

71  
2oj.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO DE MESAS DE PLANITUD DE FUNDICION  
Y SU ANALISIS POR MEDIO DE C A E

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A N :  
JOSE MANUEL HERNANDEZ ALVAREZ  
ISIDRO ANTONIO VIDAL CORTES

DIRECTOR DE TESIS.  
ING. GERARDO RUIZ BOTELLO



MEXICO, D. F.

1992

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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

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

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

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

## I N D I C E

CAPITULO 1.-	INTRODUCCION .....	2
CAPITULO 2.-	GENERALIDADES DE LAS MESAS DE PLANITUD .....	3
CAPITULO 3.-	CONCEPTOS BASICOS DEL METODO DEL ELEMENTO - FINITO.....	31
CAPITULO 4.-	IMPORTANCIA DEL ANALISIS DE TRANSFERENCIA - DE CALOR PARA LA MESA DE PLANITUD.....	43
CAPITULO 5.-	RECOMENDACIONES SOBRE EL MODELO Y LA FUNDICION.....	57
CAPITULO 6.-	ANALISIS DE UNA MESA DE FUNDICION DE PLANITUD POR MEDIO DE CAE.....	72
CAPITULO 7.-	MAQUINADO Y ACABADO.....	122
CAPITULO 8.-	VERIFICACION .....	137
CAPITULO 9.-	SUSTENTACION.....	157
CAPITULO 10.-	ACCESORIOS .....	161
CAPITULO 11.-	CONCLUSIONES .....	167
CAPITULO 12.-	BIBLIOGRAFIA .....	169

## **CAPITULO 1**

### **INTRODUCCION**

## INTRODUCCION.

Las aplicaciones de las mesas de planitud son muchas y muy variadas. Desde su aplicación inmediata como tal en los laboratorios de metrología o secciones de control de calidad, hasta aplicaciones tan especiales como base o bancada de un torno de precisión para el mecanizado de espejos, o como el plano de referencia en una máquina de medición por coordenadas, etc.

Para ello se da una idea general de todas las características de relevancia en las mesas que toman en cuenta distintos países que cuentan con normas específicas de mesas de planitud. Esto, se hace con el fin de crear dos modelos para el análisis de los distintos esfuerzos a los que están sometidas las mesas.

Para el estudio de las distintas condiciones de esfuerzo se ha optado por la utilización de la técnica del Método del Elemento Finito por ser esta una de las más innovadoras, y hasta la fecha no se han realizado análisis de mesas de planitud por este método. Esta técnica proporciona la distribución de esfuerzos, de fuerzas y momentos, siendo lo más importante en este problema los desplazamientos, en distintas direcciones, siendo la de más relevancia la dirección normal a la superficie de trabajo.

Sobre este tema se presentan tres capítulos: el del Elemento Finito, donde se da una introducción de las bases de esta técnica; el de transferencia de calor, donde se hace el análisis de la ecuación diferencial para la mesa y se resuelve un ejemplo de conducción por el Método del Elemento Finito; así como el capítulo del análisis de la mesa de planitud de fundición por medio de C.A.E., donde propiamente se hace el análisis de la mesa proponiendo varios casos de carga.

De los resultados que se obtendrán en el análisis del Método del Elemento Finito de ambos modelos, en especial la deformación máxima se comparará con la deformación máxima permitida que establece la norma para poder determinar si se encuentran dentro de tolerancia. En cuanto a los esfuerzos también se hará una comparación para determinar que mesa es la que experimenta los mayores esfuerzos. El establecer que modelo es más conveniente fabricar, además de los dos puntos anteriores tomar en cuenta también a que dificultades de fabricación estará sujeta.

En los últimos capítulos se dan recomendaciones del maquinado y del acabado, siendo esto de importancia para establecer el grado de calidad de la mesa. El capítulo sobre verificación de planitud proporciona algunas de las técnicas para comprobar el plano de trabajo de la mesa, y el de los accesorios de las mesas de planitud es un complemento para una mayor versatilidad en el uso de las mesas y en general para las funciones que en metrología pueden realizarse con ayuda de otros instrumentos.

## **CAPITULO 2**

### **GENERALIDADES DE LAS MESAS DE PLANITUD**



calibración

- fecha de la próxima calibración

al conjunto de los datos anteriores se les denomina etiqueta de calibración.

## **2.2. TIPOS.**

### **2.2.1 Planos ópticos.**

Son bloques de material vítreo cuyas caras se encuentran pulidas y en las que se aseguran tolerancias de planitud y/o paralelismo muy estrechas.

Se emplean junto con una luz monocromática para determinar la planitud y paralelismo en bloques patrón, bocas de micrómetros y en pequeñas superficies reflectantes en general, por medio de la interpretación de las franjas de interferencia que se producen.

En función de su uso se establecen dos grandes tipos de planos. El primer tipo corresponde a los calibres planos paralelos para comprobar planitud y paralelismo de superficies planas pulidas, errores periódicos en la calibración interferométrica, para su calibración dimensional, de paralelismo y de planitud. El segundo tipo son los planos que se emplean para la medición de superficies planas en general, prismas y cuñas ópticas, y comprobación de planitud de superficies pulidas, que puedan tener una o dos superficies de trabajo. Todo ello da lugar a los tipos y clases (Norma GGG-0-635).

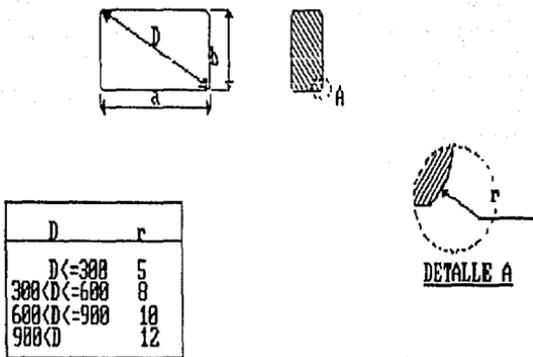
### **2.2.2. Mesas de planitud.**

Se dividen en dos tipos fundamentales atendiendo al material del que se han construido: mesas de roca, y mesas metálicas.

Existen mesas (metálicas normalmente) cuya superficie está ranurada y se utilizan en máquinas e instrumentos. Hay tipos de mesas de tamaño reducido que se utilizan en mediciones con comparador fijo y pieza móvil, por lo que se les dota de una columna fija que sirva de soporte al comparador.

## **2.3. FORMAS.**

En las mesas de planitud metálicas y de roca existen 3 formas principales que son: circulares, rectangulares y cuadradas.



mesas rectangulares y cuadradas

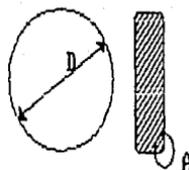


figura 2.1. Distintas formas de las mesas de planitud metálicas.

### 2.3.1 Rebordes.

Los rebordes solo son una característica de las mesas de roca. La misión de los rebordes es la de servir para el montaje de piezas, para la fijación de piezas o instrumentos a la mesa. Soló se emplean, como opción, en mesas rectangulares y cuadradas.

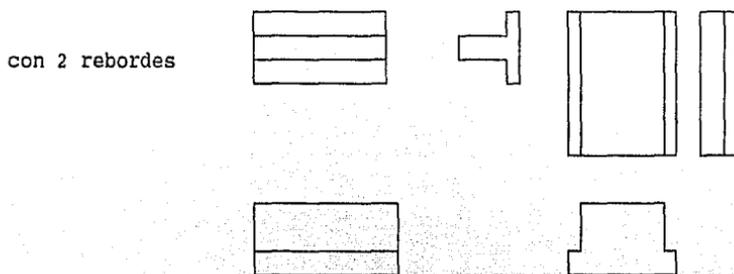


figura 2.2. Disposición con 2 rebordes.

con 4 rebordes

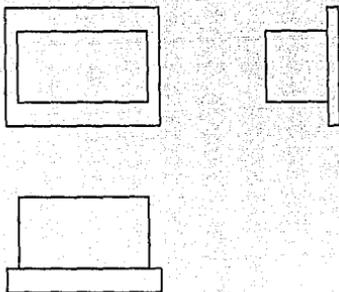
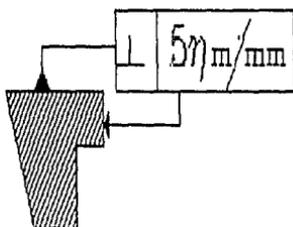


figura 2.3. disposición con cuatro rebordes.

Las superficies laterales (incluidas las de los rebordes) deberán tener una terminación superficial similar a la de la superficie de trabajo.

La tolerancia de los ángulos rectos de las superficies laterales se especificará en los casos en que sea necesario, en los restantes casos se puede considerar la indicada en la figura.



perpendicularidad de las caras laterales.

figura 2.4.

### 2.3.2. Nervaduras.

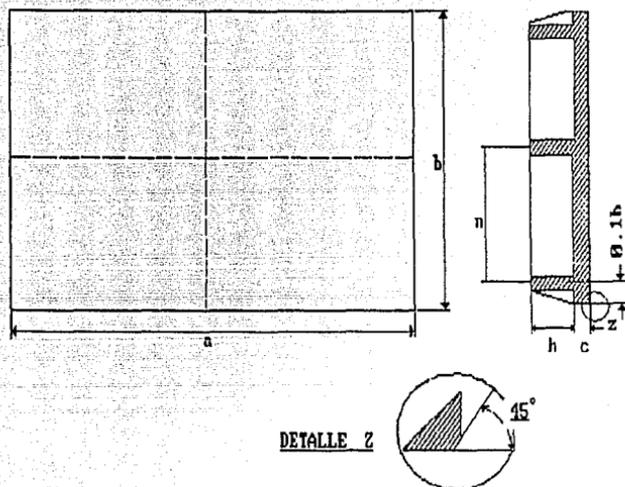


figura 2.5. Mesa metálica nervada.

Las nervaduras son únicamente características de las mesas de fundición, puesto que se busca dar la mayor rigidez posible con un peso mínimo.

La posición, forma y el número de nervaduras se suelen dejar a la iniciativa del fabricante. Como orientación la norma DIN 876 establece los tipos indicados en las figuras (2.7. y 2.8) para mesas rectangulares, o cuadradas.

También se usan otras formas de nervaduras; por ejemplo, las que se muestra en la figura 2.6 tiene una forma cruzada.

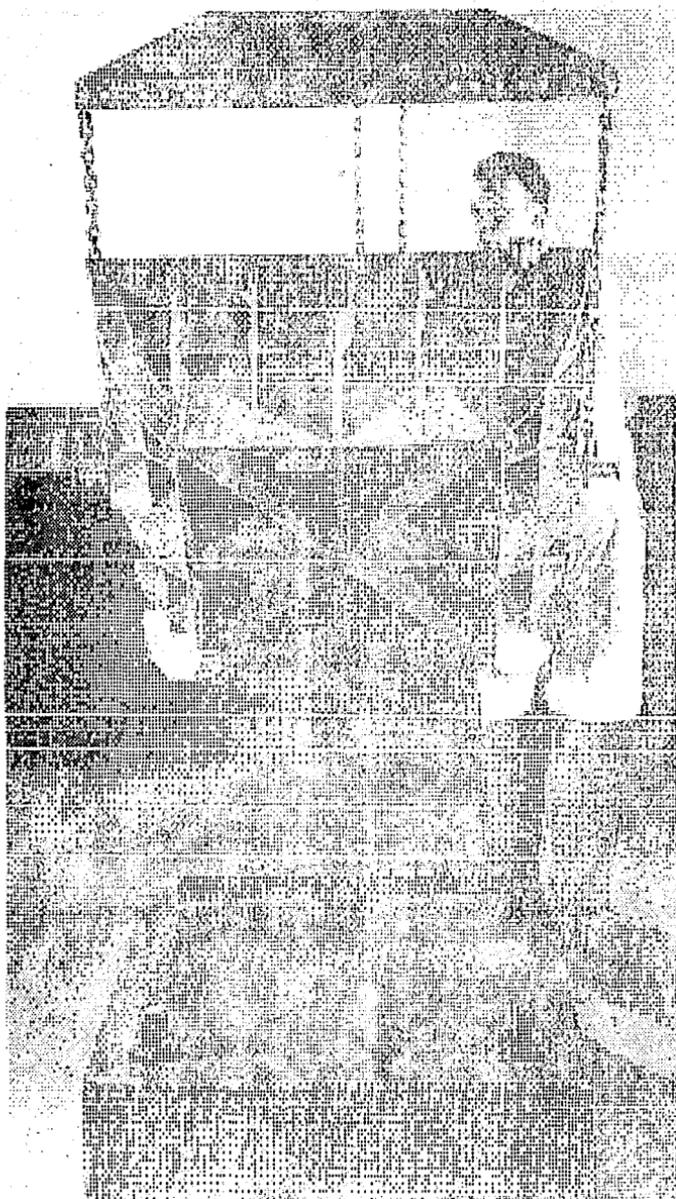


figura 2.6. Mesa metálica con nervaduras cruzadas.

Las figuras siguientes nos muestran la dimensión, tipo de nervadura así como los puntos de apoyo.

dimensiones mesa	
100x100	a
160x100	b
160x160	c
250x250	c
250x160	d
400x250	d
400x400	e
630x400	f
630x630	g
1000x1000	g
1000x630	h
1600x1000	h
2000x1000	i

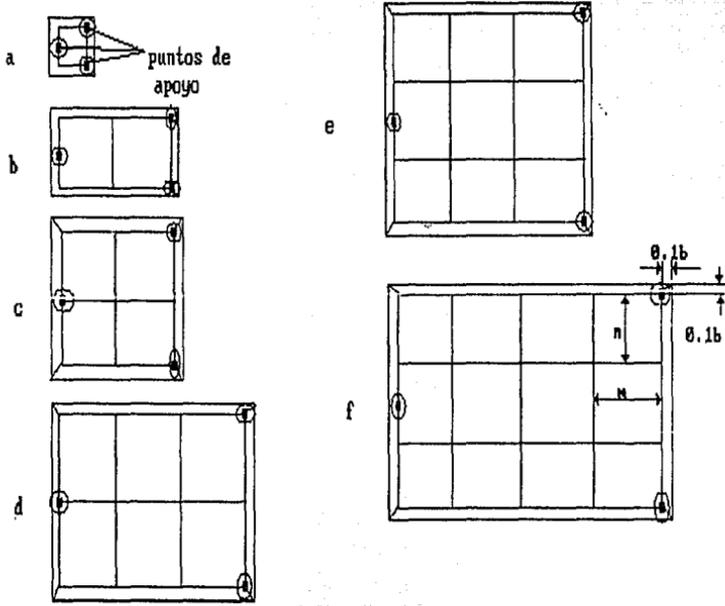
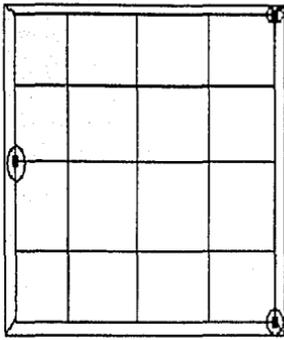
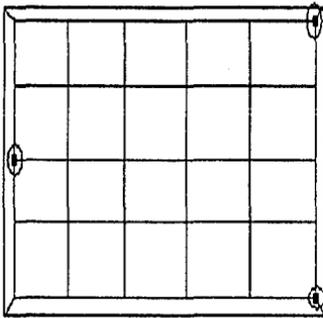


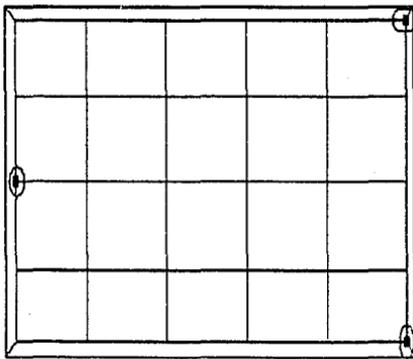
figura 2.7. Disposición de los apoyos y nervaduras.



g



h



i

figura 2.8. Continuación de las figuras anteriores.

Las mesas circulares, se construyen de acero con un diámetro mínimo de 63 mm., a un máximo de 200 mm., o de fundición con diámetro desde 250 mm., hasta 400 mm. (Norma BS 869 : 1978).

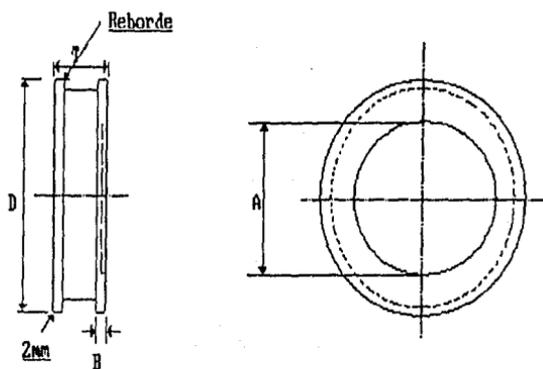


figura 2.9. Características de la mesa metálica circular.

En este tipo de mesas, se puede tener superficies de trabajo en una o ambas caras. Las superficies laterales se rebajan con objeto de permitir un manejo más fácil de la mesa.

Cuando sea necesario, se reforzará la superficie de trabajo mediante una adecuada disposición de nervaduras que le confieren la suficiente rigidez con un mínimo de peso.

#### 2.4. Dimensiones.

Existen dos grandes grupos de valores normalizados:

- 1.-Normas europeas (Alemanas, Británicas, y Francesas).
- 2.-Normas americanas.

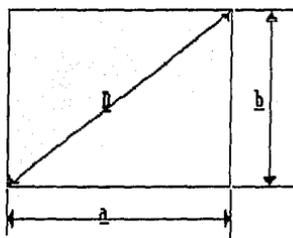


figura 2.10. Dimensiones principales de las mesas de planitud.

### 2.4.1. Dimensiones principales.

Las dimensiones principales de las mesas de planitud son su longitud (a) y su anchura (b). Las restantes dimensiones (espesor, tamaño de las nervaduras en las mesas metálicas, etc.), están condicionadas por las principales, y no son de libre elección para el diseñador, excepto en los pedidos bajo especificaciones.

DIMENSIONES PRINCIPALES DE LAS MESAS RECTANGULARES , CUADRADAS  
Y CIRCULARES SEGUN NORMAS EUROPEAS.  
en mm.

Mesas Rectangulares y Cuadradas.					Mesas Circulares.
Tipo núm.	a	x	b	D	Diámetro
1	100	x	100	189	100
	<u>160</u>	x	<u>100</u>		<u>160</u>
	160	x	160		200
2	<u>250</u>	x	<u>160</u>	297	<u>250</u>
	250	x	250		
3	315	x	200	472	315
	<u>400</u>	x	<u>250</u>		<u>400</u>
	400	x	315		
4	<u>400</u>	x	<u>400</u>	566	
	600	x	315		500
	500	x	500		
5	<u>630</u>	x	<u>400</u>	746	<u>630</u>
6	<u>639</u>	x	<u>630</u>	891	
	800	x	500		800
7	<u>1000</u>	x	<u>630</u>	1182	<u>1000</u>
	1000	x	800		
8	<u>1000</u>	x	<u>800</u>	1414	
	1250	x	800		1250
9	<u>1600</u>	x	<u>1000</u>	1887	<u>1600</u>
	1600	x	1600		
10	<u>2000</u>	x	<u>1000</u>	2236	<u>2000</u>
	2000	x	1250		
	2000	x	1600		
	2000	x	2000		
11	<u>2500</u>	x	<u>1600</u>	2968	<u>2500</u>

Se recomienda emplear los valores subrayados.

Sobre a y b se pueden considerar unas tolerancias de:

+1 por 100

-2 por 100

tabla 2.1.

DIMENSIONES DE MESAS CIRCULARES METALICAS (Norma Británica BS 869) (mm).

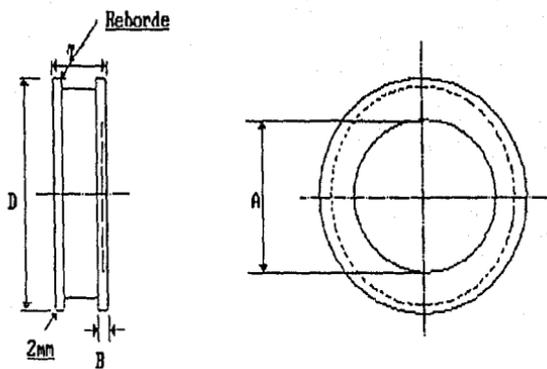


figura 2.11. Dimensiones principales de mesas circulares metálicas.

	Tamaños Recomendados en planos de planitud y mesas de planitud. D	Mínimo espesor de los planos y mesa. T	Superficie de los planos Dia.   Profundidad		Espesor mínimo en las mesas C <sup>min</sup>
			A	B	
Planos	63	16	40	2	
	100	20	80	3	
	160	32	120	6	
	200	40	160	6	
Mesas	250	70			20
	400	100			30

C= espesor de la placa, sin contar el de los nervaduras.

tabla 2.2.

Los límites de las superficies de trabajo deberán tener un voladizo de al menos 20mm sobre la superficies laterales.

DIMENSIONES SEGUN (Norma federal Americana G-P-463c Junio 15, 1977).

Rectangulares y Cuadradas				Circulares
Ancho a	y x	Largo b	Diagonal D	D
300	x	300	424	
300	x	450	541	300
450	x	450	636	
450	x	600	750	450
600	x	600	849	
600	x	900	1082	600
900	x	900	1273	900
1200	x	600	1342	1200
1200	x	900	1500	
1200	x	1200	1697	
1500	x	900	1749	
1500	x	1200	1921	
1800	x	900	2012	
1800	x	1200	2163	
2400	x	1200	2683	
2400	x	1800	3000	
3000	x	1200	3231	
3000	x	1500	3304	
3600	x	1800	4025	

tabla 2.3.

#### 2.4.2 Dimensiones no principales.

VALORES SECUNDARIOS DE LAS MESAS RECOMENDADAS NORMAS EUROPEAS  
EN mm.

largo x ancho	C <sub>n</sub>	C <sub>min</sub>	h	s	mxn	masa aprox. (kg).
160 x 100	9	6	25	5	70x 80	2.1
250 x 160	12	8	40	5	75x 64	6.8
400 x 250	15	10	50	8	117x100	19
400 x 400	18	12	50	8	107x107	32
630 x 400	18	12	80	9	137x107	61
630 x 630	21	14	80	9	126x126	105
1000 x 630	24	16	125	12	175x126	235
1000 x 1000	30	20	160	15	200x200	440
1600 x 1000	30	20	200	18	280x200	845
2000 x 1000	36	24	250	18	300x200	1350

Densidad 7.25 kg/dm<sup>3</sup> (fundición) aprox.

tabla 2.4.

Estos valores son sólo indicativos.

Los valores de la tabla anterior se obtienen en función de la tolerancia de rigidez, supuesto el caso de mesas nervadas con adecuada disposición de las nervaduras.

- c+h : espesor de la mesa
- c : espesor del plano de trabajo
- h : altura de los nervios
- s : espesor de los nervios.

Los valores de s, h y mxn que definen la nervadura de la mesa, se han elegido de manera que bajo carga puntual aplicada en el centro de la mesa de valor 4 bar (m x n), la flexión máxima de la superficie de trabajo medida en el centro de la mesa sea menor o igual que 0.25 veces la tolerancia total de planitud de la calidad DIN 0, cuando la mesa está sustentada en los apoyos previstos.

$c_n$  : valor nominal del espesor de la placa que materializa la superficie de trabajo. Es el valor que debe tener la mesa nueva.

$c_{min}$  : valor mínimo del espesor de dicha placa, que no debe ser rebasado si se desea mantener la tolerancia de planitud bajo carga.

Este valor limita el remecanizado de la superficie de trabajo.

Los valores de  $c_{min}$  y mxn se han elegido de manera que bajo una carga de 2 bar sobre cada sección mxn, aplicada en forma de carga concentrada en el centro de tal sección, la flecha en el centro debe ser menor o igual que 0.25 veces la tolerancia total de planitud de mesas de calidad DIN 0.

### 2.4.3 Flecha admisible en mesas metálicas.

FLECHA BAJO CARGA SEGUN NORMA ALEMANA DIN 876 (mesas metálicas).

Tamaño de la mesa a (mm)	$T_t$ DIN 0 ( $\mu\text{m}$ )	$f=0.25 \cdot T_t$ ( $\mu\text{m}$ )
100	4	1.0
160	5	1.5
250	5	1.5
315		
400	6	1.5
500		
630	7	2.0
800		
1000	8	2.0
1250		
1600	10	2.5
2000	12	3.0
2500	14	3.5

tabla 2.5.

$T_t$  :tolerancia de planitud

f :flecha máxima admisible

### 2.5. CALIDADES DE ELABORACION.

#### 2.5.1 Tolerancia de planitud.

##### 2.5.1.1 Tolerancia de planitud total ( $T_t$ ).

Tolerancia de planitud total ( $T_t$ ).- Todos los puntos de la superficie portante de trabajo de la mesa deben estar comprendidos entre dos planos paralelos separados una distancia  $T_t$ .



figura 2.12. Tolerancia de planitud total

La norma francesa E 11-101 noviembre 1977, es la que maneja más grados de calidad con 6 calidades 000, 00, 0, I, II, III, pero la mayor (000) por lo general solo se logra con mesas de granito.

TOLERANCIA DE PLANITUD TOTAL  $T_t$  ( $\mu\text{m}$ ).

Longitud o diámetro de la mesa. en mm	Clases de calidades.					
	000	00	0	I	II	III
100	1.5	3.0	5.5	11	22	44
160	1.5	3.0	6.0	12	23	46
250	1.5	3.0	6.5	13	25	50
315	2.0	3.5	6.5	13	26	53
400	2.0	3.5	7.0	14	28	56
500	2.0	4.0	7.5	15	30	60
630	2.0	4.0	8.0	16	33	65
800	2.5	4.5	9.0	18	36	72
1000	2.5	5.0	10.0	20	40	80
1250	3.0	5.5	11.0	23	45	90
1600	3.5	6.5	13.0	26	52	104
2000	4.0	7.5	15.0	30	60	120
2500	4.5	9.0	17.5	35	70	140

tabla 2.6.

MESAS CIRCULARES METALICAS TOLERANCIAS (norma británica BS869).

D mm	$T_t$ $\mu\text{m}$	E mm
200	0.5	2
250	0.8	6
400	1.0	10

tabla 2.7.

Las superficies de las caras deben ser paralelas con una tolerancia de 0.0025 mm.

El plano definido por las superficies de los apoyos (caso de que los tenga) deberá ser paralelo al de la superficie de trabajo con una tolerancia de 0.012 mm salvo que se provea un dispositivo de nivelación adecuada.

El valor de E indica la distancia de los márgenes de la mesa a los de la superficie de trabajo.

### 2.5.1.2. Tolerancia de planitud local ( $T_1$ ).

En el caso de mesas de grandes dimensiones se establece esta segunda tolerancia según la cual todos los puntos de la superficie portante de trabajo situados en una zona determinada de la mesa, deben estar comprendidos entre dos planos paralelos separados una distancia  $T_1$ .

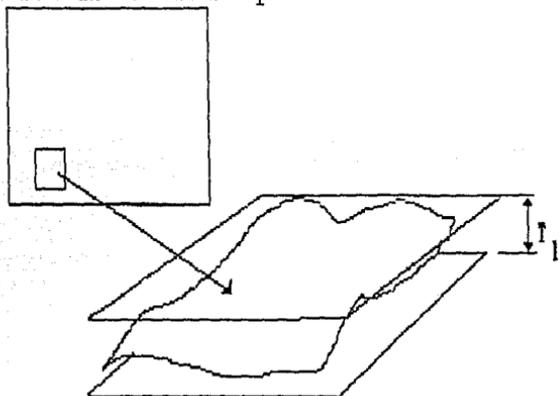


figura 2.13. Tolerancia de planitud local.

La norma DIN 876 para tolerancia local establece una superficie de trabajo de 250 mm cuadrados y especifica lo siguiente para 5 calidades solamente:

Tamaño del área de trabajo	tolerancia de planitud $T_1$ de acuerdo a la calidad de la mesa				
	00	0	I	II	III
250 x 250	3	5	13	25	50

tabla 2.8.

### 2.5.1.3. Fórmulas del cálculo de la tolerancia de planitud (norma francesa E11-101).

Estas fórmulas son para valores no previstos en las tablas anteriores.

