

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela técnica superior de
Ingeniería industrial



PROYECTO FINAL DE CARRERA
“Elaboración de un análisis modal de fallos y efectos de un cigüeñal de fundición nodular para automoción”

Titulación: I.T.I. Mecánica
Alumno: Patricio Mercader Siles
Director: Horacio T. Sánchez Reinoso
Codirector: José Ojados Roca

Cartagena, 14 de Octubre de 2008



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar he de agradecer a mis padres, D. Ginés Mercader Hernández, Ingeniero Técnico de Telecomunicaciones, y a mi madre, Dña. María Dolores Siles Lurquí toda su ayuda prestada, por el esfuerzo realizado para costear mis estudios y la confianza depositada en mi durante estos años.

Así mismo, quiero agradecer a D. Horacio Sánchez Reinoso, profesor del departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación de la UPCT, por la información prestada, por la dirección del presente proyecto fin de carrera y por la ayuda encontrada en él.

También quería agradecer al profesor D. José Ojados Roca y a D. Ginés Meroño Ruiz la colaboración y el interés que siempre han mostrado y la predisposición a ayudarme y por haberme facilitado en gran medida las fases y estudios de este proyecto.

Vaya también desde aquí, mi recuerdo y agradecimiento a todos los profesores de la Universidad Politécnica de Cartagena, que durante estos tres años han contribuido a mi formación en el campo de la Ingeniería Mecánica.



▪ **INDICE**

1. CAPITULO I - Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objeto	3
1.3 Resumen	4
1.4. Teoría AMFE	5
1.4.1 AMFE de diseño	13
1.4.2 AMFE de proceso	13
1.4.3 Implantación del AMFE	16
2. CAPITULO II - AMFE de diseño	21
2.1. Análisis y diseño del material del cigüeñal	22
2.1.1 Definición de cigüeñal	22
2.1.2 Elección del material	23
2.1.2.1 Introducción	23
2.1.2.2 Elaboración de la fundición	23
2.1.2.3 Clasificación de las fundiciones	28
2.1.2.4 Fundición nodular. Introducción histórica, características y componentes.	31
2.1.3 Análisis de la fundición del cigüeñal estudiado.	36
2.1.3.1 Caracterización del material	36
2.1.3.2 Análisis con microscopio óptico	38
2.1.3.3 Análisis con microscopio electrónico	42
2.1.3.4 Características mecánicas y composición del cigüeñal	49
2.2 Fundición y colada del material	52
2.2.1 Introducción	52
2.2.2 Fundamentos de la fundición	52
2.2.3 Moldeo	54
2.2.3.1 Partes del molde	54
2.2.3.2 Sobredimensionamiento del modelo o del molde	55
2.2.4 Fusión	56
2.2.5 Colada	57
2.2.6 Solidificación	59
2.2.6.2 Contracción	60
2.2.6.3 Solidificación direccional	61
2.2.7 Tecnología de los procesos de fundición	62
2.2.7.1 Introducción	62
2.2.7.2 Procesos de fundición en molde permanente	62
2.2.7.3 Selección del tipo de colada	65
2.2.8 Desarenado	66



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

II

2.2.9 Defectos de fundición	67
2.2.9.1 Clasificación según el origen del defecto	68
2.3 Flujo de esfuerzos	70
2.3.1 Introducción	70
2.3.2 Procesos de deformación y rotura en los metales	71
2.3.3 Por qué se rompen los metales	75
2.3.4 Concentración de esfuerzos – Analogía de flujo	75
2.4 Resultados de AMFE DE DISEÑO	79
3. CAPITULO III - AMFE de proceso	83
3.1 Proceso de fabricación	84
3.1.1 Introducción	84
3.1.2 Duración del cigüeñal	85
3.1.3 Planificación de procesos	86
3.1.3.1 Introducción	86
3.1.3.2 Elaboración de los planos, estudio de la información geométrica	88
3.1.3.3 Determinación de procesos y secuencia de mecanizado	91
3.2 Teoría de torneado	98
3.2.1 Montaje de las piezas en el torno	99
3.2.2 Materiales para herramientas de corte	101
3.2.3 Factores de corte	107
3.3. Selección de parámetros de corte	116
3.3.1 Selección de plaquitas	116
3.3.1.1 Cilindrado	116
3.3.1.2 Tronzado	126
3.3.1.3 Ranurado	128
3.3.1.4 Desahogos	132
3.3.1.5 Ranurado frontal	133
3.3.1.6 Roscado	134
3.3.2 Selección de parámetros de corte	137
3.3.2.1 Desbaste, mecanizado medio y acabado	137
3.3.2.2 Tronzado	139
3.3.2.3 Ranurado de desbaste y de acabado	140
3.3.2.4 Desahogos	141
3.3.2.5 Ranurado frontal	141
3.4 Rectificado	143
3.4.1 Introducción	143
3.4.2 Análisis del proceso	145
3.4.3 Muelas	148
3.4.3.1 Clases de abrasivos	149
3.4.3.2 Tamaño de grano	150
3.4.3.3 Estructura de la rueda	152
3.4.4 Especificación de las ruedas de esmerilado	153



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

III

3.4.5 Refrigerante / Filtrado	153
3.5 Selección de parámetros de rectificado	155
3.6 Control numérico computerizado	161
3.7 Resultados de AMFE de proceso	166
4. CAPITULO IV - Discusión de resultados y conclusiones	171
4.1 Discusión de resultados	172
4.1.1 AMFE de diseño	172
4.2.2 AMFE de proceso	173
4.2. Conclusiones	174
Bibliografía consultada	178
<i>ANEXO I – Planos</i>	179
a) Acotación del cigüeñal	180
b) Numeración de superficies del cigüeñal	181
c) Preforma original de colada	182
<i>ANEXO II – Planificación de proceso</i>	183
d) Volúmenes asociados a superficies	184
e) Hoja de proceso de mecanizado	187
f) Hoja de instrucciones	192
<i>ANEXO III – Cálculos justificativos</i>	197
g) Cálculos	198
<i>ANEXO IV – Tabla de rugosidades y amarres</i>	200
h) Rugosidades	201
j) Amarres	202
<i>ANEXO V – Criterios AMFE</i>	204
i) Criterios AMFE	205



INDICE DE FIGURAS

1. CAPITULO I – Documentos introductivos	1
Fig. 1.1 Cigüeñal de automoción estudiado	3
Fig. 1.2 Gráfico de situación de AMFE	5
Fig 1.3 Encadenado de causas de fallo	9
Fig. 1.4 Esquema implantación AMFE	16
2. CAPÍTULO II – AMFE de diseño	21
Fig. 2.1 Esquema de piezas	22
Fig. 2.2 Alto horno	25
Fig. 2.3 Proceso de producción de la fundición	26
Fig. 2.4 Diagrama de equilibrio hierro-Carbono	27
Fig. 2.5 Horno cubilote	32
Fig. 2.6 Microestructura de la fundición nodular ferrítico perlítica	33
Fig. 2.7 Esfuerzo último de tensión y límite de fluencia de los cinco grados de la norma ASTM A536	34
Fig. 2.8 Ensayo Vickers	36
Fig. 2.9 Borde del eje con 5 aumentos sobre lente	39
Fig. 2.10 Eje con 20 aumentos sobre lente, atacado	39
Fig. 2.11 Eje con 20 aumentos sobre lente, pulido	40
Fig. 2.12 Contrapeso con 20 aumentos sobre lente, atacado	40
Fig. 2.13 Imagen general con microscopio electrónico	42
Fig. 2.14 Detalle de nódulo	42
Fig. 2.15 Hueco por desprendimiento de nódulo	43
Fig. 2.16 Imagen general con microscopio electrónico	44
Fig. 2.17 Análisis de estructura general de la fundición	44
Fig. 2.18 Imagen general con microscopio electrónico	45
Fig. 2.19 Análisis del nódulo	45
Fig. 2.20 Detalle de superficie del eje	46
Fig. 2.21 Análisis de la superficie del eje	46
Fig. 2.22 Detalle del borde del eje	47
Fig. 2.23 Análisis del borde del eje	47
Fig. 2.24 Detalle de borde 2	48
Fig. 2.25 Análisis de detalle de borde 2	48
Fig. 2.26 Gráfica de tratamiento térmico de recocido	49
Fig 2.27 Esquema de procesado de una colada	53
Fig. 2.28 Elementos que componen los moldes	55
Fig. 2.29 Ensayo de colabilidad	58
Fig. 2.30 Cambio de fases de aleaciones	59
Fig. 2.31 Detalle de solidificación en molde cilíndrico y cúbico	59
Fig. 2.32 Mecanismo de formación de rechupes	60



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

V

Fig. 2.33 Fundición en molde permanente por gravedad	63
Fig. 2.34 Fundición a alta presión en cámara fría	64
Fig. 2.35 Defectos de fundición	67
Fig. 2.36 Deformación y rotura en metales	74
Fig. 2.37 Concentración de esfuerzos por muescas en la pieza	76
Fig. 2.38 Dispersión de esfuerzos por diferentes geometrías	76
Fig. 2.39 Detalle de muescas de la pieza estudiada	77
Fig. 2.40 Simulación de esfuerzos en cigüeñal	78
3. CAPÍTULO III – AMFE de proceso	
Fig 3.1 Etapas características de la planificación de procesos	87
Fig. 3.2 Movimientos principales del torno	98
Fig. 3.3 Trabajos característicos del torno paralelo	99
Fig. 3.4 Broca de puntos	100
Fig. 3.5 Tipos de plato de garras	100
Fig. 3.6 Imagen al microscopio de un conglomerado metálico	102
Fig. 3.7 Proceso de fabricación del metal duro	102
Fig. 3.8 Evolución de los tiempos de mecanizado desde 1900	104
Fig. 3.9 Dureza y temperatura de trabajo de algunos materiales de corte	104
Fig. 3.10 Factores de corte de torneado	107
Fig. 3.11 Perfil de plaquita	108
Fig. 3.12 Plaquetas de perfil positivo o negativo	108
Fig. 3.13 Influencia del ángulo de ataque en la viruta	109
Fig. 3.14 Geometrías de plaquetas	110
Fig. 3.15 Plaquetas Wiper	111
Fig. 3.16 Problemas en plaquetas por mecanizado	112
Fig. 3.17 Tipos de sujeción de plaquita	114
Fig. 3.18 Recomendación de la sujeción de la plaquita según el mecanizado 1	114
Fig. 3.19 Recomendación de la sujeción de la plaquita según el mecanizado 2	115
Fig. 3.20 Tipos de plaquetas para fundición 1	116
Fig. 3.21 Tipos de plaquetas para fundición 2	117
Fig. 3.22 Geometrías de incidencia de plaquetas	119
Fig. 3.23 Geometría de plaquita del tipo NGA	119
Fig. 3.24 Forma de la plaquita	120
Fig. 3.25 Parámetros de los materiales de corte	120
Fig. 3.26 Composición del GC 3005	121
Fig. 3.27 Composición del GC 3015	121
Fig. 3.28 Composición del GC 3025	121
Fig. 3. 29 Tipos de plaquita según sección transversal	122
Fig. 3.30 Tipos de plaquita según alzado	123
Fig 3.31 Geometría de plaquita tipo C	123
Fig. 3.33 Denominación de las plaquetas	124
Fig. 3.34 Espesores de plaquita y radio de punta	124
Fig. 3.35 Anchura de chaflán y ángulo de chaflán	124



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

VI

Fig. 3.36 Composición del GC1690	125
Fig. 3.37 Composición del GC 4025	127
Fig. 3.38 Parámetros de corte de los materiales para tronzado	127
Fig. 3.38 Denominación de plaquita para tronzado	127
Fig. 3.40 Parámetros de corte para materiales ranurado	129
Fig. 3.41 Plaquita -5G	129
Fig. 3.42 Plaquita -6G	129
Fig. 3.43 Plaquita E-G	129
Fig. 3.44 Parámetros posibles de ranurado	130
Fig. 3.45 Denominación de plaquita de roscado	136
Fig. 3.46 Parámetros recomendados para tronzado por geometría	139
Fig. 3.47 Parámetros posibles para ranurado frontal por -7G	142
Fig. 3.48 Rugosidad superficial con diferentes parámetros de mecanizado	143
Fig. 3.49 Tipos de rectificado	144
Fig. 3.50 Parámetros de rectificado	145
Fig. 3.51 Ecuaciones de rectificado	145
Fig. 3.52 Calculo de volumen de rectificado	147
Fig. 3.53 Arranque de viruta por abrasivos	148
Fig. 3.54 Materiales de rueda	149
Fig. 3.55 Granos de las ruedas	150
Fig. 3.56 Estructura de la rueda	152
Fig. 3.57 Defectos por temperatura inadecuada de lubricación	154
Fig. 3.58 Angulo de proyección de lubricante	154
Fig. 3.59 Parámetros de proyección del lubricante	154
Fig. 3.60 Código de definición de herramienta	156
Fig. 3.61 Imagen del corindón puro	156
Fig. 3.62 Tipo de estructura de la muela	158
Fig. 3.63 Reglaje de herramientas en el torno	162
Fig. 3.64 Referencias en torno respecto a plaquita	163
Fig. 3.65 Parámetros para definir una herramienta en el torno	164
Fig. 3.66 Flujo de información en CAD/CAM	166



INDICE DE TABLAS

1. CAPITULO I – Documentos introductivos	1
Tabla 1.1 Cálculo del Número de Prioridad de Riesgo	6
Tabla 1.2 Tipos de AMFE	7
Tabla 1.3 Esquema del informe AMFE	10
Tabla 1.4 Criterio para Gravedad de Fallo	12
Tabla 1.5 Criterio para probabilidad de ocurrencia	13
Tabla 1.6 Criterio para probabilidad de no detección	14
Tabla 1.7 Ejemplo de uso de cada tipo de AMFE	17
2. CAPÍTULO II – AMFE de diseño	21
Tabla 2.1 Constituyentes del acero y la fundición	28
Tabla 2.2 Cotejo de materiales para cigüeñal	31
Tabla 2.3 Clasificación de la fundición nodular teniendo en cuenta sus características mecánicas de acuerdo con la norma ASTM A-536	33
Tabla 2.4 Composición química característica de la fundición nodular (porcentajes en peso)	34
Tabla 2.5 Usos generales de los distintos tipos de fundición	34
Tabla 2.6 Efecto de los aleantes en la fundición nodular	50
Tabla 2.7 Contracción de distintos metales	61
Tabla 2.8 Características conseguidas con distintos tipos de molde	62
3. CAPÍTULO III – AMFE de proceso	83
Tabla 3.1 Calidades posibles de mecanizado por los distintos procesos	93
Tabla 3.2 Aceros rápidos para herramientas	101
Tabla 3.3 Relación entre las velocidades de corte de cuchillas de diferentes aceros para un afilado cada 60 minutos	102
Tabla 3.4 Propiedades de los recubrimientos más importantes	106
Tabla 3.5 Soluciones para problemas en plaquitas por mecanizado incorrecto	113
Tabla 3.6 Plaquitas de corte para fundición nodular y parámetros recomendados	118
Tabla 3.7 Comparación entre plaquitas recomendadas de desbaste	122
Tabla 3.8 Comparación entre plaquitas recomendadas de mecanizado medio	122
Tabla 3.9 Comparación entre plaquitas recomendadas de acabado	122
Tabla 3.10 Plaquitas de NGA	124
Tabla 3.11 Plaquitas de tronzado	126
Tabla 3.12 Geometría y material recomendado para operaciones de mecanizado	128
Tabla 3.13 Plaquitas de tronzado y rasurado -5G u -6G	131
Tabla 3.14 Plaquitas de tronzado y rasurado E-G	132
Tabla 3.15 Plaquitas para desahogos -4U	133
Tabla 3.16 Plaquitas para rasurado frontal N151.3-7G	133
Tabla 3.17 Roscado según uso de la pieza	134
Tabla 3.18 Plaquitas para roscado métrico 60°	135
Tabla 3.19 Parámetros de corte en cilindrado	137



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

VIII

Tabla 3.20 Parámetros seleccionados para cilindrado	138
Tabla 3.21 Parámetros recomendados según material	139
Tabla 3.22 Parámetros seleccionados para tronzado	139
Tabla 3.23 Parámetros seleccionados para tronzado de desbaste	140
Tabla 3.24 Iteración para V. de corte según el avance	140
Tabla 3.25 Parámetros seleccionados para tronzado en acabado	140
Tabla 3.26 Parámetros de corte par material H13A	141
Tabla 3.27 Parámetros de corte seleccionados para desahogos	141
Tabla 3.28 Parámetros de corte para ranurado frontal	142
Tabla 3.29 Velocidades de rectificado recomendadas	146
Tabla 3.30 Propiedades fundamentales de los aglomerantes	151
Tabla 3.31 Especificación de las ruedas de esmerilado	153
Tabla 3.32 Calidad de la superficie rectificada en función del tamaño de grano	155
Tabla 3.33 Muelas recomendadas según producto	156
Tabla 3.34 Identificación de tamaño de grano	157
Tabla 3.35 Índice de densidad de estructura	158
Tabla 3.36 Dureza de la piedra	158
Tabla 3.37 Código de dureza de la muela	159
Tabla 3.38 Código de velocidades de corte	159
Tabla 3.39 Velocidades de rectificado recomendadas	159
Tabla 3.40 Parámetros de rectificado seleccionados	160



I. INTRODUCCIÓN



▪ 1.2 - ANTECEDENTES

Por mediación del Departamento de Materiales y Fabricación , en este proyecto desarrollaremos los pasos a dar en la realización de un AMFE (análisis modal de fallos y efectos), del cigüeñal de un motor de cuatro tiempos monocilíndrico, del que se desprenderá una valiosa información que se utilizará para la prevención de fallos en todo el proceso de construcción de un cigüeñal desde el diseño del mismo hasta el mecanizado del mismo.

El Análisis Modal de Fallos y Efectos es una herramienta de ingeniería de la calidad cuyo propósito final no es otro que el de disminuir los costos de un proceso productivo identificando las causas de problemas y actuando sobre aquellas que se consideren que sobrepasan el umbral máximo de NPR, es decir, de lo que se denomina como número de prioridad de riesgo.

El análisis AMFE puede ser aplicado a cualquier proceso o producto y han de identificarse todos aquellos factores que mermen la calidad del proceso o producto.

Partiendo de la base de que ningún proceso es perfecto y de que en todos aparecerán defectos, se detecta que en el proceso de fabricación de este cigüeñal de fundición nodular aparecen defectos que han de ser corregidos para satisfacer los requisitos de calidad necesarios para poder competir en el mercado.

El AMFE es una potente herramienta de ingeniería de calidad. Existen otros procesos y sistemas que serán aplicados según criterio del fabricante. Las exigencias de la economía global exigen la aplicación de estas herramientas y como tal se ha escogido esta para aplicarla sobre una pieza crítica para estudiar su utilidad y mejorar un proceso siempre mejorable.

▪ 1.2 - OBJETO DEL PROYECTO

El siguiente proyecto tiene por objeto la realización de un análisis modal de fallos y efectos ligados a las variables que influyen en el proceso de fabricación de un cigüeñal de cuatro tiempos de un motor de automoción, su planificación de proceso y el diseño del mismo. En este análisis se pretenden depurar las causas de fallos y errores en la pieza, partiendo desde el mismo momento de la elección del material, hasta su puesta en funcionamiento y posterior uso.

El proyecto está basado en el estudio de un cigüeñal obtenido de un taller mecánico, dando por válidas sus calidades de dureza del material y razonando la explicación del por qué de esas decisiones. El dimensionado del mismo así como el proceso de fabricación del mismo serán descritos en este documento.

Este proyecto cuenta con una parte teórica obtenida de la distinta bibliografía disponible en el mercado, a partir de la cual se han razonado y se han presumido las causas de los fallos, las soluciones a los mismos, y los efectos de los mismos. Así como los parámetros del proceso de mecanizado.



Fig.1.1. Cigüeñal de automoción estudiado.

A lo largo del mismo se irán detallando cada una de las partes componentes de la planificación de procesos también, mediante la cual se pretende optimizar la fabricación de elementos mecánicos sujetos a procesos de fabricación mediante máquinas herramienta (MH), determinando para ello las operaciones de fabricación, parámetros de corte, tiempos, herramientas, etc., más idóneas para la llevar a cabo dicho proceso.

La representación gráfica incluida en este proyecto del cigüeñal, ha sido tomada de la pieza de la foto, conseguida de un taller mecánico, y a él se corresponden sus dimensiones, y en él está basado el proyecto.



▪ 1.4 - RESUMEN

Para el Análisis Modal de Fallos y Efectos en este proceso se ha partido del estudio de un cigüeñal ya fabricado. Asumiendo por válida la geometría del cigüeñal para soportar los esfuerzos a los que será sometida la pieza, se ha centrado el proyecto en el estudio del material, de sus propiedades, del por qué de sus componentes y de todo lo que atañe al proceso de fabricación: planificación del proceso, colada, torneado, rectificado, necesidad de CNC y CAD/CAM.

En primer lugar fue extraído un cigüeñal de un taller mecánico correspondiente a un modelo de automóvil SEAT Córdoba. El primer paso dado para el estudio del material fue su medición y análisis geométrico posteriormente plasmado en el ordenador mediante el programa AUTOCAD. Tras esto se procedió al corte de una sección de la pieza con el fin de realizar un estudio metalográfico del mismo.

En el estudio se pretendió encontrar la composición del material así como encontrar pistas que nos condujeran a la recreación de su proceso de fabricación. Para sorpresa nuestra el material del mismo no se correspondía con el de un acero sino con el de una fundición nodular.

Esto despertó el interés inmediatamente dado que el proceso de fabricación del mismo variaría de manera importante. Tras el análisis de dureza se dedujo que tampoco había recibido un tratamiento térmico ya que tanto el corazón de la pieza como la zona superficial marcaban iguales durezas.

Fue sometida también la pieza a análisis químico en el laboratorio electrónico en el que cuál se pudieron estudiar los aleantes del material y estudiar la explicación del por qué su presencia en la estructura.

Una vez definido perfectamente el material se procedió a la recreación de los procesos de conformado y mecanizado para estudiar las posibles fuentes de problemas. Partiendo del proceso de colada, hasta el último proceso de rectificado y torneado.

Se han estudiado de acuerdo a renombrados fabricantes de piezas de mecanizado los parámetros de corte más idóneos según el tipo de material del cigüeñal así como la selección de las herramientas de corte.

Para un buen orden de los procesos de fabricación y los efectos causados en la pieza, se ha realizado también un estudio de la planificación de procesos con sus respectivas hojas de instrucciones.

1.4 – INTRODUCCIÓN AL AMFE (Análisis Modal de Fallos y Efectos)

Este apartado pretende describir en qué consiste la metodología AMFE, Análisis Modal de Fallos y Efectos.

Gráfico de situación

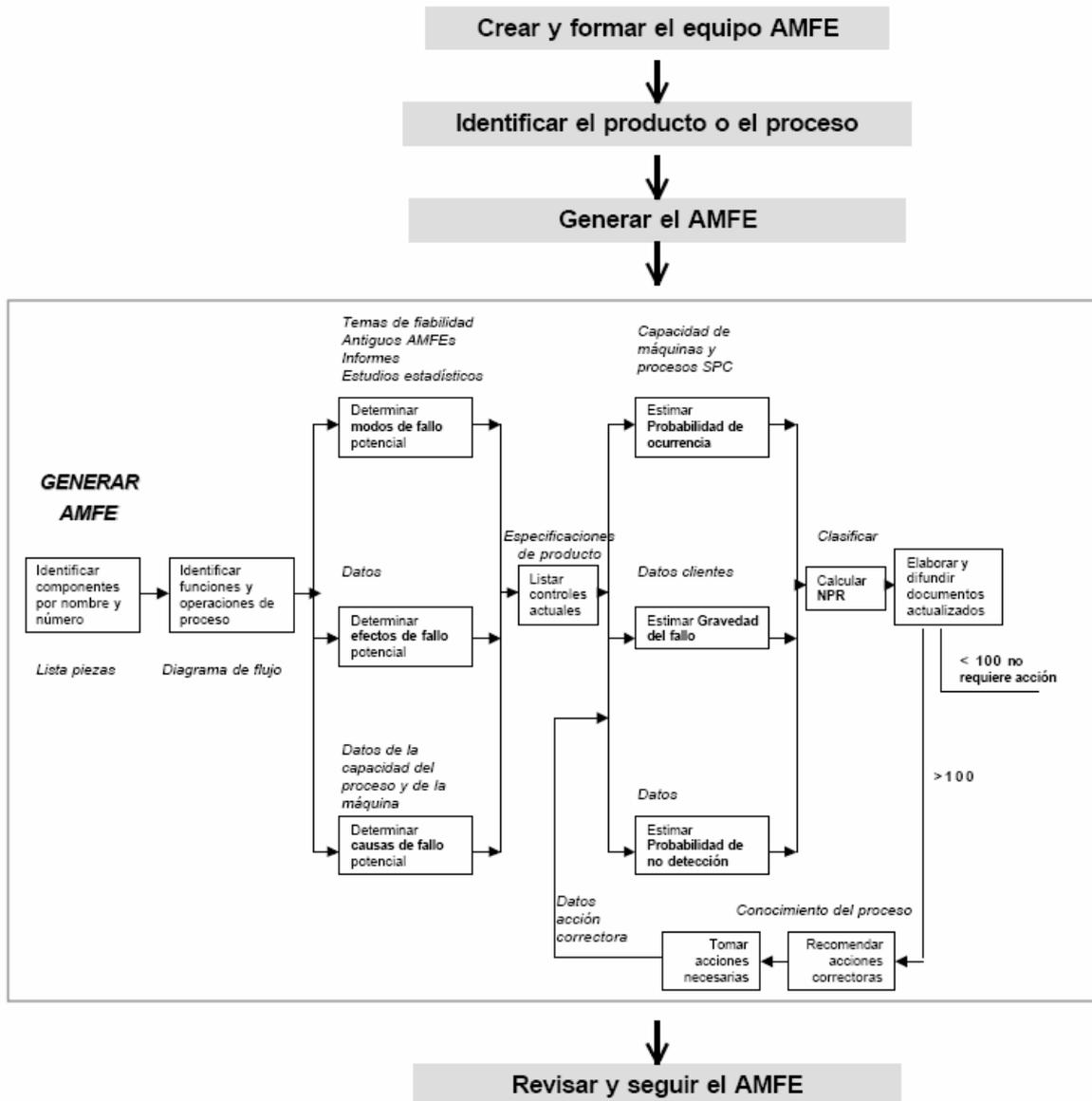


Fig. 1.2 Gráfico de situación de AMFE



▪ Introducción.

El AMFE o Análisis Modal de Fallos y Efectos, es una herramienta de máxima utilidad en el desarrollo del producto que permite, de una forma sistemática, asegurar que han sido tenidos en cuenta y analizados todos los fallos potencialmente concebibles.

Es decir, el AMFE permite identificar las variables significativas del proceso/producto para poder determinar y establecer las acciones correctoras necesarias para la prevención del fallo, o la detección del mismo si éste se produce, evitando que productos defectuosos o inadecuados lleguen al cliente.

La definición exacta por lo tanto, es la siguiente:

“El AMFE o Análisis Modal de Fallos y Efectos es un método dirigido a lograr el Aseguramiento de la Calidad, que mediante el análisis sistemáticos, contribuye a identificar y prevenir los modos de fallo, tanto de un producto como de un proceso, evaluando su gravedad, ocurrencia y detección, mediante los cuales, se calculará el Número de Prioridad de Riesgo, para priorizar las causas, sobre las cuales habrá que actuar para evitar que se presenten dichos modos de fallo.

Los siguientes términos, que aparecen en la definición anterior, son los llamados parámetros de evaluación. Mas adelante se analizarán cada uno de ellos.

Número de prioridad de Riesgo

$$NPR = S * O * D$$

Tabla 1.1

S: Gravedad de fallo

O: Probabilidad de ocurrencia

D: Probabilidad de no detección.

¿Cuáles son los objetivos que se pretenden alcanzar cuando se realiza un AMFE?

- Satisfacer al cliente
- Introducir en las empresas la filosofía de la prevención
- Identificar los modos de fallo que tienen consecuencias importantes respecto a diferentes criterios: disponibilidad, seguridad, etc.
- Precisar para cada modo de fallo los medios y procedimientos de detección.
- Adoptar acciones correctoras y/o preventivas, de forma que se supriman las causas de fallo del producto, en diseño o proceso.
- Valorar la eficacia de las acciones tomadas y ayudar a documentar el proceso.



¿Cuándo de realiza un AMFE?

Por definición el AMFE es una metodología orientada a maximizar la satisfacción del cliente mediante la reducción o eliminación de los problemas potenciales o conocidos. Para cumplir con este objetivo el AMFE se debe comenzar tan pronto como sea posible. Incluso cuando aún no se disponga de toda la información.

En concreto el AMFE se debería comenzar:

- Cuando se diseñen nuevos procesos o diseños.
- Cuando cambien procesos o diseños actuales sea cual fuere la razón.
- Cuando se encuentren nuevas aplicaciones para los productos o procesos actuales.
- Cuando se busquen mejoras para los procesos o diseños actuales.

Dentro del proceso de diseño de un producto, el AMFE es de aplicación durante las fases de diseño conceptual, desarrollo y proceso de producción. En esta fase el AMFE se complementa con otras herramientas de ingeniería de calidad como QFD, benchmarking, estudio de quejas y reclamaciones, fiabilidad y CEP.

El AMFE se puede dar por finalizado cuando se ha fijado la fecha de comienzo de producción en el caso de AMFE de diseño o cuando todas las operaciones han sido identificadas y evaluadas y todas las características críticas se han definido en el plan de control, para el caso de AMFE de proceso. En cualquier caso, siempre se puede reabrir un AMFE para revisar, evaluar o mejorar un diseño o proceso existente, según un criterio de oportunidad que se fijará en la propia empresa.

Como regla general de los archivos del AMFE habrán de conservarse durante el ciclo completo de vida del producto (AMFE de diseño) o mientras el proceso se siga utilizando (AMFE de proceso).

Tipos de AMFE

Se pueden distinguir dos tipos de AMFE según en el marco de la gestión del proceso donde se inscriba:

AMFE DE DISEÑO	→	Diseño de nuevos productos.
AMFE DE PROCESO	→	Diseño del proceso de fabricación

Tabla 1.2

Por ejemplo, en el caso que nos ocupa de un cigüeñal:

El AMFE de diseño va dirigido al producto, es decir, al diseño del cigüeñal.

El AMFE de proceso está dirigido al proceso de fabricación, es decir, a los medios de producción que se utilizan.



Realmente el AMFE es válido para cualquier tipo de proceso entendiendo que un proceso puede ser de diseño, de fabricación, de ventas, organizativo, administrativo o de cualquier tipo de servicio. En un AMFE de proceso de fabricación se supone que el producto cumplirá la finalidad del diseño, y si se descubrieran fallos en éste, deberían ser inmediatamente comunicados a los departamentos o personas implicadas. No obstante, no corresponde a la finalidad de este AMFE analizar dichos fallos, sino que se considerará que el producto está diseñado correctamente.

También hay que decir que entre el AMFE de proceso y de diseño existe una correlación: los AMFE de diseño y proceso siguen uno al otro en una secuencia lógica. Mientras el AMFE de diseño puede haber identificado una deficiencia del proceso (agujeros sin taladrar), como la causa de un modo de fallo particular de un componente o equipo, esta deficiencia es recogida como modo de fallo de proceso por el AMFE de proceso, siendo analizada mas detenidamente con el fin de hallar por qué puede fallar el proceso (broca rota).

▪ AMFE DE DISEÑO

Consiste en el análisis preventivo de los diseños, buscando anticiparse a los problemas y necesidades de los mismos. Este AMFE es el paso previo lógico al de proceso porque se tiende a mejorar el diseño, para evitar el fallo posterior en producción.

El AMFE es una herramienta de la calidad en la que:

1. Se hace un estudio de la factibilidad para ver si se es capaz de resolver el diseño dentro de los parámetros de fiabilidad establecidos.
2. Se realiza el diseño orientándolo hacia los materiales, compras ensayos, producción....ya que los modos de fallo con ellos relacionados se tienen en cuenta en este tipo de AMFE.

El objeto de estudio de un AMFE de diseño es el producto y todo lo relacionado con su definición.

Se analiza por tanto la elección de los materiales, su configuración física, las dimensiones, los tipos de tratamiento a aplicar y los posibles problemas de realización.

▪ AMFE DE PROCESO

Es el "Análisis de modos de fallos y efectos" potenciales de un proceso de fabricación, para asegurar su calidad de funcionamiento y, en cuanto de él dependa, la fiabilidad de las funciones del producto exigidos por el cliente.

En el AMFE de proceso se analizan los fallos del producto derivados de los posibles fallos del proceso hasta su entrega al cliente.



Se analizan, por tanto los posibles fallos que pueden ocurrir en los diferentes elementos del proceso (materiales, equipo, mano de obra, métodos y entorno) y cómo éstos influyen en el producto resultante.

Hay que tener claro que la fiabilidad del producto final no depende sólo del AMFE de proceso final, sino también de la calidad del diseño de las piezas que lo componen y de la calidad intrínseca con que se hayan fabricado las mismas. Sólo puede esperarse una fiabilidad óptima cuando se haya aplicado previamente un AMFE de diseño y un AMFE de proceso en proveedores externos e internos.

▪ Conceptos

Un modo de fallo puede estar originado por una o más causas. Éstas, pueden ser independientes entre sí, tales como la A o la B de la figura. También pueden combinarse entre ellas, es decir, que el modo de fallo está condicionado a que se presenten ambas, como por ejemplo, C y D. Y por último, puede que las causas estén encadenadas como la E y F, es decir, la E no se presentará si no aparece antes de F.

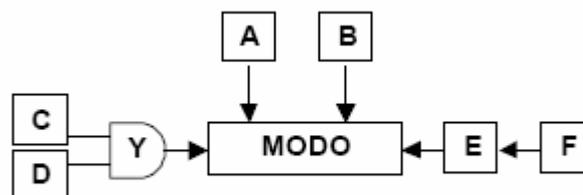


Fig. 1.3 Encadenado de causas de fallo

En este último caso, las causas pueden ser confundidas con los modos de fallo o los efectos. Por ejemplo, una vibración en un elemento mecánico puede provocarle fatiga, y ésta a su vez producir la rotura, que el cliente detectará por un ruido especial. En este caso la fatiga se puede considerar como una causa secundaria o como un modo de fallo. Esta secuencia de hechos se puede representar del modo siguiente:

Vibración → Fatiga → Rotura → Ruido

Lo más importante es establecer la cadena de sucesos en el orden correcto para una mejor comprensión del problema y una adecuada valoración de los índices de ocurrencia, de los cuales se hablará más adelante.

▪ Descripción Del Método

A continuación se indican los pasos necesarios para la aplicación del método AMFE de forma genérica, tanto para diseños como para procesos, Los pasos siguen la secuencia indicada en el formato AMFE que se presenta a continuación:



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 10 / 205

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS														HOJA	REVI. Nº	FECHA	POR
														DE PROCESO <input type="checkbox"/> DE DISEÑO <input type="checkbox"/>			
PRODUCTO:				PROCESO:				RESPONSABLE:									
ESPECIFICACIÓN:				OPERACIÓN:				FECHA:									
FECHA DE EDICIÓN:				ACTUAR SOBRE NPR> QUE:				REVISADO:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	VALORACIÓ N			18
														15	16	17	

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Nombre del producto. 2. Operación o función. 3. Modo de fallo. 4. Efectos del fallo. 5. Gravedad del fallo. 6. Características críticas. 7. Causa del fallo. 8. Probabilidad de ocurrencia. 9. Controles actuales. | <ol style="list-style-type: none"> 10. Probabilidad de no detección. 11. Número de prioridad de riesgo. 12. Acción correctora. 13. Definir responsables. 14. Acciones implantadas. 15. Nuevo valor de gravedad del fallo. 16. Nuevo valor de probabilidad de ocurrencia. 17. Nuevo valor de probabilidad de no detección. 18. Nuevo número de prioridad de riesgo. |
|---|---|

Tabla 1.3

Paso 1: Nombre del producto y componente.

En la primera columna del formato AMFE se escribe el nombre del producto sobre el que se va a aplicar. También se incluyen todos los subconjuntos y los componentes que forman parte del producto a analizar, bien sea desde el punto de vista de diseño del producto o del proceso que se vaya a utilizar para la fabricación.

Paso 2: Operación o función.

La segunda columna se completa con distinta información según se esté realizando un AMFE de diseño o proceso.

- Para el AMFE de diseño se incluyen las funciones que realiza cada uno de los componentes, además de las interconexiones existentes entre los componentes.
- Para el AMFE de proceso se reflejan todas las operaciones que se realizan a lo largo del proceso de fabricación de cada componente incluyendo las operaciones de aprovisionamiento, de producción, de embalaje, de almacenado y de transporte.



Paso 3: Modo de fallo

Para cumplimentar la tercera columna se recomienda comenzar con una revisión de los informes realizados en AMFEs anteriores, relacionados con el producto o proceso que se esté analizando.

Un modo de fallo significa que un elemento o sistema no satisface o no funciona de acuerdo con la especificación, o simplemente no se obtiene lo que se espera de él. El fallo es una desviación o un defecto de una función o especificación. Con esa definición, un fallo puede no ser inmediatamente detectable por el cliente y sin embargo hemos de considerarlo como tal.

Paso 4: Efecto/s del fallo.

Suponiendo que el fallo potencial ha ocurrido, en esta columna se describirán los efectos del mismo tal como lo haría el cliente. Los efectos corresponden a los síntomas. Generalmente hacen referencia al rendimiento o prestaciones del sistema.

Cuando se analiza una parte o componente se tendrá también en cuenta la repercusión en todo el sistema, lo que ofrecerá una descripción más clara del efecto. Si un modo de fallo tiene muchos efectos, a la hora de evaluar, se elegirá el más grave.

Entre los efectos típicos de fallo podrían citarse los siguientes:

- Diseño: ruido, acabado basto, inoperante, olor desagradable, inestable, etc.
- Proceso: no puede sujetar, no puede alinearse, no puede perforar, no se puede montar, etc.

Para la obtención de los efectos se utiliza mucho el "Diagrama causa-consecuencia" entendiéndose por consecuencia el efecto.

Paso 5: Gravedad del fallo.

Este índice está íntimamente relacionado con los efectos del modo de fallo. El índice de gravedad valora el nivel de las consecuencias sentidas por el cliente. Esta clasificación está basada únicamente en los efectos del fallo. El valor del índice crece en función de:

- La instalación del cliente. Si se produce un gran descontento, el cliente no comprará más.
- La degradación de las prestaciones. La rapidez de aparición de avería.
- El coste de la reparación.

El índice de gravedad o también llamado de "severidad" es independiente de la frecuencia y de la detección. Para utilizar unos criterios comunes en la empresa ha de utilizarse una tabla de clasificación de la severidad de cada efecto de fallo, de forma que se objetivice la asignación de valores de S. En la siguiente tabla se muestra un ejemplo en que se relacionan los efectos del fallo



con el índice de severidad. En cada empresa se debería contar con unas tablas similares adaptadas al producto, servicio, diseño, o proceso concreto para el que se vaya a utilizar.

Criterio	Valor de S
ÍNFIMA. El defecto sería imperceptible por el usuario.	1
ESCASA. El cliente puede notar un fallo menor, pero sólo provoca una ligera molestia.	2-3
BAJA. El cliente nota el fallo y le produce cierto enojo.	4-5
MODERADA. El fallo produce disgusto e insatisfacción en el cliente.	6-7
ELEVADA. El fallo es crítico, originando un alto grado de insatisfacción en el cliente.	8-9
MUY ELEVADA. El fallo implica problemas de seguridad o de no conformidad con los reglamentos en vigor.	10

Tabla 1.4

Este índice sólo es posible mejorarlo mediante acciones de diseño, y no se ve afectado por los controles actuales.

Como la clasificación de gravedad está basada únicamente en el efecto de fallo, todas las causas potenciales del fallo para un efecto particular de fallo, recibirán la misma clasificación de gravedad.

Paso 6: Características críticas.

Siempre que la gravedad sea 9 ó 10, y que la frecuencia y detección sean superiores a 1, consideraremos el fallo y las características que le corresponden como críticas. Estas características, que pueden ser una cota o una especificación, se identificarán con un triángulo invertido u otro signo en el documento de AMFE, en el plan de control y en el plano si le corresponde. Aunque el NPR resultante sea menor que el especificado como límite, conviene actuar sobre estos modos de fallo.

Paso 7: Causa del fallo.

En esta columna se reflejan todas las causas potenciales de fallo atribuibles a cada modo de fallo. La causa potencial de fallo se define como indicio de una debilidad del diseño o proceso cuya consecuencia es el modo de fallo. Las causas relacionadas deben ser lo más concisas y completas posibles, de modo que las acciones correctoras y/o preventivas puedan ser orientadas hacia las causas pertinentes.

Entre las causas típicas de fallo podrían citarse las siguientes:

- En diseño: porosidad, uso de material incorrecto, sobrecarga...
- En proceso: daño de manipulación, utillaje incorrecto, sujeción, amarre..

Decir que al igual que en la obtención de los efectos se hacía uso del diagrama "causa-efecto", a la hora de detectar las causas de un fallo se hace uso del "Árbol de fallos" que permitirá obtener las causas origen de un fallo.



Paso 8: Probabilidad de ocurrencia.

Ocurrencia se define como la probabilidad de que una causa específica se produzca y dé lugar al modo de fallo. El índice de la ocurrencia representa más bien un valor intuitivo más que un dato estadístico matemático, a no ser que se dispongan de datos históricos de fiabilidad o se haya modelizado y previsto éstos. En esta columna se pondrá un valor de probabilidad de ocurrencia de la causa específica.

Tal y como se acaba de decir, este índice de frecuencia está íntimamente relacionado con la causa de fallo, y consiste en calcular la probabilidad de ocurrencia en una escala del 1 al 10, como se indica en la tabla siguiente.

Criterio	Valor de O
MUY ESCASA probabilidad de ocurrencia. Defecto inexistente en el pasado.	1
ESCASA probabilidad de ocurrencia. Muy pocos fallos en circunstancias.	2-3
FRECUENTE probabilidad de ocurrencia. En circunstancias similares anteriores el fallo se ha presentado con cierta frecuencia.	4-5
MODERADA probabilidad de ocurrencia. En circunstancias similares anteriores el fallo se ha presentado con cierta frecuencia.	6-7
ELEVADA probabilidad de ocurrencia. El fallo se ha presentando frecuentemente en el pasado.	8-9
MUY ELEVADA probabilidad de fallo. Es seguro que el fallo se producirá frecuentemente.	10

Tabla 1.5

Cuando se asigna la clasificación por ocurrencia, deben ser consideradas dos probabilidades:

- La probabilidad de que se produzca la causa potencial de fallo. Para esto, deben evaluarse todos los controles actuales utilizados para prevenir que se produzca la causa de fallo en el elemento designado.
- La probabilidad de que, una vez ocurrida la causa de fallo, ésta provoque el efecto nocivo (modo) indicado. Para este cálculo debe suponerse que la causa del fallo y de modo de fallo son detectados antes de que el producto llegue al cliente.

Para reducir el índice de frecuencia, hay que emprender una o dos acciones:

- Cambiar el diseño, para reducir la probabilidad de que la causa de fallo pueda producirse-
- Incrementar o mejorar los sistemas de prevención y/o control que impiden que se produzca la causa de fallo.

El consejo que se da para reducir el índice de frecuencia de una causa es atacar directamente la "raíz de la misma". Mejorar los controles de vigilancia debe ser una acción transitoria, para más tarde buscar alguna solución que proporcione una mejora de dicho índice.



Paso 9: Controles actuales.

En esta columna se reflejarán todos los controles existentes en la actualidad para prevenir las causas del fallo y detectar el efecto resultante.

Paso 10: Probabilidad de no detección.

Este índice indica la probabilidad de que la causa y/o modo de fallo, supuestamente aparecido, llegue al cliente. Se está definiendo la “no-detección”, para que el índice de prioridad crezca de forma análoga al resto de índices a medida que aumenta el riesgo. Tras lo dicho se puede deducir que este índice está íntimamente relacionado con los controles de detección actuales y la causa. A continuación se muestra un ejemplo de tabla que relaciona la probabilidad de que el defecto alcance al cliente y el índice de no-detección.

- Cuadro de clasificación según la Probabilidad de no detección “D” –

Criterio	Valor de D
MUY ESCASA. El defecto es obvio. Resulta muy improbable que no sea detectado por los controles existentes.	1
ESCASA. El defecto, aunque es obvio y fácilmente detectable, podría raramente escapar a algún control primario, pero sería posteriormente detectado.	2-3
MODERADA. El defecto es una característica de bastante difícil detección.	4-5
FRECUENTE. Defectos de difícil detección que con relativa frecuencia llegan al cliente.	6-7
ELEVADA. El defecto es de naturaleza tal, que su detección es relativamente improbable mediante los procedimientos convencionales de control y ensayo.	8-9
MUY ELEVADA. El defecto con mucha probabilidad llegará al cliente, por ser muy difícil detectable.	10

Tabla 1.6

Es necesario no confundir control y detección, pues una operación de control puede ser eficaz al 100%, pero la detección puede resultar nula si las piezas no conformes son finalmente enviadas por error al cliente.

Para mejorar este índice será necesario mejorar el sistema de control de detección, aunque por regla general aumentar los controles signifique un aumento de coste, que es el último medio al que se debe recurrir para mejorar la calidad. Algunos cambios en el diseño también pueden favorecer la probabilidad de detección.

Paso 11: Número de Prioridad de Riesgo (NPR).

El Número de Prioridad de Riesgo (NPR) es el producto de la probabilidad de ocurrencia, la gravedad, y la probabilidad de no detección, y debe ser calculado para todas las causas de fallo. El NPR es usado con el fin de priorizar la causa potencial del fallo para posibles acciones correctoras. El NPR también es denominada IPR (Índice de prioridad de riesgo).



Paso 12: Acción correctora.

En este paso se incluye una descripción breve de la acción correctora recomendada, Para las acciones correctoras es conveniente seguir un cierto orden de prioridad en su elección. El orden de preferencia en general será el siguiente:

1. Cambio en el diseño del producto, servicio o proceso general.
2. Cambio en el proceso de fabricación.
3. Incremento del control o de la inspección.

Para un mismo nivel de calidad o un mismo valor del índice de prioridad NPR en dos casos, suele ser más económico el caso que no emplea ningún control de detección. Es en general más económico reducir la probabilidad de ocurrencia de fallo (si se encuentra la manera de conseguirlo) que dedicar recursos a la detección de fallos.

Es conveniente considerar aquellos casos cuyo índice de gravedad sea 10, aunque la valoración de la frecuencia sea subjetiva y el NPR menor de 100 o del valor considerado como límite.

Cuando en un modo de fallo intervienen muchas causas que no son independientes entre sí, la primera medida correctora puede ser la aplicación del Diseño de Experimentos (DDE), que permitirá cuantificar objetivamente la participación de cada causa y dirigir acciones concretas. Es un medio muy potente y seguro para reducir directamente la frecuencia de defectos.

Paso 13: Definir responsables.

En esta columna se indican los responsables de las diferentes acciones propuestas y, si se cree preciso, las fechas previstas de implantación de las mismas.

Paso 14: Acciones implantadas.

En esta columna se reflejarán las acciones realmente implantadas que pueden en algunos casos, no coincidir con las propuestas inicialmente recomendadas.

Paso 15: Nuevo número de Prioridad de Riesgo.

Como consecuencia de las acciones correctoras implantadas, los valores de la probabilidad de ocurrencia (O), la gravedad (S), y/o la probabilidad de no detección (D) habrán disminuido, reduciéndose, por tanto, el Número de Prioridad de Riesgo. Los nuevos valores de S, O, D y NPR se reflejarán en las columnas 15,16, 17 y 18.

Si a pesar de la implantación de las acciones correctoras, no se cumplen los objetivos definidos en algunos Modos de Fallo, es necesario investigar, proponer el implantar nuevas acciones correctoras, hasta conseguir que el NPR sea menor que el definido en los objetivos. Una vez conseguido que los NPR de todos los modos de fallo estén por debajo del valor establecido, se da por concluido el AMFE.

■ IMPLANTACIÓN DEL AMFE

Como requisito previo necesario para implantar el AMFE en una empresa hay que contar con el apoyo de la gerencia. Conseguir el apoyo de la gerencia es muy importante, ya que la elaboración del AMFE:

- se realiza en horas de trabajo;
- implica cambios (y los cambios cuestan dinero y no son fáciles de hacer);
- se llega a conclusiones que requieren el apoyo de la dirección.

La gerencia tiene que conocer el método, apoyar su aplicación y animar al equipo de trabajo, ya que la persistencia en el esfuerzo es uno de los factores de éxito.

Las etapas para la implantación sistemática del AMFE en la empresa son las siguientes:



Fig. 1.4

A continuación se analizan cada una de estas etapas:

1. Crear y formar el equipo AMFE.

Los miembros del grupo deben formarse específicamente en el método AMFE y también en las técnicas de análisis y solución de problemas. La práctica más usual es



formar un grupo base como máximo de seis personas, de las áreas de Ingeniería, Métodos, Producción y Calidad para que luego éstas sean capaces de formar a los miembros que se incorporen a los grupos AMFE. Todo esto siempre supervisado por un departamento de economía que tutele los cambios significativos en el precio final del producto que pueden suponer los cambios.

Hay que explicar a todos los miembros del equipo lo que es el AMFE, diagramas de flujo o de bloques funcionales, las técnicas estadísticas que se van a emplear (variabilidad, CEP,...), Plan de control, los diagramas de Ishikawa (causa-efecto), etc.

3. Identificar el producto o proceso.

El grupo base se ocupa de identificar sobre qué producto y/o proceso se va a aplicar el AMFE y quién va a ser el responsable de dirigirlo y realizarlo.

Cuando se quiera utilizar el AMFE sobre un proceso o producto y no se tenga claro sobre cual hacerlo, una buena técnica a utilizar puede ser la tormenta de ideas, seguido de una labor de priorización de las oportunidades de mejora que surjan.

Ejemplo de qué tipo de AMFE se aplica en cada uno de los siguientes casos:

Producto / Proceso	Tipo de AMFE
Producto nuevo	Diseño
Modificación importante del producto	Diseño
Diferente utilización del producto	Diseño
Producto con problemas de calidad	Diseño
Proceso nuevo	Proceso
Modificación importante del proceso.	Proceso
Proceso con problemas de calidad	Proceso

Tabla 1.7

3. Elaborar el Diagrama de Flujo y/o diagramas de Bloques funcionales.

Para los AMFE de proceso se preparan diagramas de flujo. Para los AMFE de diseño se estudia el diagrama de bloques funcionales del conjunto final y el proceso de diseño.

El diagrama de flujo es como una fotografía del proceso, Es la representación esquemática y cronológica de las operaciones que componen la elaboración del producto, Además, sirve para tomar como punto de partida la documentación del proceso: gamas de control, puntos críticos,... Para su realización se utilizan una serie de símbolos con su significado correspondiente.

El diagrama de bloques funcionales representa de forma esquemática las partes que componen un sistema y sus relaciones físicas o funcionales. Conviene simplificarlo cuando el producto a estudiar sea muy complejo, para que los integrantes del equipo puedan comprenderlo sin problemas.

El Plan de control es un documento escrito que recoge las acciones encaminadas a planificar la calidad para un proceso, producto y/o servicio específico.



El Plan de control lista todas las características de diseño y parámetros del proceso consideradas importantes para lograr la satisfacción del cliente y que requieren acciones específicas para lograr alcanzarlas.

El AMFE es el método que identifica las características críticas y significantes de un proceso o producto y por tanto es el punto de partida para iniciar un Plan de control.

4. Recoger datos de fallos y clasificarlos.

Para la realización del AMFE es necesario dirigir al grupo hacia la identificación de los problemas potenciales de calidad del producto o del proceso, de una forma estructurada.

Para ello, antes de comenzar el análisis exhaustivo del producto o del proceso, es necesario que el responsable del AMFE disponga de toda la información relevante del producto o del proceso implicado.

5. Preparar el AMFE

El grupo de AMFE, mediante una o varias reuniones y haciendo uso de la documentación aportada por el responsable del AMFE, de sus conocimientos y de las técnicas de análisis y solución de problemas más adecuadas en cada caso, comienza la aplicación del AMFE al producto o al proceso designado.

Para ello, completa en primer lugar el encabezamiento del formato AMFE con los datos correspondientes (producto, proceso, especificación, fecha, etc.).

Se completan también las columnas 1 y 2 del formato, asegurando que no se olvidan ningún componente.

A continuación y haciendo uso del método más adecuado (por ejemplo, la tormenta de ideas, el diagrama causa-efecto), se comienza a identificar los diferentes Modos de Fallo. Para cada uno se determina:

- el efecto de fallo,
- la cauda del fallo,
- la probabilidad de ocurrencia,
- la gravedad,
- la probabilidad de no detección,
- el índice de prioridad de riesgo,
- las acciones correctoras,
- la responsabilidad de implantar las acciones correctoras;

todo ello, siguiendo la metodología expuesta en la pregunta anterior y reflejando la información correspondiente en las columnas 3 a 12 del formato.

Con la definición de las acciones correctoras concluye la etapa inicial de aplicación del AMFE.



6. Implantar las acciones correctoras

El responsable de implantar cada una de las acciones correctoras propuestas es el encargado de planificar y asegurar su realización práctica. Si es preciso efectúa los ajustes o las modificaciones oportunas, con objeto de optimizar el resultado.

7. Revisar y seguir el AMFE

Una vez implantadas las acciones correctoras, con objeto de mejorar los Números de Prioridad del Riesgo en los modos de fallos seleccionado, el equipo AMFE se debe reunir con los responsables de la implantación, para evaluar los resultados.

El responsable de la implantación de cada una de las acciones correctoras propuestas informa al grupo sobre cuáles han sido implantadas y cuándo, así como de los resultados obtenidos en la evaluación de las acciones tomadas.

Con estos datos, el equipo AMFE comienza a redefinir la probabilidad de ocurrencia, la gravedad y la probabilidad de no detección de aquellos modos de fallo sobre los que se hayan tomado acciones correctoras, con objeto de calcular el nuevo Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Estos datos se reflejan en las columnas 14 a 18.

Si con los nuevos NPR se cumplen los objetivos definidos en el AMFE para el producto o proceso afectado, el AMFE puede ser dado por concluido.

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que el AMFE es un proceso dinámico y requiere revisiones periódicas, con objeto de tenerlo siempre actualizado. Especialmente, es conveniente en los siguientes casos:

- Cuando se realicen modificaciones que afecten al producto o al proceso estudiado.
- Cuando se encuentren nuevas aplicaciones para el producto o proceso actual.
- Cuando existan reclamaciones importantes por parte de los clientes.
- Cuando corresponda por la periodicidad establecida.
- Cuando interese realizar mejoras sobre el producto o proceso.

7. Beneficios de la aplicación del AMFE

Los principales beneficios que se obtienen al aplicar este método son los siguientes:

➤ Potencia la atención al cliente.

En la aplicación del método AMFE y la consiguiente reducción, al mínimo, del Número de Prioridad de Riesgo, lo que se pretende es que el efecto para los clientes (tanto externos como internos) de los posibles modos de fallo sea el mínimo posible. Esto se consigue mediante las acciones correctoras.



➤ **Potencia la comunicación entre los departamentos.**

La organización para la realización del AMFE requiere que diversos departamentos de la empresa colaboren en la búsqueda de los modos de fallo y sus soluciones. Esta interacción facilita la comunicación entre departamentos, de forma que los problemas no se observan como relativos a un departamento, sino al conjunto de la empresa.

➤ **Facilita el análisis de los productos y los procesos.**

La estructura sistemática del AMFE permite recopilar una enorme cantidad de información que de otra forma sería imposible. Además, proporciona la información necesaria para decidir qué es lo que se debe hacer y por qué, de forma clara y concisa, fomentando la participación del grupo.

➤ **Mejora la calidad de los productos y los procesos.**

El AMFE permite, mediante la ponderación y la selección, proponer y aplicar las acciones correctoras que mejoran el diseño o el proceso, de forma que se reduce el riesgo de ocurrencia de ineficacias y, por lo tanto, el resultado es una mejora de la calidad del producto o del proceso.

➤ **Reduce los costes operativos.**

La filosofía de la prevención y de la mejora continua, que subyace en el AMFE, ayuda a eliminar las ineficiencias existentes, con la consiguiente reducción en tiempo y dinero.

➤ **Ayuda a cumplir con requisitos ISO 9000 y directivas europeas de responsabilidad de productos.**

La razón por la que el AMFE se aplica a todos los aparatos de la norma ISO 9000, es porque el AMFE comparte el objetivo y el espíritu de modo de prevención que impregna este estándar. Se debe recordar siempre que por definición el AMFE es una herramienta que quiere optimizar el sistema, diseño, proceso y/o servicio a través de la modificación, mejora y/o eliminación de cualquier problema conocido o potencial.



II. AMFE DE DISEÑO

▪ 2.1 ANÁLISIS Y DISEÑO DEL MATERIAL DEL CIGÜEÑAL

▪ 2.1.1 DEFINICIÓN DE CIGÜEÑAL

Es el elemento que junto con la biela y el pistón realiza la transformación del movimiento alternativo en movimiento rotativo. Transmite también el giro y fuerza motriz a los demás órganos de transmisión.

Constituido por un árbol acodado el cual posee unas muñequillas de apoyo que descansan sobre los apoyos del bloque motor. El cigüeñal va fijado en sus apoyos, al igual que la cabeza de biela, por unos sombreretes, denominados sombreretes de bancada. Entre medias se colocan unos casquillos denominados semi casquillos de bancada o semi cojinetes de bancada, los cuales tienen la misión de reducir el rozamiento al máximo y evitar el desgaste prematuro entre las piezas en contacto. El número de apoyos de un cigüeñal suele ser, el número de cilindros menos uno.

También posee unos muñones o muñequillas de biela, sobre los que se acoplan las bielas por medio de la cabeza de biela. Siendo el número de muñones igual al de cilindros.

En los apoyos situados en los extremos del motor, se montan unos retenes que eviten las pérdidas de aceite hacia el exterior, tanto en el lado de la distribución como en el lado del volante.

Posee unos orificios que comunican entre sí y que sirven como conductos para la circulación del aceite de engrase. Estos orificios se encuentran en los apoyos y en los muñones para que lubriquen las piezas que se encuentran sometidas a mayor desgaste.

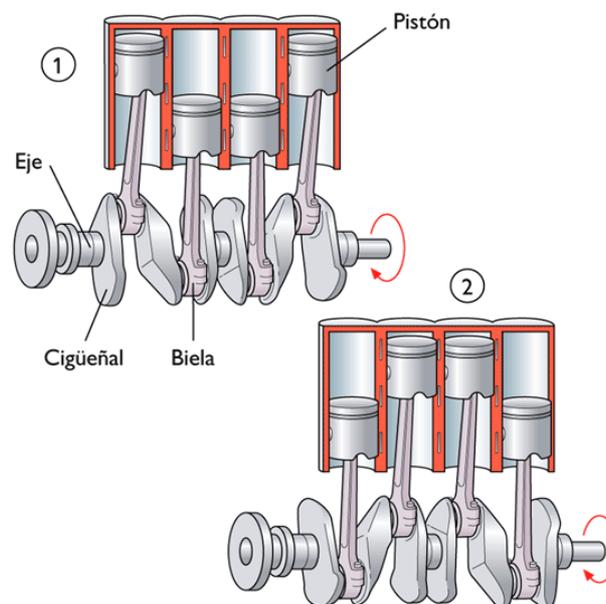


Fig. 2.1



▪ 2.1.2 ELECCIÓN DE MATERIAL

▪ 2.1.2.1 INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto se partió del estudio de un cigüeñal real correspondiente a un vehículo modelo SEAT Córdoba, perteneciente al grupo Volkswagen.

