

alimentación del granulado (descenso de los punzones inferiores) y su posterior compactación (ascenso de los punzones inferiores y descenso de los punzones superiores).

Los movimientos de ascenso y descenso de los punzones se logran mediante levas que permanecen fijas, guiando el movimiento tanto de punzones inferiores como superiores. La compactación se logra mediante rodillos que fuerzan el movimiento de los punzones para penetrar dentro del orificio de la matriz.

Todas las tableteadoras rotativas funcionan de la misma manera, sin embargo, la presente tesis se basará en las características de las tableteadoras de las marcas Kilian y Fette. En la Figura 1.3 puede verse el diagrama de funcionamiento de una tableteadora Kilian RX-51, la máquina opera de la siguiente manera:

Al comienzo del ciclo, los punzones inferiores son obligados a descender a través de la leva de llenado, en esta zona el granulado entra dentro de la cavidad formada por las matrices y la cara de trabajo de los punzones inferiores. Los punzones superiores comienzan a descender y los inferiores continúan descendiendo hasta llegar a la zona de precompresión.

La alimentación del producto se ajusta variando la velocidad del dispositivo de alimentación (señalado como zapata de alimentación en la figura 1.3), cambiando la leva de alimentación y ajustando la leva de dosificación.

Al igual que los punzones y matrices, la leva de llenado puede cambiarse para fabricar distintos productos. Mediante la leva de dosificación pueden hacerse ajustes finos del peso de la tableta variando la altura de llenado dentro de la matriz. Después de la leva de dosificación, se encuentra localizada una leva con un conmutador eléctrico para reducir el llenado durante las fases de arranque y de parada.

En la leva que guía el movimiento de descenso de los punzones superiores, suele colocarse un sensor para medir la dificultad de movimiento de éstos y así prevenir un desgaste excesivo de las levas y las cabezas de los punzones.

En la zona de precompresión, un par de rodillos provocan que los punzones inferiores y superiores se muevan en direcciones encontradas. Posteriormente, al pasar por los rodillos de presión principal, las caras de los punzones se acercan aún más hasta compactar el granulado a su dimensión final.

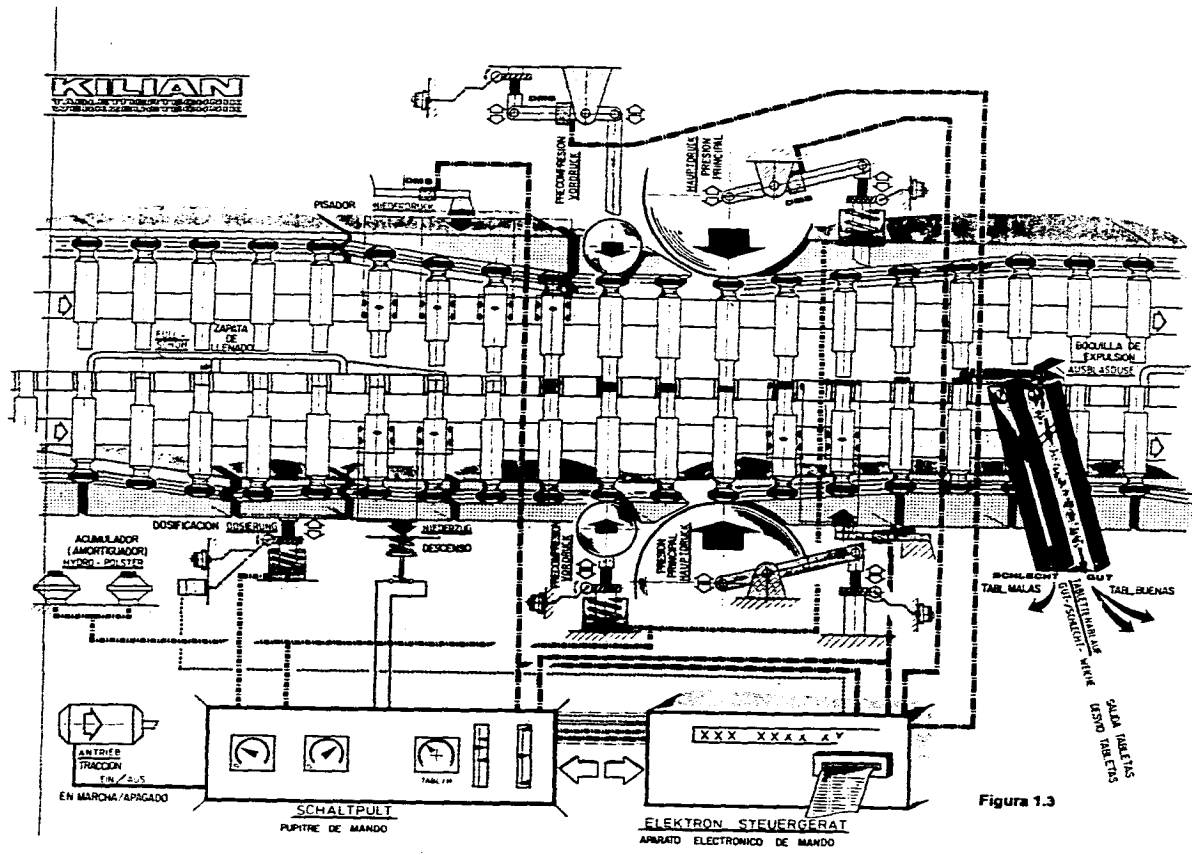
La presión inicial sirve para ventilar la matriz después del llenado y reducir el tiempo del proceso de compresión principal, aumentando así el rendimiento de la máquina. Este efecto se puede obtener con una fuerza reducida de presión inicial pues una fuerza demasiado alta no mejora el rendimiento pero puede provocar un desgaste acelerado de los componentes de la máquina.

La presión que se ejerce sobre los punzones depende de la separación entre los rodillos de presión superiores e inferiores. La presión admisible que soportan los punzones depende de sus dimensiones y de su forma, por ello existe un sistema hidráulico que funciona como amortiguador y que se ajusta para que cuando se alcance el valor de presión establecido, el rodillo inferior se desplace y se detenga la máquina.

Por último, ambos punzones comienzan a ascender para expulsar la tableta ya formada. Al pasar por la boquilla de expulsión, por medio de un sensor, las tabletas mal formadas (rotas, incompletas, etc.) son desviadas y las tabletas buenas son dirigidas hacia un contenedor.

En la leva de expulsión también se coloca un sensor para medir la fuerza que se está ejerciendo para liberar la tableta de la matriz. Cuando esta fuerza es alta, se deben hacer los ajustes pertinentes para evitar que las tabletas se rompan.





### **1.2.2 Elementos constitutivos**

Como cualquier otra máquina, una tableteadora rotativa está compuesta por varios elementos que en conjunto, llevan a cabo la operación de formar tabletas a partir de granulado.

Según el producto que se fabrique, lo único que deberá cambiarse son las levas de llenado, los punzones y las matrices. Estos dos últimos elementos constituyen el instrumental de la máquina, no son propiamente piezas de la tableteadora.

Los fabricantes de este tipo de maquinaria suelen clasificar las partes del equipo en grupos. Aquéllos que se mencionan a continuación son los más importantes.

#### **1.2.2.1 Grupo motor**

Es el conjunto de elementos que transmiten movimiento al equipo. Dependiendo del fabricante, se pueden utilizar dos sistemas distintos: el primero consiste en un motor de corriente alterna unido a un variador de velocidad, el segundo consta de un motor de corriente continua y un variador de voltaje. En ambos casos, a través de una banda dentada se transmite movimiento a un reductor de velocidad de tipo corona y sinfín, para hacer girar a lo que llamaremos grupo rotor.

El eje del grupo rotor está apoyado en rodamientos de rodillos cónicos, sometidos a tensión previa y con gran separación. De esta forma se asegura una marcha exacta en redondo y sin tambaleo.

### **1.2.2.2 Grupo rotor**

El grupo rotor está formado por un eje, el plato portamatrices y los platos con los alojamientos para los punzones inferiores y superiores. El alojamiento de los punzones superiores permite que el aceite lubricante pueda repartirse en él. Desde este punto, el aceite lubricante pasa a la zona de las guías de los punzones inferiores y se distribuye uniformemente a todos los punzones.

En sentido radial al plato portamatrices se encuentran los orificios para los tornillos de fijación de las matrices. Estos tornillos van dispuestos entre los huecos de alojamiento de las matrices. Los tornillos de fijación tienen en su punta un cono de apriete, lo que asegura que las matrices queden a nivel con el plato portamatrices.

En la guía de los punzones inferiores, dispuestos en forma radial, se encuentran unos huecos para los frenos de punzón. Estos frenos consisten en una pieza de presión sometida a esfuerzo elástico y evitan que los punzones inferiores, a elevada velocidad, puedan saltar o caer sin control.

### **1.2.2.3 Sistema de lubricación**

El sistema de lubricación comprende los siguientes elementos: una bomba eléctrica, una válvula dosificadora para lubricar las levas de llenado (y con ello, las cabezas de los punzones inferiores), y un bloque de distribución con dos o tres válvulas dosificadoras para lubricar las cabezas de los punzones superiores y los vástagos de los punzones inferiores.

El sistema funciona de la siguiente forma: la bomba eléctrica impulsa el aceite a las válvulas dosificadoras, en éstas, cuando se alcanza una presión preestablecida, el

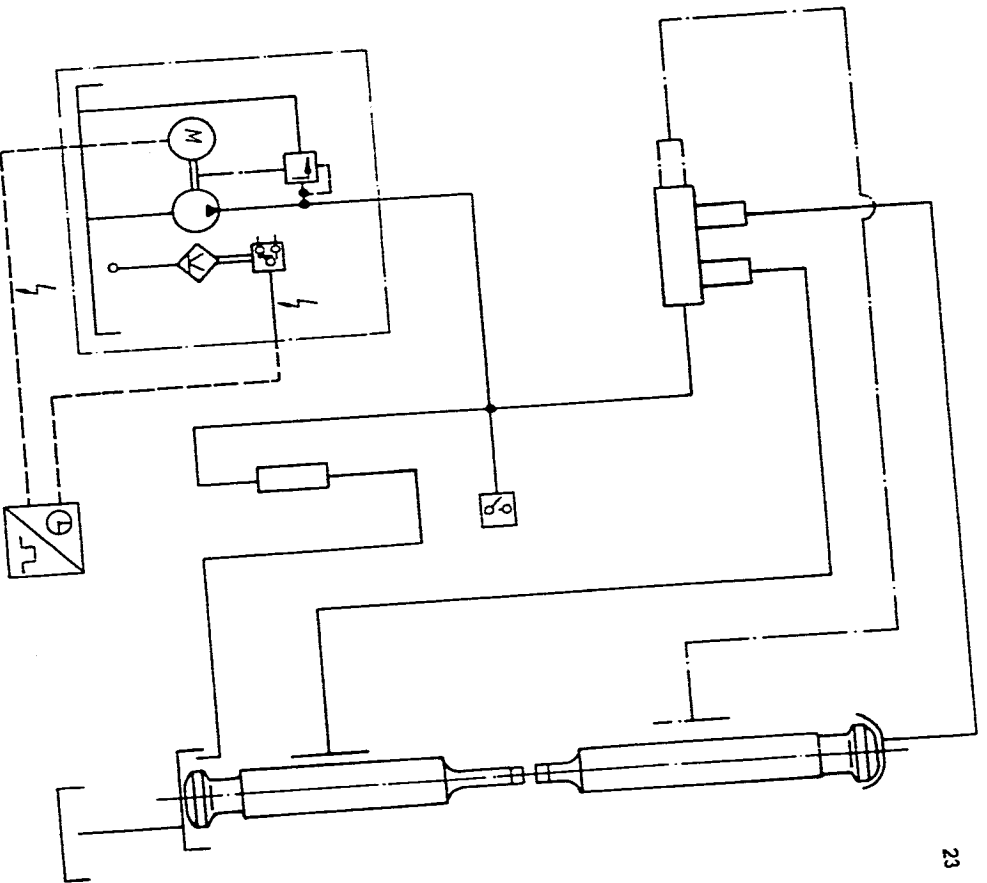


Figura 1.4 Sistema de lubricación de una tableteadora FETTE PT2080

reducido volumen de aceite contenido en la cámara de la válvula es enviado al punto de lubricación respectivo. El aceite sobrante pasa por un orificio en la parte inferior del cuerpo de la máquina a un depósito colector.

En la Figura 1.4 se muestra el diagrama de flujo del sistema de lubricación.

#### **1.2.2.4 Alimentación**

A través de la tolva, el granulado pasa a un dispositivo que mantiene un nivel adecuado de éste, y así permite que penetre fácilmente dentro de las matrices conforme van pasando.

#### **1.2.2.5 Dosificación**

La dosificación del granulado se realiza mediante levas y un dosificador. Las levas de llenado son piezas removibles que son cambiadas según el producto que se vaya a fabricar, dependiendo de las características del material a comprimir y el grado de compresión requerido.

El ajuste de la altura de llenado se realiza mediante el dispositivo dosificador. A través de una transmisión de tornillo sinfín que puede moverse mediante una perilla o un servomotor, el dispositivo sube o baja de tal forma que exista un margen de dosificación de 1 a 2 mm, ajustándose previamente a la altura de la leva de llenado. En la Figura 1.5 se muestra el dispositivo dosificador de una tableteadora FETTE PT2080.