Tolerancia de planitud total  $T_t$  (en  $\mu\text{m}$ ).

$$T_t = K \left( 1 + \frac{a}{1000} \right)$$

donde:

a= largo o diámetro de la mesa en milímetros

K= coeficiente en función de la clase de precisión de la mesa:

Clase de precisión	000	00	0	I	II	III
K	1.25	2.5	5	10	20	40

tabla 2.9.

Para la tolerancia de planitud local  $T_l$  (en  $\mu\text{m}$ ).

$$T_l = k_1 x 1.2$$

donde:

$$k_1 = \frac{k}{4} \text{ para cada clase de precisión.}$$

por lo tanto  $T_l = kx0.3$

Tamaño de la mesa mm	Calidades					
	000	00	0	I	II	III
>400	.5	1	1.5	3	6	12

tabla 2.10.

Nota: Los valores de  $T_t$  y de  $T_l$  con los 6 grados de calidad son referidos a 20 °C, y se obtienen a partir de las fórmulas indicadas mediante redondeo al medio  $\mu\text{m}$  más próximo (a) en las calidades 000, 00, y 0 el redondeo (b) al  $\mu\text{m}$  en las calidades I, II, III.

$$a \left\{ \begin{array}{l} 0.0 \leq x < 0.25 \rightarrow 0.0 \\ 0.25 \leq x < 0.75 \rightarrow 0.5 \\ 0.75 \leq x < 1.0 \rightarrow 1.0 \end{array} \right.$$

$$b \left\{ \begin{array}{l} 0.0 \leq x < 0.5 \rightarrow 0.0 \\ 0.5 \leq x < 1.0 \rightarrow 1.0 \end{array} \right.$$

Los valores anteriores solo afectan a la superficie de trabajo. Las superficies laterales no están afectadas de tolerancias especiales, salvo que se indique expresamente.

### 2.5.2. Ondulaciones según norma DIN 876.

La profundidad de las ondulaciones  $W_t$  de la superficie de trabajo no debe exceder los valores especificados en la siguiente tabla.

PROFUNDIDAD DE LAS ONDULACIONES  $W_t$ .

Grado de Exactitud	Profundidad de las Ondulaciones $W_t$ en $\mu m$
00, 0, 1, 2, 3	10 25

tabla 2.11.

### 2.5.3. Comparación de normas.

En la asignación de tolerancias, pueden observarse de nuevo dos filosofías:

1.-Normas europeas: La tolerancia de planitud de la mesa es función de la calidad de fabricación que indica un número (en caracteres arábigos o latinos, indistintamente), y del tamaño de la mesa, definido por su dimensión principal mayor (largo). Existe un buen número de calidades distintas, con lo que los valores de las tolerancias son del mismo orden de magnitud para una determinada calidad.

2.-Normas americanas y británicas : Las calidades se expresan mediante letras, y la dimensión que define el tamaño de la mesa es su diagonal (D). Existen sólo tres calidades distintas, con lo que para abarcar el campo de tolerancias es preciso que las curvas  $T_t \rightarrow D$  presenten una acusada pendiente, lo que se traduce en que no es posible establecer equivalencias con las calidades europeas para cualquier tamaño de mesa, y se asimilan a una misma calidad, mesas que según el criterio europeo son de calidades bastante diferentes.

Hoy en día está totalmente abandonada la práctica usada en algunos países anglosajones de asociar la calidad al número de rebordes de la mesa, por la cual las mesas de taller no tenían rebordes , las de departamento de inspección tenían dos rebordes, y las de metrología tenían cuatro rebordes.

#### 2.5.4. Superficie portante.

La norma francesa establece que para las mesas de fundición es necesario fijar un número determinado de puntos de contacto en una superficie cuadrada de 25 mm de lado determinado por la calidad de la mesa.

Calidad	Número de puntos portantes
00	25
0	20
I	12
II	8
III	6 (*)

(\*) En el caso de superficies mecanizadas (no rasqueteadas), sólo se obtienen líneas en vez de puntos.

tabla 2.12.

Las superficies portantes se obtienen al encimar una superficie patrón sobre la superficie a examinar donde previamente se le pone una película de gis, y al separar estas, los puntos donde se halla perdido el gis en la superficie a examinar son los puntos portantes de esta.

#### 2.6. MATERIALES Y TRATAMIENTOS TERMICOS PARA ESTOS.

Los materiales más empleados en la fabricación de mesas metálicas son:

- Acero
- Fundición

##### 2.6.1 Acero.

La norma británica (BS 869 1978) recomienda las siguientes 3 composiciones de aceros,

Acero al carbón.- Se recomienda la siguiente composición de acero al carbón.

Carbón	1.00 % a 1.10%
Manganeso	0.30 % máx.
Silicio	0.25 % máx.

El plano se calienta lenta y uniformemente hasta alcanzar una temperatura entre 770 °C y 780 °C , y es mantenida así por un tiempo de entre 1 hora a 2 para asegurar una temperatura uniforme en el plano. El plano es templado en una solución de salmuera de 5 % al 10 % y es inmediatamente revenido en un

horno o en un baño de aceite a una temperatura de 150 °C. El plano es mantenido a esta temperatura por un periodo de entre 4 a 5 horas tras lo cual se enfría lentamente en el horno o en el baño de revenido.

Aleación de acero al cromo-carbón. La composición química recomendada de cromo-carbón es la siguiente.

Carbón	1.90 %	a	2.00 %
Cromo	11.00 %	a	13.50 %
Manganeso	0.25 %	máx.	
Silicio	0.30 %	máx.	
Niquel	0.50 %	máx.	

El plano es calentado lento y uniforme a una temperatura de entre 950 °C y 960 °C , y es mantenido a esta temperatura por un periodo de entre 30 min. a 45 min. El plano es templado en aceite, es inmediatamente revenido y el demás proceso es el mencionado para el acero al carbón.

Aleación carbón-cromo (Producido por cubilote o procesos eléctricos). La composición química recomendada para este acero al cromo-carbón es la siguiente.

Carbón	0.95 %	a	1.10 %
Cromo	1.00 %	a	1.50 %
Manganeso	0.25 %	a	0.40 %
Silicio	0.30 %	máx.	

El plano es calentado lento y uniformemente a una temperatura de entre 830 °C y 840 °C y es mantenida a esta temperatura por un periodo de entre 30 min a 45 min. El plano es templado en agua a menos de 20 °C y es inmediatamente revenido por el proceso descrito para el acero al carbón.

### 2.6.2 Fundición.

Según la norma británica (BS 869 - 1978) se recomiendan las siguientes composiciones:

Fundición normal: Composición química.

Carbono total	3.0 %	a	3.5 %
Carbono combinado	0.4 %	a	0.7 %
Manganeso	0.5 %	a	1.2 %
Silicio	1.0 %	a	1.6 %
Azufre	0.15 %	máx.	
Fósforo	1.2 %	máx.	

El tratamiento apropiado para la estabilización dimensional y para relajamiento de esfuerzos en la mesa de fundición de hierro es la siguiente.

La mesa, después de un mecanizado basto completo, es calentada lentamente hasta una temperatura de entre 510 °C y 560 °C máximo dentro del horno y es mantenida a esta temperatura por un periodo largo (25 hr para mejor resultados). Debe evitarse que la mesa reciba el calor directo de las llamas o resistencias, por medio de pantallas convenientemente dispuestas de manera que el calentamiento sea lo más uniforme y continuo posible. Con mesas de pequeño tamaño, se consigue un calentamiento bastante uniforme al introducir las en cajas de limaduras de hierro. La mesa debe de estar soportada en el horno en los mismos puntos de apoyo en los que va sustentarse una vez en servicio.

El enfriamiento de la mesa debe ser a velocidad controlada con una velocidad constante o menor a 5°C/hora hasta los 100°C. Después enfriamiento al aire en el interior del horno hasta temperatura ambiente.

Hierro aleado.- La composición química recomendada es la siguiente.

Carbón total	2.8 %	a	3.2 %
Silicio	0.8 %	a	1.5 %
Manganeso	0.6 %	a	1.0 %
Azufre	0.12 %	máx.	
Fósforo	0.3 %	máx.	
Níquel	1.4 %	a	1.6 %
Cromo	0.4 %	a	0.6 %

El relevo de esfuerzos de la mesa de hierro es el mismo descrito para la fundición normal excepto por el calentamiento en el horno que debe ser de 560 °C a 590 °C máximo.

Las temperaturas inferiores deben emplearse en fundiciones con bajo porcentaje de carbón equivalente, y las superiores con fundiciones de alto porcentaje.

Porcentaje de carbono equivalente

$$C_{eq} = \% C_{total} + (1/3)(\%Si) + (1/3)(\%P)$$

La norma DIN 876 recomienda como material a la fundición de grafito laminar (GG) el cual esta especificado en la norma DIN 1691.

El hierro fundido con grafito laminar es una aleación de hierro carbono silicio, la mayoría de las veces con un 3 a 4 % C y hasta un 4 % de Si. El carbono que no se alea al hierro aparece en forma de láminas. Se puede ver en la figura 2.14.1. hierro fundido con ferrita, en la figura 2.14.2. con perlita; figura 2.14.3., grado intermedio; figura 2.14.4. con martensita.



2.14.1



2.14.2



2.14.3



2.14.4.

figura 2.14. Distintas estructuras del hierro con grafito laminar.

**2.6.3. Influencia del espesor de pared sobre la resistencia de las piezas de fundición.**

El cuadrado indica según la norma VSM 10691 (norma de la industria Suiza) las clases de materiales que son apropiadas para la pieza de fundición con espesor de pared  $s=3$  a 30 mm.

VSM 10691 (Norma de la Unión de Industriales Suizos de metal.)

Norma suiza para el hierro fundido VSM 10691.

Clase de material	$\sigma_B$ min $k_p$ mm <sup>-2</sup>	s mm	Adecuado para
GG 10	10	3 - 8	Piezas de fundición de pared extremadamente delgada y muy ligeras.
GG 15	15	8 - 10	Piezas de fundición complicadas y de pared delgada.
GG 20	20	10 - 30	Piezas de fundición de construcción de máquinas en general.
GG 25	25	20 - 30	Piezas de fundición sometidas a esfuerzo mayor con espesor de pared uniforme.
GG 30	30	> 30	Piezas de fundición sometidas a esfuerzos altos de forma sencilla y espesor de pared uniforme.

tabla 2.13.

Ultimamente se considera que el hierro fundido da mejores resultados cuando, teniendo la misma dureza, presenta una resistencia mayor a la tracción  $\sigma$ , igual resistencia a la tracción  $\sigma$ , con igual resistencia a la tracción, da una dureza menor.

#### 2.6.4. Diagrama de Collaud sobre la resistencia a la tracción.

Este diagrama presenta la resistencia a la tracción  $\sigma_B$  ( $k_p$  mm-2), la dureza Brinell HB ( $k_p$  mm-2), el módulo de elasticidad E ( $k_p$  mm-2) y el espesor de pared s (mm) de las piezas de fundición en función de la resistencia a la tracción  $\sigma_{BO}$  ( $k_p$  mm-2) de probetas fundidas de diámetro  $d_0=30$ mm. Las características de resistencia del material del núcleo de una pieza de hierro fundido dependen en primer lugar de la clase de material empleada en la fundición de la pieza y de la velocidad de enfriamiento del hierro durante y después del endurecimiento en el molde de fundición es decir, de los espesores de pared y del peso de las piezas de fundición.

Una velocidad mayor de enfriamiento debido a un espesor de pared menor favorece la formación de grafito laminar y un mayor afinamiento de la estructura perlítica. De este modo aumenta la resistencia a la tracción y la dureza Brinell. Por el contrario, velocidades de enfriamiento menores debidas a un espesor de pared mayor producen grafito más grueso y más estructura ferrítica con resistencia a la tracción y dureza Brinell menor.

El diagrama de resistencia a la tracción de Collaud ilustra las interrelaciones y grados de influencia que caracterizan al hierro fundido. En la abscisa se indica la resistencia a la tracción de la clase de material empleada en la probeta y en la ordenada la clase de pieza de fundición clasificada según el espesor de pared y el peso. De esta forma, el proyectista puede estimar para una pieza de fundición proyectada los valores que se pueden esperar para la resistencia a la tracción, dureza Brinell y módulo de elasticidad.

La pieza de fundición debe considerarse siempre en conjunto. Como en el molde de arena se efectúa una amplia compensación de temperatura entre las partes de pared gruesa y delgada de la fundición gris que se va endureciendo, todas las propiedades de resistencia indicadas para una pieza de fundición en el campo correspondiente del diagrama sirven para todos los espesores de pared que hayan en la pieza de fundición.

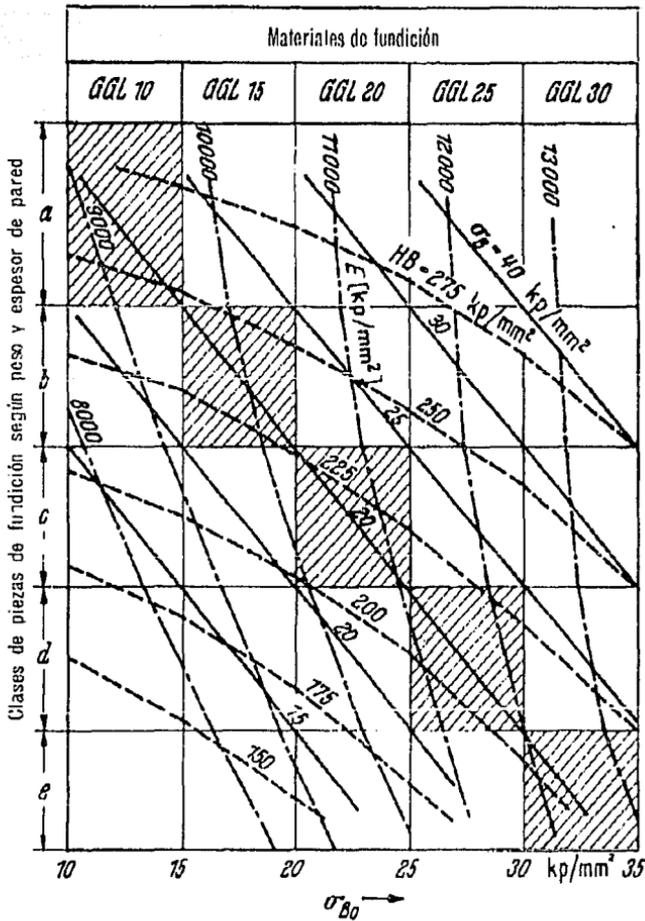


tabla 2.14. Diagrama de propiedades.

Aun cuando la figura presenta 25 campos de coordenadas, en la práctica de la fundición sólo tienen aplicación aquellos cuerpos en los que de acuerdo con el material y tipo de pieza se consiguen piezas predominantes perlíticas.

Las características se indican mediante zonas rayadas para los tipos de piezas en relación con las clases de material correspondiente. Por ello en la práctica las piezas de hierro fundido de una clase determinada se funden preferiblemente con tipos de material que pertenezcan a los campos rayados.

#### **2.6.5. Tratamiento térmico para la fundición.**

Se recomienda un tratamiento térmico ya que una estabilización natural es larga y poco constante en sus resultados, que dependen de las variaciones de temperatura (en número y amplitud). Ligada a las circunstancias atmosféricas difiere de una región a otra, y, en un mismo lugar de un año a otro. Para dar resultados verdaderamente interesantes esta exige por lo menos dos años . Por esto se recomienda un tratamiento térmico.

El único método racional, que permite obtener rápidamente resultados constantes y que asegura la desaparición de tensiones es el que consiste en hacer pasar a las piezas moldeadas de fundición por uno o varios tratamientos térmicos de recocidos de estabilización. Las piezas se calientan a una temperatura de  $T^{\circ}\text{C}$  aproximadamente (ver el valor de  $T$  en la tabla 2.15.); a esta temperatura, los cristales presentan una plasticidad mucho mayor que a la temperatura ordinaria, y bajo el efecto de esfuerzos internos, adquieren con mucha rapidez deformaciones permanentes, las cuales se producen entonces incluso bajo el efecto de acciones muy débiles (acciones que, a la temperatura ordinaria, debido a la rigidez de los cristales, no podrían, aún después de mucho tiempo, dar lugar a la deformación permanente de esos cristales).

##### **2.6.5.1 Práctica de estabilización.**

Después del desbaste, se colocan las piezas en un horno, cuya temperatura, para evitar todo choque térmico en las piezas a tratar, no debe exceder los  $100^{\circ}\text{C}$ .

La temperatura se aumenta lenta y progresivamente hasta el valor  $T$ ; el período que se tarda en alcanzar la temperatura debe ser por lo menos de 5 horas (con el fin de evitar las tensiones secundarias debidas a diferencias de dilatación); más una hora por centímetro de espesor, cuando se sobrepase un espesor medio de 20 mm.

Temperatura de estabilización en las piezas moldeadas de hierro fundido.

Tipo de fundición	Temperatura de estabilización T°C
Fundiciones ordinarias(no aleadas)	450 a 550
Fundiciones con gran contenido en silicio (Si > 3%)	480 a 560
Fundiciones débilmente aleadas (Ni, Cr, Mo, etc.)	565 a 590
Fundiciones fuertemente aleadas (Ni, Cr, Mo, etc.)	590 a 650
Fundiciones blancas (del tipo martensítico)	250 a 300
Fundiciones con un 30% de Cr y fundiciones austeníticas	650 a 670

Las cifras inferiores corresponden a piezas cuyos espesores son constantes y superiores a 20mm.

Las superiores corresponden a piezas delgadas o a piezas que presentan al mismo tiempo partes delgadas y gruesas. Si se busca una estabilización muy avanzada y se admite una disminución de la dureza Brinell, las cifras máximas indicadas serán sobrepasadas de 20 a 25 °C.

Se llaman fundiciones débilmente aleadas, aquellas cuyos componentes de adición, bien existan solos o al mismo tiempo, tengan en su composición las cantidades que seguidamente se indican:

Ni=<0.5%      Cr=<0.3%      Mo=<0.2%      Va=<0.15%

tabla 2.15.

El tiempo de mantenimiento de temperatura debe ser por lo menos de 5 horas, para piezas que tienen hasta 20mm. de espesor y se aumentará una hora por cada fracción suplementaria de 10mm. de espesor. Esta duración debe entenderse, a partir del momento en que la temperatura tenga el valor T<sup>0</sup> y se haya estabilizado. El enfriamiento deberá ser tan lento como sea posible, y en ningún caso inferior a 12 horas.

Quando se trate de piezas que deben presentar una precisión muy grande y una constancia absoluta de formas será preciso proceder a una estabilización doble. Proceder entonces de la siguiente manera:

1.-Estabilización en las condiciones que anteriormente se señalan.

2.-Desbaste de todas las partes mecanizadas de la pieza, hasta unos milímetros (alrededor de 2 a 3 para las piezas de pequeñas dimensiones, 3 a 5 para piezas medias, 5 a 6 para piezas gruesas y piezas de grandes dimensiones) de las cotas terminadas.

3.-Estabilización, en las condiciones enunciadas anteriormente (pero de una duración más corta que la primera, teniendo en cuenta los espesores).

#### Observaciones.

a) La temperatura de estabilización no debe sobrepasar las máximas indicadas, por encima de las temperatura indicadas la dureza Brinell de las piezas estabilizadas decrece ligeramente.

b) En el horno, las piezas deben ser perfectamente calzadas, todo saliente, todo falso equilibrio tendría por efecto el hacer intervenir fuerzas secundarias, cuya acción podría deformar las piezas tratadas, sobre todo el caso de piezas pesadas o de piezas que presentan secciones de pequeña resistencia a la flexión. En este orden de ideas, es necesario elegir la posición más conveniente de la pieza en el horno. Eventualmente hay que calzar las partes de las piezas que pueden dar lugar a deformaciones por gravedad.

c) Si, a primera vista, la estabilización de piezas de fundición se presenta como una operación costosa (transporte de piezas, su manipulación, energía necesaria, amortización del horno, mantenimiento y conservación de este último, etc.), la experiencia demuestra que, en el caso de piezas moldeadas destinadas a trabajos de precisión, o a aparatos y máquinas herramientas para trabajos delicados, y con mayor razón en todos los casos en que las piezas moldeadas entran como aparatos de medida o de control, la estabilización es siempre económica. Cuesta siempre mucho menos, que múltiples retoques, que una multitud de correcciones una después de otra. Y sobre todo, permite garantizar a los clientes la auténtica "estabilidad" de los conjuntos montados y darles plazos ciertos en cambio de la pieza fundida, periodos de calibración o de remaquinado, etc.

## **CAPITULO 3**

### **CONCEPTOS BASICOS DEL METODO DEL ELEMENTO FINITO**

## CONCEPTOS BASICOS DEL METODO DEL ELEMENTO FINITO

### 3.1. Introducción.

En esta sección se establecerán los conceptos necesarios para la comprensión, análisis y aplicación del método del elemento finito (M.E.F.); se describirán las bases en que se fundamenta este método, como son la teoría de la elasticidad, las relaciones esfuerzo-deformación, los conceptos de la energía potencial total, así como el principio de la energía potencial estacionaria.

En términos generales el método del elemento finito (M.E.F.) es una poderosa herramienta numérica que proporciona soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales. Este puede ser considerado como una extensión del método de Rayleigh-Ritz. El método se basa en que, teniendo un medio continuo con un número infinito de grados de libertad (g.d.l.), este es remplazado por un sistema discreto con un número finito de (g.d.l.); es decir el método subdivide el continuo en un número finito de regiones llamados elementos, que se encuentran conectados en un número finito de puntos conocidos como nodos, en los cuales son aplicadas las cargas.

### 3.2. Conceptos de elasticidad.

Los cuerpos se clasifican en rígidos y en deformables. Un cuerpo elástico es un sólido capaz de deformarse bajo la acción de fuerzas externas, este tipo de material es capaz de recuperar por completo sus dimensiones originales al suprimir las fuerzas que se aplican, es decir el cuerpo recobra completamente su estado original.

Se considera un medio continuo a una sustancia uniformemente repartida, la cual se puede idealizar con diversos modelos para su estudio. La mecánica del medio continuo involucra los desplazamientos y flujos de cantidades de materiales sólidos y fluidos.

### 3.3. Relaciones entre el desplazamiento y la deformación en un medio elástico.

Las relaciones entre las deformaciones y los desplazamientos son una clave importante en el (M.E.F.) en los problemas de análisis de esfuerzos. Por definición una deformación normal es la relación del cambio entre la longitud inicial y la longitud final; esto es:

$$\epsilon_x = \frac{L_0 - L_0}{L_0} = \frac{L_0 - L_0}{L_0} = \frac{[dx + (u + u_x dx) - u] - dx}{dx} = u_{,x} \quad (1)$$

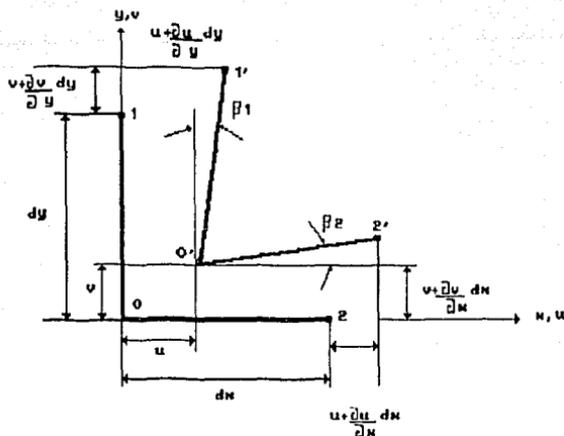


Figura 3.1 Desplazamiento y deformación para una longitud diferencial  $dx$  y  $dy$ .

En forma similar en la dirección  $y$ , para la deformación normal tenemos  $\epsilon_y = v, y$ . Si el desplazamiento ocurre en las direcciones  $X, Y, Z$  de los ejes coordenados, las definiciones básicas de deformación lineal nos dan:

$$\epsilon_x = u, x \quad \epsilon_y = v, y \quad \epsilon_z = w, z \quad (2)$$

Simultáneamente a la deformación lineal un cuerpo puede experimentar deformaciones angulares; cuando las variaciones son pequeñas, las deformaciones angulares se evalúan directamente como la variación del ángulo; es decir cuando el incremento en los desplazamientos es pequeño se consideran como  $\beta_1 \approx \tan \beta_1$  y  $\beta_2 \approx \tan \beta_2$ ; entonces la deformación angular esta dada por:

$$\Gamma_{xy} = \beta_1 + \beta_2 = u, y + v, x \quad (3)$$

Generalizando este concepto a tres dimensiones y aplicando un análisis similar tenemos:

$$\epsilon_z = w, z \quad \Gamma_{yx} = v, z + w, y \quad \Gamma_{zx} = u, z + w, x \quad (4)$$

Una vez calculadas las deformaciones lineales y las angulares, para representar el estado de deformación en un punto del medio continuo, en función del estado de desplazamientos, se puede utilizar la notación matricial es decir:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \Gamma_{xy} \\ \Gamma_{yz} \\ \Gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d/d_x & 0 & 0 \\ 0 & d/d_y & 0 \\ 0 & 0 & d/d_z \\ d/d_y & d/d_x & 0 \\ 0 & d/d_z & d/d_y \\ d/d_z & 0 & d/d_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 3.4. Relaciones de esfuerzo deformación.

Por facilidad se presenta un breve resumen de las relaciones esfuerzo deformación en coordenadas cartesianas, en dos dimensiones. En la figura (3.2) se presenta un elemento infinitesimal sujeto a un estado de esfuerzos; de aquí se desarrollan las ecuaciones de equilibrio estático. Las fuerzas a las que está sometido el elemento pueden incluir fuerzas internas (o fuerzas de cuerpo), y fuerzas aplicadas en la periferia como son las cargas térmicas. Las fuerzas de cuerpo son cargas gravitacionales o cargas de inercia (generadas por velocidades angulares, aceleraciones lineales o angulares).

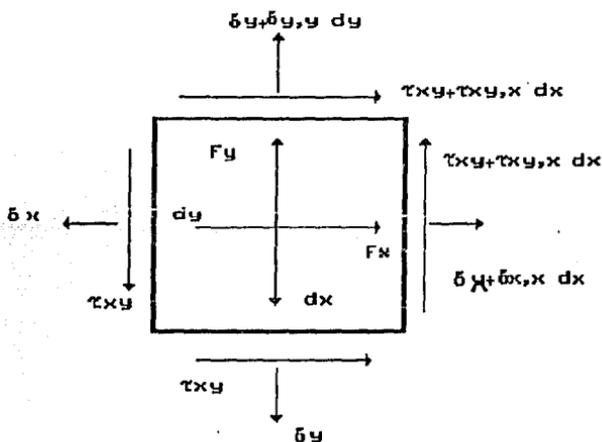


figura 3.2 Esfuerzos y fuerzas de cuerpo que actúan en un elemento diferencial de espesor constante.