La pieza fue obtenida de un taller mecánico, y formaba parte de un motor de un vehículo siniestrado. Como se puede observar es un cigüeñal de un motor de cuatro cilindros por el número de muñequillas que tiene. Aunque en un principio el estudio se iba a referir a las propiedades geométricas y de material del mismo, suponiendo que sería de acero; me fue muy grata la sorpresa al analizarlo y observar claramente que no se trataba de acero, sino de fundición nodular; lo cual ha hecho mucho más interesante la experiencia por lo peculiar del cigüeñal.

La inmensa mayoría de los cigüeñales destinados a automóviles familiares como el que corresponde a la fotografía, han sido manufacturados hasta la fecha en acero por la gran mayoría de los fabricantes. Profesores del departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación de la Universidad Politécnica de Cartagena me comentaron que conocían la aplicación de la fundición nodular por parte de la casa Ford, pero no de ninguna otra, lo cual despertó de inmediato el interés por la pieza.

La pieza recibió varios cortes para ser analizadas las secciones más características de la misma: la muñequilla y los contrapesos.

Dado el proceso de fabricación que llevan este tipo de piezas, tanto muñequillas como eje central deben de tener la misma composición y mismo tratamiento si los hubiere, por lo tanto daremos como válidos los resultados obtenidos en el análisis del eje, como válidos también para las muñequillas.

El objetivo de estudiar este cigüeñal era conocer la composición y características que poseía un elemento de fundición desarrollado por una marca prestigiosa que sin duda habría estudiado y encontrado soluciones a los problemas que plantea el uso del material. Para ello, fueron sometidas a un estudio de microdureza ambas piezas, y también al estudio del microscopio electrónico.

▪ 2.1.2.2- ELABORACIÓN DE LA FUNDICIÓN.

Como bien sabemos la fundición está conformada básicamente por hierro y carbono, con porcentajes de este último superiores a los del acero.

Aunque el hierro es muy abundante en la naturaleza, solo se puede obtener económicamente de algunos minerales. Los más rentables son las menas del hierro: oligisto, hematites roja, limonita o hematites parda, magnetita, carbonato de hierro (hierro espático o siderita). También se utiliza la chatarra o hierro viejo.



Junto con el mineral de hierro son precisas para la fabricación del hierro materias que se combinen con el oxígeno del óxido para que el hierro quede libre, estas materias se llaman reductores. En la práctica el más utilizado como reductor es el carbón de coque y algunas veces el carbón vegetal.

Son precisos además los fundentes, que sirven para que la escoria se forme mejor y tenga más fluidez. Se emplean para este fin el carbonato cálcico en forma de piedra caliza y el espatato fluor.

Para la obtención del hierro la industria utiliza generalmente los altos hornos, donde las menas del hierro se funden y se obtiene una fundición todavía impura llamada arrabio. Posteriormente este arrabio se convierte en acero tras pasar por los convertidores (Bessemer, Thomas, Rober), horno Martín Siemens, horno LD (usado en la actualidad), horno eléctrico y horno de crisol. El lingote de arrabio también se puede fundir de nuevo para obtener fundiciones más puras.

Operaciones preliminares: los minerales antes de ser introducidos en el alto horno necesitan de ciertas operaciones como son:

- Lavado: se efectúa para separar las sustancias salinas y terrosas por medio de una corriente de agua.
- Cribado: se hace por medio de cribas de mallas rotatorias. Su objeto es separar los trozos de mineral según su tamaño.
- Calcinación: calentamiento lento y prolongado del mineral. Su objetivo es convertir el carbonato de hierro en óxido de hierro.
- Tostación: es una acción más energética que la calcinación, su objetivo es eliminar el azufre.

Funcionamiento del alto horno:

La carga del mineral, el carbón y los fundentes se efectúa por la parte superior del horno llamada tragante. El tragante recibe la carga por medio de potentes montacargas y cintas transportadoras para elevar todas las materias, ya que el alto horno suele tener de 20 a 30 metros de altura.

Del tragante caen el mineral, el carbón y el fundente en capas alternativas a la cuba, la cual se va gradualmente ensanchando hasta la zona denominada vientre.

A partir de ahí el horno vuelve a estrecharse en la zona denominada etalajes y se hace cilíndrica en la obra, en cuya parte inferior se encuentra el crisol, cuyo fondo se denomina solera.

El crisol tiene dos orificios de salida: uno en la parte superior llamado bigotera por donde sale la escoria y otro en la parte inferior llamado piquera por donde sale el arrabio. A la altura de la obra y alrededor de todo el horno, existen unas bocas llamadas toberas por donde entra aire caliente procedente de las estufas Cowper, y en donde se alcanzan temperaturas de 1800 grados.

Con el hierro líquido obtenido (arrabio) se forman lingotes. El material así obtenido se llama arrabio o hierro de primera fusión. Es muy impuro y quebradizo y necesita otras operaciones para poder ser utilizado. Otras veces, en vez de hacer lingotes, el arrabio se lleva en estado líquido a la acería, cargándolo en unos recipientes llamados cucharas y vaciándolo en otros recipientes llamados mezcladores, que pueden contener hasta 2.000 toneladas de arrabio.

Objeto y principio general del afino.

Por el afino la fundición pierde parte del carbono convirtiéndose en acero, o bien solamente en otro tipo de fundición.

- Entre los procedimientos para realizar el afino tenemos:
- Afino por aire en el convertidor: Bessemer, Thomas, Robert.
- Afino por oxígeno en el convertidor.
- Afino sobre solera en horno Martín - Siemens.
- Afino sobre solera en convertidor LD (Linz-Donawitz).
- Afino en horno eléctrico.
- Afino en horno de crisol.

Propiedades físicas, químicas y mecánicas del hierro:

El hierro es un metal de símbolo químico Fe, blando, dúctil y maleable, que recién cortado presenta un color blanco gris. Su peso específico $P_e=7.86$ Kg. Es decir, 1dm^3 de hierro pesa 7.86 Kg.

Su punto de fusión es de 1530 grados, y la temperatura de ebullición es de 2.455 grados.

El aire seco no le ataca, pero sí el aire húmedo, recubriéndolo de una capa de óxido llamada herrumbre.

A la metalurgia del hierro se le llama siderurgia.

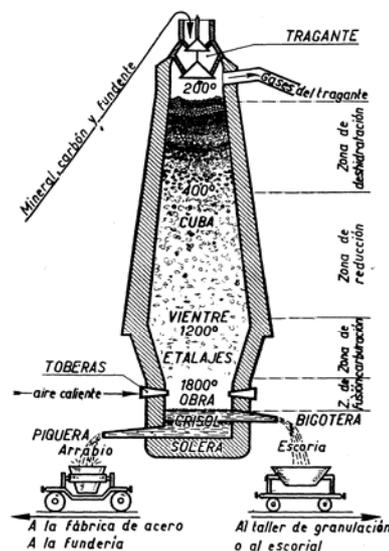


Fig. 2.2

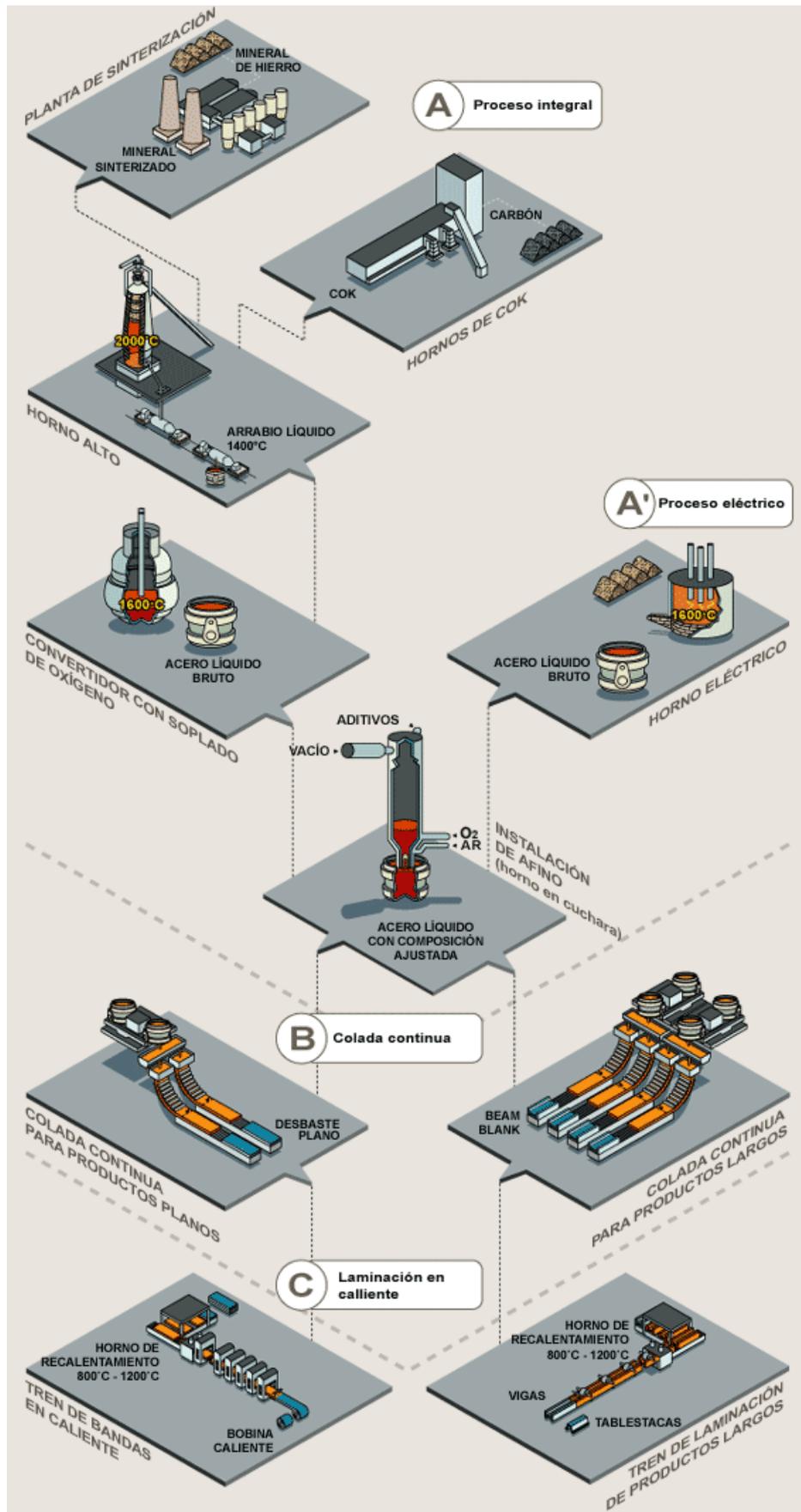


Fig. 2.3

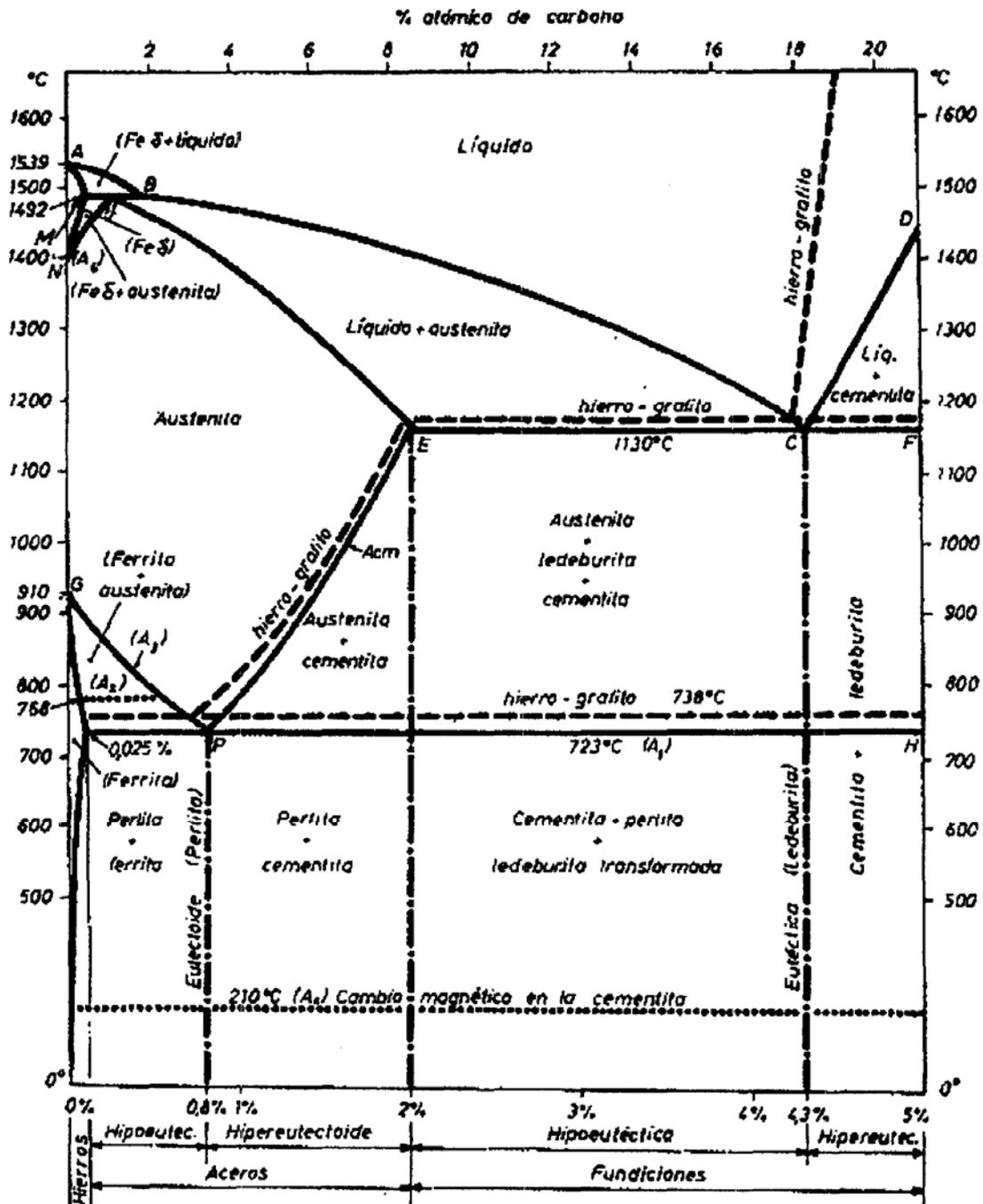


Fig. 2.4 Diagrama de equilibrio hierro-Carbono



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 28 / 205

CLASE DE ALEACIÓN	C %	CONSTITUYENTES %								
		Perlita total	Ferrita proeutectoide	Cementita proeutectoide	Eutéctico	Cementita eutéctica	Cementita primaria	Ferrita total	Cementita total	
Acero	Suave	0,00	0	100	0	0	0	0	100,0	0,0
		0,10	11	89	0	0	0	0	98,5	1,5
		0,20	22	78	0	0	0	0	97,0	3,0
	Medio duro	0,30	33	67	0	0	0	0	95,5	4,5
		0,40	44	56	0	0	0	0	94,0	6,0
		0,50	56	44	0	0	0	0	92,5	7,5
		0,60	67	33	0	0	0	0	91,0	9,0
		0,70	78	22	0	0	0	0	89,5	10,5
		0,80	89	11	0	0	0	0	88,0	12,0
		0,90	100	0	0	0	0	0	86,5	13,5
	Duro	1,00	98	0	2	0	0	0	85,0	15,0
		1,10	97	0	3	0	0	0	83,5	16,5
		1,20	95	0	5	0	0	0	82,0	18,0
		1,30	93	0	7	0	0	0	80,5	19,5
		1,40	91	0	9	0	0	0	79,0	21,0
		1,50	90	0	10	0	0	0	77,5	22,5
		1,60	88	0	12	0	0	0	76,0	24,0
Fundición	1,70	86	0	13,9	0	0	0	74,5	25,5	
	1,80	84	0	13,6	4	2	0	73,0	27,0	
	1,90	83	0	13,3	8	4	0	71,5	28,5	
	2,00	81	0	13,1	11	6	0	70,0	30,0	
	2,10	79	0	12,8	15	8	0	68,5	31,5	
	2,20	77	0	12,5	19	10	0	67,0	33,0	
	2,30	76	0	12,2	23	12	0	65,5	34,5	
	2,40	74	0	11,9	27	14	0	64,0	36,0	
	2,50	72	0	11,7	31	16	0	62,5	37,5	
	2,75	68	0	11,0	40	21	0	58,75	41,25	
	3,00	64	0	10,3	50	26	0	55	45	
	3,25	59	0	9,6	60	31	0	51,25	48,75	
	3,50	58	0	8,3	79	36	0	47,5	52,5	
	3,75	51	0	8,2	79	41	0	43,75	56,25	
	4,00	46	0	7,5	89	46	0	40,0	60,0	
	4,30	41	0	6,6	100	52	0	35,5	64,5	
	4,50	38	0	6,1	92	48	8	32,5	67,5	
4,80	32	0	5,7	79	41	21	28,0	72,0		
6,67	0	0	0,0	0	0	100	0	100,0		

Tabla 2.1

▪ **2.1.2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS FUNDICIONES.**

Se llaman fundiciones a las aleaciones de hierro y carbono que contienen del 2 al 4% de .La propiedad más importante de las fundiciones es ser fácilmente fusibles.

▪ **Clasificación de las fundiciones según el proceso de elaboración:**

- **Fundición de primera fusión o arrabio:** es la que sale del horno alto directamente. Se emplea en forma de lingotes, para refundir o bien para la fabricación del acero.
- **Fundición de segunda fusión:** Se obtiene fundiendo de nuevo el lingote de primera fusión en un horno llamado cubilote. Se emplea la fundición de segunda fusión para la obtención de piezas de maquinaria que son de formas complicadas como bancadas de máquinas herramientas y también engranajes.



- **Fundición maleable:** es una fundición de hierro en la cual se ha conseguido cierta ductilidad y maleabilidad por medio de tratamiento térmico. Se emplea para conseguir piezas tenaces y con formas complicadas (automovilismo, maquinaria agrícola, ferrocarriles y maquinaria en general).
- **Fundición endurecida o fundición templada:** es la que a través de un enfriamiento rápido, ha adquirido una dureza mayor que la normal.

Por ser muchos y muy diferentes los factores que hay que tener en cuenta para la calificación y selección de las fundiciones, es difícil establecer una clasificación simple y clara de las mismas. La más antigua y conocida de las clasificaciones establece cuatro grupos: fundición blanca, gris, atruchada y maleable. A estos cuatro grupos se añade en la actualidad otro grupo, el de las funciones especiales, en el que se pueden incluir las fundiciones aleadas que contienen elementos especiales, las fundiciones nodulares, aciculares, inoculadas, etc...

▪ Clasificación de las funciones por su micro estructura

Las fundiciones que se obtienen en los altos hornos y en los cubilotes se pueden clasificar de acuerdo con la microestructura en tres grandes grupos:

- Fundiciones en las que todo el carbono se encuentra combinado, formando cementita y que al romperse presentan fractura de fundición blanca.
- Fundiciones en las que todo el carbono se encuentra en estado libre, formando grafito. Son fundiciones ferríticas.
- Fundiciones en las que parte del carbono se encuentra combinado formando cementita y parte libre en forma de grafito. A este grupo que es el más importante de todos pertenece la mayoría de las fundiciones que se fabrican y utilizan normalmente, como son las fundiciones grises, atruchadas, perlíticas, etc... Es interesante señalar que en la práctica es muy difícil encontrar fundiciones en las que todo el carbono aparezca en forma de grafito. Con un criterio amplio, también se podrían incluir en este segundo grupo, aunque no encajan exactamente en él, las fundiciones maleables, cuya matriz es de ferrita y en las que el grafito se presenta en forma de nódulos. La fundición maleable se obtiene en dos etapas: primero se fabrica la fundición blanca y hierro nodular.

▪ Clasificación de las fundiciones según su composición y estructura:

- **Fundición gris.** Presenta gran parte del carbono en forma de grafito laminar. Trabaja bien a compresión; pero no a flexión. Absorbe vibraciones y no se deforma con el calor. Su resistencia es de 14 a 42 daN/mm², con dureza de 150 a 280 HB.



- **Fundición dúctil o nodular (fundición de grafico esferoidal).** Aleación de magnesio que hace precipitar al carbono en esferas o nódulos. Mejora la resistencia a la flexión, la rigidez y la resistencia al impacto.

Aplicaciones: eje para cigüeñales, engranajes para servicios pesados y piezas como bisagras para las puertas de automóviles.

Designación: FGE 80-2 seguida de su resistencia a tracción, y el 2 que significa el alargamiento del material expresado en porcentaje.
- **Fundición blanca.** Al enfriar no llegan a precipitar lo nódulos. Es extremadamente dura, resistente al desgaste y quebradiza. Es la que presenta todo, o gran parte, de su carbono combinado en forma de carburo de hierro, llamado cementita.

Aplicaciones: bolas para molinos, estampas para troquelados de extrusión, revestimientos de mezcladoras de cemento, zapatas de freno de ferrocarril, cilindros laminadores, trituradoras y pulverizadoras.

Designación: FB seguida de su resistencia a tracción.
- **Fundición maleable.** Se obtiene por descomposición de la cementita de la fundición blanca, mediante un tratamiento térmico. Es más económica que la fundición dúctil.

Aplicaciones: piezas pesadas que tienen superficies de apoyo y se usan en camiones, equipo de ferrocarril, maquinaria de construcción y equipos agrícolas.

Designación: FM seguida de su resistencia a tracción.
- **Fundición aleada.** Es aquella cuyo contenido en silicio o manganeso es superior al 5 ó 1.5 %, respectivamente, o cuyo contenido en elementos de aleación es superior a los tantos por cientos indicados a continuación: Ni 0.30; Cr 0.20; Cu 0.30; Ti 0.10; Va 0.10; Mo 0.10 y Al 0.10.

La designación numérica, cuando se utilice, estará compuesta por la letra G seguida de cuatro cifras, definiendo grupos y subgrupos que permiten una codificación ordenada y única para cada material: G- o o oo



Característica	Fundición esferoidal	Fundición maleable	Fundición vermicular	Fundición gris	Fundición blanca	Acero fundido medio carbono
Costo	4	2	4	5	4	1
Colabilidad	4	3	4	5	3	1
Facilidad de Mecanizado	4	4	4	5	1	3
Amortiguación de vibraciones	3	3	4	5	1	1
Módulo elástico	4	3	2	2	1	5
Seguridad	5	3	2	1	1	4
Resistencia / Peso	5	4	3	2	1	4
Resistencia al impacto	4	4	2	1	1	5
Resistencia a la abrasión	3	2	2	2	5	2
Resistencia a la fatiga térmica	3	3	5	4	1	2
Autolubricación	4	4	4	5	1	1
Aptitud para el tratamiento térmico	5	2	2	2	1	4
Total	40	37	30	20	21	33

Tabla 2.2 Comparativa entre las distintas fundiciones y acero medio para las propiedades a tener en cuenta en al elección del material del cigüeñal, yendo de 1 a 5 según se adecuen a los requerimientos, siendo el 5 el mejor valor, y el 1 el peor.

Según esta tabla, y en referencia a las propiedades que se exige a un material que va a tener los requisitos de un cigüeñal, la fundición nodular es un material perfectamente capaz de competir con el acero en cuanto a sus propiedades, no siendo así en el costo, ya que la fundición nodular es bastante mas cara que este último.

Dado que se atenderá a condicionantes económicos, en este caso se adoptar como correcta la elección del cigüeñal estudiado, y se pasa a estudiar en profundidad la fundición nodular.

2.1.2.4 FUNDICIÓN NODULAR. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA, CARACTERÍSTICAS Y COMPONENTES.

Una serie de experimentos llevados a cabo en el año 1942 por parte de International Nickel en Bayona (New Jersey) indicaron que el magnesio tenía un señalado efecto sobre las fundiciones blancas. Un año después se preparó una colada de fundición a la que se le añadieron cantidades variables de aleaciones de magnesio (80% Ni - 20% Mg) lográndose unos resultados sorprendentes. Los ensayos confirmaron que el producto tenía una resistencia casi un 45% superior a la de la fundición de partida. Además, la microestructura presentaba un afinamiento de las láminas de grafito. A la colada siguiente se le añadió una mayor cantidad de magnesio con lo que se llegó a un nuevo producto: un material que mostró un aumento de la resistencia a la tracción desde 130 N/mm² que se esperaban para la fundición base hasta los para entonces increíbles 770 N/mm² alcanzados. Al realizar el examen microscópico, el grafito aparecía en forma de esferoides dispersos, estructura que no se había observado nunca antes en las fundiciones grises. Posteriores y amplios ensayos sobre numerosísimas coladas permitieron anunciar en 1948 la puesta a punto de un nuevo producto comercial: la fundición gris de grafito esferoidal llamada nodular.

Los diferentes materiales ligados a la idea Fe - C utilizados para la fabricación de productos moldeados se distinguen por sus propiedades especiales. Por ejemplo, el acero es resistente, la fundición maleable de corazón negro es tenaz, la fundición blanca es dura, la fundición gris es barata. La nueva fundición nodular reunía en sí misma casi todas esas cualidades, puede emplearse en la fabricación de productos tenaces, resistentes y económicos. Actualmente la técnica se aprovecha de las especiales características de la fundición nodular para la realización de

proyectos no sólo en función de su factor económico sino también en el de su comportamiento. La fluidez de este tipo de fundición permite fabricar con relativa facilidad piezas de forma complicada y de secciones delgadas. Numerosas piezas que han de trabajar a tensiones elevadas y que no podrían moldearse en fundición gris por ser inadecuadas sus propiedades, o porque su forma es excesivamente compleja para realizarse en acero se fabrican en este tipo de fundición. Con valores de dureza equivalente, su maquinabilidad es superior a la de la fundición gris y mejor que la del acero a niveles resistentes también equivalentes. La adición de cantidades variables de níquel mejora las propiedades características de esta tipo de fundición proporcionando una mayor resistencia a la tracción y límite elástico, así como una excelente ductilidad y tenacidad. Ensayos de exposición a la atmósfera marina permiten comprobar que la resistencia a la corrosión de las fundiciones de grafito esferoidal al níquel es, aproximadamente, unas cinco veces superior a la del acero.

La fundición nodular, dúctil o esferoidal se produce en hornos cubilotes, con la fusión de arrabio y chatarra mezclados con coque y piedra caliza. La mayor parte del contenido de carbono en el hierro nodular, tiene forma de esferoides. Para producir la estructura nodular el hierro fundido que sale del horno se inocula con una pequeña cantidad de materiales como magnesio, cerio, o ambos. Esta microestructura produce propiedades deseables como alta ductilidad, resistencia, buen maquinado, buena fluidez para la colada, buena endurecibilidad y tenacidad. No puede ser tan dura como la fundición blanca, salvo que la sometan a un tratamiento térmico, superficial, especial.

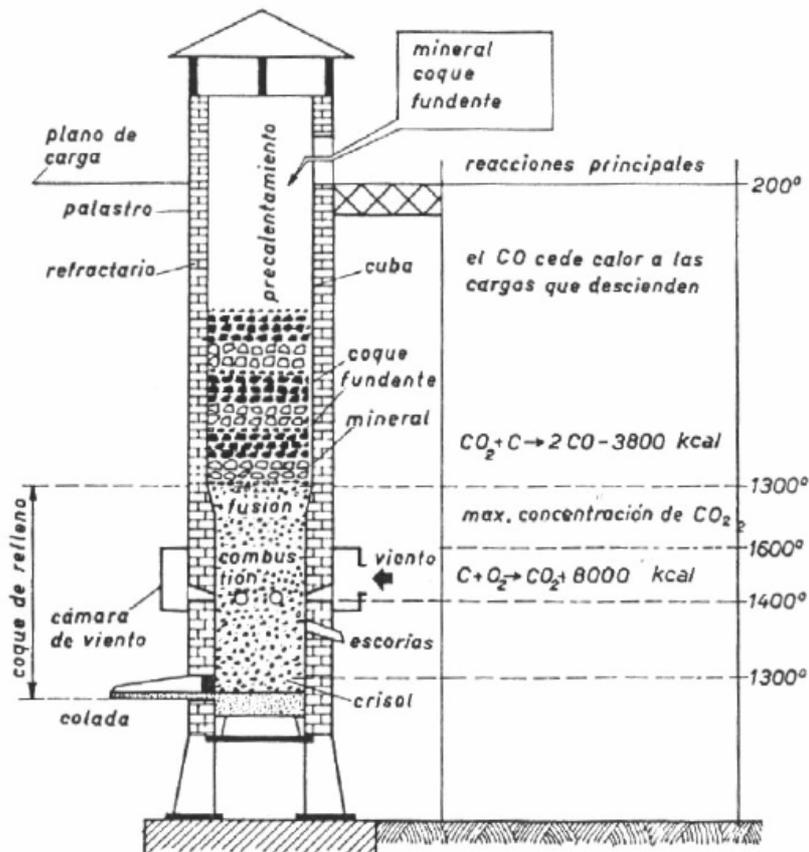


Fig. 2.5 Horno cubilote

El contenido total de carbono de la fundición nodular es igual al de la fundición gris. Las partículas esferoidales de grafito se forman durante la solidificación debido a la presencia de pequeñas cantidades de magnesio o cerio, las cuales se adicionan al caldero antes de colar el metal a los moldes, la cantidad de ferrita presente en la matriz depende de la composición y de la velocidad de enfriamiento.

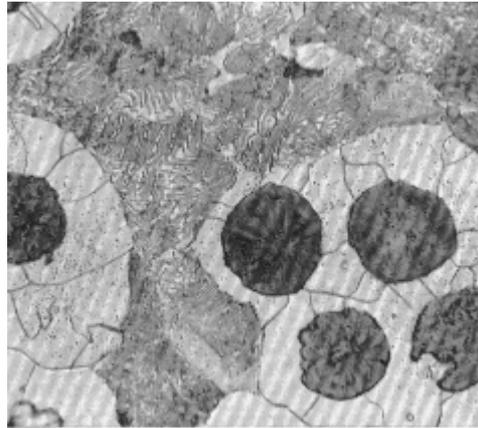


Fig. 2.6 Microestructura de la fundición nodular ferrítico perlítica.

Las fundiciones nodulares perlíticas presentan mayor resistencia pero menor ductilidad y maquinabilidad que las fundiciones nodulares ferríticas.

Clase	Resistencia psix1000	Lím. fluencia	Dureza brinell	Alargamiento (%)
60-40-18	42000	28000	149-187	18
65-45-12	45000	32000	170-207	12
80-55-06	56000	38000	187-255	6
100-70-03	70000	47000	217-267	3
120-70-02	84000	63000	240-300	2

Tabla 2.3 Clasificación de la fundición nodular teniendo en cuenta sus características mecánicas de acuerdo con la norma ASTM A-536.

Al contrario de una fundición gris, la cual contiene hojuelas de grafito, la fundición nodular tiene una estructura de colada que contiene partículas de grafito en forma de pequeños nódulos esferoidales en una matriz metálica dúctil. De este modo la fundición nodular tiene una resistencia mucho mayor que una fundición gris y un considerable grado de ductilidad, estas propiedades y otras tantas pueden mejorarse con la utilización de tratamientos térmicos.

Al igual que una fundición gris, este material tiene la ventaja de poseer una excelente fluidez. De este modo es posible obtener piezas de reducidos espesores, siempre que se asegure un flujo lineal y calmado a la hora de llenar los moldes, esto es imprescindible para evitar el endurecimiento de los bordes y la formación de carburos en las secciones más delgadas.

La fundición nodular se fabrica tratando el hierro líquido bajo en azufre en cuchara, con un aditivo que contiene magnesio (0,04 a 0,06% en peso) para luego ser inoculado usando una aleación de silicio minutos antes de ser vertido. En general, los rangos de composición química son similares a los de la fundición gris, pero en este caso existe un importante número de diferencias.



Para obtener la mejor combinación de resistencia, ductilidad y tenacidad, la materia prima debe ser escogida de modo que sea baja en impurezas. Particularmente deben evitarse aquellos elementos que promueven la reacción perlítica de la matriz.

C (total)	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	Ce	Mg
3,6-3,8	0,15-1,00	1,8-2,8	0,03-0,07	0,05-0,2	0,01-0,1	0,15-1,00	0,03 máx.	0,002 máx.	0,0005-0,2	0,03-0,06

Tabla 2.4 Composición química característica de la fundición nodular (porcentaje en peso).

El elemento que controla el tipo de matriz es el manganeso, si se pretende conseguir una matriz ferrítica de colada, el contenido en manganeso no debe superar el 0,2 % y si se desea obtener una matriz perlítica sin la utilización de tratamientos térmicos, el contenido de manganeso debe alcanzar el 1% en peso.

Los tipos de fundiciones nodulares fabricados con mayor frecuencia se rigen por la norma ASTM A536, como ya se ha indicado en la zona superior, lo cual establece cinco grados de acuerdo con sus propiedades mecánicas expuestas anteriormente.

GRADO	DESCRIPCIÓN	USOS GENERALES
60-40-18	Ferrita; puede ser recocida	Piezas resistentes al impacto; servicio a bajas temperaturas
65-45-12	Mayoritariamente ferrítica; de colada o recocida	Servicios generales
80-55-06	Ferrítica-Perlítica; puede ser normalizada	Servicios generales
100-70-03	Mayoritariamente Perlítica; puede ser normalizada	La mejor combinación de resistencia al desgaste y tenacidad. Buena respuesta al endurecimiento superficial
120-70-02	Martensítica; temple al aceite y revenido	La más tenaz y resistente al desgaste

Tabla 2.5 Usos generales de los distintos tipos de fundición

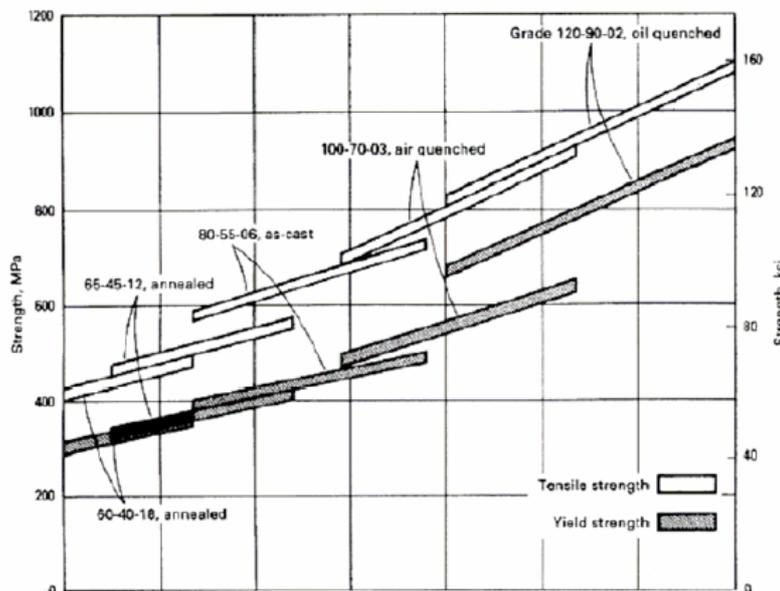


Fig. 2.7 Esfuerzo último de tensión y límite de fluencia de los cinco grados de la norma ASTM A536. Valores en MPa



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 35 / 205

La fundición nodular tiene varios usos estructurales, particularmente aquellos que requieren resistencia y tenacidad combinados con buena maquinabilidad y bajo costo.

Entre las exclusivas propiedades de la fundición nodular se incluyen la facilidad para realizar tratamientos térmicos, ya que el carbono libre de la matriz se puede disolver a cualquier nivel para ajustar su dureza y propiedades mecánicas. El carbono libre puede ser endurecido selectivamente por temple a la llama, inducción, método láser o haz de electrones. De este modo, un recocido de 3 hrs a 650 °C puede otorgar tenacidad a las bajas temperaturas. También se puede realizar un austemperado para obtener una fundición ADI, la cual posee un alto límite de fluencia, gran resistencia a la fatiga, alta tenacidad y excelente resistencia al desgaste.

La fundición nodular es menos densa que el acero y la diferencia de peso entre ambos puede llegar al 10 % en el mismo espesor.

Por último, el contenido del grafito proporciona características de lubricación en engranajes móviles debido a su bajo coeficiente de fricción. Las cajas de engranajes pueden funcionar con mayor eficiencia si están fabricadas con fundición nodular, por ejemplo.

2.1.3 ANÁLISIS DE LA FUNDICIÓN DEL CIGÜEÑAL ESTUDIADO.

2.1.3.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.

Existen diferentes mecanismos y unidades para medir la microdureza puntual. En el laboratorio se utilizó la máquina de microdurezas Vickers y la de Rockwell C.

A continuación se incluye una explicación del sistema de medición de dureza Vicker, siendo básicamente similar el de Rockwell.

El ensayo de microdureza Vickers es una prueba de dureza por penetración, en la cual se usa una maquina calibrada para aplicar una carga compresiva predeterminada, con un penetrador piramidal de diamante de base cuadrada y ángulos entre caras de 136° apoyado sobre la superficie del material bajo prueba. Para conocer la dureza después de retirar la carga se miden las diagonales de la huella resultante.

FIGURA 1

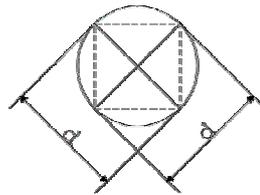


FIGURA 2

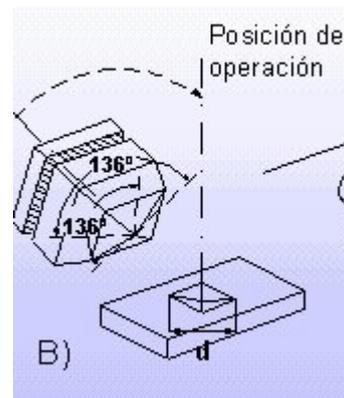
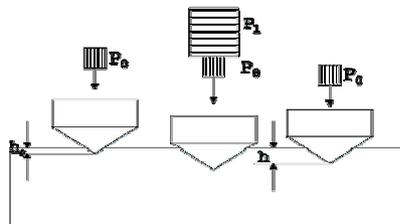


Fig. 2.8

Numero De Dureza Vickers

El ensayo consiste en hacer sobre la superficie de una probeta una huella con un penetrador en forma de pirámide recta de base cuadrada con determinado ángulo en el vértice, y medir la diagonal de dicha huella después de quitar la carga F.

La dureza Vickers se define como el cociente de la carga de ensayo entre el área de la huella, que se considera como una pirámide recta de base cuadrada y con el mismo ángulo en el vértice que el penetrador y calculado conforme a la siguiente ecuación.

$$DV = \frac{2P \operatorname{Sen}(\alpha/2)}{d} = \frac{0.18909 P}{d}$$



Donde:

- DV: Dureza Vickers
- P: carga aplicada en N
- d: Diagonal media de la huella en mm.
- α : Angulo formado por las caras del penetrador de diamante = 136°

Designación

El número de dureza Vickers es seguido por las siglas DV o HV, siglas en inglés, con un primer sufijo convencional y un segundo sufijo que indica el tiempo de aplicación de la carga, cuando este último difiere del tiempo normal, el cual es de 10 a 15 segundos.

Las pruebas de dureza Vickers se efectúan con cargas desde 1.96 N hasta 980.7 N.

En la práctica, el número de dureza Vickers se mantiene constante para cargas usadas de 49 N o mayores. Para cargas menores el número de dureza varía dependiendo de la carga aplicada.

APARATOS Y EQUIPO

MAQUINA DE PRUEBA: El equipo para la prueba de dureza Vickers consiste generalmente de una máquina que soporta la probeta y permite un contacto gradual y suave entre esta y el penetrador, bajo una carga predeterminada que se aplica durante un periodo de tiempo dado. El diseño de la máquina debe ser tal que no tenga balanceos o movimientos laterales de la probeta y del penetrador, mientras se aplica o retira la carga, se utiliza un microscopio de medición que generalmente va montado en la máquina.

Penetrador De Diamante

El penetrador debe estar finamente pulido con aristas bien definidas. La base de la pirámide debe ser cuadrada y sus caras opuestas deben formar un ángulo de 136° .

Las cuatro caras del penetrador deben estar inclinadas simétricamente con respecto al eje del mismo y terminar en un vértice afilado, o sea que la línea de unión entre las caras opuestas no deben ser mayor de 0.001 mm de longitud.

El buen estado de la punta del penetrador es de considerable importancia cuando la carga de prueba es pequeña y la huella también, por esta razón se recomienda verificar periódicamente la punta del penetrador para evitar fallas.

Microscopio de medición

Las divisiones de la escala micrométrica del microscopio, o de cualquier otro dispositivo de medición, deberán ser tal que pueda medirse la longitud de las diagonales de una huella con una aproximación de 5%, lo que sea mayor efectuada en una probeta, con la superficie pulida.



Preparación de la probeta

La prueba de dureza Vickers es aplicada a un gran número de probetas desde barras grandes y secciones laminadas hasta piezas diminutas en montajes metalográficos. Las probetas deben acondicionarse para que estas proporcionen un buen soporte de tal forma que no se muevan durante la prueba.

Acabado

La superficie de la probeta debe prepararse de tal manera que se definan claramente los extremos de las diagonales y puedan medirse. Al preparar la probeta debe tenerse cuidado de no reventar la superficie durante el rectificado de la misma o de no endurecerla por trabajo mecánico durante el pulido.

PROCEDIMIENTO

MAGNITUD DE LA CARGA DE PRUEBA: Pueden usarse cargas de prueba desde 1.96 N hasta 980.7 N conforme con los requisitos de la prueba. El número de dureza Vickers es prácticamente independiente de la carga de prueba.

APLICACIÓN DE LA CARGA DE PRUEBA: La carga de prueba debe aplicarse y retirarse suavemente sin golpes o vibraciones. El tiempo de aplicación de la carga de prueba completa debe ser de 10 a 15 segundos a menos que se especifique otra cosa.

ESPACIO ENTRE HUELLAS: El centro de la huella no debe estar cercano a la orilla de la probeta u otra huella en una distancia igual a dos veces y media la longitud de la diagonal de la huella. Cuando se prueba material con recubrimiento, la superficie de unión debe considerarse como una orilla para el cálculo del espacio entre huellas.

MEDICIÓN DE LA HUELLA: Deben medirse ambas diagonales de la huella y su valor promedio usarse como base para el cálculo del número de dureza Vickers. Se recomienda efectuar la medición con la huella centrada, tanto como sea posible, en el campo óptico del microscopio.

2.1.3.2 ANÁLISIS CON MICROSCOPIO ÓPTICO.

Las superficies a estudiar fueron primeramente cortadas con una radial de mano, después la pieza del eje fue refrentada en el torno con una lubricación importante para que la superficie no se viera térmicamente afectada y finalmente ambas piezas fueron atacadas químicamente para conseguir una buena calidad superficial apta para los ensayos.

En la página siguiente se observan las fotografías tomadas con el microscopio óptico de las piezas.

Diapositiva 1: Borde del eje con 5 aumentos sobre lente, atacado.

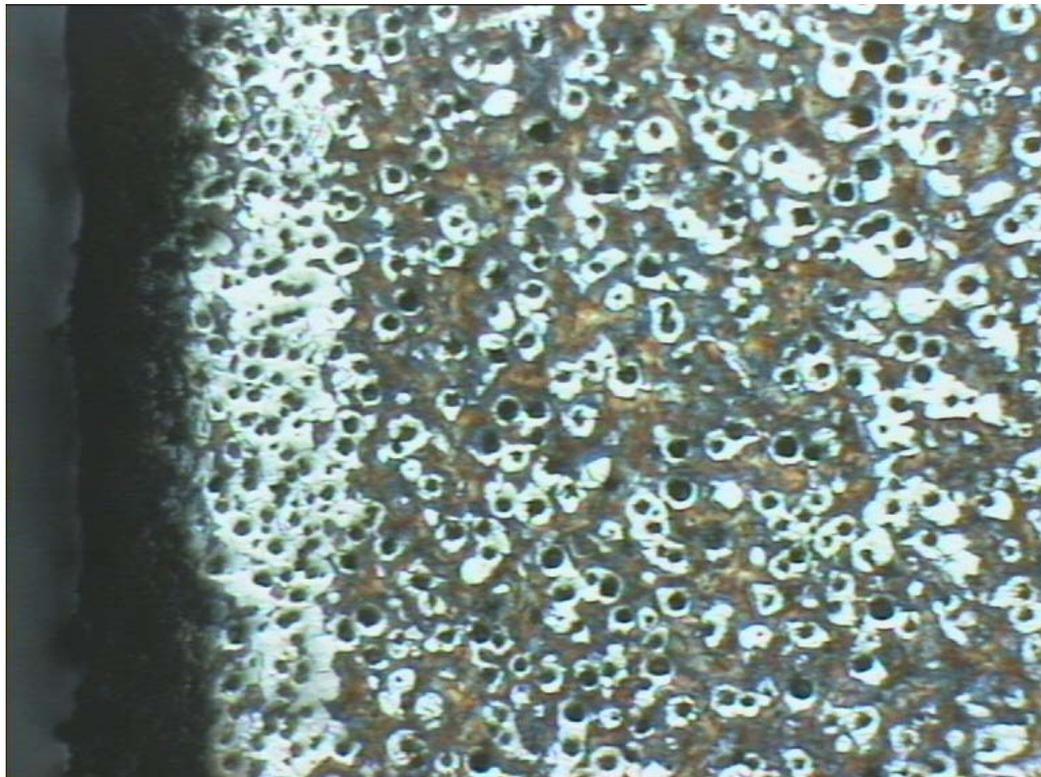


Fig. 2.9

Fue a raíz de estas primeras imágenes cuando se descubre que se trata de fundición nodular y no de acero. Se observan perfectamente los nódulos de grafito. Se observa una acumulación de granos en el borde, así como un menor tamaño de estos. Esto es debido a la dificultad de mantener un enfriamiento homogéneo de todo el volumen, por lo que se ha producido una descarburación en el borde debido a la distinta velocidad de enfriamiento.

Diapositiva 2: Eje con 20 aumentos sobre lente, atacado.

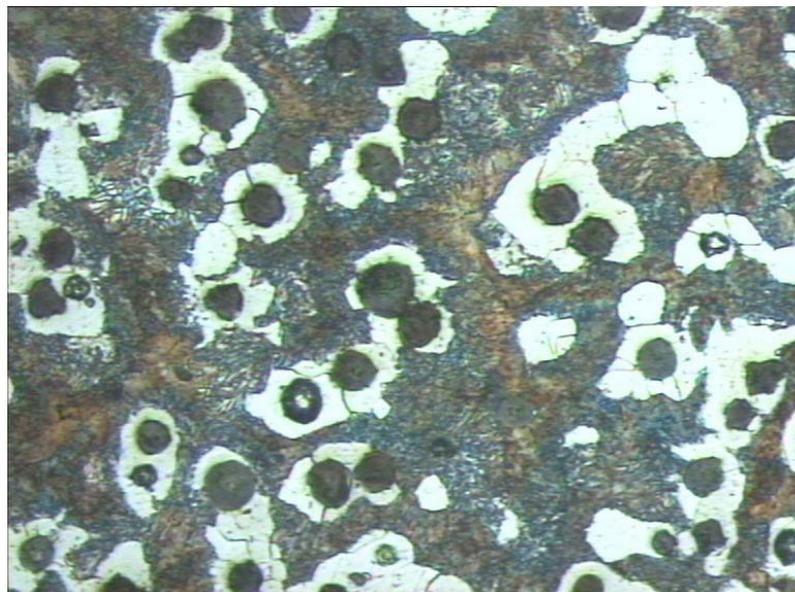


Fig. 2.10

Diapositiva 3: Eje con 20 aumentos sobre lente, pulido.

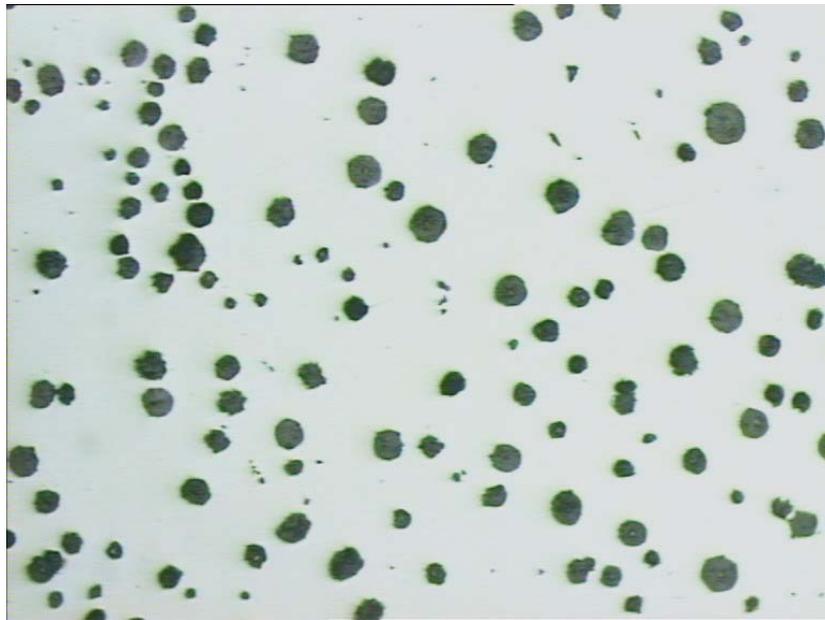


Fig. 2.11

Diapositiva 4: Pieza contrapeso con 20 aumentos, atacada.

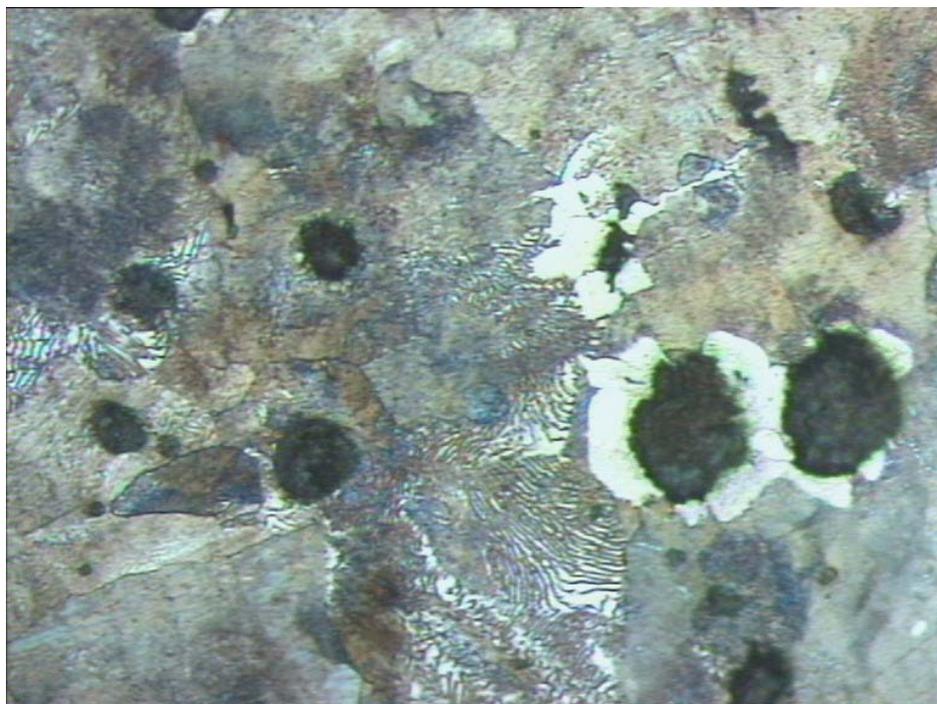


Fig. 2.12

En esta imagen se observa perfectamente la estructura perlítica, que sería esa zona rallada a modo de cebra de la zona central inferior. También se observa la descarburación alrededor de los gránulos por la gran concentración de carbono de estos.



Las mediciones de microdureza fueron realizadas del borde al centro de las piezas, y los resultados obtenidos en las máquinas de ensayo fueron los siguientes:

EJE:

Dureza Vickers: 277, 320, 335, 315, 315, 260, 280, 360, 400, 320, 325.

Dureza Rockwell C: 22'5, 24'1, 25'1, 24'1, 24'6.

CONTRAPESO:

Dureza Vickers: 240, 360, 247, 243, 200, 220, 210, 305, 248, 340, 180, 230, 240, 230, 248

Dureza Rockwell C: 13'8, 15'6, 14'7, 16'5.

ANÁLISIS:

De los datos se desprende, sorprendentemente la idea de que el material no ha sido tratado térmicamente en su superficie y que su dureza es homogénea en toda la pieza. Las diferencias existentes de dureza se deben exclusivamente a la no homogeneidad de la estructura cristalina de la fundición, variando por tanto la dureza según la estructura de la zona en la que se pincha para hacer el ensayo.

Es una sorpresa el que no lleve tratamiento térmico alguno en la superficie ya que se supondría esto haría aumentar algunas de las propiedades necesarias para el buen desempeño de la función del cigüeñal, esto no hace sino corroborar la idoneidad de este material ya que nos ahorra el realizarle tratamientos térmicos superficiales a posteriori, si se consigue unas propiedades adecuadas con la colada y el posterior recocido. Otros cigüeñales de fundición nodular presentan procesos de endurecimiento por nitruración, por no es este el caso, como se demuestra en el análisis por el microscopio electrónico que reproduzco a continuación.

▪ **2.1.3.3 Análisis con microscopio electrónico.**

A continuación la pieza fue analizada al microscopio electrónico, y aquí se plasman y analizan los resultados obtenidos con el mismo.

Imagen 1

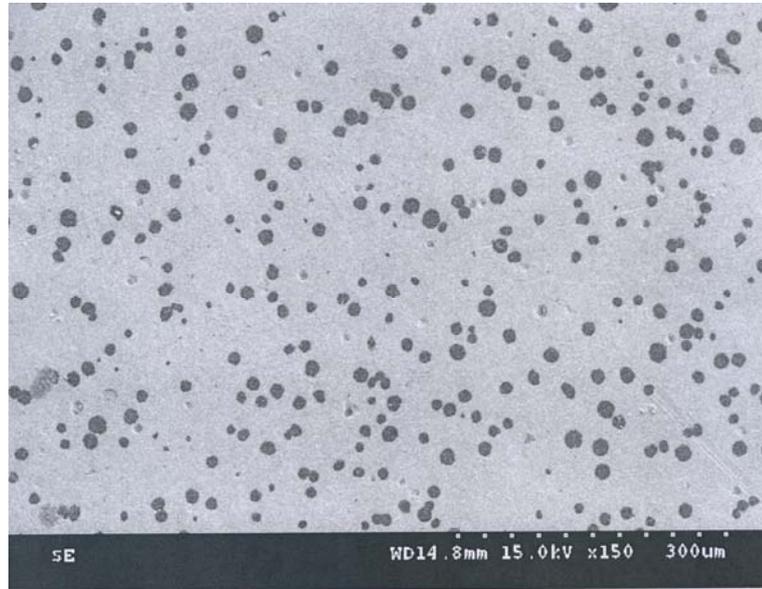


Fig. 2.13

Se observa perfectamente que se trata de una fundición nodular, con los nódulos de grafito claramente identificados. En esta imagen la superficie estaba aún sin atacar.

Imagen 2

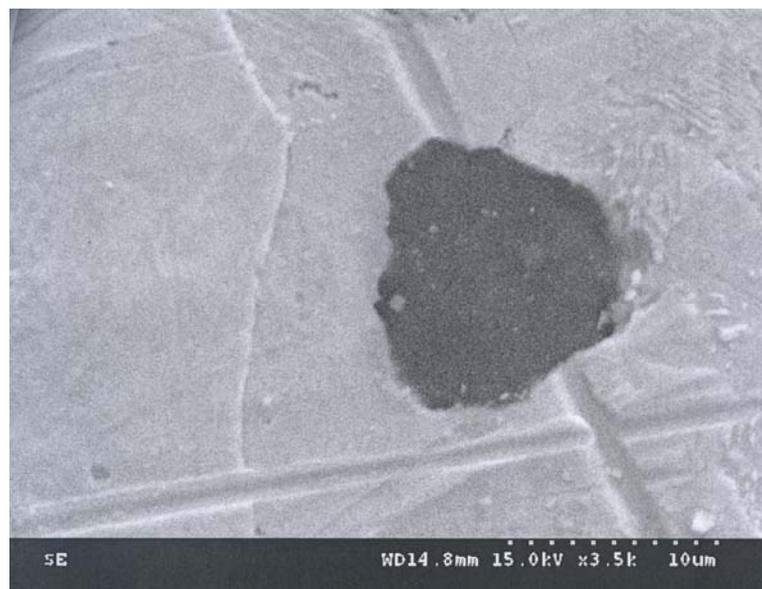


Fig. 2.14

En esta foto se aprecia en primer término un granulo de grafito. En la parte superior derecha podemos observas las estrías propias de la estructura de perlita.

Imagen 3



Fig. 2.15

En esta imagen es un hueco de desprendimiento del nódulo lo se observa.

Imagen 4

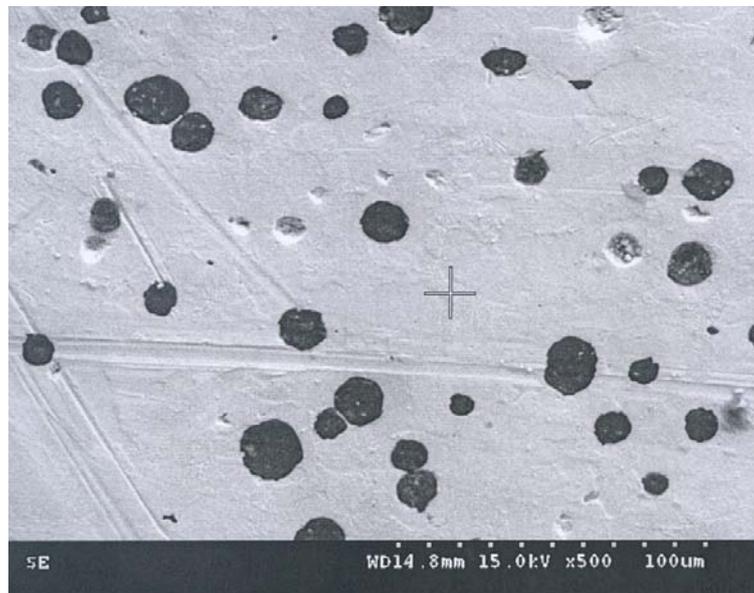


Fig. 2.16

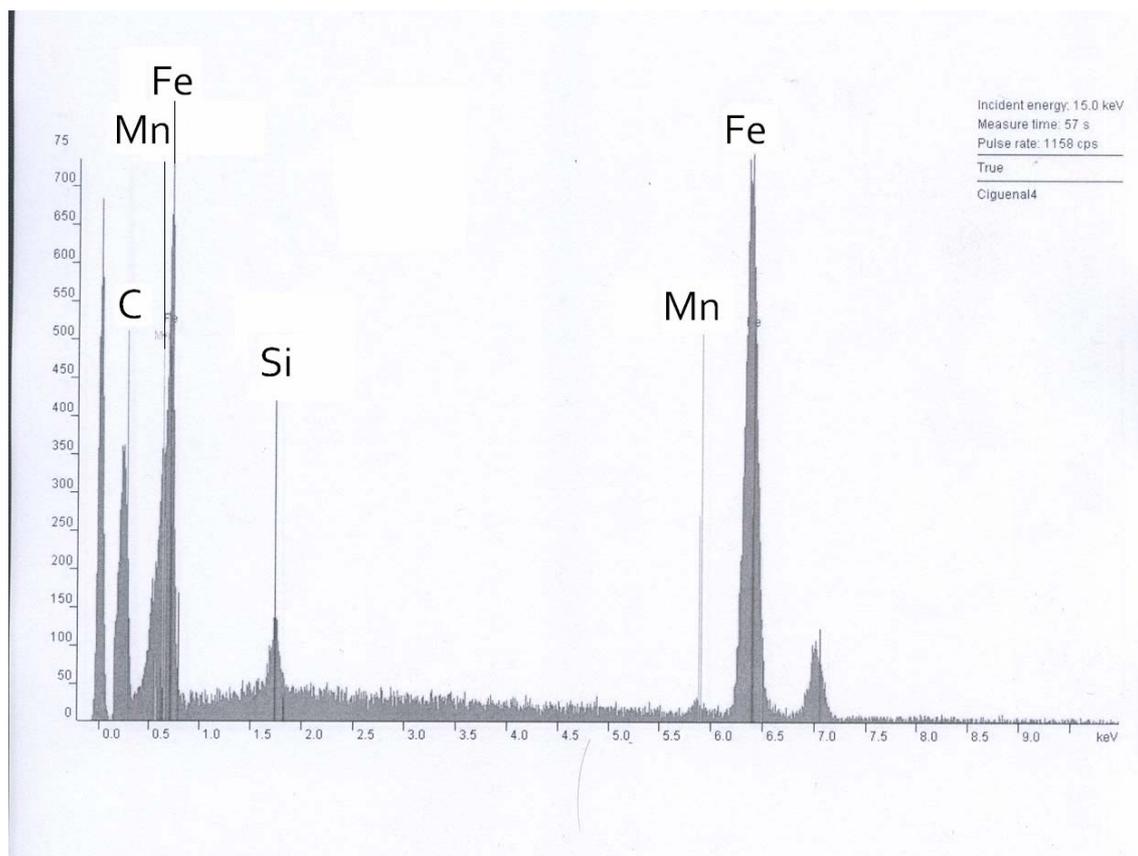


Fig. 2.17

Como se observa se ha analizado un punto común de la matriz, donde las componentes principales, aparte del hierro y el carbono, son el manganeso y el silicio.