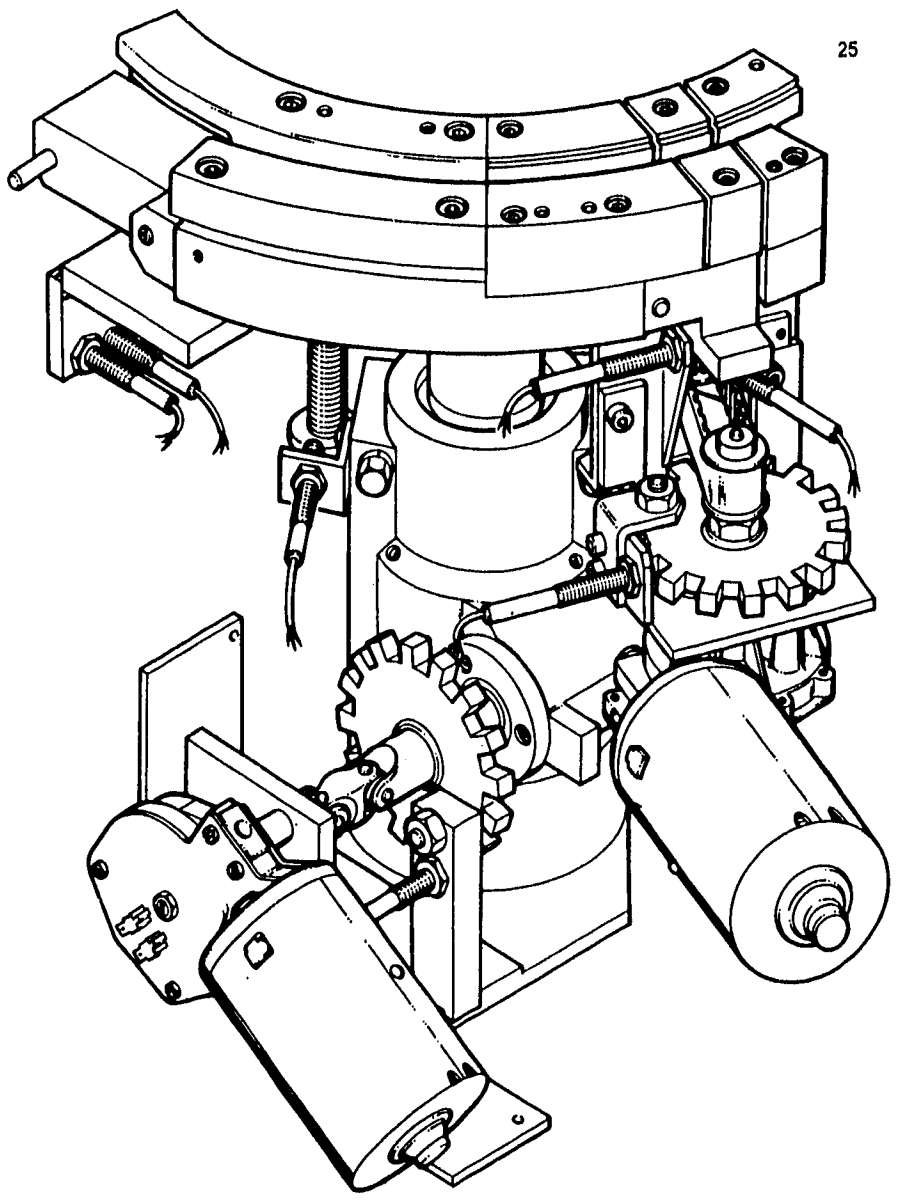


Figura 1.5 Sistema dosificador de una tableteadora FETTE PT2080

### **1.2.2.6 Grupo compresor principal**

Se compone de un rodillo superior y otro inferior, suspendidos dentro de un bastidor cerrado. El rodillo superior va unido al inferior en un lado, por medio de una robusta barra de tracción. En el lado contrario, la barra de tracción no sólo establece la unión entre los dos rodillos de presión sino que también sirve para ajustar la zona de prensado y la altura de las tabletas.

La posibilidad de ajustar la profundidad de penetración de los punzones se necesita para poder elegir el sector más favorable de la matriz donde se prensarán las tabletas. Las razones por las que se modifica la profundidad de penetración son varias, algunas de las principales son las siguientes: para tener un desgaste uniforme de las matrices, para lograr una compresión simétrica del material a moldear a fin de que la zona neutra se halle a la mitad de altura de la tableta, para tener una carrera de expulsión corta al trabajar con material muy adherente, etcétera. La altura de la tableta se ajusta para dar mayor o menor dureza a ésta.

Dependiendo de la máquina, el ajuste se realiza a través de una transmisión de tornillo sinfín, accionada manualmente mediante una perilla o por un servomotor. Cuando se modifica la profundidad de penetración del punzón superior en la matriz, tanto el rodillo de presión superior como el inferior se desplazan hacia abajo o hacia arriba según sea el caso. Por otro lado, cuando se modifica la altura de la tableta, solamente el rodillo inferior es el que se mueve.

Las fuerzas laterales que actúan sobre el grupo compresor son absorbidas por soportes entre las placas de los rodillos, evitando que éstos se inclinen. Las presiones de moldeo son absorbidas por un bastidor cerrado, puesto que la barra de tracción está apoyada en uno de sus lados en un amortiguador hidráulico. Este sistema permite que los rodillos se desplacen cuando se alcanza el valor de la presión al que se ajustó la

máquina, evitando así una posible fractura de los punzones; este valor depende de la forma y dimensiones de los punzones.

En las placas de los rodillos, se coloca una galga extensiométrica para medir la deformación elástica de éstas, y así obtener indirectamente la presión a la que son sometidos los punzones.

En las Figuras 1.6 y 1.8 se muestra el grupo compresor de una tableteadora FETTE PT2080.

#### **1.2.2.7 Grupo de presión previa**

El grupo de presión previa está formado por un par de rodillos inclinados, unidos mediante una barra de tracción. Esta barra está apoyada en un amortiguador para absorber las fuerzas debidas a la presión previa. Las fuerzas de precompresión se miden de la misma forma que se describió en el punto 1.2.2.6.

La profundidad de penetración inicial del punzón superior en la matriz debe ser igual o de 0.5 a 1 mm menor que aquella del rodillo de presión principal.

El grupo de presión previa funciona de manera similar al grupo de presión principal, y su finalidad ya fue explicada en el punto 1.2.1.

En las Figuras 1.7 y 1.9 se muestra el grupo de presión previa de una tableteadora FETTE PT2080.



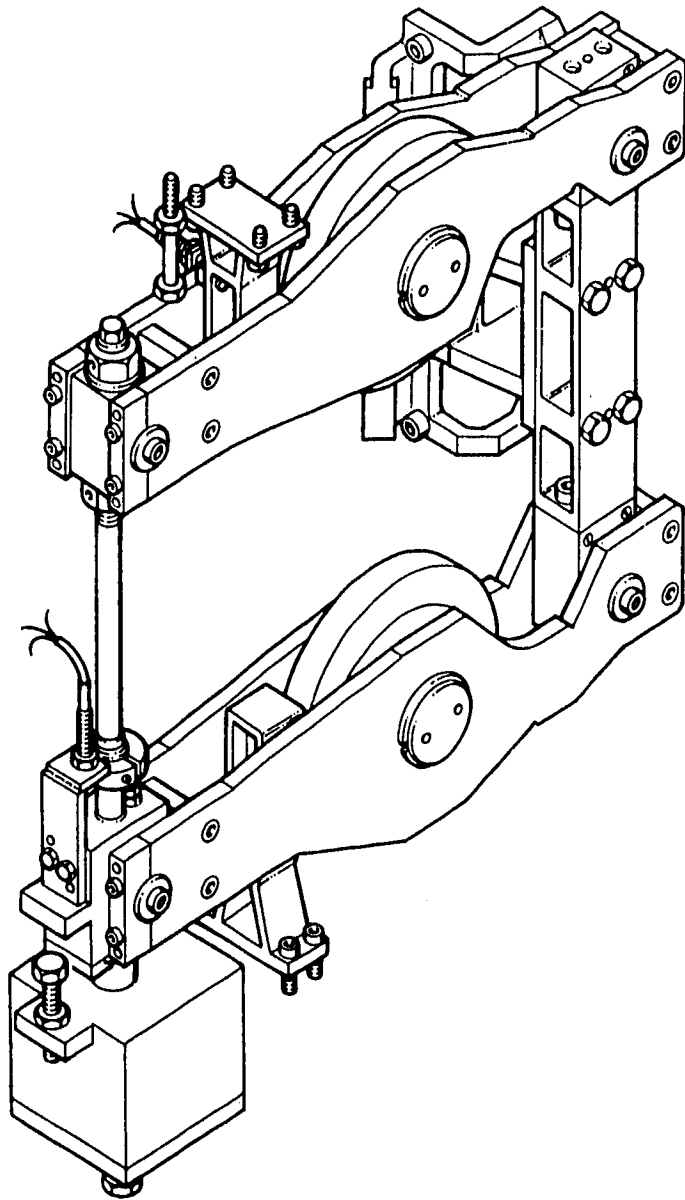


Figura 1.6 Grupo compresor principal de una tableteadora FETTE PT2080

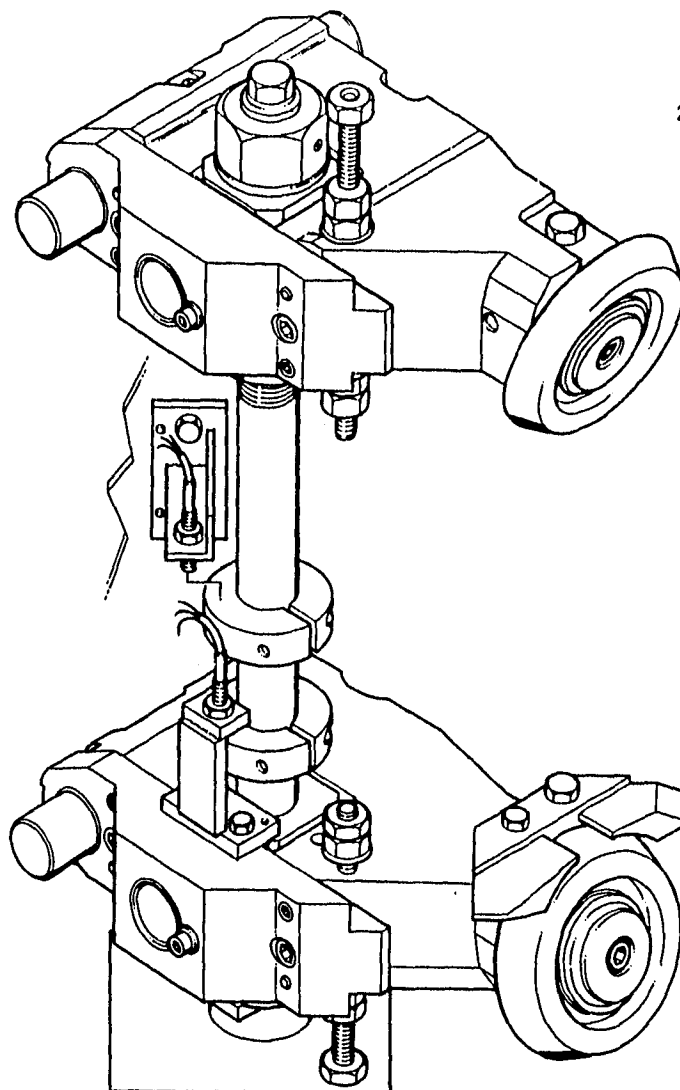
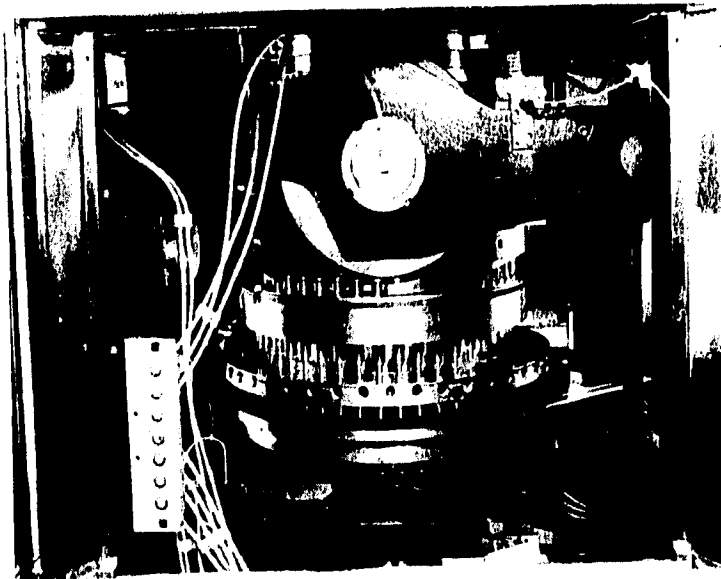
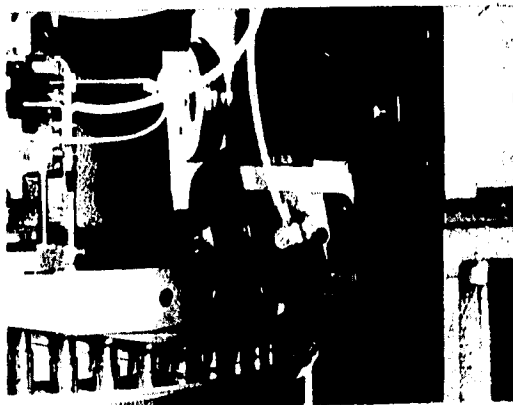


Figura 1.7 Grupo de presión previa de una tableteadora FETTE PT2080



**Figura 1.8** Rodillos de presión principal de una tableteadora FETTE PT2080



**Figura 1.9** Rodillos de presión previa de una tableteadora FETTE PT2080

## **1.3 MANUFACTURA DE PUNZONES**

### **1.3.1 Partes de un punzón**

La figura 1.10 muestra las partes de un punzón. Dependiendo del fabricante, la geometría de los punzones superiores variará en mayor o menor medida de los inferiores, sin embargo, pueden distinguirse las siguientes partes:

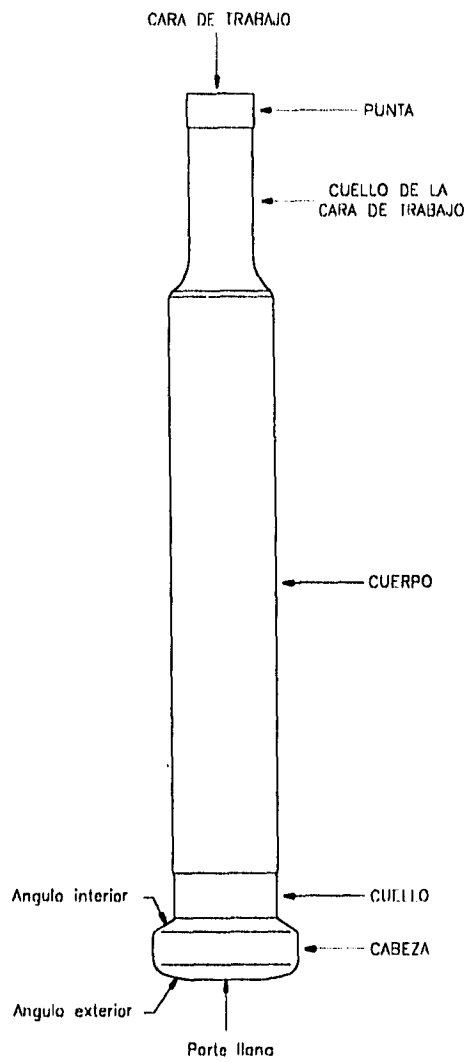
1. Cabeza
2. Cuello
3. Cuerpo
4. Cuello de la cara de trabajo
5. Punta
6. Cara de trabajo.

### **1.3.2 Diseño**

En la actualidad, los fabricantes de máquinas tableteadoras han buscado estandarizar los punzones y matrices para que puedan ser utilizados en cualquier equipo, por lo que el diseño de estos elementos se limita prácticamente al diseño de la cara de trabajo de los punzones.

La fase de diseño de punzones comienza con el diseño de la tableta: geometría, logotipos, símbolos, leyendas, etc. Para lograr un adecuado diseño debe hacerse un balance entre su complejidad y la facilidad de su manufactura, tomando en consideración los siguientes factores:

- Presión requerida para compactar el granulado.
- Tendencia del material a adherirse en la cara de trabajo.
- Facilidad para liberar la tableta del punzón inferior.