Las fuerzas de cuerpo  $F_x$  y  $F_y$  son aplicadas sobre todos los puntos del material y tienen dimensiones de fuerza por unidad de volumen. Estas pueden ser la fuerza de gravitación, fuerzas de inercia o algún campo magnético. Se consideran positivas cuando actúan en la dirección positiva de los ejes coordenados. En general las fuerzas de cuerpo están en función de las coordenadas, por ejemplo  $\sigma_{x,x}$  es la razón del cambio de  $\sigma_x$  con respecto a  $x$ . Para poder lograr el

equilibrio de las fuerzas en la dirección x requerimos  $\Sigma f_x=0$  lo mismo sucede para la dirección y ( $\Sigma f_y=0$ ).

$$\text{Esfuerzos normales } \sigma_{xx} , \sigma_{yy} , \sigma_{zz} \quad (6)$$

$$\text{Esfuerzos cortantes } \tau_{xy} , \tau_{yz} , \tau_{zx} \quad (7)$$

Para un plano tenemos:

$$\text{en la dirección x } \sigma_{x,x} + \tau_{xy,y} + F_x = 0 \quad (8)$$

$$\text{en la dirección y } \tau_{xy,x} + \sigma_{y,y} + F_y = 0 \quad (9)$$

En un sólido utilizando argumentos similares se pueden obtener las ecuaciones de equilibrio en el espacio.

$$\sigma_{x,x} + \tau_{xy,y} + \tau_{zx,z} + F_x = 0 \quad (10)$$

$$\tau_{xy,x} + \sigma_{y,y} + \tau_{yz,z} + F_y = 0 \quad (11)$$

$$\tau_{zx,x} + \tau_{yz,y} + \sigma_{z,z} + F_z = 0 \quad (12)$$

Para un material elástico, isotrópico (no tiene direcciones preferenciales) y homogéneo la ley de Hooke establece que la relación entre el  $\sigma$  y  $\epsilon$  es la siguiente.

$$\{\sigma\} = [E] \{\epsilon\} \quad (13)$$

donde

$$\{\sigma\} = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx}]^T \quad (14)$$

$$\{\epsilon\} = [\epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z \ \Gamma_{xy} \ \Gamma_{yz} \ \Gamma_{zx}]^T \quad (15)$$

Las deformaciones angulares se relacionan con los esfuerzos cortantes con las siguientes expresiones:

$$\Gamma_{xy} = \tau_{xy}/G \quad (16)$$

$$\Gamma_{yz} = \tau_{yz}/G \quad (17)$$

$$\Gamma_{zx} = \tau_{zx}/G \quad (18)$$

Donde  $G$  es el módulo de rigidez al corte definido como  $G = E/2(1+\mu)$ , y  $\mu$  es la relación de Poisson. En dos dimensiones se tiene:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix} = 1/E \begin{bmatrix} 1 & -\mu & 0 \\ -\mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & E/G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Invirtiendo la matriz

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = 1/(1-\mu^2) \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\mu/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (20)$$

Con lo cual se obtiene la relación entre esfuerzos y deformaciones en un punto cualquiera dentro de un material elástico, isotrópico y homogéneo.

### 3.5. Principio de la energía potencial estacionaria.

La configuración de equilibrio para un sistema está fundamentada en el principio de la energía potencial. Se presentará la energía potencial como una expresión integral, esta y otras integrales se conocen como funcionales y se introducen para tener un punto de partida de las técnicas de aproximación.

El funcional es una expresión integral que tiene implícitas ecuaciones diferenciales que describen el problema que se pretende resolver. En mecánica estructural es utilizado extensamente el funcional que expresa la energía potencial. Los funcionales también se utilizan para analizar fenómenos de conducción de calor, acústica, modos en cavitación, ciertos flujos de fluidos y otros problemas. Se presentará el funcional que expresa la energía potencial y se observará su uso para producir la formulación del elemento finito en problemas de mecánica de sólidos.

En esta parte consideraremos que los problemas de mecánica estructural son independientes del tiempo. Se define a un sistema como una estructura física junto con las cargas aplicadas a ella.

De la figura 3.3. se observa que el sistema tiene una configuración inicial de referencia  $C_R$  y una configuración de desplazamiento  $C_D$ . Este sistema se conoce como conservativo si el trabajo final de las fuerzas internas y el trabajo final de las cargas externas, son independientes de la trayectoria seguida para pasar de la configuración inicial  $C_R$  a la final  $C_D$ . En una estructura elástica el trabajo final de las fuerzas internas es igual en magnitud al cambio de energía interna.

El resorte de la figura 3.3 que está sujeto a una carga donde  $C_R$  y  $C_D$  son las configuraciones de referencia, no disipa energía, el trabajo de las fuerzas internas (energía de deformación del resorte) depende sólo de la amplitud  $D$  y no del camino recorrido de  $C_R$  a  $C_D$ . En forma similar, la carga externa  $P$  con magnitud y dirección constante produce un desplazamiento de magnitud  $PD$  no importando el camino seguido para pasar de la configuración  $C_R$  a la  $C_D$ .

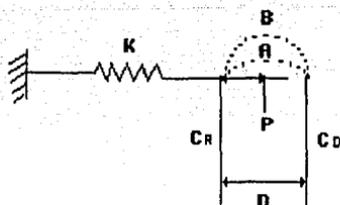


Figura 3.3 Resorte lineal con una rigidez  $k$ , cargado con una fuerza constante  $P$ , paralela al eje  $x$ . Los desplazamientos hipotéticos por las trayectorias  $A$  y  $B$ , hasta el punto de configuración de carga  $C_D$ .

Por otro lado las condiciones de frontera que puede presentar un sistema son de dos tipos esenciales (o principales) y no esenciales (conocidas como naturales). Por ejemplo para una barra en cantilever donde  $w$  es la deflexión lateral y  $w, x$  es el giro de la barra en el punto  $x$ , las condiciones de frontera esenciales (que también pueden llamarse geométricas o cinemáticas en otros problemas) donde  $w=0$  y  $w, x=0$  para  $x=0$ . Las condiciones no esenciales como  $w, xx=0$  y  $w, xxx=0$  para  $x=L$ , el momento de la barra  $M=EIw, xx$  y la fuerza de corte transversal  $V=EIw, xxx$  ambas son cero cuando  $x=L$ . ver figura 3.4 (a).

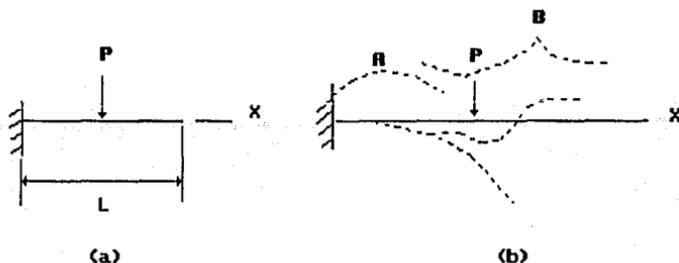


Figura 3.4 (a) Barra en cantilever. (b) Dos tipos de configuraciones inadmisibles (líneas arriba de eje  $x$ ) y dos configuraciones admisibles (las que se encuentran por abajo del eje  $x$ ).

Una configuración admisible es una configuración que satisface la configuración interna y las condiciones de frontera esenciales. Por ejemplo en la figura. (3.4 b) la curva superior es inadmissible, pues no satisface las dos condiciones de frontera esenciales,  $w=0$  y  $w, x=0$  para  $x=0$ . Tampoco satisfacen la compatibilidad porque hay un salto en  $A$  y la cúspide en  $B$ . En cambio las dos curvas de abajo ambas pueden ser admisibles.

La energía potencial de un sistema también conocida como energía total potencial incluye:

- a.- La energía de esfuerzo de una distorsión elástica.
- b.- La energía potencial que almacena cuando se aplica una carga.

El principio de la energía potencial estacionaria.

Entre todas las configuraciones admisibles de un sistema conservativo, aquellas que satisfagan las ecuaciones de equilibrio hacen que la energía se mantenga estacionaria, con respecto a pequeñas variaciones admisibles de desplazamiento.

Para un sistema linealmente elástico la energía potencial total esta dada por la expresión  $\Pi_p = U + \Omega$ . Donde  $U$  es la energía de deformación del sistema y  $\Omega$  es la carga potencial. Para la figura 3.5 la carga esta considerada que actúa siempre con un valor  $P$  por lo que  $\Omega = -PD$  y  $U = \frac{1}{2}kD$ ; el desplazamiento es a lo largo del eje  $x$  por lo que se obtiene un trabajo  $PD$  con eso las cargas potenciales son iguales en magnitud, de aquí por que el signo negativo de  $\Omega = -PD$ , la energía potencial total es  $\Pi_p = \frac{1}{2}kD - PD$ .

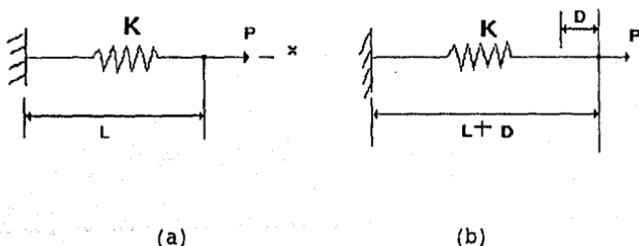


Figura 3.5 (a) Configuración de un resorte lineal con rigidez  $k$ . (b) Configuración del resorte después de que ha sido aplicada una fuerza  $P$ , se observa un alargamiento del resorte  $D$  unidades.

Se puede considerar que la energía interna total y el trabajo externo final cambian de configuración del estado de referencia  $D=0$  hasta un desplazamiento  $D \neq 0$ . Tomando en cuenta que  $P$  es considerada positiva de derecha a izquierda y  $D$  es considerada positiva de izquierda a derecha, y  $\Omega$  se ha supuesto como  $+PD$ . En un solo desplazamiento a lo largo del eje  $x$ , el simple (g.d.l.) define todas las posibles configuraciones. La configuración de equilibrio  $D_{eq}$  esta fundamentada por el valor estacionario de  $\Pi_p$ .

$$d\Pi_p = (kD_{eq} - P)dD = 0 \quad \text{donde } D_{eq} = P/k \quad (22)$$

La ecuación  $(kD_{eq} - P)dD = 0$  en un instante por el principio del trabajo virtual al final de varios esfuerzos se tienen

pequeños desplazamientos que son admisibles  $dD$  de la configuración de equilibrio. Gráficamente podemos ver que  $II_p$  es relativamente mínimo, con la media del equilibrio en estado estable de la figura 3.6.

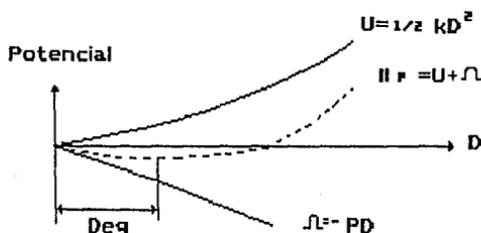


Figura 3.6 Interpretación gráfica de la relación de la energía potencial.

### 3.6. Problemas con muchos grados de libertad (g.d.l.).

En un análisis típico de elementos finitos se utilizan cientos de grados de libertad y se tienen desplazamientos nodales en los ejes  $X, Y, Z$ . Donde  $n$  el número de (g.d.l.) que han de calcularse y  $D$  es el vector de desplazamientos  $(D) = [D_1, D_2, \dots, D_n]^T$ , utilizando el principio de superposición bajo las condiciones impuestas.

El potencial  $II_p$  esta en función de  $D_i$ , simbólicamente  $II_p = II_p(D_1, D_2, \dots, D_n)$ . Aplicando el principio de la energía estacionaria podemos escribir:

$$dII_p = \delta II_p / \delta D_1 \cdot dD_1 + \delta II_p / \delta D_2 \cdot dD_2 + \dots + \delta II_p / \delta D_n \cdot dD_n = 0 \quad (23)$$

En el principio del estado estacionario prevalece que  $II_p = 0$  solo para pequeñas variaciones que son admisibles en la configuración de equilibrio. Podemos imaginar que  $D_1$  no es cero y tampoco lo serán  $D_2$  y  $D_3$ . Las  $n$  ecuaciones son resueltas valuando los  $n$  de los grados de libertad (g.d.l.) que están definidos por la configuración de equilibrio.

Por ejemplo para la serie de resortes presentada en figura la 3.7. La energía potencial esta dada por:

$$II_p = \frac{1}{2} k_1 D_1^2 + \frac{1}{2} k_2 (D_2 - D_1)^2 + \frac{1}{2} k_3 (D_3 - D_2)^2 - P_1 D_1 - P_2 D_2 - P_3 D_3 \quad (24)$$

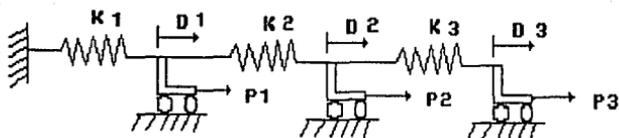


Figura 3.7 Sistema de tres resortes idealizados con tres grados de libertad, sujetos a las cargas axiales P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> y P<sub>3</sub>. Los grados de libertad D<sub>i</sub> son los desplazamientos relativos en un punto. Cuando el resorte se encuentra sin carga los desplazamientos son D<sub>1</sub>=D<sub>2</sub>=D<sub>3</sub>=0.

Derivando con respecto a D<sub>i</sub> para i=1,2,3 se obtienen una serie de ecuaciones lineales de la forma:

$$\begin{aligned} k_1 D_1 - k_2 (D_2 - D_1) - P_1 &= 0 \\ k_2 (D_2 - D_1) - k_3 (D_3 - D_2) - P_2 &= 0 \\ k_3 (D_3 - D_2) - P_3 &= 0 \end{aligned} \quad (25)$$

En forma matricial se tiene  $[k][D] = \{R\}$ .

$$\begin{bmatrix} K_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (26)$$

La energía potencial puede estructurarse y escribirse de la siguiente manera:

$$IIP = U + \Omega \text{ donde } U = \frac{1}{2} \{D\}^T [K] \{D\} \text{ y } \Omega = -\{D\}^T \{R\} \quad (27)$$

Y U=0 cuando D=0 donde D representa la rigidez del cuerpo al movimiento.

### 3.7. Energía potencial de un cuerpo.

La energía potencial de un cuerpo elástico consiste en la energía de deformación elástica y las cargas potenciales que actúan sobre un cuerpo o en su superficie. La expresión de la energía potencial puede usarse para formular la matriz de rigideces y el vector de carga del sistema.

Considerando un cuerpo linealmente elástico, que tiene cargas conservativas, en un volumen V y una área con superficie S, la expresión de la energía potencial es:

$$II_P = \int_V \left( \frac{1}{2} \{\epsilon\}^T [E] \{\epsilon\} - \{\epsilon\}^T [E] \{\epsilon_0\} + \{\epsilon\}^T \{\sigma_0\} \right) dV - \int_V \{u\}^T \{F\} dV - \int_S \{u\}^T \{\phi\} ds - \{D\}^T \{P\} \quad (28)$$

En la primera integral la expresión que se encuentra entre paréntesis representa  $U_0$ , la energía de deformación por unidad de volumen. Siendo el trabajo igual a las fuerzas aplicadas para un mismo desplazamiento.

$$dU_0 = \sigma_x d\epsilon_x + \sigma_y d\epsilon_y + \sigma_z d\epsilon_z + \tau_{xy} d\Gamma_{xy} + \tau_{yz} d\Gamma_{yz} + \tau_{zx} d\Gamma_{zx} \quad (29)$$

Generalizando tenemos que  $\delta U_0 / \delta \epsilon_x = \sigma_x$ ;  $\delta U_0 / \delta \epsilon_y = \sigma_y$ ;  $\delta U_0 / \delta \Gamma_{zx} = \tau_{zx}$ . Expresando las seis derivadas de la matriz usando la relación de esfuerzo-deformación:

$$\{\delta U_0 / \delta \epsilon\} = \{\sigma\} \quad \{\delta U_0 / \delta \Gamma\} = [E] \{\epsilon\} - [E] \{\epsilon_0\} + \{\sigma_0\} \quad (30)$$

La segunda integral de la ecuación (28) contiene las fuerzas de cuerpo  $\{F\}$  y la fuerza de tracción de superficie  $\{\phi\}$ .

La solución del (M.E.F.) raramente es exacta pero se puede tener mayor precisión cuando se utilizan un número mayor de (g.d.l.).

Los desplazamientos y esfuerzos producidos por la aplicación de las fuerzas están descritos por las componentes del desplazamiento  $u, v, w$ . La solución del (M.E.F.) da una aproximación para el campo  $u, v, w$ . Cada campo es una serie que se expresa como una combinación lineal de las funciones de aproximación,  $f_i = f_i(x, y, z)$  y de las amplitudes  $a_i$ , donde los coeficientes  $a_i$  se conocen como coordenadas generalizadas. Por lo tanto:

$$u = \sum_{i=1}^l a_i f_i \quad v = \sum_{i=1}^m a_i f_i \quad w = \sum_{i=m+1}^n a_i f_i \quad (31)$$

Cada una de las funciones  $f_i = f_i(x, y, z)$  deben ser admisibles, esto es, deben satisfacer cada una de las condiciones de compatibilidad así como las condiciones esenciales de frontera. Estas pueden admitir que algunas de las  $f_i$  no satisfaga las condiciones no esenciales de frontera. Usualmente las  $f_i$  son polinomios. Si se desea mayor precisión en la solución aproximada, estos análisis pueden realizarse con una gran cantidad de términos de la serie ó incluyendo una mayor cantidad de elementos. Los (g.d.l.) se determinan de la siguiente manera. Se sustituyen las ecuaciones (31), en las relaciones de deformación desplazamiento de la ecuación (5), con lo que se obtienen las deformaciones y a fin de obtener los esfuerzos usamos la ecuación (28). Para evaluar  $II_P$  que esta en función de  $D_i$  se utiliza la ecuación (23) y de acuerdo con el principio de la energía potencial estacionaria la ecuación de equilibrio está definida por  $n$  ecuaciones algebraicas.

$$dII_P / da_i = 0 \quad \text{para } i=1, 2, 3, \dots, n \quad (32)$$

El sistema de ecuaciones (32) se resuelve numéricamente para evaluar las  $a_i$  del campo de los desplazamientos de la ecuación (31). Las ecuaciones (32) conducen a la matriz de rigidez del sistema y puede escribirse de la forma usual  $[K]\{D\}=\{R\}$ , donde  $\{D\}=[a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ . Donde todas las  $D_i$  tienen unidades de desplazamiento y no todas las  $R_i$  tienen unidades de fuerza pero cada producto  $D_i R_i$  tiene unidades de trabajo o energía.

Los conceptos anteriores se aplicarán a un problema de una barra cargada axialmente. Considerando una barra uniforme figura. (3.8), la carga se distribuye linealmente a lo largo de toda la barra según la función  $q=cx$ , donde  $c$  es una constante por unidad de fuerza dividida por la raíz cuadrada de la longitud. El desplazamiento axial  $u$  y el esfuerzo axial  $\sigma_x$  serán calculados de acuerdo al (M.E.F.).

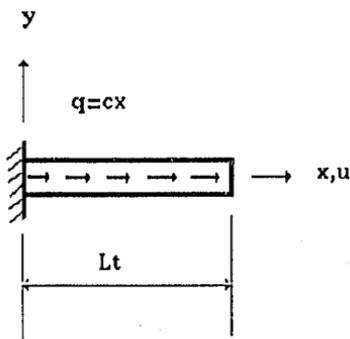


Figura 3.8 Barra cargada uniformemente bajo una carga axial de intensidad  $q=cx$ , donde  $c$  es una constante.

La deformación axial esta dada por  $\epsilon_x = u, x$  de la ecuación:

$$II_P = \int_0^L (\frac{1}{2} E \epsilon_x^2 - \epsilon_x E \epsilon_0 + \epsilon_x \sigma_0) A dx - \int_0^L u F_x A dx - (D)^T (P) \quad (33)$$

$$II_P = \int_0^{L_t} \frac{1}{2} E u, x^2 A dx - \int_0^{L_t} u (cx) dx \quad (34)$$

De la ecuación (30) con  $f_i = f_i(x)$  considerándola como una función polinomial:

$$u = \sum_{i=1}^n a_i f_i = a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \quad (35)$$

Para este caso usaremos solo una aproximación simple utilizando el primer término de la serie  $u=a_1x$ , haciendo uso de la ecuación (32)  $dII_p/da_1=0$ , obtenemos:

$$II_p = AEL_t/2 \cdot a_1^2 - cL_t/3 \cdot a_1 \quad (36)$$

$$dII_p/da_1 = 0 \quad a_1 = cL_t^2/3AE \quad (37)$$

Donde  $u=cL_t/3AE \cdot x$  como el esfuerzo está definido por  $\sigma_x = Eu, x$  se tiene  $\sigma_x = cL_t^2/3A$ .

Si se requiere mayor exactitud se utilizarían más términos de la serie. Por ejemplo, tomando un término más  $u=a_1x+a_2x^2$  realizando nuevamente los mismos pasos anteriores y escribiendo  $dII_p/da_1=0$  y  $dII_p/da_2$  obtenemos:

$$AEL_t \begin{bmatrix} 1 & L_t \\ L_t & 4L_t^2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = cL_t^3/12 \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\text{o de la forma} \quad \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = cL_t/12AE \begin{bmatrix} 7L_t \\ -3 \end{bmatrix} \quad (39)$$

donde  $u=cL_t/12AE \cdot (7L_t-3x^2)$  y finalmente  $\sigma_x = Eu, x$ ;  $\sigma_x = cL_t/12A \cdot (7L_t-6x)$ . Se puede ver como la aproximación mejora pero el grado de dificultad aumenta considerablemente.

## **CAPITULO 4**

### **IMPORTANCIA DEL ANALISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA LA MESA DE PLANITUD**

## IMPORTANCIA DEL ANALISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA LA MESA DE PLANITUD.

### 4.1. Inestabilidad por Temperatura.

Los gradientes de temperatura se deben tomar en consideración, ya que pueden ocasionar distintas variaciones en las dimensiones de las piezas. A continuación se mencionan algunos de los posibles problemas, que conducen a hacer un análisis de transferencia de calor para la mesa de planitud.

A.- Variaciones de las relaciones geométricas por efecto de diferentes gradientes de temperatura sobre una misma pieza. Por ejemplo, si se somete una mesa de planitud a un gradiente de temperatura de 70°F (21.1°C) y después es sometida a otro gradiente de temperatura de 90°F (32.2°C), Si se lleva a cabo una medición con una escuadrada, se encuentra una diferencia de 0.2 segundos de arco con respecto a la longitud tomada a la temperatura de referencia (inicial). Del mismo modo, si se realizara la medición en sentido inverso, se tendría el mismo error de 0.2 segundos de arco. Es raro que las tensiones y compresiones que han sido formadas por las distintas contracciones que ha experimentado la pieza, se equilibren en forma tal que está permanezca igual al modelo que ha servido para fabricarla. Generalmente, el equilibrio no se produce sino después de la deformación más o menos importante del conjunto de ciertas partes de la pieza. Estas deformaciones que cesan cuando se realiza el equilibrio de esfuerzo-deformación, se acentúan una vez que el equilibrio es roto, ya sea por mecanizado, que tiene como resultado la disminución de ciertas secciones de la pieza, por la manipulación de la pieza cuando es trasladada de un sitio a otro, y no se toma el tiempo estipulado de estabilización que proporciona el fabricante, o cuando se encuentra en un ambiente con niveles de estratificación y la pieza se encuentra sometida a un gradiente térmico, que por mínimo que sea se manifiesta en deformaciones y tensiones internas, este último caso es por el que se realiza el análisis de transferencia de calor.

B.- Las diversas temperaturas que se pueden localizar en una o en diferentes piezas, si no se toman las precauciones necesarias pueden hacer que estas se dilaten o contraigan irregularmente. La distorsión ocasionada por diferentes temperaturas por lo general es producida por el mal manejo de las piezas.

Algunos ejemplos de causas que ocasionan temperaturas no uniformes son los siguientes:

- Proximidad con radiadores, puertas, ventanas, o corrientes de aire.
- Calor por manipulación.

- Cambio en la temperatura del cuarto. Esto produce un efecto particular en el largo de las piezas. Para eliminar esto se recomienda un tiempo de estabilización de algunas horas.

- En la estratificación es extremadamente difícil controlar la temperatura de un cuarto de inspección de piso a techo. En algunas laboratorios de metrología es posible tener un gradiente de temperatura de  $\pm 0.135^{\circ}\text{C}$ . Es posible tener en estratos de 0.6 a 0.91 metros de ancho una diferencia de temperatura de  $1.11^{\circ}\text{C}$ , a lo largo de toda la altura del techo. Esta diferencia de temperatura es satisfactoria para trabajos con piezas pequeñas. Cuando las piezas son muy grandes estas se someten a gradientes mayores (Nuestro caso de análisis).

#### 4.2 Introducción a la transferencia de calor.

El calor es energía en tránsito, debida a diferencias de temperatura. La transferencia de calor es el área de ingeniería que trata los mecanismos encargados de la transferencia de energía de un lugar a otro, cuando existe una diferencia de temperatura.

Existe tres mecanismos de transferencia de calor: la conducción, la convección, y la radiación.

Conducción. Se dice del calor que pasa de un cuerpo a otro que esta en contacto con él, o de una parte a otra del mismo cuerpo, sin desplazamiento de las partículas.

Convección. Es la transmisión de calor de un lugar a otro dentro de un fluido (gas o líquido) por la mezcla de una porción de éste con otra.

Radiación. Todos los cuerpos desprenden calor en forma de energía radiante, la cual se propaga en todas direcciones como un movimiento ondulatorio, aparentemente sin la intervención de las partículas materiales. La radiación que incide sobre un cuerpo es absorbida por él ya sea totalmente o en parte. Si dos cuerpos, uno más caliente que el otro, son colocados dentro de un recipiente, se produce un intercambio de energía entre ellos. El cuerpo más caliente radia más energía que la que absorbe, el cuerpo mas frío absorbe más energía que la radiada. El proceso continúa aún después que se haya establecido el equilibrio de temperatura, y cada uno de los cuerpos seguirá radiando y absorbiendo energía.

El problema de análisis de la mesa es un problema de conducción, por eso se abunda un poco más sobre este mecanismo de transferencia de calor.

#### 4.3. Conducción.

Los primeros adelantos acerca de la conducción de calor se deben, en gran parte, a los esfuerzos del matemático francés Fourier (1822), que propuso la ley que hoy se conoce como la ley de la conducción de Fourier. La ley de Fourier es una generalización de la información empírica. Dicha ley predice cómo se conduce el calor a través de un medio, partiendo de una región de baja temperatura. Un ejemplo de esto es un horno, caliente en el interior y frío en su exterior. La razón de calor transferido, desde dentro del horno hasta el exterior, es directamente proporcional al área de la superficie de la pared,  $A$ , que se encuentra normal a la dirección del flujo de calor, directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre las paredes,  $(T_{int} - T_{ext})$ , e inversamente proporcional al espesor de las paredes,  $L$ . Por lo tanto:

$$Q = KA \frac{(T_{int} - T_{ext})}{L} \quad (1)$$

donde  $K$  es la constante de proporcionalidad, y se le llama conductividad térmica de la pared;  $K$  es una constante física del material en cuestión. Se debe insistir en que, para mantener las temperaturas con valores  $T_{int}$  y  $T_{ext}$ , se debe suministrar a la cara de la pared que tiene  $T_{int}$ , una cantidad de calor  $Q$ .

Las unidades en S.I. de las diferentes cantidades que aparecen en la ecuación son las siguientes:

$Q$ , razón de flujo de calor,  $[W]$ .

$A$ , el área de la pared normal al flujo de calor,  $[m^2]$ .

$T_{int}$ , la temperatura de la superficie interior de la pared,  $[^{\circ}C]$ .

$T_{ext}$ , la temperatura de la superficie exterior de la pared,  $[^{\circ}C]$ .

$K$ , conductividad térmica del material,  $[W/m^{\circ}C]$ .

Si se lleva la ecuación anterior a la forma diferencial, tendremos que:

$$Q = -KA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

La cantidad  $(dT/dx)$  es el cambio de temperatura con respecto al incremento en la coordenada  $x$ . Puesto que deseamos que la cantidad de calor,  $Q$ , que fluye en la dirección positiva de las  $x$  sea una cantidad positiva, y se sabe, por la segunda

ley de la termodinámica que el calor fluye en la dirección de decrecimiento de la temperatura (es decir,  $dT$  es negativa), se debe tener un signo negativo de la ecuación anterior.

El análisis de la mesa puede considerarse como un problema unidimensional, puesto que se tiene un gradiente de temperatura en una sola dirección. No obstante, el programa de elemento finito resuelve el problema tridimensional, y proporciona las isotermas a todo lo largo de los dos modelos propuestos; por esto hablaremos de conducción en el espacio. El problema también se consideró en estado estable, es decir que no es función del tiempo, puesto que la estratificación del cuarto de metrología se considera estable después de un período de estabilización.

Un objetivo en cualquier problema de transferencia de calor es la determinación de la distribución de temperaturas y el flujo de calor dentro y en la frontera de un cuerpo dado. Existen técnicas analíticas, gráficas, o numéricas. Aquí solamente mencionaremos dos analíticas, y las numéricas.