Imagen 5

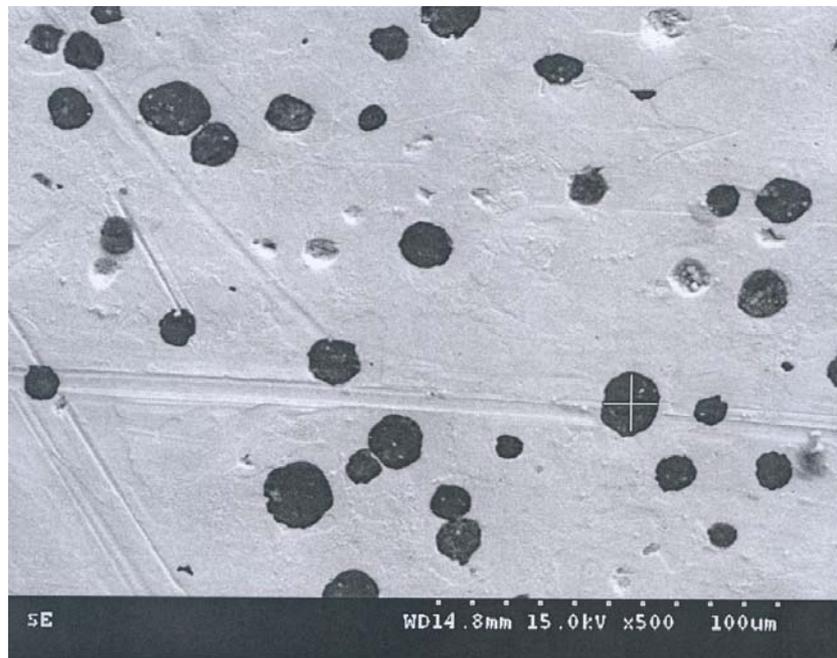


Fig. 2.18

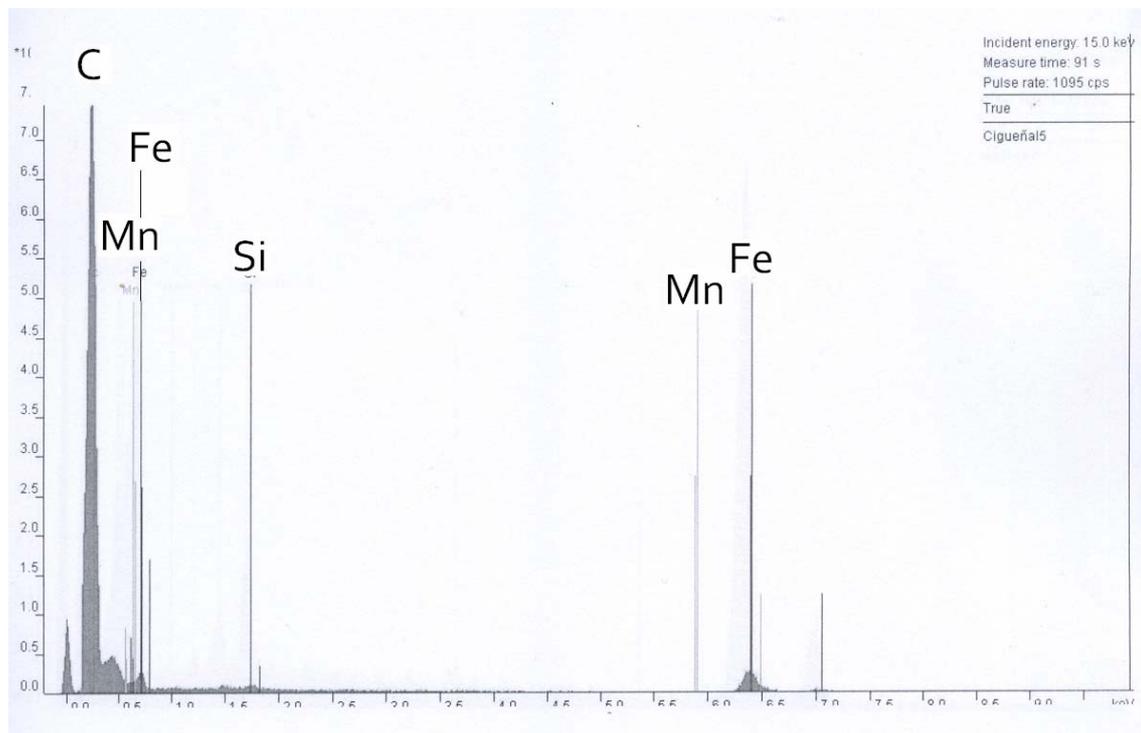


Fig. 2.19

En este segundo análisis, se ha punteado de pleno en un nódulo de grafito. Como se observa la presencia de carbono se dispara y se reducen el resto de elementos. De hecho se podría estar hablando de un carbono casi puro. Nótese la diferencia con la gráfica anterior en la cual existía una sombra continua de diferentes elementos a lo largo del eje de abscisas, y que en esta segunda desaparece; siendo cero o casi cero en la mayor parte del espectro.

Imagen 6



Fig. 2.20

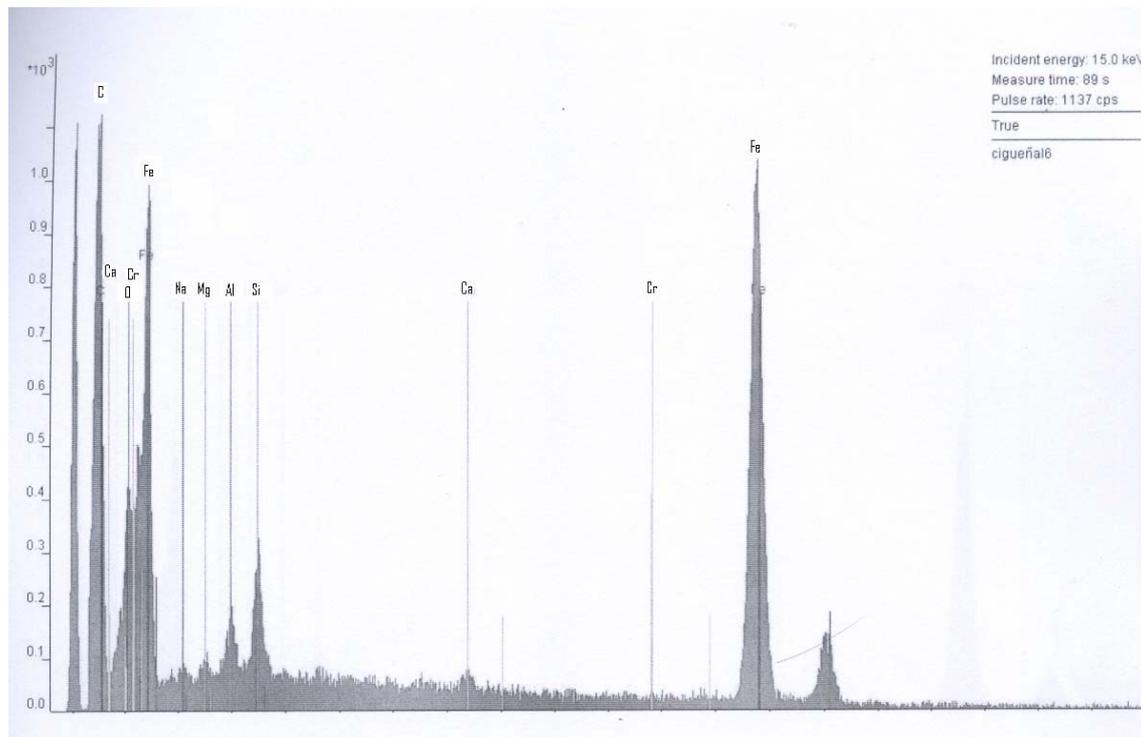


Fig. 2.21

En esta imagen la lectura está hecha en la superficie mecanizada. Se observa que aparecen componentes distintos a los de las mediciones anteriores. Estos componentes, principalmente el aluminio y el silicio se supone que pueden provenir de la biela, debido a un proceso de interacción molecular fruto de la fricción entre ambos cuerpos durante el funcionamiento del motor.

Imagen 7

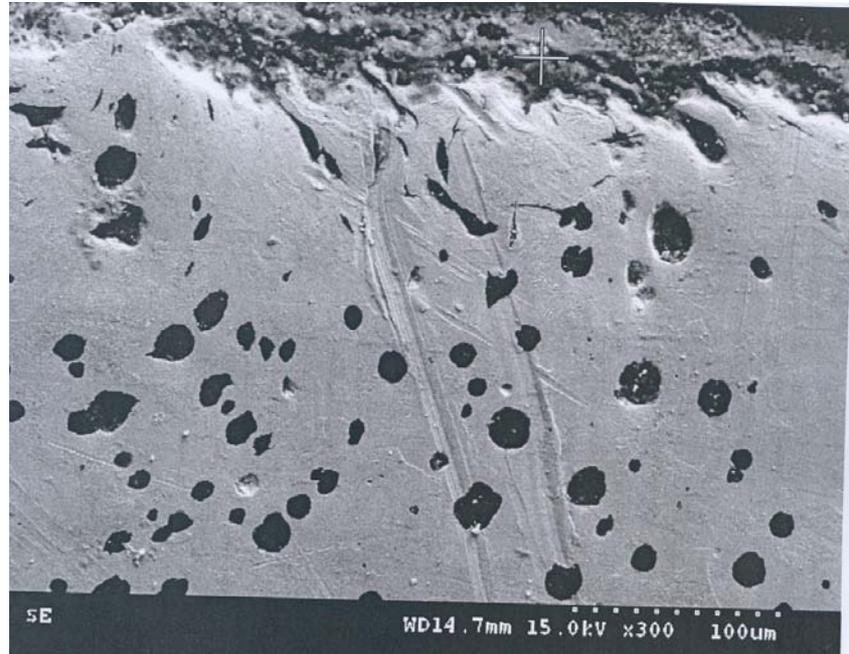


Fig. 2.22

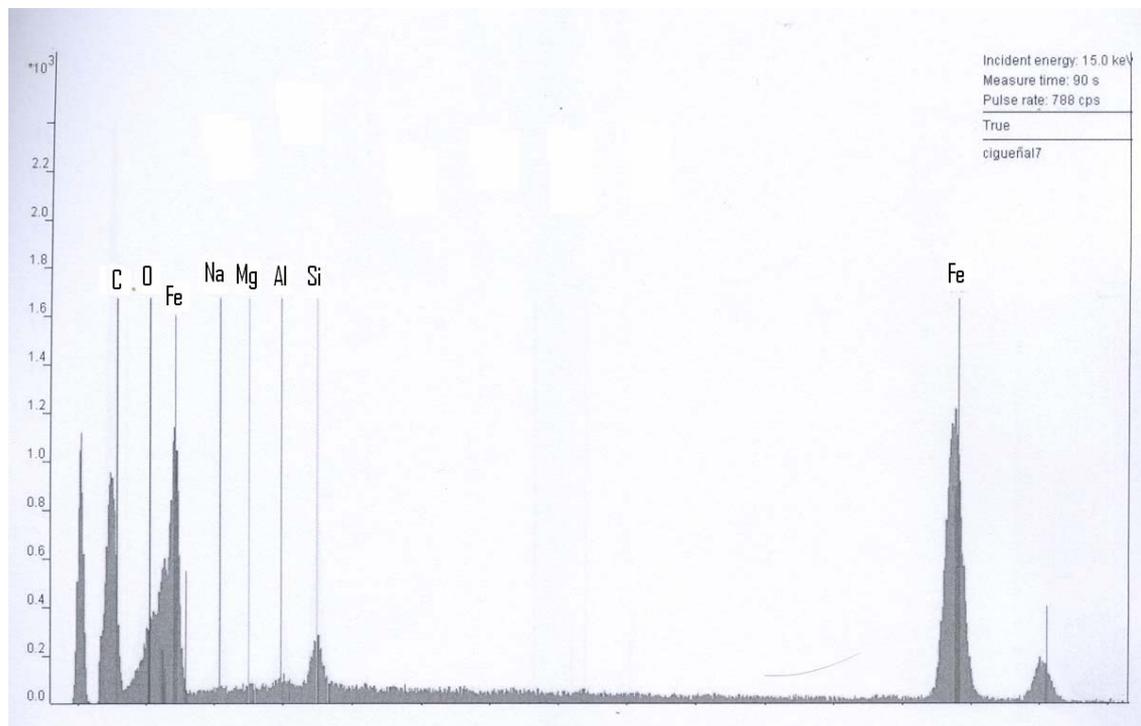


Fig. 2.23

Lo curioso de esta captura del microscopio es la deformación sufrida por el material debido al uso del mismo. Se puede observar claramente como el material se ha plegado hacia la izquierda fruto de la fricción con la biela. En este punto no se constata una presencia significativa de aluminio en la estructura de la fundición.

Imagen 8

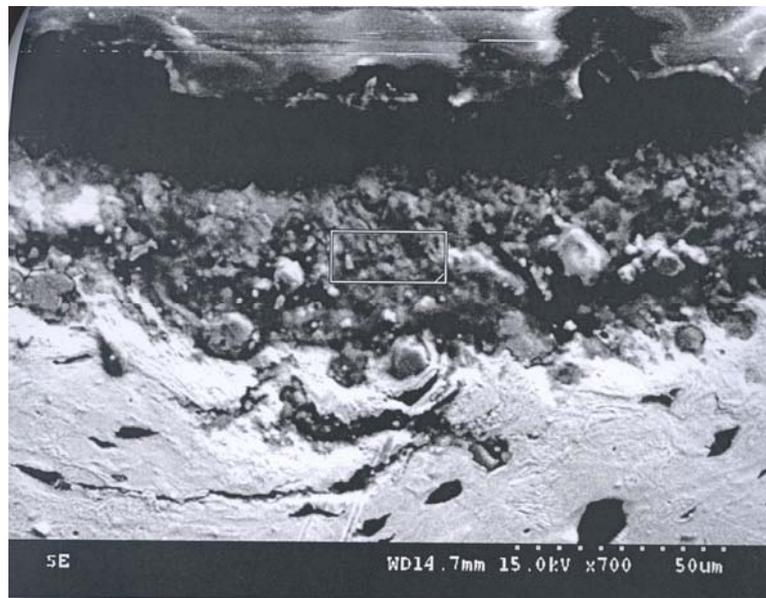


Fig. 2.24

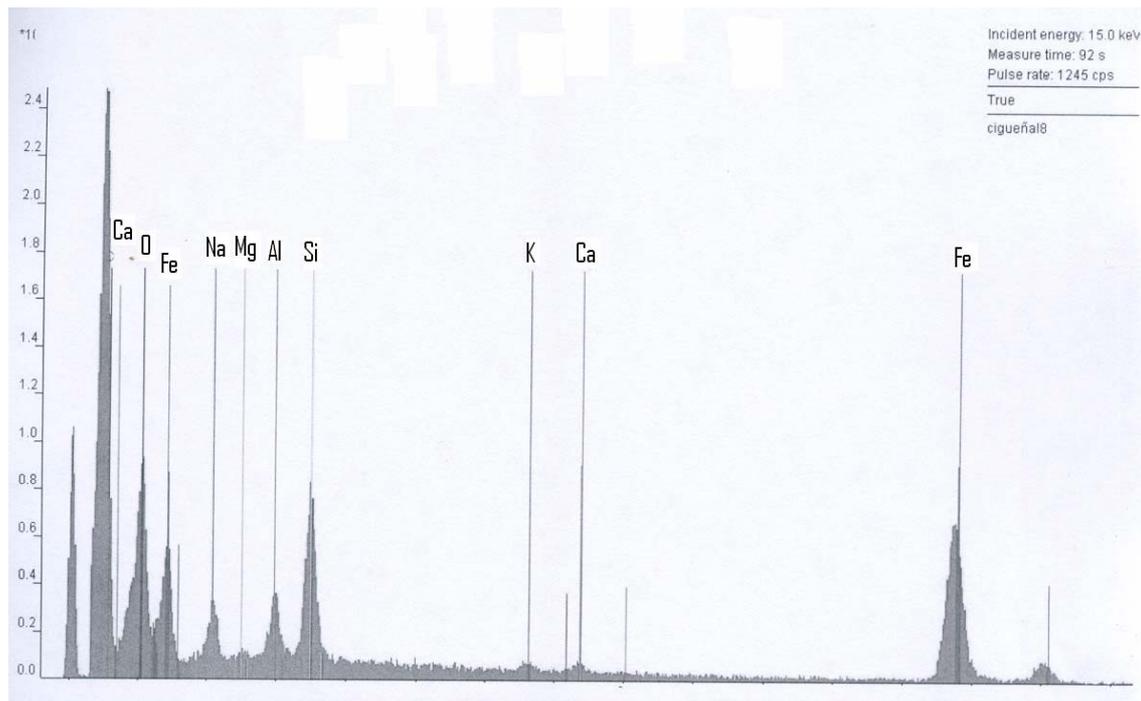


Fig. 2.25

En este análisis aparecen sodio, magnesio, aluminio, potasio y calcio. Se supone que estos no forman parte de la estructura del cigüeñal, ya que son elementos característicos de contaminación del análisis por polvo o por los mismos fluidos de preparación de la muestra.

2.1.3.4 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y COMPOSICIÓN DEL CIGÜEÑAL.

Resistencia; $R = 70 \text{ Kg/mm}^2$

Límite elástico; $\sigma = 56 \text{ Kg/mm}^2$

Alargamiento; $A = 2,5 \%$

Composición:

- C = 1,75 %
- Mn = 0,60 %
- Mg = 0,038 %
- S = 0,08 %
- P = 0,07 %
- Cr = 0,4 %
- Ni = 0,2 %
- Carbono equivalente = 2 %

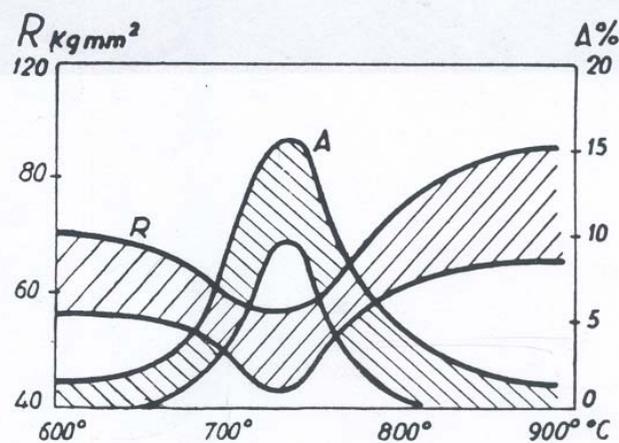


Fig. 2.26

De esta gráfica se desprende que para una resistencia de 70 Kg/mm^2 y un alargamiento del 2,5 %, el material ha sido tratado con un recocido de aproximadamente 700°C

Elementos aleantes

Las fundiciones aleadas son aquellas que contienen elementos químicos distintos del C y el Fe en porcentajes significativos para variar y condicionar alguna de las propiedades de la misma.

Los elementos de aleación modifican la microestructura de las fundiciones y con ello su dureza y resistencia, estando en ocasiones estos cambios influenciados, además, por una variación de la templeabilidad.

Los elementos de aleación modifican también como en los aceros, la situación de los puntos críticos y además ejercen una acción muy importante y compleja de la grafitización.



En la tabla 3.3.4.1 se señala la influencia que los diversos elementos aleados ejercen sobre la formación del grafito y de los carburos y sobre las características de la matriz.

Ciertos elementos como el Silicio, aluminio, níquel y cobre, que se disuelven en la ferrita, la endurecen y la hacen aumentar su resistencia, Son elementos que favorecen la grafitización.

Otros elementos como el cromo, manganeso, y molibdeno son formadores de carburos, son elementos que tienden a formar fundición blanca en vez de gris y dificultan la grafitización.

Elemento	Grafitización y de coeficientes de grafitización	Efecto sobre los carburos a alta temperatura	Efecto en la estructura de grafito	Efecto en el carbono combinado de la perlita	Efecto que produce en la matriz
Carbono	Favorece	Decrece estabilidad	Engruesa	Decrece fuertemente	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Silicio	Favorece +1	Decrece estabilidad	Engruesa	Decrece fuertemente	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Aluminio	Favorece +0,5	Decrece estabilidad	Engruesa	Decrece fuertemente	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Titanio	Favorece +0,4	Decrece estabilidad	Afina fuertemente	Decrece	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Níquel	Favorece +0,35	Decrece ligeramente estabilidad	Afina ligeramente	Decrece estabiliza u la perlita	Afina la perlita y da dureza
Cobre	Favorece +0,2	Indiferente	Indiferente	Decrece ligeramente	Da dureza
Manganeso	Se opone -0,25	Estabiliza	Afina ligeramente	Aumenta	Afina la perlita y da dureza
Molibdeno	Se opone -0,30	Indiferente	Afina ligeramente	Aumenta ligeramente	Afina la perlita y da dureza
Cromo	Se opone -1	Estabiliza fuertemente	Afina ligeramente	Aumenta	Afina la perlita y da dureza
Vanadio	Se opone -2,5	Estabiliza fuertemente	Afina	Aumenta	Afina la perlita y da dureza

Tabla 2.6

- Manganeso.

En nuestro cigüeñal de la casa Volkswagen lo encontramos en una proporción del 0,60 %. Es un elemento que se opone ligeramente a la grafitización, y que en ese aspecto no es beneficioso para el material. Por otro lado, el manganeso se combina con el azufre y previene la formación de sulfuro de hierro en los bordes de grano, altamente perjudicial. El manganeso se usa para desoxidar, estabiliza los carburos a alta temperatura y ayuda a aumentar la capacidad de endurecimiento de la matriz.

- Magnesio.

El magnesio se incluye en cantidades muy pequeñas para conseguir la condición esferoidal del carbón contenido en la matriz ferrítica. Se puede conseguir con inclusiones de cerio también, aunque en este caso no se ha encontrado el mismo. He de decir, que el magnesio no garantiza por su sola presencia la formación de las esferas; son también importantes el enfriamiento y el origen de la materia prima.



- Azufre.

El azufre es considerado un elemento perjudicial en las aleaciones de hierro, una impureza. Sin embargo se agrega una pequeña cantidad con el fin de mejorar la maquinabilidad de la pieza.

- Fósforo.

El fósforo, al igual que el azufre, se considera un elemento perjudicial en los aceros, casi una impureza, ya que reduce la ductilidad y la resistencia al impacto. Sin embargo, se agrega deliberadamente en algunas ocasiones para aumentar sus resistencia a la tensión y mejorar la maquinabilidad.

He de decir que la inclusión de estos dos elementos confirma el proceso de fabricación del cigüeñal estudiado en este proyecto, por mecanizado.

- Cromo

El cromo es un elemento que perjudica la grafitización y que en ese aspecto es negativo para la estructura. Sin embargo es un elemento con propiedades muy beneficiosas para la fundición nodular. Estabiliza fuertemente los carburos a altas temperaturas, como las que se verá sometida la pieza durante su trabajo. Afina la perlita y dota de una considerable dureza a la matriz. También es de reseñar su efecto para prevenir la corrosión.

- Cobre

El cobre es un elemento que aumenta la resistencia a la corrosión. Favorece de manera moderada a la grafitización en el material. Como se observa en la tabla no es de los elementos que más la favorece, pero también hemos constatado que la proporción en la que se encuentra es realmente importante. También es un elemento que aumenta la dureza del material.

- Níquel

Favorece el proceso de grafitización. La adición de cantidades variables de níquel mejora las propiedades características de esta tipo de fundición proporcionando una mayor resistencia a la tracción y límite elástico, así como una excelente ductilidad y tenacidad.

Su efecto en el aumento en la resistencia a la corrosión también es destacable. Ensayos de exposición a la atmósfera marina permiten comprobar que la resistencia a la corrosión de las fundiciones de grafito esferoidal al níquel es, aproximadamente, unas cinco veces superior a la del acero.



▪ 2.2 FUNDICIÓN Y COLADA DEL MATERIAL

▪ 2.2.1 INTRODUCCIÓN.

El moldeo (llamado también fundición o colada) es el proceso por el cual se consigue la forma o preforma de las piezas de fundición nodular. Este es un proceso de conformación sin arranque de viruta basado en la fusión de los materiales. Consiste en una serie de operaciones mediante las cuales se obtiene un hueco o molde que reproduce la forma de la pieza que se desea fabricar, en el cual se vierte o cuela el metal fundido dejándole enfriar hasta que solidifica completamente.

La principal ventaja de la fundición, como proceso tecnológico de conformación de metales, consiste en que con su ayuda se pueden fabricar, con facilidad y economía, piezas de formas muy complicadas imposibles o muy difíciles de obtener por otros métodos. Aunque la geometría de nuestro cigüeñal no es imposible de obtener por otros métodos si se puede afirmar que este es el proceso más rápido, económico y que vierte menos problemas en el proceso. La deformación de la fundición nodular por deformación no es un proceso que ofrezca buenos resultados aún en las condiciones más óptimas de proceso; por tanto podemos afirmar que la pieza fue producida por una colada o vertido.

▪ 2.2.2 FUNDAMENTOS DE LA FUNDICIÓN.

El principio general de estos procesos es muy sencillo, simplemente consiste en fundir el metal de la pieza, verterlo en el interior del molde y dejar que solidifique adquiriendo la geometría deseada. No obstante, durante estos procesos tiene lugar una serie de fenómenos que dificultan la obtención de piezas con las características geométricas y propiedades mecánicas deseadas.

Así por ejemplo, la contracción del metal de la pieza durante la fase de solidificación tiene una repercusión en las dimensiones de la pieza, así como en las propiedades mecánicas de la misma. Esto hace necesario diseñar el molde de modo que la solidificación se produzca en la dirección adecuada como veremos posteriormente (solidificación direccional).

▪ **Etapas de la fundición.**

Todos los procesos de fundición tienen una serie de etapas comunes que se muestran en la figura siguiente:

1. En primer lugar se realiza la fase de diseño del producto. En ella definimos el material del cual ha de estar constituida la pieza, así como su geometría, propiedades mecánicas, precisión dimensional y acabado superficial.
2. A continuación se encuentra la fase de selección del proceso, en el cual se debe seleccionar la técnica de fundición más adecuada para obtener las especificaciones requeridas con el mínimo coste posible.
3. La fase de moldeo consiste en el diseño y construcción del molde, para lo cual se van a tener en cuenta una serie de condiciones que van a determinar las características de producto obtenido, como son el diseño de un molde con una permeabilidad adecuada, la capacidad de contracción del mismo y la evacuación de gases.



4. En la fase de fusión se lleva a cabo la preparación del metal de trabajo para su posterior vertido en la cavidad del molde. En esta fase se debe proteger el metal de trabajo frente a la contaminación, para reducir el riesgo de contaminación del metal por óxidos y gases, además se debe controlar la correcta dosificación de los elementos de aleación.
5. Una vez preparado el molde y dispuesto el metal fundido a la temperatura adecuada se efectúa la fase de colada. En esta fase se vierte el metal fundido en la cavidad del molde hasta completar su llenado. Las características del producto final están condicionadas por los parámetros de colada (velocidad de vertido, la sección de los conductos, la temperatura del metal fundido, etc).
6. Cuando se completa el llenado del molde (incluso a veces antes) se tiene lugar el comienzo de la fase de enfriamiento y solidificación, durante la cual hemos de controlar diferentes factores tales como la porosidad por contracción de la pieza y el tamaño de grano del metal.
7. La fase de desmoldeo consiste en la extracción de la pieza fabricada del molde, que debe efectuarse de modo que la superficie de la pieza no resulte dañada.
8. Finalmente, en caso de que sea necesario se efectúa la limpieza de la superficie de la pieza, se le somete a algún proceso de acabado y se verifican las especificaciones del producto tales como las tolerancias dimensionales y acabado superficial.

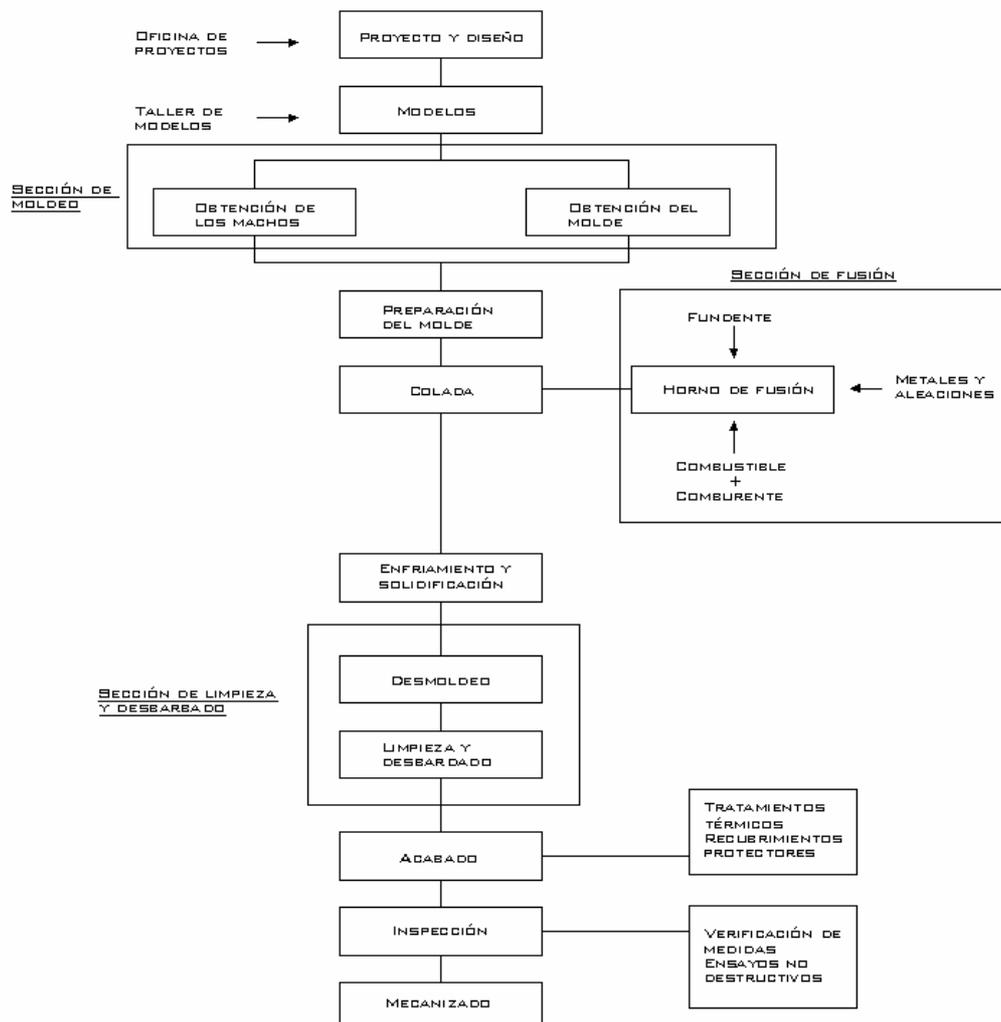


Fig. 2.27



Ventajas de la fundición en la producción de un cigüeñal.

Existen diversos métodos para la fundición de formas, lo cual la convierte en uno de los procesos de fabricación más versátiles. Entre las ventajas de estos procesos podemos destacar las siguientes:

- Los procesos de fundición permiten fabricar piezas con una geometría relativamente compleja como la del cigüeñal a un menor costo que otros procesos como el mecanizado de un bruto o la deformación plástica.
- La precisión superficial conseguida con la fundición es suficiente para la mayor parte de la superficie del cigüeñal, con lo que el mecanizado posterior se vería reducido exclusivamente a aquellas zonas de mayor exigencia de precisión.
- La fundición es un proceso aplicable a cualquier material metálico, si bien algunos responden mejor a este proceso. La fundición nodular es un material que responde magníficamente al proceso de moldeo y colada y es excelente a la hora de mantener sus propiedades mecánicas intactas según diseño.

Inconvenientes de la fundición en la producción de un cigüeñal.

A pesar de las ventajas que se acaban de mencionar, los procesos de fundición también presentan una serie de inconvenientes que los hacen inadecuados para ciertas aplicaciones. Entre las desventajas de los procesos de fundición se pueden resaltar:

- Limitaciones en las propiedades mecánicas debido a la elevada porosidad de las piezas, la baja precisión dimensional y el acabado superficial deficiente en algunos procesos de fundición.
- Riesgos en la seguridad de los trabajadores durante el procesamiento.
- Problemas de impacto ambiental.

▪ 2.2.3 FASE DE MOLDEO

En la fase de moldeo se lleva a cabo el diseño y construcción del molde de acuerdo con el tipo de proceso empleado, las características del metal de la pieza, la disposición del sistema de distribución y las exigencias de la solidificación.

▪ 2.2.3.1 PARTES DEL MOLDE

Los moldes de fundición están constituidos por una serie de elementos diseñados para desempeñar diferentes funciones, si bien algunos pueden estar presentes o no en función de la tecnología empleada. Como muestra la figura 2.25, los elementos fundamentales de un molde de fundición son la cavidad principal del molde, machos (corazones), sistemas de distribución, mazarotas y sistema de evacuación de gas.

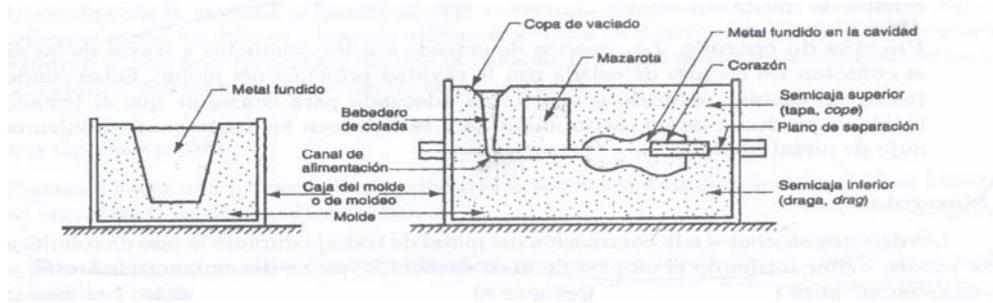


Fig. 2.28 Elementos que componen los moldes

▪ 2.2.3.2 SOBREDIMENSIONAMIENTO DEL MODELO O DEL MOLDE.

Como bien sabemos durante los procesos de cambios de estado se producen variaciones en los volúmenes del cuerpo por efecto de una redistribución en su red cristalina. Este efecto ha de tenerse muy en cuenta a la hora de diseñar el molde de tal modo que la diferencia de medidas sea capaz de absorber los efectos de variación de volúmenes.

Se deberán tener en cuenta los siguientes factores:

- La contracción o expansión que experimente el metal durante todo el periodo de enfriamiento.
- La necesidad de dejar un sobremetal para aquellas superficies de la pieza fundida que requieran un proceso de mecanizado posterior para la obtención de una mejor precisión dimensional y acabado superficial.
- Los ángulos de salida o "despulla", necesarios para posibilitar la extracción del modelo sin dañar al molde.

En nuestro caso se ha diseñado el molde con un sobredimensionamiento de 6,4 mm para las zonas que llevarán un mecanizado posterior.



▪ 2.2.4 FUSIÓN

La operación previa a la colada es la obtención del metal o aleación en estado líquido a partir del estado sólido. En la fase de fusión se calienta el metal de trabajo hasta alcanzar la temperatura de colada deseada.

Las condiciones que se le exigen al metal líquido antes de la colada son:

- Composición química adecuada.
- Que posea buena fluidez o colabilidad; para que llene bien el molde antes de que comience la solidificación.
- Temperatura adecuada, superior a la de fusión (sobrecalentamiento).

A lo largo de esta etapa la fundición nodular fundida en el horno tendrá una tendencia a oxidarse con el aire contenido en el horno de fusión. La contaminación del material por estos óxidos y gases ha de ser reducida al mismo con un buen diseño o selección del horno para la fusión del metal. La temperatura del metal fundido vertido en el molde se denomina temperatura de colada. Esta temperatura debe ser suficientemente superior al punto de fusión del material de tal modo que impida una solidificación rápida al ser introducido en el molde. Esto podría provocar la obturación de la entrada con la consecuente imposibilidad del metal fundido de llenar el molde. Este sobrecalentamiento se hace necesario para que la masa fluida llegue en perfectas condiciones de inundar el molde; hay que tener en cuenta que desde que el metal abandona el horno hasta que inunda el molde se produce una pérdida de calor y un enfriamiento que ha de ser también tenido en cuenta a la hora de establecer el sobrecalentamiento por encima de la temperatura de fusión.

Por el contrario este sobrecalentamiento ha de ser muy controlado, ya que a medida que aumenta la temperatura aumenta la solubilidad de los gases en el material y por tanto un sobrecalentamiento excesivo podría provocar una contaminación del mismo. Además las diferentes temperaturas de vaporización de la aleación también podrían suponer un límite para el sobrecalentamiento, ya que en caso de alcanzarse alguna de ellas, se produciría la vaporización de los elementos más volátiles de la colada.

Otro inconveniente de un sobrecalentamiento excesivo sería el efecto que esta tendría en el molde, a medida que aumenta la temperatura aumenta el peligro de una reacción química entre los componentes del molde y los de la aleación. Además, un sobrecalentamiento excesivo también provocaría una dilatación de las paredes del molde no calculadas que podrían desembocar en deformaciones o tolerancias inadmisibles.



▪ 2.2.5 COLADA

Para efectuar adecuadamente la fase de colada es necesario establecer una serie de parámetros tales como la temperatura de colada y la velocidad de colada.

Temperatura de colada

La temperatura de colada de la aleación en el molde depende de su composición y de la forma y tamaño de la pieza. Aún cuando el sobrecalentamiento incrementa la fluidez y facilita el llenado del molde, no debe ser elevado, ya que con él aumenta la tendencia a la oxidación, la cantidad de gases disueltos, la posibilidad de que se vaporicen los componentes más volátiles y, finalmente, el crecimiento del tamaño del grano de solidificación. Es, pues, necesario un control riguroso de la temperatura del metal en la cuchara, para decidir el momento más adecuado de la colada en el molde.

Metal necesario para la colada y rendimiento de fundición.

La masa de metal, M_t , que se precisa para obtener una pieza es:

$$M_t = M_p + M_d + M_s$$

M_p = Masa de la pieza

M_d = Masa de los conductos de distribución y mazarotas

M_s = Masa adicionada como margen de seguridad y cuyo valor se estima entre un 5 y 10% del valor de $M_p + M_d$.

El cálculo se reduce a hallar el volumen el volumen de todos los huecos. Para ello se descomponen en volúmenes: $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$, de forma geométrica sencilla, con lo cual el volumen total será la suma de esos volúmenes, y la masa total el volumen total por la densidad de la aleación.

El concepto de rendimiento de fundición se define como la relación entre la cantidad M_p de metal necesario para obtener la pieza propiamente dicha y la cantidad total M_t , es decir, $\rho = M_p / M_t$.

Colabilidad

Aun cuando los conductos del sistema de distribución estén perfectamente diseñados, existe la posibilidad de que el metal comience a solidificar antes de haber llenado por completo el molde, sobre todo las partes más delgadas. Para que esto no suceda, la aleación debe tener su colabilidad adecuada, entendiéndose por tal su mayor o menor aptitud para llenar por completo la cavidad del molde. Evidentemente la colabilidad será función de la cantidad de calor que pueda perder el metal antes de solidificar y, en consecuencia, de la temperatura de sobrecalentamiento, Dependerá también de las condiciones de enfriamiento del metal en el molde y de la velocidad de colada. Ante la imposibilidad de poder calcular teóricamente el camino que recorre una aleación en el interior del molde. Antes de que comience la solidificación, se ha tratado de obtener experimentalmente una cifra convencional que sea función de la colabilidad. Para ello se utiliza la



espiral de colabilidad, que se obtiene en un molde normalizado (figura inferior), metálico o de arena, en el que se cuela con una presión determinada la aleación que se va a ensayar. La colabilidad se mide en este ensayo por la longitud que recorre el metal en el canal de la espiral. Según Portevin y Bastien, esta longitud nos la da la fórmula:

$$\Delta l = k \times \delta \times \xi \times C_e \times (\theta_s - \theta_f) + l_f / (\theta_f - \theta_m)$$

Δl = Longitud de la espiral

K= constante

C_e = Calor específico

δ = densidad de al aleación

θ_s = temperatura de sobrecalentamiento

θ_f = temperatura de solidificación del metal

θ_m = temperatura del molde

l_f = calor latente de solidificación

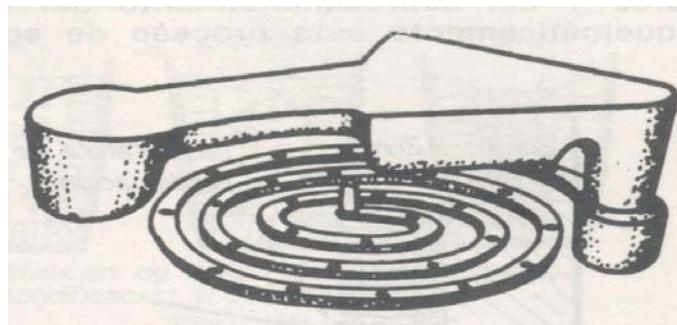


Fig . 2.29

Velocidad de colada

A medida que mayor sea la velocidad de colada mayor será la capacidad del metal de acceder a las secciones de un espesor más reducido. Este no es un factor a tener muy en cuenta en la fabricación del cigüeñal ya que este no presenta secciones de reducido grosor.

Por otro lado, el empleo de velocidades altas es perjudicial por la formación de un flujo turbulento que incrementa la porosidad de la pieza por atrapamiento de gas y aumenta la tendencia a oxidación del material. Siendo así mismo una fuente de erosión del molde que podría provocar su desecho prematuro.

En definitiva, la velocidad de colada ha de ser la suficiente para un llenado completo del molde de tal modo que los factores negativos debidos a una excesiva velocidad de colada se presenten en una intensidad tan pequeña como posible.

2.2.6 SOLIDIFICACIÓN

A lo largo de la fase de solidificación de la cigüeñal, se produce el enfriamiento progresivo del metal y su transformación de estado líquido a estado sólido. El diseño del molde y la selección de sus parámetros son de vital importancia para evitar o disminuir los fenómenos negativos en el metal tales como formación de poros, grietas, heterogeneidad estructural o tamaño de grano inadecuado, entre otros.

Los aspectos asociados con la solidificación incluyen el tiempo de enfriamiento del metal, la contracción y la solidificación direccional.

Las características del molde, los parámetros de solidificación y las propiedades del metal definirán las propiedades mecánicas del material. Nos interesa que el tiempo de solidificación sea lo menor posible para obtener un material con tamaño de grano fino, pero sin embargo, la solidificación debe ser lo suficientemente lenta como para permitir el llenado completo del molde y que los efectos de la contracción se vean reducidos.

La fundición nodular solidifica en un intervalo de temperaturas debido a la variedad de sus componentes. Por encima de la línea de líquidus, el metal se encuentra en estado líquido completamente, y por debajo de la línea solidus, se encuentra totalmente sólido.

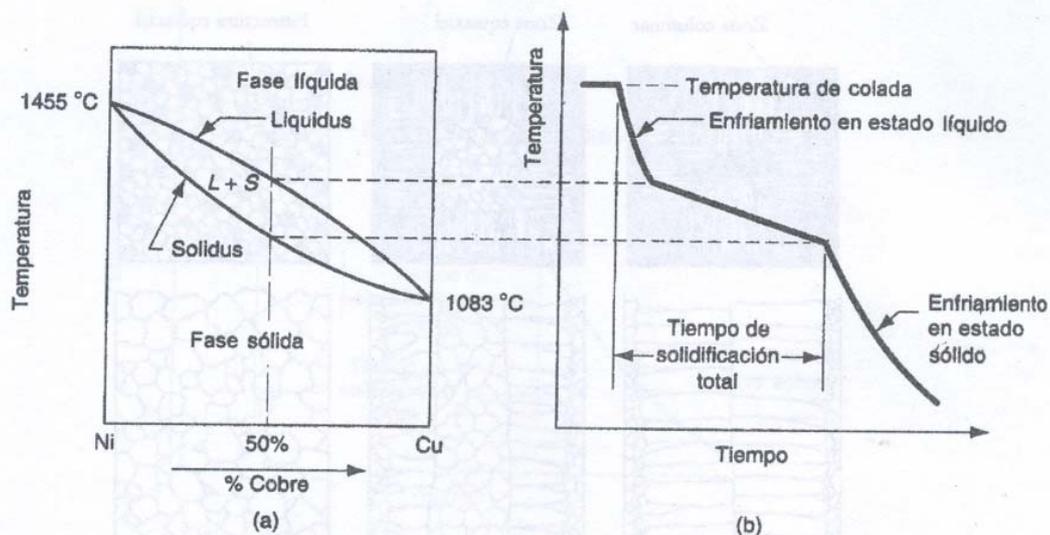


Fig. 2.30

A medida que comienza la solidificación, produciéndose esta en primer instante en las paredes del molde, se generan frentes de solidificación, que llegan a encontrarse en la zona central. Estos planos de debilidad se ven disipados por el hecho de que la pieza posea una geometría de tipo cilíndrica.

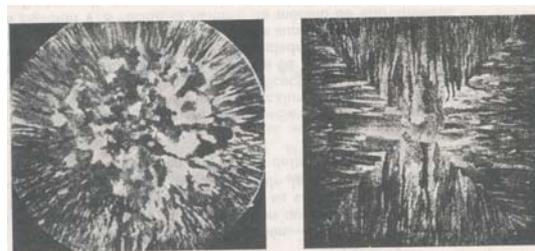


Fig. 2.31

2.2.6.1 CONTRACCIÓN

La fundición nodular como la mayoría de materiales sufre una contracción o disminución de volumen conforme se reduce su temperatura. Tras el proceso de llenado, este fenómeno de contracción a medida que se produzca el enfriamiento va a provocar la aparición de poros o grietas en el metal, lo cual reducirá las propiedades mecánicas del material. Estos fenómenos indeseables pueden reducirse con un buen diseño del molde.

A lo largo del proceso de enfriamiento se producen tres tipos de solidificación:

- La primera de ellas se produce antes de llegar al estado líquido.
- Contracción por el cambio de estado
- Contracción en estado sólido

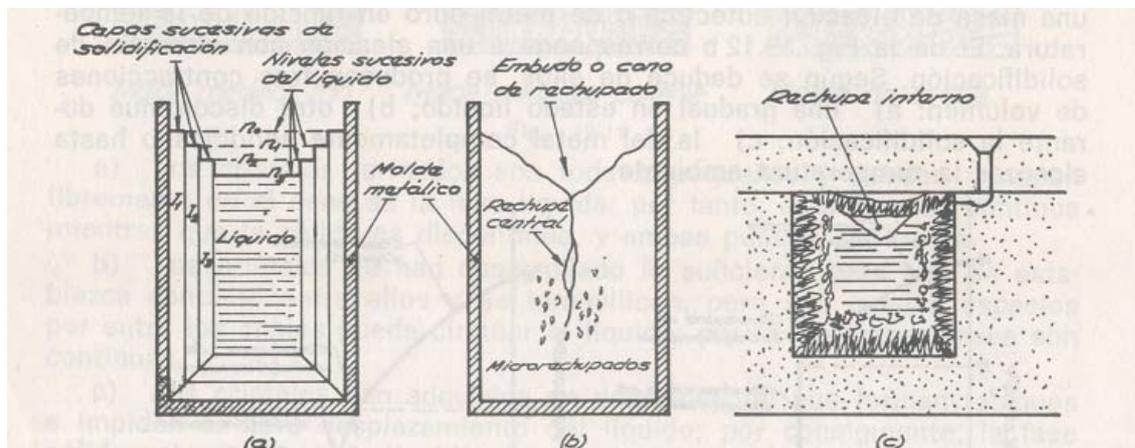


Fig 2.32 Mecanismo de formación de rechupes.

En primer lugar se produce la contracción líquida, que generalmente se encuentra alrededor del 0,5 %. Conforme disminuye el volumen ocupado por el metal en estado líquido va disminuyendo lógicamente su nivel en el molde. La contracción por solidificación no solamente causa una reducción posterior en el nivel de metal fundido sino que como consecuencia de esto disminuye la cantidad de metal líquido disponible para alimentar la zona superior central de la pieza. Es decir, el metal empieza a solidificar por las zonas en contacto con la pared y va reduciéndose el nivel de metal fundido al disminuir el volumen ocupado por el mismo al enfriarse y solidificar. Como consecuencia, al final la superficie del metal presenta una cavidad que se denomina rechupe. Al mismo tiempo se producen una serie de poros a nivel microscópico que reciben el nombre de microrrechupes en el interior del material debido a la contracción del metal.

Prácticamente todos los materiales presentan contracción, y no es la fundición una excepción, debido a que la fase sólida tiene una mayor densidad que la fase líquida, por lo que la transformación de fase provoca una reducción en el volumen por unidad de peso del metal. No obstante, existe la excepción de la fundición gris, que es el caso que nos ocupa, cuya contracción es nula o incluso negativa. Esto se debe a que durante la solidificación tiene lugar la precipitación del carbono en forma de grafito durante las etapas finales de enfriamiento, lo cual provoca una expansión que tiende a contrarrestar la contracción asociada con el cambio de fase.



Una vez que se ha producido el cambio de fase tiene lugar la contracción en estado sólido.

Para tener en cuenta los efectos de la contracción por solidificación es necesario sobredimensionar la cavidad del molde. La cantidad que hay que aumentar a las dimensiones del molde con respecto al tamaño de la pieza final se denomina tolerancia de contracción. Aunque la contracción es volumétrica.

En la tabla figuran los valores de la contracción volumétrica en % para diversas aleaciones, enfriadas desde una temperatura de sobrecalentamiento de unos 150 °C hasta su completa solidificación, siendo la de la fundición nodular de entre el 4 el 5%.

Metal o aleación	Contracción %	Metal o aleación	Contracción %
Aceros no aleados	5 - 7	Cobre	5 - 7
Aceros muy aleados	8 - 10	Aluminio	8 - 10
Fundición gris	3 - 5	Aleaciones ligeras	3 - 5
Fundición blanca	6 - 7	Aleaciones de Mg	6 - 7
Fundición nodular	4 - 5	Niquel	4 - 5
Bronces de Sn	5 - 7	Cuproníquel	5 - 7
Bronces de Al	4 - 5'5	Cinc	4 - 5'5
Latones	6 - 7		

Tabla 2.7

2.2.6.3 SOLIDIFICACIÓN DIRECCIONAL.

Es necesario minimizar los efectos perjudiciales de la contracción. Se hace conveniente que las piezas mas distantes de la fuente de alimentación del metal fundido sean las primeras en solidificar y que la solidificación progrese desde estas regiones hasta las puertas de colada y las mazarotas, así el metal fundido continuará disponible para impedir los vacíos por contracción.

Con el fin de impedir la formación de rechupes se emplea lo que se conoce como solidificación direccional. Consiste en el control de la dirección en que se produce el avance de la solidificación del metal de trabajo a lo largo de la cavidad del molde por medio de elementos auxiliares tales como mazarotas, rebosaderos, calentadores y enfriadores.

En los procesos de fundición a alta presión es posible reducir los efectos de contracción mediante la intensificación de la presión de inyección.

Rebosaderos. Son cavidades conectadas con el exterior del molde que permiten el aporte de material. Este sistema no será aplicable a nuestro proceso ya que finalmente y como se verá más adelante se opta por una colada al vacío.

Mazarotas. Son cavidades internas en las cuales se acumula material fundido que se va aportando al molde para contrarrestar la disminución de volumen por contracción.

Enfriadores y calentadores. Son elementos cuyo fin es el de controlar la temperatura de las distintas zonas del molde. Pueden ser de diversos tipos, externos e internos, controlados térmicamente por el exterior o basados en la conductividad térmica del material.

Con este tipo de elementos podemos controlar que la colada empiece a solidificar por las zonas más alejadas y que los conductos de aporte se mantengan abiertos para el aporte de material desde las mazarotas.



2.2.7 TECNOLOGÍAS DE LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN

2.2.7.1 INTRODUCCIÓN

La variedad de tecnologías disponibles para los procesos de fundición es enorme, sin embargo cada una de ellas tiene sus particularidades y sus características que las hacen más apropiadas para un determinado producto.

Estas características bien pueden ser de calidad, económicos, de número de producción, de tiempo de trabajo, entre otros.

En la tabla 2.6 se representa algunas características conseguidas con los distintos tipos de molde más comunes en el mercado. Un valor de 5 se corresponde con la máxima calidad en ese parámetro, y de un 1 con la menor.

Proceso	Material	Rugosidad (μm)	Peso (Kg)		Sección (mm)		Porosidad	Geometría	Tolerancia
			Min.	Max.	Min.	Max.			
Arena	-	5-25	0,05	-	3,0	-	2	4,5	3
Cáscara	-	1-3	0,05	100	2,0	-	2	3,5	4
Cera	-	1-3	0,005	100	1,0	75	3	5	5
Yeso	No ferrosos	1-2	0,05	50	1,0	-	3	4,5	4
Poliestireno	-	5-20	0,05	-	2,0	-	2	5	4
Molde permanente	-	2-3	0,5	300	2,0	50	3,5	2,5	5
Alta presión	No ferrosos	1-2	0,05	50	0,5	12	4,5	2,5	5
Centrífuga	-	2-10	-	5000	2,0	100	4,5	2,5	3

Tabla 2.8

A su vez, los procesos de fundición de metal se pueden dividir en dos grandes bloques según el tipo de molde empleado:

- Procesos de molde desechable.
- Procesos de molde permanente.

Dado que aunque el proyecto se centra en la fabricación de un cigüeñal, sin especificar si este es para producción en serie o no; nos centraremos en los procesos de molde permanente ya que se entiende que la industria de la automoción es una industria de producción de gran cantidad de unidades y que por lo tanto cualquier pieza que forme parte de un vehículo ha de ser producida en cantidades industriales tras haber ensayado los diferentes prototipos.

2.2.7.2 PROCESOS DE FUNDICIÓN EN MOLDE PERMANENTE.

Los moldes permanentes no son eternos, sino que su vida se ve limitada debido al desgaste superficial y a la fractura por fatiga térmica. La fabricación de estos moldes es más cara y solamente se emplean para grandes volúmenes de producción, de modo que el coste de los moldes no sea un motivo para que el producto pierda competitividad.

Las tecnologías principales aplicables al proceso de cigüeñal de fundición nodular son las estudiadas a continuación.

▪ Fundición en molde permanente por gravedad.

El proceso recibe el nombre ya que el material fundido se vierte sobre el molde por efecto de la gravedad. El molde se construye de metal o grafito revestido con una pequeña capa de material refractario.

Se usa ante todo para aluminio, aleaciones de aluminio, cinc, aleaciones de cinc y a veces para latón y bronce de aluminio; aunque en años recientes ha aumentado el interés por la fundición de hierro gris.

Las coquillas casi siempre se hacen en dos mitades, pudiendo diseñarse con la línea divisoria en posición vertical u horizontal.

La obtención de las piezas en las coquillas consta de las siguientes operaciones:

- Limpieza de las diversas partes del molde con aire caliente a presión y calentamiento hasta la temperatura más adecuada para la colada.
- Recubrimiento de la cara del molde con una delgada capa de material refractario.
- Colocación de los machos y cierre del molde.
- Colada del metal en el molde, dejándolo en reposo el tiempo suficiente para que la pieza solidifique.
- Extracción de la pieza del molde.

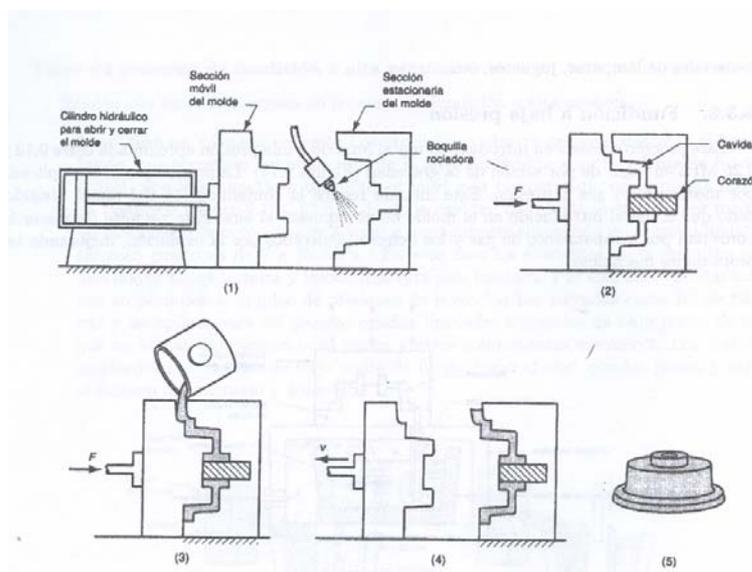


Fig. 2.33 Fundición en molde permanente por gravedad

Los inconvenientes son los siguientes:

- Su utilización solo resulta económica cuando el número de piezas que se desea fabricar es lo suficientemente elevado.
- La forma de la pieza debe ser sencilla, sobre todo en el interior.

- **Fundición a baja presión.**

El proceso consiste en introducir el metal fundido a una presión de entre 0,12 y 0,20 MPa. Este proceso produce una reducción en la contaminación del metal fundido dado que no se expone la colada al aire. La porosidad, el atrapamiento de gas y la oxidación también se ven reducidas con este proceso respecto al de gravedad.