**Figura 1.10** Partes de un punzón

Aunque el fabricante de las tabletas puede establecer la geometría que tendrán, las formas más comunes que se utilizan son dos: oblonga y circular. También el "perfil" de la tableta puede variar (ver Tabla 2.1), los más usados son los siguientes:

- Plana
- Cóncava moderada
- Cóncava estándar
- Cóncava profunda
- Doble radio
- Plana biselada
- Cóncava biselada
- Esférica.

### **1.3.3 Formado y maquinado**

La materia prima de la que se parte son barras de acero herramental (puede utilizarse acero A2, D2, S1, S7, según el criterio del fabricante) laminadas en caliente, éstas son entregadas en su condición de recocido.

Estas barras son cortadas a una longitud cercana a la del punzón. Uno de los extremos de estos tochos es refrentado, y el otro que formará la punta del punzón, se carea para dar una forma propicia para el estampado. Esta superficie se pule hasta dar un acabado tipo espejo.

En una prensa hidráulica, se lleva a cabo un estampado en frío de la superficie pulida. El macho de estampado tiene grabado el logotipo o la leyenda que quedará marcada

en la cara de trabajo del punzón.

Una vez estampada la pieza, se maquina en dos pasos: primero el cuerpo, el cuello y la punta, y posteriormente la cabeza.

#### **1.3.4 Tratamiento térmico**

Dependiendo del acero que se utilice para fabricar los punzones, se aplica un tratamiento térmico específico. En el caso particular de estudio de la presente tesis, los punzones ya con la forma deseada son sometidos a un temple al alto vacío y posteriormente a dos ciclos de revenido para lograr una dureza promedio de 53 a 60 Rockwell C, sin perder la tenacidad requerida para sus condiciones de trabajo.

#### **1.3.5 Acabado superficial**

Por último, las superficies del punzón que estarán en constante fricción durante su funcionamiento en la máquina tableteadora, como son la cabeza, el cuerpo y la punta, son rectificadas. Para el cuerpo y la punta, se utiliza una rectificadora cilíndrica, mientras que para la cabeza, el rectificado se realiza en el torno, utilizando insertos de material cerámico.

La superficie grabada, se pule nuevamente hasta dar un acabado tipo espejo.

## **CAPÍTULO DOS**

### **DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

#### **2.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VIDA ÚTIL DE LOS PUNZONES**

La vida del herramental (punzones y matrices) de una prensa rotativa para fabricar tabletas depende principalmente de los siguientes factores: características del material a compactar, condiciones de trabajo de la máquina, diseño de los punzones y matrices, material del que están hechos, y proceso de manufactura.

Existen granulados que son muy difíciles de compactar, en los que es necesario aplicar una fuerza grande para conseguir un buen aspecto de las tabletas. En otros casos, el granulado puede ser muy abrasivo y causar un desgaste acelerado de la punta de los punzones, principalmente la cara de trabajo, o bien, puede ser muy sensible al calor y endurecerse cuando se eleva ligeramente la temperatura.

Las condiciones de trabajo de la máquina están fuertemente ligadas no sólo con su adecuado manejo y mantenimiento, también con las características físicas de la formulación: tamaño de grano, cantidad de polvos finos, distribución del principio activo y excipientes, sensibilidad al calor y fluidez. Un granulado con un tamaño de grano grande, muchos polvos finos, sensible al calor, mala distribución del principio activo y excipientes y fluidez deficiente, será muy difícil de compactar ya que tiende a adherirse a la cara de trabajo del punzón, dificulta su alimentación a las matrices y se endurece al aumentar la temperatura, dando un mal aspecto a la tableta. Como se mencionó anteriormente, en estos casos la máquina debe trabajar con fuerzas aitas de



compresión, causando un desgaste más rápido de punzones y matrices.

El diseño de punzones y matrices depende de la forma y dimensiones de la tableta. En general, los punzones para fabricar tabletas con diámetro pequeño o con un "perfil" con cambios bruscos, son más frágiles.

En todos los casos, la selección del tipo de material del que se fabricarán los punzones estará en función del tipo de granulado. Su tenacidad, dureza y resistencia a la fatiga deberán adecuarse a las necesidades. Una mala selección del material y una deficiente fabricación del herramental disminuirán su vida y aumentarán las posibilidades de una falla prematura.

## **2.2 CONDICIONES DE TRABAJO**

Por las características de las prensas rotativas, el herramental está sujeto a un estado cíclico de esfuerzos de tracción y compresión, y fricción inherente al proceso.

Como puede verse en la Figura 1.3, durante la etapa de alimentación los punzones superiores se mantienen a una altura constante y los inferiores descienden. En esta fase del ciclo, los punzones inferiores son sometidos a esfuerzos de tensión de baja magnitud, en tanto que los superiores permanecen libres de esfuerzos considerables. Cuando estos últimos comienzan a descender a través de la leva de control, quedan sujetos a esfuerzos de compresión.

Al llegar los punzones superiores e inferiores a la zona de precompresión, un par de rodillos los obliga a moverse uno contra el otro. En esta zona, el granulado se encuentra contenido entre la cara de trabajo del punzón superior, la superficie del orificio de la matriz, y la cara de trabajo del punzón inferior, de tal forma que estas

superficies quedan sujetas a una carga uniformemente distribuida, mientras que el resto del punzón está sometido a un estado de esfuerzos de compresión. La misma situación ocurre en la zona de presión principal, pero las fuerzas son de mayor magnitud.

Por último, durante la carrera de expulsión de la tableta ya formada, el punzón inferior es sometido a fuerzas de compresión de una magnitud que depende de las características del granulado, ya que si éste tiende a adherirse a las paredes de la matriz, la tableta ya formada presentará mayor oposición a ser desplazada hacia el exterior del orificio de la matriz. Paralelamente, los punzones superiores comienzan su ascenso suave, por lo que el estado de esfuerzos de tensión en el que se encuentran es pequeño.

La falla más crítica de los punzones ocurre cuando se fractura la cabeza de alguno de éstos. Si la cabeza del punzón superior se separa, el cuerpo puede caerse a través del hueco que guía el movimiento de éste, ocasionando un daño severo a la tableteadora. Cuando el cuerpo se queda en el hueco y la punta en la matriz, se daña el sistema de alimentación o cualquier otra cosa que se encuentre a su paso. Si es un punzón inferior, la cabeza se atasca en las levas, dañándose severamente, así como otras partes de la tableteadora.

Durante el funcionamiento de una tableteadora, diferentes superficies de los punzones y de la máquina entran en contacto. En los punzones inferiores, la parte llana de la cabeza y el ángulo exterior hacen contacto con el rodillo de presión inferior, la leva de ajuste de peso y la leva de expulsión, mientras que el ángulo interior hace contacto principalmente con la leva de descenso.

De igual forma, la parte llana del punzón superior hace contacto con el rodillo de presión superior. El ángulo interno hace contacto con la leva superior de empuje, y el ángulo externo hace contacto con la leva inferior y el rodillo de presión.









Cuando el equipo trabaja adecuadamente, ocurre un ligero desgaste de la cabeza del punzón, el cuerpo, la punta y la cara de trabajo. Desafortunadamente, no siempre es posible trabajar en las condiciones ideales.

El desgaste más común ocurre en el ángulo interior de la cabeza del punzón inferior y es causado por un descenso forzado, ocasionado por el apriete del cuerpo del punzón dentro del hueco que guía su movimiento. Por diseño, el diámetro de la parte llana de la cabeza es menor que el diámetro del cuello, esto asegura que toda la carga bajo el rodillo de presión se distribuya a través de todo el punzón. Cuando el diámetro de la parte llana de la cabeza excede el diámetro del cuello, toda la carga está inicialmente sobre la parte llana de la cabeza, lo que puede ocasionar que una sección de ésta se separe del resto del punzón, causando los daños que ya fueron descritos.

Con la finalidad de disminuir el desgaste del herramental y el riesgo de fallas prematuras, los fabricantes de punzones y matrices han establecido valores máximos permisibles de la fuerza que la máquina debe aplicar a los punzones. Estos valores pueden expresarse en forma de tablas o gráficas, en función del diámetro (ancho en el caso de tabletas oblongas) y de la geometría de las tabletas. En la tabla 2.1 se establecen los valores recomendados por un fabricante de punzones y matrices.

El desgaste acelerado y las fallas son causados normalmente por exceder dichos límites, situación que es fácil que ocurra ya que es más sencillo aplicar fuerzas grandes para dar un buen aspecto a la tableta, que reprocesar un granulado difícil de compactar.

**TABLA 2.1 Carga máxima recomendada según las dimensiones de las tabletas**

Tamaño de la tableta		mm	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	25
		inch	1/8	5/32	3/16	7/32	9/32	5/16	11/32	1/2	7/16	15/32	1/2	9/16	19/32	5/8	21/32	23/32	3/4	29/32	1"
 Plana  Cóncava moderada  Cóncava estándar	KN	5	10	15	22	30	40	50	60	70	90	100	120	130	160	180	203	226	251	393	
	Tons	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7	9	10	12	13	16	18	20	23	25	40	
 Doble radio  Plana biselada  Cóncava biselada	KN	3	5.6	8.8	12	17	22	28	35	42	50	59	67	78	90	102	114	127	141	221	
	Tons	0.3	0.6	0.9	1.2	1.7	2.2	2.8	3.5	4.2	5	6	7	8	9	10	11	13	14	22	
 Cóncava profunda  Esférica	KN	2	3.7	5.8	8.5	11	15	19	23	27	33	39	46	53	60	68	74	85	94	147	
	Tons	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	5	5.5	6	7	7.5	8.5	9.5	15	

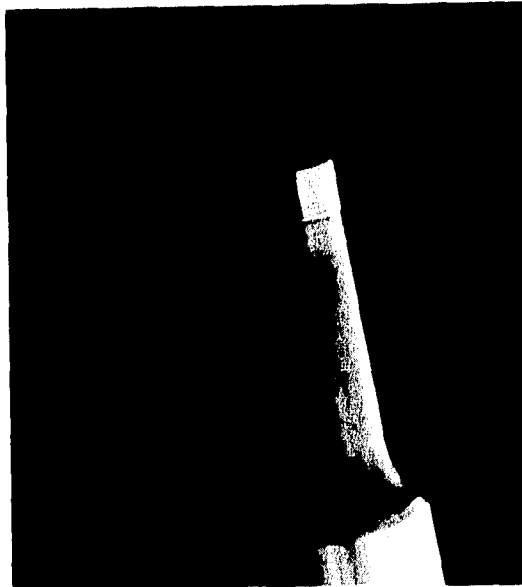
Fuente: I. Holland Limited.

### 2.3 DESCRIPCIÓN DE LA FALLA

El caso que se analizará en la presente tesis es la fractura de prácticamente un juego completo de punzones inferiores para fabricar tabletas planas biseladas de 13 mm de diámetro, en una tableteadora de la marca Kilian, modelo RX-51.

Como puede verse en las Figura 2.1, estos punzones sufrieron una despostilladura en la punta, desde la zona donde comienza la superficie que forma el bisel de la tableta hasta la superficie cilíndrica exterior de la punta del punzón. La superficie de la fractura es en su mayor parte paralela al eje principal de la pieza, tiene una apariencia frágil y no se observa deformación plástica ni marcas ocasionadas por corrosión.

La parte llana de la cabeza de los punzones no presenta marcas ocasionadas por una sobrepresión, tal como se observa en la Figura 2.2. Se aprecia un desgaste ligero en el ángulo exterior y la parte llana, ocasionado por una carrera de expulsión forzada. Es



**Figura 2.1** Despostilladura en la punta de un punzón inferior

normal observar este tipo de desgaste en la mayoría de los punzones, sobre todo si consideramos que por sus características, no era fácil la expulsión de las tabletas compactadas por estos punzones. Por esto, puede considerarse que este desgaste no tiene relación con la fractura.

En la Figura 2.3 puede verse un desgaste en el ángulo interior de la cabeza de las piezas, esto se debe a un apriete del cuerpo de los punzones dentro de los huecos que guían su movimiento. La causa de este apriete fue probablemente por una acumulación de polvos finos en estos huecos. En mayor o menor grado, estas marcas de desgaste aparecen comúnmente en todos los punzones inferiores, por lo que tampoco se tomará como un factor que haya influido en la falla.

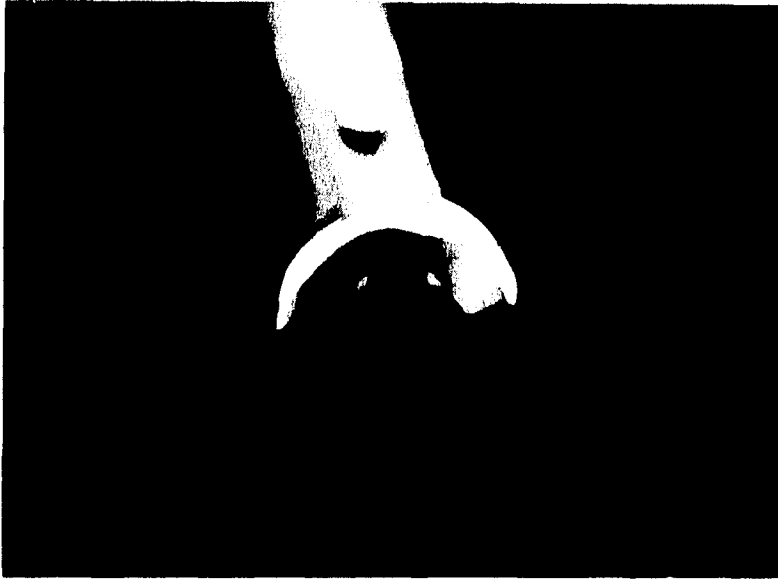


Figura 2.2 Marcas de desgaste en el ángulo exterior y en la parte llana de la cabeza.

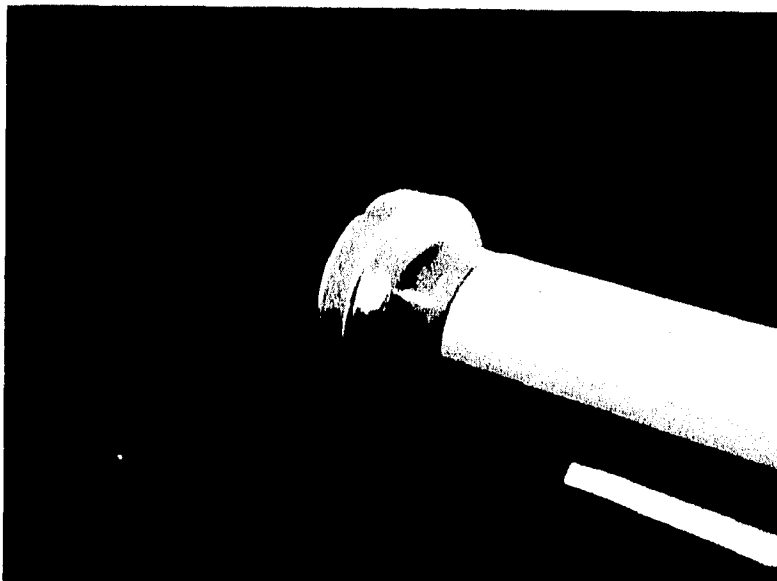


Figura 2.3 Marcas de desgaste en el ángulo interior de la cabeza y en el cuello.