Con el fin de deducir la ecuación general tridimensional de transferencia de calor, consideramos un pequeño elemento cúbico en coordenadas cartesianas con lados  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  paralelos a los ejes  $x$ ,  $y$ , y  $z$ , respectivamente como se ilustra en la figura 4.1. Utilizando la primera ley de la termodinámica (conservación de la energía), se puede escribir el siguiente balance de energía para el elemento:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Calor que se conduce al} \\ \text{interior en las caras } x=x, y=y, \\ \text{z=z, por unidad de tiempo.} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Calor interno} \\ \text{generado por unidad} \\ \text{de tiempo} \end{array} \right] =$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Calor que se conduce hacia el exterior} \\ \text{en las caras } x=x+dx, y=y+dy, z=z+dz, \\ \text{por unidad de tiempo.} \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Cambio en la energía interna} \\ \text{por unidad de tiempo.} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Trabajo hecho por un} \\ \text{elemento de volumen, por} \\ \text{unidad de tiempo.} \end{array} \right]$$

Como la expansión de sólidos debida a cambios de temperatura es extremadamente pequeña, el último término del miembro derecho en la ecuación anterior es despreciable, y por lo tanto, se elimina.

Sean:

$$Q_x = \text{calor conducido hacia adentro por unidad de tiempo en } x=x.$$

$Q_y$  = calor conducido hacia adentro por unidad de tiempo en  $y=y$ .

$Q_z$  = calor conducido hacia adentro por unidad de tiempo en  $z=z$ .

$Q_{x+dx}$  = calor conducido hacia afuera por unidad de tiempo en  $x=x+dx$ .

$Q_{y+dy}$  = calor conducido hacia afuera por unidad de tiempo en  $y=y+dy$ .

$Q_{z+dz}$  = calor conducido hacia afuera por unidad de tiempo en  $z=z+dz$ .

$q$  = generación de calor interna por unidad de tiempo y por unidad de volumen.

$K$  = conductividad térmica del material.

$\sigma$  = densidad del material.

$c$  = calor específico del material.

$t$  = tiempo.

Según la ley de Fourier:

$$Q_x = -K_x A_x \frac{\delta T}{\delta x} \quad (3)$$

donde :

$K_x$  es la conductividad térmica en la dirección  $x$ .

$A_x$  es el área normal a la dirección  $x$ .

$\frac{\delta T}{\delta x}$

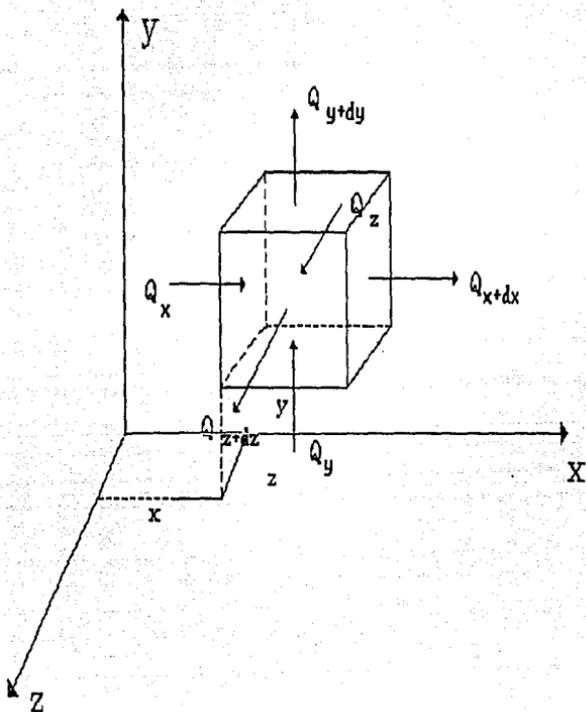
es el gradiente de temperatura en dirección  $x$  o bien:

$$Q_x = -K_x \frac{\delta T}{\delta x} dy dz \quad (4)$$

de igual modo:

$$Q_y = -K_y \frac{\delta T}{\delta y} dx dz \quad (5)$$

$$Q_z = -K_z \frac{\delta T}{\delta z} dx dy \quad (6)$$



Volumen diferencial  
figura 4.1.

También, para los flujos de calor que salen en las tres direcciones de los ejes coordenados se tiene :

$$Q_{x+dx} = -K_x \frac{\delta T}{\delta x} dy dz - \frac{\delta}{\delta x} \left[ K_x \frac{\delta T}{\delta x} \right] dx dy dz \quad (7)$$

$$Q_{y+dy} = -K_y \frac{\delta T}{\delta y} dx dz - \frac{\delta}{\delta y} \left[ K_y \frac{\delta T}{\delta y} \right] dx dy dz \quad (8)$$

$$Q_{z+dz} = -K_z \frac{\delta T}{\delta z} dx dy - \frac{\delta}{\delta z} \left[ K_z \frac{\delta T}{\delta z} \right] dx dy dz \quad (9)$$

Para determinar la energía generada por unidad de tiempo,  $q$ , se multiplica por el volumen del elemento diferencial, dando por resultado la cantidad  $q (dx dy dz)$ .

El cambio en la energía interna para el elemento diferencial sobre un periodo,  $dt$ , es igual a :

$$\left[ \begin{array}{c} \text{masa del} \\ \text{elemento} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \text{calor específico a} \\ \text{volumen constante} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \text{cambio de temperatura} \\ \text{del elemento en el tiempo } dt \end{array} \right]$$

o bien:

$$(\rho dx dy dz) (c_v) dt = (\rho c_v dT) (dx dy dz) \quad (10)$$

Sin embargo, para la ecuación de balance de energía del elemento, necesitamos el cambio de energía interna por unidad de tiempo. Dicho cambio se obtiene dividiendo la expresión anterior entre  $dt$  y se escribe en la forma:

$$[\rho c_v (\delta T / \delta t) dx dy dz] \quad (11)$$

Aproximadamente, para todos los sólidos y líquidos, los calores específicos a presión constante y volumen constante son esencialmente iguales, y por lo tanto borraremos el subíndice en la cantidad  $c_v$ .

Al poner el balance de energía en forma analítica, simplificando se tiene como resultado la ecuación tridimensional general de conducción de calor en coordenadas cartesianas.

$$\frac{\delta}{\delta x} \left[ K_x \frac{\delta T}{\delta x} \right] + \frac{\delta}{\delta y} \left[ K_y \frac{\delta T}{\delta y} \right] + \frac{\delta}{\delta z} \left[ K_z \frac{\delta T}{\delta z} \right] + \dot{q} = \rho c \frac{\delta T}{\delta t} \quad (12)$$

En esta forma, se puede usar la ecuación general tridimensional de conducción de calor para resolver problemas donde la conductividad térmica depende de la posición y/o temperatura. Sin embargo, en muchos problemas de ingeniería, se considera que los materiales poseen conductividad térmica constante.

Para el caso de materiales con conductividad constante, la ecuación general tridimensional de conducción de calor se

transforma en:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} + \frac{q}{K} = \frac{1}{K/\sigma c} \frac{\delta T}{\delta \tau} \quad (13)$$

A la cantidad  $k/\sigma c$  se le llama difusividad térmica,  $\alpha$ , del material y nos dice que tan rápido se propaga o difunde el calor a través del material. Aun cuando la conductividad térmica de los metales es muchas veces mayor que la de los gases, la densidad de los gases es suficientemente pequeña como para admitir que el calor se difunde a través de ellos aproximadamente a la misma razón que lo hace a través de los metales. Escribimos de nuevo la ecuación anterior, usando la difusividad térmica, y tenemos.

$$\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} + \frac{q}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\delta T}{\delta \tau} \quad (14)$$

Para flujo de calor en estado estacionario sin generación o liberación alguna de energía calorífica dentro del cuerpo (es decir, en ausencia de fuentes de calor), la ecuación general se convierte en:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} = 0 \quad (15)$$

Que es la ecuación de Laplace.

Las condiciones de la última ecuación corresponden al caso de la mesa de planitud, aunque esta ecuación esta simplificada. Resolverla se torna difícil puesto que es una ecuación diferencial de segundo orden y en tres dimensiones. De ahí la importancia de los métodos numéricos.

#### 4.4 Ejemplo de transferencia de calor resuelto por el elemento finito.

El siguiente ejemplo es de conducción de calor en una barra. El procedimiento del método es ilustrado, considerando una configuración simple y la solución paso a paso. La configuración nos conduce a un análisis sencillo de flujo de calor en una dimensión, de en una barra aislada en todo su alrededor. La barra esta empotrada con un flujo de calor  $\dot{q}$  en empotramiento. El otro extremo esta libre y tiene un coeficiente de convección  $h$  y una temperatura del fluido circundante de  $T_{\infty}$  °C. La varilla al estar aislada, no permite la perdida de calor a través de la superficie lateral de esta.

La ecuación diferencial que gobierna la temperatura

diferencial de la varilla es:

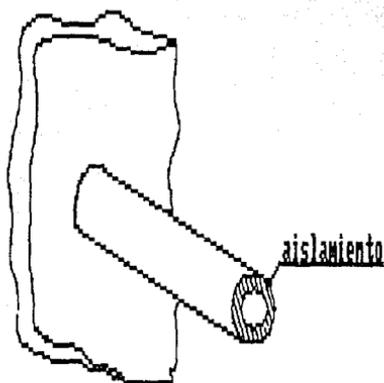
$$Kx \frac{dT}{dx} = 0 \quad (16)$$

con las condiciones de frontera

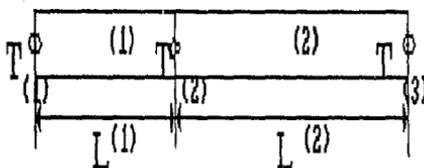
$$Kx \frac{dT}{dx} + q = 0 \quad \text{en } x=0$$

y

$$Kx \frac{dT}{dx} + h(T - T_{\infty}) = 0 \quad \text{en } x=L$$



a



b

figura 4.2. Barra aislada, discretizada en elementos. donde  $Kx$  es el coeficiente de conducción térmica del material. El flujo de calor  $q$  es positivo si lo consideramos así para el calor que sale de la barra.

La ecuación que gobierna la distribución de T con las condiciones de frontera supuestas definen y modelan el problema; éstas son el comienzo de la solución numérica usando la técnica del elemento finito. El cálculo de variaciones proviene de métodos alternativos de formulación de problemas de transferencia de calor. Para el análisis de problemas de transferencia de calor se puede usar el siguiente funcional (en el capítulo anterior se definió este concepto matemático).

$$X = \int_V \frac{1}{2} \left[ K_{xx} \left[ \frac{\delta\phi}{\delta x} \right]^2 + K_{yy} \left[ \frac{\delta\phi}{\delta y} \right]^2 + K_{zz} \left[ \frac{\delta\phi}{\delta z} \right]^2 - 2Q\phi \right] dV \quad (17)$$

$$+ \int_S \left[ q\phi + \frac{1}{2}h(\phi - \phi_\infty)^2 \right] dS$$

La ecuación anterior se minimiza con respecto al grupo de valores nodales ( $\phi$ ); en este caso  $\phi=T$ , es la temperatura.

Para el problema en cuestión el funcional se reduce a:

$$X = \int_V \frac{KX}{2} \left[ \frac{dT}{dx} \right]^2 dV + \int_S \left[ qT + \frac{1}{2}h(T - T_\infty)^2 \right] dS \quad (18)$$

donde la ecuación diferencial:

$$Kx \frac{dT}{dx} = 0 \quad (19)$$

esta sujeta a las condiciones de frontera:

$$Kx \frac{dT}{dx} + q + h(T - T_\infty) = 0 \quad (20)$$

Las ecuaciones anteriores son idénticas a las que gobiernan a la barra, por esto la distribución de temperatura esta dada por X, que también satisfacen las ecuaciones diferenciales que gobiernan nuestro problema ( mesa de fundición), y por esto es solución a este. Como las condiciones de frontera están contenidas en ambos miembros la ultima parte de la ecuación, que es la integral sobre la superficie esta puede ser separada en 2 partes, una por cada extremo de la varilla.

La ecuación (18) empieza por determinar la temperatura en cada nodo. Esta se minimiza usando el grupo de funciones de elemento, en donde cada una define un elemento sencillo y puesto en valores de nodos. Los valores nodales  $T_\beta$  son pues nuestras incógnitas en la formulación del problema.

La implementación del método del elemento finito empieza definiendo los puntos nodales. La varilla puede ser representada por dos elementos lineales con valores nodales  $T_1$ ,  $T_2$ , y  $T_3$ . Las funciones de aproximación de la temperatura para cada elemento son:

$$T^{(1)} = N_1^{(1)} T_1 + N_2^{(1)} T_2 \quad (21)$$

$$T^{(2)} = N_2^{(2)} T_2 + N_3^{(1)} T_3$$

donde las funciones de aproximación están definidas por las expresiones

$$N_i^{(1)} = \frac{x_j - x}{L^{(1)}} \quad N_j^{(1)} = \frac{x - x_i}{L^{(1)}} \quad (22)$$

La formulación funcional para el ejemplo, se transforma en :

$$X = \int_V \frac{1}{2} Kx \left[ \frac{dT(x)}{dx} \right]^2 dv + \int_{S1} qT(x) dS + \int_{S2} \frac{h}{2} (T(x) - T_\infty)^2 dS \quad (23)$$

donde  $s_1$  y  $s_2$  son las superficies donde  $q$  y  $h$  son especificadas. El valor  $X$  es obtenido por sustitución de la temperatura,  $T(x)$  y valuando la integral.

Las integrales de las superficies son valuadas sobre las superficies donde se localizan los nodos, empezando con la de superficie con el flujo de calor  $q$ .

$$\int_{S1} qT(x) dS = qT_1 \int_{S1} dS = qT_1 A_1 \quad (24)$$

Donde  $A_1$  representa el área sobre el nodo uno. La función de temperatura  $T(x)$  simplemente es  $T_1$ , por que la superficie esta sobre el nodo uno. La integral de superficie donde se localiza el coeficiente convectivo,  $h$ , es:

$$\int_{S2} \frac{h}{2} (T(x) - T_\infty)^2 dS = \frac{h}{2} (T_3 - T_\infty)^2 \int_{S3} dS \quad (25)$$

$$= hA_3 (T_3 - T_\infty)^2 = hA_3 (T_3^2 - 2T_3 T_\infty + T_\infty^2) \quad (26)$$

donde  $A_3$  es el área y  $T_3$  es la temperatura sobre el nodo tres.

La derivada de la temperatura con respecto a la integral sobre el volumen en la ecuación (23) y las diferencias (22) nos producen:

$$\frac{dT(1)}{dx} = \frac{1}{L(1)} (-T_1 + T_2) \quad (27)$$

y

$$\frac{dT(2)}{dx} = \frac{1}{L(2)} (-T_2 + T_3)$$

La integral sobre el volumen se separa en dos partes puesto que la ecuación  $dT/dx$  no es continua a todo lo largo del cuerpo. Separando, sustituyendo, e integrando se tiene;

$$\int_V \frac{KX}{2} \frac{dT}{dx} dV = KX \frac{(1)A(1)}{2L(1)} (-T_1 + T_2) + KX \frac{(2)A(2)}{2L(2)} (-T_2 + T_3) \quad (28)$$

El área de la sección transversal es constante entonces en cada elemento se puede considerar  $dV = A^{(e)} dx$  que se utiliza para valuar la integral.

La necesidad de separar la integral del volumen en sumas de integrales, sobre cada uno de los elementos, es producto de una importante característica del método del elemento finito; las propiedades del material nos permite hacer esto de un elemento a otro.

El valor de la función  $X$ , es obtenida por la suma de las ecuaciones (26), (27), (28). El resultado es una ecuación en función de las temperaturas nodales.

$$X = C(1) \frac{(T_1^2 - 2T_1T_2 + T_2^2)}{2} + C(2) \frac{(T_2^2 - 2T_2T_3 + T_3^2)}{2} + qA_1T_1 + hA_3 \frac{(T_3 - 2T_3T_\infty + T_\infty^2)}{2} \quad (29)$$

donde  $C(1) = A^{(1)} KX^{(1)} / L^{(1)}$  y  $C(2) = A^{(2)} KX^{(2)} / L^{(2)}$ .

Los valores de  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$  se obtienen a minimizar  $X$ , por lo tanto:

$$\frac{\delta X}{\delta T_1} = C(1)T_1 - C(2)T_2 + qA_1 = 0 \quad (30)$$

$$\frac{\delta X}{\delta T_2} = -c^{(1)}T_1 + (c^{(1)} + c^{(2)})T_2 - c^{(2)}T_3 = 0 \quad (31)$$

$$\frac{\delta X}{\delta T_3} = -c^{(2)}T_2 + (c^{(3)} + hA_3)T_3 - hA_3T_\infty = 0 \quad (32)$$

La ecuación anterior puede ser ordenada como:

$$\begin{bmatrix} c^{(1)} & -c^{(1)} & 0 \\ -c^{(1)} & (c^{(1)} + c^{(2)}) & -c^{(2)} \\ 0 & -c^{(2)} & (c^{(2)} + hA_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -qA_1 \\ 0 \\ hA_3T_\infty \end{bmatrix}$$

que es la matriz general de la forma.

$$[K](T) = \{F\} \quad (33)$$

La matriz de coeficientes [K] es llamada generalmente la matriz global de rigidez. Propiamente dicho, para este problema de transferencia de calor, la matriz global de conducción. El vector {F} es el vector global de fuerzas, en el caso térmico representa a las temperaturas.

Para finalizar este análisis, solo queda calcular todas nuestras incógnitas físicas, que en este caso son las temperaturas  $T_1$ ,  $T_2$ , y  $T_3$ , con los siguientes valores:

$$Kx = 75 \text{ W/cm } ^\circ\text{C}$$

$$h = 10 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$A = \pi \text{ cm}^2 \text{ (1 cm de diámetro)}$$

$$L = 7.5 \text{ cm}$$

$$q = -150 \text{ W/cm}^2 \text{ (negativo puesto que el calor se mueve dentro de la barra).}$$

y

$$T_\infty = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Los coeficientes se valúan:

$$c^{(1)} = \frac{\pi(75)}{3.75} = 20\pi = c^{(2)} \quad (34)$$

$$hA_3 = 10\pi$$

y

$$hA_3T_\infty = 10(\pi)(40) = 400\pi$$

El sistema final de ecuaciones es

$$\begin{bmatrix} 20 & -20 & 0 \\ -20 & 40 & -20 \\ 0 & -20 & 30 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \pi \begin{bmatrix} 50 \\ 0 \\ 400 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Para que finalmente los valores que satisfacen estas ecuaciones son  $T_1=70$ ,  $T_2=62.5$ , y  $T_3=55$  en grados Celsius.

## **CAPITULO 5**

### **RECOMENDACIONES SOBRE EL MODELO Y LA FUNDICION**

## RECOMENDACIONES SOBRE EL DISEÑO DEL MODELO Y LA FUNDICION

### 5.1. Introducción.

Las piezas que se van a obtener por moldeo deben tener un trazado lógico y tomar en cuenta los fenómenos de contracción.

Los colados apropiadamente diseñados y producidos no tienen propiedades direccionales. No existe estructura laminada o segregada como ocurre cuando el metal se trabaja después de la solidificación. Por ejemplo, esto significa que la resistencia es la misma en todas las direcciones y esta característica es muy útil en algunos engranes, anillos de pistón, camisas de cilindros de motores, etc. La capacidad del metal fundido para fluir dentro de secciones estrechas de diseño complicado es una característica muy deseable. El hierro colado es único ya que tiene buenas características de amortiguamiento que son deseables en la producción para bases de máquinas herramientas, bastidores de motor y otras aplicaciones donde es deseable minimizar la vibración.

### 5.2. Trazado de la piezas con el fin de evitar el rechupe.

Las secciones de espesores diferentes se enfrían a velocidades diferentes. Esto conduce a dificultades si no se diseña un colado con secciones uniformes. Las paredes que se contraen a velocidades diferentes tiran unas de otras y establecen esfuerzos residuales.

Aplicando una serie de reglas de trazado es posible obtener piezas sanas de gran confiabilidad y de aspecto agradable. El hecho de evitar los rechupes en cualquier forma en que se presenten (internos, externos, globales, menores, etc.) se producen siempre en las partes de las piezas que permanecen en último lugar líquidas (en estado pastoso), en condiciones iguales en las partes relativamente macizas de la pieza.

**5.2.1 La primera ley del trazado de una pieza de fundición es diseñar piezas cuyos espesores sean constantes durante el moldeo.**

Esta primera ley es relativamente fácil de respetar cuando se trata de paredes, su aplicación requiere un poco más de estudio y exige más atención cuando se trata de conectar varias paredes.

#### 5.2.1.2. Resaltos.

Cuando están situados en posición de moldeo sobre las paredes laterales o sobre las partes de las piezas colocadas en la parte baja del molde. Los resaltos mal diseñados

constituyen masas difíciles de alimentar, necesitando alimentadores que complican el moldeo.



Figura 5.1. Trazado de una pieza de gran masa aplicando un diseño de espesores constantes.

#### 5.2.1.3. Conexiones de paredes.

Unión de dos paredes. Dos paredes  $P_1$  y  $P_2$  de espesores igual a  $E$ , que se cortan bajo un ángulo  $\alpha$ ; dan lugar en la pieza en su intersección a la formación de un punto caliente.

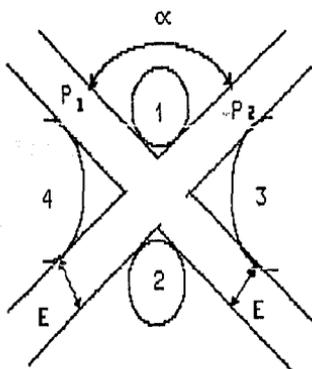
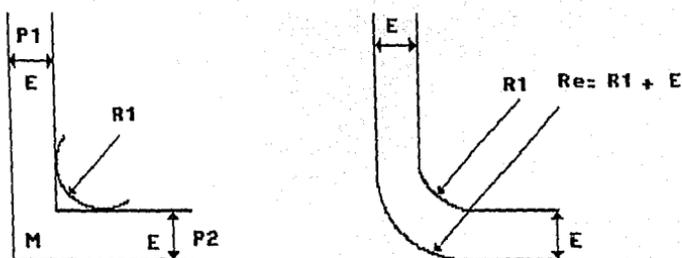


Figura 5.2. Aumento local en la sección debido a la unión con medios arcos.

El trazado de las piezas deberá ser tal que se eviten estas uniones si es posible, o por lo menos se estudien para que el efecto de la masa sea lo más pequeño posible.

#### 5.2.1.4. Unión de dos paredes en forma de V (L).

Las paredes  $P_1$  y  $P_2$  dan en  $M$  una masa que será un punto caliente de la pieza. Realizando un nuevo trazado se puede evitar toda causa de punto caliente.



a. Las paredes P1 y P2 dan en M una masa que será un punto caliente.

b. Este trazado permite evitar toda causa de punto caliente.

Figura 5.3. Unión de dos paredes en forma de V.

El valor del radio  $R_i$ . El valor debe ser tal que el efecto del ángulo prácticamente no se haga notar. Para esto es necesario que en cada instante del enfriamiento de las superficies isotermas  $T_f$  sean paralelas a las superficies isotermas  $T_d$  las cuales deben ser paralelas a las paredes.

Esto implica que las paredes de las piezas sean ellas mismas paralelas, por tanto que estas paredes tengan un espesor constante, y la curva de conexión de radio  $R_i$  sea concéntrica con la curva de radio  $R_e$ , luego que  $R_e = R_i + E$  por lo que  $R_i$  depende de:

- 1.- El valor del ángulo  $\alpha$  de las dos direcciones de las paredes.
- 2.- De la temperatura de la aleación colada.
- 3.- De la conductividad térmica; o más exactamente del poder refrigerante del material, que constituye el molde en el lugar de la unión.
- 4.- Del valor del espesor  $E$  de la paredes de conexión.

#### 5.2.1.5. Unión de dos paredes en T.

Dos paredes en T de espesor igual a  $E$  conectado por curvas de conexión de radio  $R$ , dan lugar en el punto de unión, a la formación de una masa caliente. La modificación del trazado, permite regularizar los espesores, cuando la dirección de las

paredes no son perpendiculares, la masa en la conexión aumenta y esto más cuando la inclinación de la pared A sobre B se incrementa.

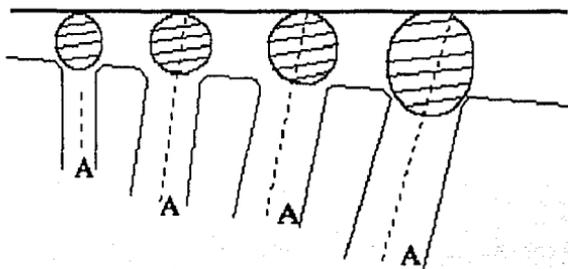


Figura 5.4. Unión de dos paredes que no son perpendiculares.

#### 5.2.1.6. Uniones en cruz.

Este tipo de uniones dan siempre origen a un punto caliente de aproximadamente dos veces el valor el espesor, esto puede evitarse realizando un trazado en el cual el valor de  $R_i$  es tal que la circunferencias de radio  $R_e$  delimitan en el centro de la unión un vaciado cuya cota  $A$  es por lo menos igual a  $E$ .

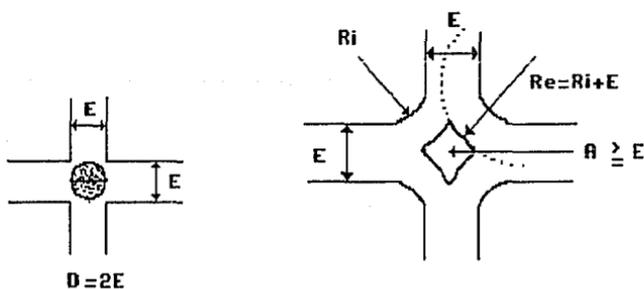


Figura 5.5. Unión en forma de cruz.

Casos de las piezas cuyos espesores no pueden mantenerse constantes.

Generalmente y con mucha frecuencia, es casi imposible diseñar piezas en las que los diámetros de los círculos inscritos en las distintas secciones rectas sean idénticas en todas las partes.

### 5.2.2 Segunda ley del trazado.

Cuando es imposible dar espesores constantes a una pieza de fundición, el trazado debe ser tal que; "Los círculos inscritos (o más exactamente las esferas inscritas)" en cada sección horizontal de la pieza tengan diámetros superiores o por lo menos iguales a los círculos inscritos en una sección horizontal inmediata inferior, estando la pieza en posición de colada.

La pieza ideal considerada desde este punto de vista es un cono (o el tronco de un cono) efectuando la colada cuando estando el vértice colocado mirando hacia abajo el molde. Este trazado permite realizar lo que se designa como "Solidificación dirigida de abajo hacia arriba gradualmente"; aunado a esto se obtiene el beneficio de autoalimentación. Es de suma importancia determinar las formas que tendrán los alimentadores, la regla del trazado debe aplicarse no solamente a la pieza sino al conjunto de la misma, es decir al sistema pieza alimentador.

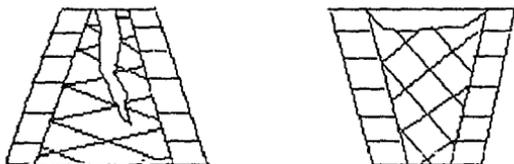


Figura 5.6. Alimentadores ideales.

Es importante obtener una solidificación dirigida de abajo hacia arriba, se deben tener en cuenta todos los sobreespesores del mecanizado; se trata de efectuar correctamente el trazado de la pieza en bruto de fundición y no el de la pieza terminada.

### 5.3. El molde.

Los buenos colados no pueden producirse sin buenos moldes. Dada la importancia del molde, los procesos de colado con frecuencia se describen por el material y el método empleado para el molde. Por lo tanto, los colados en arena pueden hacerse en:

- 1.- Moldes de arena verde.
- 2.- Moldes de arena seca.
- 3.- Moldes de corazón de arena.

- 4.- Moldes de arcilla.
- 5.- Moldes de cáscara.

En la producción de un molde de arena es de gran valor la habilidad del moldeador. Debe saber cómo preparar un molde con las siguientes características:

- 1.- El molde debe ser lo suficientemente fuerte para sostener el peso del metal.
- 2.- El molde debe resistir la acción de la erosión del metal que fluye con rapidez durante el colado.
- 3.- El molde debe generar una cantidad mínima de gas cuando se llena con metal fundido. Los gases contaminan el metal y pueden alterar el molde.
- 4.- El molde debe construirse de modo que cualquier gas que se forme pueda pasar a través del cuerpo del molde mismo, más bien que el metal.
- 5.- El molde debe ser lo suficientemente refractario para soportar la alta temperatura del metal y poderse desprender con limpieza del colado después del enfriamiento.