- **Fundición al vacío en molde permanente.**

Este proceso consiste en el empleo de una reducida presión de vacío en el molde para atraer el metal líquido hasta la cavidad principal, en lugar de forzarlo mediante una presión de aire desde la parte inferior del molde. Este proceso permite obtener una porosidad por atrapamiento de gas menor que por fundición a baja presión, lo cual da lugar a componentes con propiedades mecánicas mejores.

- **Fundición a alta presión.**

El proceso es una inyección de colada a presiones elevadas (de 7 a 350 Mpa), permitiendo así la obtención de mejores tolerancias dimensionales y acabado superficial. Mediante esta técnica se reducen los tiempos de llenado del molde.

Tipos de procesos de fundición a alta presión.

Existen dos tipos de procesos de fundición a alta presión:

Fundición de cámara caliente. Los materiales que se pueden procesar aquí son los de bajo punto de fusión, tales como el zinc, estaño y plomo, entre otros, y por tanto no se adecua a la fundición nodular que necesita de elevadas temperaturas para estar en estado líquido.

Fundición en cámara fría. En las máquinas de cámara fría el horno es un elemento externo a la máquina de modo que los elementos de la máquina están sometidos a altas temperaturas el menor tiempo posible. En este caso las presiones empleadas son de 14 a 140 MPa. Este proceso presenta una elevada productividad. En la mayor parte de estas máquinas la cámara de inyección es horizontal. Las máquinas de cámara fría se usan típicamente para fundiciones de aluminio, latón y aleaciones de magnesio.

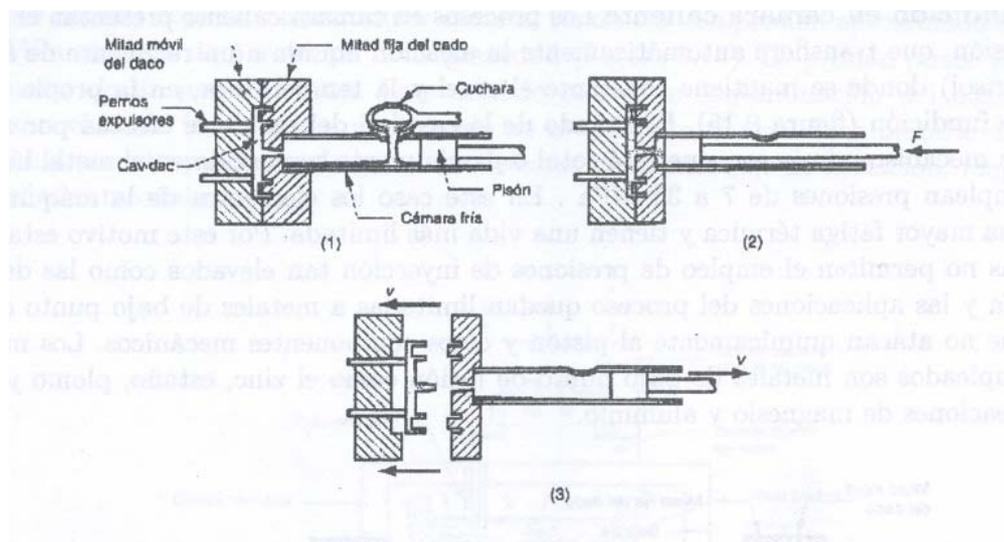


Fig. 2.34 Fundición a alta presión en cámara fría



▪ **Fundición Squeeze.**

Esta es una técnica híbrida que consiste en el llenado del molde en condiciones normales y posteriormente, durante la solidificación, la aplicación de una alta presión que provoque un aumento de densidad sustancial.

Tiene dos variantes. La *directa*, en la que se produce el llenado del molde en la cantidad justa y luego su comprensión (hasta 15000 bar en procesos de última generación) entre las dos partes que componen el molde (una estática que hace de recipiente y otra que hace de émbolo de empuje). Esta técnica es también llamada forjado líquido y tiene inconvenientes como de posibles turbulencias en el llenado con oxidaciones superficiales.

En general este proceso alcanza un alto grado de calidad dimensional de homogeneidad del material y alta densidad con ausencia de poros. También la mayor parte de los metales pueden trabajarse por este método. Sin embargo el proceso es bastante caro y requiere alta sofisticación en el equipo y en el mantenimiento.

▪ **2.2.7.3. SELECCIÓN DEL TIPO DE COLADA**

La porosidad es uno de los defectos más comunes en los procesos de fundición y es por esto que se debe seleccionar un proceso que ayude a disminuirla en la mayor medida posible. Es por esto que se descartan los procesos de colada por gravedad en contacto con la atmósfera. Los procesos posibles para la colada de la fundición nodular que reúnan suficientes garantías son el de inyección a baja presión, el de inyección por vacío, inyección por alta presión y fundición squeeze.

La fundición squeeze es un proceso relativamente nuevo que requiere de una sofisticación en el equipo y en el mantenimiento elevada. Además presenta problemas de turbulencia y microoxidaciones superficiales; por lo que se opina que no es la más conveniente para el proceso disponiendo de las otras opciones.

La colada a baja presión reduce considerablemente la contaminación del metal fundido ya que el metal introducido en el molde no está expuesto al aire. La porosidad disminuye así como los defectos originados por oxidación. Estas características hacen muy aconsejable el uso de este procedimiento para la colada de una pieza crítica como es el cigüeñal. Aún así, el proceso de fundición al vacío ofrece aún mejores garantías que el de colada a baja presión. La porosidad conseguida por atrapamiento de gas es menor que en el proceso de baja presión y esto me hace considerarlo con la opción más adecuada.

La fundición a alta presión es un proceso recomendado para componentes de una gran complejidad geométrica y de espesores reducidos. Nuestro cigüeñal aún teniendo una complejidad geométrica, no lo considero excesivamente complejo; siendo además su espesor bastante grueso. Además la fundición a alta presión de cámara caliente no es apta para materiales de alto punto de fusión, y la de cámara fría se utiliza generalmente para aleaciones de aluminio, latón y aleaciones de magnesio; por lo que no refleja confianza para una colada de fundición nodular.

Por tanto se puede decir, que el proceso que más se ajusta a los requerimientos técnicos y mecánicos para el proceso de colada de fundición nodular sería el de colada por vacío. Siendo válido en caso de no ofrecer unas garantías de calidad el suministrador, o por eventualidades empresariales, también el de colada a baja presión.



▪ 2.2.8 DESARENADO

Operación en virtud de la cual, después del desmoldeo, se retira de la superficie de la pieza cualquier traza de arena, refractario u otras impurezas que hayan podido quedar adheridas. Para ello se pueden emplear:

- Cepillos de alambre: cuando el número de piezas es pequeño y su tamaño también lo es.
- Tambores o cubas de frotación: Se usan para las piezas pequeñas y están formados por un tambor giratorio, dentro del cual se introducen las piezas junto con pequeñas estrellas de punta de fundición blanca. Al girar el tambor se desprende la arena, por frotación con las estrellas de puntas, y las piezas quedan completamente limpias.
- Chorro a presión: Se puede emplear para piezas de cualquier tamaño. Se usan los siguiente tipos:
 1. Chorro de aire, en el cual una corriente de aire, a elevada presión, impulsa arena (chorro de arena) o perdigones metálicos (chorro de perdigones) contra la superficie de la pieza. Cuando se emplea arena, los obreros encargados de la operación deben protegerse debidamente para evitar la silicosis. Existen diversos tipos de instalaciones por chorro de arena o perdigones, adaptadas a las necesidades de cada caso. Así, cuando las piezas son pequeñas o medianas, pueden disponerse en una plataforma giratoria y van recibiendo uno o más chorros de arena o granalla. Si las piezas son grandes, se sitúan en una cabina especial, muy bien ventilada, y el chorro de arena o de perdigones, lo dirige contra la superficie, mediante una manguera flexible, un obrero situado en el interior, convenientemente protegido con un traje especial y careta contra el polvo. En los sistemas modernos, el chorro de arena se puede maniobrar desde el exterior de la cabina
 2. Chorro de agua, a elevada presión que limpia la superficie exterior de la pieza y desaloja perfectamente los machos sin que se produzca polvo.
 3. Chorro de arena y agua a presión. Es un método muy rápido y eficaz, pero tiene el inconveniente de que necesita instalaciones muy costosas (bombas de agua, acumulador hidráulico, sistema de eliminación de lodos y recuperación del agua y arena, cabina especial, etc.) que sólo se pueden amortizar cuando el volumen de trabajo es muy elevado.

2.2.9 DEFECTOS DE FUNDICIÓN

Los fenómenos que intervienen en la fundición son innumerables y es por esto que se hace necesaria la acotación de los principales defectos que podemos encontrar y que supondrían en caso de aparición un problema para la calidad de la pieza.

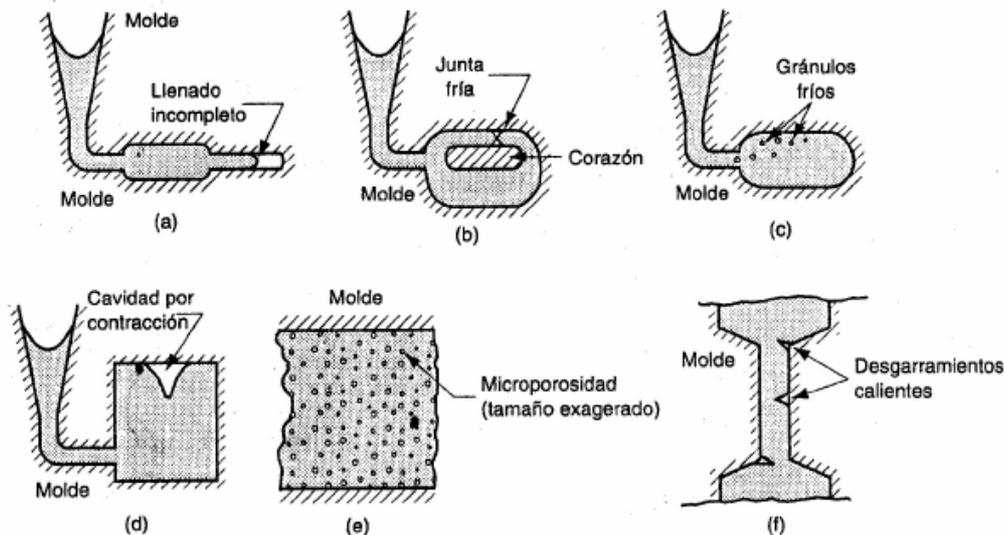


Fig. 2.35 Algunos defectos en los productos de fundición.

- **Llenado incompleto.** Este defecto aparece en una fundición que solidificó antes de completar el llenado de la cavidad del molde. Las causas típicas incluyen: 1) fluidez insuficiente del metalfundido, 2) muy baja temperatura de vaciado, 3) vaciado que se realiza muy lentamente y/o 4) sección transversal de la cavidad del molde muy delgada.
- **Junta fría.** Una junta fría aparece cuando dos porciones del metal fluyen al mismo tiempo, pero hay una falta de fusión entre ellas debido a solidificación o enfriamiento prematuro. Sus causas son similares a las del llenado incompleto.
- **Metal granoso o gránulos fríos.** Las salpicaduras durante el vaciado hacen que se formen glóbulos de metal que quedan atrapados en la fundición. Un buen diseño del sistema y de los procedimientos de vaciado que eviten las salpicaduras puede prevenir este defecto.
- **Cavidad por contracción.** Este defecto es una depresión de la superficie o un hueco interno en la fundición debido a la contracción por solidificación que restringe la cantidad de metal fundido disponible en la última región que solidifica. Ocurre frecuentemente cerca de la parte superior de la fundición, en cuyo caso se llama rechupe. El problema se puede resolver frecuentemente por un diseño apropiado de la mazarota.
- **Microporosidad.** Se refiere a una red de pequeños huecos distribuida a través de la fundición debida a la contracción por solidificación del último metal fundido en la estructura dendrítica. El defecto se asocia generalmente con las aleaciones, debido a la forma prolongada, en que ocurre la solidificación en estos metales.



- **Porosidad:** La porosidad puede ser causada por contracción y/o presencia de gases perjudicando la ductilidad y su acabado superficial. La porosidad causada por contracción puede reducirse con el uso de enfriadores metálicos internos o externos, aumentando el gradiente de temperaturas. En el caso de gases, éstos pueden ser sacados del metal fundido mediante lavados con un gas inerte o fundiendo y vaciando en vacío.
- **Desgarramiento caliente.** Este defecto, también llamado agrietamiento caliente, ocurre cuando un molde, que no cede durante las etapas finales de la solidificación o en las etapas primeras de enfriamiento, restringe la contracción de la fundición después de la solidificación. Este defecto se manifiesta como una separación del metal (de aquí el término desgarramiento o agrietamiento) en un punto donde existe una alta concentración de esfuerzos, causado por la indisponibilidad del metal para contraerse naturalmente. En la fundición en arena y otros procesos con molde desechable o consumible, esto se previene arreglando el molde para hacerlo retráctil. En los procesos de molde permanente se reduce el desgarramiento en caliente, al separar la fundición del molde inmediatamente después de la solidificación.

▪ 2.2.9.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL ORIGEN DEL DEFECTO

▪ Defectos provocados por la contracción.

La disminución de volumen que experimenta la aleación, desde el estado líquido hasta el estado sólido, a la temperatura ambiente, puede dar lugar a alguno de los siguientes defectos:

- **Rechupado.** En el apartado de fundamentos de los procesos de fundición se ha explicado el mecanismo de su formación. Podemos distinguir entre microrrechupes y macrorrechupes. Su eliminación se consigue mediante diseños adecuados: utilizando mazarotas, consiguiendo una solidificación direccional y evitando las acumulaciones de masa o puntos calientes (espesores uniformes, ángulos, etc).

- **Tensiones internas. Roturas, grietas y deformaciones.** Para que una pieza moldeada esté exenta de tensiones internas, tanto durante su enfriamiento como después del mismo, se precisa, en primer lugar, que toda la masa se conserve isotérmicamente, desde el final de la solidificación hasta que alcance la temperatura ambiente. Para conseguirlo se deben adoptar sistemas de distribución que no creen grandes diferencias de temperatura en las distintas zonas de la pieza; al mismo tiempo los moldes se deben construir de forma que no impidan la libre contracción.

Cuando se producen tensiones internas, los esfuerzos resultantes son capaces de producir roturas, grietas y deformaciones. Las grietas pueden ser superficiales o internas.

- Inclusiones.

Son partículas extrañas procedentes de las impurezas que inevitablemente se encuentran en el metal en el momento de la colada y de las que accidentalmente pueden incorporarse durante ella. Produce discontinuidades en la masa metálica, que afectan a las características mecánicas

- Heterogeneidades de tipo químico. Segregaciones.

Como consecuencia del proceso de solidificación, las aleaciones en el estado sólido presentan cierta heterogeneidad en su composición química, que se conoce con el nombre de segregación. En virtud de este fenómeno ciertos elementos de aleación o las impurezas se concentran en determinadas regiones de las piezas fundidas.



-Gotas frías

Se originan cuando las gotas que salpican durante la colada se oxidan y solidifican bruscamente. Si, al caer en la aleación líquida, la temperatura de ésta no es lo suficientemente elevada para refundirlas, quedan aprisionadas en su seno en forma de gotas frías. Si quedan al descubierto durante el mecanizado, deterioran las herramientas de corte por su elevada dureza.

▪ Defectos debidos a los gases

Durante la colada de una aleación, en el molde se produce un desprendimiento gaseosos, procedente de distintas fuentes (del metal, materiales del molde, etc).

Cuando la evacuación de los gases no es completa, algunos pueden quedar aprisionados en la aleación después de solidificar, en forma de porosidades o sopladuras.

▪ Defectos debidos a la colabilidad.

El exceso de colabilidad es perjudicial, porque la aleación puede infiltrarse entre los granos de arena y también por las juntas del molde y machos. La falta de colabilidad por su parte, puede dar lugar a falta de llenado del molde, sobre todo, en partes delgadas.

▪ Defectos debidos a la aleación fría.

Cuando la aleación en el momento de la colada está demasiado fría o cuando los conductos de colada no se han dispuesto convenientemente, existe el peligro de que el molde no se llene totalmente (llenado incompleto) y la pieza salga incompleta.

▪ Defectos debidos a discontinuidad de colada.

Por último, si se interrumpe la colada durante cierto tiempo y después se continúa, existe el peligro de que la parte que penetra primero en el molde solidifique y no se una con la segunda, dando origen a una unión fría.



▪ 2.3 FLUJO DE ESFUERZOS

▪ 2.3.1 INTRODUCCIÓN.

Cuando se trata de la forma más acertada de elegir un material para la fabricación de una pieza, en la que la resistencia mecánica constituye su cualidad fundamental, parece natural considerar ante todo las causas a las que son debidas las roturas en servicio de los metales, a fin de poder así estudiar los medios de contrarrestarlas y elegir así nuestros materiales con las condiciones más favorables para la resistencia.

A primera vista parece indudable que cuando una pieza sometida a la acción de ciertas cargas se rompe es debido a que la resistencia del material es inferior a los esfuerzos a que se le ha sometido. Sin embargo, si consideramos que el cálculo del dimensionado de las piezas mecánicas se realiza hoy con conocimientos bastante precisos de los esfuerzos y sobrecargas a que puede hallarse sometido el material, y sobre ellos se establecen aún elevados coeficientes de seguridad, se comprende que tendría que ser muy difícil que pudieran producirse roturas en servicio más que en casos absolutamente anormales.

El problema de la rotura es, sin embargo, mucho más complejo y conviene lo consideremos aunque sea brevemente.

En el estudio de las dimensiones de las piezas para resistir esfuerzos se parte de dos hipótesis: la de la isotropía del material y la de que las tensiones se distribuyen homogénea o regularmente en la sección resistente. Ambas hipótesis, sin embargo, son sólo aproximadas y ni los materiales son perfectamente isótropos ni las tensiones se distribuyen con regularidad.

Por una parte, se conoce que los metales contienen siempre impurezas y éstas, por las peculiaridades de los procesos de obtención, solidificación, etc., se distribuyen heterogéneamente. Los metales no pueden, por tanto, ser homogéneos y su resistencia y propiedades, en general, no serán iguales en todos sus puntos. Así, pues, cuando se indica un valor como resistencia de un metal, este valor no expresa la resistencia en todos sus puntos, sino que expresa un valor medio. La resistencia en un punto determinado puede, por tanto, ser superior o inferior a la nominal establecida.

Por otra parte, las tensiones que un sistema de cargas desarrollan en una pieza varían de un punto a otro según la configuración de la pieza, y así los cambios de sección, codos, entallas, orificios, fileteados, etc., provocan puntos de concentración de tensiones que dan lugar a que los esfuerzos que se desarrollan en tales puntos pueden ser muy superiores a los esfuerzos nominales medios previstos. Aun cuando un estudio detenido de las tensiones originadas por la configuración compleja sea posible y podamos determinar los esfuerzos que se desarrollan en los puntos de concentración, existen otras causas de irregularidad en las tensiones provocadas por los efectos de entalla debidos a defectos superficiales, de mecanizado, grietas, inclusiones, sopladuras, tensiones internas, defectos de montaje, de ajuste, etc., que dan lugar a que se puedan producir estos esfuerzos locales que pongan en peligro la seguridad de la pieza.



Todo ello da lugar a que, aun cuando en el cálculo del dimensionado se considere que los esfuerzos a que se somete el material son inferiores a su resistencia y aun se establezca un coeficiente de seguridad que garantice tal afirmación, puede en ciertos puntos débiles producirse una concentración de tensiones que exceda la resistencia del material y se produzca la rotura. Tal rotura, aun cuando fuese local, no tardaría en producirse totalmente por el fuerte efecto de entalla de la grieta que provocaría una elevadísima concentración de tensiones que difícilmente soportaría el material.

Los metales, sin embargo, gozan de una propiedad inestimable y que es causa de su gran preponderancia para resistir esfuerzos. Tal es la facultad de deformación plástica o deformación sin rotura, en virtud de la cual cuando se rebasa el límite elástico de un metal, éste sufre una deformación, sin que por ello se inicie la rotura. Así, pues, si se rebasa localmente el límite elástico en un determinado lugar de una pieza metálica, ésta sufrirá una deformación local en virtud de la cual no sólo por el pequeño cambio de configuración se corregirá el efecto de concentración de tensiones modificándose su distribución, sino que por el fenómeno de acritud, anejo en los metales a toda la deformación plástica, se aumentará la resistencia en el punto débil, compensándose por ambas causas el estado de debilidad local, peligroso en la pieza metálica considerada.

Esta capacidad de deformación o ductilidad de los metales constituye, pues, una autodefensa de éstos para resistir la rotura y, junto con un elevado límite elástico, constituyen sus atributos para la resistencia mecánica. Resistencia y ductilidad aparecen, pues, unidas en la aptitud de un metal para soportar esfuerzos y las roturas en servicio parece debieran producirse tan sólo por insuficiencia de tales propiedades frente a las condiciones de trabajo en servicio.

Las roturas en servicio aparecen, sin embargo, aun en metales en los que por su resistencia y ductilidad podríamos esperar un comportamiento más eficaz y sus causas las tendremos que investigar en un más detallado estudio de su proceso de deformación y rotura.

▪ 2.3.2 PROCESOS DE DEFORMACIÓN Y ROTURA EN LOS METALES.

Cuando una pieza metálica se somete a una carga de cualquier clase, de tracción por ejemplo, el metal sufre una deformación tanto mayor cuanto mayor sea la carga que actúa.

Si la carga es inferior a cierto límite, la deformación se denomina elástica y tiene un carácter transitorio, desapareciendo al cesar la actuación de la carga. La relación de la carga a la deformación constituye el módulo de elasticidad que es una constante física del metal.

Si la carga rebasa cierto límite, denominado límite elástico, las deformaciones dejan de ser proporcionales a las cargas; aumentando más rápidamente que éstas, el fenómeno se hace irreversible y aunque, cese la actuación de la carga el metal queda deformado permanentemente. Tal deformación se denomina plástica o permanente.

Es característico de la deformación plástica el que el metal, al ser deformado por una carga superior a su límite elástico, sufre un aumento de resistencia a la deformación, lo que le permite soportar la carga aplicada y sin el cual el metal se rompería al rebasar la carga aplicada su límite elástico. Este fenómeno constituye, la acritud y es característico en todos los metales. Así, pues, podemos decir que un metal sometido a cargas crecientes superiores su límite elástico se deforma y aumenta la resistencia a la deformación progresivamente con ésta, hasta que termina por romperse. El término de la deformación plástica es, pues, la rotura que se produce en cierto instante del proceso de deformación.



¿Es, pues, la rotura consecuencia de la deformación? Aparentemente sí, pero no se puede afirmar que dependa exclusivamente de ella; antes, al contrario, la experiencia demuestra que un mismo metal llega a romperse con deformaciones de muy distinta magnitud, según el proceso mecánico que las origina. Un metal en un ensayo de tracción, en efecto, se alarga mucho menos que estirado en una hilera. No existe, pues, un límite de deformación que cuando se alcanza produce la rotura, sino que ésta, aunque relacionada con la deformación, obedece además a otras causas.

Es opinión muy generalizada que el metal se deforma y se rompe según dos procesos que aunque se interfieren se desarrollan según distintos mecanismos.

Sin entrar por ahora en detalles sobre los mecanismos íntimos de estos procesos de deformación y rotura, se puede considerar a grandes rasgos su desarrollo. Un metal en estado sólido debe su permanencia de forma, base de su cohesión, al equilibrio entre las fuerzas de atracción y repulsión existentes entre sus átomos. Todo esfuerzo exterior que actúe sobre él desarrolla en estos átomos unas tensiones adicionales que rompen el estado de equilibrio haciendo que se desplacen en la dirección de las resultantes entre sus fuerzas de enlace y las tensiones adicionales. Si el desplazamiento es pequeño, variando las fuerzas interatómicas inversamente con las distancias y más intensamente las de repulsión que las de atracción, se establecerá un nuevo equilibrio con desplazamientos atómicos mayores o menores, según la intensidad de las tensiones adicionales, con lo que se habrá producido una deformación en el metal. Claro está que tal estado sólo se puede mantener mientras dure la acción de la carga exterior y al cesar ésta, desapareciendo las tensiones adicionales, el metal recuperará el equilibrio inicial volviendo sus átomos a sus primitivas posiciones y restableciendo su forma y dimensiones iniciales. Tal proceso corresponde a la **deformación elástica**.

Si el esfuerzo rebasa cierto límite, la tensión adicional puede alejar unos átomos de otros, a tal distancia que se produzca la ruptura de algunos enlaces, manteniéndose otros y restableciéndose algunos nuevos, por variación de las posiciones reciprocas de algunos átomos con respecto a sus vecinos. En tal caso los desplazamientos serán permanentes, ya que algunos enlaces y posiciones atómicas han sido alterados, y aun cuando desaparezca la carga el efecto o deformación subsiste, produciéndose, por tanto, una **deformación plástica**.

Pero puede suceder que la ruptura de enlaces sea total, sin conservación de enlaces antiguos ni establecimiento de otros nuevos. En tal caso, perdida la cohesión, se producirá la **rotura** del metal.

La deformación plástica y la rotura se producen, pues, ambas por desplazamientos atómicos debidos a las tensiones desarrolladas por el esfuerzo exterior aplicado y que son resistidas por los enlaces interatómicos del metal, pero así como en la deformación la ruptura de enlaces es sólo parcial y subsiste la cohesión, en la rotura se produce una ruptura total de aquellos enlaces con destrucción de la cohesión. La resistencia a la deformación de un metal es, pues, inferior a su cohesión.

Se puede, pues, considerar que un metal posee una resistencia a la deformación, o límite elástico, y una cohesión. Para que el metal se deforme es preciso que lo sometamos a un esfuerzo que rebasa su límite elástico; para que se rompa deberá rebasar la cohesión. Pero como el límite elástico no puede ser superior a la cohesión, los metales deformarán siempre, más o menos, antes de romperse.



El límite elástico de un metal depende de la energía de los enlaces interatómicos, pero también de la posibilidad de desplazamientos de grupos de átomos que, sin pérdida de la cohesión, varían de posiciones mutuas y modifican sus enlaces; ello depende de la ordenación o estructura de los átomos en el seno del metal.

En cuanto a la cohesión no dependerá más que de la energía de los enlaces que unen a unos átomos con otros.

Pero la cohesión real de un metal no es la resultante de las fuerzas de enlaces interatómicas, como podría suponerse, sino que este valor se ve disminuido por los defectos internos que existen en todo metal, como grietas, sopladuras, fallos y demás defectos microscópicos que dan lugar a que su cohesión real o tecnológica sea sólo una fracción de la absoluta o teórica. Esta fracción será mayor o menor según los defectos del metal y, por tanto, según su calidad.

Ahora bien, así como la acritud da lugar a que conforme se deforma el metal su resistencia a la deformación va creciendo, la cohesión varía también con la deformación.

Inicialmente, al deformarse el metal, los defectos se deforman estirándose en el sentido del alargamiento disminuyen, por tanto, su agresividad, con lo que la cohesión tecnológica se va aproximando más a la absoluta sin que llegue a igualarla. Para grandes deformaciones, sin embargo, parece que la cohesión disminuye a partir de cierto límite por efecto de ciertas microgrietas que la misma gran deformación provoca en el seno del metal.

Así, pues, bien sea porque el ritmo de crecimiento de la cohesión sea más lento que el de crecimiento de la resistencia a la deformación, o bien porque al alcanzarse grandes deformaciones la cohesión disminuye por desgarramientos internos, en ambos casos se llegará a una cantidad de deformación en que la resistencia del metal a la deformación y su cohesión se igualen, y, por tanto, si se aumenta la carga el metal se rompe, ya que al intentar aumentar la deformación, por el aumento de carga, su resistencia a la deformación se hace superior a su cohesión.

Un metal rompe, pues, cuando su resistencia a la deformación se iguala a la cohesión, debido a que en el proceso de deformación la acritud ha aumentado la resistencia a la deformación hasta el valor que haya alcanzado la cohesión, que constituye, pues, su resistencia a la rotura. Este valor de la cohesión no será igual al valor inicial, ya que el proceso de deformación ha dado lugar a que aquélla varíe. El valor final de la cohesión es, pues, la resistencia a la rotura.

En la figura siguiente representamos gráficamente estos procesos. La línea OENR representa la variación de la resistencia a la deformación de un metal conforme éste se deforma. La recta OE corresponde al proceso elástico, en el que vemos que la resistencia crece proporcionalmente con la deformación. El punto E marca el límite de elasticidad. La curva ENR corresponde al proceso plástico en que vemos la resistencia aumenta, pero no proporcionalmente a las deformaciones.

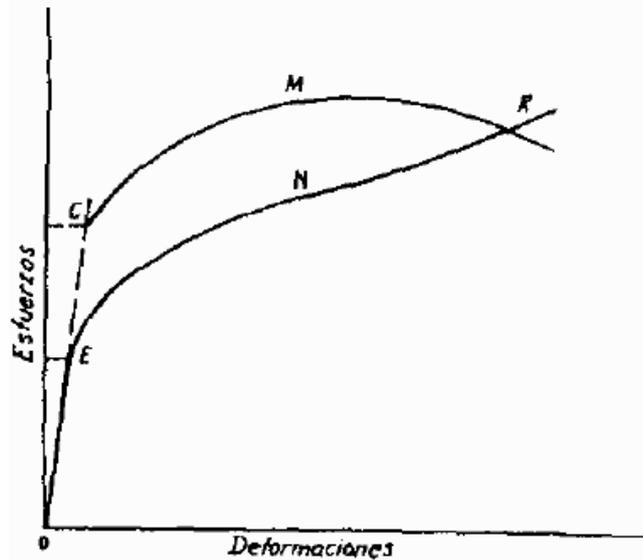


Fig. 2.33

El punto C corresponde a la cohesión tecnológica inicial del metal. Con la deformación la cohesión varía según la curva CMR, que al principio crece para disminuir después. En el punto R, en que se igualan la cohesión y la resistencia a la deformación, el metal se rompe.

El comportamiento mecánico del metal está ligado, pues, a las posiciones iniciales de los puntos E y C y a la marcha de las curvas ENR y CMR o, lo que es lo mismo, depende de los valores de su límite elástico y cohesión tecnológica y de sus leyes de variación en el proceso de su deformación. Ellos constituyen, pues los atributos de resistencia del metal y de su capacidad de deformación antes de la rotura,

Resulta, pues, aparentemente al menos, que si elegimos para la fabricación de la pieza un metal no solamente capaz por su límite elástico de soportar los esfuerzos nominales a que por el cálculo del dimensionado de la pieza y sus condiciones de trabajo se ha de ver sometido, sino con una capacidad de deformación o ductilidad elevada que nos garantice ampliamente que la rotura no puede producirse sin una gran cantidad de deformación, parece que la supervivencia de la pieza debe estar asegurada y que las roturas en servicio solamente podrían producirse en casos sumamente anormales de extraordinarias sobrecargas o errores en el concepto o cálculo de las piezas.

La consecuencia que se acaba de exponer sería efectiva si el comportamiento de un metal dependiese tan sólo de la intensidad de la tensión máxima a que se halle sometido y no variase con la naturaleza o sistema de las cargas que actúan. En tal caso nos bastaría conocer cómo se comporta el metal sometido a cargas simples, de tracción por ejemplo, y podríamos generalizar tal comportamiento a cualquier condición de servicio.

En realidad, sin embargo, no sucede así y la naturaleza de los esfuerzos influye intensamente en el proceso de la deformación modificando profundamente su desarrollo, como se expone.



▪ 2.2.3 Por qué se rompen los metales.

Resulta de todo lo expuesto que los metales, sólo excepcionalmente, se rompen en servicio por sobrecargas generales que rebasan su resistencia a la rotura siendo lo general que ésta se produzca por sobrecargas locales que pueden engendrar esfuerzos que rebasan sus condiciones de resistencia. Pero la facultad de deformarse plásticamente, dando origen a la acritud, les protege de aquel riesgo, homogeneizando su estado de tensión y reforzando los puntos vulnerables. Si a pesar de ello se producen roturas en servicio con metales de elevada ductilidad, es debido a que causas externas que afectan a la modalidad de actuación de las cargas pueden contrarrestar los beneficiosos efectos de su facultad de deformación, bien por alterar e impedir su desarrollo, como sucede con la triaxialidad y demás factores enfragilizadores, bien por que provocan una desorganización interna que destruye la cohesión como sucede en la fatiga. En el primer caso por elevación de la curva ENR (figura 2.33) de variación de la resistencia a la deformación, en el segundo por descenso de la CMR (fig. 2.33) de variación de la cohesión, su punto de intersección R se desplaza hacia la izquierda facilitando la rotura.

Las roturas en servicio se producen, pues, porque la naturaleza o forma de actuar las cargas impiden el normal desarrollo del proceso de deformación. Tienen, pues, el carácter de roturas frágiles o roturas de fatiga y en ambos casos se caracteriza por la pequeñez de la deformación producida.

Es precisamente esta pequeñez de deformación que las caracteriza lo que hace posible se haya producido la rotura.

Constituye esta falta de deformación, por otra parte, un enmascaramiento de los procesos que se desarrollan en el seno del metal, ya que el no observar deformaciones nos hace confiar en una amplia seguridad del metal, siendo así que puede hallarse en riesgo inminente de rotura. Por ello, las roturas en servicio nos sorprenden generalmente cuando menos las esperamos.

▪ 2.2.4 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS – ANALOGÍA DE FLUJO

Es muy importante que en el diseño de elementos mecánicos se desarrolle un “sentido” para captar la concentración del esfuerzo, a fin de poder saber intuitivamente cuándo se produce y qué hacer al respecto. Tal sensibilidad también ayuda en alto grado a efectuar una extrapolación de valores K_t a partir de diagramas o estimar el factor de concentración del esfuerzo cuando no puede recurrirse a procedimientos experimentales.

La analogía del flujo es quizá el mejor medio sencillo para imaginar la concentración de los esfuerzos. La figura 2.34 indica una barra de sección uniforme sometida a tensión, y se visualiza la acción de la fuerza como un flujo a través de la barra. De este modo, cada línea de flujo en la figura representa una cierta intensidad de fuerza, y como la barra es uniforme, las líneas de flujo están uniformemente espaciadas. En la figura se indican dos aberturas o muescas en la barra, para representar el efecto de los acentuados de esfuerzo. En secciones alejadas de los cortes, las líneas de flujo estarán espaciadas en forma uniforme como se hallaban en a).

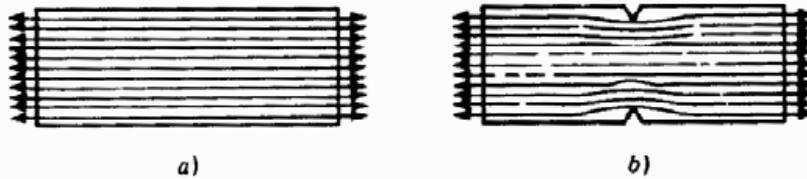


Fig. 2.37

A medida que las líneas de fuerza o flujo se van aproximando a una muesca, las más cercanas tendrán que flexionarse al máximo para poder pasar por la sección más estrecha. La intensidad de la concentración del esfuerzo es proporcional al grado de desviación de las líneas de flujo. Esto puede explicarse de otra manera. Para el mismo alargamiento, entre dos barras, una doblada y otra recta; la recta soportará mucha más carga que la curvada, en otras palabras, se alargará en mayor grado que la recta si se les aplica la misma carga. Por lo tanto, el efecto de la muesca indicada en la figura anterior es reducir la capacidad de carga, y dicha reducción es máxima en el material inmediatamente adyacente a la muesca.

La analogía de flujo es importante porque nos proporciona una imagen física de la existencia de las concentraciones de esfuerzo. También puede utilizarse como un procedimiento cualitativo que ayuda a decidir lo que tiene que hacerse para aminorar la concentración del esfuerzo. Algunos ejemplos serán suficientes para fines de ilustración.

Sin duda, la falla que ocurre con mayor frecuencia en maquinaria rotatoria es la de fatiga de un eje o árbol. Los cojines, engranes y otros elementos tienen que ser montados ajustándolos contra un hombro o escalón formado en el eje, y es precisamente en la base de tal reborde donde la falla tiene lugar. La figura siguiente muestra tal parte, junto con las líneas de flujo. Para el mínimo k_t el radio de enlace r debe ser lo más grande posible; sin embargo, por lo general r está limitado por el diseño de la parte embonante. Se puede utilizar un enlace o un filete mayor y obtener así un valor inferior de k_t efectuando un rebaje en el hombro, como se indica en b). El método que se ilustra en la figura, en la imagen c), es muy útil a veces. La primera ranura debe ser más profunda que la segunda, pero el diámetro en el fondo de la misma debe ser ligeramente mayor que d). Sorprendentemente, la formación de ranuras adicionales suele ser un medio muy efectivo para reducir concentraciones de esfuerzo. De esta manera se han resuelto muchos problemas de concentración del esfuerzo, quitando material en lugar de agregarlo. Cuando se utiliza con elementos sujetos a flexión debe estudiarse el diagrama de momento flexionante, a fin de asegurar que las ranuras adicionales no se formen en un punto de máximo momento de flexión. De hecho, el rebaje que se muestra en la figura d) sólo será un remedio si se efectúa en un punto de bajo momento flexionante.

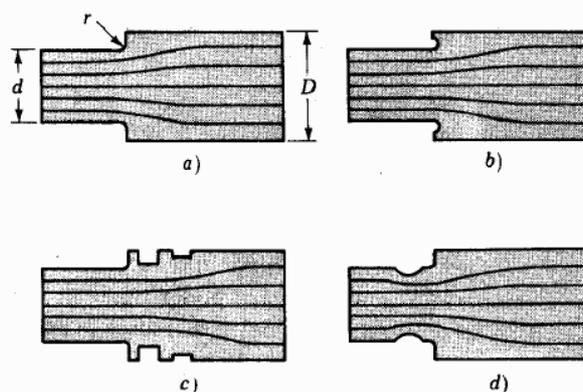


Fig. 2.38



Muchas de las discontinuidades que se tienen en la práctica en elementos no pueden evitarse. Sin embargo, para un buen diseño deberemos optar a menudo por longitudes extremas en un esfuerzo por localizar la discontinuidad en una región de bajo esfuerzo nominal.

En el diseño mecánico siempre es buena práctica estudiar todo acentuador de esfuerzo cuando presente, e investigarlo mediante el trazo de las líneas de flujo para observar si se puede o no obtener una mejora en el elemento.

Para el caso de nuestro cigüeñal han de estudiarse y aplicarse estas muescas de manera que la concentración de esfuerzos haya donde la geometría los haga inevitables, sean paliados para evitar el agrietamiento y rotura del mismo.



Fig. 2.39

Para comenzar se debe hacer un estudio obligado de los esfuerzos a los que el propio cigüeñal estará sometido, tanto estática como dinámicamente. La pieza irá asentada al bloque motor por cinco cojinetes, uno en cada una de las secciones cilíndricas del cuerpo del cigüeñal. Esto hace que los efectos de torsión estén muy controlados debido a las pequeñas distancias que hay entre muñequilla (lugar de aplicación de fuerza) y los apoyos. Además el cigüeñal trabaja de manera simétrica, de tal modo que las dos muñequillas centrales giran al compás, y las dos exteriores, al igual.

Aún así, se hace patente que las zonas que estarán sometidas a un mayor esfuerzo serán las de cambio de sección, las zonas donde se unen los contrapesos a las zonas cilíndricas, de contacto con la biela, y centrales. En ellas el flujo de esfuerzos cambia completamente de dirección al no ser continua la dirección de la pieza. Es por esto que han de aplicarse las ranuras para controlar esos flujos de fuerza.

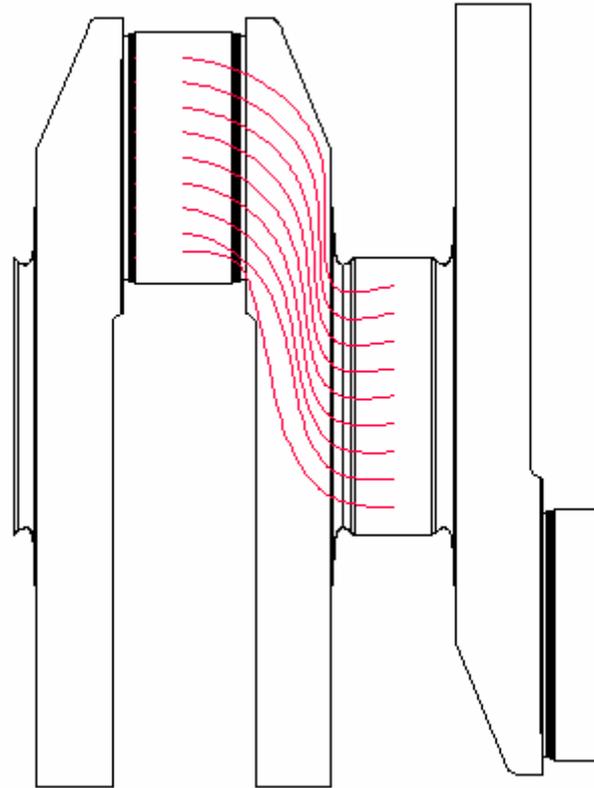


Fig. 2.40

Se ha de comentar que la presencia de las ranuras no responde exclusivamente al hecho de que los flujos de esfuerzo se concentran en las zonas de cambio de sección. También son necesarios para liberar las partículas de suciedad que se generan por el rozamiento del uso de la máquina, tanto por el contacto cojinete-cigüeñal, como por el contacto biela cigüeñal. Por estas ranuras se liberan esas partículas que de no existir, causarían una enorme fricción entre superficies, degradando de una manera mucho más acelerada la calidad superficial de las mismas y provocando por tanto, de manera prematura, la aparición de ruidos y vibraciones innecesarias.



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 79 / 205

2.4. ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS

De diseño

Hoja: 1	Revi. Nº	Fecha	Por

PRODUCTO: Cigüeñal fundición PROCESO: RESPONSABLE: Patricio Mercader Siles

ESPECIFICACIÓN: OPERACIÓN: FECHA:

FECHA DE EDICIÓN: ACTUAR SOBRE NPR > QUE: 100 REVISADO:

Nombre producto /pieza/ operación 1	Operación o función 2	Modo de fallo 3	Efectos de fallo 4	S	G	Causas del fallo	O	Controles actuales 9	D	NPR	Acción correctora 12	Responsables 13	Acciones implantadas 14	Valoración			NPR 18	
				5	6		8		10					11	S 15	O 16		D 17
Cigüeñal	Transmitir potencia generada en cilindros. Transformar movimiento rotativo en lineal.	No cumple las exigencias mecánicas el material	Deformación y rotura de la pieza	9		Selección inadecuada del material	1	Ensayos mecánicos de resistencia, tracción, alargamiento	1	9								
				8		Temperatura de revenido incorrecta.	2	Visual del operario.	4	64								
				8		Tiempo de revenido incorrecto.	2	Visual del operario.	4	64								
			7		Aparición de grietas superficiales	7	Tensiones superficiales por mecanizado agresivo.	7	Control visual.	4	196	Variación del proceso de producción.	Ingeniería	Sustituir el proceso de forja por uno de colada menos agresivo con la estructura molecular	7	2	4	56
			6		Excesivo desgaste del cigüeñal	6	Tamaño de grano excesivo	6	Estudio de microscopia	5	180	Disminución de la velocidad de enfriamiento	Ingeniería	Disminución de la velocidad de enfriamiento.	6	1	5	30
			4		Dificultades en el proceso de mecanizado del cigüeñal	4	Maquinabilidad inadecuada por la estructura molecular del material	5	Mecanizado de modelos previos al producto definitivo	9	180	Selección previa del material contemplando otras posibilidades distintas al acero.	Ingeniería	Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de trabajo y de maquinabilidad de las fundiciones nodulares (Pág. 31)	4	1	9	36
		Lubricación incorrecta	5		Temperatura elevada del motor	5	Fricción elevada	5	Medida de potencia generada y potencia transmitida	5	125	Variación de la composición del material inicial o selección de otro.	Ingeniería	Estudio y posterior sugerencia del uso de la fundición nodular por su característica autolubrificante debido a la presencia de grafito en su matriz.	5	2	5	50
			3		Obstrucción del conducto de lubricación		Diámetro insuficiente de los conductos de lubricación.	7	Ninguno	4	84							
						Contaminación del aceite por partículas	8	Ninguno	4	128	Estanqueidad del volumen de aceite	Ingeniería	Mayor apriete entre carter y bloque motor, así como el empleo de una junta más aislante.	4	3	4	48	



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 80 / 205

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS

De diseño

Hoja: 2	Revi. N°	Fecha	Por

PRODUCTO: Cigüeñal fundición **PROCESO:** **RESPONSABLE:** Patricio Mercader Siles

ESPECIFICACIÓN: **OPERACIÓN:** **FECHA:**

FECHA DE EDICIÓN: **ACTUAR SOBRE NPR > QUE: 100** **REVISADO:**

Nombre producto /pieza/ operación 1	Operación o función 2	Modo de fallo 3	Efectos de fallo 4	S	G	Causas del fallo O	Controles actuales D	NPR	Acción correctora 12	Responsables 13	Acciones implantadas 14	Valoración			NPR 18				
				5	6							8	9	10		11	S 15	O 16	D 17
Cigüeñal	Transmitir potencia generada en cilindros.	Oxidación del eje	Ruidos, vibraciones, pérdida de potencia y bloqueo del cigüeñal.	5		Material con insuficiente resistencia a la oxidación	4		Estudio de los cigüeñales de prueba tras un número de horas determinado de funcionamiento.	5	120	Estudio y variación de la composición química y estructural del material.	Ingeniería	Inclusión de manganeso, cromo y cobre en la matriz (Pág. 50)	5	1	5	25	
				5		Presencia de elementos contaminantes en la matriz del material	8		Muestreo	3	120	Instalar sistema de evacuación de gases más eficiente	Ingeniería	Inclusión de un sistema de inyección de colada en el molde por vacío (Pág. 65).	5	2	3	30	
				5		Picaduras en la superficie del cigüeñal	4		Muestreo	5	100	Nivel de aceite constante en motor	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo del cigüeñal con un cambio de aceite automático tras un número de kilómetros recorridos con él.	5	2	3	30	
				5		Tratamiento térmico inadecuado	2		Muestreo	1	10								
		Transformar movimiento rotativo en lineal.	Fisuras en la superficie del cigüeñal	Figurado de la superficie del cigüeñal	7		Concentración de esfuerzos en los cambios de sección	5		Visual	8	280	Simulación por ordenador y corrección de geometría	Ingeniería	Simulado de concentración de esfuerzos mediante software e inclusión de hendiduras en aquellas zonas críticas con el fin de disipar dicha concentración (Pág. 76).	7	2	3	42
			Porosidad del material	Deformación de la pieza y resistencia mecánica reducida.	6		Solubilidad elevada de los gases por temperatura de colada excesiva	7		Ninguno	3	126	Variación del sistema de colada	Ingeniería	Inyección de la colada en un molde al vacío libre de gases (Pag. 66).	6	2	3	36
	6				Velocidad de colada excesiva, lo que facilita el atrapamiento de gases.	4		Ninguno	3	72									
	6				Microrrechupado por contracción del material	2		Muestreo	3	36									
		Pieza incompleta	Pieza incompleta	10		Llenado incompleto del molde por falta de fluidez.	2		Visual	1	20								
		Equilibrado inadecuado	Aumento de los esfuerzos a fatiga	3		Defecto de dimensionado del molde	3		Muestreo	5	45								



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 81 / 205

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS

De diseño

Hoja: 3	Revi. N°	Fecha	Por

PRODUCTO: Cigüeñal fundición **PROCESO:** **RESPONSABLE:** Patricio Mercader Siles

ESPECIFICACIÓN: **OPERACIÓN:** **FECHA:**

FECHA DE EDICIÓN: **ACTUAR SOBRE NPR > QUE: 100** **REVISADO:**

Nombre producto /pieza/ operación 1	Operación o función 2	Modo de fallo 3	Efectos de fallo 4	S	G	Causas del fallo	O	Controles actuales 9	D	NPR 11	Acción correctora 12	Responsables 13	Acciones implantadas 14	Valoración			NPR 18
				5	6		8		10					15	16	17	
Cigüeñal	Transmitir potencia generada en cilindros. Transformar movimiento rotativo en lineal.	Desgaste del cigüeñal	Holguras, ruidos y vibraciones	4		Reacción química entre cigüeñal y aceite lubricante	1	Ninguno	7	28							
				4		Dureza superficial inapropiada	3	Ensayo mecánicos en muestreo	2	24							
		Vibraciones en el cigüeñal por transmisión de vibraciones desde fluidos	Vibraciones	3		Inadecuado equilibrado por geometría de los contrapesos incorrecto	4		3	36							
				10		Presencia de cavidades internas por llenado incompleto del molde	3	Visual	8	240	Diseñar un sistema que mantenga el aporte de material durante la colada	Ingeniería	Inclusión de mazarotas en el diseño del molde para coladas (Pág. 61).	10	1	8	80
		Rotura total de la pieza	Rotura de una parte del elemento.	10		Solidificación no direccional	3	Visual	4	120	Incluir sistema que controle la velocidad de enfriamiento de la colada	Ingeniería	Inclusión de enfriadores y calentadores para controlar el proceso de solidificado (Pág. 61).	10	1	2	20
				9		Dimensionado inapropiado del material	2	Visual	1	18							
		Desgaste excesivo de cojinetes	Vibraciones	3		Inadecuada geometría de los contrapesos, que no distribuyen correctamente las fuerzas.	4		3	36							
		Rayado superficial de la pieza	Presencia de ralladuras en la pieza.	6		Presencia de suciedad proveniente del desprendimiento de partículas del molde.	6	Visual	3	108	Limpieza de dicha superficie	Ingeniería	Aplicar un proceso de desarenado con perdigones metálicos que elimine dicha suciedad de la superficie (Pág. 66).	6	1	3	
Deformaciones	Montado imposible del cigüeñal en el bloque motor	10		Enfriamiento discontinuo en las distintas partes del molde	2	Visual	1	20									



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 82 / 205



III. AMFE DE PROCESO



▪ 3.1 PROCESO DE FABRICACIÓN

▪ 3.1.1 INTRODUCCIÓN

El material empleado generalmente para la construcción de los cigüeñales de automoción ha sido hasta ahora el acero al carbono; en los casos de mayores solicitaciones se emplean aceros especiales al cromo - níquel o al cromo -molibdeno-vanadio tratados térmicamente. Pero en este caso nuestro cigüeñal analizado es de fundición nodular, la cual cuenta con unas características mecánicas semejantes al acero.

Este hecho hace que el proceso de fabricación varíe entre uno y otro, ya no en los parámetros de las operaciones, sino en las mismas operaciones en si. En un principio los cigüeñales de acero se obtenían de un cilindro bruto de acero, el cual iba siendo mecanizado hasta que finalmente se eliminaban todas las partes sobrantes. Los brazos de la manivela, al ser circulares, se aligeraban eliminando las partes laterales, y por esta razón la sección de los brazos de manivela resultaba rectangular. Más adelante los cigüeñales se comenzarían a construir mediante un proceso de forja por sucesivas estampaciones en caliente. Este proceso no es necesario con la fundición nodular, puesto que es mucho más rápido y económico, y ofrece unas propiedades aptas, el método de la colada fundida para un después mecanizado.

Las operaciones de mecanizado consisten en el desbarbado de la pieza, torneado de las muñequillas y posterior rectificado, y arranque de material para el equilibrado estático y dinámico.

En la fabricación en serie, estas operaciones se hacen con máquinas semiautomáticas o automáticas. Para reducir los tiempos de mecanización se tiende a disminuir la cantidad de material que debe arrancarse durante la misma, pero siempre deberá de dejarse un margen para un mecanizado posterior, ya que solo los procesos de mecanizado, y no los de colada, consiguen las tolerancias dimensionales que se exigen para un cigüeñal. Ésta es una de las razones por las que se construyen los cigüeñales con fundición nodular: Los cigüeñales fundidos son más precisos, en bruto, que los forjados, amén de su más fácil mecanizado, lo que reduce considerablemente los costes de las plaquitas respecto a los de corte de acero, así como los tiempos de mecanizado.

Las principales operaciones del proceso de fabricación son: producción de la aleación, vertido de la colada en el molde, desmoldeo de la pieza, tratamiento térmico, cilindrado y torneado, rectificado, control posterior, acabado (rectificado, equilibrado y afinado). Una vez terminada la mecanización, se efectúan los numerosos controles de verificación, como son: control de la alineación de las muñequillas de bancada, control de la posición y alineación de las muñequillas de manivela, control del radio de manivela, de la ovalización y conicidad de las muñequillas, del grado de acabado, de la retención hidráulica, etc.



▪ 3.1.2 DURACIÓN DEL CIGÜEÑAL

El cigüeñal es la pieza del vehículo, entre las que tienen movimiento, que gira a mayor velocidad y pesa más; no obstante, está proyectado para durar, sin ser reparado, tanto como el automóvil. Las técnicas de construcción modernas, los juegos de montaje cuidadosamente controlados y los progresos en el campo de los lubricantes le aseguran un amplio margen de seguridad y una óptima fiabilidad. Sin embargo, no es raro - y esto sucedía con mayor frecuencia en el pasado- que se produzcan averías en el cigüeñal, que deben achacarse casi siempre al conductor. Las más importantes son: la rotura por fatiga del cigüeñal y el rayado de las muñequillas.

La primera es producida por las vibraciones de torsión y por las sollicitaciones anormales causadas por el bajo número de revoluciones, por el golpeteo contra la culata, por el encendido irregular en algún cilindro o, Finalmente, también por el equilibrado incorrecto del cigüeñal. Especialmente, los juegos excesivos en los cojinetes de bancada causan vibraciones de flexión que pueden producir la rotura.

La segunda avería, es decir el rayado de las muñequillas, depende de la lubricación y del filtrado del aceite; esta circunstancia puede producirse por las causas más diversas: por ejemplo, acelerando el motor en frío cuando el aceite no está aún en circulación, tomando las curvas con el nivel de aceite por debajo del mínimo, viajando a plena carga con bajo número de revoluciones, o bien, Finalmente, cuando el lubricante o la instalación de lubricación no funcionan correctamente. En todos estos casos mencionados, la presión del aceite es el valor que más influye para una buena lubricación y, por tanto, es aconsejable emplear un manómetro de aceite para que pueda controlarse constantemente.

En caso de rotura del cigüeñal es necesario cambiarlo junto con los cojinetes de bancada o de biela, y debe realizarse un nuevo equilibrado conjuntamente con el volante. A veces, conviene también efectuar un mandrilado de los apoyos de bancada - es decir, su alineación mediante escariado- con el fin de corregir las eventuales deformaciones.

En el caso de rayado de las muñequillas es necesario minorar las muñequillas del cigüeñal y proceder a su rectificación, volviendo a efectuar el montaje después con los cojinetes reducidos. La minoración es la disminución del diámetro de las muñequillas de bancada y de la biela para eliminar la parte dañada. Generalmente es posible efectuar una o dos disminuciones según la profundidad de la cementación. El valor de cada rectificación es, en general, de 0,2 mm, y el constructor lo indica en los manuales de reparación



▪ 3.1.3 PLANIFICACIÓN DE PROCESOS

▪ 3.1.3.1 INTRODUCCIÓN

Los cambios tecnológicos se suceden cada vez más rápidamente y las empresas deben competir dentro de un mercado global ofreciendo productos constantemente renovados, un aumento en la variedad (complejidades, materiales, tamaños, formas) y con exigencias de calidad cada vez mayores. Para satisfacer las necesidades de este nuevo tipo de mercado, la empresa debe contar con sistemas de producción capaces de dar mayor rapidez de respuesta a las demandas (reducción de los plazos de entrega), con costes competitivos. Esto obliga a la incorporación de una mayor flexibilidad e integración de los medios empleados (máquinas y sistemas de fabricación cada vez más automáticos), y a la utilización de metodologías eficientes, integradas en las diversas etapas de producción: diseño, fabricación, montaje, planificación, verificación, etc. En última instancia, queda claro que no se puede hablar de mejorar el sistema productivo si no se hace de una forma global y afectando a todas las etapas de producción. Es en este contexto de exigencias donde cobra sentido el análisis AMFE. Siendo su objetivo el de analizar tanto el diseño, como la producción de cualquier producto o servicio, su resultado último es la reducción de costes en la empresa.

Para un correcto AMFE, en el cual se han de estudiar todas y cada una de las etapas que forman parte del proceso, es muy útil recurrir a los datos de una planificación de proceso para estudiar cada uno de sus puntos.

La planificación de procesos se puede definir en términos generales como la tarea de preparar las instrucciones necesarias para poder efectuar la fabricación de una pieza determinada a partir de la preforma que es considerada. En particular, cuando se trata de operaciones de mecanizado, mediante la planificación de procesos se seleccionan los procesos de fabricación, máquinas-herramienta, herramientas de corte, parámetros del proceso y sistemas de fijación y amarre que se consideran adecuados, y al mismo tiempo se establece toda la información necesaria para convertir el material en bruto en una pieza completamente acabada.

Entre los objetivos que se pretenden cumplir mediante la planificación de procesos de encuentran los siguientes:

- La calidad deseada en la pieza mecanizada
- El número necesario de piezas
- El plazo de entrega previsto
- El precio más económico posible

El número necesario de piezas es uno de los datos que no son considerados en este trabajo. Lo mismo sucede con el plazo de entrega previsto, que tampoco se tendrá en cuenta como un dato de partida para este trabajo, si bien este parámetro se verá afectado notablemente por las decisiones tomadas durante la planificación de procesos. En efecto, una mala planificación de procesos podría dar como resultado un exceso de fases y subfases que alargarían de forma ineficiente el ciclo de producción.



En general, dentro de la planificación de procesos se puede distinguir entre una serie de etapas tales como las que se ilustran en la figura siguiente. El objetivo final es conseguir la mayor eficacia posible en la cadena de producción, por lo que se trata de optimizar cada una de las etapas que aparecen en esta figura, teniendo en cuenta todas las restricciones que pueden aparecer, ya sean de carácter económico o tecnológico.