### 2.3.1 Características de la tableteadora

Como ya se mencionó, la tableteadora en la que se encontraban trabajando estos punzones es de la marca Kilian, modelo RX-51. A continuación se presentan los datos técnicos de esta máquina.

Número de matrices:	51
Diámetro máximo de las tabletas:	16
Producción máxima (tab/hr):	460 000
Velocidad del plato portamatrices (rpm) máxima:	75
mínima:	8
Diámetro de paso del portamatrices:	620
Altura de llenado máxima:	20
Profundidad de penetración:	1...6
Presión máxima de compresión (kN):	100
Presión previa máxima (kN):	20
Diámetro de los punzones:	20/28
Longitud del punzón superior:	150
Longitud del punzón inferior:	157
Diámetro de las matrices:	30
Altura de las matrices:	25

\* Todas las dimensiones están en milímetros.

### **2.3.2 Características de los punzones**

Conforme las tableteadoras han ido evolucionando, los fabricantes han modificado la geometría y las dimensiones de los punzones y matrices para hacerlos más compactos, resistentes y eficientes. Ante el constante desarrollo de estas máquinas, se ha hecho cada vez más necesario estandarizar el herramental de tal forma que sea posible ocupar las mismas piezas en equipos de diferente fabricante.

En nuestro caso en particular, las tableteadoras Kilian RX-51 funcionan con punzones tipo 20/28, diseñados por ellos mismos. Los números 20 y 28 corresponden al diámetro del cuerpo y la cabeza del punzón respectivamente, como puede apreciarse en el plano de fabricación.

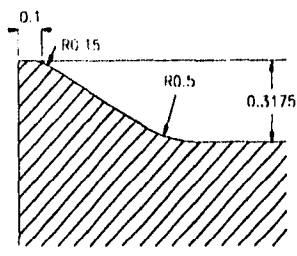
En dicho plano no se especifica el tipo de material que debe utilizarse ya que su selección depende de las características del material a compactar, así como del criterio del fabricante de los punzones y matrices. En ocasiones, un fabricante puede utilizar un material distinto que otro fabricante para la misma aplicación.

El fabricante de los punzones que se fracturaron especificó un acero tipo AISI D2 para estas piezas. Su proceso de manufactura es el mismo que se describió en el punto 1.3.

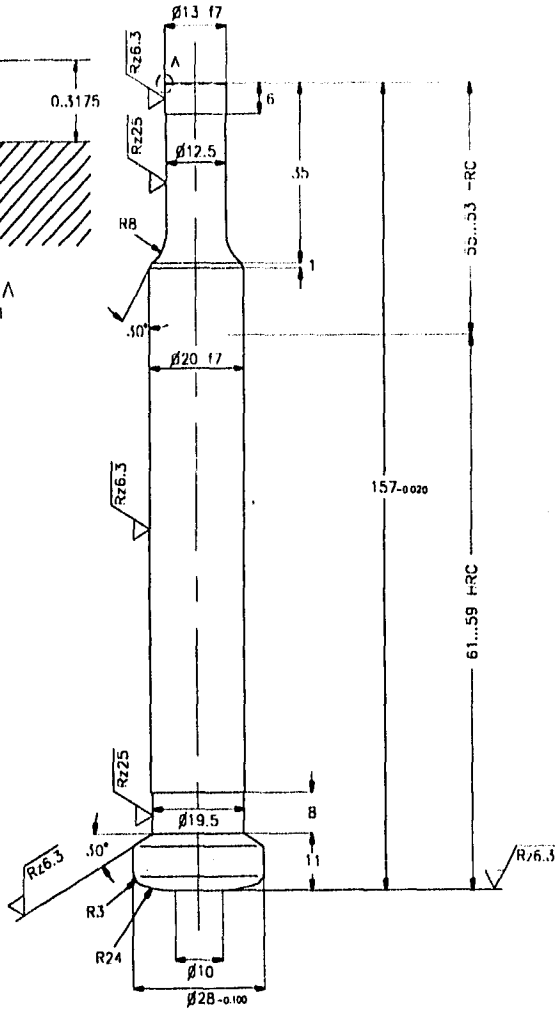
### **2.3.3 Condiciones de operación**

Los punzones se fracturaron después de haber trabajado durante un mes, con una velocidad de operación de la máquina de 300 000 tabletas por hora, aplicando una carga estimada de 55 kN. De acuerdo con el número de horas que se utiliza la máquina durante un día, la vida de los punzones fue de aproximadamente  $1.8 \times 10^6$  ciclos.





DETALLE A  
ESCALA 50:1



ESCALA 1:1	ACOTACIONES EN MM
<b>PUNZON INFERIOR</b> <b>TIPO 20/28</b>	

Si consultamos la Tabla 2.1, podemos ver que la carga máxima recomendada por Holland que debe aplicarse a este tipo de punzones es de 59 kN. Kilian recomienda una carga máxima de 66 kN. En este caso, no se rebasó ninguno de los dos valores, tal como lo demuestra la ausencia de marcas de sobrepresión en la parte llana de la cabeza de los punzones.

Las tableteadoras realizan automáticamente la lubricación de los punzones y en caso de que faltara aceite en el depósito del sistema de lubricación, el equipo dejaría de funcionar y no trabajaría hasta que se repusiera el aceite hasta el nivel preestablecido. Por lo tanto, la lubricación puede considerarse como adecuada.

El mantenimiento de la tableteadora en la que se encontraban trabajando estos punzones se realiza cada seis meses, y puede considerarse como eficiente ya que los mecánicos responsables del mismo, tienen mucha experiencia en este tipo de máquinas. Además, no existió ninguna operación considerable de mantenimiento previa a la falla, que pudiera haber afectado el funcionamiento correcto de la máquina.

## **2.4 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

Es importante señalar que la investigación comenzó varios meses después de que ocurrió la fractura. Por ello, no se sabe exactamente cuáles eran los punzones superiores y las matrices que se encontraban trabajando en conjunto con los punzones inferiores cuando ocurrió el problema. Lo ideal sería trabajar con un juego de matrices, punzones superiores e inferiores, y cambiarlo completamente cuando se presenta alguna falla de varias piezas o cuando termina su vida útil. Sin embargo, es común que se armen juegos utilizando piezas de diferentes fabricantes.

Además, para evitar un mal uso de estas piezas, cuando dejan de utilizarse en la producción normal de tabletas (por desgaste, falla o por su misma vida útil), generalmente se busca hacerlos inservibles totalmente ya sea esmerilando la punta o colocándoles puntos de soldadura en la misma. Por lo anterior, en la presente tesis no aparecen especificaciones de la tableta, principalmente las dimensiones del logotipo, ni tampoco fotografías que pudieran facilitar la producción de tabletas falsas.

## **CAPÍTULO TRES METODOLOGÍA**

### **3.1 OBJETIVOS QUE PERSIGUE UN ANÁLISIS DE FALLA**

El objetivo de un análisis de falla es determinar las principales causas que la originaron, con el fin de tomar las medidas pertinentes para prevenir futuras fallas:

Es importante tomar en cuenta todos los factores que pudieron propiciar la falla, desde las consideraciones para el diseño de la pieza y su proceso de manufactura, hasta sus condiciones de trabajo y operaciones de mantenimiento realizadas.

### **3.2 PASOS DE UN ANÁLISIS**

El procedimiento a seguir durante la investigación de las causas de la falla puede variar dependiendo de la naturaleza de ésta, sin embargo, D.A. Ryder<sup>1</sup> propone seguir los siguientes pasos durante la investigación:

- Obtención de especificaciones sobre la pieza y selección de las muestras a analizar.
- Análisis preliminar de la pieza que falló.
- Pruebas no destructivas.

---

<sup>1</sup> D.A. Ryder, "General Practice in Failure Analysis", *Metals Handbook*, 9th ed., vol. 10: "Failure Analysis and Prevention", American Society for Metals, 1988, p. 15.

- Pruebas mecánicas (incluyendo dureza y tenacidad).
- Cuidado de las superficies fracturadas.
- Análisis macroscópico.
- Análisis microscópico.
- Selección y preparación de las muestras para análisis metalográfico.
- Análisis metalográfico.
- Determinación del mecanismo de falla.
- Análisis químico.
- Mecánica de la fractura.
- Pruebas bajo condiciones de trabajo similares.
- Análisis de toda la información, formulación de las conclusiones y elaboración del reporte (incluyendo sugerencias).

Algunos de los análisis no pueden aplicarse a todos los casos, principalmente porque el equipo necesario para realizarlos no está al alcance del investigador. Afortunadamente, en la mayoría de los casos es suficiente aplicar sólo algunos de éstos.

A continuación se da una breve explicación de cada uno de los pasos de la investigación. Para cada análisis, se menciona a grandes rasgos la técnica utilizada, para información más específica se recomienda consultar el Metals Handbook y otros textos especializados en el tema.

### **3.2.1 Obtención de especificaciones y selección de las muestras**

La investigación debe comenzar con la recopilación de toda la información relevante sobre la falla. Se deberán obtener, si es posible, todas las especificaciones, planos de fabricación y consideraciones sobre el diseño de la pieza.

La información acerca de su proceso de manufactura puede ser clasificada en tres grupos: procesos mecánicos, como trabajo en frío, maquinado, rectificado; procesos térmicos, como trabajo en caliente, tratamiento térmico, procesos de soldadura; y procesos químicos, como limpieza, recubrimientos, electrodeposición.

Es importante mantener un completo historial del funcionamiento de un equipo, ya que esto facilita el análisis cuando algún elemento llega a fallar. Al recolectar los datos sobre el historial del servicio de la pieza antes de la falla, se debe prestar especial atención a factores como los valores nominales de carga que soportaba, si era sometido a cargas cíclicas, sobrecargas que haya sufrido, variaciones de presión y temperatura, y si operaba en algún ambiente corrosivo.

También es importante investigar si la falla ocurrió durante alguna condición anormal a su funcionamiento y si alguna operación de mantenimiento se llevó a cabo recientemente.

Cuando la información con que se disponga es insuficiente, como ocurre en la mayoría de los casos, la persona responsable del análisis deberá deducir algunas de las condiciones en que trabajaba la pieza. Estas suposiciones tendrán que estar bien fundamentadas ya que una deducción errónea puede ser más perjudicial que la ausencia de información.

Las muestras que se seleccionen para analizar deberán ser aquellas que mejor representen las características de la falla. Normalmente estos componentes se comparan con otros similares que no fallaron, con el fin de ayudar a determinar si la falla se propició por las condiciones de servicio o fue el resultado de una deficiente fabricación.

### **3.2.2 Análisis preliminares**

Antes de limpiar la pieza, debe hacerse un examen visual muy minucioso de ésta y de los fragmentos que puedan existir, ya que proporcionan información relevante sobre las condiciones en que ocurrió la falla.

La observación a simple vista permite examinar largas áreas rápidamente y detectar cambios de color y textura, cosa que no sucede con el uso del microscopio. Se debe prestar especial atención a la superficie de la fractura y la orientación de las grietas que pudieran existir.

A continuación, se deben tomar fotografías del elemento completo que falló, incluyendo las piezas fracturadas, de tal manera que se observe la relación entre las diversas piezas con el equipo o elemento que falló. Es recomendable comenzar con una iluminación directa, posteriormente dirigir la luz a diferentes ángulos y variar la intensidad hasta que las características de la fractura puedan ser apreciadas mejor.

### **3.2.3 Pruebas no destructivas**

Este tipo de pruebas se utilizan para localizar grietas superficiales y discontinuidades, se aplican principalmente durante el control del proceso de manufactura para detectar piezas defectuosas. Las principales son: inspección magnética, inspección con líquidos penetrantes y análisis por ultrasonido.

En el primer caso, se utiliza un campo magnético para localizar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en metales ferrosos. Cuando la pieza se magnetiza, las discontinuidades que se encuentran de manera transversal a la dirección del campo magnético provocan un campo secundario que se detecta al aplicar partículas

ferromagnéticas sobre la superficie, y que al ser atrapadas por el campo secundario muestran la forma y el tamaño de la grieta. Con frecuencia, las partículas magnéticas se mezclan con algún material fluorescente, de tal manera que las discontinuidades puedan observarse utilizando luz ultravioleta.

La inspección con líquido penetrante se utiliza principalmente en materiales no magnéticos, en los que la inspección magnética no puede aplicarse. Consiste en cubrir totalmente la muestra con dicho líquido, quitar el excedente, y aplicar una substancia que provoca que el líquido que entró en las grietas salga de ellas. Este líquido es capaz de penetrar en grietas de hasta una micra. Normalmente es de color brillante o contiene partículas fluorescentes, de tal forma que al aplicar luz ultravioleta, permiten observar las discontinuidades del material.

En el análisis por ultrasonido se hacen incidir ondas acústicas de alta frecuencia al material, éstas viajan a través de él hasta que se topan con alguna discontinuidad, causando que parte de la onda incidente se refleje. La cantidad de energía reflejada dependerá de la naturaleza y orientación de la discontinuidad.

#### **3.2.4 Pruebas mecánicas**

Una de las pruebas mecánicas más importantes es la de dureza, ya que contribuye a la evaluación del tratamiento térmico (al comparar la dureza de la pieza que falló con la que se requiere según las especificaciones), proporciona una aproximación indirecta de la resistencia a la tracción del acero, y ayuda a averiguar si existió endurecimiento por deformación o algún endurecimiento o reblandecimiento por sobrecalentamiento o por descarburización.

Cuando sea posible, podrán aplicarse ensayos de tracción, fatiga, o impacto. Es



importante tener cuidado al interpretar los resultados de pruebas mecánicas, ya que los ensayos de laboratorio a muestras pequeñas pueden no representar correctamente el comportamiento del elemento en sus condiciones normales de funcionamiento.

En la mayoría de los análisis de falla, el ensayo a tracción no proporciona mucha información útil, pues relativamente pocas fallas ocurren por el uso de un material que tenga una mala resistencia a la tracción o por cargas de tracción pura que se apliquen hasta que ocurra la fractura. Además, algunas muestras de elementos que han sufrido una fractura frágil, muestran una adecuada ductilidad en los ensayos a tracción.

### **3.2.5 Cuidado de las superficies fracturadas**

La adecuada selección, identificación y cuidado de las piezas es muy importante para prevenir que la superficie de la fractura sufra algún daño químico o mecánico.

La superficie de una fractura no debe ser tocada con los dedos. Tampoco debe intentarse hacer embonar las secciones de la pieza fracturada.