Dependiendo del método para hacer estos moldes se clasifican en tres grandes grupos, moldeo en banco, moldeo en máquina y moldeo en foso.

El moldeo en banco se aplica principalmente a los moldes lo suficientemente pequeños para hacerse en un banco de trabajo.

El moldeo en piso implica moldes demasiado grandes para un banco y se hacen en cajas de moldeo en el piso del taller de fundición o en máquinas asentadas en el piso.

Los moldes demasiado grandes para hacerse por completo en cajas se construyen en fosos abajo del piso del taller de fundición, a esto se le llama molde en foso.

#### 5.4. Alimentadores.

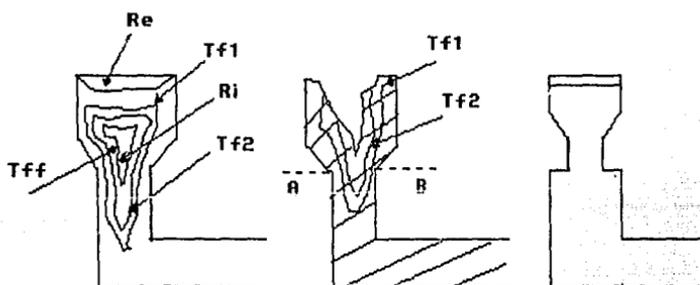
Los alimentadores son prolongaciones de las piezas que tienen por misión servir de reservas de aleación líquida, la cual en el momento de su solidificación, debe llegar en cada instante a compensar la pérdida de volumen que resulta de las diversas contracciones que experimenta la aleación. El alimentador debe tener una forma cónica y en el extremo más grande que recibe el metal actuará como depósito. En general

se prefiere un alimentador redondo con diámetro hasta de 20 mm (cerca de 3/4 in) pero con frecuencia los alimentadores más grandes se hacen rectangulares. Hay menos turbulencia en un alimentador rectangular, pero un alimentador circular tiene una superficie mínima expuesta al enfriamiento y ofrece la menor resistencia al flujo.

Como los rechupes siempre se presentan, estos se manifiestan en los alimentadores. Se crea un desplazamiento del defecto de la pieza hacia el alimentador que posteriormente desaparece con el rebarbado.

La intuición del desplazamiento del rechupe hacia el alimentador, se comprende fácilmente al considerar las superficies isoterma  $T_f$ , debido a que el rechupe interno tiene tendencia a producirse cuando la superficie isoterma  $T_f$  se encierra en la parte maciza de la pieza. Cuando la parte maciza lleva colocado encima un alimentador en los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  las superficies isoterma  $T_f$  tienen las posiciones dadas por las isoterma  $T_{f1}, T_{f2}$ .

Para que el rechupe se produzca fuera de la pieza, es preciso cuando la temperatura de la pieza tiene el valor  $T_f$  en el punto más caliente del plano  $AB$ , que la superficie isoterma  $T_f$  este situada completamente por encima de ese plano.



**Ri=rechupe interno**

**Re=rechupe externo**

- a. La mazarota presenta un rechupe interno  $R_i$  y en el otro extremo  $R_e$       b. El alimentador presenta un rechupe reducido en un punto      c. Forma ideal de un alimentador.

Figura 5.7. Formas de alimentadores con el fin de trasladar el rechupe fuera de la pieza.

#### **5.4.2. Características que debe tener los alimentadores para desempeñar correctamente su función.**

1.- El alimentador debe constituir, en la pieza moldeada, un punto caliente.

Tiene por misión alimentar con aleación líquida, durante toda su solidificación, una parte de la pieza que, debido a su espesor y su masa, se enfría menos rápido que las partes próximas. Para desempeñar correctamente este papel es preciso que el alimentador permanezca caliente más tiempo que la pieza a la que alimenta (que este aún líquida, cuando la parte a alimentar esté ya completamente solidificada). Esto es, la forma del alimentador debe ajustarse de manera que su relación volumen superficie, sea por lo menos tan grande como el de la fundición.

2.- El alimentador debe estar unido a la pieza por un paso de sección suficiente. Todo estrangulamiento, toda sección insuficiente contribuirá a acelerar el enfriamiento de la aleación en las partes reducidas.

3.- El alimentador debe estar siempre que sea posible, por encima de la parte a cargar. Para que el alimentador se solidifique hasta el último lugar en la parte de la pieza que se considera se precisa:

a.- Que sea llenado con la aleación lo más caliente posible.

b.- Que la aleación se enfríe lo más lentamente posible en ella.

Se debe poner atención sobre la importancia que tiene el tratar de obtener la máxima eficacia de los alimentadores, con un mínimo de aleación. En efecto la aleación que llena a los alimentadores, debe estar fundida, tener las mismas características que la fundición a utilizar, lo cual implica un gasto económico. Por eso el fundidor debe tratar de obtener el cociente: Peso del metal colado/peso de la pieza rebarbada; tan aproximadamente como sea posible a la unidad.

#### **5.5. Enfriadores.**

Son formas de metal insertadas en los moldes para acelerar la solidificación en partes específicas del metal. Un enfriador externo debe tener el suficiente contacto para enfriar y ser lo suficientemente grande para no fundirse con el colado. La forma y tamaño y uso de un enfriador debe proporcionarse con cuidado para evitar un enfriamiento demasiado rápido, lo cual puede provocar grietas y defectos de colado.

#### **5.6. Respiraderos.**

Los respiraderos son agujeros pequeños hechos perforando la arena con un alambre o una cinta antes de introducir el

modelo en el molde. La función de un respiradero es permitir el escape de los gases de la cavidad del molde para evitar que los gases queden atrapados en el metal o que levanten contra presión que se oponga al flujo de entrada del metal. Los respiraderos deben de servir a todos los puntos altos del molde y estar abiertos en la parte superior. Muchos respiraderos pequeños son mejores que pocos grandes.

### **5.7. Modelos.**

El modelo es una forma usada para preparar y producir una cavidad en el molde. Es una herramienta más en las manos del fundidor, ya que es posible producir un mal colado mediante un buen modelo, pero un buen colado no se hará con un mal modelo. El diseñador de un colado debe poner atención en la forma lo más simple que sea posible para tener una producción económica.

#### **5.7.1. Material del modelo.**

La madera es el material más común para los modelos. Es sencillo trabajarla y pueden encontrarse fácilmente. Con frecuencia se utiliza la caoba, el nogal, pino blanco, seleccionados en forma apropiada y secados en la estufa.

La madera que más se usa es el nogal porque se trabaja con relativa facilidad y por lo común esta libre de alabeo y grietas. La humedad en la madera debe de ser de 5 a 6% para evitar el alabeo, contracción o expansión del modelo terminado.

Existen otros tipos de materiales usados como son los modelos de metal, los cuales se fabrican para cuando se producen grandes cantidades de una pieza. Los modelos que se elaboran con yeso y plástico son fáciles de hacer, pero el yeso es quebradizo y no es adecuado para moldear grandes números de coladas en arena.

### **5.8. Tolerancias de contracción del modelo.**

Conforme el metal se solidifica y enfria, se contrae y se reduce de tamaño. Para compensar esto, un modelo se hace más grande que el colado terminado en una cantidad llamada tolerancia de contracción. Aunque la contracción es volumétrica, es común expresar en forma lineal la corrección de contracción. Las dimensiones no se muestran con sobre tamaño en el dibujo de una parte o modelo para incluir la tolerancia por contracción. Sin embargo el modelista mide las

dimensiones de acabado con una reglas de contracción. Dichas reglas tienen una escala más grande que la estándar por una proporción definida según 5, 10 o 15 mm/m (1/16, 1/8, 3/16 in/ft). La contracción es diferente para distintos metales, formas diferentes de colados del mismo metal y distintos métodos de moldeo y colado. En la siguiente tabla se muestran las tolerancias típicas de contracción de los metales más comunes.

Tolerancia de contracción	Hierro colado gris	Acero colado	Aluminio	Latón	Bronce
mm/m	10	20	13	15	10-20
in/ft	1/8	1/4	5/32	3/16	1/8 1/4

### 5.9. Tolerancia de maquinado.

La tolerancia de maquinado es la cantidad por la cual se hace en sobre tamaño las dimensiones de un colado para proporcionar material para el maquinado. Las dimensiones en el dibujo de un modelo incluyen la tolerancia del maquinado. La cantidad de metal que se debe dejar para el maquinado debe ser no más del necesario, pero suficiente para asegurar que los cortadores puedan introducir un corte amplio y remover por completo la escama dura y la cáscara en la superficie del colado. La cantidad suficiente depende de la clase de metal, la forma de colado y los métodos del colado, limpieza y maquinado. En la siguiente tabla se muestran las tolerancias típicas de maquinado.

	Hierro colado [mm (in)]	Acero colado [mm (in)]	Latón, bronce y aluminio [mm (in)]
En las superficies exteriores	2.5 (3/32)	3 (1/8)	1.5 (1/16)
En diámetros internos	3 (1/8)	5 (3/16)	2.5 (3/32)

Puede agregarse una tolerancia de distorsión a las dimensiones de diversos objetos como grandes placas planas y

colados en forma de U que se supone se pandean al enfriarse. El propósito de ese margen es desplazar el modelo de tal forma que los colados tengan la forma y el tamaño adecuados después de la distorsión en proceso.

#### **5.10. Arena e ingredientes de moldeo.**

La función primaria de cualquier material de moldeo es mantener la forma de la cavidad del molde hasta que solidifique el material fundido. La arena silicea es el material de moldeo de uso más amplio; en particular para metales que funden a temperaturas altas. Sirve bastante bien ya que es de fácil disponibilidad, baja en costo, puede formarse con facilidad en formas complicadas y es capaz de soportar el material fundido.

##### **5.10.1. Las tres partes principales de un molde de arena son:**

- 1.- Los granos de arena, los cuales tienen las propiedades refractarias necesarias para soportar el intenso calor del metal fundido.
- 2.- Un material de liga, el cual puede ser arcilla natural o agregada, para mantener juntos los granos.
- 3.- El agua para aglutinar los granos y ligarlos en un material plástico de moldeo.

Arena de moldeo. Las arenas naturales solo contienen un poco de aglutinante minado y se usan conforme se reciben con la adición de agua. Tienen la ventaja de mantener el contenido de humedad durante largo tiempo, tienen márgenes de humedad amplios para trabajarse y permitir el retocado y acabado fácil de los moldes. Algunas veces se desea mejorar sus propiedades y se le agrega bentonita (un aglutinante de arcilla), a esta arena se le conoce como semisintética.

Las arenas sintéticas se formulan con diversos ingredientes. La base puede ser la arena natural con cierto contenido de arcilla o una arena lavada con toda la arcilla eliminada. Se agrega un aglutinante como bentonita y agua. Estas arenas tienen las ventajas sobre las arenas naturales de:

- a.- tamaño de grano más uniforme.
- b.- mejores propiedades refractarias.
- c.- facilidad de moldeo con menos humedad.
- d.- requieren menos aglutinantes.
- e.- control más sencillo de las propiedades.
- f.- la necesidad de menos espacio de almacenamiento ya que una clase de arena puede ser suficiente para diferentes clases de colado.

## 5.10.2. Propiedades de la arena.

La forma en que la arena se comporta en el molde para producir buenos colados puede probarse y depende principalmente de su permeabilidad en verde, resistencia en verde y resistencia en seco. Estas propiedades se determinan principalmente por la finura del grano, forma del grano, contenido de arcilla y contenido de la humedad en la arena. Otras propiedades de menos influencia son la resistencia en caliente, el punto de sinterizado, la deformación y la facilidad de colapso.

### 5.10.2.1 Permeabilidad en verde.

La permeabilidad es la porosidad de las aberturas entre los granos. Esta da paso al aire, gases y vapor para que se escapen cuando se vierte el metal fundido en el molde. La permeabilidad se mide en una prueba común pasando una cantidad definida de aire a través de una muestra estándar de prueba en condiciones especificadas. El resultado se expresa por un número  $P=501.2/pt$ , donde  $p$  es la presión en gramos por centímetro cuadrado y  $t$  es el tiempo en minutos. Por lo tanto, el número de permeabilidad es más grande conforme la arena es más porosa.

La finura del grano se mide pasando arena a través de cribas estándar, cada una con cierto número de aberturas por pulgada lineal. Las arenas comerciales están hechas de granos de diferentes tamaños. Los granos más finos en un molde imparten un acabado más liso a un colado, por otra parte, la permeabilidad disminuye conforme el tamaño de los granos, y por lo tanto los huecos entre los granos se vuelven más pequeños. Hay dos formas distintas de granos de arena, angular y redondeada, con muchos grados de redondez y angularidad entre los dos extremos. Los granos claramente angulares no pueden empacarse juntos en forma tan estrecha y en consecuencia dan una permeabilidad más alta que los granos redondeados.

Tanto el tipo como la cantidad del aglutinante tienen un efecto decisivo en la permeabilidad de la arena. La permeabilidad puede disminuir con un aumento en el contenido de la arcilla. En general el contenido de arcilla es óptimo cuando está presente en la extensión de revestir las partículas de arena por completo sin llenar los espacios entre los granos.

## 5.11. Diseño de una colada.

Las coladas son canales por los que fluye el metal fundido para llenar una cavidad de un molde. Sus tipos y

nomenclaturas depende de la función que se quiere llevar a cabo.

Las tres principales son: el bebedero, las canales y las portadas (entradas o bocas, todos los cuales están diseñados para conducir al metal fundido hacia abajo, a través y adentro de la cavidad principal del molde). Los tres tipos entran generalmente en la confección de un molde y al conjunto se le llama sistema de colada.

Las funciones de un sistema de colada ideal son:

- 1.- Llenar la cavidad de un molde.
- 2.- Introducir el metal fundido con la mínima turbulencia posible para evitar la erosión del molde y la absorción de gases.
- 3.- Establecer los mejores gradientes de temperatura posibles en la fundición.
- 4.- Introducir en el metal la acción de barrido apropiada al fluir por el sistema de canales.
- 5.- Regular la velocidad de la entrada del material en la cavidad del molde.

Con objeto de que las coladas funcionen con propiedad se deben controlar:

- 1.- La velocidad del vertido.
- 2.- El tamaño, número y localización de las portadas que llevan a la pieza fundida.
- 3.- El tamaño y tipo de bebedero y canal.
- 4.- Tipo de equipo de vertido, tal como cucharas, cavidades de canal o coladas de limpia.
- 5.- Posición del molde durante el vertido y el enfriamiento.
- 6.- Temperatura (fluidez del metal).

#### **5.12. Colada directa.**

La colada directa se limita usualmente a moldes relativamente pequeños, de diseño sencillo, a fundiciones grandes hechas en moldes de material resistente a la erosión.

##### **5.12.1 Coladas en línea de partición.**

El método más fácil para situar coladas es siempre en la línea de partición natural del molde. Desde el punto de vista del flujo la colada en línea de partición constituye un arreglo entre la colada directa y la colada por el fondo.

##### **5.12.2 Coladas por el fondo.**

Las coladas por el fondo reducen la turbulencia y la erosión en la cavidad del molde a un mínimo, pero pueden causar

gradientes de temperaturas desfavorables cuando se usan como alimentadores cimeros. La región más baja de un molde colado por el fondo se calienta con el metal que fluye por el, y se retarda la solidificación en esos lugares. Debe tenerse especial cuidado en asegurar que "el foco caliente" potencial en la portada sea mínimo, o de lo contrario resultara un rechupado.

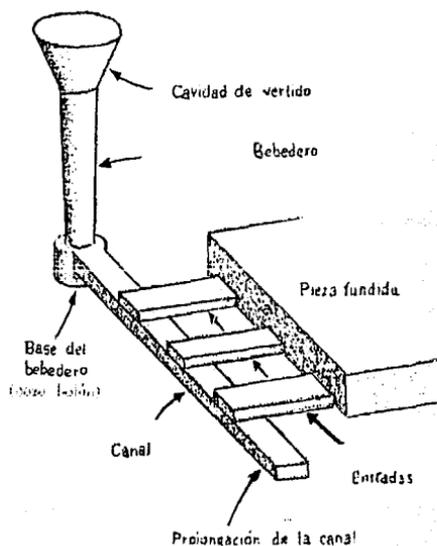


Figura 5.8. Terminología de un sistema de colada.

### 5.12.1. La relación de la colada.

Se emplea el término de "relación de colada" para describir las áreas relativas de las secciones transversales de los componentes de un sistema de colada. Se define normalmente como la relación del área de la sección transversal del bebedero al área total de la canal y al área total de la portada. Las relaciones de colada recomendadas en la literatura para el uso del taller de fundición varían dentro de un amplia gama, pero pueden agruparse dentro de dos clasificaciones generales: Sistemas a presión y sistemas sin presión. En los sistemas a presión se mantiene un contrapresión en el sistema de colada por medio de una restricción del flujo de coladas en las portadas no sean más grande que el área del bebedero, como por ejemplo en sistemas con relaciones de coladas de 1:0.75:0.5. En sistemas sin presión se tienen relaciones tales como 1:3:3.

Los sistemas de coladas a presión tienen ciertas desventajas que resultan de las velocidades del metal relativamente altas en los canales del flujo. Puede haber una fuerte turbulencia en los empalmes y esquinas, a no ser que se emplee un cuidadoso curvamiento.

Los sistemas sin presión tienen las ventajas de una velocidad del metal más baja en comparación con los sistemas a presión. La mayor sección de la canal y de las portadas permiten flujos adecuados a velocidades relativamente bajas. Así pues se reducen las turbulencias en los sistemas de coladas y el "borboteo" del metal en la cavidad del molde.

Unas de las desventajas de los sistemas sin presión son:

a.- Requieren un diseño cuidadoso para asegurar que los sistemas sin presión se mantengan completamente llenos durante el vertido.

b.- Es difícil obtener un flujo igual con portadas múltiples en los sistemas sin presión, como en el caso de las coladas por etapas.

c.- Estos sistemas requieren mayores bebederos y mayores portadas, a causa de la sección relativamente grande que los sistemas a presión requieren al mismo régimen de flujo.

## **CAPITULO 6**

### **ANALISIS DE UNA MESA DE FUNDICION DE PLANITUD POR MEDIO DE C A E**

## ANALISIS DE UNA MESA DE FUNDICION POR MEDIO DE CAE

### 6.1. Introducción.

Una vez que se conocen los conceptos del (M.E.F.), de la forma, tamaño y material que será utilizado en la fabricación de la mesa de planitud, se procede a realizar el análisis estático y térmico de la misma, para saber cuales son los sitios en donde más se deforma, las zonas donde hay concentraciones de esfuerzos significativos, esto con el fin de poder tener un criterio que nos permita realizar modificaciones al modelo original para que la mesa tenga la menor deformación posible y además los esfuerzos que experimente sean los más pequeños.

Se analizaron dos tipos de configuraciones de mesa, una con nervaduras cuadradas, con dimensiones y formas normalizadas (Norma DIN 876), y la otra con una distribución de nervaduras en forma triangular, ya que esto lo permite la norma, porque el diseño de las nervaduras, se deja a la libre elección del diseñador.

6.2. Para el diseño y análisis se utilizó el paquete de CAE NISA (Numerically Integrated-Elements for System Analysis).

Este tipo de paquetes se subdivide en tres módulos fundamentales que son:

#### 6.2.1 Módulo de Pre-procesamiento.

En esta fase inicial, se construye la geometría del modelo, (tamaño, forma, espesores etc.), y se lleva a cabo la generación del modelo de elementos finitos, es decir la discretización del medio continuo en elementos finitos que simulan el comportamiento del modelo real bajo diferentes tipos de solicitaciones. También en esta fase se proporcionan las propiedades físicas de los materiales del modelo, así como el tipo de restricciones o condiciones de apoyo a las que estará sujeto.

#### 6.2.2. Módulo de análisis por medio del elemento finito.

En este módulo se forma el modelo de elementos finitos generado en las fase anterior y se resuelve el problema planteado ( ya sea de estática, dinámica o transferencia de calor). Internamente el programa hace una revisión y ordenamiento de los datos. Se obtiene la matriz de rigideces para cada elemento, se ensambla la matriz de rigidez del sistema, y se define el vector de cargas para los elementos (estas pueden ser presiones, cargas térmicas y fuerzas de cuerpo).

1. La formulación a la que llega el programa en el caso de un análisis estático lineal.

$$K u = f$$

**K** Matriz de rigidez del sistema

Propiedades de los elementos.  
Propiedades del material,  
Rigideces por esfuerzos.

**u** Grados de libertad de los nodos

Desplazamientos desconocidos

**f** Vector de cargas

Presiones, cargas  
térmicas.

2. Si se trata de un análisis dinámico, el problema que se resuelve es el siguiente:

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + k u = f(t)$$

**M** Matriz de masas e inercias.

**C** Matriz de amortiguamiento.

**k** Matriz de rigideces.

**f(t)** Vector de cargas.

3. Si el problema es de transferencia de calor se tiene:

$$k \phi = v$$

**k** Matriz de "rigideces",  
Propiedades térmicas,  
conductividad, etc.

$\phi$  Temperatura.

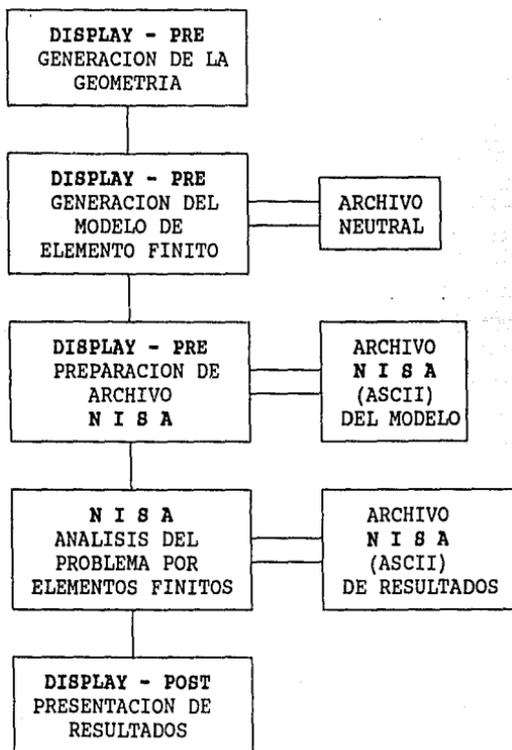
**v** Flujo térmico.

### 6.3. El post-procesamiento.

Esta tercera etapa, ha llegado a considerarse como una de las más atractivas, siendo aquí donde se observan los resultados de los análisis. Se permite graficar las deformaciones y los esfuerzos, se puede girar el modelo en cualquier sentido X, Y, Z, en cualquier ángulo, hacer acercamientos del modelo por medio de ventanas, definir y cambiar títulos, observar al modelo deformado, graficar al modelo deformado superpuesto al original no deformado. Una de las características más importantes del post-procesador es que permite poder darle animación al modelo para ver como se comporta este.

Esto es interesante porque a medida que se sabe más acerca del comportamiento del modelo, es posible realizar una serie de modificaciones hasta llegar a tener el modelo óptimo.

6.3.1. En síntesis el plan de uso del programa es el siguiente:



#### 6.4. Convención de signos y unidades.

1.- Esfuerzos positivos, en las caras positivas, en dirección positiva de los ejes.

2.- La tensión es positiva.  
La compresión es negativa.

3.- Desplazamientos y fuerzas positivas en dirección positiva de los ejes globales.

4.- Rotaciones y momentos positivos según la regla de la mano derecha.

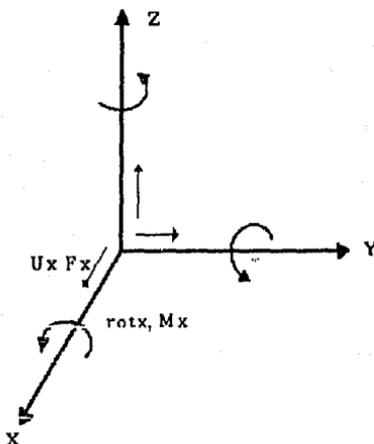


Figura 6.1. Convención de signos de acuerdo a la regla de la mano derecha.

#### 6.5. Diseño del modelo.

Para diseñar el modelo se consideraron las siguientes dimensiones normalizadas:

Longitud = 1000 mm.

Ancho = 630 mm.

Espesor de la mesa = 169 mm.

Espesor del plano de trabajo = 24 mm.

Altura de los nervios = 125 mm.

Espesor de los nervios = 12 mm

Tamaño de las retículas = 175 x 126 mm.

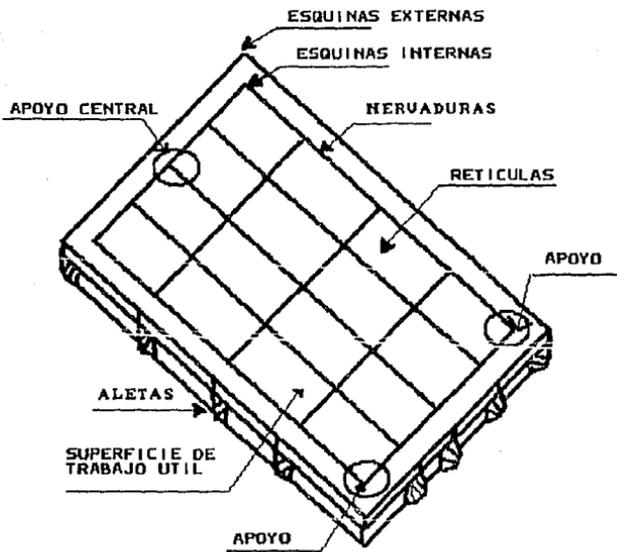


figura 6.2. Nomenclatura de la mesa de fundición de planitud.

6.5.1. Una vez dibujado el modelo, se procede a discretizarlo; el mallado se puede realizar de dos maneras, manual o automáticamente. Para la discretización automática el paquete cuenta con un algoritmo que dependiendo de la configuración geométrica, discretiza con los elementos más apropiados la figura del modelo; se tiene como ventaja que es sumamente fácil y rápido realizarlo, pero tiene el inconveniente de no permitir discretizaciones más finas en lugares de interés. La discretización manual es tediosa pero se logran mejores discretizaciones, un mayor control en la forma y tamaño de los elementos, así como refinamientos en los lugares de mayor interés.

Cuando se ha terminado la discretización del modelo, se le proporcionan las propiedades geométricas a cada elemento utilizado. (por ejemplo, espesores de las placas, secciones transversales de las vigas etc.). Después se asignan las propiedades de los materiales, que dependiendo del tipo pueden ser:

**1. Isotrópico. Se proporcionan dos constantes elásticas.**

Módulo de elasticidad EX,  
Módulo de Poisson NUXY.  
Rigidez de resorte K,

**2. Material Ortotrópico se proporcionan nueve constantes elásticas.**

Módulos de elasticidad EX, EY, EZ.  
Módulos de Poisson NUXY, NUXZ, NUYZ.  
Módulos de rigidez al corte GXY, GXZ, GYZ.

**3. Propiedades dependientes de la temperatura.**

EX= Función de la Temperatura

**4. Propiedades de masa.**

Densidad DENS (En unidades consistentes)

**4. Coeficientes de expansión térmica.**

ALPX, ALPY, ALPZ.

**5. El siguiente paso es proporcionar las sollicitaciones y condiciones de frontera.**

Condiciones de apoyo fijo en nodos o desplazamientos especificados.

Desplazamientos	UX	UY	UZ
	1	2	3

Rotaciones	ROTX	ROTY	ROTZ
	4	5	6

(De acuerdo a la regla de la mano derecha)

Como se sabe, para definir un plano basta con tener tres puntos, por lo que la mesa se sustentará en tres puntos de apoyo, dos en un extremo y otro en la parte opuesta.

La característica que deben tener los apoyos es que deben permanecer fijos; es decir restringir todos los (g.d.l.), por lo que en el modelo se restringieron las tres direcciones de desplazamiento, y las tres rotaciones.

Finalmente se lleva a cabo la aplicación de las cargas. Estas pueden ser fuerzas, momentos (en el modelo se aplicaron solo fuerzas puntuales).