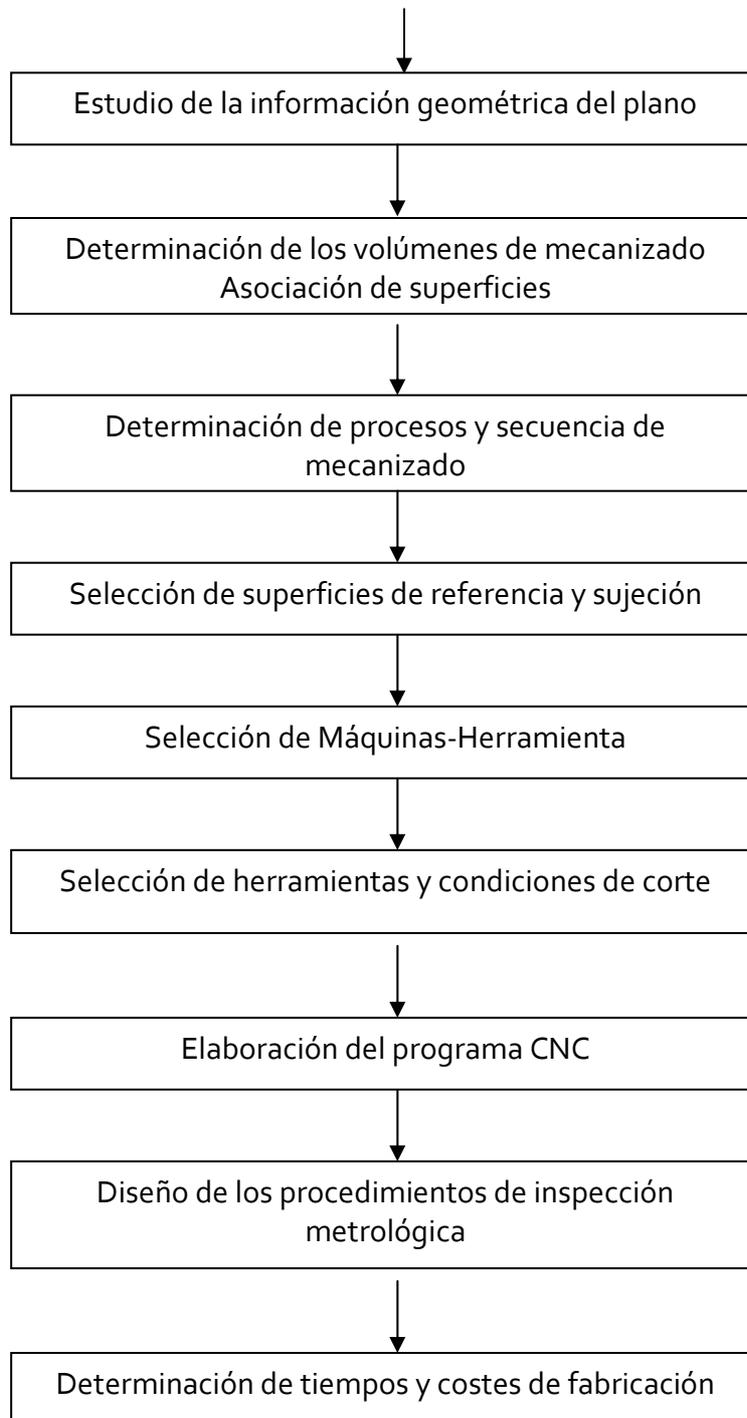


Fig. 3.1 Etapas características de la planificación de procesos



▪ 3.1.3.2 ELABORACIÓN DE LOS PLANOS. ESTUDIO DE LA INFORMACIÓN GEOMÉTRICA.

El estudio del diseño, es sin duda una de las operaciones básicas y más delicadas que el preparador debe de realizar, con el fin de determinar la fabricabilidad y asegurar el cumplimiento de todas las especificaciones.

Se trata de un análisis profundo para poner en evidencia:

- Si hay dimensiones ó vistas que no aparecen en el plano y por lo tanto si algún dato queda indeterminado.
- Determinar si disponemos de procesos que aseguren las tolerancias dimensionales, geométricas y de acabado superficial.
- Si las tolerancias indicadas son posibles y no presentan contradicciones entre ellas.
- Detectar los posibles errores de dimensionado.
- Determinar las cotas críticas.
- Decidir las referencias, superficies y puntos de sujeción y posicionado.
- Analizar si se requieren procesos especiales de mecanizado, tratamientos térmicos intermedios ó cualquier operación auxiliar.
- Prever los instrumentos de verificación y control necesarios.

▪ **Metodología De Análisis**

Para conseguir una correcta elaboración de la Planificación de Procesos, es necesario un riguroso estudio de cada uno de los puntos indicados y por lo tanto el establecimiento de una metodología. La que proponemos es la siguiente:

- Numeración de las superficies a mecanizar.
- Análisis de las especificaciones de superficie:
- Análisis de las especificaciones de acabado superficial.
- Análisis de las tolerancias dimensionales.
- Análisis de las tolerancias geométricas: forma, posición.
- Análisis del material y forma de partida (preforma).
- Análisis del resto de las especificaciones.

▪ **Numerar Las Superficies A Mecanizar**

Se realizara un inventario muy detallado de las diferentes superficies a mecanizar, se las marcará y numerará, comprobando posteriormente que se han tenido en cuenta todas las superficies



▪ **Análisis De Las Especificaciones De Acabado Superficial**

En este análisis se deben estudiar todas las especificaciones que aparezcan en el plano referentes a la rugosidad superficial de cada una de las superficies de la pieza, para determinar para cada una de ellas cual es la rugosidad superficial que debe tener.

Se pondrá mucha atención a las cotas y sus tolerancias ya que afectan al posicionado, tipo de máquina y herramienta

Se pueden distinguir varios tipos de especificaciones dimensionales:

- 1.- Cotas con tolerancia definida: Comprende la cota nominal y la indicación de calidad y posición. Ejemplo 30 H8.
- 2.- Cotas sin tolerancia definida: Se tomaran como tolerancias las indicadas como generales en plano, en caso de no existir se pueden utilizar las de norma JS14.
- 3.- Cotas uní límite: Indican un solo límite, generalmente, sitúan las superficies mecanizadas con respecto al bruto, lo que supone que la superficie mecanizada toma como referencia la superficie en bruto.

Las cotas y tolerancias dimensionales que aparezcan reflejadas en el plano de definición de la pieza las clasificaremos en tres grupos:

- Cotas intrínsecas a las superficies: Son cotas intrínsecas a cada una de las superficies de la pieza y que por tanto dependen exclusivamente de la superficie.
- Cotas de posición relativa entre superficies mecanizadas: Son cotas entre superficies mecanizadas de la pieza y que por tanto establecerán una relación entre dos superficies. Estas relaciones serán siempre recíprocas.
- Cotas de posición relativas entre superficies en bruto y mecanizadas: Son cotas que establecen una relación entre de una superficie mecanizada con respecto a una superficie en bruto de la pieza.

▪ **Análisis De Las Tolerancias Geométricas: Forma Y Posición**

La influencia de las tolerancias geométricas es similar a las tolerancias dimensionales, si bien en general, son más restrictivas e imponen por ello la secuencia y los procedimientos de posicionado y amarre de la pieza.

De igual forma condicionan la asociación de las superficies, ya que las tolerancias geométricas alcanzadas dependen del sistema de posicionado y amarre elegido, así como de la precisión de la máquina.

Son por ello estas tolerancias, una de las restricciones básicas para la selección de la máquina, sistemas de posicionado y amarre, secuencia de operaciones y condiciones corte.

▪ **Tipo Y Forma Del Material En Bruto.**

El tipo de material condiciona la manera de obtener la preforma, la maquinabilidad, la necesidad de tratamiento térmico durante le proceso, los elementos de posicionado y amarre, los esfuerzos de sujeción admisibles etc...



En caso de que existan tratamientos intermedios estos influirán e incluso determinarán la secuencia de fabricación. Por otra parte la forma y dimensiones del material en bruto nos definirán aspectos tales como deformabilidad, puntos frágiles, accesibilidad de útiles y herramientas y dificultades de amarre.

Un aspecto importante es la determinación en su caso de la preforma del material para el mecanizado de la pieza.

Para determinar esta preforma se deben tener en cuenta varios factores o criterios:

- Se elegirá la preforma intentando que las creces de material a eliminar sean las mínimas posibles. Es decir, adoptar preformas lo más parecidas posibles a la forma final de la pieza.
- Se tendrán en cuenta las tolerancias de la pieza y la posibilidad de que éstas tolerancias se puedan obtener directamente en la preforma sin necesidad de mecanizado.
- El tipo del material de la pieza influye en los tipos de conformado posibles para obtener la preforma.
- Las formas o geometrías características que se pueden obtener por otros tipos de conformado, así como los brutos comercialmente disponibles en diversas formas y medidas.
- El tamaño de la serie de piezas a producir. Dependiendo de este tamaño y atendiendo a criterios económicos la preforma y conformados previos pueden ser distintos.
- Las características mecánicas finales de la pieza, pueden determinar un proceso de conformado previo por las características que éste introduce en el material.
- La necesidad de efectuar tratamiento intermedios sobre el material.

▪ **Determinación de los volúmenes de mecanizado. Asociación de superficies.**

Una vez conocida la preforma, se pueden determinar los volúmenes de mecanizado, como diferencia entre la preforma y la forma final de la pieza. Todo el material a eliminar se puede dividir en subvolúmenes, que se corresponden con aquellos susceptibles de ser eliminados con distintas operaciones.

Existen subvolúmenes, que están ligados a una superficie, por cuanto su eliminación genera la propia superficie, mientras que otros no lo están y por tanto se pueden asociar a otros subvolúmenes.

La división en subvolúmenes determina, en algunos casos, el que dos o más superficies se asocien como una sola, pues la eliminación del subvolumen, supone la generación de esas superficies y por tanto su mecanizado es simultáneo.

Conocidos los volúmenes a mecanizar, se pueden determinar los procesos posibles para su eliminación, sin tener en cuenta las especificaciones de tolerancias, acabados superficiales, etc. Con ello se establece para cada uno de los volúmenes de mecanizado, los distintos mecanizados que son capaces de eliminarlos. Las diferentes opciones darán lugar a planes alternativos.



▪ 3.1.3.3 DETERMINACIÓN DE PROCESOS Y SECUENCIA DE MECANIZADO.

▪ **Introducción**

Una vez conocidos los volúmenes de mecanizado y los posibles procesos de desbaste, se deben de determinar todas las operaciones necesarias para la fabricación de la pieza, teniendo en cuenta las restricciones impuestas por las especificaciones a las superficies, tanto de acabado superficial, como de tolerancias geométricas y dimensionales, para lo cual es necesario realizar un análisis en dos etapas. En la primera se determinan todas las operaciones y en la segunda se ordenan para generar un plan de trabajo. Los factores ha considerar son los siguientes:

▪ **Factores Tecnológicos**

De las máquinas

- Tipos de superficies realizables
- Asociación de superficies, considerando el número de herramientas, tipo trayectorias, etc.
- Dispersión de posicionado de los carros.
- Capacidad de la máquina.
- Calidades de superficie: Dimensión, geometría y acabado superficial
- Condiciones de corte alcanzables

De las herramientas

- Tipo de operación: Desbaste, acabado, acabado con esmero, etc..
- Condiciones de corte permitidas.
- Tipos de trayectorias posibles.
- Calidad de superficie: Dimensional, geometría y rugosidad
- Tipo y valor del desgaste
- Materiales a mecanizar

De los utillajes.

- Tipos de amarre de pieza y herramienta.
- Posicionado de la pieza y la herramienta.
- Facilidad y seguridad de empleo.
- Dispersiones de posicionamiento de pieza y herramienta.



Factores Económicos:

- Tasa horaria de la máquina.
- Tamaño del lote.
- Plazo de entrega.
- Frecuencia del lanzamiento.

Factores Físicos:

- Peso de la pieza.
- Características del metal.
- Deformabilidad.
- Aspectos generales de la pieza.

Factores Geométricos:

- Creces de la pieza.
- Exigencias de superficie.
- Precisiones dimensionales.
- Precisiones geométricas.



▪ **Determinación de superficies**

Aquí se muestra las tolerancias y rugosidades que se consiguen con cada uno de los procesos de mecanizado.

FUNCIONES	Superf. bruta al contac		Superfici contacto fijo				Superficie con contacto movi guías, centrado.				Alta precisión estanqueidad movimientos preciso				Desviaciones de forma			
	16-12	11-9	8-7-6	5-4-3-2-1-0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001	0,0005	0,0002	0,0001	0,00005	0,00002	0,00001	0,000005	
Tolerancias IT	16-12		11-9				8-7-6				5-4-3-2-1-0,1							
Rugosidad R	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.02	0						
Moldado en arena	■																	
Moldado en cera	■																	
Moldado en coquilla	■																	
Moldado bajo presión	■																	
Estampado en caliente	■																	
Laminado en caliente	■																	
Estrusión en caliente	■																	
Laminado en frío	■																	
Trefilado en frío	■																	
Serrado	■																	
Osi-corte	■																	
Cepillado	■										0,05 0,1 0,1							
Fresado periférico	■										0,05-0,01 0,03 0,005-0,02 0,01							
Fresado frontal	■										0,02-0,01 0,02 0,01							
Torneado en desbaste	■																	
Torneado acabado	■										0,02-0,01 0,02 0,005-0,01 0,01							
Torneado diamante	■										0,01 0,02 0,01 0,01							
Taladrado broca	■										0,2-0,05 0,1 0,1 0,1							
Mandrinado herrami.	■										0,005 0,01 0,01 0,01							
Escariado	■										0,2-0,05 0,1 0,1 0,1							
Mandrinado diamante	■																	
Brochado	■										0,002 0,002							
Tallado	■																	
Rectificado desbaste	■																	
Rectificado producción	■																	
Rectificado precisión	■										0,001 0,001 0,002 0,002							
Honing	■										0,0005 0,001 0,002 0,002							
Lapping	■																	
Pulido mecánico	■																	
Pulido electrolítico	■																	
Superacabado	■										0,0005 0,001 0,005 0,002							
Mecanizado electrolítico	■																	
Acabado con rodillos	■																	
Acabado en tonel	■																	

ECONÓMICOS

POSIBLES

Tabla 3.1 Calidades posibles de mecanizado



▪ Procedimiento Para Determinar Las Operaciones

Para cualquiera de las distribuciones de volúmenes obtenidas del análisis del punto anterior (Selección de Volúmenes), es necesario considerar todos los procesos de fabricación que posibiliten eliminar esos volúmenes cumpliendo las especificaciones de las superficies (acabados superficiales, tolerancias dimensionales y de forma intrínsecas, tolerancias de posición y dimensionales entre superficies, etc.).

Para ello se deberá contemplar el cuadro resumen generado de la información geométrica del plano, en el que están plasmadas todas estas especificaciones para cada una de las superficies seleccionando en la tabla anterior, entre los procesos de desbaste determinados en el paso anterior, los que cumplen los requisitos de IT, rugosidad superficial y desviaciones de forma. Los valores indicados en la tabla son orientativos por lo que es necesario operar con los realmente obtenibles en las máquinas de que se dispone.

En algunos casos, es posible que sea necesario establecer algunos requisitos que determinadas operaciones requieren de la operación precedente y que al no ser estos una exigencia funcional, sino consecuencia del proceso productivo (por ejemplo un tratamiento térmico intermedio), no aparezcan en el plano y por lo tanto tampoco en el cuadro resumen, siendo necesario añadir nuevas relaciones dimensionales y/o geométricas entre operaciones.

De entre todas las alternativas posibles, habrá que descartar aquellas para las que no existen medios disponibles en el taller (tipo de máquinas, dimensiones de la máquina, etc.).

En segundo lugar se eliminarán todas aquellas posibilidades, que aún siendo factibles, presente dificultades tecnológicas (herramientas especiales, etc.) y supongan un coste elevado. Esta eliminación repercutirá en un menor coste del análisis, al no arrastrar opciones claramente inviables. En este sentido, por ejemplo, si dos superficies asociadas a un volumen se pueden obtener con un mismo proceso de acabado, se podrían eliminar todas las otras alternativas.

Para cada una de las distintas distribuciones de volúmenes se tendrá entonces una serie de posibilidades de procesos para su eliminación tanto de desbaste como de acabado, que se encarguen a su vez de conseguir las especificaciones de las superficies de la pieza.

De todas estas opciones, y para aquellas que se quieran considerar, se efectuará un inventario de todas las operaciones a realizar codificándose para su posterior uso y establecimiento las relaciones entre ellas.

▪ Determinación De La Secuencia De Operaciones.

Se entiende que:

Existen ligaduras de precedencia entre superficies, cuando la realización de una superficie, precisa necesariamente la previa realización de otra.

Fase: es el trabajo realizado en una máquina. Puede contener distintas subfases y operaciones.

Subfase: es el trabajo realizado en una máquina y en una misma sujeción. Puede estar formado por varias operaciones.

Operación: es la parte más elemental en un mecanizado



▪ Selección de máquinas-herramienta

A la hora de realizar la selección de la máquina que debe realizar el trabajo se han de tener en cuenta una serie de condiciones:

- Que la pieza se pueda realizar con dicha máquina, en lo que a tolerancias y acabados superficiales se refiere.
- Que los parámetros de corte que se determinan en el proyecto no superen la capacidad de la máquina.
- Que sea económicamente viable en relación a la importancia de la pieza a realizar.

Por lo tanto, proceso racional de selección de la máquina, requiere del conocimiento de las posibilidades técnicas de los medios de producción disponibles y un análisis minucioso de las restricciones económicas y de gestión de la empresa.

A partir de las hipótesis establecidas, la selección comprende las siguientes etapas:

▪ Análisis de la pieza a fabricar.

Preselección de las máquinas tecnológicamente válidas.

Selección de la máquina óptima de acuerdo al criterio económico elegido (máxima producción, mínimo coste, máximo beneficio, mínimo número de piezas fuera de plazo, etc).

Comprobación de que la máquina seleccionada puede realizar el trabajo teniendo en cuenta su carga.

Para la realización de este proyecto no se realizará un estudio tan profundo para dar con la máquina más idónea, sino que se ha optado por determinar ciertas características que las mismas han de poseer.

▪ Selección de herramientas y condiciones de corte.

En el contenido de este proyecto hay un apartado en el que se habla de las herramientas de corte, en lo que a fabricación, materiales, maquinabilidad, etc, se refiere. A continuación se expondrá la dinámica que se ha seguido en la elección de herramientas y condiciones de corte.

Análogamente al problema que nos planteábamos al elegir la máquina idónea, la selección de la herramienta y sus condiciones de trabajo, nos presenta unas condiciones ó restricciones que tenemos que respetar y que básicamente se podrían agrupar de la forma siguiente:

Especificaciones Impuestas Por El Diseño.

- Dimensión.
- Forma.
- Calidad superficial.
- Precisiones dimensionales y de forma.
- Material a mecanizar.



Limitaciones técnicas impuestas por:

A) Maquina herramienta

- Velocidad y avances disponibles.
- Precisión geométrica de la máquina.
- Rigidez estática y Estabilidad dinámica.

B) Herramienta.

- Geometría.
- Material del filo.
- Duración.
- Factores económicos. Criterios económicos.

En este proyecto en vez de someter la elección de herramientas y condiciones de corte a los criterios de máxima producción y mínimo coste, se ha optado por la consulta de los manuales de fabricantes especializados en el corte de metales, ya que estos exponen las herramientas más adecuadas para cada proceso de mecanizado y los parámetros de corte a seguir para obtener un mecanizado lo más eficiente posible.

▪ **Elaboración de la hoja de instrucción.**

Estas hojas son muy importantes para la correcta realización de la pieza en taller, ya que junto con las hojas de procesos serán las que el operario siga para fabricar la pieza. En esta hoja se incluyen los parámetros de corte usados en cada una de las operaciones y el tiempo gastado en su realización, obteniéndose al final de la misma un tiempo total de mecanizado en el que figura además del tiempo de corte, los tiempos relativos al reglaje de herramientas y verificación de medidas.

Las fórmulas empleadas son:

Cálculo del tiempo promedio de producción (t_{pr}):

$$t_{pr} = t_l + t_m + \frac{t_m}{t} \times t_{ct}$$

donde:

t_l \equiv tiempo improductivo

t_m \equiv tiempo mecanizado

t_c \equiv tiempo corte

t \equiv vida herramienta

t_{ct} \equiv tiempo cambio herramienta



Cálculo del coste de producción (C_{pr}):

$$C_{pr} = M \cdot t_{pr} + \frac{t_c}{t} \times C_t$$

donde:

$M \equiv$ Coste M.H.

$C_t \equiv$ Coste herramientas

Operaciones de torneado:

Cálculo del tiempo en el refrentado:

Tomamos revoluciones por minuto constante:

Para hallar el número de revoluciones por minuto (n) se emplea la conocida fórmula:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot d}$$

Donde:

v = velocidad de corte en mm

d = diámetro máximo de la pieza en milímetros

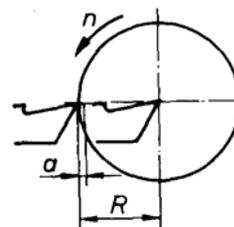
La herramienta ha de recorrer el radio R. Si a es el avance de la herramienta en milímetros por revolución, $A = av \cdot n$: (A: milímetros que avanza en 1 minuto)

av: avance por vuelta

n: número de vueltas por minuto

El tiempo de refrentado será:

$$T_r = \frac{R}{A} = \frac{R}{a \cdot n}$$



▪ 3.2 TORNEADO

El torno es una máquina-herramienta en la cual, la pieza que se ha de mecanizar, tiene un movimiento de rotación alrededor de un eje. Así, en el torno la pieza verifica el movimiento de corte, en tanto que la herramienta, produce el avance y el movimiento de profundidad de pasada.

El torno más corriente es el llamado torno paralelo; los otros se consideran como especiales.

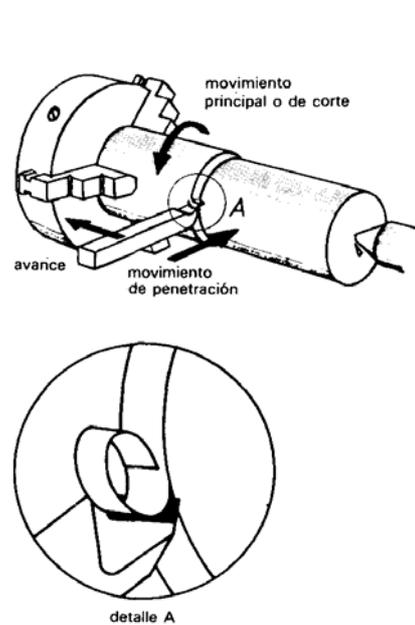


Fig. 3.2 Movimientos principales en el torno

▪ Trabajos característicos en el torno paralelo

Los trabajos característicos que se hacen en el torno paralelo y que servirán como título a otros tantos temas son:

- Cilindrado exterior.
- Refrentado.
- Torneado de conos exteriores.
- Troceado y ranurado.
- Otros trabajos de torneado.
- Roscado en el torno.

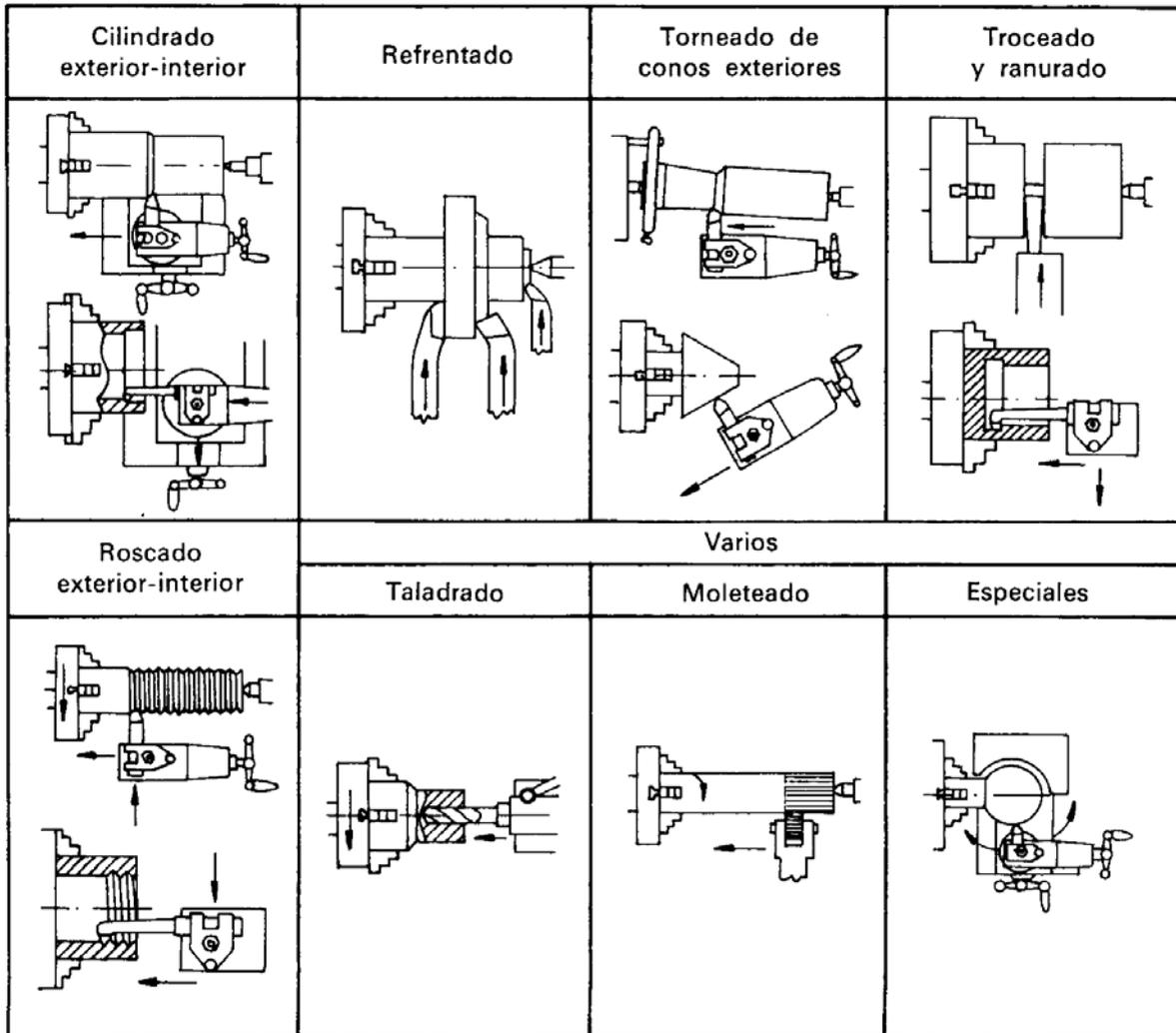


Fig. 3.3 Trabajos característicos del torno paralelo

3.2.1 MONTAJE DE LAS PIEZAS EN EL TORNO

Las piezas que se han de trabajar en el torno pueden sujetarse en el mismo de varios modos:

Entre puntos, al aire, entre plato y contrapunto, entre plato y luneta fija, con luneta móvil y montaje sobre el carro o la bancada.

Montaje entre puntos

Este montaje supone dos operaciones preliminares: el trazado de los puntos y su ejecución.

- Trazado de puntos:

En las piezas redondas puede hacerse de varias maneras:

a. Con gramil. Unas veces se las sostiene sobre calzos; colocando la punta de un gramil aproximadamente a la altura del centro de la pieza, se trazan líneas en ambos extremos de la misma, haciéndola girar a intervalos. Dichas líneas o se cortan en un punto, que será el centro de la pieza, o forman un pequeño círculo cuyo centro será también el centro de la pieza.

b. Con escuadras de centros. Puede usarse más cómodamente una es cuadra de centrar o la campana de centrar.

- Ejecución de puntos:

Trazados los centros, hay que hacerlos. Para ello, se emplea generalmente la máquina de taladrar; pero, puede emplearse también el mismo torno. Hay máquinas especiales para ejecutar los puntos.

Forma normalizada de los puntos

Los puntos de las piezas han de tener una parte cónica (con un cono de la misma conicidad que el cono externo de los puntos del torno, generalmente de 60° para tornos no muy grandes) y otra parte cilíndrica; además, pueden tener una protección con un avellanamiento de mayor conicidad o una caja cilíndrica de mayor diámetro. Las medidas que se deben dar a los puntos, según los diámetros de las piezas, están normalizadas y se pueden ver en la norma DIN 332.

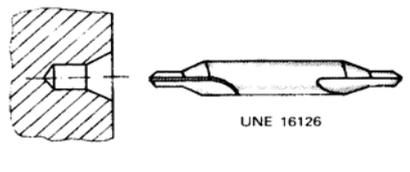


Fig. 3.4 Broca de puntos

▪ Montaje al aire

Se pueden realizar de varias formas; los principales accesorios y mecanismos son:

- Plato universal

Las piezas cilíndricas se trabajan al aire, sujetándolas sencillamente entre las garras de un plato universal, el cual tiene la propiedad de centrarlas automáticamente. La figura de la página siguiente da clara idea de su mecanismo.

- Plato de garras independientes

Las piezas de forma irregular es preferible sujetarlas en platos de garras independientes, pues resulta así mucho más fácil centrarlas.

- Plato plano de agujeros

Cuando por la forma, peso o clase del trabajo que se ha de realizar no es posible sujetar las piezas en los platos universales o de garras independientes, se las coloca en platos planos, a los cuales se fijan mediante bridas y tornillos. En estos platos se fijan, a veces, escuadras para facilitar la colocación de piezas determinadas.

En esta clase de montaje ha de procurarse equilibrar el peso de las piezas mediante contrapesos, de lo contrario el torno trabajaría en malas condiciones.



Plato plano



Plato de garras independientes



Plato universal

Fig. 3.5



▪ **3.2.2 MATERIALES PARA HERRAMIENTAS DE CORTE.**

Los materiales empleados actualmente para la construcción de herramientas pueden agruparse en siete clases:

1. Aceros al carbono.
2. Aceros aleados.
3. Aceros rápidos.
4. Carburos metálicos sinterizados.
5. Diamantes.
6. Materiales cerámicos.

- Acero rápido, de alta velocidad o HSS (High Speed Steel): es una aleación de metales que contiene alrededor de un 20% de partículas duras. Con molibdeno (Mo) y tungsteno (W) (también puede tener vanadio (Va) y cromo (Cr)), tienen buena resistencia a la temperatura y al desgaste. Generalmente es usado en mechas y fresas, para realizar procesos de mecanizado con máquinas herramientas.

Los aceros al carbono y la mayoría de los aceros aleados para herramientas tienen el gran inconveniente de que se ablandan y desafilan a temperaturas superiores a 250°, lo que limita la velocidad de corte de las herramientas que se fabrican con ellos.

En cambio los aceros denominados rápidos (Tabla 8.2.1), realizados por Taylor y White en 1898, trabajan a temperaturas hasta de 600°C, conservando su dureza y filo inicial. Esto permite una velocidad de trabajo mucho mayor que la de los demás aceros, y de ahí su nombre de «aceros rápidos».

Para tener idea de la velocidad de corte a que se pueden utilizar los aceros rápidos y extrarrápidos, damos en la tabla una relación entre las velocidades límites de trabajo de las herramientas fabricadas con diversos tipos de acero al carbono, aleados, rápidos y extrarrápidos, para un afilado cada sesenta minutos.

Hay dos clases principales de aceros rápidos: los aceros rápidos al wolframio y los aceros rápidos al cobalto.

Los aceros rápidos al wolframio contienen del 13 al 19 % de W, 3,75 % a 4,5 % de Cr, 1 a 1,25 % de V y 0,65 a 0,8 % de C.

Los aceros rápidos al cobalto, también denominados extrarrápidos, con tienen del 4 al 12 % de Co, 17 a 19 % de W. 0,8 a 1 % de Mo y 0,75 a 0,85% de C.

Grupo F-550 ACEROS RAPIDOS PARA HERRAMIENTAS

I.H.A.	Designación común	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cr	% W	% V	% Mo	% Co
F-551	Aceros rápidos 14% W.	0'65 / 0'75	0'20 / 0'40	0'20 / 0'40	<0'03	<0'03	3'75 / 4'25	13'00 / 15'00	1'00 / 1'25	-	-
F-552	Aceros rápidos 18% W.	0'70 / 0'80	0'20 / 0'40	0'20 / 0'40	<0'03	<0'03	4'00 / 4'50	17'00 / 19'00	1'00 / 1'25	Opcional	-
F-553	Aceros extrarrápidos 5 % Co.	0'75 / 0'80	0'20 / 0'40	0'20 / 0'40	<0'03	<0'03	4'00 / 4'50	17'00 / 19'00	1'00 / 1'25	0'80 / 1'00	4'0 / 6'0
F-554	Aceros extrarrápidos 10 % Co.	0'80 / 0'85	0'20 / 0'40	0'20 / 0'40	<0'03	<0'03	4'00 / 4'50	17'00 / 19'00	1'00 / 1'25	0'80 / 1'00	9 / 11'0

Tabla 3.2 Aceros rápidos para herramientas

Clase de aceros de la herramienta	V.60 (m/minuto)
Aceros al carbono	1
Aceros al 4% de wolframio. o'5 % de Cr. (F-531)	5'60
Aceros al 10 % de wolframio (F-534)	8'20
Herramientas de aceros rápidos	14
Herramientas de aceros extrarrápidos	17 a 19

Tabla 3.3 Relación entre las velocidades de corte de cuchillas de diferentes aceros para un afilado cada 60 minutos (V60).

- Carburo cementado o metal duro: hecho con partículas de carburo unidas por un aglomerante a través de un proceso de sinterizado. Los carburos son muy duros y representan de 60% a 95% del volumen total. Los más comunes son: Carburo de tungsteno (WC), carburo de titanio (TiC), carburo de tantalio (TaC), carburo de niobio (NbC)

Los carburos metálicos sinterizados fueron descubiertos por el Dr. Fry de la fábrica Krupp (Alemania), en 1927, y patentados con la denominación de Widia. Del alemán wi (como) y diamant (diamante), pues el Dr. Fry consideró que eran tan duros como el diamante, y representan un gran avance sobre los demás materiales empleados hasta esa fecha para la construcción de herramientas de corte.



Fig. 3.6 Vista al microscopio de un conglomerado metálico

Estos materiales están compuestos por carburo de wolframio y un metal auxiliar que sirve de liante, generalmente el cobalto.

Tienen una dureza de 9.7 en la escala de Mhos (el diamante tiene 10), equivalente a 90 HRC. Y su peso específico es de 14 Kg/dm³.

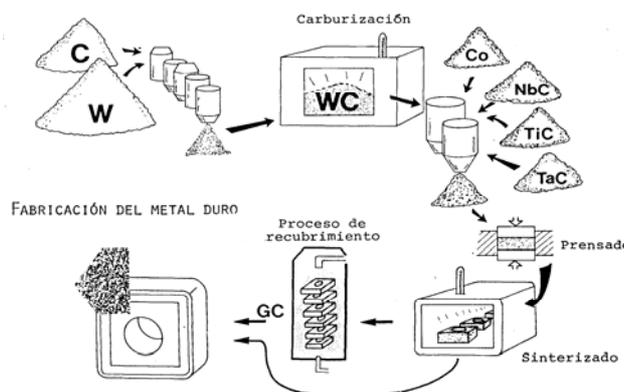


Fig. 3.7 Proceso de elaboración del metal duro



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 103 / 205

Como producto pulvimetalurgico el metal duro es bastante diferente de una aleación metálica como el acero. Al comienzo del proceso de fabricación los componentes se encuentran en forma de polvo. Mediante el proceso se produce un material formado por partículas duras incrustadas en el metal aglutinante. El producto final es duro, térmicamente estable, relativamente tenaz y lo suficientemente resistente al desgaste para que sea un material de corte muy apropiado.

El proceso parte del polvo de tungsteno (W) y de carbono (C). Se mezclan perfectamente y se calientan a una temperatura de unos 1800°C . Este es el proceso de carburación que produce el carburo de tungsteno. Estas son las partículas duras básicas del metal duro. Utilizando distintos tipos de polvo de tungsteno y otros aditivos se pueden producir combinaciones con características diferentes.

El siguiente aditivo básico es el metal aglutinante, normalmente el cobalto (Co), en forma de polvo. Otras partículas duras utilizadas como aditivos son los carburos de niobio (NbC), titanio (TiC) y tántalo (TaC). Estas materias primas se mezclan de acuerdo con el tipo de metal duro requerido. Todos ellos deben pasar por un cierto número de subprocesos para formar una mezcla con posibilidades de ser prensada.

Para compactar la mezcla en polvo por medio del prensado se deben preparar moldes con la forma del producto final, pero no con las mismas dimensiones. El compacto prensado tiene alrededor de un 50% de porosidad. Esta porosidad desaparece durante la fase siguiente, el sinterizado. Este es un proceso de calentamiento en el que se funde parte de la mezcla en polvo. Los carburos no fundidos reaccionan entre sí cambiando su estructura. La temperatura es de unos 1600°C y el volumen del compacto se reduce alrededor de un 20%.

El producto que resulta del sinterizado es la plaquita o el filo de metal duro. Algunas de las plaquitas quedan terminadas en esta fase, otras requieren aún un afilado y las hay que todavía pasarán por el proceso de recubrimiento para llegar a ser plaquitas del tipo GC (revestimiento gamma: Gamma Coating).

El recubrimiento GC es un proceso complicado en el que las plaquitas son tratadas con un producto químico vaporoso en atmósfera de vacío a gran temperatura. Las capas del revestimiento son de solo unos 0.01 mm. de espesor, que obtienen un tremendo efecto sobre la duración del filo de corte. Así el GC 15 es una calidad de metal duro con doble recubrimiento, por medio del cual se ha demostrado obtener más del doble de rendimiento de arranque de viruta por filo comparado con las calidades de metal duro de la primera generación.

El metal duro es el principal material de corte que existe hoy en día y lo seguirá siendo por algún tiempo. Las razones son, desde luego, las propiedades que ofrece, que hacen de él un material excepcional para el filo de corte.

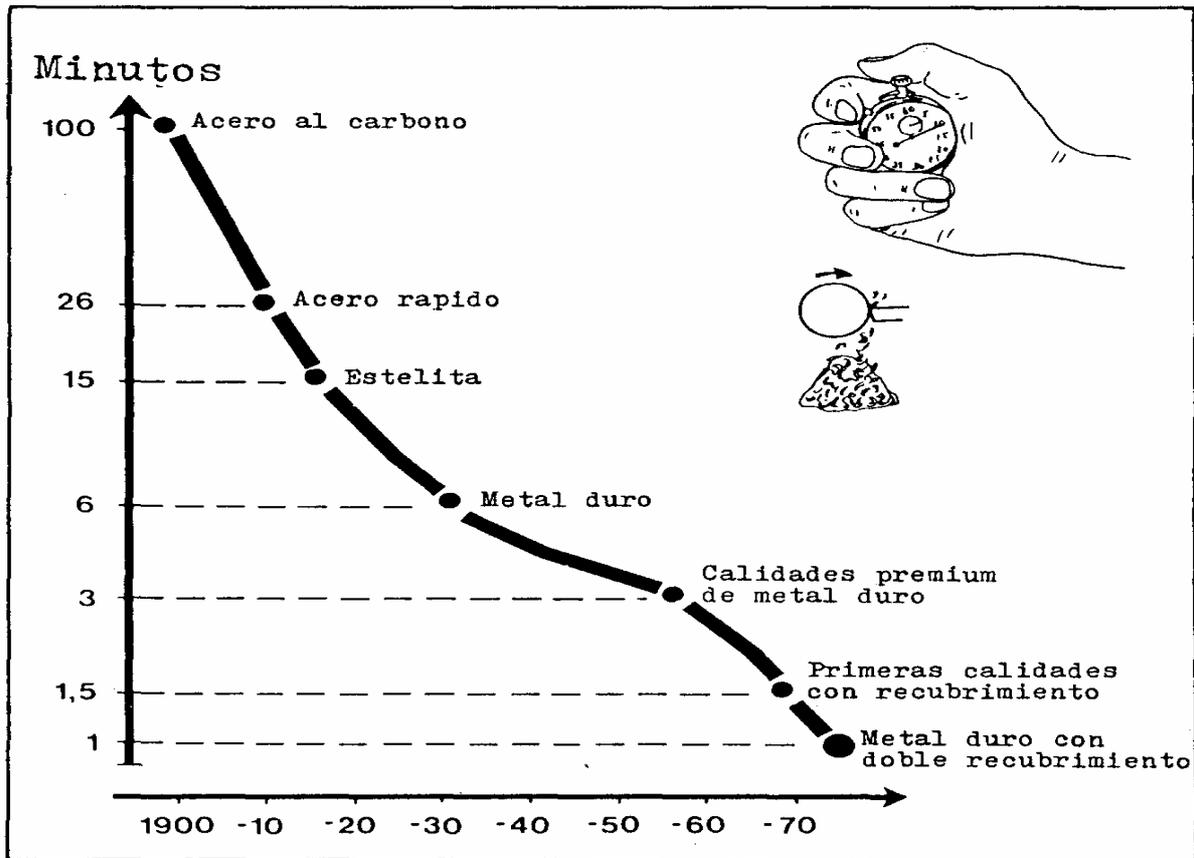


Fig 3.8 Evolución de los tiempos de mecanizado desde 1900.

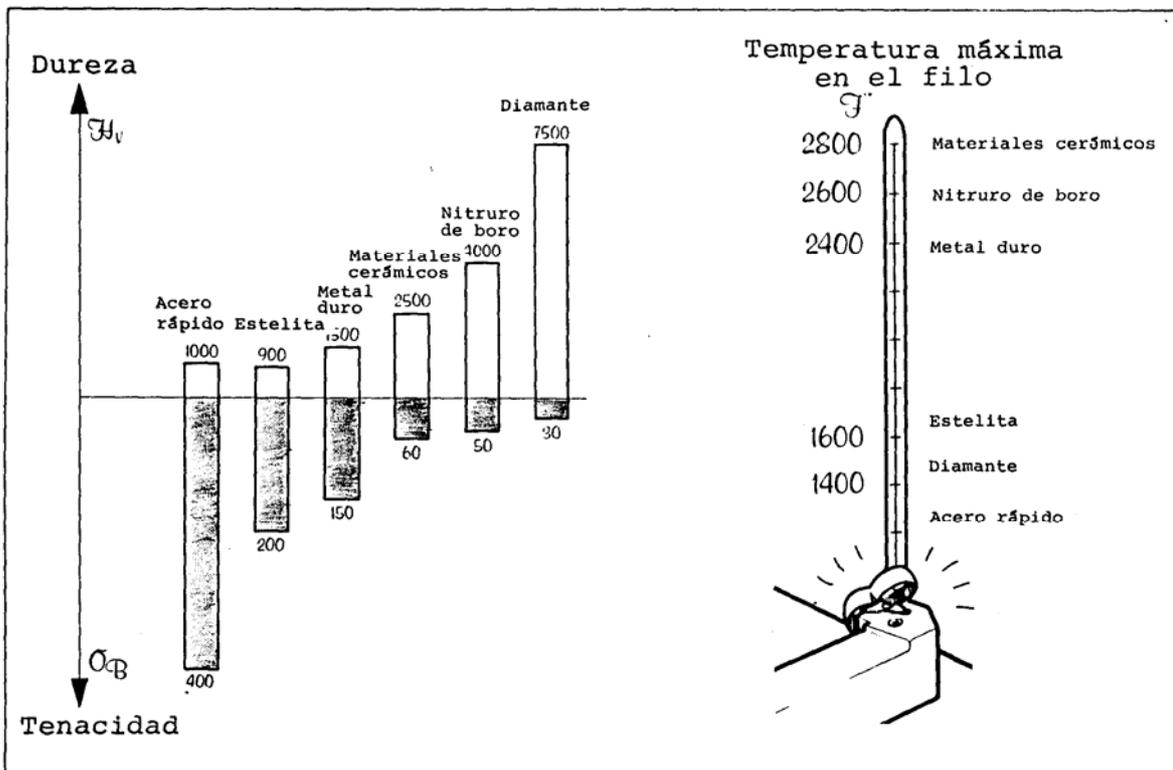


Fig. 3.9 Dureza y temperaturas de trabajo de algunos materiales de corte.



- Cermet (CERamic / METal): Aunque el nombre es aplicable incluso a las herramientas de carburo cementado, en este caso concreto las partículas base son de TiC, TiCN, TiN exclusivamente, en lugar de carburo de tungsteno. El aglomerante es níquel-cobalto. Buena resistencia al desgaste y formación de cráteres, alta estabilidad química y dureza en caliente. Baja tendencia a la oxidación y a la deformación del filo recocido. Son de gran dureza y resistencia a la abrasión en detrimento de su tenacidad.

Los cermets se aplican mejor a aquellos materiales que producen una viruta dúctil, aceros y las fundiciones dúctiles. Los modernos aleados carburos de tantalio y niobio (TaNbC) y carburo de molibdeno (MoC) añadidos incrementan la resistencia de los cermets ante el choque cíclico propio de la operación de fresado.

- Cerámicos: Existen dos tipos básicos de cerámica: La basada en óxido de aluminio (Al_2O_3) y las de nitruro de silicio (Si_3N_4). Esta es una sustancia muy dura que ha sido empleada desde hace muchos años en ruedas de rectificado. Básicamente, un inserto cerámico es una rueda de rectificar de óxido de aluminio de grano muy fino. Son duras, con alta dureza en caliente, y no reaccionan químicamente con los materiales de la pieza. Sin embargo son muy frágiles. Ideales para el mecanizado de piezas en duro y como reemplazo de las operaciones de rectificado.

Estas herramientas constituyen la más moderna contribución al progreso de los materiales para herramientas de corte pues prácticamente no se han empezado a generalizar hasta el año 1960.

Se trata de materiales porosos de 3,5 a 4,5 gr. de peso por cm. de dureza superior a los carburos metálicos y, naturalmente, a los aceros rápidos. Poseen un coeficiente de dilatación lineal muy parecido al del acero. Tienen el inconveniente de que son muy frágiles.

Se presentan en forma de plaquitas que se emplean soldadas a sus mangos con resinas epoxi, o bien sujetas por medios mecánicos.

Con estas herramientas se puede trabajar a velocidades superiores a las empleadas con las de carburos metálicos, pues resisten temperaturas de 1.200° sin desafilarse.

Las herramientas de cerámica aplicadas al lomeado de la fundición de 220 Brinell permiten velocidades hasta de 400 m. por minuto, con profundidades de pasada hasta de 5 mm., y avances hasta de 8 mm. por vuelta. En trabajo de acabado de esta misma fundición se ha llegado a trabajar a velocidades hasta de 2.000 m. por minuto, con profundidades de pasada de 1 mm. y avances de 0,2 mm.

También en el torneado de los aceros se ha llegado a emplear velocidades de corte de 200 m. por minuto, con resultados satisfactorios.

Como resumen, puede admitirse que las velocidades de corte de las cuchillas de cerámica pueden ser de 1,5 a 4 veces superiores a las correspondientes a las cuchillas de carburo.

- Nitruro de Boro Cúbico (CBN): Es uno de los materiales más duros. Ocupa el segundo lugar después del diamante. Dureza extrema en caliente, excelente resistencia al desgaste y en general buena estabilidad química durante el mecanizado. Es frágil, pero más tenaz que las cerámicas.



• **Diamante policristalino (PCD):** Es casi tan duro como el diamante natural. Este diamante sintético tiene una increíble resistencia al desgaste y una baja conductividad térmica. Sin embargo, son muy frágiles. La vida de la herramienta es hasta cien veces mayor que la del carburo cementado. Como principal desventaja es su limitación en cuanto a la temperatura de corte, que no ha de superar los 600 °C; y además, no puede ser usado para cortar materiales ferrosos porque existe afinidad, y tampoco sirve para cortar materiales tenaces. Es por tanto un material que no podremos utilizar en nuestro proceso de mecanizado de un cigüeñal.

▪ Recubrimientos

Hay dos factores que deben ser considerados en la evaluación de recubrimientos de insertos: los materiales usados y el proceso mediante el cual son aplicados. Ambos influyen en el rendimiento del sistema del inserto. El mismo recubrimiento actúa como interfaz entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte. Según la aplicación, los recubrimientos pueden proporcionar resistencia al desgaste, a la abrasión, a la formación de cráteres, a la acumulación de adherencias en el filo, a la resistencia química, o a una simple reducción de la fricción que disminuye las temperaturas de corte.

Las características principales de los recubrimientos se resumen en los siguientes puntos:

- Aumenta la dureza en los filos de corte de la herramienta.
- Facilitan la disipación del calor acumulando en el filo de corte.
- Baja conductividad térmica que favorece la eliminación del calor a través de la viruta.
- Aumentan la resistencia a la abrasión, disminuyen la afinidad herramienta-pieza.
- El grosor del recubrimiento varía entre 0,002 mm y 0,01 mm.
- Los recubrimientos se aplican mediante deposición química de vapor o deposición física de vapor.

Recubrimiento	TiN	TiCN	WC/C	TiAlN (monocapa) + WC/C	TiAlN (multicapa)	TiAlN (monocapa)
Microdureza	2300	3000	1000	2600-1000	3000	3500
Coefficiente de rozamiento contra el acero	0,4	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4
Temperatura máxima de trabajo	600	400	300	1000	800	800
Color	Oro-amarillo	Azul-gris	Gris-claro	Gris oscuro	Violeta-gris	Púrpura-gris
Espesor del recubrimiento	1-4 μm	1-4 μm	1-4 μm	2-6 μm (1/3 WC/C, 2/3 TiAlN)	1-5 μm	1-3 μm

Tabla 3.4 Propiedades de los recubrimientos más importantes

3.2.3 FACTORES DE CORTE

Estos datos de corte corresponden a la relación material de la pieza – material de la herramienta.

Velocidad de corte, m/min.

$$v_c = \frac{\pi \times D_c \times n}{1000}$$

v_c = velocidad de corte: m/min
 n = revoluciones / min.
 D_c = Diámetro mm

Velocidad del husillo, rpm

$$n = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D_c}$$

n = velocidad del husillo, revoluciones/min.
 v_c = velocidad de corte m/min
 D_c = diámetro mm

Avance de la mesa, mm/min.

$$v_f = n \times z \times f_z$$

v_f = avance de la mesa mm/min.
 n = revoluciones/min.
 z = número de dientes
 f_z = avance mm/diente

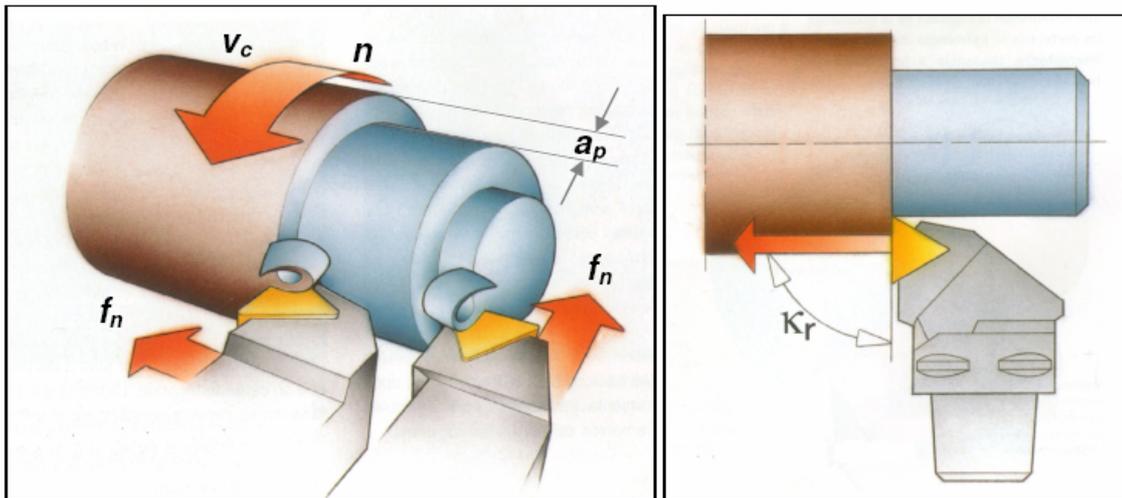


Fig. 3.10

La Velocidad de Corte (v_c), o velocidad tangencial, es la velocidad que el material (viruta) tiene sobre la superficie de la herramienta (plaquita).

En los modernos tornos con CNC, este valor es constante, lo que implica que la velocidad de rotación del husillo se incrementa a medida que la herramienta se acerca al centro de la pieza.

El Avance (f_n), es la velocidad de la herramienta en relación a la pieza que está girando, Podríamos decir que es la velocidad de avance del carro, en el caso de los tornos, o de las mesas, en el caso de las fresas.

La Profundidad de Pasada (a_p) (mm), es la semi-diferencia entre el diámetro sin cortar y el cortado.

$$a_p = \frac{\text{diámetro no mecanizado} - \text{diámetro mecanizado}}{2}$$

Estos datos podemos encontrarlos en la caja en la cual vienen las plaquitas, o en manuales referidos al tema.



En los torneados también se debe tener en cuenta el ángulo de posición del filo de corte (Kr) con respecto a la superficie de la pieza.

Incide directamente en la formación y dirección de la viruta. Sus valores de corte varían desde 45° hasta 95° según el tipo de operación.

▪ Geometría de corte.

Cuando hablamos de geometría de corte, nos referimos específicamente al perfil que la plaquita tiene si la observamos en un corte transversal.

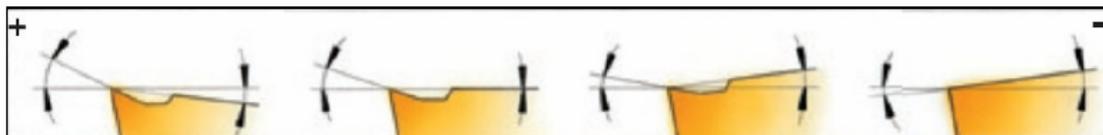


Fig. 3.11

Este labrado que encontramos en la parte superior, es quien provocará el correcto desprendimiento y rotura de la viruta, dependiendo sus formas del tipo de mecanizado al que está destinado el inserto.

- Plaquetas negativas.

Estas han sido desarrolladas para lograr un torneado de alto rendimiento en los entornos de producción modernos. Las plaquetas están optimizadas exclusivamente para alcanzar los requisitos específicos en las aplicaciones de torneado con unas calidades con las que se logran una acción de corte y rotura de las virutas adecuadas.

Se utilizan principalmente para operaciones de torneado exterior, desde desbaste hasta acabado. También pueden usarse con grandes ventajas para el mecanizado interior de agujeros grandes. Las plaquetas tienen una forma básica negativa que las dota de unas aristas de corte muy robustas.

- Plaquetas positivas.

El sistema, con un ángulo de incidencia de 7° en la arista de corte, se utiliza principalmente para desbaste ligero a acabado exterior de componentes pequeños, esbeltos y largos. El sistema de sujeción por tornillo ofrece importantes ventajas, como por ejemplo: sujeción segura de la plaqueta, excelente repetibilidad y flujo de virutas sin problemas.

Son muy aconsejables para el mecanizado en copia gracias a que la plaqueta positiva va montada de forma neutra en el portaplaquetas que le permite avanzar en distintas direcciones, ofreciendo una holgura constante alrededor de la periferia de la plaqueta y garantiza un corte limpio y con un buen acabado superficial y una gran duración de la herramienta.

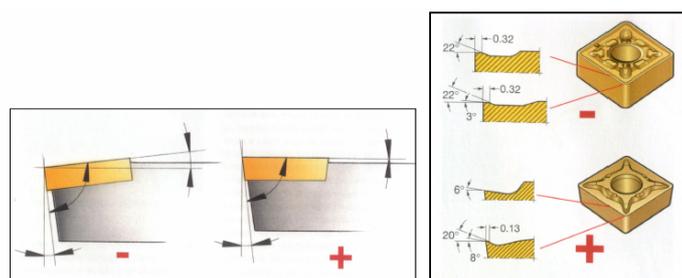


Fig. 3.12

A la hora de optar por alguna de estas herramientas, es importante considerar cuidadosamente si es conveniente usar una plaquita negativa, con dos caras de corte, lo cual económicamente es más ventajoso que una monocara, pero con el inconveniente de un apoyo incompleto, con menos avance y menos profundidad de pasada; o privilegiar el apoyo completo de una plaquita positiva (una sola cara de corte).

- **Rompe virutas o formas geométricas superiores.**

Una de las principales, funciones de los rompe virutas, es la de permitir el libre deslizamiento del material de pieza extraído, disminuyendo al máximo la energía perdida por rozamiento, además de evitar que la viruta entorpezca la operación de corte.

Con las sofisticadas formas geométricas de hoy, el término rompe virutas ya no describe la contribución de este elemento a los sistemas de insertos. "Geometría superior" es un término más preciso para las muy complejas formas que se ven en la superficie de corte de inserto moderno.

Aunque el control de virutas aún es una de sus principales funciones, la geometría superior también sirve para reducir las fuerzas de corte. Menores fuerzas, representan menos calor, deformación y fricción, incrementando la vida de la herramienta y, menudo, se mejora el control del tamaño y el terminado de la pieza de trabajo. Quizás el mejor ejemplo de esto el uso de rompe virutas en insertos de fresado.

La selección adecuada del rompe virutas para una aplicación específica es muy importante. Su variedad es enorme, y tomando como ejemplo la compañía Valenite, encontramos que tiene veintiocho virutas para torneado, desbaste, mecanizado general y acabados.

Existen geometrías especiales para algunos metales, como las aleaciones para altas temperaturas y los aceros inoxidable. El rompe virutas Valente SR es un ejemplo de este tipo de geometría. Tiene una geometría positiva-negativa con un pequeño radio de nariz, quizás de solamente 0,1 mm. En este tipo de materiales se necesita una geometría muy fina para realizar cortes suaves y un control de virutas.

En muchos casos, se piensa que no se necesitan rompe virutas para ciertos materiales, como el hierro gris y la fundición nodular, porque las virutas se rompen solas. Se utilizan geometrías superiores planas para estos materiales por tener gran resistencia de borde. Sin embargo, a menudo se recomienda el uso de una geometría superior para el hierro fundido y el nodular, con el fin de reducir la fuerza de corte y minimizar la reconstrucción de los filos.

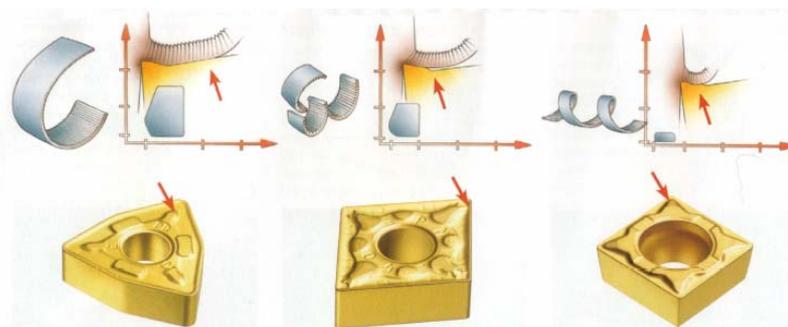


Fig. 3.13

▪ FORMA DE LA PLAQUITA Y RADIO DE LA PUNTA

Se refiere a la forma de la cara superior de la plaquita.

Las hay de forma cuadrada, triangular, rómbica, las llamadas trigonaes, de ranurar, de roscar, e inclusive redondas.

Se buscan formas robustas si el mecanizado es pesado, de profundidades de corte importantes, o más agudas si es torneado en copiado, o zonas de difícil acceso.

En el siguiente dibujo, veremos en la línea 1 mayor versatilidad a la derecha y mayor tenacidad hacia la izquierda.

En la línea 2 obtenemos menor vibración en el mecanizado a la derecha y mayor requerimiento de potencia hacia la izquierda.

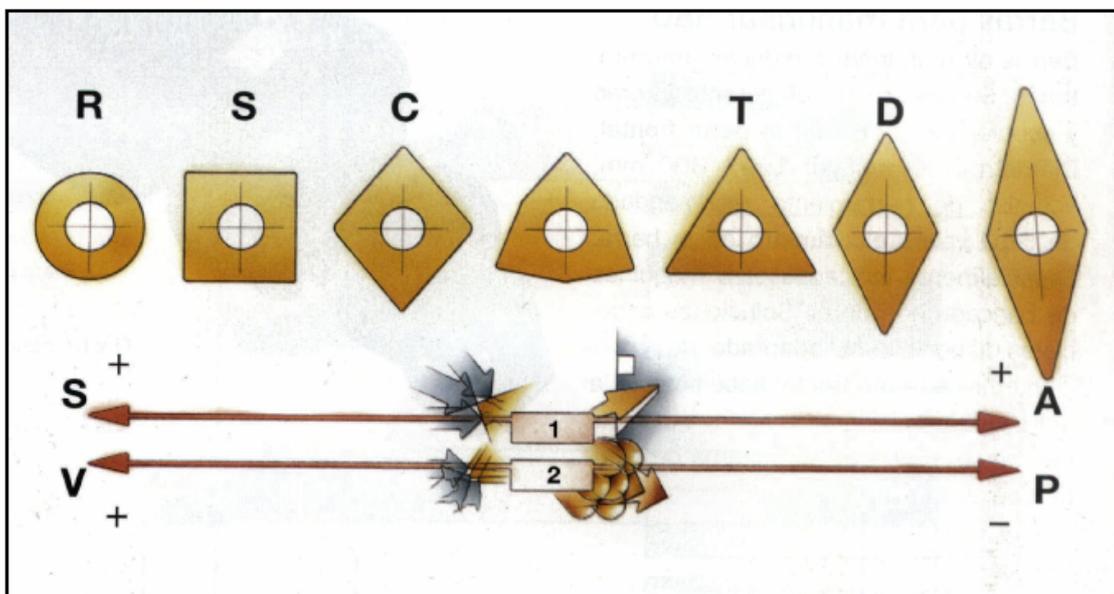


Fig. 3.14

La escala 1 indica que en lo referente a robustez de la arista de corte (S), cómo mayor sea el ángulo de punta hacia la izquierda, mayor será la resistencia. Sin embargo. En lo referente a versatilidad y accesibilidad (A), las plaquitas hacia la derecha son superiores

La escala 2 indica que la tendencia a las vibraciones (V) aumenta hacia la izquierda, mientras que la potencia se reduce hacia la derecha.