El daño químico de la superficie (corrosión) puede evitarse de varias maneras. Cuando sea posible, es mejor secar la pieza utilizando aire comprimido. Posteriormente, la pieza deberá colocarse en un deshidratador.

La superficie de una fractura sólo deberá limpiarse cuando sea estrictamente necesario. Para ello puede utilizarse aire comprimido seco o un cepillo de cerdas suaves, limpieza por ultrasonido, o bien algún solvente inorgánico. Uno de los métodos más efectivos es utilizar réplicas de acetato, principalmente cuando la superficie ha sido afectada por la corrosión.

En superficies fracturadas extensas es conveniente fraccionarlas para manejar secciones de un tamaño adecuado. No importa el método de corte que se utilice, siempre debe hacerse de tal forma que no se afecte la superficie fracturada y las zonas cercanas a ella.

### **3.2.6 Análisis macroscópico**

El examen detallado de superficies fracturadas a un aumento de 1 a 100X puede llevarse a cabo a simple vista, con lupas, o mediante un microscopio óptico de pocos aumentos. Para este tipo de análisis, el microscopio estereoscópico (también conocido como macroscopio) resulta de gran utilidad.

El análisis macroscópico ayuda a determinar la dirección de propagación de la grieta y por consiguiente, el origen de la falla. En las fracturas frágiles normalmente aparecen marcas tipo chevrón que apuntan hacia el origen de la falla. En otros casos como fatiga, corrosión, y fragilización por hidrógeno, la superficie de la fractura tiene una textura diferente de la zona de la fractura final.

### **3.2.7 Análisis microscópico**

El análisis microscópico de superficies fracturadas puede llevarse a cabo utilizando un microscopio óptico, un microscopio de transmisión de electrones, o uno de barrido de electrones.

El microscopio óptico es usado con mucha frecuencia sólo para observaciones con poco aumento (<100X) debido a su limitada resolución ( $\sim 10^{-4}\text{m}$ ), lo que no permite enfocar claramente superficies rugosas.

Para hacer observaciones en el microscopio de transmisión de electrones, es necesario utilizar réplicas de la superficie fracturada.

El análisis microfractográfico por lo general se efectúa con la ayuda de un microscopio de barrido electrónico. La amplitud del campo de enfoque, el extenso rango de aumentos que pueden lograrse, la facilidad de preparar la muestra para su observación, y la apariencia tridimensional de la imagen, son las principales ventajas de este tipo de instrumento, que lo convierten en una herramienta muy útil para el análisis de fallas.

### **3.2.8 Selección y preparación de las muestras para análisis metalográfico**

Solamente se pueden hacer algunas sugerencias acerca de las secciones de la pieza fracturada que deben ser sometidas al análisis metalográfico puesto que casi cada tipo de falla tiene características específicas que deben tomarse en cuenta. Sin embargo, en la mayoría de los casos debe considerarse si la estructura de la muestra analizada es representativa de la pieza en su conjunto, esto sólo puede saberse examinando muestras de varias secciones de la pieza en cuestión.

La preparación de las muestras incluye su pulido burdo, montaje, pulido intermedio, pulido fino y ataque químico. Las recomendaciones para cada tipo de material que vaya a examinarse pueden encontrarse prácticamente en cualquier texto de metalurgia.

### **3.2.9 Análisis metalográfico**

El análisis metalográfico es una parte fundamental de un análisis de falla y debe realizarse en todos los casos, ya que proporciona información sobre el tipo de material y si éste tiene la estructura deseada. También aporta información acerca del proceso

de manufactura de la pieza y del tratamiento térmico al que se ha sometido, ya sea intencionalmente o accidentalmente durante el servicio.

Los efectos causados por las condiciones de trabajo, como corrosión, oxidación y endurecimiento por deformación, pueden apreciarse mediante este análisis, así como las características de grietas que aparezcan en la pieza, en particular, su modo de propagación.

Inclusiones, descarburización, tratamiento térmico inadecuado, martensita sin revenir, austenita retenida, y corrosión intergranular, son sólo algunas de las condiciones no deseadas en una estructura metalográfica que pueden observarse mediante este tipo de análisis.

### **3.2.10 Determinación del mecanismo de falla**

Una falla puede ocurrir por uno o más mecanismos, tales como daño de la superficie (como corrosión y desgaste), deformación elástica y plástica, y fractura. En lo particular, se describirán brevemente las fracturas más típicas. Muchos elementos característicos de cada fractura se han utilizado para describirlas y clasificarlas. Algunos de ellos son: las condiciones de carga, la forma de desarrollo de la grieta, y la apariencia macro y microscópica de la superficie fracturada.

De acuerdo con la forma en que se desarrolla una fractura, éstas pueden clasificarse en dúctiles, frágiles, fatiga, y fracturas resultantes de la combinación del estado de esfuerzos y del medio ambiente, como agrietamiento por corrosión bajo tensión, fragilización por metal líquido, fragilización por hidrógeno, y termofluencia.

### **Fractura dúctil**

Las fracturas dúctiles se caracterizan por la presencia de una apreciable deformación plástica y alta energía necesaria para el desarrollo de la fractura. En la mayoría de los materiales, la superficie de una fractura dúctil ocurrida por tracción tiene una apariencia gris y fibrosa.

Cuando una pieza es sometida a una carga de tracción, primero comienza un alargamiento en el que empiezan a formarse grietas en las inclusiones del material (estas inclusiones siempre están presentes aún en los metales más puros), o se presenta una decohesión entre estas partículas y la matriz, lo que provoca que aparezcan microcavidades. Cuando la capacidad del material de endurecerse por deformación comienza a agotarse, se forma un cuello, lo que da origen a un estado triaxial de esfuerzos, causando que las microcavidades se extiendan hacia el exterior hasta unirse para formar una grieta en el centro, la cual avanza hacia la superficie en una dirección perpendicular al esfuerzo aplicado. La parte anular restante se fractura formando un ángulo de aproximadamente  $45^\circ$  con el eje del esfuerzo de tracción. La etapa final deja un labio circular sobre la mitad de la pieza y un bisel sobre la superficie de la otra mitad.

En el análisis microfractográfico de la superficie normalmente aparecen una serie de dunas (*dimples*) espaciadas, alrededor de las partículas que las originaron.

### **Fractura frágil**

Las fracturas frágiles se caracterizan por una rápida propagación de la grieta en la que la energía necesaria para que ocurra es menor que en la fractura dúctil, y en este caso, no se observa deformación plástica. El aspecto de la superficie de la fractura depende

de la temperatura a la cual ocurre. En cierto rango de temperaturas, aparecen marcas tipo chevrón que apuntan al origen de la fractura.

Una fractura dúctil puede ser intergranular o transgranular. En el primer caso, la grieta se propaga a lo largo de las fronteras de grano, esto causa que en el análisis microscópico se observe una "superficie rocosa" en la que se distinguen los granos. En el segundo caso, se aprecia una "superficie escalonada" debida a los cambios en orientación de los planos de clivaje de un grano a otro. Conforme la fractura se propaga, los escalones se van uniendo para formar escalones de mayor altura y con esto se reducen los planos en los que ocurre el clivaje. La convergencia de estos escalones producen una apariencia de un río con varias afluentes, en el que la grieta se propaga aguas abajo.

### **Fractura por fatiga**

Las fracturas por fatiga ocurren por un estado cíclico de esfuerzos cuya magnitud normalmente es bastante inferior al valor nominal de la resistencia a la cedencia del material. La falla se desarrolla de manera progresiva, avanzando y reduciendo el área de la pieza hasta que ésta no soporta la carga aplicada y ocurre una fractura súbita.

La superficie de la fractura generalmente presenta marcas de playa alrededor del origen de la fractura, indicando la secuencia de avance de la grieta. Estas marcas pueden ocurrir por cambios en la magnitud de la carga, frecuencia de la misma, o por oxidación de la superficie fracturada en periodos en que la pieza no trabaja. Sin embargo, varias fracturas por fatiga que ocurren en condiciones de crecimiento ininterrumpido de la grieta y sin variaciones en la carga, no presentan marcas de playa.

Existen muchas variables que influyen en este tipo de fallas, algunas de ellas son: la

magnitud y frecuencia de aplicación de la carga, el valor medio de los esfuerzos, la temperatura, el medio ambiente, el tamaño y forma de la pieza, el estado de esfuerzos, la presencia de esfuerzos residuales, el acabado superficial, y la microestructura.

Las fallas por fatiga se inician en zonas donde la magnitud de los esfuerzos es grande (mayor que la resistencia del material) y baja resistencia, mediante un mecanismo que implica deslizamiento y endurecimiento por deformación, formando discontinuidades microscópicas que se desarrollan en fisuras. Una vez que se desarrolla una fisura o microgrieta, ésta se propaga en una dirección perpendicular al esfuerzo a tracción de mayor magnitud. Cuando la grieta alcanza un tamaño considerable, se convierte en un gran concentrador de esfuerzos que tiene mayor influencia que cualquier otro factor.

Microscópicamente, la superficie se caracteriza por la presencia de estrías finamente espaciadas, las cuales están orientadas perpendicularmente a la dirección de propagación de la grieta.

#### **Agrietamiento por corrosión bajo tensión**

Esta falla se produce por la acción conjunta de un estado de esfuerzos de tensión y un medio corrosivo, causando una falla en un tiempo menor que si hubieran actuado por separado. Este tipo de falla normalmente se presenta por la exposición de una pieza a un medio corrosivo, al mismo tiempo que se somete a esfuerzos de tensión que están muy por debajo de la resistencia a la cedencia del material. Bajo estas condiciones, aparecen pequeñas grietas que penetran profundamente en el material, mientras que en la superficie no aparecen señales notables de corrosión.

### **Fragilización por metal líquido**

La fragilización por metal líquido tiene por resultado que un metal sólido cuya superficie es mojada por un metal líquido con punto de fusión menor, pierda ductilidad o se fracture bajo esfuerzos de magnitud menor a su resistencia a la cedencia. Por ejemplo, si un latón 70-30 es mojado por mercurio, se fractura bajo un esfuerzo ligeramente inferior a su resistencia a la cedencia, en un ensayo a tracción o flexión. A pesar de que el latón 70-30 es muy dúctil y durante un ensayo a tracción se forma un cuello bastante pronunciado, cuando se fragiliza por mercurio, la fractura ocurre por clivaje.

La susceptibilidad de un metal en estado sólido a ser fragilizado por otro en estado líquido es muy específica. Por ejemplo, el mercurio fragiliza las aleaciones de cobre y de aluminio pero no ocurre la misma situación para los aceros al carbono y los aceros aleados.

### **Fragilización por hidrógeno**

El hidrógeno tiene la capacidad de fragilizar varios tipos de metales y aleaciones pero su efecto más notable se presenta en los aceros, especialmente en aquellos cuya resistencia es superior a los 1240 MPa. Unas cuantas partes por millón de hidrógeno disuelto en el acero puede originar grietas y causar una disminución de la ductilidad. Estas grietas normalmente aparecen en las fronteras de grano de la austenita y se originan por el efecto combinado del hidrógeno disuelto y los esfuerzos inherentes al proceso de transformación de austenita a martensita durante el temple. Las áreas afectadas por el hidrógeno se distinguen en la superficie de la fractura por su aspecto frágil y brillante, el cual contrasta con el aspecto opaco del resto de la fractura dúctil.



### **Termofluencia**

La termofluencia es el alargamiento de un metal o aleación cuando es sometido a un estado de esfuerzos y a una temperatura mayor a  $0.5 T_M$ , donde  $T_M$  es el punto de fusión del material. La deformación por termofluencia puede provocar cambios lo suficientemente grandes en las dimensiones de una pieza como para hacerla inservible, e incluso puede causar una fractura.

Las fallas por termofluencia generalmente son fáciles de identificar ya que normalmente se observa una alta ductilidad localizada y una gran cantidad de grietas en esa zona. En un análisis microscópico pueden verse cerca de la zona de la fractura, una gran cantidad de pequeñas cavidades localizadas principalmente en las fronteras de grano.

#### **3.2.11 Análisis químico**

Este análisis es conveniente aplicarlo como rutina para certificar que el material corresponde al especificado. Pequeñas desviaciones con respecto a la composición establecida del material no son muy importantes. De hecho, debido a que sólo un pequeño número de fallas ocurren por un material fuera de especificaciones, es difícil que el análisis químico determine la causa de la falla.

Cuando los resultados del análisis indican que el contenido de un cierto elemento se encuentra ligeramente arriba del especificado, no significa que ésta es la causa de la falla, ni siquiera puede afirmarse que dicha variación haya jugado un papel importante durante el inicio y desarrollo de la fractura. Por ello se debe tener cautela al interpretar estos análisis.

### **3.2.12 Mecánica de la fractura**

La mecánica de la fractura es un análisis matemático del proceso mecánico que ocasionó la fractura. Abarca desde el desarrollo de la grieta por mecanismos como fatiga y corrosión bajo tensión, hasta la fractura final por clivaje o coalescencia de microcavidades. Este análisis se basa en técnicas generalmente utilizadas en mecánica de sólidos, tal como la teoría de elasticidad. Los conceptos empleados incluyen los campos de esfuerzo y deformación así como el cambio de energía que ocurre durante una fractura.

### **3.2.13 Pruebas bajo condiciones de trabajo similares**

En las últimas fases de la investigación, en ocasiones es conveniente efectuar pruebas que de alguna forma simulen las condiciones en las que se piensa que ocurrió la falla. Normalmente este tipo de pruebas no se aplican debido a que se necesita equipo sofisticado, y aún en el caso que puedan aplicarse, es posible que no se conozcan o entiendan completamente las condiciones de trabajo de la pieza.

Por otra parte, cuando se comprenden claramente las limitaciones de estas pruebas, pueden resultar de mucha ayuda para aplicar medidas correctivas con la finalidad de evitar fallas similares.

### **3.2.14 Análisis de toda la información, formulación de las conclusiones y elaboración del reporte**

En cierta etapa de cualquier investigación, con los resultados de los análisis que se hayan practicado y las pruebas efectuadas, pueden formularse algunas hipótesis y

conclusiones preliminares. Si la probable causa de la falla aparece en las primeras etapas de la investigación, los análisis y pruebas subsecuentes se realizarán para confirmar la hipótesis de la falla y descartar otras posibilidades.

La lista de preguntas que se presenta a continuación, propuesta por George F. Vander Voort<sup>2</sup>, es de gran ayuda para analizar toda la información obtenida durante la investigación y formular las conclusiones. Estas preguntas también sirven para dirigir la atención a detalles que pudieran haber pasado desapercibidos durante la investigación.