Las cargas puntuales aplicadas fueron de 25 Kg. ( 2.4525 E+7 dinas), por que este peso es aproximado a los instrumentos que son colocados sobre la mesa cuando se realizan las mediciones o pruebas de verificación sobre esta.

La carga térmica fue de dos grados centígrados como gradiente, teniendo en la parte superior la temperatura mayor y en la inferior la más baja.

Para el análisis de transferencia de calor, en comparación con un análisis estático se requiere de un paso adicional. Primero se resuelve el análisis de transferencia de calor, y el resultado es salvado en un archivo en código ASCII. En esta corrida únicamente se obtiene la distribución de temperaturas, después estos datos son requeridos en el módulo de análisis estático y con la información de la distribución de temperatura se calculan las deformaciones y esfuerzos debidos a la carga térmica.

En cada uno de los modelos se aplicaron diversos tipos de cargas, como son carga en las esquinas exteriores, en un solo lado, en ambos, en el centro. En los extremos la carga tiene un valor de 25 Kg. (2.4525 E+7 dinas), hasta llegar a hacer un total de 100 Kg. (9.81 E+7 dinas); se analizó la configuración de la mesa con peso propio únicamente, para observar como se deforma y que tipo de esfuerzos experimenta, cuando no se encuentra en uso. Esto permite sugerir algunas modificaciones al modelo, tanto en la configuración de las nervaduras como en el tipo de apoyos que se utilizan.

De todos los casos anteriores, se realizaron combinaciones, hasta llegar a tener más de 23 casos de carga para cada uno de los modelos propuestos.

#### **6.6. Resultados del análisis por medio de CAE.**

En esta sección se presentaran únicamente los casos más interesantes, y la comparación de los valores obtenidos de la mesa con nervaduras triangulares v.s. la mesa con nervaduras cuadradas.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Mesa con nervaduras triangulares

Caso de carga	Desplazamiento Resultante (cm)		Esfuerzo en el plano ZX (dinas/cm <sup>2</sup> )	
Peso propio de la mesa	mín.	2.878 E-5	mín.	-102.4 E+4
		0		-119.5 E+4
	máx.	25.90 E-5	máx.	34.34 E+4
		23.00 E-5		17.25 E+4
Transferencia de calor sin peso	mín.	1.08 E-4	mín.	-311.02 E+4
		0		-377.2 E+4
	máx.	16.20 E-4	máx.	217.1 E+4
		14.40 E-4		151.1 E+4
Peso propio y Transferencia de calor	mín.	1.891 E-4	mín.	-400.90 E+4
		0		-479.10 E+4
	máx.	17.02 E-4	máx.	224.2 E+4
		15.13 E-4		146.2 E+4
Carga en las esquinas externas Peso propio y transf. de calor	mín.	1.980 E-4	mín.	-463.2 E+4
		0		-550.0 E+4
	máx.	17.82 E-4	máx.	231.1 E+4
		15.84 E-4		144.3 E+4

Mesa con nervaduras triangulares

Caso de carga	Desplazamiento Resultante (cm)		Esfuerzo en el plano ZX (dinas/cm <sup>2</sup> )	
Carga en las esquinas internas Peso propio y transf. de calor	mín.	1.962 E-4	mín.	-333.0 E+4
		0		-401.5 E+4
	máx.	17.66 E-4	máx.	215.2 E+4
		15.70 E-4		146.6 E+4
Carga en el centro, peso propio y transferencia de calor	mín.	1.894 E-4	mín.	-447.0 E+4
		0		-531.9 E+4
	máx.	17.05 E-4	máx.	232.4 E+4
		15.16 E-4		147.5 E+4

Mesa con nervaduras cuadradas

Caso de carga	Desplazamiento Resultante (cm)		Esfuerzo en el plano ZX (dinas/cm <sup>2</sup> )	
Peso propio de la mesa	mín.	3.476 E-5	mín.	-330.6 E+3
		0		-487.2 E+3
	máx.	31.029 E-5	máx.	924.5 E+3
		27.81 E-5		767.6 E+3

Mesa con nervaduras cuadradas

Caso de carga	Desplazamiento Resultante (cm)		Esfuerzo en el plano ZX (dinas/cm <sup>2</sup> )	
Transferencia de calor sin peso	mín.	2.11 E-4 0	mín.	-104.5 E+4 -134.5 E+4
	máx.	18.99 E-4 16.88 E-4	máx.	135.8 E+4 105.7 E+4
Peso propio y Transferencia de calor	mín.	2.003 E-4 0	mín.	-112.6 E+4 -152.8 E+4
	máx.	18.30 E-4 16.26 E-4	máx.	209.2 E+4 169.0 E+4
Carga en las esquinas internas Peso propio y transf. de calor	mín.	2.209 E-4 0	mín.	-108.4 E+4 -149.8 E+4
	máx.	19.88 E-4 17.67 E-4	máx.	223.1 E+4 181.7 E+4
Carga en las esquinas externas Peso propio y transf. de calor	mín.	2.365 E-4 0	mín.	-133.3 E+4 -175.2 E+4
	máx.	21.29 E-4 18.92 E-4	máx.	201.7 E+4 159.9 E+4

Mesa con nervaduras cuadradas

Caso de carga	Desplazamiento Resultante (cm)		Esfuerzo en el plano ZX (dinas/cm <sup>2</sup> )	
Carga en el centro, peso propio y transferencia de calor	min.	2.047 E-4	min.	-115.7 E+4
		0		-165.3 E+4
	máx.	18.43 E-4	máx.	281.2 E+4
		16.38 E-4		231.6 E+4

6.7. Comparación de los valores obtenidos de las mesas.

Se comparan los valores máximos y mínimos de desplazamientos y esfuerzos, de los casos más representativos que fueron analizados, así como el utilizar nuevas unidades que permitan una mejor evaluación de estos.

Para los diversos casos se tienen los siguientes resultados:

6.7.1. Peso propio sin transferencia de calor.

	Desplazamientos (cm)	Esfuerzos (dinas/cm <sup>2</sup> )
Triangular	25.90 E-5	34.34 E+4
Cuadrada	31.029 E-5	924.5 E+3
Diferencia	5.129 E-5	5.811 E+5
	0.5129 $\mu$ m	0.5927 (Kg/cm <sup>2</sup> )

6.7.2. Transferencia de calor sin peso propio.

	min.	min.
Triangular	1.80 E-4	-377.2 E+4
Cuadrada	2.11 E-4	-134.5 E+4
Diferencia	0.31 E+4	-242.7 E+4
	0.31 $\mu$ m	-2.475 (Kg/cm <sup>2</sup> )

La mesa cuadrada tiene la máxima deformación en el centro.

	máx.		máx.
Triangular	16.20 E-4		217.1 E+4
Cuadrada	18.99 E-4		135.8 E+4
Diferencia	2.79 E-4		81.3 E+4
	2.79 $\mu\text{m}$		0.8292 (Kg/cm <sup>2</sup> )

En los esfuerzos mínimos la mesa triangular soporta un esfuerzo de compresión mayor que la cuadrada. Al igual que el los esfuerzos máximos ( a tensión), pero la diferencia en este tipo de esfuerzos es más pequeño.

#### 6.7.3. Deformación por temperatura y peso propio.

	min		min
Triangular	1.891 E-4		-479.1 E+4
Cuadrada	2.003 E-4		-152.8 E+4
Diferencia	0.112 E-4		-326.3 E+4
	0.112 $\mu\text{m}$		-3.3282 (Kg/cm <sup>2</sup> )

La mesa cuadrada tiene la máxima deformación, pero la mesa triangular tiene los mayores esfuerzos de compresión.

	máx.		máx.
Triangular	17.02 E-4		224.4 E+4
Cuadrada	18.30 E-4		209.2 E+4
Diferencia	1.28 E-4		15.2 E+4
	1.28 $\mu\text{m}$		0.155 (Kg/cm <sup>2</sup> )

La mesa con la configuración cuadrada tiene una deformación mayor de aproximadamente una décima de micra, la mesa triangular soporta un esfuerzo de tensión mayor.

#### 6.7.4. Carga en las esquinas internas con peso propio y transferencia de calor

	min.		min.
Triangular	1.962 E-4		-401.5 E+4
Cuadrada	2.209 E-4		-149.8 E+4
Diferencia	0.247 E-4		-251.7 E+4
	0.247 $\mu\text{m}$		-2.5673 (Kg/cm <sup>2</sup> )

La diferencia en la deformación mínima es tan pequeña, que no es significativa como una comparación, en cambio el esfuerzo

que presenta de compresión es bastante elevado de aproximadamente tres veces el de la cuadrada.

	máx.		máx.
Triangular	17.66 E-4		215.2 E+4
Cuadrada	19.88 E-4		223.1 E+4
Diferencia	2.22 E-4		7.90 E+4
	2.22 $\mu\text{m}$		80.58 E-3 (Kg/cm <sup>2</sup> )

Nuevamente la mesa triangular tiene los esfuerzos de tensión más grandes y las deformaciones más pequeñas.

#### 6.7.5. Carga en las esquinas externas con peso propio y transferencia de calor.

	min.		min.
Triangular	1.980 E-4		-550.0 E+4
Cuadrada	2.365 E-4		-175.2 E+4
Diferencia	0.385 E-4		-374.8 E+4
	0.385 $\mu\text{m}$		-3.8229 (Kg/cm <sup>2</sup> )

La diferencia en la deformación mínima es tan pequeña, que no es significativa como una comparación, en cambio el esfuerzo que presenta de compresión es bastante elevado de aproximadamente tres veces el de la cuadrada.

	máx.		máx.
Triangular	17.82 E-4		231.1 E+4
Cuadrada	21.29 E-4		201.7 E+4
Diferencia	3.47 E-4		29.4 E+4
	3.47 $\mu\text{m}$		0.2998 (Kg/cm <sup>2</sup> )

Nuevamente la mesa triangular tiene los esfuerzos de tensión mayores, pero su deformación es más pequeña.

#### 6.7.6. Carga en el centro de la mesa con peso propio y transferencia de calor.

	min.		min.
Triangular	1.894 E-4		-531.9 E+4
Cuadrada	2.047 E-4		-165.5 E+4
Diferencia	0.153 E-4		-366.6 E+4
	0.153 $\mu\text{m}$		-3.4333 (Kg/cm <sup>2</sup> )

	máx.		máx.
Triangular	17.05 E+4		232.4 E+4
Cuadrada	18.43 E+4		281.2 E+4
Diferencia	1.38 E+4		48.8 E+4
	1.38 $\mu\text{m}$		0.497 (Kg/cm <sup>2</sup> )

### 6.8. Esfuerzos principales en el plano ZZ.

#### 6.8.1 Peso propio

	min.		máx.
Triangular	- 336.4 E+4		40.74 E+4
Cuadrada	- 321.3 E+4		46.58 E+4
Diferencia	15.1 E+4		5.84 E+4
	0.15402 (Kg/cm <sup>2</sup> )		0.0595 (Kg/cm <sup>2</sup> )

En este caso podemos observar como la mesa triangular soporta un mayor esfuerzo de compresión, y la mesa cuadrada un esfuerzo a tensión siendo estos más perjudiciales para las fundiciones.

#### 6.8.2. Temperatura sin peso propio.

	min.		máx.
Triangular	- 58.53 E+4		142.4 E+4
Cuadrada	- 61.45 E+5		128.5 E+5
Diferencia	- 2.92 E+5		13.9 E+5
	- 0.2978 (Kg/cm <sup>2</sup> )		1.4178 (Kg/cm <sup>2</sup> )

Se puede ver que en este caso se invierten los casos de esfuerzos, la triangular soporta un esfuerzo de compresión mayor que la cuadrada, y la cuadrada soporta un esfuerzo mayor de tensión.

#### 6.8.3. Temperatura y peso propio.

	min.		máx.
Triangular	- 58.53 E+5		142.4 E+5 *
Cuadrada	- 72.00 E+5		127.2 E+5
Diferencia	- 13.47 E+5		15.2 E+5
	- 1.3739 (Kg/cm <sup>2</sup> )		1.5504 (Kg/cm <sup>2</sup> )

#### 6.8.4. Carga en las esquinas externas.

	mín.	máx.
Triangular	- 57.35 E+5	136.6 E+5
Cuadrada	- 78.09 E+5	125.9 E+5
Diferencia	- 20.74 E+5	10.7 E+5
	- 2.1154 (Kg/cm <sup>2</sup> )	1.0914 (Kg/cm <sup>2</sup> )

#### 6.8.5. Carga en las esquinas internas.

	mín.	máx.
Triangular	- 56.49 E+5	115.6 E+5
Cuadrada	- 78.26 E+5	126.4 E+5
Diferencia	- 21.77 E+5	10.8 E+5
	- 2.2205 (Kg/cm <sup>2</sup> )	1.1016 (Kg/cm <sup>2</sup> )

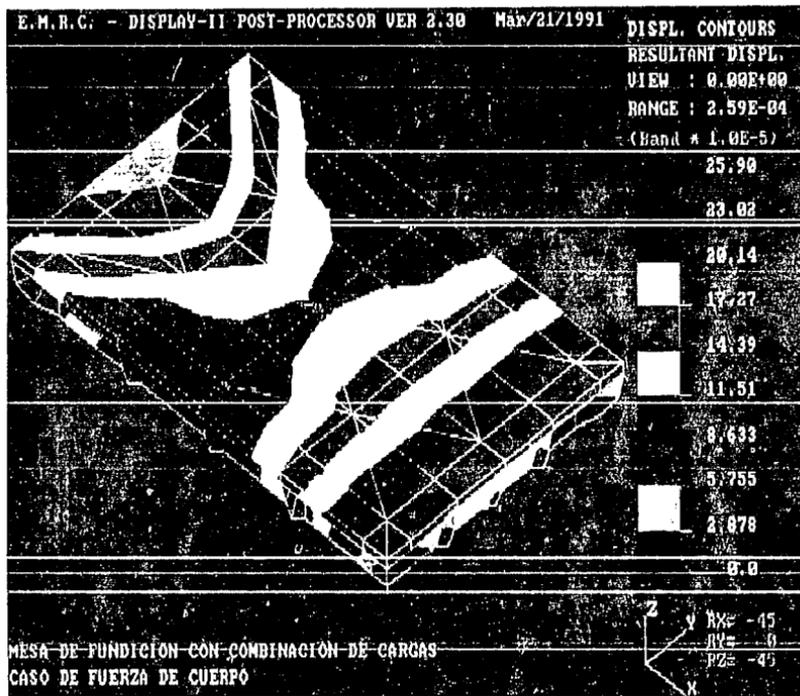
#### 6.8.6. Carga en el centro con transferencia de calor y peso propio.

	mín.	máx.
Triangular	- 57.35 E+5	136.8 E+5
Cuadrada	- 77.42 E+5	127.2 E+5
Diferencia	- 20.07 E+5	9.6 E+5
	- 2.047 (Kg/cm <sup>2</sup> )	0.9792 (Kg/cm <sup>2</sup> )

Como se puede observar en la comparación de los dos tipos de mesas, la de configuración cuadrada se deforma más que la triangular, pero los esfuerzos a los que está sometida son más pequeños. Esto se debe a que a medida que permite una mayor deformación (es más elástica), los esfuerzos se distribuyen de una manera más uniforme a lo largo de todo el cuerpo. En cambio, la mesa con nervaduras triangulares al tener en el centro un mayor cruzamiento de estas, logra una mayor rigidez, los desplazamientos que presenta son pequeños, pero los esfuerzos son grandes en especial los de compresión. En realidad este tipo de esfuerzos no son dañinos para las fundiciones, en cambio los de tensión tienen valores pequeños.

#### 6.9. Gráficos con los diversos casos de carga.

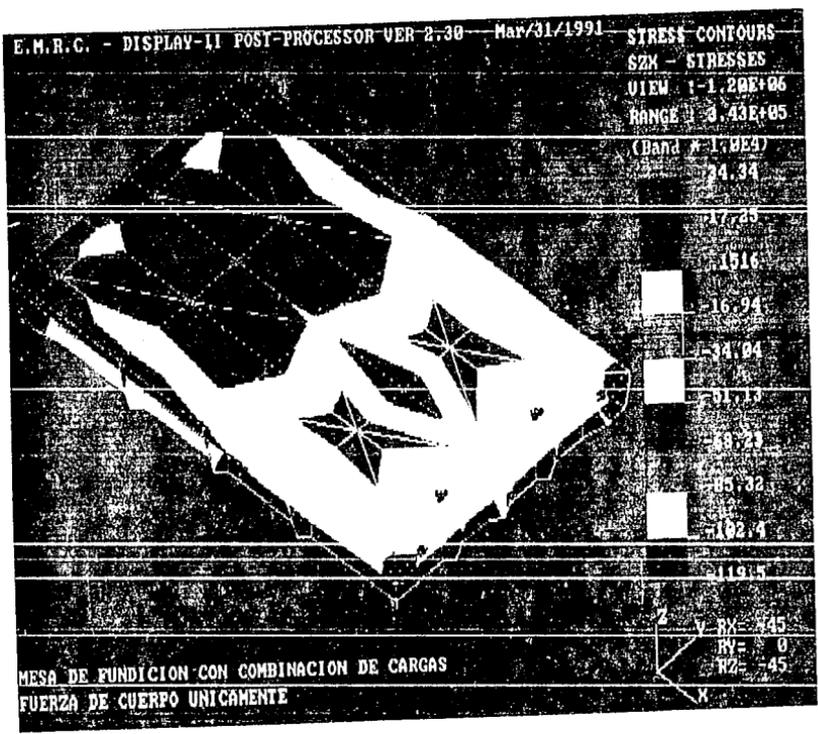
A continuación se muestran las gráficas de los casos que fueron comparados. En cada una de las gráficas se tiene un pequeño comentario. Como se utilizó el sistema (cgs), los valores que se presentan son tan pequeños, que conviene utilizar unidades más grandes por lo que para las longitudes se usaran las  $\mu\text{m}$  y para los esfuerzos Kg/cm<sup>2</sup>, en todos los casos.



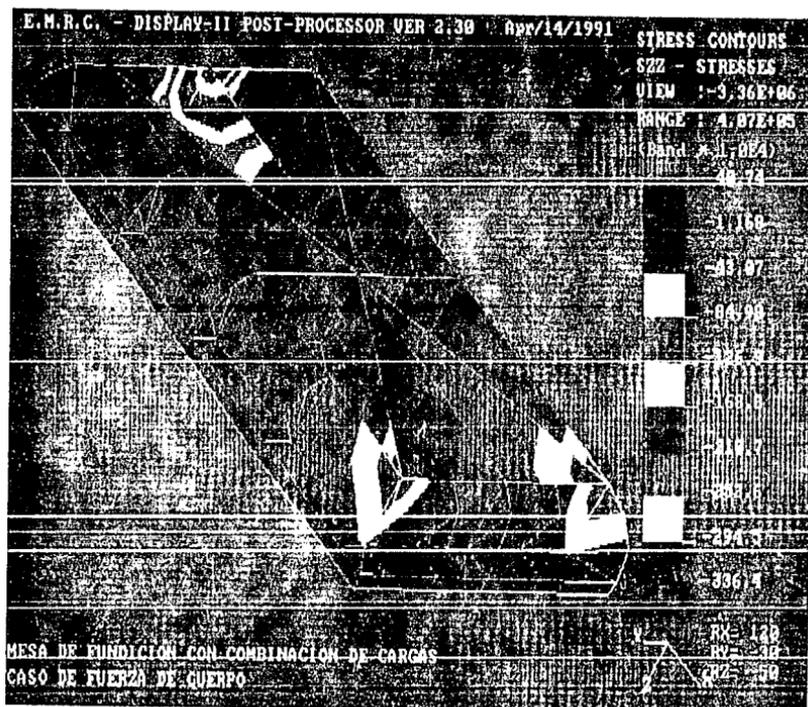
La deformación más grande la podemos observar en los extremos de la mesa, con un valor de  $2.59 \mu\text{m}$ , y la más pequeña de  $0.287 \mu\text{m}$  alrededor de los apoyos. La diferencia entre estos valores es de  $2.303 \mu\text{m}$ , la norma establece una deformación máxima de  $4 \mu\text{m}$ , se puede decir que la mesa sin carga se encuentra dentro de dicha la tolerancia. Al tener la mesa triangular, nervaduras que cruzan por el centro estas refuerzan esta área.



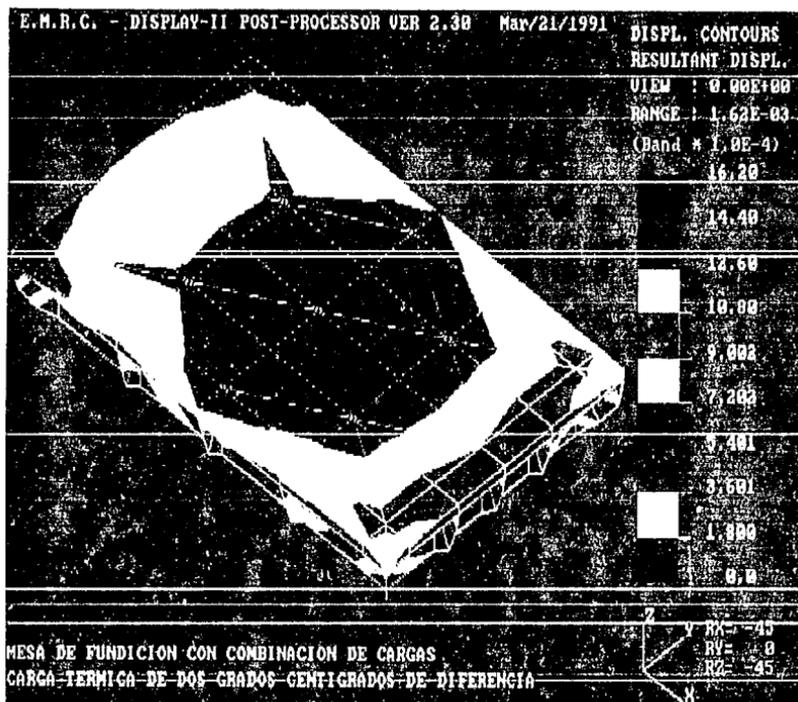
Gráfica de la mesa, con una deformación exagerada con el propósito de conocer la dirección y sentido, en que la mesa se deforma, las unidades que muestra la gráfica son cm, pero para una mayor visualización y comprensión se hace una transformación de unidades y se comentaran los valores obtenidos en  $\mu\text{m}$ , en todas las figuras.



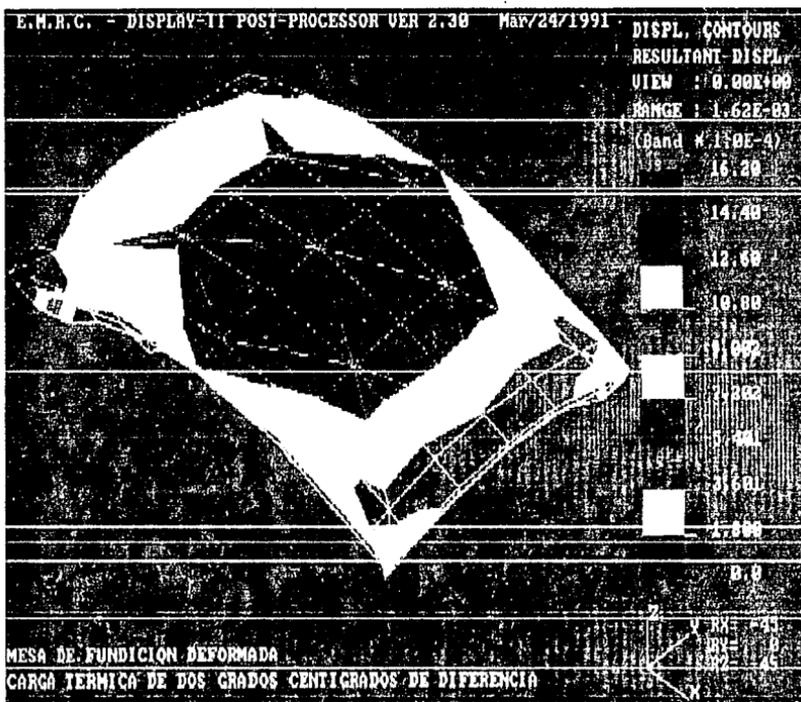
El esfuerzo máximo se tiene en la parte intermedia donde se localizan los dos apoyos de 0.35026 Kg/cm<sup>2</sup>, estos esfuerzos positivos (tensión), son muy pequeños en comparación con los de negativos (compresión), en este caso la mesa trabaja como una viga cargada en los extremos, la parte superior se encuentra a tensión y la parte inferior (todas las nervaduras) a compresión. El máximo esfuerzo se localiza en los apoyos con un valor de 1.2189 Kg/cm<sup>2</sup>.



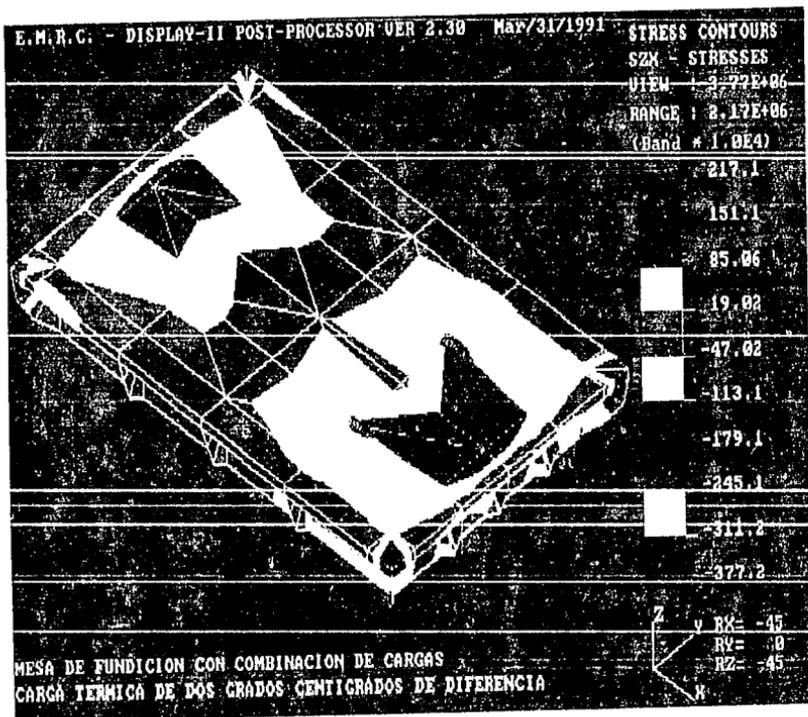
Los esfuerzos en el plano ZZ, son muy significativos porque el plano Z es el área de trabajo, y Z es la dirección normal a esta. La mayor parte de la mesa se encuentra a una tensión de 0.4155 Kg/cm<sup>2</sup>. Se puede observar como las áreas cercanas a los apoyos se encuentran a tensión. El máximo esfuerzo a compresión se localiza en el apoyo central con un valor de 3.4312 Kg/cm<sup>2</sup>.



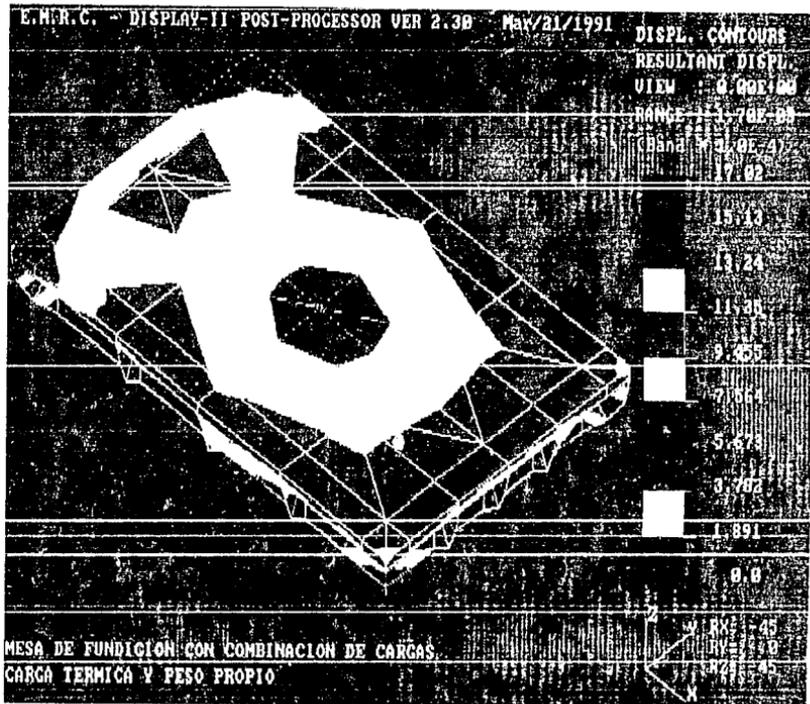
Esta gráfica nos muestra los desplazamientos que se originan debido a un gradiente térmico de dos grados centígrados. Las deformaciones máximas se localizan en el centro del modelo y en las esquinas con un valor de  $0.162 \mu\text{m}$  formando un hexágono. Debe tomarse en cuenta que está deformación la origina el gradiente térmico, sin tomar en cuenta el peso propio de la mesa.