El radio de la punta (r_ϵ) afecta al acabado superficial de la pieza. Puede ser desde 0,2 mm hasta 2,4 mm. Para operaciones de acabado, se usan los valores menores, en cuanto para desbaste y desbaste pesado se emplean los valores de radio más altos.

Un radio de corte más grande ofrece un filo fuerte, resistente a avances importantes, en tanto que con un valor bajo consigo realizar cortes más finos.

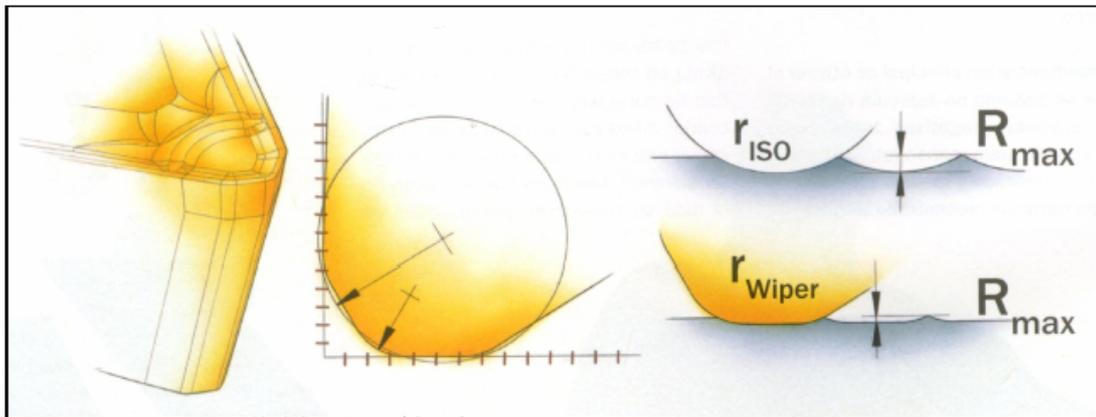
La forma sugerida de la plaquita según la operación en lo que veremos en la siguiente tabla.

- Tecnología Wiper (plaquita rascadora)

Con un pequeño cambio en el radio de las plaquitas, podemos duplicar la velocidad de avance en el torneado sin que sufra modificaciones la terminación superficial de la pieza.

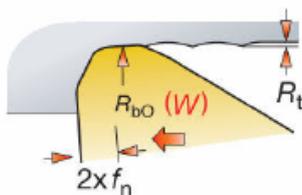
Es recomendable el uso de las plaquitas rascadoras en las operaciones de acabado y de semi-acabado.

Sin embargo, esta tecnología no es recomendable en todas las operaciones de mecanizado, solamente en aquellos torneados con poco voladizo de la pieza, para piezas rígidamente tomadas en el amarre. No es conveniente en trabajos con mucho voladizo o entre puntas, ya que se generaría una importante vibración, lo que significa mala calidad de terminación superficial y casi segura rotura de plaquita.



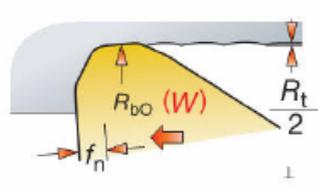
Geometría Wiper

Dos veces el avance



Geometría Wiper

El mismo avance



Radio del vértice estándar

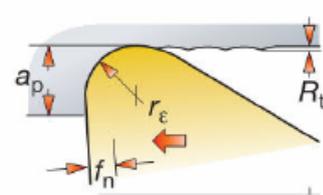


Fig. 3.15

▪ Clasificación del tipo de desgaste en las herramientas

	<p>Desgaste de incidencia Desgaste de incidencia rápido, que provoca un acabado superficial deficiente o a la pérdida de las tolerancias.</p>		<p>Astillamiento Pequeña fisura en el filo de corte que provoca un acabado superficial deficiente y un desgaste de incidencia excesivo.</p>
	<p>Craterización Provoca un debilitamiento del filo.</p>		<p>Rotura de la plaquita Daños no sólo en la plaquita, sino también en la placa de apoyo y la pieza a trabajar.</p>
	<p>Deformación plástica Depresión en el filo o impresión en el flanco que provocan un control de virutas deficiente y un acabado superficial de baja calidad. Riesgo de desgaste excesivo en el flanco que puede provocar la rotura de la plaquita.</p>		<p>Desgaste en forma de mella Desgaste por entalladura que provoca un acabado superficial deficiente, con riesgo de rotura del filo.</p>
	<p>Filo de aportación (B.U.E.) Provoca un acabado superficial deficiente y el astillamiento del filo de corte al desprenderse el filo de aportación.</p>		<p>Fisuras térmicas Pequeñas fisuras perpendiculares al filo de corte, que Provocan astillamiento y un acabado superficial deficiente.</p>

Fig. 3.16 Defectos en plaquitas de corte

▪ **CONSEJOS PRACTICOS** (en el caso de tener problemas)

Algunas soluciones para resolver los problemas más comunes durante:

Cilindrado	Remedios y soluciones									
	Reduce la velocidad de corte	Incrementa la velocidad de corte	Reduce el avance	Incrementa el avance	Reduce la profundidad de corte	Aumenta la profundidad de corte	Seleccione una calidad con mayor resistencia al desgaste	Seleccione una calidad más tenaz	Seleccione un radio de punta pequeño	Seleccione una geometría positiva
Problemas										
Desgaste del flanco	X						X			
Desgaste en entalla	X						X			
Craterización	X		X				X			X
Deformación plástica	X		X				X			
Formación del filo de aportación (BUE)		X								X
Pequeñas fisuras perpendiculares al filo de corte								X		
Pequeñas fracturas (astillamiento) del filo de corte		X						X		X
Rotura de la plaquita			X		X			X		
Virutas rizadas largas				X		X			X	
Vibración	X			X	X				X	X

Tabla 3.5

▪ **Sistema de sujeción de la plaquita**

Este punto es de vital importancia, junto con la sujeción del porta en la máquina, ya que determinará la correcta estabilidad de la plaquita que esté sometida a los esfuerzos del mecanizado.

El tamaño y la forma del inserto, más el ángulo de posición definen el portaplaquitas correspondiente.

Esta selección también debe garantizar que no entorpezca el libre flujo de virutas, la mayor versatilidad posible y el mínimo de mantenimiento.

También es importante el tamaño de portaplaquitas. Generalmente, se selecciona el mayor tamaño posible, proporcionando la base más rígida para el filo y se evita el voladizo que provocaría vibraciones.

Los sistemas de sujeción más comunes, son los siguientes.

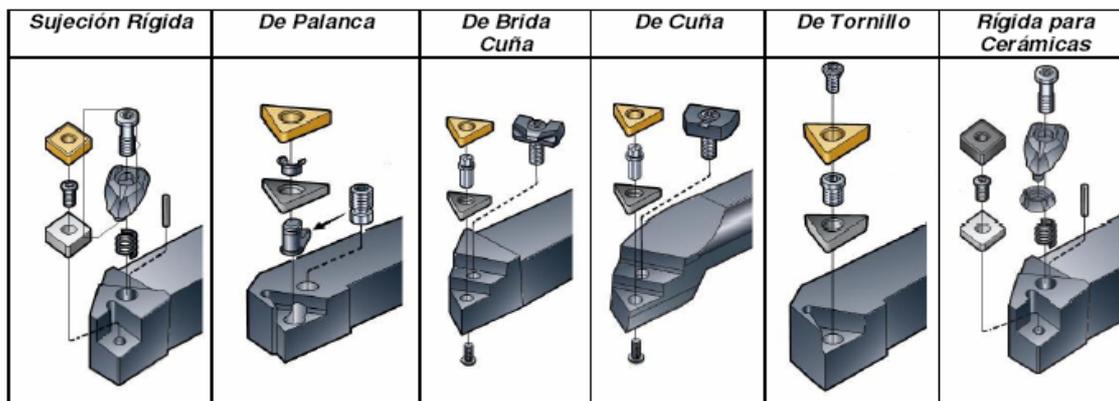


Fig. 3.17

Veremos que tener en cuenta que sistema de sujeción utilizaremos para cada mecanizado, favorecerá no solo las condiciones de corte, sino la terminación de la pieza, ya que podemos evitar la vibración de la herramienta.

Mecanizado exterior	Plaquetas negativas				Plaquetas positivas		Plaquetas de cerámica y de CBN	
Sistema de sujeción	Sujeción rígida	Sujeción por palanca	Sujeción por cuña	Sujeción superior por tornillo	Sujeción por tornillo	Diseño de sujeción de guía T	Sujeción rígida	Sujeción superior
Torneado longitudinal/frentado	**	*	*	*	*		**	*
Perfilado	**	*	*	*	**	**	**	*
Frentado	**	*	*	*	*		**	*
Operaciones en "plunge"		*			**			**

** = Sistema de portaherramientas recomendado * = Sistema de portaherramientas alternativo
Plunge: en caída, en rampa, en pendiente.

Fig.3.18



Mecanizado interior	Plaquitas negativas			Plaquitas positivas	Plaquitas de cerámica y de CBN	
Sistema de sujeción	 Diseño de sujeción rígida	 Diseño de sujeción por palanca	 Diseño de brida-cuña	 Diseño de tornillo y brida superior	 Diseño de sujeción por tornillo	 Diseño de sujeción superior
Torneado longitudinal/frenteado	**	**	*		**	*
 Perfilado				*		
 Frenteado	*	*			**	
 Frenteado	*	*			**	*

** = Sistema de portaherramientas recomendado * = Sistema de portaherramientas alternativo

Fig. 3.19

Una vez optado por algún porta, deberemos de elegir el montaje del mismo en la máquina. Por supuesto, esto depende de cada máquina, quedando para nosotros determinar, de los posibles, cual me brinda una sujeción más estable, más rígida y con el menor tiempo de recambio o mantenimiento.

▪ 3.3 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CORTE

▪ 3.3.1 SELECCIÓN DE PLAQUITAS

Para seleccionar los tipos de plaquitas, he consultado un catálogo de un conocido fabricante de productos para mecanizado de metal. Considero que al ser unos profesionales del sector que se dedican exclusivamente a este campo y cuyo objetivo es ofrecer la máxima calidad y prestaciones a sus clientes, las recomendaciones hechas en sus manuales serán las más apropiadas de entre las distintas opciones del mercado actual.

▪ 3.3.1.1 CILINDRADO

Las fase de torneado, con las subfases de desbaste, mecanizado medio y acabado han sido analizadas individualmente de entre las opciones del catálogo.

Para comenzar, en el catalogo como se puede observar en el anexo venían tres gamas o familias de herramientas.

-Los sistemas de herramientas T-MAX P se utilizan principalmente para operaciones de torneado exterior, desde desbaste a acabado. También se pueden utilizar para las operaciones interiores en el caso de componentes de gran tamaño.

Las plaquitas T-Max P cumplen las normas ISO. Su filo de corte es muy robusto, gracias a la forma básicamente negativa de las plaquitas. Las geometrías de plaquitas están clasificadas como básicas y complementarias y la mayoría de ellas han sido desarrolladas para una determinada área de aplicación, desde extra-acabado hasta desbaste pesado, en diferentes tipos de materiales.

ISO K		FUNDICIÓN					
ALUMINIO / MATERIALES NO FÉRREOS y MATERIALES ENDURECIDOS		Extra acabado	Acabado	Mecanizado medio	Desbaste ligero	Desbaste	Desbaste pesado
	Mecanizado con avance elevado Plaquitas rascadoras - Wiper		WF 	WM 			
	Mecanizado en general Plaquitas básicas		KF 	KM 	MR(R) 	KR 	HR
	Otros Producción mixta	Cerámicas CBN		QM 		QR 	
	Materiales de corte avanzados	CBN 		QM 	QR 		

Línea K y GC3000

- Elevado régimen de arranque del metal
- Tolerancias estrechas y componentes de paredes finas
- Recomendados mangos de fijación rígida (RC)

Fig 3.20

- **Los sistemas de herramientas CoroTurn 107 y T-MAX U;** ambos sistemas se utilizan principalmente para mecanizados exteriores o interiores de pequeños componentes. La forma de plaquita positiva combina fuerzas de corte bajas con buena resistencia del filo. Su sistema de sujeción por tornillo garantiza una mayor estabilidad y un flujo de la viruta sin obstrucciones.

ISO K		FUNDICIÓN			
APLICACIÓN		Extra-acabado	Acabado	Mecanizado medio	Desbaste
	Mecanizado con avance elevado Plaquetas rascadoras CoroTurn 107		WF	WM	
	Mecanizado en general CoroTurn 107 T-MAX U		KF	KM	KR
ISO K-H	Materiales de corte avanzados	CBN			
ISO K-N	Materiales de corte avanzados	Diamante			

Línea K y GC3000

- Elevado régimen de arranque de metal
- Tolerancias estrechas y componentes de paredes finas

A 42

SANDVIK
Coromant

Fig. 3.21

La tecnología Wiper o de plaquita rascadora será descartada, dado que el voladizo de la pieza es importante y esto provoca la aparición de vibraciones que aseguran una mala calidad superficial y una probable rotura de la plaquita.

En las páginas siguientes se incluye la tabla con la recomendación para mecanizado de fundición nodular. Esta tabla es simplemente una orientación, una recomendación, y no es la única opción a aplicar, pero como bien he dicho, me parece lo más sensato ajustarme al estudio de estas plaquetas ya que es una empresa multinacional del sector la que recomienda su uso.



TORNEADO EN GENERAL Datos de corte

Recomendaciones de geometría y calidad como primera elección

ISO	CMC	HB	MATERIAL	APLICACIÓN	Plaquitas negativas T-MAX P			Plaquitas positivas CoroTurn (T-Max L)			
					Geometría	Calidad	Tipo de plaquita	Geometría	Calidad	Tipo de plaquita	
P	01.2	150	Acero al carbono no aleado	Super acabado	QF	4015	G	04	0,5	0,12	430
				Acabado	PF	4015	G	08	0,4	0,2	395
				Mecanizado medio	PM	4025	G	08	3,0	0,3	325
				Desbaste ligero	PR	4025	G	12	4,0	0,4	290
P	02.1	160	Acero de baja aleación	Super acabado	QF	4015	G	04	0,5	0,12	465
				Acabado	PF	4015	G	08	0,4	0,2	425
				Mecanizado medio	PM	4025	G	08	3,0	0,3	330
				Desbaste ligero	PR	4025	G	12	4,0	0,4	290
P	03.11	200	Acero de alta aleación, recocido	Super acabado	QF	4015	G	04	0,5	0,12	340
				Acabado	PF	4015	G	08	0,4	0,2	295
				Mecanizado medio	PM	4025	G	08	3,0	0,3	220
				Desbaste ligero	PR	4025	G	12	4,0	0,4	195
P	06.2	200	Acero fundido, de baja aleación	Super acabado	QF	4015	G	04	0,5	0,12	220
				Acabado	PF	4015	G	08	0,4	0,2	200
				Mecanizado medio	PM	4025	G	08	3,0	0,3	150
				Desbaste ligero	PR	4025	G	12	4,0	0,4	135
M	05.21	180	Acero inoxidable, austenítico, barras/forjadas	Acabado	MF	2015	G	08	0,4	0,2	250
				Mecanizado medio	MM	2025	G	12	3,0	0,3	180
				Desbaste ligero	MR	2025	G	12	3,0	0,35	165
				Desbaste pesado	QR	4035	M	16	5,0	0,5	135
M	05.52	180	Acero inoxidable, austenítico/ferrítico barras/forjadas (Dúplex)	Acabado	MF	2025	G	08	0,4	0,2	255
				Mecanizado medio	MM	2035	G	12	3,0	0,3	235
				Desbaste ligero	MR	2035	G	12	3,0	0,35	205
				Desbaste pesado	QR	235	M	16	5,0	0,5	120
M-S	23.22	R _m 1050	Aleaciones de titanio	Acabado	-23	H10A	G	08	1,0	0,2	65
				Mecanizado medio	-23	H13A	G	08	2,0	0,3	53
				Desbaste	OM	H13A	G	12	4,0	0,4	49
				Desbaste	-23	H10A	G	08	3,0	0,2	40
M-S	20.22	350	Aleaciones termorresistentes Base Ni	Acabado	-23	H10A	G	08	3,0	0,35	20
				Mecanizado medio	UM	G	12	4,0	0,4	20	
				Desbaste	KM	UM	G	12	4,0	0,4	20
				Desbaste	KR	UM	G	12	4,0	0,4	20
K	06.2	200	Fundición gris, alta resist. a la tracción	Acabado	KF	3005	G	08	0,5	0,2	250
				Mecanizado medio	KM	3015	G	12	3,0	0,35	210
				Desbaste	KR	3015	A	16	4,0	0,55	180
				Desbaste	KF	3005	G	08	0,5	0,2	270
K	06.2	250	Fundición nodular, Perlítica	Acabado	KF	3005	G	08	0,5	0,2	270
				Mecanizado medio	KM	3005	G	12	3,0	0,4	220
				Desbaste	KR	3005	A	16	4,0	0,55	190
				Desbaste	KF	3005	G	08	0,5	0,2	270
K-H	04.1	HRC 60	Acero duro	Acabado	NMA	670	A	08	0,2	0,1	150
				Mecanizado medio	NGA	670	A	12	0,2	0,15	100
K-N	30.22	90	Aleaciones de aluminio	Acabado	-23	H13A	G	12	3,0	0,35	2000
				Mecanizado medio	AL	AL	G	12	3,0	0,35	2000

Datos de corte **TORNEADO EN GENERAL**

Recomendaciones sobre geometrías y calidades

Radio de punta	Rec. a _p mm	Rec. f _n mm/r	Rec. v _c m/min	Geometría	Calidad	Tipo de plaquita	Radio de punta	Chafilán	Rec. a _p mm	Rec. f _n mm/r	Rec. v _c m/min
04	0,11	485									
08	0,2	370									
08	0,25	345									
04	0,11	520									
08	0,2	375									
08	0,25	350									
04	0,11	380									
08	0,2	250									
08	0,25	235									
04	0,11	245									
08	0,2	175									
08	0,25	160									
04	0,11	255									
08	0,2	205									
08	0,3	180									
04	0,11	310									
08	0,2	285									
08	0,3	235									
04	0,5	115	70								
08	0,2	60									
08	0,25	55									
04	0,5	15	30	NGN	670	N	12	T01020	1,0	0,12	432
08	0,2	15	15	NGN	670	N	12	T01020	2,0	0,2	351
08	0,25	15	15	NGN	670	N	12	T01020	3,0	0,3	271
04	0,11	265		NGA	650	A	12	T01020	1,5	0,3	550
08	0,2	250		NGA	690	A	16	T02520	3,0	0,4	500
08	0,3	230		NGA	690	A	16	T02520	3,0	0,4	500
04	0,11	300		NGA	650	A	12	T01020	1,5	0,3	400
08	0,2	270		NGA	1690	A	16	T01020	3,0	0,4	350
08	0,3	240		NGA	690	A	16	T02520	3,0	0,4	350
08	0,2	0,1	150	NGN	7020	A	08	S01020	0,2	0,1	150
08	0,2	0,1	150	NGN	670	N	12	T01020	0,2	0,15	100
08	0,2	0,1	150	CMW	CB20	W	08	S01020	0,2	0,1	150
04	0,5	0,1	2000	CMW	CD10	W	04	F	0,5	0,1	2000
08	1,5	0,3	2000								
08	1,5	0,3	2000								

El cuarto símbolo en el código de pedido = tipo de plaquita. Ver clave de códigos en página A 6.

CNMG
G = Plaquita de doble cara con rompevirutas
M = Plaquita de una sola cara con rompevirutas
A = Plaquita lisa con orificio
N = Plaquita lisa sin orificio
W = Plaquita lisa con orificio, sujeción por tornillo

a_p mm = Valor de profundidad de corte inicial recomendado, en mm
f_n mm/r = Valor de avance recomendado en mm/revolución
v_c m/min = Valor de velocidad de corte inicial recomendado, en m/min

Tabla. 3.6

Se debe optar por una de las tres opciones recomendables para cada fase del torneado: desbaste, mecanizado medio y acabado.

Se analizarán las tres plaquitas para cada una de las subfases:

Las geometrías recomendadas para las dos primeras familias de herramientas recomendadas son KF para acabado; KM para mecanizado medio y KR para desbaste.

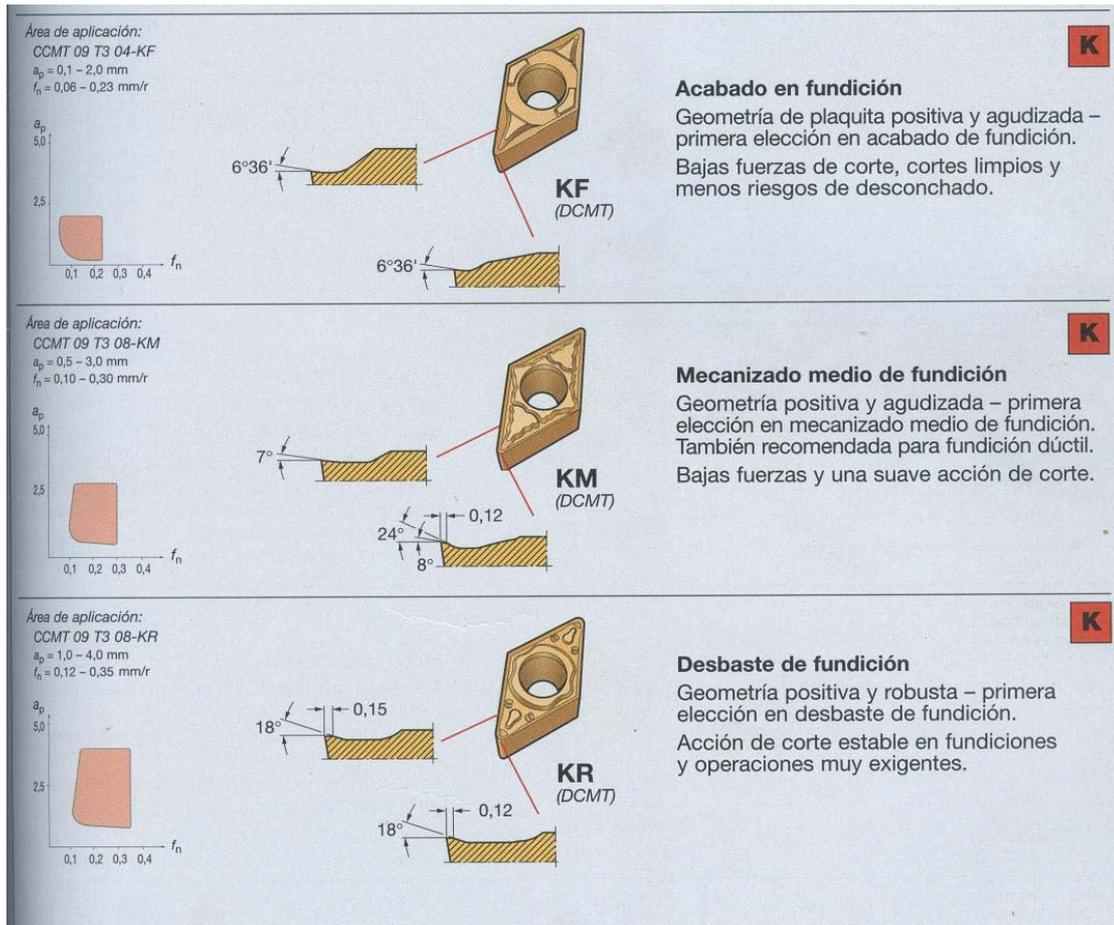


Fig. 3.22

La plaquita de cerámica es recomendada en una geometría plana tipo NGA:

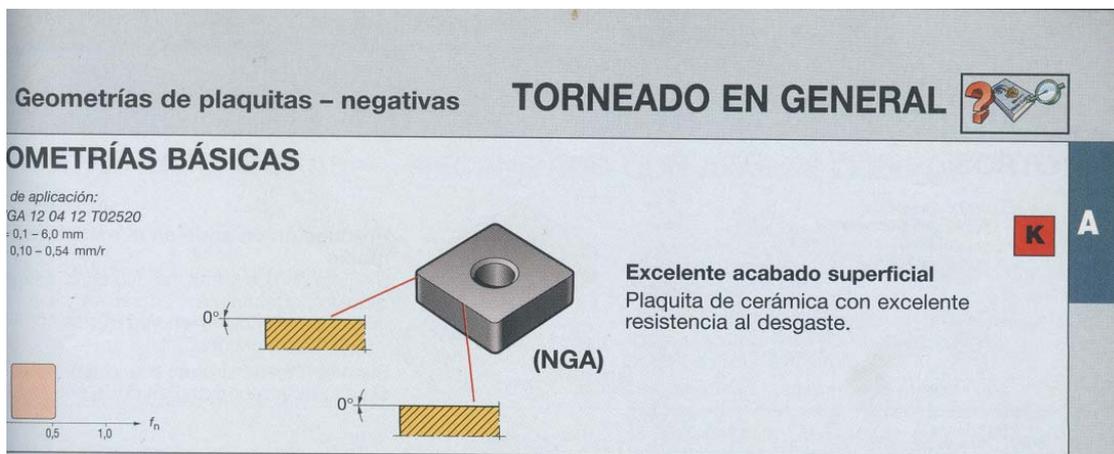


Fig. 3.23



Como se observa, las plaquitas son recomendadas con geometría positiva, caracterizándose estas por un corte limpio de buen acabado superficial y por una gran duración de la herramienta.

La herramienta cerámica es de una superficie plana, ya que la fundición nodular es un material que ofrece buen comportamiento al ser mecanizado en lo relativo a la viruta; rompiéndose esta sola por sí misma.

Las plaquitas se pueden encontrar en las geometrías rómbica 80°, rómbica 55°, rómbicas 35°, cuadradas, triangulares y trigonales:

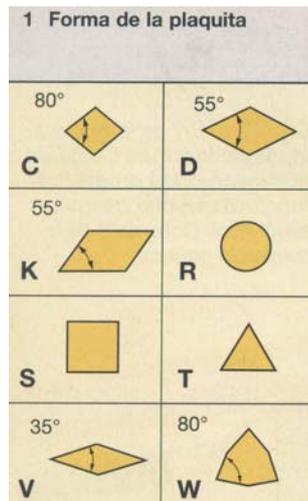


Fig. 3.24

Los materiales de las tres plaquitas difieren, en esta tabla se nos muestra su relación en cuanto a tenacidad y duración de la plaquita:

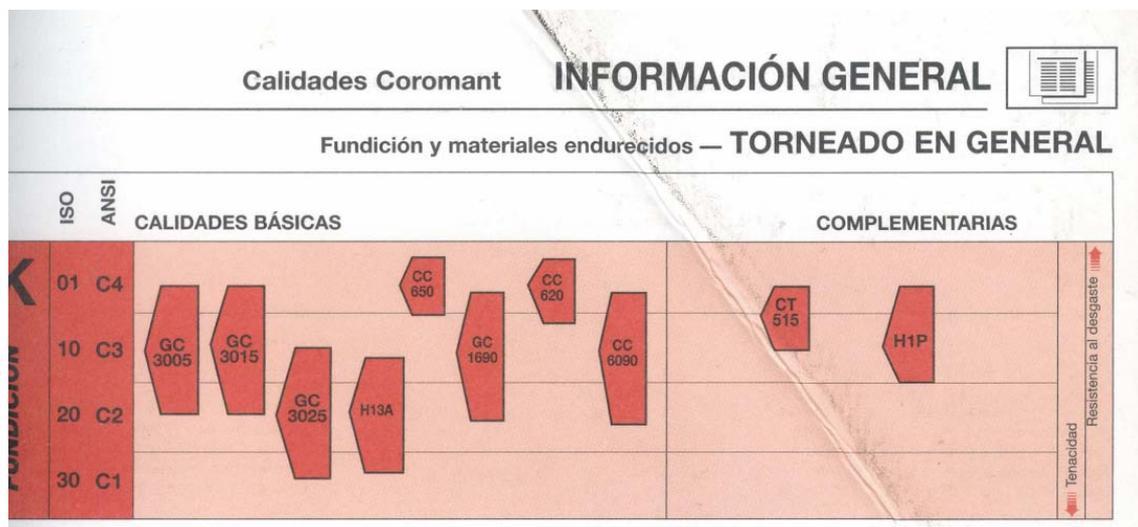


Fig. 3.25

La posición y forma de los símbolos de calidad indican el correspondiente campo de aplicación, siendo el óptimo el del vértice izquierdo, y el posible, el de la vertical derecha.

Los valores superiores corresponden a una mayor resistencia al desgaste, y los inferiores corresponden a una mayor tenacidad.

Los materiales recomendados para desbaste son el 3005, el 3015 y el 3025. Voy a copiar lo que literalmente se lee en el catálogo de ellos:

- GC3005: Calidad de metal duro con recubrimiento por CVD. Su recubrimiento resistente al desgaste presenta una excelente adherencia al bustrato. Este substrato es capaz de soportar elevadas temperaturas de corte sin deformarse, lo que hace de GC3005 la primera elección para fundición nodular y acabado de fundición gris.

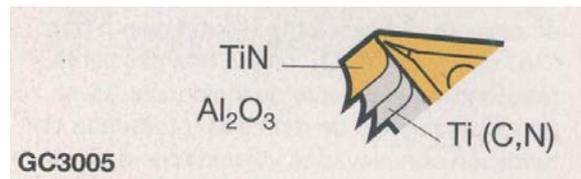


Fig. 3.26

- GC3015: Calidad de metal duro con recubrimiento por CVD. La combinación de un recubrimiento con una gran resistencia al desgaste y un substrato que es capaz de soportar altas temperaturas de corte sin deformarse hace de GC3015 la calidad ideal para el torneado de fundición gris. Calidad complementaria para fundición nodular con una buena maquinabilidad y bajo condiciones desfavorables.

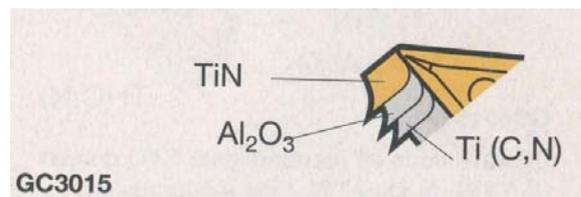


Fig. 3.27

- GC30025: Calidad de metal duro con recubrimiento por CVD. La combinación de un substrato tenaz que es capaz de soportar altas temperaturas de corte sin deformarse y la excelente adherencia del recubrimiento al substrato hace que esta calidad sea una buena elección para torneado de fundición bajo condiciones inestables y aplicaciones que requieren tenacidad en el filo.

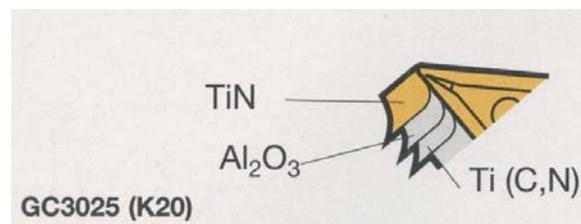


Fig. 3.28

- CB 690: es una calidad de nitruro de silicio puro (Si₃N₄) y, gracias a su buena tenacidad, adecuada para operaciones de mecanizado en desbaste y semiacabado en fundición gris.

Los tipos de plaquita son todos exactamente iguales, y por tanto no es un dato diferenciador, las tres opciones son del tipo "A".

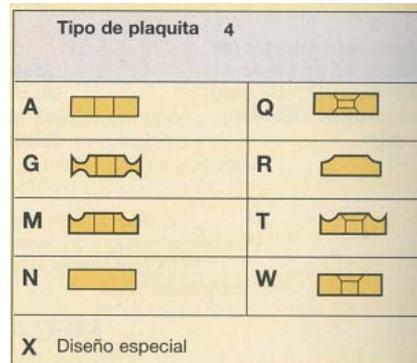


Fig. 3.29

A continuación se muestran los parámetros recomendados de mecanizado de las tres plaquitas:

- Desbaste

	T-MAX P	CoroTurn	Cerámicas
Profundidad de corte inicial recomendado (mm)	4,0	2,0	3,0
Avance recomendado (mm)	0,55	0,3	0,4
Velocidad de corte inicial recomendado (m/min)	190	240	350
Arranque de material $Q_z = V_c \times a_p \times f_n$ (cm ³ /min)	330	140	420

Tabla 3.7

- Mecanizado medio

	T-MAX P	CoroTurn	Cerámicas
Profundidad de corte inicial recomendado (mm)	3,0	0,8	3,0
Avance recomendado (mm)	0,4	0,2	0,4
Velocidad de corte inicial recomendado (m/min)	220	270	350
Arranque de material $Q_z = V_c \times a_p \times f_n$ (cm ³ /min)	264	43,2	420

Tabla 3.8

- Acabado

	T-MAX P	CoroTurn	Cerámicas
Profundidad de corte inicial recomendado (mm)	0,5	0,4	1,5
Avance recomendado (mm)	0,2	0,11	0,3
Velocidad de corte inicial recomendado (m/min)	270	300	400
Arranque de material $Q_z = V_c \times a_p \times f_n$ (cm ³ /min)	27	13,2	180

Tabla 3.9

Se descarta en primer lugar la serie CoroTurn, por tener unas prestaciones mecánicas menores en cuanto a velocidad de mecanizado. Entendiendo que en este proyecto no se tienen en cuenta el coste económico de cada una de las plaquitas, aún asumiendo que la tercera opción será la más cara, se recomienda el uso de esta plaquita por su enorme dureza que la hace conservar perfectamente su forma, con una enorme resistencia al desgaste, aún a temperaturas elevadas, y por su mayor velocidad de mecanizado, lo que reducirá los costes referentes a los tiempos de operación.

Además su reacción química es nula y no afecta químicamente al material que está tratando. La única pega que presenta este tipo de plaquitas, es su elevada fragilidad, y es solo considerando que la plaquita va a ser montada en un torno de control numérico cerrada, con acción mínima humana y excelente estabilidad, por lo que se recomienda el uso de la misma. Para un torno en el que existiese un riesgo de vibraciones o colisión de la herramienta con la pieza por mal ajuste, programación o manejo de la misma, se recomendaría el uso de la primera opción, ya que es significativamente menos frágil.

Por esta misma razón se seleccionan las plaquitas de cerámica para el mecanizado medio, y el acabado.

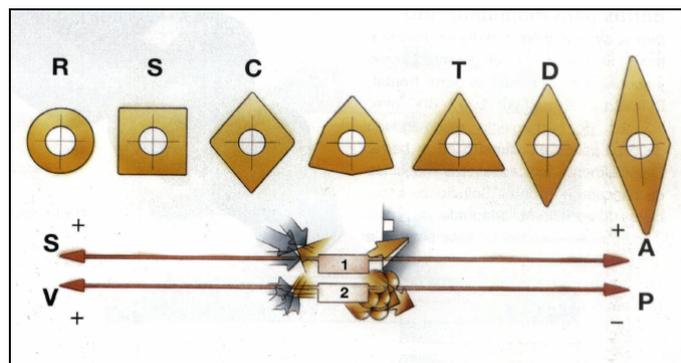


Fig. 3.30

La escala 1 indica que en lo referente a robustez de la arista de corte (S), cómo mayor sea el ángulo de punta hacia la izquierda, mayor será la resistencia. Sin embargo. En lo referente a versatilidad y accesibilidad (A), las plaquitas hacia la derecha son superiores

La escala 2 indica que la tendencia a las vibraciones (V) aumenta hacia la izquierda, mientras que la potencia se reduce hacia la derecha.

Como se observa, a medida que aumenta su accesibilidad disminuye su robustez, disminuye la potencia y aumentan las vibraciones. Es por esto que considero que los materiales de las plaquitas que tienen que mecanizar esos anillos en el cigüeñal han de tener una máxima calidad para verse afectado en la menor medida posible por este tipo de inconvenientes. La geometría necesaria para una buena accesibilidad obliga a una geometría que resistirá en menor medida el desgaste. Los materiales cerámicos y el CBN son unos materiales excelentes en cuanto a resistencia al mismo.

Dado que no existen problemas de accesibilidad a la superficies a mecanizar se decide que lo más adecuado sería elegir una de tipo C, rómbicas de 80°; que ofrece un buen comportamiento en lo que a vibraciones se refiere, y en cuanto a la potencia desarrollada; siendo también una placa suficientemente robusta para el propósito del mecanizado.

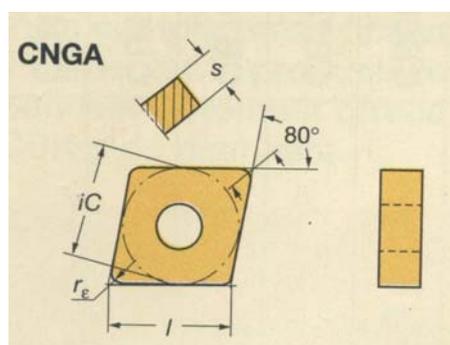


Fig. 3.31



		CERAMICAS				
ISO		620	650	670	690	690
CNGA	12 04 08 T01020		☆			
	12 04 08 T02520	☆				
	12 04 12 T01020		☆	☆	☆	☆
	12 04 12 T02520	☆	☆	☆	☆	☆
	12 04 16 T01020		☆			
	12 04 16 T02520	☆				
	16 06 08 T01020		☆			
	16 06 08 T02520			☆		
	16 06 12 T01020		☆			
	16 06 12 T02520				☆	☆
	16 06 16 T02520				☆	☆
	19 06 16 T02520				☆	☆

Tabla 3.10

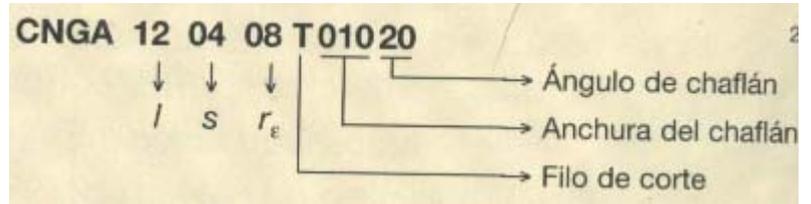


Fig. 3.33

El primer término, l , corresponde a la longitud del lado de la plaquita.

El segundo y el tercero corresponden al espesor de la plaquita y al radio de la punta:

6 Espesor de plaquita, s mm	7 Radio de punta, r_ϵ mm
01 $s = 1,59$	M0, 00 $r_\epsilon =$ Plaquita redondeada
T1 $s = 1,98$	04 $r_\epsilon = 0,4$
02 $s = 2,38$	08 $r_\epsilon = 0,8$
03 $s = 3,18$	12 $r_\epsilon = 1,2$
T3 $s = 3,97$	16 $r_\epsilon = 1,6$
04 $s = 4,76$	24 $r_\epsilon = 2,4$
05 $s = 5,56$	
06 $s = 6,35$	
07 $s = 7,94$	
09 $s = 9,52$	
10 $s = 10,00$	
12 $s = 12,00$	

Fig. 3.34

Los dos últimos se refieren a los ángulos característicos de la plaquita:

10 Anchura de chafilán, mm	11 Ángulo de chafilán
010 $b_{\gamma n} = 0,10$	15 $\gamma_n = 15^\circ$
025 $b_{\gamma n} = 0,25$	20 $\gamma_n = 20^\circ$
070 $b_{\gamma n} = 0,70$	
150 $b_{\gamma n} = 1,50$	
200 $b_{\gamma n} = 2,00$	

Fig. 3.35

Como se puede observar, en el catálogo vienen las plaquitas, con la misma geometría, para los tres materiales distintos, para el acabado 650, para el mecanizado medio el 1690, y el 690 para el desbaste.

Se han seleccionado las plaquitas para desbaste, mecanizado medio, y acabado, por sus características de mecanizado, pero no quiero dejar de incluir su descripción dada en la guía SANDVIK.

- 1690: GC1690 está formada por un substrato de nitruro de silicio, con un recubrimiento de nitruro de titanio. Las propiedades de la calidad GC1690, hacen que sea especialmente adecuada para aplicaciones de desbaste ligero, medio y el acabado en fundición.

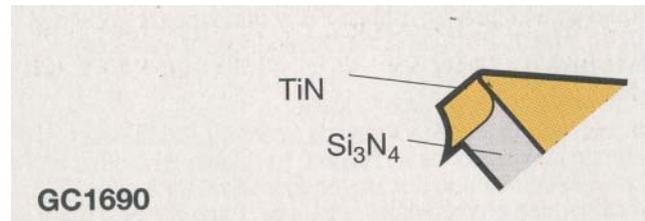


Fig. 3.36

- 650: es una calidad de cerámica mixta con base de alúmina, con adición de carburo de titanio ($Al_2O_3 + TiC$). CC650 se recomienda principalmente para operaciones de acabado de fundición, acero tratado, fundición tratada y super-aleaciones termorresistentes, que requieren una combinación de resistencia al desgaste y de buenas propiedades térmicas.

En vista a las distintas opciones que ofrece el catálogo para las plaquitas, se escogerá:

- Desbaste: Se elegirá una plaquita de longitud mayor y ángulos más agresivos de corte, por no ser la calidad superficial una necesidad en esta operación. Su código de definición será:

CNGA 12 04 16 To 25 20

- Mecanizado medio: Para esta plaquita se reducirá el tamaño y los ángulos de la misma, con el fin de suavizar el mecanizado. La opción seleccionada es:

CNGA 12 04 12 To 10 20

- Acabado: Para esta plaquita se seleccionará la opción mas fina para un acabado más preciso que reduzca y facilite la operación de rectificado. La opción seleccionada es:

CNGA 12 04 08 To 10 20

3.3.1.2 TRONZADO

	Criterios de selección, mm				Tamaño de asiento ¹⁾	Código de pedido	Dimensiones, mm	Calidades Coromant			
	l_a	φ_r	r_e	α_r				l_1	4025	4125	2135
Tronzado Geometría y calidad P Acero -CM GC2135 M Acero inoxidable -CM GC2135 K Fundición -CM GC4025	Elección para avance bajo				-CF Tolerancias, mm $l_1 = \pm 0,10$ $l_a = + 0,10$ 0 $r_e = \pm 0,10$	N123F2-0250-0001-CF R/L123F2-0250-0501-CF N123G2-0300-0001-CF R/L123G2-0300-0501-CF N123H2-0400-0001-CF R/L123H2-0400-0501-CF	20 20,2 20 20,2 25 25,3	☆	☆	☆	☆
	2,50 0° 0,10 18,4	F	20	☆				☆	☆	☆	
	2,50 5° 0,15 18,4	F	20,2	☆				☆	☆	☆	
	3,00 0° 0,10 18,4	G	20	☆				☆	☆	☆	
	3,00 5° 0,15 18,3	G	20,2	☆				☆	☆	☆	
	4,00 0° 0,15 23,3	H	25	☆				☆	☆	☆	
	4,00 5° 0,15 25,3	H	25,3	☆				☆	☆	☆	
Elección para avance medio				-CM Tolerancias, mm $l_1 = \pm 0,10$ $l_a = + 0,10$ 0 $r_e = \pm 0,10$	N123E2-0200-0002-CM L123E2-0200-0502-CM N123F2-0250-0002-CM R/L123F2-0250-0502-CM N123G2-0300-0002-CM R/L123G2-0300-0502-CM N123H2-0400-0002-CM R/L123H2-0400-0502-CM N123J2-0500-0002-CM L123J2-0500-0502-CM	20 20,1 20 20,1 20 20 25 25,3 25 25,4	☆	☆	☆	☆	
2,00 0° 0,20 19,0	E	20	☆				☆	☆	☆		
2,00 5° 0,20 19,0	E	20,1	☆				☆	☆	☆		
2,50 0° 0,20 18,9	F	20	☆				☆	☆	☆		
2,50 5° 0,20 18,9	F	20,1	☆				☆	☆	☆		
3,00 0° 0,20 18,9	G	20	☆				☆	☆	☆		
3,00 5° 0,20 18,8	G	20	☆				☆	☆	☆		
4,00 0° 0,20 24,1	H	25	☆				☆	☆	☆		
4,00 5° 0,20 24,1	H	25,3	☆				☆	☆	☆		
5,00 0° 0,20 24,1	J	25	☆				☆	☆	☆		
5,00 5° 0,20 24,1	J	25,4	☆	☆	☆	☆					
Elección para avance alto				-CR Tolerancias, mm $l_1 = \pm 0,10$ $l_a = + 0,10$ 0 $r_e = \pm 0,10$	N123F2-0250-0003-CR R/L123F2-0250-0503-CR N123G2-0300-0003-CR R/L123G2-0300-0503-CR N123H2-0400-0003-CR R/L123H2-0400-0503-CR N123J2-0500-0004-CR L123J2-0500-0504-CR N123K2-0600-0004-CR	20 20,1 20 20,2 25 25,3 25 25,4 25	☆	☆	☆	☆	
2,50 0° 0,30 18,9	F	20	☆				☆	☆	☆		
2,50 5° 0,30 18,9	F	20,1	☆				☆	☆	☆		
3,00 0° 0,30 18,8	G	20	☆				☆	☆	☆		
3,00 5° 0,30 18,8	G	20,2	☆				☆	☆	☆		
4,00 0° 0,30 23,7	H	25	☆				☆	☆	☆		
4,00 5° 0,30 23,7	H	25,3	☆				☆	☆	☆		
5,00 0° 0,40 23,7	J	25	☆				☆	☆	☆		
5,00 5° 0,40 23,6	J	25,4	☆				☆	☆	☆		
6,00 0° 0,40 23,5	K	25	☆				☆	☆	☆		

¹⁾ Para adaptarse al tamaño del asiento en el portaplaquitas. Ejemplo de pedido: 10 piezas N123F2-0250-0001-CF 2145
 R123G2-0300-0502-CM 2145
 L123G2-0300-0502-CM 2145
 N = Neutra, R = a Derecha, L = a Izquierda

Tabla 3.11

Puesto que esta herramienta será utilizada exclusivamente para seccionar las sobremedidas de los extremos usadas como punto de sujeción para las extremidades, se elegirá la tercera elección (-CR), por ser la de mayor avance, ya que no nos interesa en absoluto en este proceso el acabado superficial, sino el tiempo de mecanizado.

El material recomendado para fundición es el 4025. De este material se puede leer en la guía lo siguiente:

- GC4025: lleva una gruesa capa de Al_2O_3 sobre una capa de Ti (C,N) de grosor medio. La fina capa exterior de TiN hace que tenga un color amarillo que facilita la detección del desgaste. El espesor total del recubrimiento es de aprox. 10 μ mm. La combinación de una capa gruesa resistente al desgaste y de un sustrato tenaz enriquecido con cobalto, proporciona a la calidad GC 4025 una excelente combinación de alta resistencia al desgaste, junto con una buena seguridad del filo de corte.

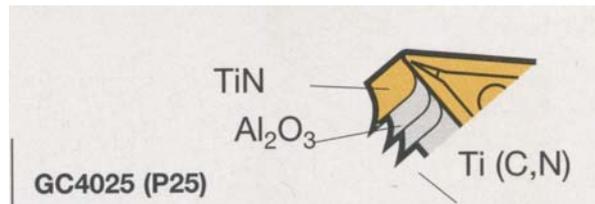


Fig. 3-37

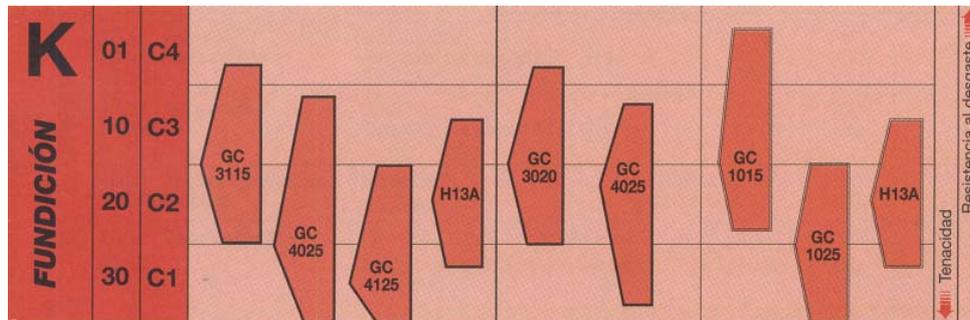


Fig. 3-38

A continuación viene representada la clave de códigos para este tipo de plaquitas:

N	123	H	2	-	0400	-	00 04	-	TF
1	2	3	4		5		6	7	8

<p>1 Sentido de la herramienta</p> <p>R </p> <p>N </p> <p>L </p>	<p>2 Código principal</p> <p align="center">123</p>	<p>3 Tamaño de asiento de plaquita</p> <p>E H F J G K</p> <p>Para adaptarse al tamaño del asiento en el portaplaquitas.</p>	<p>4 Número de filos</p> <p>1 6 2</p> <p></p> <p></p> <p></p>	<p>5 Ancho de plaquita</p> <p></p>
<p>6 Ángulo frontal</p> <p>Ejemplo: 00 = 0° 05 = 5°</p> <p></p>	<p>7 Radio del vértice</p> <p>Ejemplo: 04 = 0,4 mm 08 = 0,8 mm</p> <p></p>	<p>8 Geometrías</p> <p>Primer dígito: Tipo de operación</p> <p>C = Tronzado T = Torneado G = Ranurado R = Perfilado</p> <p>Segundo dígito: Área de avance</p> <p>F = Avance bajo M = Avance medio R = Avance alto</p>		

Fig.3-39

La plaquita seleccionada será:

N 123 K2-0600-0004-CR

Como se puede observar en la Tabla 3.11 de los modelos de plaquita, para fundición se recomienda el material GC4025, el cual solo es producido para plaquitas de ángulo frontal nulo. La plaquita ha sido elegida para un máximo corte posible dado que su cometido es el de tronzar en el menor tiempo posible dos superficies sin ningún requisito de calidad superficial.

▪ **3.3.1.3 RANURADO**

T-MAX Q-Cut Geometrías de plaquita y calidades

Información detallada sobre calidades para los diferentes materiales en página B 72.

	-4E	-5E	-7E	-5F	151.2 -4G	151.3 -4G	-5G	-6G	-7G	E-G	-4T	-5T	-AL	-4P	-5P	F-P	-4U
Página	B 14	B 14	B 14	B 15	B 17	B 19	B 16	B 16	B 20	B 18	B 20	B 20	B 22	B 21	B 21	B 23	B 23
Tronzado	1025	1025	2145	1025													
	2145	2145	2145	235													
	4025	4025	1025														
Barras	4025	1025	1025	1025			4025										
	1025	1025	1025	1025			1025										
	3020	4025	1025				3020										
Tubos																	
Ranurado																	
Exterior																	
Profundo																	
Interior																	
Ranurado frontal																	
Desahogos																	
Perfilado																	
Barras																	
Torneado de ruedas de Al																	
Cilindrado																	
Exterior																	
Interior																	
Ranurado superficial																	

P Primera elección en el área ISO P (acero).
M Primera elección en el área ISO M (acero inoxidable).
K Primera elección en el área ISO K (fundición).

Tabla 3.12

Como se puede observar para el proceso de cilindrado de fundición se recomiendan además del 4025 otros dos materiales. A continuación plasmó la descripción dada para el CB 20 en este manual, ya que del 3020 no aparece, aunque como podemos observar en la tabla, sus prestaciones son similares a las del 4025, si bien la tenacidad de este último es superior, e inferior el desgaste.

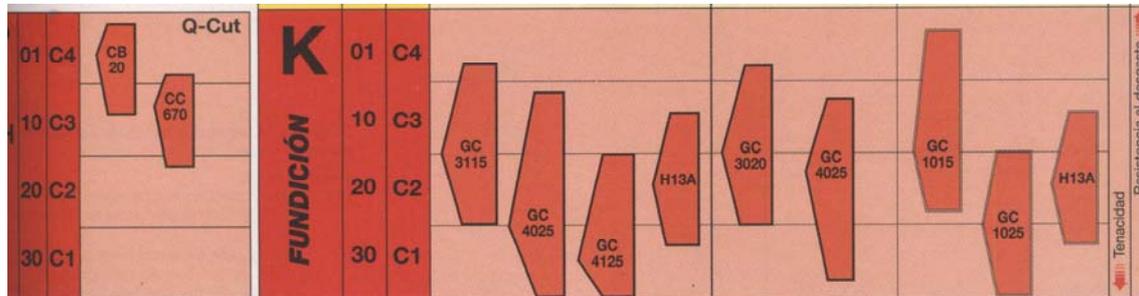


Fig. 3.40

Como el CB20 es un material que ofrece una extraordinaria resistencia al desgaste, superior a la de las otras dos opciones, por el contrario, su tenacidad es significativamente menor. Su descripción dada en el catálogo es:

- CB20: Es una calidad de nitruro de Boro Cúbico (CBN), basadas en CBN con adicción de nitruro de titanio. Ello proporciona a estas calidades unas buenas propiedades de resistencia química y al desgaste, para las operaciones de acabado en acero tratado y fundición endurecida.

Para decidirse entre una de las dos plaquitas se recurre a la descripción final dada en la guía:

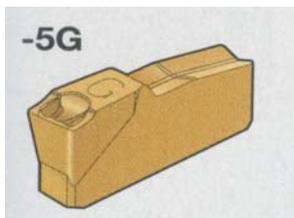


Fig. 3.41

Primera elección para rasurado en general.

Excelente control de viruta

Reduce el ancho de las virutas y permite un buen acabado superficial

Para rasurado en todo tipo de materiales

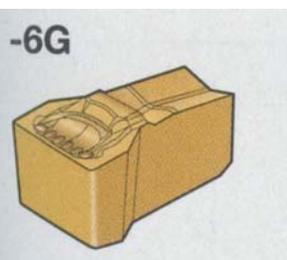


Fig. 3.42

Elección alternativa cuando el control de virutas es de primera importancia a altos ritmos de producción.

Particularmente recomendada para la producción en serie.

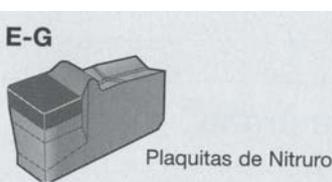


Fig. 3.43

Alternativa para el acabado de ranuras en materiales endurecidos.

Mantiene tolerancias estrechas y proporciona un excelente acabado superficial de la pieza

De entre las tres opciones, la última de ellas es la que ofrece un mejor acabado superficial. La del modelo 6G está especialmente recomendada y sería una opción válida para la producción a nivel industrial del cigüeñal, pero puesto que en este proyecto se está tratando el cigüeñal como un prototipo y no como una pieza de mercado, se seleccionará aquel que ofrezca mejor calidad superficial, ya que la zona en la que ha de trabajar será la de contacto con la biela y con los cojinetes, y por tanto el control de las tolerancias es máximo, y la precisión de las dimensiones muy exigentes, como influyente sería en el funcionamiento del cigüeñal un inadecuado acabado de estas superficies que son las encargadas de transmitir los esfuerzos con las menores pérdidas posibles.

Asimismo, y considerando las distintas velocidades de avance que ofrece y uno y otro, se opina que lo más adecuado sería disponer de dos plaquitas distintas. Una de acabado de nitruro, con mejor calidad superficial, y otra de mayor avance, como es la 6G.

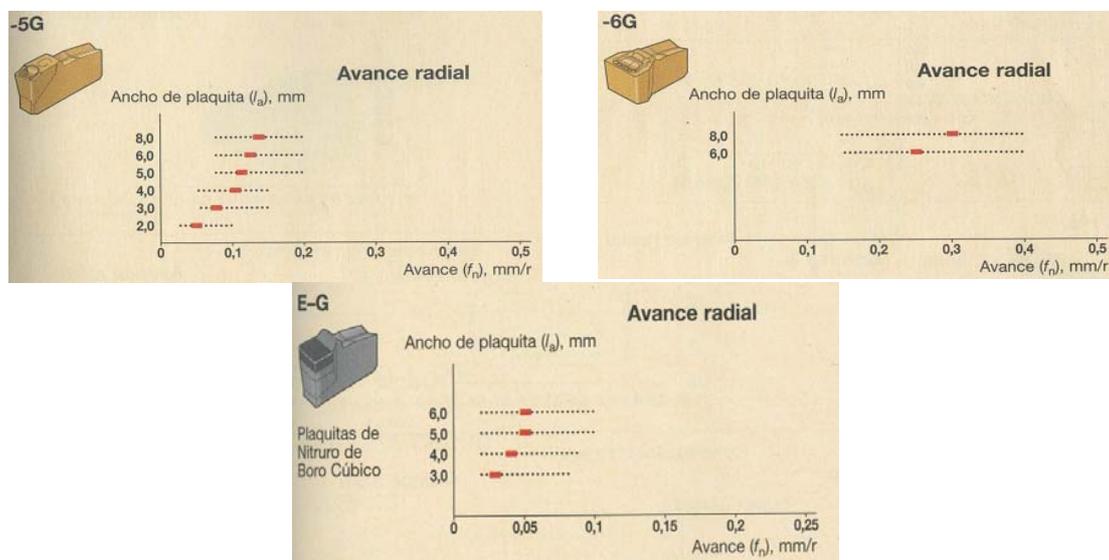


Fig. 3.44

		Criterios de selección, mm		Tamaño de asiento	Código de pedido	Dimensiones, mm			Calidades Coromant										
		l_a	r_ϵ			l_1	α_{pt}	\varnothing_{GB}	225	235	1025	3020	4025	525	H13A				
<p>Ranurado</p>																			
		<p>-5G</p> <p>Tolerancias, mm: $l_1 = \pm 0,1$ $l_a = +0,1$ $r_\epsilon = \pm 0,1$</p>	2,00	0,2	20	N151.2-200-20-5G	4,4	4°	2	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆			
			3,00	0,3	30	N151.2-300-30-5G	5,5	4°	2	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆		
			4,00	0,3	40	N151.2-400-40-5G	6,8	4°	2	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆		
			5,00	0,4	50	N151.2-500-50-5G	6,8	6°	2	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆		
			6,00	0,4	60	N151.2-600-60-5G	8,4	6°	3	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆		
			8,00	0,5	80	N151.2-800-80-5G	11,3	6°	3	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆		
								Plaquitas para ranuras circlip											
					Tolerancias, mm: $l_1 = +0,17$ $+0,07$ $l_a \leq 3,00 +0,05$ $+0,13$ $l_a > 3,00 +0,07$ $+0,17$ $r_\epsilon = \pm 0,1$		1,85	0,10	20	N151.2-185-20-5G	4,42	4°	2	☆	☆			☆	☆
							2,15	0,15		-215-20-5G	4,42	5°	2	☆	☆			☆	☆
					2,65	0,15	25	N151.2-265-25-5G	5,46	5°	2	☆	☆			☆	☆		
				3,15	0,15	30	N151.2-315-30-5G	5,46	5°	2	☆	☆			☆	☆			
				4,15	0,15	40	N151.2-415-40-5G	6,80	5°	2	☆	☆			☆	☆			
				5,15	0,15	50	N151.2-515-50-5G	6,80	6°	2	☆	☆			☆	☆			
		Criterios de selección, pulgadas		Tamaño de asiento	Código de pedido	Dimensiones, pulgadas													
		l_a (mm) r_ϵ				l_1	α_{pt}	\varnothing_{GB}											
<p>-5G</p> <p>Tolerancias, pulgadas: $l_1 = \pm .004$ $l_a = \pm .002$ $r_\epsilon = \pm .004$</p>	.094 (2,39)	.007	20	N151.2-A094-20-5G	.174	7°	.079	☆	☆				☆	☆					
	.125 (3,18)	.010	30	N151.2-A125-30-5G	.214	5°	.079	☆	☆	☆				☆	☆				
	.187 (4,75)	.010	40	N151.2-A187-40-5G	.268	7°	.079	☆	☆	☆				☆	☆				
	.250 (6,35)	.010	60	N151.2-A250-60-5G	.329	6°	.118	☆	☆					☆	☆				
	.312 (7,92)	.013	80	N151.2-A312-80-5G	.444	4°	.118	☆	☆					☆	☆				
<p>-6G</p> <p>Tolerancias, pulgadas: $l_1 = \pm .001$ $l_a = \pm .001$ $r_\epsilon = \pm .002$</p>	.250 (6,35)	.031	60	N151.2-A250-60-6G	.333	3°	.118	☆					☆						
	.375 (9,52)	.031	80	N151.2-A375-80-6G	.462	3°	.118	☆						☆					

Tabla 3.13

Sin embargo como se puede observar, el material GC3020 no está disponible para el modelo 6G, y por tanto deberemos escoger una del modelo 5G.