1. ¿Se ha establecido la secuencia de la falla?
2. ¿Se ha establecido el lugar del origen de la falla?
3. ¿La falla se inició en la superficie o debajo de ella?
4. ¿Se relaciona la fractura con una concentración de esfuerzos?
5. ¿Durante cuánto tiempo se desarrolló la fractura?
6. ¿Fue grande la intensidad de la carga?
7. ¿Qué tipo de carga se aplicaba -estática, cíclica, de impacto-?
8. ¿Cuál es la orientación de los esfuerzos?
9. ¿Cuál fue el mecanismo de la falla?
10. ¿Cuál era la temperatura de operación de la pieza al momento de la falla?
11. ¿Pudo influir la temperatura en la falla?
12. ¿Existió influencia de algún tipo de desgaste para que ocurriera la falla?
13. ¿Existió influencia de algún tipo de corrosión?
14. ¿Fue adecuado el material de la pieza o es necesario otro tipo?
15. ¿Fue adecuada el área de sección para este tipo de servicio?
16. ¿Es aceptable la calidad del material?
17. ¿Fue correcto el tratamiento térmico de la pieza?

---

<sup>2</sup> G.F. Vander Voort, "Conducting the Failure Examination", *Met. Eng. Quart.*, May 1975.

18. ¿Estuvo bien realizado su proceso de fabricación?
19. ¿Fue bien ensamblada la pieza?
20. ¿Recibía un mantenimiento adecuado antes de ocurrir la falla?
21. ¿Se utilizó correctamente la pieza?
22. ¿Se le daba una adecuada lubricación?
23. ¿Existió algún abuso durante el servicio de la pieza?
24. ¿Se puede mejorar el diseño de la pieza para prevenir fallas similares?
25. ¿Existen otras piezas en funcionamiento que puedan fallar de la misma manera?, de ser así, ¿qué se puede hacer para evitar fallas similares?

El reporte de un análisis de falla debe ser claro, conciso y lógico. D.A. Ryder<sup>3</sup> propone dividir el reporte en las siguientes secciones:

1. Descripción del componente que falló.
2. Condiciones de funcionamiento al momento de la falla.
3. Historial de funcionamiento de la pieza.
4. Proceso de manufactura.
5. Estudio metalúrgico y mecánico de la pieza.
6. Análisis metalográfico.
7. Descripción de los mecanismos de falla involucrados.
8. Recomendaciones para prevenir fallas similares futuras.

Obviamente no todos los reportes deberán dividirse en estas secciones. Los reportes largos deben comenzar con una breve introducción ya que los lectores de estos reportes normalmente son personas relacionadas con las áreas de compras, y los mismos operadores de las máquinas de producción. Cuando sea necesario, pueden ser de gran ayuda los apéndices y un glosario de términos.

---

<sup>3</sup> D.A. Ryder, Op. cit. (nota 1), p.32.

### **3.3 PROCEDIMIENTO Y MATERIAL UTILIZADO PARA LA INVESTIGACIÓN**

En general, se siguieron los pasos expuestos en el subcapítulo anterior. Las observaciones preliminares y las especificaciones de los punzones fracturados fueron presentadas en el capítulo dos.

De todos los punzones fracturados, se seleccionaron tres muestras que fueran las más representativas de la falla. A estos tres punzones se les practicaron los análisis que a continuación se describen. También se sometió a análisis un punzón sin fracturar proveniente de otro fabricante, para compararlo con aquellos que se fracturaron.

Los primeros análisis practicados a las piezas fueron con la finalidad de comprobar que éstas cumplieran con las especificaciones. Conforme se avanzó en la investigación, resultó innecesario someter la pieza a algunos análisis, prestando mayor atención a otros.

El objetivo de cada análisis, así como el equipo utilizado en cada uno de ellos, se presentan a continuación, en la secuencia en que fueron practicados. Los resultados de estos análisis se presentan en el siguiente capítulo.

#### **3.3.1 Medición de dimensiones**

Las mediciones se realizaron para verificar que las principales dimensiones cumplieran con lo que se especifica en el plano de fabricación, y para comprobar que las tolerancias estuvieran dentro del rango establecido, observando si el desgaste de las piezas había sido considerable. Se prestó atención a aspectos como la concentricidad de las piezas y la perpendicularidad de la cara de trabajo con el eje de la pieza.

#### MATERIAL UTILIZADO

Calibrador con indicador de cuadrante

Mesa de granito

Base prismática

#### 3.3.2 Medición de dureza

Se midió la dureza de varias zonas de las muestras. El objetivo principal fue comprobar que se cumpliera con las especificaciones de estos punzones. Aunque de alguna forma otras propiedades como la resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga, tienen relación con la dureza, esta prueba no es suficiente para determinar si el proceso de manufactura, y principalmente el tratamiento térmico, se realizaron correctamente.

#### MATERIAL UTILIZADO

Durómetro

#### 3.3.3 Análisis macroscópico

Se realizaron varias observaciones en un macroscopio con un rango de aumentos de 10X a 32X, esto con la finalidad de determinar si todos los punzones que fallaron presentan el mismo tipo de fractura. Se observaron las características de la zona fracturada de varias muestras, la dirección de propagación de las grietas y su aspecto.

En este tipo de análisis es muy importante la forma en que se ilumine la zona fracturada. Por ello, se buscó la intensidad y el ángulo de incidencia que mejor resaltarán el aspecto de la fractura.

## MATERIAL UTILIZADO

Macroscopio

### **3.3.4 Análisis químico**

Con la finalidad de verificar la cantidad de aleantes en el acero tanto de punzones fracturados como del punzón sin fracturar, se hizo un análisis químico utilizando un fotospectrómetro. Las muestras que se analizaron corresponden a una sección del cuerpo de los punzones.

## MATERIAL UTILIZADO

Analizador de composición química por fotospectrometría.

### **3.3.5 Análisis metalográfico**

Se cortaron los punzones para observar al microscopio la estructura metalográfica de distintas zonas de éstos. Para los punzones fracturados, se tomaron dos muestras: una del cuerpo, haciendo un corte transversal, y otra de la punta, haciendo un corte longitudinal. Para el punzón sin fracturar, se tomó sólo una muestra transversal correspondiente a la región del cuerpo.

Estas muestras se pulieron utilizando lijas de distintas graduaciones, la muestra correspondiente a la zona de la fractura se montó en lucita, posteriormente a todas las muestras se les dio un pulido fino utilizando óxido de aluminio, primero de 5 micras y después de 0.3 micras. Por último, se les atacó químicamente utilizando Nital al 2%.

Se hicieron observaciones al microscopio con aumentos de 100X y 400X, primero con las muestras sin ataque químico y a continuación con las muestras después de haber sido atacadas.

#### **MATERIAL UTILIZADO**

Lijas de los números 120, 280, 400, 500 y 600.

Óxido de aluminio de 5  $\mu\text{m}$  y 0.3  $\mu\text{m}$ .

Pulidora de muestras metalográficas.

Nital al 2%

Microscopio óptico.



## **CAPITULO CUATRO**

### **RESULTADOS**

#### **4.1 DIMENSIONES**

Los resultados obtenidos de la medición de dimensiones importantes para que los punzones trabajen adecuadamente, resultaron satisfactorios. Aunque las tolerancias no se ajustan estrictamente a las que marca el plano de fabricación, debe tomarse en cuenta que los punzones ya habían trabajado durante aproximadamente  $1.8 \times 10^6$  ciclos y por ello se presenta un desgaste normal en las piezas.

La Tabla 4.1 presenta los resultados de las mediciones a las cuatro muestras, tres correspondientes a los punzones fracturados y una al punzón sin fracturar. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede asegurar que la fractura no ocurrió porque variaran mucho las dimensiones de un punzón con respecto a otro, o porque tuvieran una diferencia con respecto al valor especificado en el plano de fabricación, tal que afectara en el adecuado funcionamiento de la máquina.

Cuando la altura de los punzones varía mucho entre ellos, el estado de esfuerzos de los punzones será diferente para cada uno, es decir, algunos estarán sometidos a esfuerzos de mayor magnitud que otros, ya que la distancia entre los rodillos de presión es la misma pero la distancia entre las caras de trabajo de punzones superiores e inferiores cambia. Por lo anterior, es muy importante que esta dimensión sea uniforme. Como puede verse en la Tabla 4.1, la altura de los punzones fracturados está dentro de los límites establecidos en el plano de fabricación.

**TABLA 4.1 Dimensiones principales de las muestras**

DIMENSIÓN [mm]	NOMINAL	A	B	C	D
Diámetro de la cabeza	28 <sup>+0.000</sup> -0.100	27.975	27.962	27.935	27.967
Diámetro del cuerpo	20 <sup>-0.020</sup> -0.041	19.977	19.967	19.967	19.975
Diámetro de la punta	13 <sup>-0.018</sup> -0.034	12.977	12.984	12.992	12.975
Altura total	157 <sup>+0.000</sup> -0.020	156.987	156.975	156.982	156.985
Concentricidad	0.005	0.0152	0.0076	0.0102	0.0178
Perpendicularidad	0.005	0.0152	0.0254	0.0254	0.0076

Punzones fracturados: muestras A,B,C.

Punzón sin fractura: muestra D.

## 4.2 DUREZA

En la Tabla 4.2 aparecen los valores de dureza Rockwell C de las piezas seleccionadas. Estas mediciones corresponden a la zona media del cuerpo de los punzones. Como puede verse, la dureza tanto de los punzones fracturados como del punzón sin fracturar, están dentro de lo especificado. Sin embargo, puede notarse que la dureza de los punzones fracturados es ligeramente mayor a la dureza del punzón sin fracturar. Esto es debido a que el material del que están fabricados los primeros es un acero D2, mientras que el punzón sin fracturar está hecho de acero DIN 1.2550, que es muy parecido al acero S1.

**TABLA 4.2 Dureza Rockwell C del cuerpo de las muestras**

MEDICIÓN	A	B	C	D
1	57.1	58.4	58.0	56.7
2	58.0	58.6	58.6	57.1
3	58.5	57.6	58.6	56.6
4	58.3	58.4	58.5	57.1
5	58.1	57.8	58.1	57.3
PROMEDIO	58.0	58.2	58.4	57.0

Punzones fracturados: muestras A,B,C.  
 Punzón sin fractura: muestra D.

**TABLA 4.3 Dureza Rockwell C de la cara de trabajo de las muestras**

MEDICIÓN	A	B	C	D
1	53.1	55.4	55.4	54.3
2	54.2	54.1	55.6	54.3
3	55.7	57.3	54.3	54.5
4	54.2	54.3	55.1	54.5
5	57.2	55.1	54.9	54.4
PROMEDIO	54.9	55.2	55.1	54.4

Punzones fracturados: muestras A,B,C.  
 Punzón sin fractura: muestra D.

De manera similar a la Tabla 4.2, la Tabla 4.3 muestra los resultados de las mediciones de dureza de la cara de trabajo de las muestras. También en la cara de trabajo de estos punzones, la dureza es en promedio ligeramente mayor para los punzones fracturados que para aquél sin fracturar, por las causas que ya se explicaron anteriormente. En general, la dureza promedio está dentro de los límites especificados en el plano de fabricación.

En los resultados de las mediciones de dureza, no aparecen valores que muestren alguna zona específica más dura o más suave que el resto de la pieza. Podría decirse que el tratamiento térmico fue adecuado ya que la dureza promedio de las piezas es correcta, pero antes de asegurar esto, es necesario analizar su estructura metalográfica para confirmar esta suposición.

### **4.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA**

Las Tablas 4.4 y 4.5 muestran la composición química del acero de los punzones fracturados y del punzón sin fractura respectivamente. El fabricante de los punzones fracturados especificó un acero D2 para esta aplicación, mientras que el otro fabricante utilizó un acero DIN 1.2550, similar al S1.

En un acero D2, los aleantes que le dan sus propiedades de alta resistencia al desgaste y excelente templabilidad, son principalmente el cromo y el molibdeno, además del contenido de carbono. Por otro lado, en un acero S1, los aleantes que le dan sus propiedades de resistencia al impacto son principalmente el cromo y el tungsteno, además del contenido de carbono. La variación en el contenido de los demás aleantes no es de mucha importancia.

**Tabla 4.4 Composición química de punzones fracturados**

TIPO	ELEMENTOS DE ALEACIÓN, PORCENTAJE									
	C	Mn(a)	Si(b)	Cr	Ni	V(c)	W	Mo	Co	Al
AISI D2	1.5	0.5	...	12.0	...	0.2-0.9	...	1.0	...	...
Muestra	1.1	0.3	0.28	10.15	0.18	>0.42	0.02	0.55	0.02	...

(a) Todos los aceros herramientales contienen normalmente entre 0.2 y 0.4% de manganeso, a menos que se especifique otro valor. (b) Todos los aceros herramientales contienen entre 0.2 y 0.35% de silicio, a menos que se especifique otro valor. (c) A discreción del fabricante del acero, pueden agregarse cantidades mayores de este aleante.

**Tabla 4.5 Composición química de punzón sin fractura**

TIPO	ELEMENTOS DE ALEACIÓN, PORCENTAJE									
	C	Mn(a)	Si(b)	Cr	Ni	V(c)	W	Mo	Co	Al
AISI S1	0.5	...	0.75	1.5	...	0.2	2.5	...	...	...
Muestra	0.6	0.28	0.58	1.1	0.15	0.19	2.35	0.25	0.01	0.031

(a) Todos los aceros herramientales contienen normalmente entre 0.2 y 0.4% de manganeso, a menos que se especifique otro valor. (b) Todos los aceros herramientales contienen entre 0.2 y 0.35% de silicio, a menos que se especifique otro valor. (c) A discreción del fabricante del acero, pueden agregarse cantidades mayores de este aleante.

De acuerdo con los resultados de los análisis, el acero utilizado por el fabricante de los punzones fracturados no es de muy buena calidad ya que tanto el contenido de carbono como el de cromo y molibdeno están por debajo del recomendado. A diferencia de este acero, el utilizado por el otro fabricante puede considerarse de buena calidad.

#### **4.4 MACROFRACTOGRAFÍA**

El análisis macroscópico de los punzones fracturados reveló el mecanismo de la falla: fatiga. La apariencia de la superficie fracturada coincide con aquella de una falla típica por fatiga, tal como se describió en el punto 3.2.10; asimismo, el tipo de falla concuerda con el estado cíclico de esfuerzos al que eran sometidas las piezas.

La Figura 4.1 muestra la zona de la fractura de una de las muestras, en la que puede apreciarse que la fractura abarca desde la cara de trabajo hasta la superficie cilíndrica de la punta del punzón, también se puede observar uno de los bordes del logotipo y parte de una letra del mismo logotipo.

En la Figura 4.2 se aprecian perfectamente las marcas de concha o marcas de playa (*beach marks*), típicas de la fatiga. Estas marcas siempre rodean el punto donde se originó la fractura, y como puede verse en la figura, en este caso las marcas rodean uno de los bordes del logotipo. El logotipo cubre toda la cara de trabajo del punzón y se extiende hasta donde comienza el bisel; esta zona en la que se unen la cara de trabajo, el bisel y el logotipo, actúa como un concentrador de esfuerzos en el que pueden iniciarse microgrietas. Puede afirmarse que la fractura inició en esta zona y mediante los esfuerzos cíclicos se fue propagando hasta salir a la superficie cilíndrica de la punta del punzón.