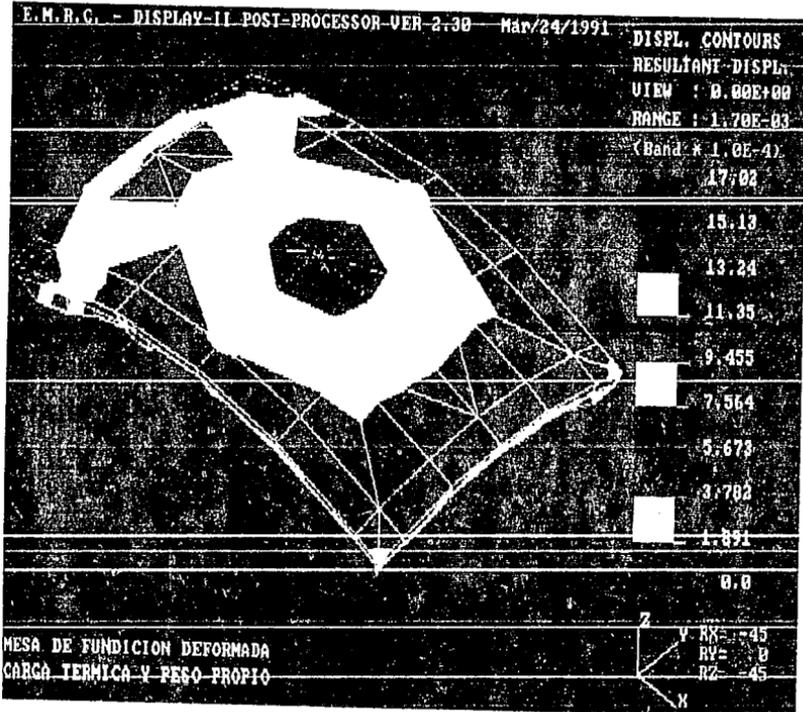
El modelo se deforma al estar en contacto con un gradiente térmico, cabe hacer notar que en un laboratorio de metrología no se llega a tener dos grados de diferencia, pero se realizó este análisis con el fin de mostrar, las deformaciones que se llegan a tener cuando las mesas son transportadas de un lugar a otro y no se da el tiempo suficiente para que alcancen el equilibrio térmico, originando con esto una mala calibración de la misma.



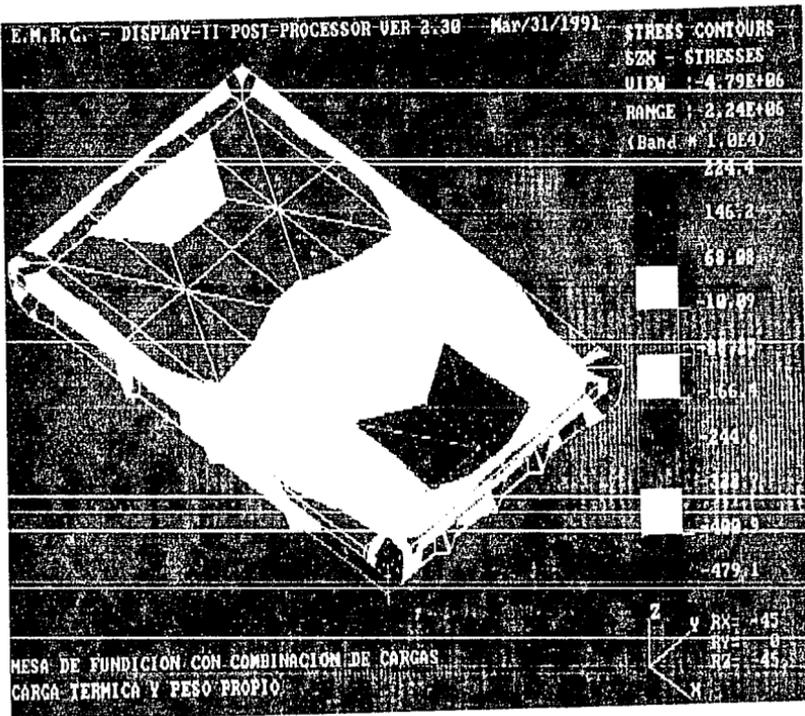
La carga térmica origina en la superficie de trabajo dos clases de esfuerzos el primero, localizado en la zona donde se encuentran los dos apoyos esta a compresión de 0.4796 Kg/cm<sup>2</sup> y dentro de esta se encuentra el segundo esfuerzo de 1.1563 Kg/cm<sup>2</sup>, en cambio en el apoyo central y en toda el área a su alrededor se tiene un esfuerzo a tensión máximo de 2.2114 Kg/cm<sup>2</sup>.



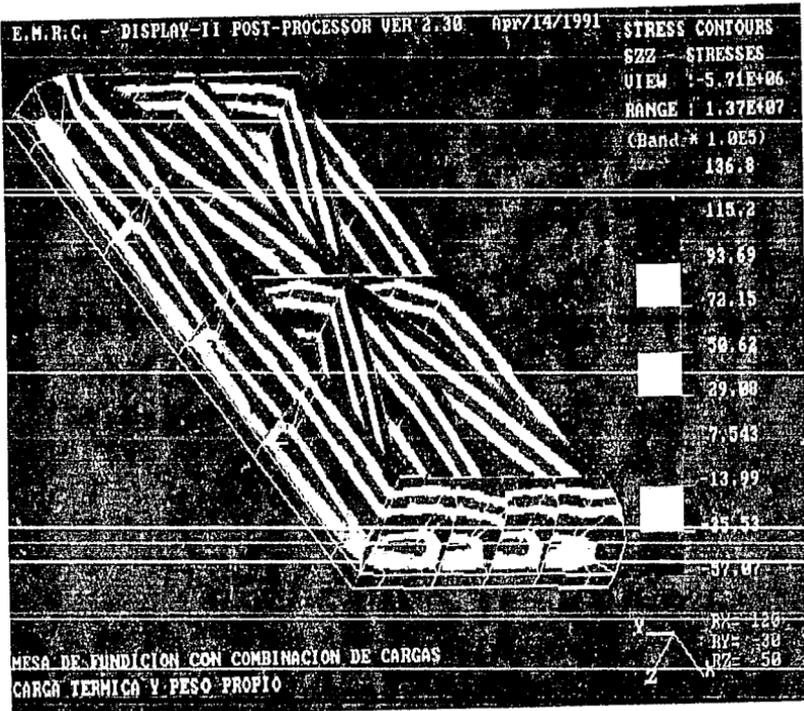
Se observa la combinación de los dos tipos de carga, el peso de la mesa y un gradiente térmico. Las máximas deformaciones se localizan en las esquinas del modelo, concentrándose estas en los extremos donde se tienen los dos puntos de apoyos, estos desplazamientos son de 17.02  $\mu\text{m}$ , y en una zona que central es de 15.13  $\mu\text{m}$ , la deformación en el área que la circunda de 13.24  $\mu\text{m}$ , la diferencia entre una zona y otra no excede a la tolerancia establecida por la norma.



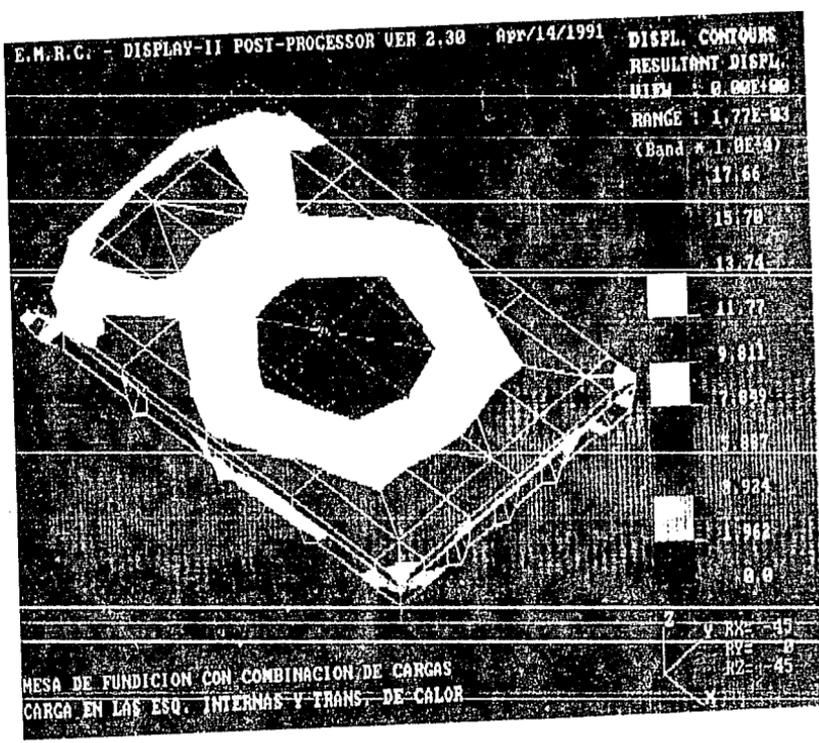
Al modelo se le dio un factor de deformación, para observar los efectos que experimenta el modelo en una forma exagerada. Como los apoyos no permiten desplazamientos, el modelo con el gradiente térmico sufre una dilatación volumétrica, como no le es posible expandirse hacia los lados y además la parte superior es más caliente adopta un patrón esférico en el centro.



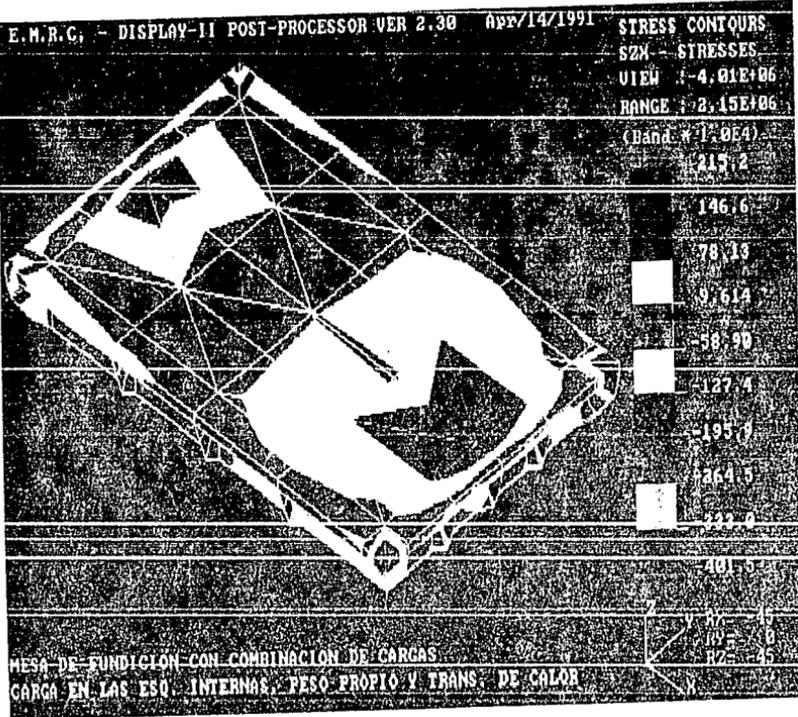
Se pueden observar solo pequeñas zonas de esfuerzos a tensión se localizan junto al apoyo central y en las esquinas de  $2.2888 \text{ Kg/cm}^2$ , la mayor parte de la mesa se encuentra a tensión siendo el valor más significativo de  $0.6944 \text{ Kg/cm}^2$ . De las dos clases de carga a la que esta sometida la que predomina es la térmica.



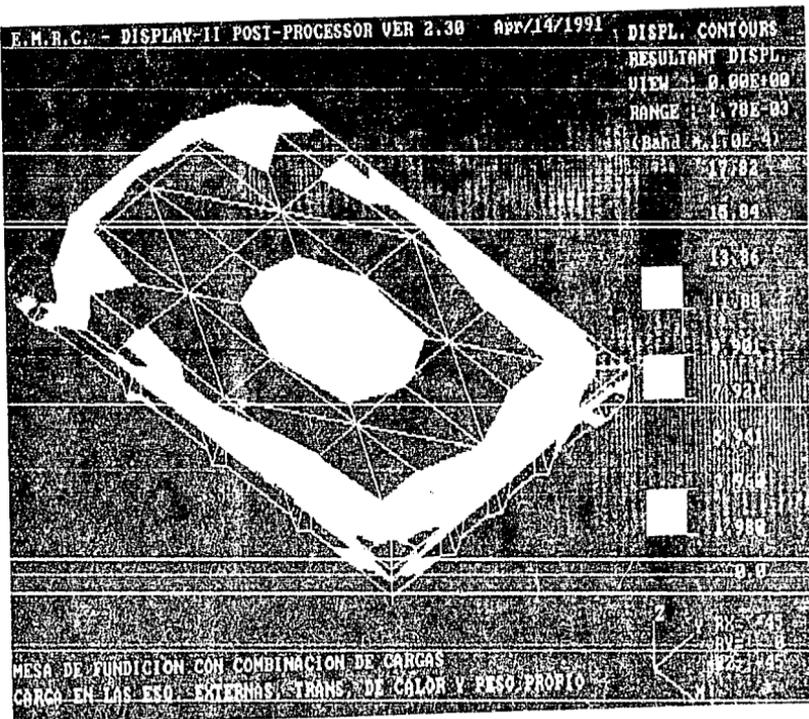
En este caso se tiene una distribución de esfuerzos más homogénea, el máximo esfuerzo de tensión se presenta en la base inferior 13.923 Kg/cm<sup>2</sup>. Las nervaduras se encuentran a compresión donde se unen con la superficie de trabajo de valor 3.624 Kg/cm<sup>2</sup>. Prácticamente toda la superficie de trabajo soporta un esfuerzo de tensión de 0.7693 Kg/cm<sup>2</sup>.



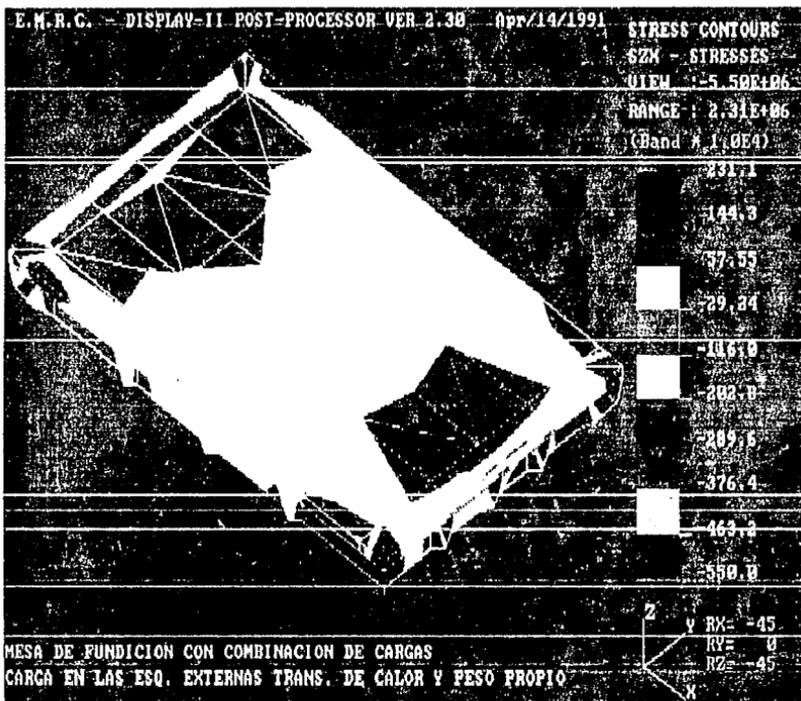
En esta figura se muestra la superposición de tres tipos de carga, la primera es una carga de 25 Kg. concentrada en cada una de las esquinas, la segunda es debido al peso propio de la mesa y la tercera por un gradiente térmico. Los puntos críticos se localizan en dos esquinas con una deformación de 17.66  $\mu\text{m}$  y en el centro la mesa se deforma 13.86  $\mu\text{m}$ . Teóricamente estas serian las deformaciones que se obtendrian al realizar una calibración.



Como se esperaba los esfuerzos máximos se tienen en las esquinas y en el apoyo central con una magnitud de 2.19504 Kg/cm<sup>2</sup>, en la zona que se localiza entre los dos apoyos se tiene una compresión de 1.2994 Kg/cm<sup>2</sup>. Al tratar de expandirse la mesa en la zona de los apoyos y encontrándose estas partes restringidas los esfuerzos se revierten en compresión.

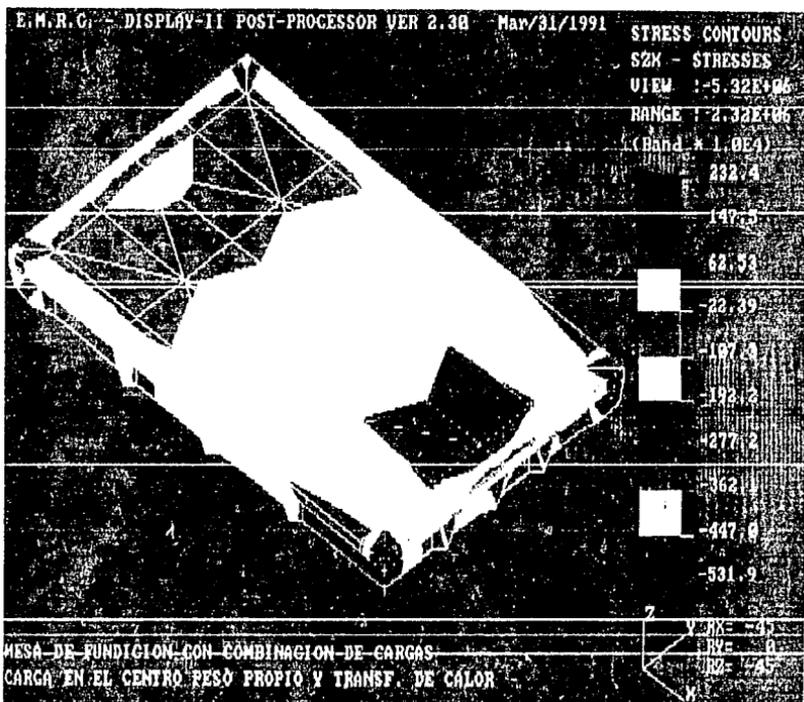


Se ve en la gráfica como interactúan este tipo de cargas observando que los máximos valores se localizan en las esquinas de la mesa  $17.82 \mu\text{m}$  las que se encuentran a un lado de los dos apoyos y en el centro es de  $13.86 \mu\text{m}$ . En teoría estos serían los valores máximos esperados en una medición con este tipo de carga.



En comparación con la gráfica anterior, los esfuerzos son más pequeños, pero dada las similitudes, los esfuerzos se localizan en los mismos lugares. El máximo valor es de 2.3572 Kg/cm<sup>2</sup>, localizado en las esquinas. Los esfuerzos a compresión tienen el orden de 0.2982 Kg/cm<sup>2</sup>.

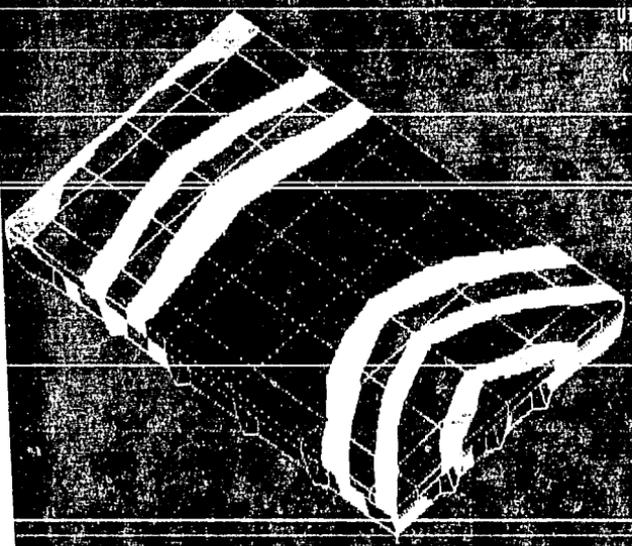




En la zona donde se encuentran los dos apoyos los esfuerzos presentes son de compresión 1.0944 Kg/cm<sup>2</sup>. Aproximadamente un 60% de la superficie de trabajo se encuentra a tensión con un valor de 0.6378 Kg/cm<sup>2</sup>. En las esquinas se localizan esfuerzos de tensión de 2.37048 Kg/cm<sup>2</sup>.

E.M.R.C. - DISPLAY-II POST-PROCESSOR VER 2.3B Mar/21/1991

DISPL. CONTOURS  
 RESULTANT DISPL.  
 VIEW 0:00E+00  
 RANGE 3.13E-04  
 (Band 1.0E-5)  
 31.29

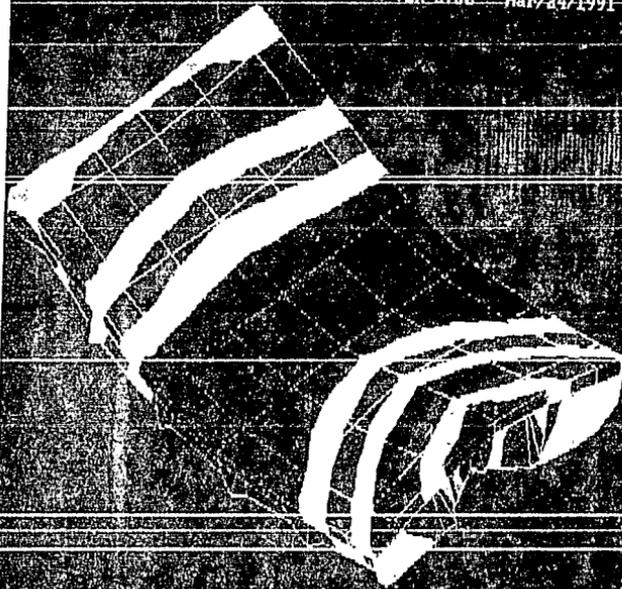


Z Y  
 RW = 245  
 RV = 0  
 RZ = 245  
 X

DEFORMACION POR DIFERENTES TIPOS DE CASOS  
 PESO PROPIO DE LA MESA

En este análisis de peso propio de la mesa, la figura nos muestra como la máxima deformación se presenta en toda la franja central de la mesa, con un valor de  $3.129 \mu\text{m}$ , se considera que esta deformación es alta. Las zonas localizadas cerca del apoyo central tienen una deformación de  $0.3476 \mu\text{m}$ . Con esta deformación es posible trabajar en dos zonas sin exceder los  $4 \mu\text{m}$  que establece la norma.

DISPL. CONTOURS  
RESULTANT DISPL.  
VIEW 0.00E+00  
RANGE 3.13E-04  
Chan # 1.0E+5  
31.29

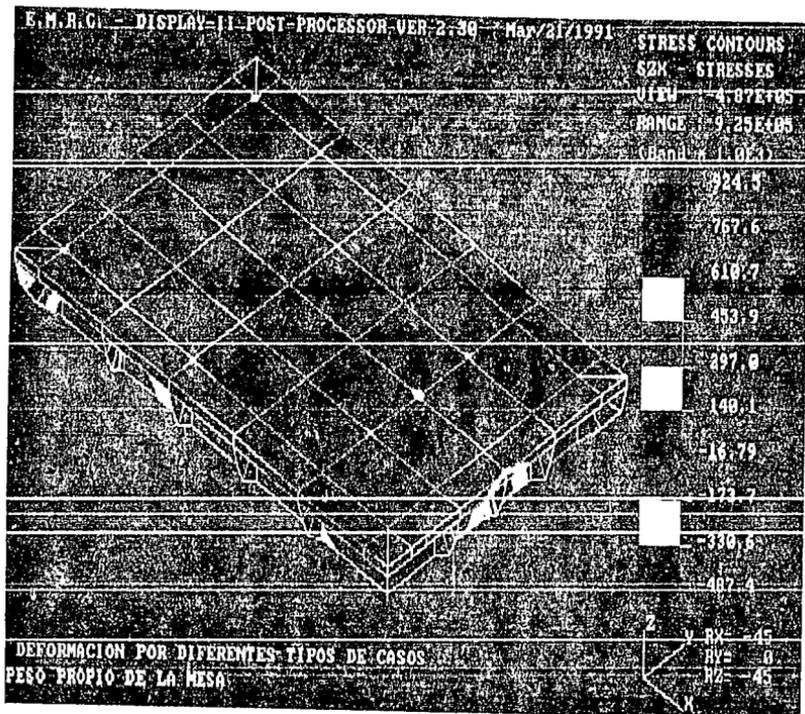


- 27.81
- 24.33
- 20.86
- 17.38
- 13.91
- 10.43
- 6.95
- 3.47

DEFORMACION POR DIFERENTES TIPOS DE CARGAS  
DEFORMACION EXAGERADA UNICAMENTE POR PESO PROPIO



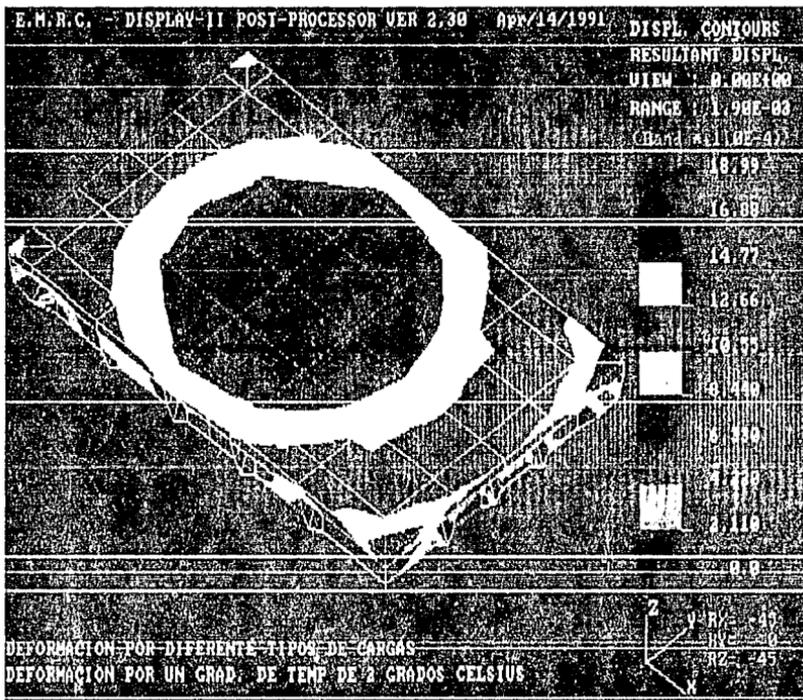
En está gráfica del modelo, se le ha dado un factor de deformación, para exagerar esta presentación, siendo así posible saber en que dirección y sentido actúa la fuerza de gravedad, observando como los apoyos se mantienen en un punto fijo y la parte central es la más deformada con 3.129  $\mu\text{m}$ .