Tronzado y ranurado
 Plaquetas de Nitruro de Boro Cúbico para tronzado y ranurado en materiales endurecidos

	Criterios de selección, mm		Tamaño de asiento	Código de pedido	Dimensiones, mm			Calidades Coromant				
	l_a	r_f			l_1	iW	\varnothing_{GB}	CB20				
E-G Tolerancias, mm: $l_1 = \pm 0,02$ $l_a = \pm 0,02$ $r_f = \pm 0,05$	3,00	0,20	25	N151.2-300-25 E-G	5,71	3,20	2	☆				
	4,00	0,20	30	N151.2-400-30 E-G	5,58	3,20	2	☆				
	5,00	0,20	40	N151.2-500-40 E-G	6,87	3,20	2	☆				
	6,00	0,20	50	N151.2-600-50 E-G	6,72	3,20	2	☆				
Tolerancias, pulgadas: $l_1 = \pm .0008$ $l_a = \pm .0008$ $r_f = \pm .0020$.125 (3,18)	.007	25	N151.2-A125-25 E-G	.225	.126	.079	☆				
	.185 (4,70)	.022	40	N151.2-A185-40 E-G	.270	.126	.079	☆				
	.250 (6,35)	.022	60	N151.2-A250-60 E-G	.333	.126	.118	☆				
	.312 (7,92)	.033		-A312-60 E-G	.333	.126	.118	☆				

Ejemplo de pedido: 10 piezas N151.2-300-25 E-G CB20

Tabla 3.14

- Desbaste seleccionamos la opción de mayor ancho de plaqueta disponible para conseguir mejores tiempos de mecanizado:

N151.2-500-50-5G

- Acabado:

N151.2-500-40-E-G

▪ 3.3.1.4 DESAHOGOS

Como se ve en la tabla 3.12 el material recomendado para esta función es un denominado H13A. Este material viene descrito en el catálogo de la siguiente manera:

- H13A: Una calidad sin recubrimiento que puede soportar elevadas temperaturas sin deformarse. La combinación de una buena resistencia al desgaste por abrasión y tenacidad hacen de ella una buena elección para el mecanizado de fundición, aluminio y materiales no ferrosos.

El tipo de plaqueta para desahogos tiene un ángulo de incidencia grande que permite desahogos de pequeño diámetro.



Desahogos

	Criterios de selección, mm		Tamaño de asiento	Código de pedido	Dimensiones, mm			Calidades Coromant						
	l_a	r_e			Min $\varnothing D$	$\alpha_n = \alpha_{pt}$	l_1	\varnothing_{GB}	225	235	525	H13A		
-4U Tolerancias, mm: $l_1 = \pm 0,02$ $2 \times r_e = \pm 0,02$	2,00	1,00	30	20	N151.2-200-20-4U	5°	4,67	2	☆	☆	☆	☆		
	3,00	1,50	28	25	N151.2-300-25-4U	7°	5,86	2	☆	☆	☆	☆		
	4,00	2,00	23	30	N151.2-400-30-4U	11°	5,86	2	☆	☆	☆	☆		
	5,00	2,50	27	40	N151.2-500-40-4U	11°	7,28	2	☆	☆	☆	☆		
	6,00	3,00	27	50	N151.2-600-50-4U	11°	7,27	2	☆	☆	☆	☆		
	8,00	4,00	30	60	N151.2-800-60-4U	11°	9,04	3	☆	☆	☆	☆		

Ejemplo de pedido: 10 piezas N151.2-200-20-4U 225
 N = Neutra

SANDVIK
Coromant

B 23

Tabla 3.15

Dadas las medidas pequeñas con las que se trabajará para conseguir la geometría del cigüeñal, elegiremos el de menor tamaño que nos aporte mayor seguridad en la flexibilidad de su uso:

N151.2-200-20-4U

El material recomendado es el H13A.

▪ **3.3.1.5 RANURADO FRONTAL**

Para el rasurado frontal se dispone de dos opciones a elegir, la -5E y la -7G. La primera de ellas es una plaquita ideada para tronzado, aunque también puede cumplir las funciones de rasurado frontal. La segunda de ellas, la -7G, se describe en la guía como la primera opción para el rasurado frontal. Posee un buen control de virutas tanto al cortar la primera ranura como al abrir. Se pueden cortar diámetros de ranura más pequeños. Posee una excelente estabilidad y puede ser utilizada en una amplia gama de materiales. También puede ser usada este tipo de plaquita para realizar torneado interior.

El material de la plaquita es el 3020 según denominación de SANDVIK, y que ya ha sido expuesto anteriormente.

TRONZADO Y RANURADO Plaquetas T-MAX Q-Cut

Ranurado frontal, ranurado interior

Nota:
 Estas plaquetas sólo se pueden utilizar en porta-plaquetas tipo R/LF151.37 o barras tipo R/LAG151.32

	Criterios de selección, mm		Tamaño de asiento	Código de pedido	Dimensiones, mm				Calidades Coromant		
	l_a	r_e			l_1	α_n	α_{pt}	\varnothing_{GB}	235	1025	3020
N151.3 -7G Tolerancias, mm: $l_1 = \pm 0,1$ $l_a = +0,10$ $r_e = \pm 0,1$	3,00	0,3	25	N151.3-300-25-7G	5,38	8°	9°	1,5	☆	☆	☆
	4,00	0,4	30	N151.3-400-30-7G	5,38	8°	8°30'	1,5	☆	☆	☆
	5,00	0,4	40	N151.3-500-40-7G	6,76	8°	8°30'	2,0	☆	☆	☆
	6,00	0,4	50	N151.3-600-50-7G	6,76	8°	8°30'	2,0	☆	☆	☆

Tabla 3.16

Dado que el tamaño de la hendidura no es demasiado grande, se selecciona la de menor tamaño:

N151.3-300-25-7G

▪ **3.3.1.6 ROSCADO**

Existen multitud de diferentes roscados. Los más comunes son las enumeradas a continuación:

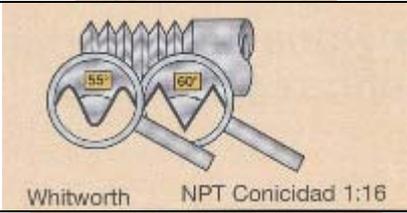
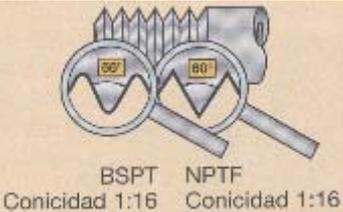
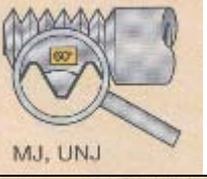
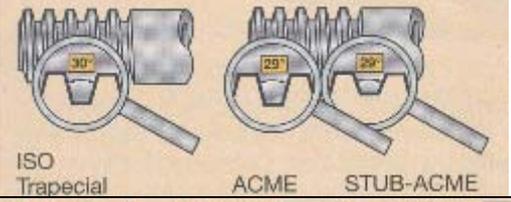
<p>- Uso general para todos los segmentos de la industria de ingeniería.</p>	 <p align="center">UN ISO MM</p>
<p>- Ajuste y acoplamiento de tuberías en conductos de gas, agua y alcantarillado.</p>	 <p align="center">Whitworth NPT Conicidad 1:16</p>
<p>- Rosas de tuberías para líneas de vapor, gas y agua.</p>	 <p align="center">BSPT NPTF Conicidad 1:16 Conicidad 1:16</p>
<p>- Acoplamiento de tuberías en la industria de productos alimenticios y de protección contra incendios.</p>	 <p align="center">Redonda DIN 405</p>
<p>- Roscas para la industria aeroespacial.</p>	 <p align="center">MJ, UNJ</p>
<p>- Roscas para tornillo trapecoidal para transmisión de movimientos.</p>	 <p align="center">ISO Trapecial ACME STUB-ACME</p>
<p>- Petróleo y gas.</p>	 <p align="center">Conicidad API V-0.038R, V-0.040, V-0.050 API Conicidad 1:16 (Redondeada) API BUT New VAM VAM</p>

Tabla 3.17

A continuación se incluye el código para la lectura y comprensión del tipo de plaquita:

R	166.0	G	-	16	MM0	1	-	150	
1	2	3		4	5	6	7	8	9

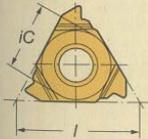
<p>1 Sentido de la plaquita</p> <p>R = plaquita a derecha L = plaquita a izquierda</p>	<p>2 Código principal</p> <p>166.0 = Plaquetas T-MAX U-Lock Para portaplaquetas: 166.4, 166.5 y 166.0.</p>	<p>3 Tipo de mecanizado¹⁾</p> <p>G = plaquetas para roscado exterior L = plaquetas para roscado interior</p>																										
<p>4 Dimensión de la plaquita</p> <p>Longitud, l en mm</p> <p>11 = $iC\ 1/4'' = 6,35\text{ mm}$ 16 = $iC\ 3/8'' = 9,52\text{ mm}$ 22 = $iC\ 1/2'' = 12,70\text{ mm}$ 27 = $iC\ 5/8'' = 15,88\text{ mm}$</p> 	<p>5 Perfil de rosca¹⁾</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td>VM0 = Perfil en V 60°</td> <td>MJO = MJ 60°</td> </tr> <tr> <td>VW0 = Perfil en V 55°</td> <td>NFO = NPTF 60°</td> </tr> <tr> <td>MM0 = Métrico 60°</td> <td>BU0 = Buttress</td> </tr> <tr> <td>UN0 = UN 60°</td> <td>VA0 = VAM</td> </tr> <tr> <td>WHO = Whitworth 55°</td> <td>NVO = New VAM</td> </tr> <tr> <td>NT0 = NPT 60°</td> <td>RDO = API Rd 60°</td> </tr> <tr> <td>RNO = Redondo 30°</td> <td>V38 = V-0.038R</td> </tr> <tr> <td>RX0 = Redondo 30°</td> <td>V40 = V-0.040</td> </tr> <tr> <td>PT0 = BSPT 55°</td> <td>V50 = V-0.050</td> </tr> <tr> <td>TR0 = Trapezoidal 30°</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ACO = ACME 29°</td> <td></td> </tr> <tr> <td>SA0 = STUB-ACME 29°</td> <td></td> </tr> <tr> <td>NJO = UNJ 60°</td> <td></td> </tr> </table>	VM0 = Perfil en V 60°	MJO = MJ 60°	VW0 = Perfil en V 55°	NFO = NPTF 60°	MM0 = Métrico 60°	BU0 = Buttress	UN0 = UN 60°	VA0 = VAM	WHO = Whitworth 55°	NVO = New VAM	NT0 = NPT 60°	RDO = API Rd 60°	RNO = Redondo 30°	V38 = V-0.038R	RX0 = Redondo 30°	V40 = V-0.040	PT0 = BSPT 55°	V50 = V-0.050	TR0 = Trapezoidal 30°		ACO = ACME 29°		SA0 = STUB-ACME 29°		NJO = UNJ 60°		<p>6 Número de dientes por filo de corte</p> <p>Varía de 1 a 3 dientes. 1 = 1 diente 2 = 2 dientes 3 = 3 dientes</p>
VM0 = Perfil en V 60°	MJO = MJ 60°																											
VW0 = Perfil en V 55°	NFO = NPTF 60°																											
MM0 = Métrico 60°	BU0 = Buttress																											
UN0 = UN 60°	VA0 = VAM																											
WHO = Whitworth 55°	NVO = New VAM																											
NT0 = NPT 60°	RDO = API Rd 60°																											
RNO = Redondo 30°	V38 = V-0.038R																											
RX0 = Redondo 30°	V40 = V-0.040																											
PT0 = BSPT 55°	V50 = V-0.050																											
TR0 = Trapezoidal 30°																												
ACO = ACME 29°																												
SA0 = STUB-ACME 29°																												
NJO = UNJ 60°																												
<p>7 Filo de corte</p> <p>-- = filo redondeado (ER) F = filo de corte agudizado C = geometría para rotura de virutas</p>	<p>8 Paso¹⁾</p> <p>mm: paso x 100 Pulg.: número de roscas por pulgada x 10</p>	<p>9 Código suplementario</p> <p>Conicidad en diámetro/pulg. por pie (pulg.p.p.) 1 = 1 pulg.p.p. 2 = 2 pulg.p.p. 3 = 3 pulg.p.p.</p> <p>Plaquetas de Nitruro de Boro Cúbico: E = Filo redondeado (ER)</p>																										

Fig. 3.45

Dados los requisitos del material, y las medidas observadas en el cigüeñal, se selecciona como material el dado como primera opción, GC1020. El código de plaquita será:

R166.0 G 16 MM 03 - 100



3.3.2 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CORTE

La selección de los parámetros de corte será basada en las recomendaciones del fabricante SANDVIK, por considerar que su experiencia y su renombre en el campo del mecanizado son razones suficientes para seguir sus recomendaciones.

3.3.2.1 DESBASTE, MECANIZADO MEDIO Y ACABADO (T₃, T₄, T₅)

La herramienta de desbaste era una CNGA 12 04 16 To 25 20. El material es el denominado "6090".

A continuación se indican las tablas con los valores apropiados y tolerables para este tipo de plaquitas:

ISO		CMC No.	Material	Fuerza de corte específica k _c 0,4 N/mm ²	Dureza Brinell HB	RESISTENCIA AL DESGASTE			
					CC620			CC650	GC1690
					Avance, f _n mm/r			0,1 - 0,25 - 0,4 0,1 - 0,25 - 0,4 0,2 - 0,4 - 0,6	
					Velocidad de corte, v _c m/min			800 - 700 - 600 800 - 700 - 600 750 - 600 - 500	
K	07.1	07.2	Fundición maleable Ferrítica (de viruta corta) Perfítica (de viruta larga)	950 1100	130 230	800 - 700 - 600 700 - 600 - 500	800 - 700 - 600 700 - 600 - 500	750 - 600 - 500 655 - 500 - 400	
	08.1	08.2	Fundición gris Baja resistencia a la tracción Alta resistencia a la tracción	1100 1400	180 260	800 - 700 - 600 700 - 600 - 500	800 - 700 - 600 700 - 600 - 500	750 - 600 - 500 650 - 500 - 400	
	09.1	09.2	Fundición Nodular SG Ferríticas Perfíticas Martensíticas	1050	160	600 - 550 - 450	600 - 550 - 450	550 - 450 - 350	
	09.3	1750 1820		250 380	500 - 450 - 350	500 - 450 - 350	550 - 450 - 350		

Los datos de corte para el mecanizado en fundición, indicados en la siguiente tabla, se refieren a cortes en continuo. Para cortes intermitentes, se deberá reducir el avance y la profundidad de corte.

ISO		Material de la herramienta de corte	Capacidad para cortes intermitentes	Velocidad de corte, v _c m/min				Avance, f _n mm/r						Profundidad de corte, a _p mm								
CMC ¹⁾				300	400	500	600	700	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0		
FUNDICIÓN	K	07	CC620																			
			Cerámica pura	NO																		
		08	CC650																			
			Cerámica mixta	NO																		
			CC690																			
			Nitruro de silicio	SÍ																		
		CC6090																				
		Nitruro de silicio	SÍ																			
		GC1690																				
		Nitruro de silicio con recubrimiento	SÍ																			
		CB7050																				
		Nitruro de boro cúbico	SÍ																			
	CB50																					
	Nitruro de boro cúbico	SÍ																				
	09	CC620																				
		Cerámica pura	NO																			
		CC650																				
		Cerámica mixta	NO																			
	CC690																					
	Nitruro de silicio	SÍ																				
	GC1690																					
	Nitruro de silicio con recubrimiento	SÍ																				

¹⁾ Clasificación de Materiales Coromant
CMC 07 = Fundición maleable
CMC 08 = Fundición gris
CMC 09 = Fundición nodular

²⁾ Se recomiendan unas velocidades de corte altas, de hasta 2000 m/min y para fundición con un bajo contenido de ferrita, un máx. de 5%. Ver recomendaciones sobre datos de corte en página A 220 - A 222

Tabla 3.19



	Desbaste (T3)	Mec. Medio (T4)	Acabado (T5)
f_n : Avance (mm/r)	0,4	0,2	0,1
f_n : Avance refrentado (mm/r)	0,1	x	0,1
V_c : Velocidad de corte (m/min)	300	300	400
a_p : Profundidad de corte (mm)	3	2	1
r_e : Radio de punta de la plaquita (mm)	1,6	1,2	0,8
K_r : Ángulo de posición	85°	85°	85°
V_{max} del husillo (rpm)	2652	2983	4107
V del husillo de refrentado	2667	x	4107
Q_z : Arranque de metal (cm ³ /min)	360	120	60
P_c : Requisito de potencia (kW)	10,5	4,3	2,62
R_{max} : Profundidad del perfil (μm)	12,5	4,17	1,56

Tabla 3.20

▪ Desbaste

$$V_{max} \text{ husillo} = V_c \times 1000 / \pi \times D_{min} = 300 \times 1000 / \pi \times 36 = 2652 \text{ rpm}$$

$$Q_z = V_c \times a_p \times f_n = 300 \times 3 \times 0,4 = 360 \text{ cm}^3/\text{min}$$

$$P_c = Q_z \times k_{c0,4} \times [0,4 / f_n \times \text{sen } k_r]^{0,29} / 60 \times 10^3 =$$

$$540 \times 1750 \times [0,4 / 0,4 \times \text{sen } 85]^{0,29} / 60 \times 10^3 = 10,5 \text{ kW}$$

$$V_c = \omega \times r; \quad \omega = V_c / r = 300 \text{ (m/min)} / 18 \times 10^{-3} \text{ (m)} = 25000 \text{ rad/min} = 2667 \text{ rpm}$$

▪ Mecanizado medio

$$V_{max} \text{ husillo} = 300 \times 1000 / \pi \times D_{min} = 300 \times 1000 / \pi \times 32 = 2983 \text{ rpm}$$

$$Q_z = V_c \times a_p \times f_n = 300 \times 3,2 \times 0,2 = 120 \text{ cm}^3/\text{min}$$

$$P_c = Q_z \times k_{c0,4} \times [0,4 / f_n \times \text{sen } k_r]^{0,29} / 60 \times 10^3 =$$

$$120 \times 1750 \times [0,4 / 0,2 \times \text{sen } 85]^{0,29} / 60 \times 10^3 = 4,3 \text{ kW}$$

▪ Acabado

$$V_{max} \text{ husillo} = 400 \times 1000 / \pi \times D_{min} = 400 \times 1000 / \pi \times 31 = 4107 \text{ rpm}$$

$$Q_z = V_c \times a_p \times f_n = 400 \times 1,5 \times 0,1 = 60 \text{ cm}^3/\text{min}$$

$$P_c = Q_z \times k_{c0,4} \times [0,4 / f_n \times \text{sen } k_r]^{0,29} / 60 \times 10^3 =$$

$$60 \times 1750 \times [0,4 / 0,1 \times \text{sen } 85]^{0,29} / 60 \times 10^3 = 2,62 \text{ Kw}$$

$$V_c = \omega \times r; \quad \omega = V_c / r = 400 \text{ (m/min)} / 15,5 \times 10^{-3} \text{ (m)} = 32258 \text{ rad/min} = 4107 \text{ rpm}$$

▪ 3.3.2.2 TRONZADO (T9)

La denominación del modelo de plaquita es:

N 123 K2 – 0600 – 0004 – CR

Material: GC 4025

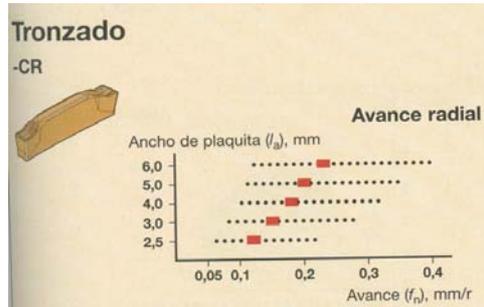


Fig. 3.46

Estas recomendaciones son válidas para utilizar con fluido de corte.

ISO	CMC No	Material:	Fuerza de corte específica k_c 0,4	Dureza Brinell	Tronzado					
					Ranurado exterior Cilindrado Perfilado Desahogos					
					GC1015	GC3020	GC3115	GC4025	GC4125	
					Avance f_n , mm/r					
					0,05-0,5	0,05-0,5	0,05-0,5	0,05-0,5	0,05-0,5	
					Velocidad de corte v_c , m/min					
					N/mm ²	HB				
FUNDICIÓN	K^{-H}	04.1 Acero extra-duro Templado y revenido	4700	55 HRC						
		10.1 Fundición en coquilla Fundidas o fundidas y envejecidas	2750	400	20- 10	30- 10				
	07.1 Maleable Ferrítica (viruta corta)	950	130	110- 90	230-120	335-170	295-155	215-110		
		07.2 Perlítica (viruta larga)	1100	230	80- 60	180- 90	245-110	215-100	145- 80	
	08.1 Gris Baja resistencia a la tracción	1100	180	90- 70	250-110	290-135	260-125	180- 95		
		08.2 Alta resistencia a la tracción	1400	260	70- 60	140- 90	215-105	200- 95	130- 65	
	09.1 Fundición Nodular SG Ferrítica	1050	160	80- 60	180- 90	255-110	235-100	155- 80		
		09.2 Perlítica	1750	250	70- 50	150- 80	200- 95	185- 85	125- 65	
	-N	30.11 Aleaciones de aluminio Forjadas o forjadas y trabajadas en frío, no envejecidas	500	60	1100-640	1500-1100			990-580	
		30.12 Forjadas o forjadas y envejecidas	800	100	460-260	500-370			445-190	
	30.21 Aleaciones de aluminio Fundidas, no envejecidas	750	75	1100-650	1500-1100			995-580		
		30.22 Fundidas o fundidas y envejecidas	900	90	720-400	750-270			695-360	
	33.1 Cobre y aleaciones de cobre Aleaciones de corte fácil, $\geq 1\%$ Pb	700	110	330-200	300-220			295-125		
33.2 Latón, bronce con plomo, $\leq 1\%$ Pb	700	90	220-130	200-150			195- 75			
33.3 Bronce y cobre sin plomo, incluyendo cobre electrolítico	1750	100	170-100	150-110			135- 55			

Tabla 3.21

	Tronzado (Tg)
f_n : Avance (mm/r)	0,22
V_c : Velocidad de corte (m/min)	85
L_a : Ancho de plaqueta (mm)	6
V del husillo (rpm)	712
Q_z : Arranque de metal (cm ³ /min)	112,2

Tabla 3.22

V_{max} husillo = $85 \times 1000 / \pi \times 0 \Rightarrow$ Al ser una operación de corte el diámetro final será 0, y por lo tanto tendería a infinito si quisiéramos mantener estos parámetros, así que tomaremos como longitud el radiodiámetro medio.

$$V_c = \omega \times r; \quad \omega = V_c / r = 85 \text{ (m/min)} / 19 \times 10^{-3} \text{ (m)} = 4473 \text{ rad/min} = 712 \text{ rpm}$$

$$Q_z = V_c \times a_p \times f_n = 85 \times 6 \times 0,5 = 112,2 \text{ cm}^3/\text{min}$$



3.3.2.3 RANURADO DE DESBASTE Y RANURADO DE ACABADO. (T1, T6)

La herramienta para realizar el cilindrado de desbaste en las muñequillas ha sido la siguiente:

N151.2 – A250 – 60 – 6G

El material es el GC3020.

	Desbaste (T1)
f_n : Avance (mm/r)	0,13
V_c : Velocidad de corte (m/min)	137,55
L_a : Ancho de plaquita (mm)	6
V del husillo (rpm)	883
Q_z : Arranque de metal (cm ³ /min)	107,289

Tabla 3.23

$$Q_z = V_c \times a_p \times f_n = 0,13 \times 137,55 \times 6 = 107,289 \text{ cm}^3/\text{min}$$

$$V_{\text{husillo}} = V_c \times 1000 / \pi \times D = 137,55 \times 1000 / \pi \times 49,6 = 883 \text{ rpm}$$

Cálculo de velocidad de corte para avance de de 0,13.

Según tabla de página 3.21,

Avance (f_n) (mm/r)	V corte (V_c) (m/min)
0,05	150
0,5	80
0,13	137,55

Tabla 3.24

$$\Delta V_{c_{1-2}} = V_{c1} - V_{c2} = 150 - 80 = 70$$

$$\Delta f_{n_{1-2}} = f_{n1} - f_{n2} = 0,05 - 0,5 = -0,45$$

$$\text{Variación} = \Delta V_c / \Delta f_n = 70 / -0,45 = -155,55 \text{ [(m/min) / (mm/r)]}$$

$$f_{n_{85}} = [(f_{n3} - f_{n2}) * \Delta V_{c_{1-2}} / \Delta f_{n_{1-2}}] + V_{c2} = [(0,13 - 0,5) * 70 / -0,45] + 80 = 137,55 \text{ mm/r}$$

Para acabado, el código de plaquita es:

N151.2 – 500 – 40 – E – G

Siendo el material CB20.

	Desbaste (T11)
f_n : Avance (mm/r)	0,06
V_c : Velocidad de corte (m/min)	300
L_a : Ancho de plaquita (mm)	4
V_{max} del husillo (rpm)	1965
Q_z : Arranque de metal (cm ³ /min)	72

Tabla 3.25

$$Q_z = V_c \times a_p \times f_n = 0,06 \times 300 \times 4 = 72 \text{ cm}^3/\text{min}$$

$$V_{\text{max}} \text{ husillo} = V_c \times 1000 / \pi \times D_{\text{min}} = 300 \times 1000 / \pi \times 48,6 = 1964,9 \text{ rpm}$$



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 141 / 205

▪ **3.3.2.4 DESAHOGOS (T2)**

El código de plaquita es:

N151.2-200-20-4U

El material recomendado es el H13A.

TRONZADO Y RANURADO				Velocidades de corte																	
Familia CoroCut™ (CoroCut y T-Max Q-Cut)				Velocidades de corte																	
Estas recomendaciones son válidas para utilizar con fluido de corte.				TRO																	
SO	CMC No	Material:	Fuerza de corte específica k_c 0,4	Dureza Brinell	Tronzado Ranurado exterior Cilindrado Perfilado Desahogos																
					GC1015	GC3020	GC3115	GC4025	GC4125	GC225	GC235	CB20	CC670	CD10	CD1810	H10	H13A				
Avance f_n mm/r					0,05-0,5 0,05-0,5 0,05-0,5 0,05-0,1 0,05-0,5 0,05-0,5 0,05-0,5																
Velocidad de corte v_c m/min					0,05-0,5 0,05-0,5 0,05-0,5 0,05-0,1 0,05-0,5 0,05-0,5 0,05-0,5																
K	-H	04.1 Acero extra-duro	Templado y revenido	4700	55 HRC			20- 10	30- 10												
		10.1 Fundición en coquilla	Fundidas o fundidas y envejecidas	2750	400																
		07.1 Maleable	Ferrítica (viruta corta)	950	130	110- 90	230-120	335-170	295-155	215-110											
	07.2	Perfítica (viruta larga)	1100	230	80- 60	180- 90	245-110	215-100	145- 80												
	08.1 Gris	Baja resistencia a la tracción	1100	180	90- 70	250-110	290-135	260-125	180- 95												
	08.2	Alta resistencia a la tracción	1400	260	70- 60	140- 90	215-105	200- 95	130- 65												
	09.1 Fundición Nodular SG	Ferrítica	1050	160	80- 60	180- 90	255-110	235-100	155- 80												
	09.2	Perfítica	1750	250	70- 50	150- 80	200- 95	185- 85	125- 65												
	-N	30.11 Aleaciones de aluminio	Forjadas o forjadas y trabajadas en frío, no envejecidas	500	60	1100-640	1500-1100														
		30.12	Forjadas o forjadas y envejecidas	800	100	460-260	500-370														
30.21 Aleaciones de aluminio		Fundidas, no envejecidas	750	75	1100-650	1500-1100															
30.22		Fundidas o fundidas y envejecidas	900	90	720-400	750-270															
33.1 Cobre y aleaciones de cobre	Aleaciones de corte fácil, $\geq 1\%$ Pb	700	110	330-200	300-220																
33.2	Latón, bronce con plomo, $\leq 1\%$ Pb	700	90	220-130	200-150																
33.3	Bronce y cobre sin plomo, incluyendo cobre electrolítico	1750	100	170-100	150-110																

Tabla 3.26

	Desbaste (T11)
f_n : Avance (mm/r)	0,5
V_c : Velocidad de corte (m/min)	40
L_a : Ancho de plaquita (mm)	2
V_{max} del husillo (rpm)	265
Q_z : Arranque de metal (cm ³ /min)	40

Tabla 3.27

$$V_{max} \text{ husillo} = V_c \times 1000 / \pi \times D_{min} = 40 \times 1000 / \pi \times 48 = 265 \text{ rpm}$$

$$Q_z = 0,5 \times 40 \times 2 = 40 \text{ cm}^3/\text{min}$$

▪ **3.3.2.5 RANURADO FRONTAL (T7)**

El código de plaquita es:

N151.3-300-25-7G

El material recomendado para fundición en esta operación es el 3020.

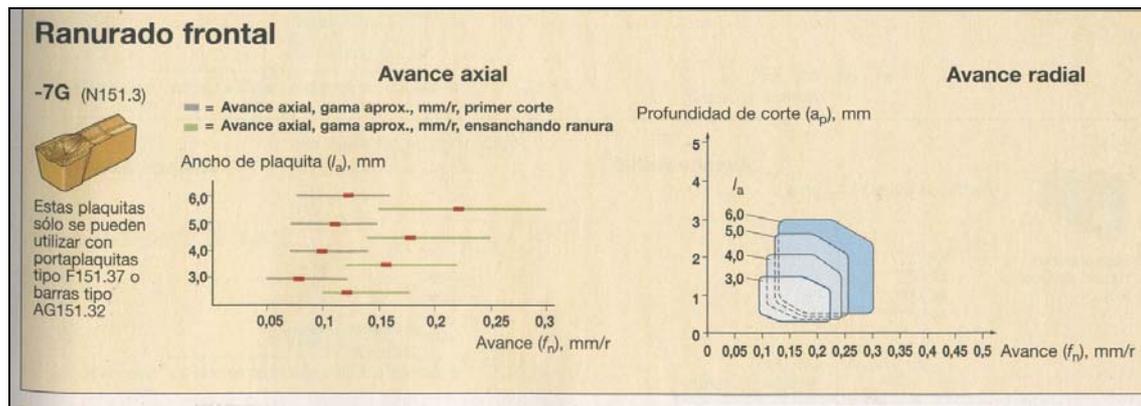


Fig. 3.47

	Desbaste (T11)
f_n : Avance (mm/r)	0,08
V_c : Velocidad de corte (m/min)	100
L_a : Ancho de plaquita (mm)	3
a_p : profundidad de corte	1
V del husillo (rpm)	3744
Q_z : Arranque de metal (cm ³ /min)	8

Tabla 3.28

$$V_c = \omega \times r; \quad \omega = V_c / r = 100 \text{ (m/min)} / 4,25 \times 10^{-3} \text{ (m)} = 23529 \text{ rad/min} = 3744 \text{ rpm}$$

$$Q_z = 0,08 \times 100 \times 1 = 8 \text{ cm}^3/\text{min}$$



3.4 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CORTE

3.4.1 INTRODUCCIÓN

La exigencia en el acabado en la superficie de las muñequillas del cigüeñal debe ser máxima, ya que a través de ellas se transmitirá toda la potencia desarrollada por los pistones al eje del motor. La fricción producida entre ambas superficies desembocará en una pérdida en la potencia transmitida por la combustión del combustible al cigüeñal, por ello estas fricciones deben reducirse al a mínima expresión y las superficie sobre las que se produce el contacto biela-cigüeñal han de estar mecanizadas con un nivel máximo de precisión.

Para unas tolerancias mínimas en el juego eje-biela se requieren unas máquinas de alta precisión en el mecanizado final de la superficie. Este último proceso será llevado a cabo por maquinaria específica para el acabado de superficies, conocidas como máquinas rectificadoras.

En la siguiente gráfica se muestra el grado de precisión que podemos lograr con las diferentes máquinas de mecanizar.

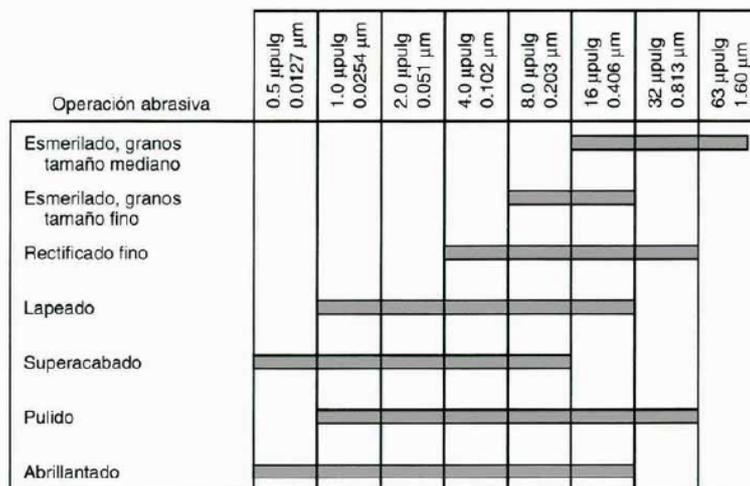
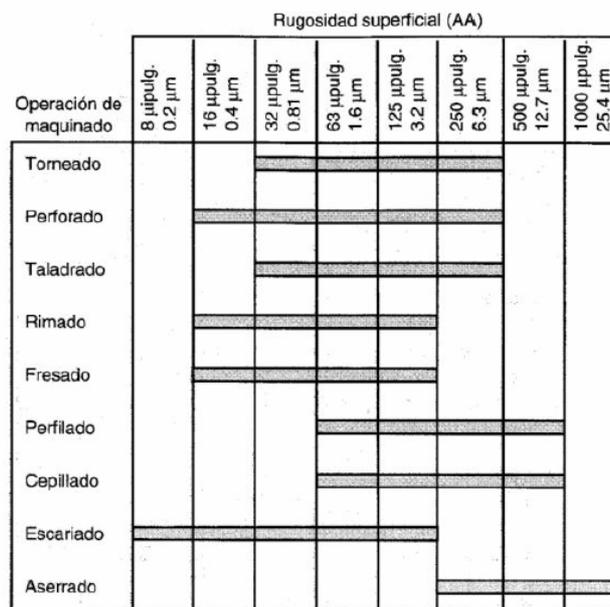


Fig. 3.48



El rectificado es un procedimiento de conformación por arranque de viruta basado en la acción cortante de unos cuerpos abrasivos llamados muelas. Una muela cualquiera se compone del abrasivo propiamente dicho, en forma de granos, y de un producto aglomerante cuya misión es aglutinarlo.

La alta velocidad de corte desarrollada (de ordinario muy superior a la de otras máquinas herramientas), junto con la capacidad de arrancar virutas microscópicas, permiten alcanzar precisiones y calidades superficiales imposibles de obtener por otros procedimientos. Por esta razón, el rectificado es un método de trabajo que se emplea para acabar piezas mecanizadas con anterioridad con las demasías adecuadas (torneadas, fresadas, etc.), cuando sus características mecánicas así lo aconsejan.

Clases de rectificado

El rectificado requiere como mínimo la conjunción de tres movimientos: El de corte, realizado por la muela; el de avance o alimentación, realizado por la pieza y el de penetración, que casi siempre lo efectúa la muela.

Por otro lado, el rectificado se aplica a superficies de revolución de generatrices rectas (cilíndricas, cónicas...) o curvas y también a superficies planas.

En consecuencia, las diversas variedades de rectificado dependen de la combinación armónica de los movimientos necesarios y de la naturaleza geométrica de las superficies a trabajar.

A grandes rasgos, los rectificados más importantes son:

- Rectificado plano con muela frontal.
- Rectificado plano con muela tangencial.
- Rectificado cilíndrico exterior.
- Rectificado cilíndrico interior.
- Rectificado sin centros.
- Rectificado de perfiles.

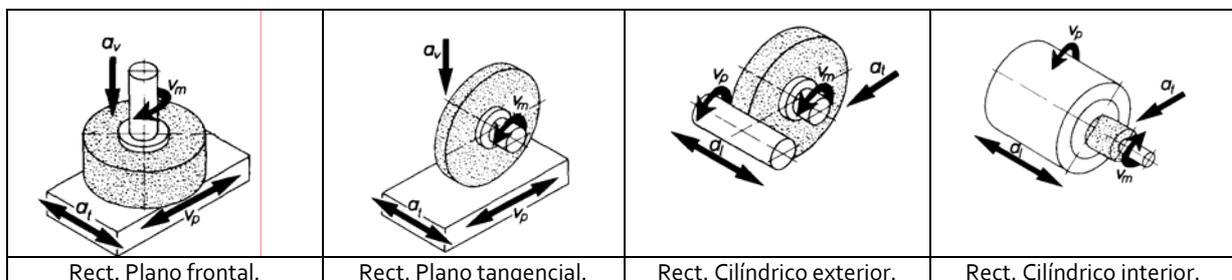


Fig. 3.49

3.4.2 ANÁLISIS DEL PROCESO

Esmerilado cilíndrico

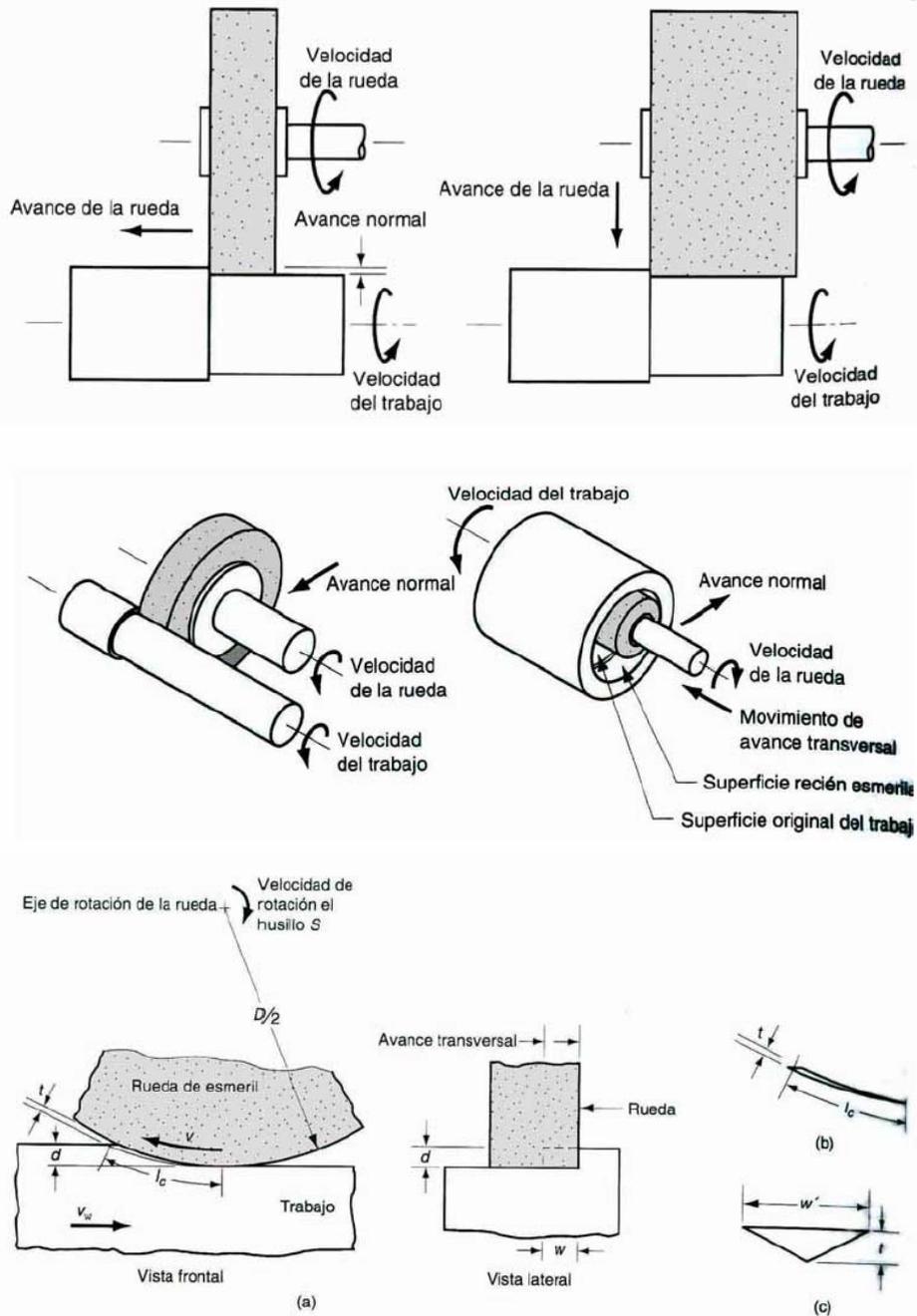


Fig. 3.50

Velocidad de corte, v	MRR [mm^3/min]
$v = \pi ND$	$MRR = dwV_w$
$l_c = \sqrt{Dd}$	$r = 2w'/t$
$V_w C \frac{rt^2 l}{4} = V_w w d$	$Vol_{ch} = \frac{wtl}{2} = \frac{rt^2 l'}{4}$
	$t = \sqrt{\frac{4v}{VCr}} \sqrt{\frac{d}{D}}$

Fig. 3.51



El movimiento de corte consiste en una rápida rotación de la muela en torno a su eje, con un sentido tal que la velocidad periférica en la zona de contacto con la pieza se dirija hacia abajo. Esta velocidad debe ser la máxima posible en compatibilidad con la resistencia de la muela, cuyo aglomerado está solicitado por fuerzas centrífugas.

El movimiento de avance periférico pertenece a la pieza y consiste en una rotación en torno a su propio eje. Su sentido tiene que producir una velocidad relativa entre la pieza y la muela igual a la suma de ambas velocidades y simultáneamente debe impedir una acción de arrastre sobre la pieza. Sirve para alimentar, en una sección transversal dada, nuevo material para arrancar y, por tanto, su velocidad depende del propio material, de la profundidad de la pasada y de la longitud del arco de contacto entre la pieza y la muela. Para los aceros es de 8-15 m/mn.

Las condiciones de esmerilado de desbaste determinan la máxima profundidad de corte. En la operación de acabado la profundidad de corte suele ser pequeña, de 0.0005 a 0.001 pulg (de 0.013 a 0.025 mm). Es posible lograr buen acabado superficial y poca tolerancia mediante el "chisporroteo" o dejando que la rueda se desplace sobre la pieza de trabajo sin aumentar la profundidad de corte, hasta que se apagan o extinguen las chispas. La relación de esmerilado, o número G, es el cociente de las pulgadas cúbicas de material para labrar eliminadas, y las pulgadas cúbicas que pierde la rueda de esmeril.

▪ Velocidad de corte

Se entiende por velocidad de corte de una muela, su velocidad periférica expresada en m/s. es un factor que influye decisivamente en la vida y rendimiento de la muela. Cuánto mayor sea la velocidad de corte de la muela, mayor será su fuerza centrífuga y su rigidez dinámica, lo cual repercutirá positivamente en su duración y estabilidad dimensional. Sin embargo, una velocidad demasiado elevada afectará negativamente a su poder de corte al perder capacidad de auto-avivado-granos abrasivos aún activos son arrancados demasiado pronto del aglomerante provocando que la muela se emboce rápidamente. Su superficie queda brillante, la muela vibra y pueden aparecer chispas. Por el contrario, una muela utilizada a velocidades demasiado pequeñas se desgastará antes debido a su menor rigidez dinámica. Como regla general, para obtener un mayor rendimiento y una mejor rentabilidad, se recomienda elegir una velocidad elevada pero vigilando que la muela no se emboce.

La velocidad de corte viene supeditada al tipo de aglomerante de la muela y a que el rectificado se realice con o sin refrigeración. En el cuadro adjunto se indican unos valores orientativos que deben servir de guía para ser optimizados en función del proceso de rectificado y las condiciones disponibles en la máquina.

Velocidades de corte recomendadas

Tipo de abrasivo	Tipo de aglomerante	Rectificado en húmedo m/s	Rectificado en seco m/s
Diamante	B: resina sintética	20- 30	10-20
Diamante	M: metálico	15- 25	10-15
Diamante	V: cerámico-vitrificado	10- 20	
Diamante	G: galvánico	10- 20	10-15
CBN	B: resina sintética	40- 80	15-30
CBN	M: metálico	40- 80	10-20
CBN	V: cerámico-vitrificado	40- 60	
CBN	G: galvánico	40-125	10-30

Tabla 3.29

El movimiento de regulación radial es intermitente; se comunica a la muela al final de cada pasada completa y la desplaza una longitud igual a la profundidad de la pasada.

▪ **Volumen específico de materia arrancada por unidad de tiempo (Qw')**

El volumen específico de materia arrancada por unidad de tiempo (Qw') representa la capacidad de arranque de materia de una muela en mm³, por cada mm de anchura de capa abrasiva y por segundo. Este valor permite comparar los diversos procesos de rectificado y evaluar su capacidad de corte. El valor Qw' se utiliza para calcular la profundidad de pasada y el avance.

$$Qw' = \text{mm}^3 / \text{mm} / \text{s}$$

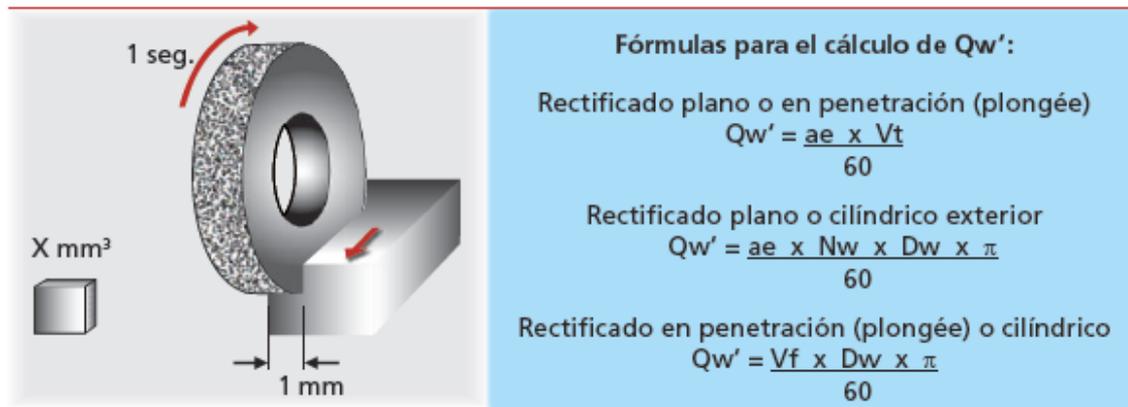


Fig. 3.52

Símbolos: ae = profundidad de pasada en mm
 Vt = velocidad de avance en mm/min
 Dw = diámetro de la pieza a rectificar en mm
 Nw = velocidad de rotación de la pieza en rpm
 Vf = velocidad radial de penetración (avance) en mm/min

▪ **Acabado superficial**

Mejora a medida que disminuye el tamaño de grano abrasivo y aumenta la velocidad de corte.

▪ **Fuerza y energía**

Par generado:

$$u_t = T\omega / MRR$$

La energía y la fuerza necesaria para este tipo de mecanizado es mucho mayor que la desarrollada en los mecanizados de filo convencional. La superficie de contacto es mucho mayor, y por ende, también la zona de fricción. Los principales factores que influyen y determinan este esfuerzo son:

- Tamaño de la viruta
- Ángulos de corte negativos
- Posición aleatoria de los granos, tres tipos de acción: corte, roturado y roce.

▪ Temperatura en la superficie de trabajo

El control de la temperatura de trabajo en este proceso ha de ser exquisito, ya que será este el mecanizado último de la pieza y tras este debe conservar todas las propiedades exigidas en el diseño. No podrá ser dañada térmicamente la superficie. Una alteración térmica grave podría significar el desecho de la pieza y la pérdida de una inversión que la empresa debe de cuidar muy bien.

Las altas temperaturas en los procesos de rectificado, pueden producir quemaduras, grietas, pérdidas de dureza y esfuerzos residuales.

Para evitar que esto se produzca se deben controlar los parámetros de mecanizado, materiales de rectificado, velocidad de corte, entre otros; pero también es importante observar el buen estado del material de la muela. Existen diversos mecanismos que producirán a lo largo del tiempo y del uso la degradación de los granos abrasivos. Estos mecanismos son principalmente:

- Fractura de granos.
- Por roce
- Fractura por el aglutinante
-

▪ 3.4.3 MUELAS

Arranque de viruta por abrasivos

Este procedimiento de conformación se basa en las propiedades cortantes de unos productos de gran dureza y resistencia al calor, denominados abrasivos, contenidos en las muelas.

Estos abrasivos, reducidos a granos de tamaño mínimo, están dispersos de la forma más homogénea posible en el seno de una masa aglutinante que los sostiene y que, a la vez, permite conformar la herramienta abrasiva o muela, de modo que sea apta para el trabajo de esmerilado.

Examinando una muela, se puede apreciar, incluso a simple vista, los granos abrasivos cohesionados por el aglomerante, que no llega a ocupar todo el espacio intergranular, sino que aparece dejando poros de tamaño variable cuya existencia es imprescindible para un mecanizado correcto.

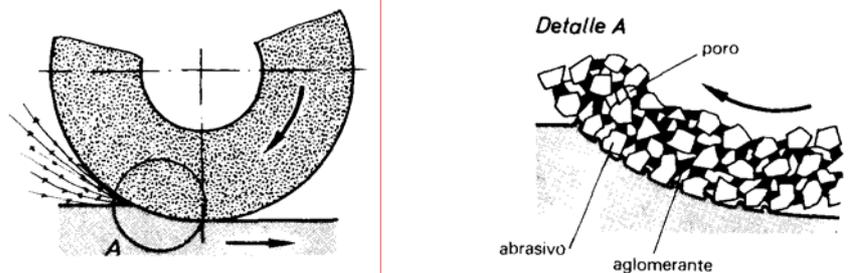


Fig. 3.53 Arranque de viruta por abrasivos.

En efecto, las partículas de material arrancadas por los granos abrasivos se depositan en los poros de la muela hasta ser proyectados por la fuerza centrífuga, muchas veces en estado incandescente, formando un haz de chispas característico.



3.4.3.1 CLASES DE ABRASIVOS

En primer lugar están los abrasivos naturales, como el cuarzo, el esmeril, el corindón natural, etc.; todos ellos tienen poco interés industrial, a excepción del diamante.

Los abrasivos más empleados son los artificiales, sobre todo el corindón artificial y el carburo de silicio. También están el diamante artificial y el nitruro de boro.

Los abrasivos utilizados actualmente son artificiales. El Alundum (hasta 99 % de Al_2O_3 cristalizado) conocido en el comercio también con los nombres de Corundum, Coralund, Aloxite y Alucoromax, se utiliza generalmente para trabajar aceros. El carburo de silicio (SiC) conocido como Carborundo. Crystolon y Carborite, más duro, pero menos resistentes a la rotura, se utiliza para materiales durísimos que son poco tenaces (fundiciones y carburos metálicos) o materiales blandos (aluminio, latón y bronce). El Borolón es el abrasivo artificial más duro y resistente que se conoce.

La dimensión de los granos está vinculada a la utilización de la muela: para muelas desbastadoras se emplea grano grueso; para operaciones de rectificado se pasa de los granos medianos a los finos, hasta llegar a los polvos utilizados para el pulido. El número índice del grosor de los granos expresa el número de hilos por pulgada contenido en el último cedazo separador atravesado (los granos más finos llegan hasta 240 hilos).

Como ya hemos dicho, hoy en día a nivel industrial se utilizan como materiales abrasivos casi exclusivamente materiales duros cristalinos de fabricación sintética. Los materiales abrasivos convencionales más utilizados son el corindón (óxido de aluminio) y el carburo de silicio.

El corindón es un óxido de aluminio (Al_2O_3) cristalino y se divide, por pureza creciente, en corindón normal, corindón semipuro y corindón puro. El corindón normal y semipuro se obtiene por fundición de bauxita y calcinada y corindón puro de alúmina pura en el horno eléctrico de acero, a unos 2.000°C. por medio de diversos aditivos y un enfriado determinado, se varía la viscosidad del corindón. A mayor proporción de Al_2O_3 , mayor será la dureza y la acritud del corindón.

Los corindones sinterizados microcristalinos se distinguen de los corindones fundidos en su fabricación y propiedades. Por su proceso especial de fabricación, en el corindón sinterizado se forma una estructura granular especialmente homogénea y finamente cristalina.

La estructura finamente cristalina sólo permite la aparición de pequeñas partículas en caso de desgaste granular creciente, de esta forma se aprovecha al máximo el grano abrasivo.

El carburo de silicio (SiC) es un producto puramente sintético y se obtiene en el horno eléctrico de resistencia a partir de arena de sílice y coque a unos 2.200 °C. Se distingue el carburo de silicio verde y el negro con viscosidad ligeramente creciente.

El carburo de silicio es más duro, más frágil y de cantos más vivos que el corindón. El carburo de silicio se aplica mayoritariamente con materiales duros y frágiles como fundición gris y metal duro, así como con metales no férricos.



Fig. 3.54

3.4.3.2 TAMAÑO DE GRANO

- Determina el acabado superficial y la velocidad de remoción del material
- Varía en función del material de trabajo.
- Se utiliza una escala para definir el tamaño de grano que varía entre el 8 (mas grueso) hasta 600 (mas fino).
- El número indica la cantidad de aberturas por pulgadas lineales en una criba estándar, a través de la que pasaría la mayor parte de las partículas de un tamaño específico.
- A partir de un tamaño de grano de 240, el grano abrasivo deja de clasificarse por cribas normalizadas, sino que se hace por un complejo sistema de sedimentación.

El tamaño de grano influye como hemos visto, en el rendimiento de la muela, su capacidad de arranque de materia, la rentabilidad del rectificado y la calidad de la superficie rectificada. El tamaño de grano refleja aproximadamente el diámetro nominal de los granos, de forma que un número alto indica un grano grueso, mientras que un valor bajo representa un grano fino. Un calibrado preciso del tamaño de grano – por tamizado o decantación – es indispensable para determinar la calidad y rugosidad de la superficie a rectificar y la capacidad de corte y rendimiento de la muela.

La forma de los granos también juega un papel importante en el rendimiento de la muela. Los granos pueden presentar desde formas redondeadas y en bloques como en la figura 1 hasta otras más alargadas y fragmentadas como en la figura 2.

La estructura de los granos puede ser monocristalina o policristalina. Mientras que los monocristales (fig1) se distinguen por su dureza y resistencia a los golpes, los policristales (fig 3) presentan una mayor tendencia al fraccionamiento. Durante el rectificado, se produce la rotura de los cristales – engarzados los unos con los otros – del grano, formándose continuamente nuevas puntas y aristas cortantes que, junto al desprendimiento de los fragmentos de grano gastado, mantienen viva la capacidad de arranque de material de la muela.

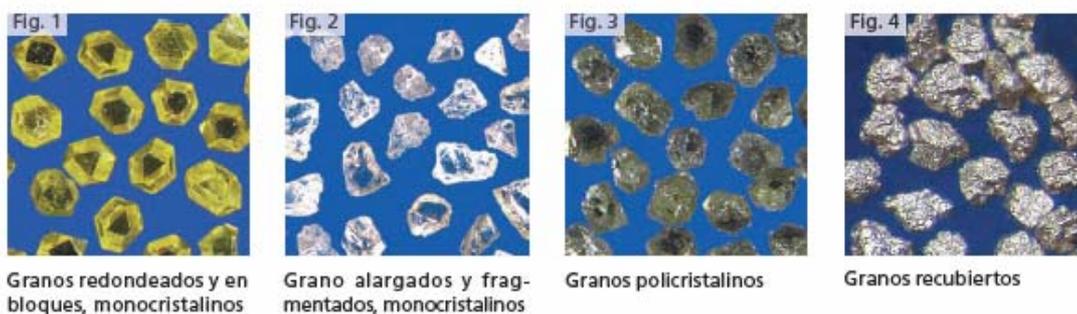


Fig.3.55

El recubrimiento de los granos con una capa metálica, proceso conocido como coating, permite mejorar la fijación de los granos en el aglomerante ya que la rugosidad que aporta la superficie recubierta sujetará mucho mejor al grano en el aglomerante. Además, la capa metálica distribuirá y dispersará más uniformemente el calor producido en el proceso de rectificado en el aglomerante, produciendo un aislamiento térmico del grano de diamante. De esta forma la temperatura generada en el afilado será menor, el diamante, que es un excelente



conductor de calor según se puede constatar en el gráfico adjunto, pero cuya dureza varía mucho en función de la temperatura, se calentará menos y la muela mantendrá su capacidad de corte durante un mayor periodo de tiempo.

- Material aglutinante
 - Sujeta a los granos, y define la forma y estructura de la rueda.
 - Propiedades deseables: resistencia, tenacidad, dureza y resistencia a la temperatura.

Tipos:

- Vitrificados: arcillas cocidas y materiales cerámicos.
- De silicato de sodio.
- Caucho o hule.
- Resinoides
- De Laca.
- Oxiclорuros.

Propiedades fundamentales de los aglomerantes

	Capacidad de corte	Estabilidad dimensional	Resistencia térmica	Conductividad térmica	Capacidad de reavivado del grano
Resina sintética	↑	→	→	→	↑
Metálico	→	↑	↑	↑	→
Cerámico vitrificado	↑	→	↑	↓	↑
Metalocerámico	→	↑	↑	↓	↓

↑ = Muy buena	→ = Buena	↓ = Insuficiente
---------------	-----------	------------------

Tabla 3.30

Las características de un aglomerante se pueden modificar añadiendo una serie de materiales de relleno. Dichos aditivos aportan las siguientes propiedades:

- Rellenos de soporte: mejor soporte del grano y mejor protección contra el desgaste.
- Rellenos metálicos: mejor transmisión del calor y mejor fijación de los granos.
- Rellenos lubricantes: reducción del calor de fricción y mejor evacuación de viruta
- Rellenos porosos: mayor acción refrigerante y reducción de las superficies de contacto.