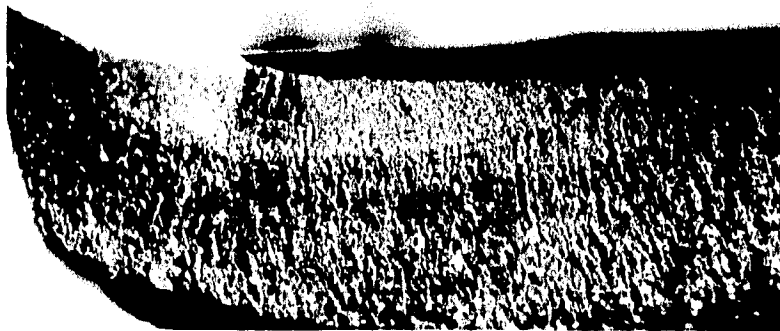
**Figura 4.1** Superficie de la fractura de un punzón, la cual se inició en la unión de un borde del logotipo y el bisel, y se propagó hacia el exterior de la pieza. 10X.

En la Figura 4.1 se pueden distinguir dos zonas de la fractura: una región relativamente lisa que comienza en la cara de trabajo de la pieza y a continuación una región más rugosa que llega hasta el exterior de la punta del punzón. La primera corresponde a la parte de la fractura que se desarrolló por fatiga, mientras que la segunda corresponde a la fractura súbita por sobrecarga. Como puede verse, la zona de la fractura final presenta las características típicas de una fractura frágil. Estas dos regiones también pueden apreciarse en la Figura 4.3.

La Figura 4.4 muestra la cara de trabajo de un punzón en el que no se ha desarrollado completamente la fractura. Como ya se había mencionado anteriormente, el origen de la fractura corresponde a la zona en donde se unen el borde del logotipo y el bisel, y de allí la grieta se desplaza hacia el exterior de la pieza.



**Figura 4.2** Marcas de fatiga alrededor de la zona donde termina uno de los bordes del logotipo y comienza el bisel. 20X.



**Figura 4.3** Superficie de la fractura en la que se distinguen dos zonas: una lisa que corresponde a la parte de la fractura que se desarrolló por fatiga, y otra rugosa, que corresponde a la fractura frágil que ocurrió al final. 20X.





Figura 4.4 Fractura que no se ha desarrollado completamente. 10X.

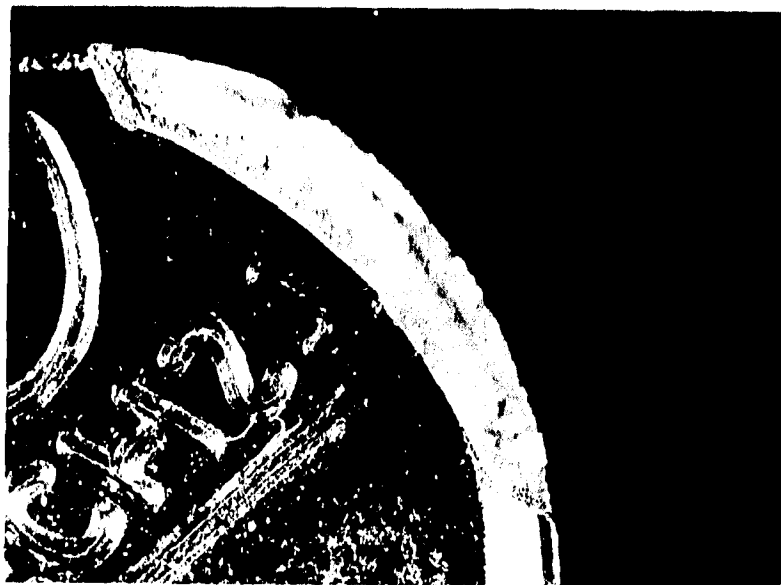


Figura 4.5 Fractura totalmente desarrollada. 10X.

La Figura 4.5 muestra la cara de trabajo de un punzón en el que la fractura se ha desarrollado por completo y un pedazo de material ya se desprendió. Se observa que durante el desarrollo de la grieta por fatiga, ésta se desplaza en forma "recta", ya que ocurre transgranularmente.

#### 4.5 METALOGRAFÍA

El análisis metalográfico de las muestras fue clave para determinar la causa de la falla prematura de estas piezas: segregación. A continuación se describen una serie de fotografías que muestran las características metalúrgicas de estas piezas.

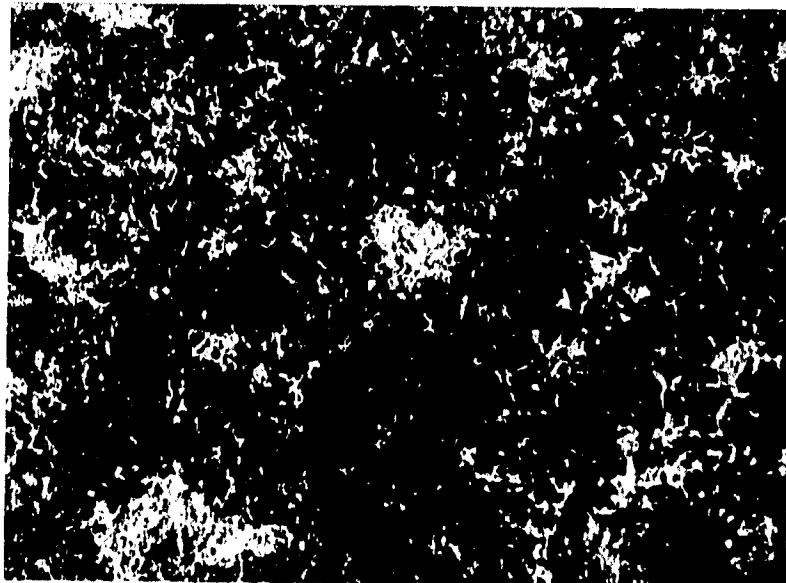
La Figura 4.6 corresponde a la estructura metalográfica de la región transversal del cuerpo de un punzón fracturado. Las zonas blancas son carburos de cromo, mientras que la región oscura que los rodea es martensita revenida y algunos pequeños carburos de cromo, carburos de los otros aleantes, y las demás fases.

La estructura metalográfica deseable para un acero D2 después de tratamiento térmico, es aquella constituida por carburos esféricos (principalmente de cromo) de tamaño moderado, rodeados por martensita fina. Si bien la estructura que aparece en la Figura 4.6 contiene martensita fina, el tamaño y la forma de los carburos no son los adecuados.

Otro factor importante es la cantidad de austenita retenida ya que este tipo de acero tiene alto contenido de carbono y aleantes que estabilizan la austenita, sin embargo, el tamaño de la martensita es tan fino que no puede apreciarse la cantidad de austenita retenida. Una estructura con austenita retenida no deseada suele ir acompañada de



**Figura 4.6** Estructura metalográfica en la dirección transversal del cuerpo de un punzón fracturado. El tamaño y forma de los carburos son inadecuados para un acero D2. Atacado con nital al 2%. 400X.



**Figura 4.7** Estructura metalográfica del cuerpo de un punzón sin fracturar. Los carburos se distinguen como puntos blancos. Atacado con nital al 2%. 400X.

martensita gruesa y acicular, situación que no ocurre en la estructura analizada, por lo que puede considerarse que la cantidad de austenita retenida es correcta.

La Figura 4.7 corresponde a la estructura metalográfica de la región transversal del cuerpo de un punzón sin fracturar. Como puede verse, los carburos apenas pueden apreciarse como pequeños puntos blancos, y la martensita es muy fina. En este caso, debido al moderado contenido de carbono y aleantes estabilizadores de austenita, la austenita retenida es más difícil que se presente que en el caso anterior. Como el acero de este punzón (DIN 1.2550) es parecido a un acero S1, de acuerdo con la Figura 4.7, su estructura metalográfica es adecuada.

En la Figura 4.8 puede verse una grieta en la parte central del cuerpo de un punzón fracturado. Esta grieta seguramente ocurrió durante el tratamiento térmico de la pieza debido al gran tamaño y mala distribución de los carburos en la estructura. La Figura 4.9 muestra la misma grieta pero con mayor aumento. Como puede verse, la grieta pasa a través de las zonas donde existen carburos de gran tamaño.

La Figura 4.10 corresponde a un corte longitudinal de la punta de un punzón fracturado. La estructura metalográfica de esta región está compuesta por zonas con muchos carburos de forma alargada y otras zonas con martensita revenida. Ambas zonas se intercalan en forma de bandas o fibras, por ello en inglés a este tipo de estructura se le conoce con el nombre de *banded structure*, y es el resultado de un fenómeno conocido como segregación. Este tipo de defecto está presente en el material desde que el fabricante del acero lo entrega en forma de barras laminadas. Esto puede comprobarse mediante la Figura 4.11, la cual muestra una región de la punta cerca de la fractura, en la que se aprecian las bandas con cierta deformación que corresponde a la deformación plástica del material ocurrida durante el estampado de la cara de trabajo. Como se puede ver, el tratamiento térmico no mejora la segregación presente en el material desde antes de su manufactura.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



Figura 4.8 Grieta en la parte central de un punzón fracturado. Atacado con nital al 2%. 100X.

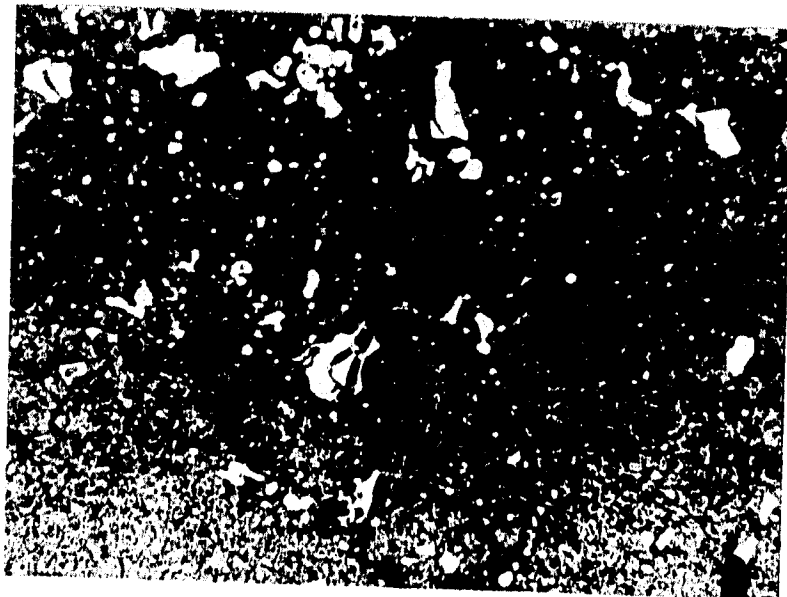


Figura 4.9 Grieta en la parte central de un punzón fracturado. Atacado con nital al 2%. 400X.

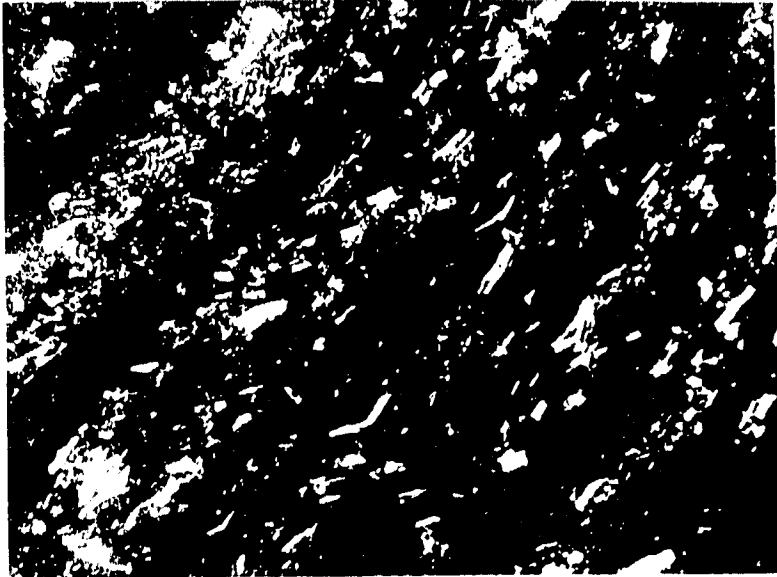


Figura 4.10 Segregación en la dirección longitudinal de la punta de un punzón fracturado. Atacado con nital al 2%. 100X.

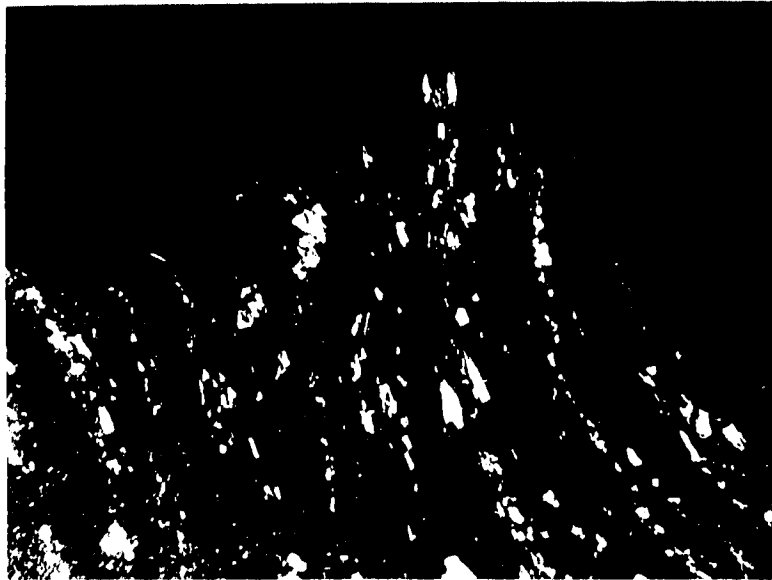


Figura 4.11 Segregación cerca de la cara de trabajo de un punzón fracturado. Puede observarse la deformación del material durante el estampado en frío. Atacado con nital al 2%. 100X.

## CONCLUSIONES

### CAUSAS DE LA FALLA

La falla de estas piezas ocurrió por fatiga, su duración fue alrededor de  $1.8 \times 10^8$  ciclos, trabajando bajo cargas cíclicas de una intensidad aproximada de 55 kN, aplicadas sobre la parte llana de la cabeza. Ya que las condiciones de trabajo de los punzones implican cargas cíclicas, deben diseñarse para no fallar por fatiga; sólo existe la posibilidad de que ocurra una falla por sobrecarga. Por lo tanto, una falla por fatiga se considera anormal.

Las condiciones de trabajo para estas piezas fueron normales. Sufrieron el desgaste típico de cualquier juego de punzones inferiores: en el ángulo interno y externo, y en la parte llana de la cabeza. Este desgaste común no tuvo ninguna influencia en la falla.

Por las características de las prensas rotativas, es difícil que ocurra una falla por un mal montaje de punzones y matrices, por lo que esta posibilidad queda descartada. Asimismo, debido a que la lubricación de los punzones es controlada por la misma tableteadora, puede afirmarse que fue adecuada; esto lo demuestra la ausencia de marcas anormales de desgaste o aumento de la temperatura. Además, el tipo de granulado que se compactaba con estos punzones no es sensible a la temperatura, por lo que este factor tampoco influyó en la falla.

Para la tableteadora en particular donde ocurrió la falla de estos punzones, está establecido un programa de mantenimiento preventivo que es ejecutado por mecánicos con mucha experiencia en este tipo de máquinas. Además, según la bitácora de este equipo, no se llevó a cabo ninguna operación mayor de mantenimiento que pudiera haber afectado en el adecuado funcionamiento tanto de la tableteadora como de los punzones y matrices.

Por otra parte, el fabricante de los punzones que se fracturaron utiliza equipo moderno como tornos de control numérico y centros de maquinado, para cumplir con todas las especificaciones establecidas para estas piezas. Por lo tanto, se considera que el proceso de manufactura fue adecuado. Asimismo, el tratamiento térmico aplicado a las piezas fue el correcto para un acero D2.

Aunque los resultados del análisis químico practicado a las piezas demuestran que la calidad del material no es muy buena, esta no fue la causa de la falla, sino la deficiente estructura metalográfica con que fue entregada la materia prima. De acuerdo con los resultados del análisis metalográfico, su estructura era en bandas (*banded structure*) y no la estructura esferoidizada típica de un acero herramental recocido. Desafortunadamente, este defecto no puede corregirse con el tratamiento térmico.

## **DESARROLLO DE LA FRACTURA**

Cuando el granulado contenido dentro de una matriz es comprimido por un par de punzones, la cara de trabajo de éstos y la superficie interna de la matriz quedan sujetos a una carga uniformemente distribuida. Como existe un ajuste de movimiento entre punzones y matrices, el plano del bisel puede flexionarse ligeramente, lo que provoca



que esta zona se encuentre en un estado de esfuerzos de tracción. Es justamente en el cambio de plano donde la magnitud de los esfuerzos es más grande.

El borde del logotipo actuó como un concentrador de esfuerzos, por lo que probablemente se originó una microgrieta en la superficie, donde los esfuerzos de tracción son de mayor magnitud, específicamente en la zona donde termina el borde del logotipo y comienza el bisel. Además, debido a la segregación en bandas presente en el material, existían esfuerzos residuales del tratamiento térmico y zonas muy frágiles en las que los carburos largos y de gran tamaño también funcionaron como concentradores de esfuerzos que facilitaron la formación de microgrietas.

Una vez formadas una o más microgrietas, éstas fueron avanzando en una dirección paralela al eje principal de la pieza, cada vez que se aplicaba una carga a ésta, hasta unirse para formar una sola grieta que se propagó hacia el exterior de la punta del punzón. La forma en que ésta avanzó puede visualizarse a través de las marcas de playa. La grieta se desarrolló por fatiga hasta que la sección del material no soportó más la magnitud de los esfuerzos y se propagó rápidamente de manera frágil.

## **SUGERENCIAS**

Como la causa de la falla se atribuye al proveedor de las barras de acero de las que se fabrican los punzones, las recomendaciones más importantes están dirigidas al fabricante de los punzones. Sin embargo, también se hacen algunas sugerencias al fabricante de tabletas, para alargar su vida útil y evitar fallas que ellos pudieran ocasionar.

**Al fabricante de punzones:**

1. Establecer un control de su materia prima para evaluar su calidad. Para ello se recomienda que se haga un análisis metalográfico de cada barra que reciban, de la siguiente forma:
  - a) Tomar una muestra de uno de los extremos de la barra para determinar el tipo de microestructura tanto en la dirección longitudinal como transversal. En ambos casos, se deberá observar una estructura esferoidizada típica de un acero herramental recocido, y no una estructura segregada en bandas.
  - b) Repetir el paso anterior pero ahora para una muestra del otro extremo.
2. En caso de no ser posible llevar a cabo la recomendación anterior, solicitar un certificado de origen que garantice la calidad del material, en el que se especifique que las barras son entregadas en su condición de recocido y homogéneas.
3. Considerar un cambio del tipo de acero utilizado para fabricar los punzones, en vez de emplear un acero resistente al desgaste como el D2, utilizar para los punzones un acero resistente al impacto, como el S1 o el S7, y para las matrices uno resistente al desgaste, como el A2 o el D2.

**Al fabricante de tabletas:**

1. Establecer procedimientos estándar para la recepción de punzones en los que se especifique el número de muestras que deberán medirse y las tolerancias en las dimensiones. En caso de cumplir con los requisitos establecidos en el procedimiento, el juego de punzones podrá aceptarse.

2. Establecer un plan de validación de los punzones en el cual se verifiquen las dimensiones después de cierto número de lotes producidos, para determinar si están dentro de las tolerancias establecidas. Como se explicó en el punto 4.1, esto es muy importante principalmente para la altura de los punzones, ya que si ésta varía mucho, se deberán rectificar ligeramente las cabezas de los mismos para estandarizar la altura de todos ellos. Esta verificación deberá hacerse antes de guardar los punzones, para poder tomar acciones correctivas antes de la producción de un nuevo lote.
3. Elaborar procedimientos estándar para el cambio de formato en una tableteadora y para su mantenimiento preventivo. De esta forma, se busca que siempre que se realice alguna operación de mantenimiento, se ejecute bien sin importar quien la lleve a cabo.
4. Evitar sobrepasar los valores de carga recomendados por el fabricante de la máquina y de los punzones.
5. Buscar el desarrollo de nuevas formulaciones cuyas características faciliten la operación de tableteado sin perder las propiedades que debe tener la tableta.
6. Tener una comunicación continua con el fabricante de punzones para que éste utilice el tipo de acero más adecuado de acuerdo con las características del granulado que se vaya a compactar.

## **APÉNDICE**

### **SEGREGACIÓN**

La composición química de una pieza fundida nunca es totalmente uniforme, el contenido de los elementos varía de un punto a otro. La variación en el contenido de un elemento con respecto a la composición media de una aleación es una imperfección conocida como segregación.

Cualquier aleación que solidifica a lo largo de un rango de temperaturas forma un sólido con una composición no homogénea. La parte externa, que es la primera que solidifica, tendrá una composición diferente a la del núcleo, que es la parte última en solidificar.

La estructura metalográfica resultante de la solidificación en ausencia de un gradiente de temperaturas que provoque un enfriamiento parejo, es la estructura conocida como dendrítica, y se presenta en la mayoría de las piezas fundidas. El tamaño y espaciamiento de las dendritas dependerá de la velocidad de enfriamiento, y determinará el tamaño de grano.

La variación en el contenido de un elemento entre el núcleo de las dendritas y las zonas interdendríticas, provoca que las características del material varíen de un punto a otro, afectando sus propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, resistencia a la fractura y a la fatiga. También, en aleaciones que reciben un tratamiento térmico, puede causar zonas con poca o mucha dureza, grietas durante el temple, y otros defectos.

Hay dos métodos para resolver el problema de la segregación dendrítica: uno es impedir su formación a través de un lento enfriamiento del líquido, pero esto origina granos de gran tamaño y requiere un tiempo muy largo; el otro, preferido por la industria, es igualar la composición u homogeneización de la estructura dendrítica segregada mediante difusión en el estado sólido.

Para la mayoría de los metales, a temperatura ambiente la rapidez de difusión es muy baja, pero si la aleación se recalienta a una temperatura abajo de la línea solidus, la difusión será más rápida y la homogeneización ocurrirá en un tiempo menor. Deberá tenerse mucho cuidado en este tratamiento para no cruzar la línea solidus, ya que de lo contrario, habrá derretimiento de las fronteras de grano, dañando la forma y las propiedades físicas de la pieza fundida.

El grado de segregación, el espaciamiento interdendrítico y el coeficiente de difusión, son los factores más importantes para calcular el proceso de homogeneización, pues este espaciamiento es la distancia que los átomos deberán recorrer durante la difusión.

En lingotes de más de una tonelada, la velocidad de enfriamiento provoca un espaciamiento tan grande que la homogeneización es prácticamente imposible. Estos lingotes normalmente son deformados para reducir su sección transversal, y ya que la deformación también afectará el espaciamiento interdendrítico, este proceso tiene gran influencia en la homogeneización.

Una de las funciones de los procesos de deformación plástica como forja, laminación y extrusión, es romper la estructura dendrítica resultante de la fundición, favoreciendo la homogeneidad de la pieza. Sin embargo, aunque ayuda a la homogeneización de la pieza, ésta no se logra totalmente si el grado de segregación del lingote es muy grande.

En una pieza fundida, los ejes de las dendritas son más ricos en los elementos de aleación que solidifican primero y en impurezas, que las regiones interdendríticas y por consecuencia, son más duros y frágiles. Durante la deformación plástica del material, no se deforman ni fluyen con la facilidad que lo hace la matriz en la que se encuentran (zonas interdendríticas). Al comienzo de la deformación, la matriz fluye tratando de reorientar a las dendritas en la dirección del flujo. Conforme el proceso continúa, las dendritas se deforman y fracturan, alargándose cada vez más.

Por lo anterior, la homogeneidad de la pieza generalmente es mejor en la dirección longitudinal que en la transversal. La estructura resultante está compuesta por capas alternadas de ferrita y perlita, en forma de bandas o fibras, y se debe a que durante el proceso de deformación (principalmente en laminación), las zonas ricas y pobres en elementos de aleación son alargadas, formando estas bandas o fibras.

Debido a que el coeficiente de difusión del carbono intersticial es muy alto, la estructura fibrosa es difícil que ocurra en aceros al carbono, pero aparece cuando están presentes aleantes cuya difusión en el acero es más lenta y que alteran la temperatura de transformación de austenita a ferrita. Durante el enfriamiento, las regiones con baja concentración de elementos estabilizadores de la austenita, como el manganeso y el cromo, se transformarán primero a ferrita, precipitando el carbono hacia regiones más ricas en manganeso y cromo, los cuales conservan la estructura austenítica. Conforme continúa el enfriamiento, el carbono se concentra en estas zonas hasta que se alcanza la temperatura eutectoide y se transforman a perlita, y si el contenido de aleantes es elevado, se formarán también carburos.

Como estos procesos de deformación plástica se realizan en caliente, es muy importante la velocidad de enfriamiento de las piezas. Si la diferencia de temperaturas en el rango donde ocurre la transformación de austenita a ferrita lo denotamos como  $\Delta T$ , la velocidad de enfriamiento como  $T'$ , el espacio entre bandas como  $d$  y el

coeficiente de difusión térmica como  $D_c$ , entonces la condición para que las bandas de perlita y ferrita aparezcan es la siguiente:

$$T' < \frac{D_c \Delta T}{d^2}$$

Si la velocidad de enfriamiento es mayor que este valor, la segregación en bandas no aparece pero existe la posibilidad que esta estructura pueda desarrollarse durante el tratamiento térmico posterior. Por ello, lo más recomendable es llevar a cabo un recocido inmediatamente después del proceso de deformación en caliente. Si el recocido se realiza a una temperatura entre  $A_{c1}$  y  $A_{c3}$ , la estructura obtenida no es completamente homogénea ya que la ferrita y la perlita se transforman a austenita de manera distinta, debido a la diferencia de composiciones. La estructura más homogénea se obtiene si recocemos a una temperatura por arriba de  $A_{c3}$ , seguido de un rápido enfriamiento en el rango de temperaturas entre  $A_{c1}$  y  $A_{c3}$ . Donde  $A_{c1}$  es la temperatura a la que se empieza a formar austenita durante el calentamiento y  $A_{c3}$  es la temperatura a la que la transformación de ferrita en austenita se completa.

**BIBLIOGRAFÍA**

ASM Handbook Committee, *Metals Handbook, 9th Edition*, Volume 4: Heat Treating, American Society for Metals, Metals Park Ohio, USA, 1985, p.p. 709 - 725, 739 - 745.

ASM Handbook Committee, *Metals Handbook, 9th Edition*, Volume 9: Metallography and Microstructures, American Society for Metals, Metals Park Ohio, USA, 1985, p.p. 256 - 272.

ASM Handbook Committee, *Metals Handbook, 9th Edition*, Volume 11: Failure Analysis and Prevention, American Society for Metals, Metals Park Ohio, USA, 1986, p.p. 15 - 64, 102 - 135, 314 - 343.

ASM Handbook Committee, *Metals Handbook, 9th Edition*, Volume 12: Fractography, American Society for Metals, Metals Park Ohio, USA, 1987, p.p. 12 - 68.

Avner, Sydney H., *Introducción a la metalurgia física*, Ed. McGraw-Hill, México, 2a. ed., 1990, p.p. 162 - 251, 384 - 419.

Brooks, Charlie R., Choudhury, Ashok, *Metallurgical Failure Analysis*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1993, p.p. 73 - 268.

Dieter, George E., *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill Book Company, London, 1988, p.p. 348 - 431.

Doyle, Lawrence E., Keyser, Carl. A., et ali., *Materiales y procesos de manufactura para ingenieros*, Ed. Prentice Hall, México, 3a. ed., 1988, p.p. 771 - 819.



I. Holland Limited, *Holland Educational Series*, Vol. 2: Tablet Design, I. Holland Limited, England, 1993, p.p. 3 - 15.

I. Holland Limited, *Holland Educational Series*, Vol. 4: Tooling Problems, I. Holland Limited, England, 1993, p.p. 2 - 17.

KILIAN & Co. GmbH., *Manual de operación y mantenimiento de la tableteadora Kilian RX-51*, KILIAN & Co. GmbH., W. Germany, 1981.

Mohn Bill, "El cuidado y mantenimiento adecuado de las tableteadoras rotativas: montaje y problemas relacionados", *Informacético*, vol. 1, no. 5, Asociación Farmacéutica Mexicana A.C., 1995.

Lange, Kurt, *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1985, p.p. 17.1 - 17.25.

Martin J.W., Doherty R.D., *Stability of microstructure in metallic systems*, Cambridge University Press, Great Britain, 1976, p.p. 21 - 37.

Sachdev A.K., Embury J. D., *Formability and Metallurgical Structure*, The Metallurgical Society Inc., USA., 1987, p.p. 92 - 97.

Tableting Committee of the Industrial Pharmaceutical Technology Section, *Tableting Specification Manual*, American Pharmaceutical Association, USA, 2d. ed., 1981, p.p. 1 - 24.

Wilhelm FETTE GmbH., *Manual de operación y mantenimiento de la tableteadora FETTE PT2080*, Wilhem FETTE GmbH., W. Germany, 1991.

Wilhelm FETTE GmbH., Manual de operación y mantenimiento de la tableteadora  
FETTE P3100, Wilhem FETTE GmbH., W. Germany, 1994.