Gracias a una multitud de aglomeraciones cerámicas es posible adaptar la piedra de bruñir exactamente al proceso de mecanizado correspondiente. El aglomerante tiene la misión de mantener el grano en la piedra de bruñir hasta que se haya despuntado por el proceso de corte. Entonces el aglomerante debe soltar el grano de forma que se aplica un nuevo grano, afilado. Las piedras de bruñir se fabrican mayoritariamente en aglomerante cerámico.

3.4.3.3 ESTRUCTURA DE LA RUEDA

Espaciamiento relativo de los granos abrasivos.

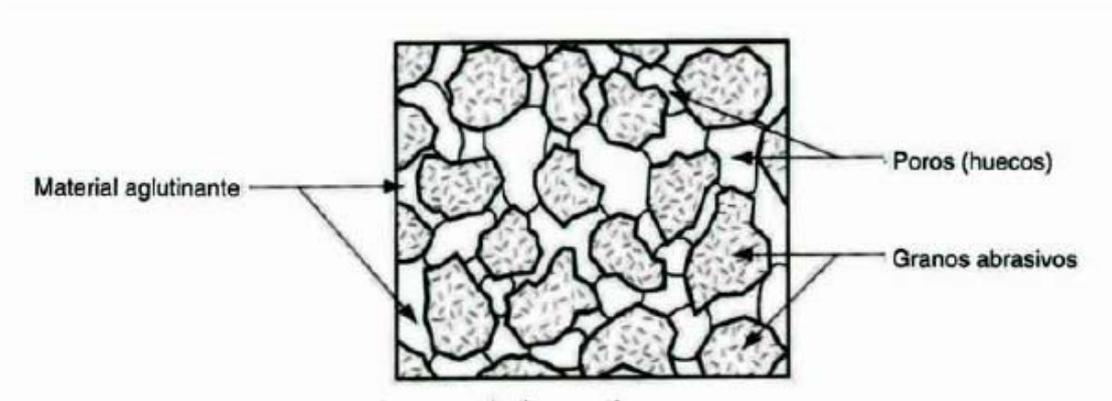


Fig. 3.56

La proporción volumétrica se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Volumen}_{\text{grano}} + \text{Volumen}_{\text{poros}} + \text{Volumen}_{\text{aglutinante}} = 1$$

Y se define su estructura como abierta o densa, en función de si la superficie cubierta por el grano abrasivo es muy elevada (estructura densa), o por el contrario si es reducida se dice que tiene una estructura abierta.

También puede existir un parámetro conocido como grado de la rueda, que se define como la resistencia del aglutinante para retener los granos abrasivos. Se mide en función de $\text{Volumen}_{\text{aglutinante}}$ y varía desde grado suave, hasta duro.



3.4.4 ESPECIFICACION DE LAS RUEDAS DE ESMERILADO

La norma ANSI define un sistema basado en letras y números:

Prefijo	Tipo de abrasivo	Tamaño de grano	Grado	Estructura	Tipo de aglutinante	Registro del fabricante
30	A	46	H	6	V	XX

Prefijo:	Símbolo del fabricante para el abrasivo
Tipo de abrasivo:	A = Óxido de aluminio
	C = Carburo de silicio
	etc
Tamaño del grano:	Burdo = tamaños de grano 8,10,12,14,15,20,24
	Mediano = tamaños de grano 30, 36, 46, 54, 60
	Fino = tamaños de grano 70,80,.....180
	Muy fino = tamaños de grano 220, 240,.....60.
Grado:	La escala va de la A a la Z: A = suave, M =mediano, Z = duro.
Estructura:	Escala numérica: 1 = estructura muy densa, 15 = estructura muy abierta.
Tipo de aglutinante:	B = resinoso
	E = laca
	R = hule
	S = silicato
	V= vitrificado
Registro del fabricante:	Marca privada de identificación de la rueda (opcional).

Tabla 3.31

3.4.5 REFRIGERANTE/FILTRADO

La refrigeración de la muela con un producto adecuado mejora considerablemente su capacidad de corte y rendimiento. El refrigerante es un excelente medio par disipar el calor generado en el rectificado, facilitar la evacuación de virutas y residuos y procurar lubricación a la muela. Por tanto debe trabajarse con refrigeración siempre que la máquina y el tipo de trabajo lo permitan.

Para bruñir se emplean mayoritariamente aceites de bruñir poco viscosos (muy fluidos). La misma temperatura del aceite de bruñir puede influir en el resultado del mecanizado. Con un aceite de bruñir demasiado frío (p. ej. Después de un fin de semana de invierno en una sala sin calefacción), la viscosidad aumenta. En verano y/o con una instalación refrigerante de poca capacidad, el aceite de bruñir se puede volver demasiado fluido por las altas temperaturas.

Como consecuencia de la dilatación térmica de la máquina y de la pieza de trabajo pueden surgir problemas con la tolerancia de las medidas. Las temperaturas ideales para los aceites de bruñir son de 20-25 °C. Para el mecanizado de precisión se debe prestar atención a que haya un filtrado suficiente del aceite de bruñir. Si el filtrado es insuficiente, algunas partículas no filtradas

pueden producir rayas profundas en la superficie. La industria ofrece multitud de sistemas de filtrado.

Causa	Efecto
Demasiado frío	⇒ Alta viscosidad (poco fluido), Mala superficie
Demasiado caliente	⇒ Baja viscosidad (muy fluido), Errores en la medidas por dilatación térmica
Insuficiente	⇒ Sin capacidad de corte, mala superficie

Ideal: 20-25 °C de temperatura del aceite de bruñir

Fig. 3.57

En el trabajo con muelas de CBN, la utilización de aceite mineral puro como refrigerante permite llegar a triplicar la duración de la muela en relación a su empleo con otros refrigerantes de base acuosa.

Para obtener una óptima refrigeración, el caudal de refrigerante debe ser abundante y bien dirigido a la zona de contacto muela-pieza. Se recomienda dirigir el chorro de refrigerante a alta presión con un ángulo de unos 20° respecto de esta zona de contacto.

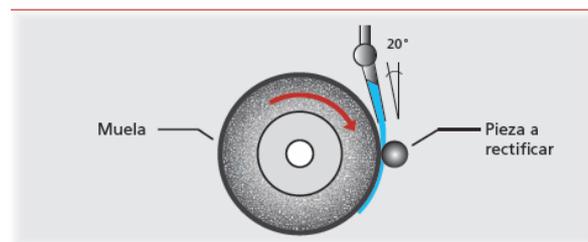


Fig. 3.58

El refrigerante ha de estar limpio y exento de partículas sólidas ya que, en caso contrario, conduciría al embozamiento de la muela. La boquilla de refrigeración debe estar en buen estado y tener una anchura ligeramente mayor a la capa de la muela (por ejemplo, para una muela de capa 10 mm, boquilla de 11 mm) para asegurar la llegada de refrigerante a toda la superficie de corte de la muela. Un último factor a considerar es la velocidad de salida del refrigerante. Esta deberá ser lo más aproximada posible a la velocidad periférica de la muela (V_s). En la tabla siguiente se relaciona dicho valor con la presión de refrigeración (P) necesaria:

V_s en m/s	P en bar	
	óptima	mínima
10	1	0.6
20	2	1.2
30	5	3.0
40	8	4.8
50	13	7.8
60	19	11.4

Fig. 3.59



▪ 3.5 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE RECTIFICADO

Los parámetros de rectificado han sido basados en tablas del fabricante de muelas de rectificado "Atlántic". Se considera que una empresa especialista en el suministro de este tipo de productos sabrá ofrecer la mejor de las opciones para las exigencias del proceso de mecanizado.

Calidad de la superficie rectificada en función del tamaño de grano

Muela de diamante/CBN, forma vaso, resina, rectificado cruzado de HM K20/HSS 64 HRC

Tamaño de grano según norma FEPA		Rugosidad media Ra		Calidad de superficie rectificada	Tipo de rectificado
D	CBN	D	CBN	N	
	B 301		2.100	N8	Desbaste
	B 251		1.770	N8	Desbaste
	B 213		1.410	N7	Desbaste
	B 181		1.120	N7	Desbaste
	B 151		0.750	N6	Desbaste
	B 126		0.660	N6	Desbaste
D 181	B 107	0.530	0.530	N6	Rectificado basto
D 151	B 91	0.500	0.500	N6	Rectificado basto
D 126	B 76	0.450	0.450	N6	Rectificado basto
D 107	B 64	0.400	0.400	N5	Rectificado previo
D 91	B 54	0.330	0.330	N5	Rectificado previo
D 76	B 46	0.250	0.250	N5	Rectificado previo
D 64		0.180		N4	Rectificado fino
D 54		0.160		N4	Rectificado fino
D 46		0.150		N4	Rectificado fino
MD 25		0.120		N3	Pulido
MD 20		0.050		N2	Pulido
MD 10		0.025		N1	Pulido

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
Ra (µm)	0.025	0.05	0.10	0.2	0.4	0.8	1.60	3.20
Rt (µm)	0.500	0.80	1.25	2.5	5.0	8.0	16.0	32.0
Rz (µm)	0.400	0.63	1.00	2.0	4.0	6.3	10.0	16.0

Tabla 3.32

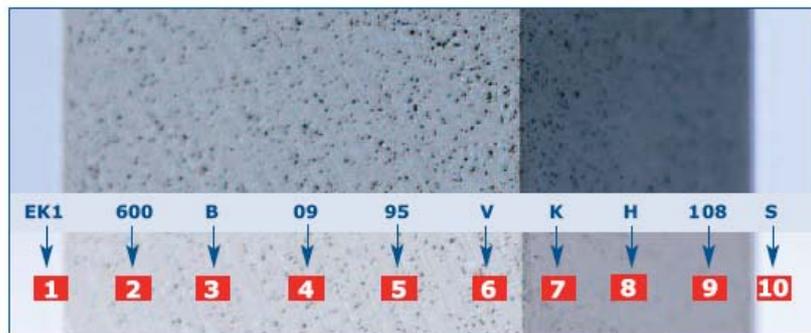
Como requisito de rugosidad superficial en el proceso de rectificado se debe conseguir una rugosidad N2. Esta es por tanto una operación final de pulido y se hará directamente con una muela por el torneado de acabado al que van a ser sometidas las superficies a rectificar. Por tanto, según tabla debemos elegir una muela MD 20.

Industria del automóvil		Especificación ATLANTIC
Acabado pasante de vástagos de amortiguador (Después del cromado)	Estación 1	EK1 400 - 0 - 110 VKH S
	Estación 2-3	EK1 400 - 07 - 175 VKH S
	Estación 4-5	EK1 600 - 03 - 200 VKH S
	Estación 6-7	EK1 800 - 03 - 200 VKH S
	Estación 8	EK1 1000 - 02 - 140 VLO S
Árbol de levas (fundición)		SC9 800 - 05 - 35 GVYY
Cigüeñal (fundición)		EK1 800 - 08 - 105 VLD 4 S
Cigüeñal (acero)		EK1 1000 - 08 - 45 VLO 109 S

Tabla 3.33

El código de herramienta recomendada es el:

EK1 800 - 08 - 105 VLD 4 S



- | | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| 1 Materiales abrasivos | 6 Clase de aglomerante |
| 2 Tamaño de grano | 7 Tipo de aglomerante |
| 3 Combinación de grano* | 8 N° de acabado |
| 4 Estructura | 9 N° tejido* |
| 5 Dureza | 10 Impregnación* |

* Estos datos son opcionales, es decir, no se indican en todas las calidades

Fig. 3.60

▪ **Material**



Corindón puro 99,5 % Al₂O₃
 Notación abrev.: EK 1

Fig. 3.49



▪ **Identificación de tamaño de grano.**

Identificación de tamaño de grano (mesh)	Diámetro medio de grano en μm			
	DIN ISO 6344	JIS	ANSI	
60	270	270	270	Macrogramos
70	230		230	
80	190	190	190	
90	160		160	
100	140	165	140	
120	120	120	120	
150	95	95	95	
180	80	80	80	
200	70			
220	60	70	70	
240	45	57	57	Microgramos
280		48	37	
320	29	40	29	
360		35	23	
400	17	30	17	
500	13	25	13	
600	9	20	9	
700		17		
800	7	14	7	
1000	5	12	4	
1200	3	10	3	
1500	2	8		
2000	1	7		
2500		5		
3000		4		
4000		3		
6000		2		
8000		1		

Tabla 3.34

▪ **Estructura**

La estructura de una muela abrasiva se indica a través de un número que va de 1 a 18 y define la distancia de granos abrasivos entre sí dentro de un cuerpo abrasivo. Los números de estructura bajos identifican distancias entre granos pequeñas, los números altos distancias grandes.

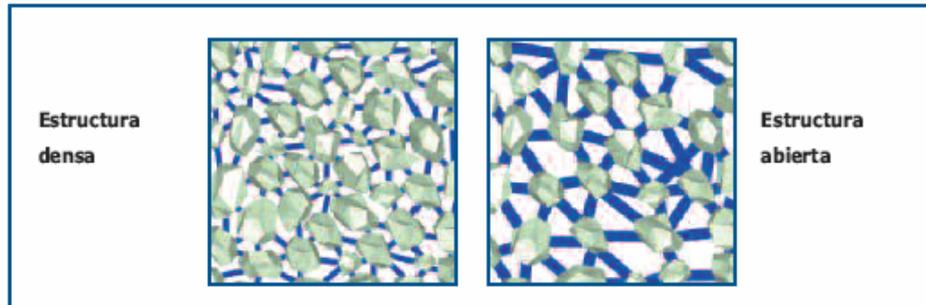


Fig. 3.62

1 a 4	denso
5 a 7	normal
8 a 11	abierto
12 a 18	muy abierto

Tabla 3.35

▪ **Dureza de las piedras de bruñir**

La dureza identifica la resistencia con la que el aglomerante mantiene el grano dentro del cuerpo abrasivo. Para piedras de bruñir en aglomerante cerámico y un grano 150 o más fino, la dureza se identifica con un número, donde 200 significa una piedra de bruñir extremadamente blanda, y/o extremadamente dura. Para granos de 120 y más gruesas, la dureza de la piedra de bruñir se identifica de forma análoga a la de las muelas abrasivas, usando una letra del alfabeto desde la "A" (muy blanda) hasta la "Z" (muy dura).

La prueba de la dureza

La clasificación de las piedras de bruñir en niveles de dureza es considerablemente más fino en comparación con las muelas abrasivas. Las piedras de bruñir con un tamaño de grano de 150 o más fino se someten a un proceso de prueba específico, En este proceso de prueba Rockwell modificado se genera una presión esférica sobre el bloque de piedra de bruñir bajo unas condiciones definidas. El valor de dureza se obtiene a partir de la profundidad de la huella de la esfera. Cuanto mayor sea la cifra, mas blanda es la piedra.

Dureza de la piedra

Identificación	Dureza mínima	Dureza máxima
Tamaño de grano 150 o más fino	200	0
Tamaño de grano 120 o más grueso	A	Z

Prueba de dureza

Diámetro de la esfera	5 mm
Carga previa	98,1 N (10 Kg)
Carga principal	490,5 N (50 Kg)

Tabla 3.36



A a D	Extremadamente blando
E a G	Muy blando
H a K	Blando
L a O	Medio
P a S	Duro
T a Z	Extremadamente duro

Tabla 3.37

▪ Aglomerante

El aglomerante tiene la misión de mantener el grano de la muela abrasiva hasta que se haya despuntado por el proceso de corte. Entonces, el aglomerante debe soltar el grano de forma que se aplica un nuevo grano, afilado. Esta propiedad se puede adaptar al proceso abrasivo correspondiente con el tipo de aglomerante y la cantidad del mismo. Las muelas abrasivas "Atlantic" se fabrican con dos grupos de aglomerantes: aglomerantes cerámicos (V) y aglomerantes resinoides.

Como hemos visto, el aglomerante recomendado es el cerámico. Los aglomerantes cerámicos se componen de caolín, cuarzo, feldespato y fibras de vidrio. Mezclando estos componentes se puede ajustar la característica del aglomerante. Los aglomerantes cerámicos son químicamente resistentes frente a los aceites y las emulsiones, pero frágiles y sensibles a los choques. El desgaste del aglomerante lo produce la presión abrasiva.

▪ Velocidad de corte

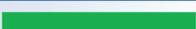
Velocidad de corte	Bandas de color	
hasta 40 m/s	ninguna	
50 m/s	azul	
63 m/s	amarillo	
80 m/s	rojo	
100 m/s	verde	
125 m/s	azul/amarillo	

Tabla 3.38

Tipo de abrasivo	Tipo de aglomerante	Rectificado en húmedo m/s	Rectificado en seco m/s
Diamante	B: resina sintética	20– 30	10–20
Diamante	M: metálico	15– 25	10–15
Diamante	V: cerámico-vitrificado	10– 20	
Diamante	G: galvánico	10– 20	10–15
CBN	B: resina sintética	40– 80	15–30
CBN	M: metálico	40– 80	10–20
CBN	V: cerámico-vitrificado	40– 60	
CBN	G: galvánico	40–125	10–30

Tabla 3.39



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 160 / 205

	Tronzado (Tg)
f_n : Avance (mm/min)	15
A_e : profundidad de pasada (mm)	0,2
V_c : Velocidad de corte (m/s)	50
L_a : Ancho de muela (mm)	8
N_w velocidad de rotación de la pieza (rpm)	500
Q_z : Arranque de metal (cm ³ /min)	112,2
D_w : Diámetro de la pieza a rectificar	48,6 / 54

Tabla 3.40

Según fórmula de la Fig. 3.52:

$$Q_{w\text{-muñequillas}} = a_e \times N_w \times D_w \times \pi / 60 = 0,2 \times 500 \times 48,6 \times \pi / 60 = 254,46 \text{ mm}^3/\text{s}$$

$$Q_{w\text{-apoyo cojinetes}} = a_e \times N_w \times D_w \times \pi / 60 = 0,2 \times 500 \times 54 \times \pi / 60 = 282,73 \text{ mm}^3/\text{s}$$



■ 12 CONTROL NUMÉRICO COMPUTERIZADO

■ Introducción

El control numérico (CNC) es un sistema que permite automatizar y controlar todas las acciones que debe efectuar la máquina-herramienta. En general, mediante un CNC se pueden controlar los siguientes aspectos:

- Los movimientos de los carros o del cabezal
- El valor y sentido de las velocidades de avance y de corte
- Las condiciones de funcionamiento de la máquina-herramienta, incluyendo los aspectos relacionados con el modo de trabajar (con o sin refrigerante, etc.) y el estado de funcionamiento (deficiencias, averías, etc.)

Al mismo tiempo, el control numérico se encarga de coordinar otras funciones propias del mismo, entre las cuales se encuentran por ejemplo:

- El control de flujos de información
- El control de la sintaxis de programación
- El diagnóstico de su funcionamiento

Toda la información necesaria para la obtención de una pieza constituye el programa de control numérico, que es escrito en un lenguaje o código especial por medio de caracteres alfanuméricos sobre un soporte físico (en un principio utilizando una cinta perforada, posteriormente una cinta magnética y en la actualidad en formato digital).

La pauta a seguir para llevar a cabo el mecanizado de la pieza mediante un programa de control numérico es la siguiente:

En primer lugar se escribe el programa CNC para la pieza a partir de la información disponible, que básicamente viene dada en los planos de diseño. Como esta fase se realiza de una forma externa e independiente de la máquina-herramienta, no impide que la máquina-herramienta pueda seguir en funcionamiento mientras tanto.

Se efectúa el acopio de piezas de partida, herramientas de corte y utillaje que sean necesarios.

Posteriormente se colocan las herramientas, el utillaje y la pieza en la máquina-herramienta y se introduce el programa en la unidad de control.

Se pone en marcha la máquina-herramienta y, una vez terminada la operación, se comprueba si la pieza presenta las características metrológicas deseadas. Si no se cumplen las propiedades dimensionales y acabado superficial requeridos, se comprueba si esto se debe a una mala programación y, en caso afirmativo, se corrige el error inmediatamente a pie de máquina, pero si el error es debido al ajuste incorrecto de las herramientas de corte se pueden modificar los reglajes en la unidad de control.



▪ Ventajas de la aplicación de las máquinas-herramienta con CN

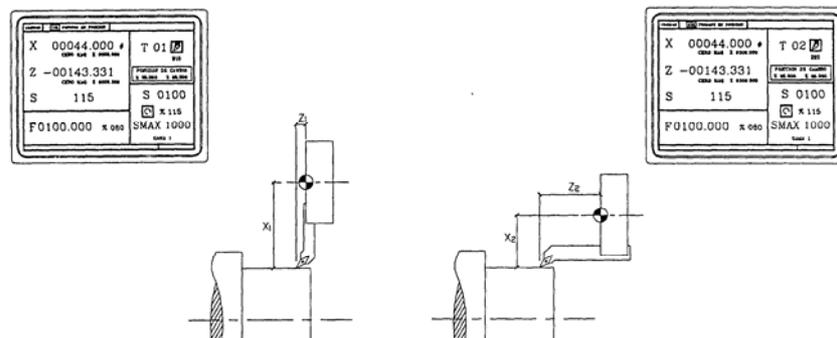
A continuación se enumeran algunas de las ventajas que en general pueden que presentar las máquinas-herramienta CNC:

- La reducción de los tiempos muertos durante el ciclo productivo. Las causas principales de la reducción al mínimo de estos tiempos superfluos son:
 - Trayectorias y velocidades más ajustadas que en las máquinas convencionales
 - Menor revisión constante de los planos y hojas de instrucciones
 - Menor verificación de medidas entre operaciones
- El ahorro en herramientas de corte y utillaje. El ahorro en concepto de herramientas se obtiene como consecuencia del empleo de herramientas universales.
- En cuanto al ahorro de utillajes, se determina en base al menor número de operaciones en máquinas distintas.
- La obtención de una mayor precisión e intercambiabilidad en las piezas fabricadas.
- La reducción del porcentaje de piezas defectuosas
- La reducción del tiempo de cambio de pieza
- La disminución del tamaño del lote
- La reducción del tiempo de inspección. Dado que la probabilidad de que se produzcan piezas defectuosas dentro de una serie es menor, pueden evitarse inspecciones intermedias entre ciclos

▪ Reglaje de herramientas

El reglaje de herramientas es la operación mediante la cual le decimos al CNC cuales son las dimensiones de la herramienta. Es muy importante hacer bien esta operación para que las piezas salgan con las dimensiones correctas, y para que al hacer un cambio de herramienta, se siga controlando el mismo punto.

Torno



Diferentes dimensiones de herramienta, mismo punto.

Fig. 3.63 Reglaje de herramientas en el torno



Tabla de herramientas.

La información relativa a las herramientas, (como la posición que ocupan en la torreta, dimensiones, etc), se encuentran almacenadas en la tabla de herramientas. Cuando se realiza un cambio de herramienta, el CNC toma la información guardada en la tabla de esa herramienta.

La información incluida en la tabla es T, D, X, Z, I, K, A, B, C, R, F:

T: Número de herramienta.

D: Tabla donde se guarda la información de la herramienta. También hay que definir el tipo de herramienta seleccionada:

-  Herramienta rómbica.
-  Herramienta de roscar.
-  Herramienta cuadrada.
-  Herramienta redonda.
-  Herramienta motorizada.

X: Longitud de la herramienta (en radios)según el eje X.

Z: Longitud de la herramienta según el eje Z.

I: Corrector de desgaste en eje X

K: Corrector de desgaste en eje Z

A: Angulo de la cuchilla.

B: Anchura de la cuchilla.

C: Angulo de corte.

R: Radio de la herramienta.

F: Factor de forma o modo en el que se ha calibrado la herramienta

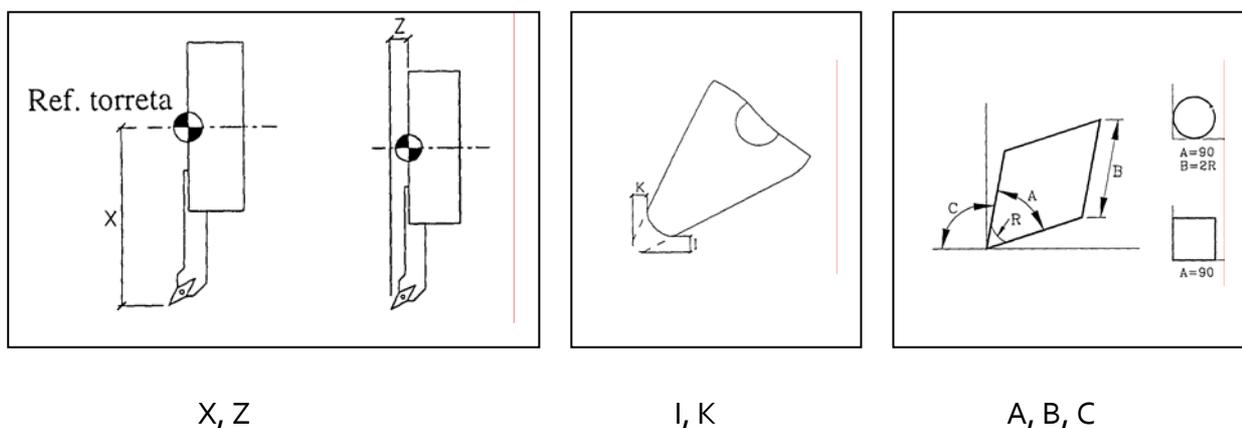


Fig. 3.64

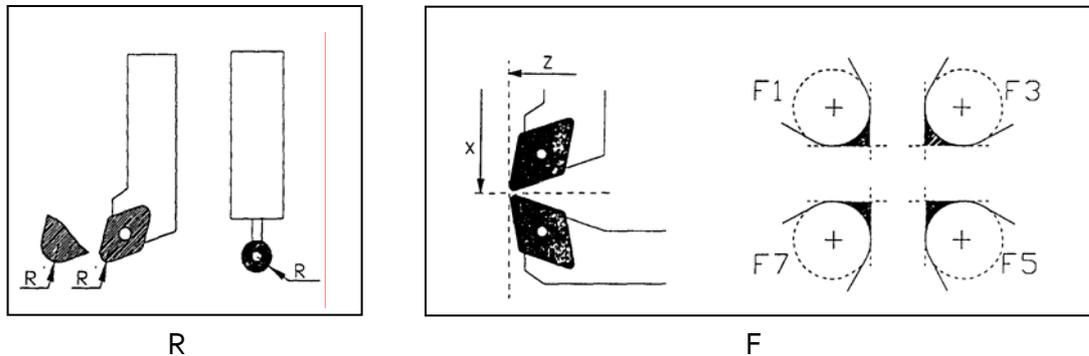


Fig. 3.65 Parámetros de la tabla de herramientas.

▪ Sistemas CAD-CAM

Si bien el CNC se está utilizando de forma continuada desde hace más de 20 años, es ahora cuando goza de un mayor protagonismo como consecuencia de la proliferación de las nuevas tecnologías y el bajo coste de las mismas, sobre todo si se une a métodos asistidos mediante ordenador como son el CAD/CAM. Las herramientas de CAD/CAM permiten la posibilidad de diseñar la pieza mediante un software que posteriormente permitirá establecer la ruta de la herramienta durante el proceso de corte. Este tipo de métodos será muy recomendable para el mecanizado en general, pero muy especialmente en aquellos casos donde las superficies a mecanizar sean difíciles o imposibles de obtener mediante el uso de una máquina-herramienta de CNC estándar, como es caso del mecanizado de piezas para su posterior utilización como moldes.

Mediante el uso de potentes aplicaciones informáticas se realiza el procesado de toda la información sobre procesos de fabricación y materiales disponibles en la base de datos de la organización. De esta forma, el Ingeniero de Fabricación utiliza el ordenador con el fin de obtener programas de control numérico, programación de robots, diseño de herramientas, inventario, gestión y control de calidad.

Según la norma ISO/IEC 2382-24:1995 se define CAM como: "Tipo de fabricación cuyos procesos productivos están controlados directamente mediante sistemas de procesamiento de datos"

Los sistemas CAD/CAM constituyen el enlace entre la fase de diseño y la de programación de las máquinas-herramienta con control numérico. Aunque este enlace parece a primera vista de fácil implantación, la realidad es bien distinta, debido principalmente a que la evolución experimentada en ambos sistemas ha sido por separado, no existiendo una conexión entre ellos y dificultando las labores posteriores de integración.

El diseño por ordenador permite obtener una representación de la geometría de la pieza que se quiere fabricar. En ésta se deberá incluir toda la información necesaria para que se produzca el mecanizado de la pieza con la precisión necesaria.

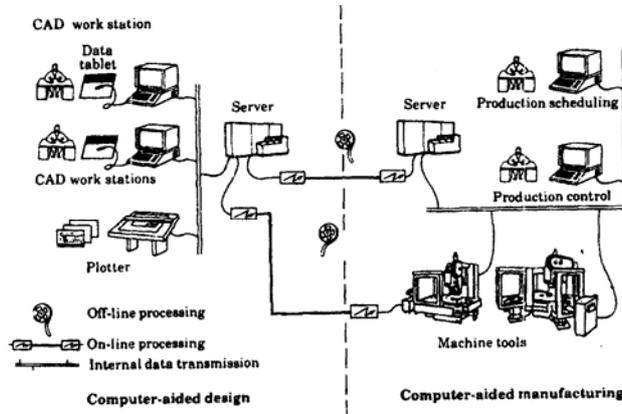


Fig. 3.66 Flujo de información en CAD/CAM

En los sistemas CAD/CAM se dispone de módulos de simulación del proceso de mecanizado que permiten reproducir en el ordenador los desplazamientos relativos entre la pieza y la herramienta y establecer las condiciones óptimas de mecanizado en función de: velocidades de corte, tipo de material o potencia de la máquina, entre otras. De esta forma, se dota a los ingenieros de fabricación de un instrumento eficaz, que es capaz de describir y optimizar el recorrido de la herramienta. Además, presenta como ventaja la facilidad de modificar el recorrido de la herramienta con la finalidad de adaptarse a nuevas formas geométricas de la pieza de trabajo.

Por otra parte, es importante disponer de bases de datos con toda la información referente a: procesos, herramientas y utillajes, entre otros, de manera que dicha información sea empleada en la planificación de nuevos procesos, en la simulación del mecanizado, o en la planificación y control de la producción.

Mediante el empleo de Computer-Aided Engineering (CAE) se pueden llevar a cabo simulaciones, análisis y tests sobre las piezas diseñadas con resultados muy precisos.

Los sistemas CAD/CAM tienen en la actualidad cada vez mayor relevancia en la fabricación de productos estandarizados donde se obtienen importantes reducciones en los esfuerzos de diseño y prueba de prototipos, reducciones de costes y aumento en la productividad. Como ejemplo, cabe mencionar la fabricación de los motores del Boeing 777, donde todo el diseño se realiza completamente por ordenador ("paperless design").



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 166 / 202

3.7 ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS

De proceso

Hoja: 1	Revi. Nº	Fecha	Por

PRODUCTO: Cigüeñal fundición PROCESO: RESPONSABLE: Patricio Mercader Siles

ESPECIFICACIÓN: OPERACIÓN: FECHA: 2 / 9 / 2008

FECHA DE EDICIÓN: ACTUAR SOBRE NPR > QUE: 100 REVISADO:

Nombre producto /pieza/ operación 1	Operación o función 2	Modo de fallo 3	Efectos de fallo 4	S	G	Causas del fallo O	Controles actuales 9	D	NPR	Acción correctora 12	Responsables 13	Acciones implantadas 14	Valoración			NPR 18	
				5	6								8	S 15	O 16		D 17
Cigüeñal	Colada	Desgarra miento	Pieza inservible o de difícil mecanizado posterior.	9		Separación del metal por una alta concentración de esfuerzos debido a indisponibilidad del metal para contraerse naturalmente.	2	Visual	5	90							
		Rechupado	Pieza inservible	10		Aporte del material fundido desde la mazarota incorrecto	4	Visual	3	120	Aumentar la temperatura de la mazarota con calentadores	Operaciones	La zona de la mazarota en el molde dispondrá de unos calentadores que mantengan el material en ella con viscosidad suficiente para fluir.	10	1	3	30
		Gota fría	Desgaste prematuro de las plaquitas en torneado por la discontinuidad de propiedades	2		Originada por una temperatura de colada insuficiente que no es capaz de refundir las gotas que solidifican prematuramente al salpicar en el molde	3	Ninguno	8	48							
	Marcado de centros	Sujeción imposible	Marcado de centros en puntos incorrectos	4		Piezas de medir incorrectamente calibradas	6	Ninguno	5	120	Implantación de un sistema de certificación y calibración de todos los instrumentos de medida.	Calidad	Contratación de una agencia acreditada para que certifique el correcto calibrado de las máquinas de medición que formen parte del proceso.	4	2	1	8
		Sujeción incorrecta en el torno	Vibraciones en el torno	3		Cono de presión para el agarra insuficiente	7	Visual	5	105	Aumentar la geometría de los puntos de sujeción	Ingeniería	Se realizará un aumento en dichos puntos de sujeción para un seguro agarre	3	2	5	30
	Torneado	Desgaste de incidencia	Deficiente acabado superficial	3		Velocidad de corte demasiado elevada	4	Visual	6	72							
3					Resistencia al desgaste insuficiente	4	Visual	6	72								
	Desgaste por entalladura	Acabado deficiente	3		Oxidación de la plaquita	6	Visual	6	108	Seleccionar una calidad con recubrimiento Al ₂ O ₃	Operaciones	La selección de las plaquitas se hará según recomendaciones de fabricante de renombre.	3	1	6	18	



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 168 / 202

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS

De proceso

Hoja: 3	Revi. Nº	Fecha	Por

PRODUCTO: Cigüeñal fundición **PROCESO:** **RESPONSABLE:** Patricio Mercader Siles

ESPECIFICACIÓN: **OPERACIÓN:** **FECHA:** 2 / 9 / 2008

FECHA DE EDICIÓN: **ACTUAR SOBRE NPR > QUE:** 100 **REVISADO:**

Nombre producto /pieza/ operación 1	Operación o función 2	Modo de fallo 3	Efectos de fallo 4	S	G	Causas del fallo O	Controles actuales 9	D	NPR	Acción correctora 12	Responsables 13	Acciones implantadas 14	Valoración			NPR 18	
				5	6			8	10				11	S 15	O 16		D 17
Cigüeñal	Torneado	Fisuras térmicas	Astillamiento y acabado superficial deficiente	5		Suministro de refrigerante desigual o insuficiente	4	Ninguno	5	100	Suministro continuo y en abundancia de refrigerante	Mantenimiento	Aumento del diámetro del conducto de suministro del refrigerante.	5	1	5	25
		Rotura de la plaquita	Daños en placa de apoyo y pieza mecanizada	4		Calidad demasiado frágil	6	Revisión por jefe de taller	5	120	Seleccionar una calidad más tenaz (pág. 118)	Operaciones	Seleccionamos material recomendado en catálogo Sandvik	4	2	1	8
				4		Carga excesiva en la plaquita	3	Ninguno	3								
				4		Geometría de la plaquita demasiado débil	6	Ninguno	6	144	Seleccionar una geometría suficientemente resistente (pág. 118)	Operaciones	Selección de una plaquita romboidal de 80 ° de ángulo	4	2	6	48
				4		Tamaño de plaquita demasiado pequeño	3	Ninguno	2	24							
	Fractura en trozos	Parada de equipo y daño superficial en la pieza	7		Excesiva presión de la herramienta	5	Ninguno	3	105	a)Reducir el avance b) Seleccionar una calidad más tenaz c) Selecciona una plaquita de chafán más pequeño	Operaciones	Seleccionamos un chafán de 20 mm para desbaste y de 10 mm para mecanizado medio y acabado.	7	2	2	28	
	Torneado (roscado)	Rotura de la plaquita	Imposible roscar	7		Torneado del diámetro inadecuado antes de la operación de roscado	2	Medición previa	1	14							
				5		Serie de penetración demasiado fuerte	5	Ninguno	4	100	Disminuir la penetración		Se disminuye la penetración y se disminuye también el sobreespesor de colada.	5	1	4	20
				5		Calidad inadecuada	2	Ninguno	2	20							
				3		Control de virutas deficiente	2	Ninguno	4	24							
Vibración		Roscado dificultoso, de ser intensa la vibración, roscado imposible	5		Fijación incorrecta de la pieza a trabajar	2	Autocomprobado por la máquina	1	10								
			5		Ajuste incorrecto de la herramienta	1	Autocomprobado por la máquina	1	5								
				5		Datos de corte incorrectos	4	Revisión por software	1	20							



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 169 / 202

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS											Hoja: 4	Revi. Nº	Fecha	Por				
De proceso																		
PRODUCTO: Cigüeñal fundición				PROCESO:							RESPONSABLE: Patricio Mercader Siles							
ESPECIFICACIÓN:				OPERACIÓN:							FECHA: 2 / 9 / 2008							
FECHA DE EDICIÓN:				ACTUAR SOBRE NPR > QUE: 100							REVISADO:							
Nombre producto /pieza/ operación 1	Operación o función 2	Modo de fallo 3	Efectos de fallo 4	S	G	Causas del fallo	O	Controles actuales 9	D	NPR	Acción correctora 12	Responsables 13	Acciones implantadas 14	Valoración			NPR 18	
				5	6		8		10					11	S 15	O 16		D 17
Cigüeñal	Torneado (roscado)	Perfil de rosca incorrecto	Roscado imposible	7		Perfil de rosca, ángulo de rosca y radio de punta inadecuados.	2	Ninguno	2	28								
				7		El portaplaquitas no está a 90° con respecto a la línea central	4	Atucomprobado por la máquina	1	28								
				7		Error de paso en la máquina	5	Ninguna	5	175	Simulación del proceso mediante software y comprobación de las medidas	Operaciones	Se recurre a software de simulación	7	2	1	14	
	Mecanizado	Pérdida de herramienta	Tiempo perdido	2		Uso irresponsable de las herramientas sin devolverlas al lugar de origen	9	Ninguno	6	108	Uso de máquinas de CNC con almacén propio de herramientas.	Operaciones	Uso de máquinas CNC para todas las operaciones del proceso.	2	2	1	4	
	Rectificadora	Rugosidad excesiva	Ruidos y pérdidas de potencia en el uso del cigüeñal	6		Incapacidad del torno para mecanizar con calidades tan exigentes	10	Ensayos previos de mecanizado	3	180	Procesos en una rectificadora las zonas críticas del cigüeñal	Ingeniería	Uso de la rectificadora para acabado para las zonas de acabado más exigente.	6	2	3	36	
		Sobremecanizado	Holguras excesivas	8		Mecanizado excesivo por fallo en el programador de CNC	5	Muestreo tras mecanizado	3	120	Simulación previa en software (Pág. 164)	Ingeniería	Uso de sistemas CAD/CAM	8	2	3	48	
		Ausencia de refrigerante	Calidad superficial deficiente	6		Insuficiente suministro de refrigerante	8	Visual	4	192	Inclusión de un dispositivo que aporte de manera continua un caudal constante de refrigerante.	Operaciones	Inclusión de dispositivo de control del refrigerante.	6	2	4	48	
		Refrigeración insuficiente	Calidad superficial deficiente	6		Alta viscosidad del refrigerante por temperatura excesivamente baja	3	Ninguno	6	108	Inclusión de un termostato y un indicador que asegure un flujo de refrigerante a la temperatura óptima	Operaciones	Inclusión de dispositivo de control del refrigerante.	6	1	3	18	
	Baja viscosidad del refrigerante	Holguras excesivas	8		Temperatura elevada del refrigerante que provoca una dilatación del material y la muela	5	Ninguno	6	240		Operaciones	Inclusión de dispositivo de control del refrigerante.	8	1	3	24		



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 170 / 205



IV. ANALISIS DE RESULTADOS Y MODIFICACIONES PROPUESTAS



▪ 4.1 MEDIDAS ADOPTADAS

▪ 4.1.1 AMFE DE DISEÑO

- 1.** El proceso de producción por forja al que son sometidos los cigüeñales al que son sometidos los producidos en acero es agresivo en cuanto a su estabilidad estructural, ya que supone un cambio brusco en cuanto a su geometría original. Es sabido que esto genera una tensión superficial que dificulta el mecanizado posterior y produce zonas con alta concentración de tensión. Esto desemboca en deformaciones y zonas frágiles en las que pueden producirse grietas. Por ello, se considera el proceso de colada mucho más beneficioso por no ser agresivo en absoluto con la estructura cristalina del material. Dicha estructura se adopta con la forma ya establecida dentro del molde, lo que reduce considerablemente ese componente de tensión residual.
- 2.** El tamaño de grano es un factor clave que condiciona enormemente las propiedades mecánicas del material. Por ello se hace indispensable un estudio previo para conocer las condiciones idóneas de enfriamiento para conseguir el tamaño de grano ideal para nuestra fundición.
- 3.** El material que conformará el cigüeñal hará que el proceso sea totalmente distinto, así como los parámetros de corte. Es por esto que se hace indispensable hacer un estudio previo de las distintas opciones que disponemos con los materiales adecuados. Siguiendo la línea de este proyecto y en lo que a este punto se refiere, la maquinabilidad de la fundición nodular es considerablemente mayor que la del acero. Su corte se produce de una manera más rápida y con unos avances superiores. Con esto se consigue ganar no solo costes en la calidad de las plaquitas, sino tiempo en el mecanizado de la pieza, y como bien saben las empresas actuales, el tiempo es dinero.
- 4.** La lubricación es un factor clave durante el periodo de trabajo del cigüeñal. Sin una lubricación adecuada la fricción entre metales provoca un aumento de la temperatura que llega a fundir las zonas de contacto produciéndose lo que se conoce como gripado. La fundición nodular cuenta en su estructura con grafito, siendo este el lubricante sólido más popular en ingeniería. La presencia de grafito en la fundición nodular garantiza un lubricado extra en su funcionamiento por segregación del mismo.
- 5.** Para que el aceite pueda desempeñar su función lubricante, es preciso que este se encuentre libre de impurezas para poder fluir a través de los conductos del cigüeñal. Es por esto que la estanqueidad del cárter es algo fundamental. Un gran apriete del mismo junto con una junta totalmente aislante se hace necesaria para impedir el paso a la suciedad presente.
- 6.** El manganeso, el cromo y el cobre; aleados en la fundición nodular aumentan considerablemente su resistencia a la corrosión. El manganeso y el cromo principalmente estabilizan los carburos a alta temperatura evitando una oxidación cuando el cigüeñal se caliente durante el mecanizado y durante su uso.



7. La inyección del material por el sistema de vacío permite limpiar de gases la cavidad del molde consiguiendo con esto rebajar la contaminación del material por la inclusión de gases en su estructura.
8. El cambio de aceite se hace obligatorio para mantener este siempre con unas propiedades lubricantes y anticorrosivos intactas. El lubricante ha de contar con un margen de seguridad entre cambio y cambio, para que en ningún momento se produzca la degradación de este de tal manera que pueda afectar al cigüeñal.
9. La simulación de los flujos de esfuerzos es un paso previo clave en el diseño. A pesar de que numéricamente es sencillo realizar los cálculos con las zonas críticas que se verán sometidas a mayor sollicitación; la concentración de esfuerzos no es tan apreciable numéricamente y es necesario recurrir a potentes softwares que reproduzcan estos flujos en las zonas críticas del cigüeñal para adoptar las medidas adecuadas, tales como cuñas de alivio.
10. Las mazarotas son un elemento que mantiene una cantidad de fluido en estado líquido de tal manera que cuando se produzca la contracción del material, el material de aporte contenido en estas mazarotas sea suficiente para que no se produzcan deformaciones por un llenado incompleto.
11. El control del proceso de enfriado es muy importante para que las diferencias de contracción no desencadenen grietas por tensiones en este proceso. El control de la dirección es importantísimo, y puede ser controlado mediante la inclusión de calentadores internos en el molde de tal modo que se controlen perfectamente las distintas zonas del molde y su enfriado sea direccional, creando un gradiente dirigido de temperatura en la pieza.
12. La inclusión de suciedad en la pieza es inevitable y se hace necesario un proceso de limpieza de dicha superficie para que no se vean dañadas las propiedades del material, ni tampoco sean dañadas las plaquitas de mecanizado que están seleccionadas exactamente para el mecanizado de la fundición nodular, y no de adiciones de mayor dureza que puedan quedar.

▪ 4.2.2 AMFE DE PROCESO

1. Para evitar que se pueda producir un enfriamiento prematuro del líquido en la mazarota y que este no fluya, y por tanto no cumpla su misión de evitar que queden huecos internos y se produzcan deformaciones; se instalará unos calentadores alrededor de la mazarota que mantengan la fundición contenida en ella con una viscosidad suficiente para fluir, así como los conductos de suministro.
2. La fiabilidad de las lecturas de medida que ofrezcan los equipos que intervienen a lo largo del proceso es un factor clave, y por tanto es obligado que estos sean calibrados periódicamente y certificada su válida medición por una empresa experta en calidad de acuerdo con la normativa ISO



3. La fiabilidad de las lecturas de medida que ofrezcan los equipos que intervienen a lo largo del proceso es un factor clave, y por tanto es obligado que estos sean calibrados periódicamente y certificada su válida medición por una empresa experta en calidad de acuerdo con la normativa ISO
4. El agarre por los puntos perimetrales es complicado y se ha de mecanizar una geometría suficientemente grande que asegure totalmente la sujeción de la pieza. Esto se consigue aumentando la zona cónica de presión.
5. La selección de las plaquitas se basará en un fabricante de renombre y calidad garantizada como es Sandvik. En su catálogo se incluyen diferentes opciones para un mismo mecanizado y en el apartado de selección de plaquitas se explican detalladamente las razones de por qué se escoge cada modelo.
6. El fabricante Sandvik recomienda una geometría neutra para las plaquitas de cerámicas seleccionadas.
7. Para una buena accesibilidad, sumada a una suficiente y correcta robustez se selecciona una plaquita romboidal de ángulo 80° según catálogo de fabricante.
8. Se aumenta la velocidad de corte sobre la ideada inicialmente, para evitar los problemas de filo de aportación que suponen problemas en el mecanizado, en el acabado y en la vida de la plaquita.
9. Para un correcto y suficiente refrigerado del proceso de corte se aumenta el diámetro del conducto de suministro del líquido, para que no haya problemas de obturaciones ni de caída de caudal por atoramiento de ningún tipo.
10. Para evitar una degradación prematura de las plaquitas de roscado que supondría una deficiente operación de mecanizado, y por tanto una deficiente geometría que supondría la imposibilidad de roscar la pieza, se reduce la profundidad de pasada con el fin de asegurar el buen funcionamiento del proceso.
11. La potencia del software en el día de hoy es una gran herramienta que nos permite la simulación del proceso en prácticamente todas sus operaciones. La fase de roscado es una operación clave de acabado cuyo mal resultado podría suponer el desecho de la pieza. Por esto se debe recurrir obligatoriamente a la simulación previa a la operación, y un estudio de la geometría y las medidas conseguidas con ese software.
12. Las personas son un fruto constante de imprecisiones y despistes por la imposibilidad de repetir de manera exacta dos mismas operaciones en dos tiempos distintos. Además la precisión humana siempre será mucho menor que la conseguida por computadores. Por esto, es obligado el uso de máquinas de control numérico computerizado que añadan calidad y exactitud a los procesos y gestionen sus propios recursos para que no se produzca la pérdida de ningún elemento del proceso de mecanizado.



- 13.** La naturaleza propia de la máquina exige unas tolerancias muy precisas en cuanto a las superficies críticas de trabajo, como son la de contacto con la biela y las de contacto con los cojinetes. La calidad de acabado exigida no es posible conseguirla mediante máquinas de torneado convencionales y es la rectificadora una solución con precios asequibles para la incorporación al proceso. Por su gran calidad de acabado y su economía se recurre a esta máquina, también controlada por un CNC para llevar a cabo la operación crítica de rugosidad en las zonas de contacto.
- 14.** Los programas de CNC se desarrollarán con programas de CAD CAM que aseguren un correcto procesado y eviten errores en cuanto a medidas. El desarrollo de manera mañuela de un programa de CNC es un proceso arduo que puede provocar errores simplemente tocando mal una tecla, además su lectura se hace difícil por parte del operario por el sistema de código. Sin embargo, en un sistema CAD/CAM toda la información es geométrica y fácilmente entendible y corregible por un operario.
- 15.** Para un buen suministro del refrigerante en la fase final de rectificado se debe tener un buen control sobre el líquido, y un dispositivo debe de mantener un caudal de suministro constante, así como constante ha de suministrar siempre la temperatura del refrigerante. Este dispositivo debe proceder a la parada automática de la máquina si alguno de los parámetros de caudal o temperatura se sobrepasa los límites establecidos previamente para un correcto mecanizado.



▪ 4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADO Y CONCLUSIONES

Tras la realización del análisis quedan al descubierto la globalidad de aspectos que influyen en el resultado final de una simple pieza. Para un correcto y productivo análisis se hace indispensable abarcar todo el espectro de operaciones que forman parte de la operación, ya no de manera directa, sino también de manera indirecta.

El estudio en profundidad de cada una de las operaciones por los especialistas de cada campo se hace indispensable la participación de todos los operarios especializados en cada una de las ramas estudiadas en este AMFE. Aún así soy consciente de lo poco riguroso del trabajo y he constatado sobradamente la dificultad de detectar los errores y posibles fallos en su justa medida e importancia.

Sin embargo, lo que si he podido comprobar, es la amplia gama de opciones que dispone cada uno de los departamentos empresariales para una misma operación. Esto permite que par un mismo proceso las opciones de llevarlo a cabo sean muy variadas, y por lo tanto se hace necesario un estudio de este tipo con el fin de encontrar el camino de menor riesgo y costos para la empresa.

El elemento más importante a destacar con la realización de este proyecto ha sido sin duda el inicio en la filosofía de la prevención de errores antes de que estos puedan producirse, así como la corrección de los mismos cuando haya sido imposible identificarlos en un proceso de calidad de diseño.

Las correcciones descritas en este AMFE están basadas en teoría básica de producción, y todas ellas suponen una optimización del proceso y los recursos de una manera importante con una inversión muy reducida.

▪ Estimación de ahorro.

El hecho de que se produzcan averías y roturas en cigüeñales una vez entregados a usuarios, supone en primer lugar un costo en corrección de la avería y suministro de una nueva pieza corregida, pero el más importante de todos los costos, es el intangible.

El descontento con el que un cliente queda tras el fallo de una pieza de precio importante como puede ser el motor de un coche; quedará para siempre en el recuerdo de este cliente que acudirá posiblemente durante el resto de su vida a los competidores de nuestra empresa. La divulgación de imagen de una empresa es algo que cuesta realmente conseguir, y que fácilmente se puede ver degradada por el fallo de uno de sus productos.

Además, el malestar de un cliente, será transmitido directamente a sus más allegados, y estos a su vez, tendrán una mala experiencia a contar en el caso de que alguien les pida asesoramiento u opinión sobre la compra de este producto.

Es por tanto, la cantidad de pérdidas producidas por la falta de pedidos en un futuro una pérdida imposible de definir, pero por seguro de gran importancia. Por esto se hace necesario el control exhaustivo de los procesos de fabricación y de la calidad de los productos que ofertemos al mercado para conseguir aumentar, o como mínimo mantener una cuota de mercado que permita a la empresa seguir funcionando sin que sus clientes migren a compañías del mismo sector.



PROYECTO FINAL DE CARRERA
Análisis AMFE de un cigüeñal de fundición nodular



Realizado por: Patricio Mercader Siles

Hoja: 177 / 205

Un costo directo de los posibles fallos de un producto ya en el mercado y defectuoso supone un cambio o reparación de dicho producto al cliente. Esto supone no solo el dinero de la fabricación de nuevas piezas, sino el de un staff técnico mayor para poder satisfacer la demanda de reparaciones, con un incremento no solo en materiales, sino también en mano de obra especializada.

Dado el mundo competitivo en el que nos encontramos, la mejora continua de nuestros productos es imperativa. En primer lugar, el hecho de no realizar un AMFE de diseño supone la fabricación de numerosos prototipos, la reparación de numerosos fallos supondrá previamente que aparezcan otros, y que por tanto se requieran de más prototipos. Este costo tanto de material, como de tiempo para mejorar nuestro producto, corre en contra de la empresa, y se traduce en pérdidas y desventaja frente a los competidores. Por esto, para que nuestros prototipos sean lo más fiables posibles, y el número de fallos se reduzca drásticamente, es necesario el estudio previo de los procesos y la simulación por medio de software que hoy en día existe en el mercado. El tiempo de análisis es infinitamente más corto que el de corrección de errores tras una producción fallida.

Una de las ventajas del AMFE, es la claridad del informe y de la metodología. Con unas simples páginas se pueden detectar claramente las fuentes más importantes de problemas por cualquier persona poco cualificada. Además es un proceso que se puede trabajar por etapas, es decir, tras un análisis AMFE, y la implantación de las medidas de corrección; puede realizarse otro en el que se detecten nuevas circunstancias problemáticas, o simplemente, realizar un nuevo estudio AMFE más exigente en cuando al número de riesgo para ir disminuyéndolo poco a poco por etapas según la empresa pueda afrontar los costos de las operaciones de mejora.

Como resumen el AMFE implica directamente una reducción de costes , un aumento de la productividad , y nos abre la puerta a una gran cantidad de herramientas de gestión de la calidad , y que estas son indispensables en el marco de la economía global en cualquier economía, pero aún más en las más desarrolladas como la europea, que no pueden competir en costos de mano de obra con los países emergentes del sureste asiático o de los países de Europa del este. Al no poder competir en mano de obra debido a que sus condiciones laborales son realmente mucho más precarias, debemos responder con una productividad mucho mayor y una calidad diferenciada y es el AMFE una excelente herramienta para ayudar a conseguir este propósito.

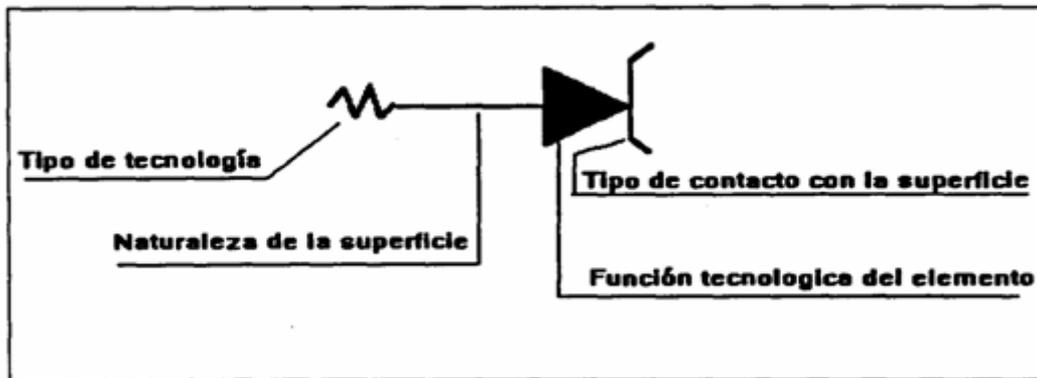


BIBLIOGRAFÍA

- J.D. Zamanillo, Procesos de Fabricación (Planificación de Procesos), Servicio de Publicaciones de la U.P. de Valencia, 2000.
- J. Ojados y F. Carrión, Apuntes de materiales. UPCT. Cartagena, 2005
- J. Gonzalez, El Control numérico y la programación manual de las MHCN, Bilbao, URMO S.A. Ediciones, 1986.
- D. Ojados y J. Guillamón, Dibujo asistido por ordenador, Servicio de publicaciones de la U.P. de Cartagena, 2006.
- J.J. Herández Ortega, Apuntes de Tecnología Mecánica, Servicio de publicaciones de la U.P. de Cartagena, 2004
- B.J. Hamrock, Bo O. Jacobson, S.R.Schmid, Elementos de Máquinas, Méjico D.F. , Editorial Mc Graw Hill, 2000.
- Sighley & Mischke, Diseño en Ingeniería mecánica, Méjico D.F. , Editorial Mc Graw Hill, 2002.
- J. E. Para Conesa, Apuntes de Ingeniería de la Calidad, Servicio de repografía de la U.P. de Cartagena, 2007
- P.C. Cebollero y J. R. Jiménez, Tecnología Mecánica y Metrotecnica (3ª edición), Editorial Cosmos, Valencia, 1977.
- J. Félez, M. L. Martínez, Dibujo Industrial, Editorial Síntesis S.A., Madrid, 1997.
- SANDVIK, Herramientas para torneear, 2000.
- Artículos varios de páginas de Internet, artículos publicados por universidades y foros de mecanizado:
 - <http://www.atlantic-bonn.de/index.php?id=12&L=7>
 - www.coitiar.es
 - <http://www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/y3.html>
 - <http://www.utp.edu.co/>
 - www.solomantenimiento.com
 - http://webs.advance.com.ar/eupages/indice_m.htm

SIMBOLIZACION DE POSICIONAMIENTO Y SUJECIÓN DE LAS PIEZAS

Composición de un símbolo:



Cada símbolo está formado por un cierto número de símbolos elementales aditivos, de forma que quede claramente establecido el papel del símbolo compuesto, es decir:

- La función que realiza.
- La naturaleza de la superficie de contacto de la pieza (bruta o mecanizada).
- La tipo de contacto con la superficie.
- La clase de tecnología del elemento.

En el caso representado: Puesta en posición rigurosa (triángulo negro). Superficie de apoyo en la pieza mecanizada (un solo trazo). Apoyo en forma de cubeta, Sistema de sujeción reversible (esquemáticamente una rosca).

REPRESENTACION DE LAS FUNCIONES TECNOLOGICAS

FUNCION	SIMBOLO	REPRESENTACION PROYECTADA
Posición rigurosa		Superficie especificada Apoyos Centrador
Origen de acotación		
Definición de un eje	Triángulo negro	ó cualquier otra forma Completo Libre
Inmovilización pieza		Superficie especificada NATURALEZA DE LA SUPERFICIE
Prelocalización		Mecanizada un trazo
Evitar Vibraciones y Deformaciones	Triángulo blanco	Bruto dos trazos

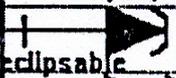
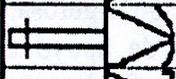
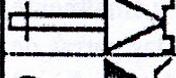
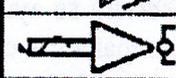
TIPOS DE TECNOLOGIAS

TIPO DE CONTACTO CON LA PIEZA

			CONTACTO	SIMBOLO	CONTACTO	SIMBOLO
Apoyo fijo						
Centrado fijo			Plano		Libre	
Sistema de apriete			Estriado		Cubeta	
Apriete concentrico			Aboobado		Uve	
Sujeción irreversible			Punto fijo		Balancín	
Sujeción reversible			P. giratorio			



Ejemplos de posicionamiento:

SÍMBOLO DESCRIPCIÓN	
	Contacto fijo plano, sobre una superficie mecanizada, origen del mecanizado
	Idem eclipsable
	Garras estriadas de apriete concéntrico flotante, para centrar una superf. bruta
	Contacto abombado fijo, de inmovilización sobre superficie en bruto
	Contacto libre, de inmovilización sobre superficie en bruto
	Cubeta con sistema de apriete axial, punto de partida de mecanizado, sup ^l .mec.#
	Punto fijo, punto de partida de mecanizado(eje), sobre superficie mecanizada
	Punto giratorio móvil, punto de partida de mecanizado(eje), sup ^l .mecanizada
	Balancín de inmovilización sobre superficie en bruto
	Uve de posicionado para el mecanizado, sobre superficie mecanizada



ANEXO I

Planos



ANEXO II

Planificación de proceso



ANEXO III

Tabla de rugosidades y amarres



ANEXO IV

Apoyo de planos