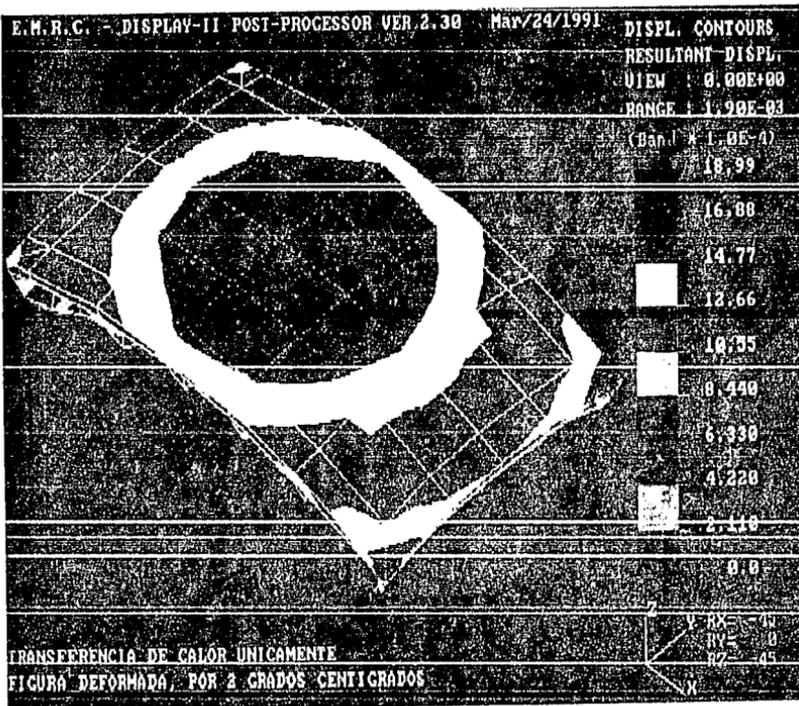
La mesa experimenta en la parte superior un esfuerzo de tensión de 0.1429 Kg/cm<sup>2</sup>. Nótese como en el apoyo central la aleta experimenta un esfuerzo a tensión de 0.94299 Kg/cm<sup>2</sup>. En general la mesa en su parte superior se encuentra sometida a esfuerzos a compresión, y en su parte inferior a esfuerzos de tensión.



En los apoyos se presentan los máximos esfuerzos de compresión 3.277 Kg/cm<sup>2</sup>, al igual que la zona que los rodea. La parte superior se encuentra a una compresión de 0.05817 Kg/cm<sup>2</sup>. Cerca de los apoyos hay zonas que experimentan una tensión 0.4751 Kg/cm<sup>2</sup>. Esta distribución de esfuerzos es lógico debido a que el peso de la mesa actúa sobre si misma.

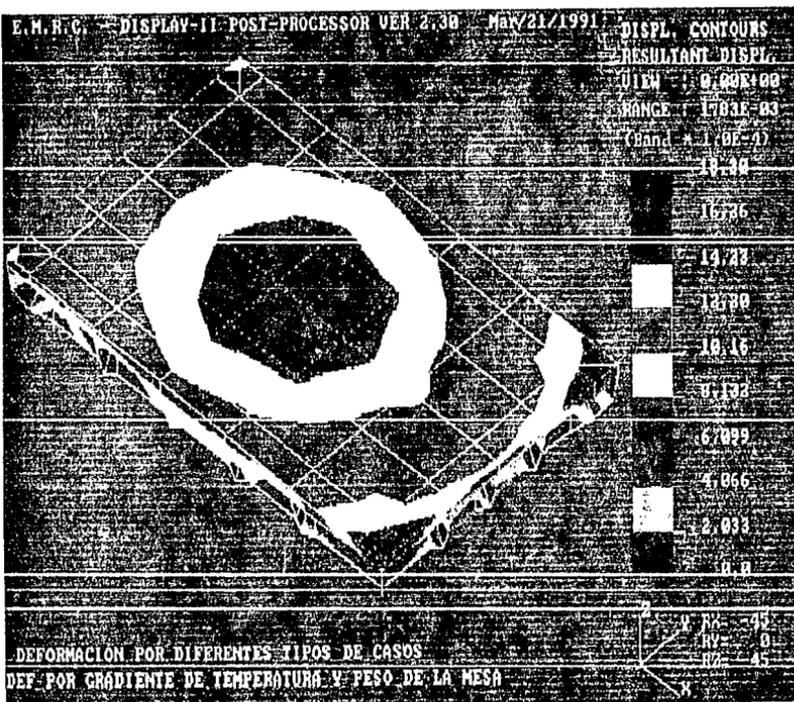


Para este tipo de carga (térmica), la máxima deformación se localizó en el centro al igual que en la mesa triangular; este desplazamiento es significativo, del orden de 18.99  $\mu\text{m}$  y en las esquinas este es de 16.88  $\mu\text{m}$ , en las zonas cercanas a los apoyos los desplazamientos son muy pequeños.

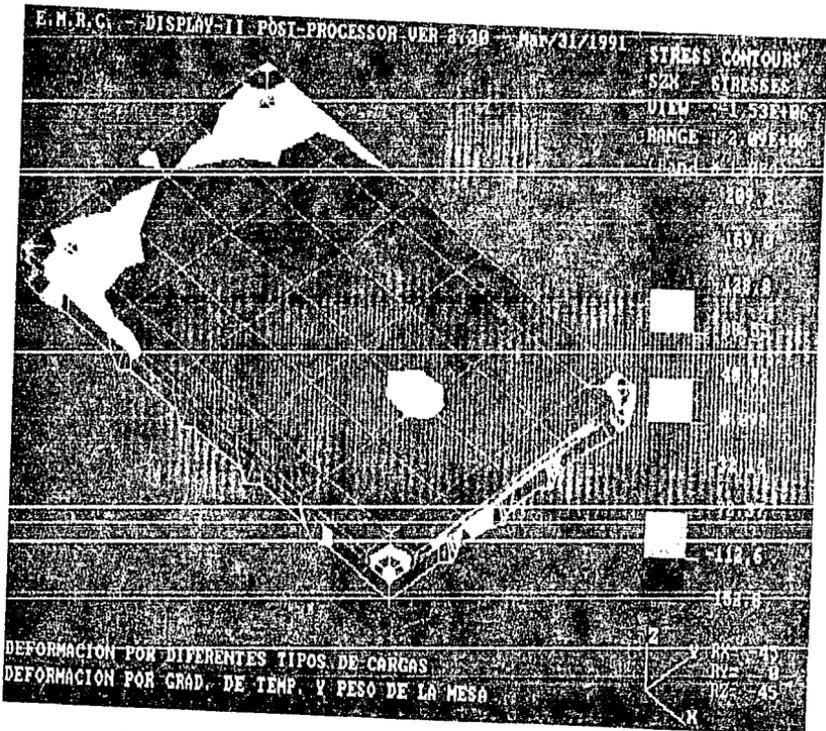


Vista exagerada de la deformación por temperatura. El campo de desplazamientos actúa en dirección vertical y hacia arriba; esto es consecuencia de estar restringida por los apoyos, además que la temperatura máxima se encuentra en la parte superior. En la zona central la mesa se deforma adoptando un patrón esférico.

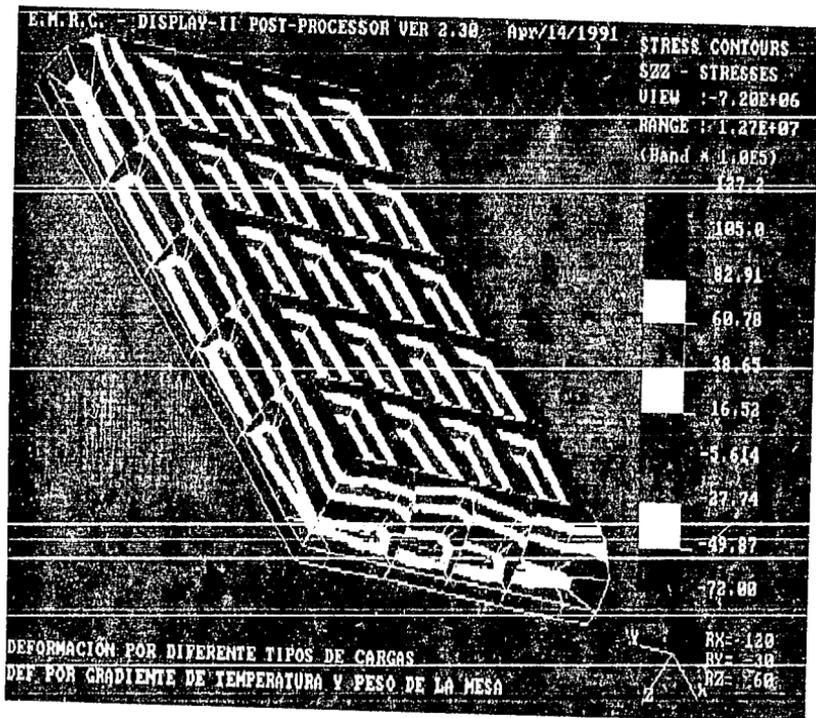




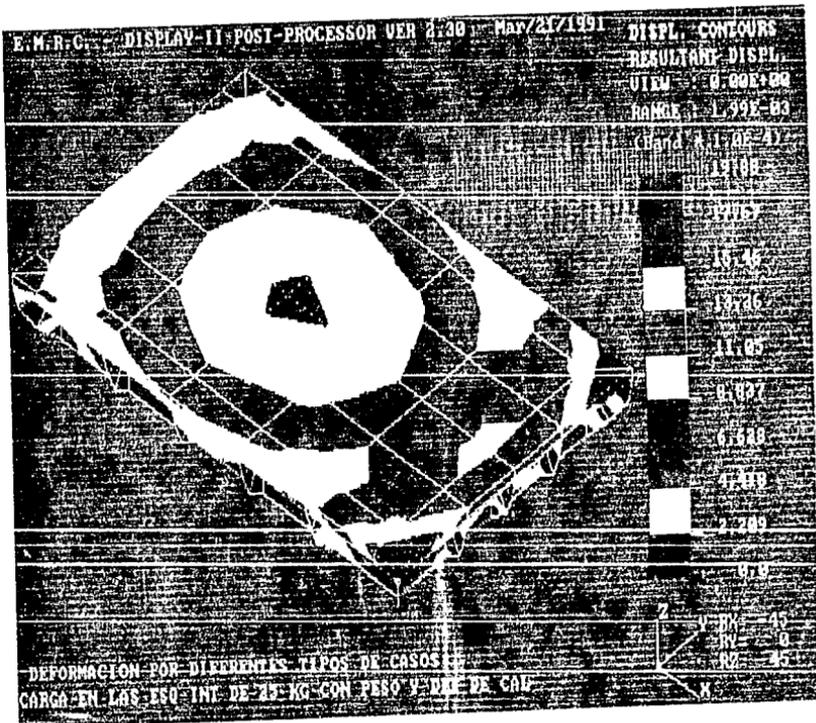
Como se esperaba, el gradiente de temperatura influye de una manera significativa; en el centro se tiene una deformación de  $16.26 \mu\text{m}$ , en las esquinas cerca del apoyo central el desplazamiento es de  $18.3 \mu\text{m}$ . Las nervaduras también presentan deformaciones pero estas son muy pequeñas.



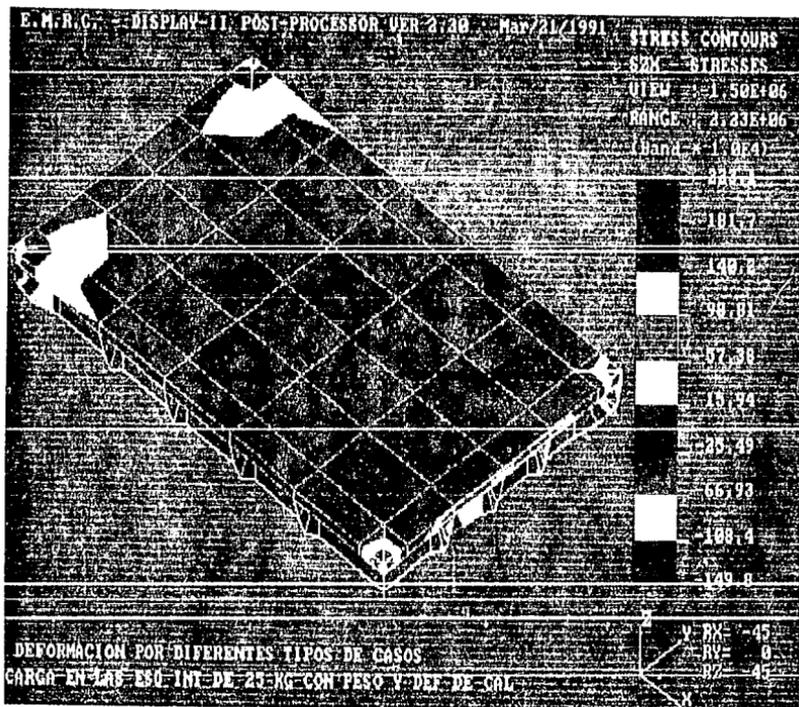
En esta figura se presenta el estado de esfuerzos debido a la combinación del peso propio y del gradiente térmico, siendo los esfuerzos térmicos los que más predominan, con una magnitud de  $0.0825 \text{ Kg/cm}^2$ , en la superficie de trabajo los esfuerzos a compresión se localizan cerca de los apoyos.



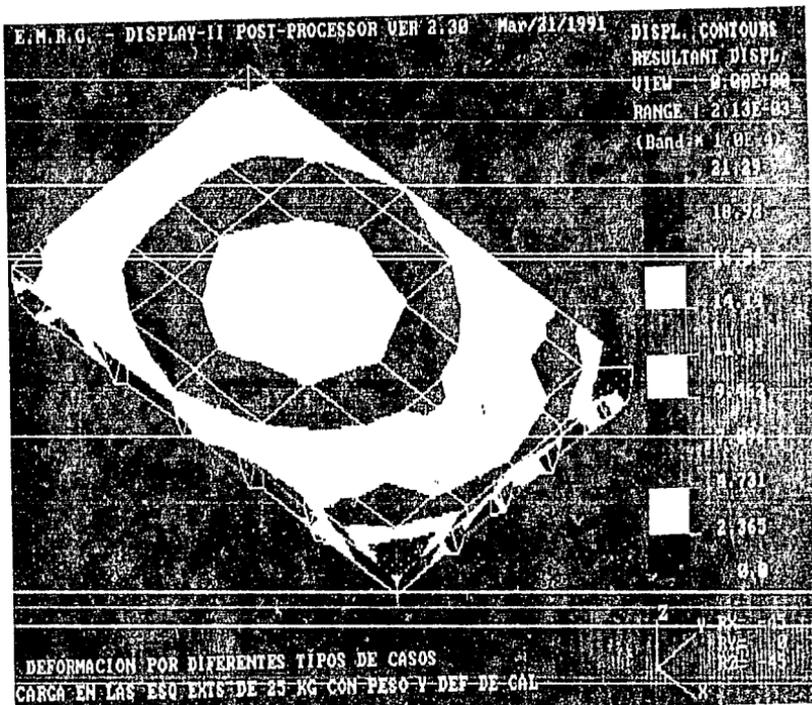
Los resultados de la combinación de la carga de gradiente térmico y el peso propio, se nota como predomina el efecto de la carga térmica. En la unión de las aletas, la placa útil de trabajo y las nervaduras, se presenta un esfuerzo de compresión de 7.344 Kg/cm<sup>2</sup>. La tensión más grande es de 12.974 Kg/cm<sup>2</sup> en la base de las nervaduras. La superficie de trabajo soporta una tensión de 1.685 Kg/cm<sup>2</sup>.



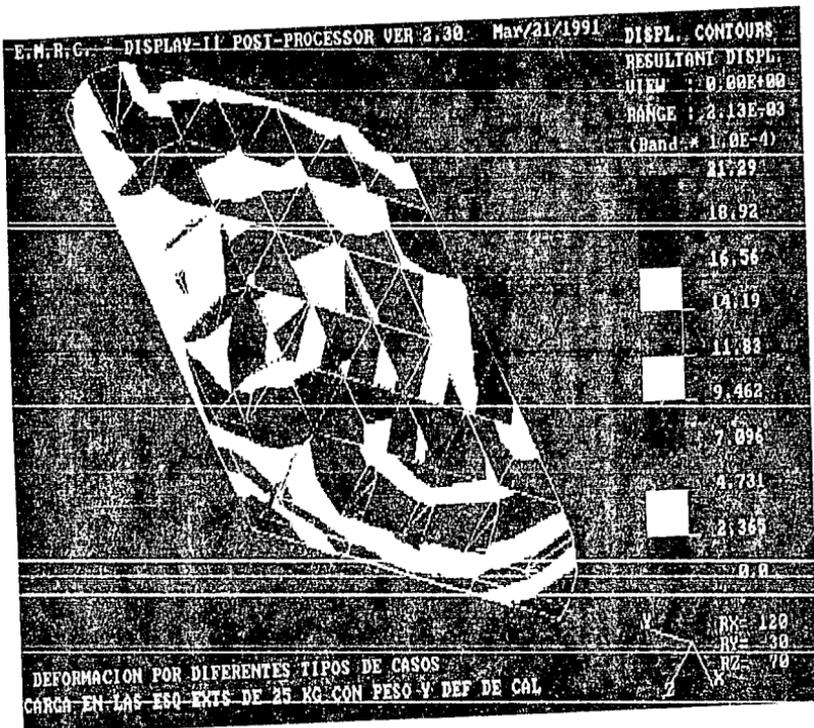
La superposición de la cuatro cargas concentradas en las esquinas, la fuerza de cuerpo y la carga térmica, dan como resultado un desplazamiento máximo en las esquinas, cercanas a los dos apoyos, de  $19.88 \mu\text{m}$ . En las esquinas cercanas al apoyo central tan solo es de  $13.26 \mu\text{m}$ , porque al estar menos restringida esta parte permite un mejor distribución de los desplazamientos.



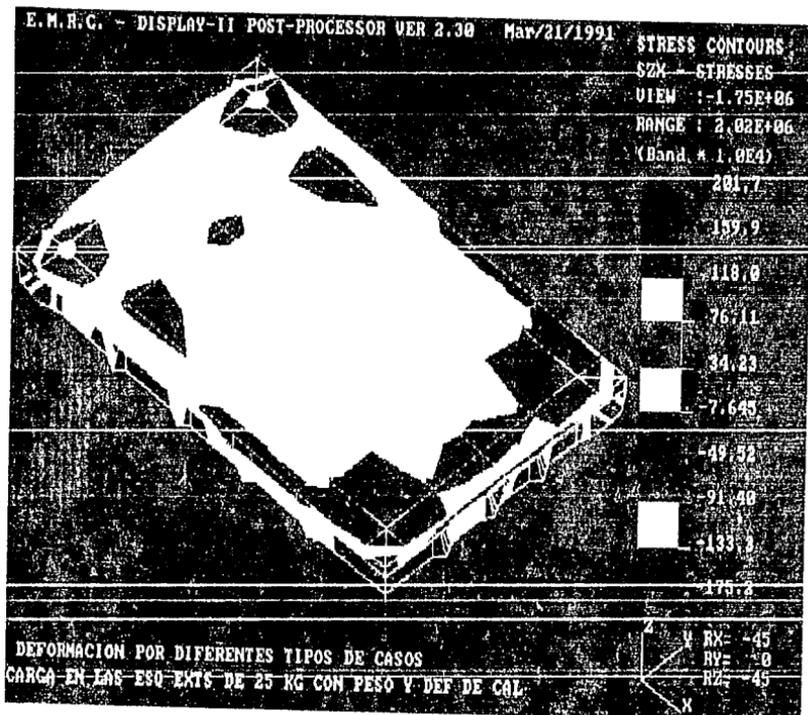
La mayor parte de la superficie de trabajo experimenta un esfuerzo a tensión de 0.10528 Kg/cm<sup>2</sup>; es importante notar que las aletas, además de proporcionar rigidez a la mesa, generan una distribución de esfuerzos más homogénea, en todos los casos siempre se encuentran soportando los dos tipos de esfuerzos; el máximo esfuerzo a compresión es de 1.52769 Kg/cm<sup>2</sup>.



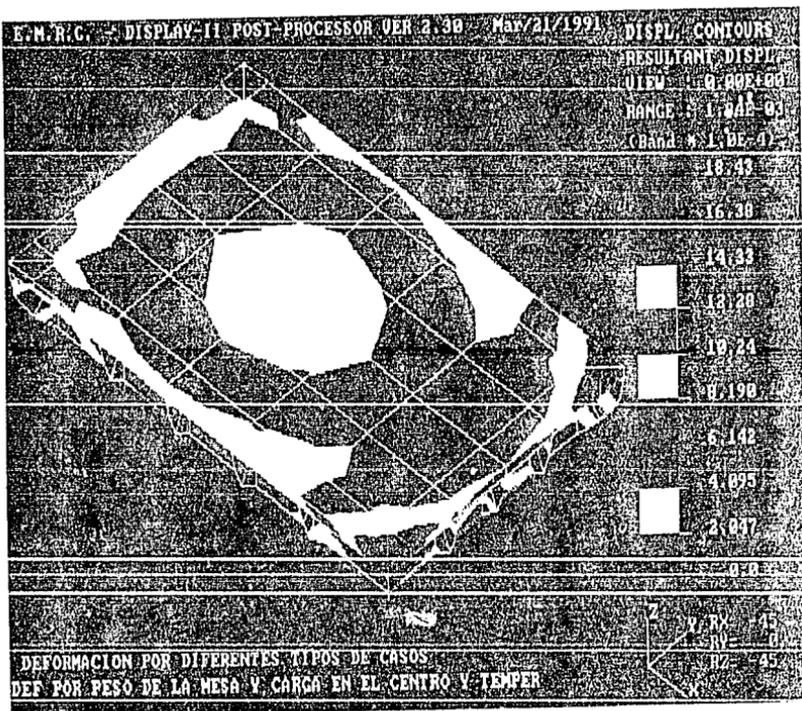
Al aplicar una carga concentrada de 25 Kg. en cada una de las esquinas exteriores, se obtienen zonas criticas precisamente en estos puntos; las esquinas cercanas a los dos apoyos presentan un desplazamiento de 21.29  $\mu\text{m}$ , en el centro de la mesa el desplazamiento es de 16.56  $\mu\text{m}$ . Teóricamente se obtendrian estos valores en una medición real.



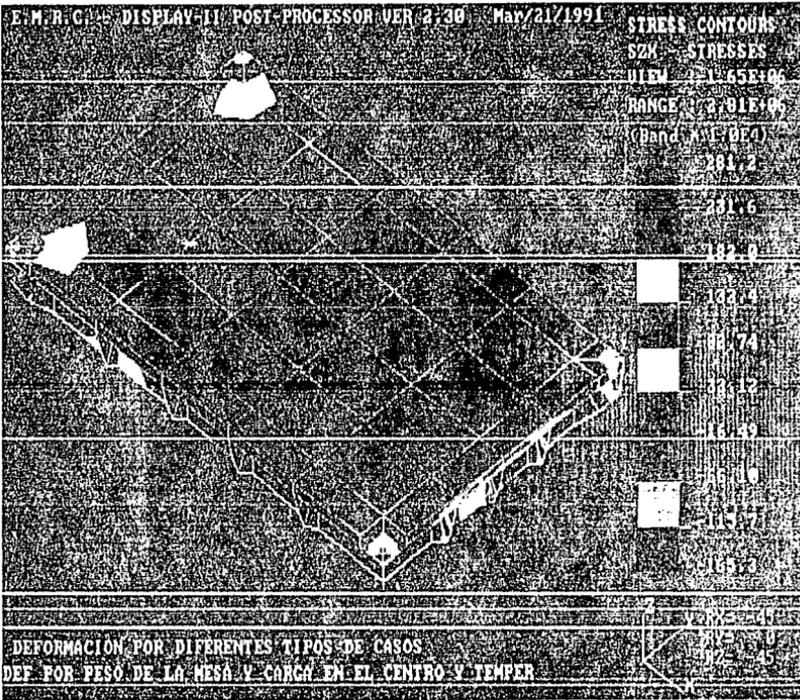
Esta vista posterior permite observar como trabajan las nervaduras; cerca de los apoyos los desplazamientos son muy pequeños, a mayores distancias de los apoyos los desplazamientos crecen hasta alcanzar los valores máximos, como es el caso de las esquinas 21.29  $\mu\text{m}$ .



La superposición de la carga térmica, peso propio, y la carga puntual concentrada en las cuatro esquinas, dan como resultado este tipo de distribución de esfuerzos, siendo los máximos de tensión 2.05734 Kg/cm<sup>2</sup>. En la mayor parte de la zona superior predomina un esfuerzo de tensión 0.3491 Kg/cm<sup>2</sup>, las nervaduras experimentan tensiones.



La carga fue aplicada en dos puntos al centro de la mesa cada una de 25 Kg. En este análisis se esperaba que la máxima deformación se presentara en el centro de la mesa, cosa que no sucedió, el valor en el centro de la mesa fue de 14.33  $\mu\text{m}$ , y en la esquina cerca del apoyo central se alcanzó 18.43  $\mu\text{m}$ .



El estado de esfuerzos resultante es simétrico respecto al eje longitudinal, el esfuerzo predominante es de 0.3378 Kg/cm<sup>2</sup>. Mientras en las esquinas cercanas a los dos apoyos se tienen esfuerzos a compresión de 0.6742 Kg/cm<sup>2</sup>.

## **CAPITULO 7**

### **MAQUINADO Y ACABADO**

## MAQUINADO Y ACABADO.

### 7.1.RECOMENDACIONES DE MAQUINADO.

#### 7.1.1.Limpieza.

Antes de empezar a maquinar la pieza, se recomienda hacer una limpieza para quitar todo el material impregnado que tenga la fundición, como rastros de arena. La limpieza se puede hacer con chorros de agua a alta presión.

La remoción de las mazarotas, se puede hacer por medio de un desbarbado con una piedra de esmeril, con un cincel, o un marro de mano, etc.

#### 7.1.2.Desbaste y afinado.

El desbaste y afinado pueden hacerse en fresa vertical, horizontal, universal, y/o cepillo de mesa. La elección de cualesquiera de estas máquinas depende si estas tienen las dimensiones necesarias para el maquinado de la mesa de planitud.

Para el desbaste, se recomienda empezar a maquinar por la parte de las nervaduras, para que la superficie de trabajo de la mesa de planitud tenga una correcta nivelación. Después de desbastar esta cara se recomienda proseguir con la superficie de trabajo, para continuar con cualesquiera de las superficies largas y proseguir con la siguiente de las caras largas de la mesa. Finalmente terminar maquinando las caras cortas. Las cuatro superficies laterales se maquinan hasta el afinado, siempre buscando el paralelismo de las caras opuestas y ángulos rectos en las esquinas y que sean superficies normales a la superficie de trabajo.

Para la fresa, el número de revoluciones depende de la velocidad de corte admitida y del diámetro de la fresa. En el fresado se entiende por velocidad de corte el recorrido de un filo de la fresa en m/min.

Sean

v=velocidad de corte m/min.

d=diámetro de la fresa en mm.

n=número de revoluciones de la fresa por minuto.

El número de revoluciones de la fresa por minuto será

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

VALORES PRACTICOS PARA LA VELOCIDAD DE CORTE (v en m/min.) Y  
PARA EL AVANCE (s' en mm/min.).

Anchura de la fresa b Profundidad de corte	fresa cilíndrica b=100mm				fresa frontal cilíndrica b=70mm				fresa de vástago b=25mm			
	des. a=5mm		afi. a=0.5mm		des. a=5mm		afi. a=0.5mm		des. a=5mm		afi. a=0.5mm	
	v	s'	v	s'	v	s'	v	s'	v	s'	v	s'
Fundición gris	12	120	18	60	12	140	18	70	15	60	19	120

tabla 7.1.

El avance se da en el fresado por medio de la velocidad de avance en mm/min. Se entiende por este avance el recorrido en mm que realiza la mesa fresadora y con ella la pieza, en un minuto.

La velocidad de avance (s') viene obligada por la fresa, el material de la pieza, la profundidad de corte y la cantidad superficial que se desee. Para evitar que la máquina vaya sobrecargada, se calcula a veces la velocidad de avance. Se parte para ello de la cantidad máxima de viruta que puede arrancar la fresa en un minuto. Por medio de experiencias se ha fijado la cantidad máxima de viruta en  $\text{cm}^3$  por kilowatt de potencia en la máquina.

V=cantidad máxima posible en  $\text{cm}^3/\text{min}$ .

V'=cantidad admisible en  $\text{cm}^3/\text{kW min}$ .

N=potencia de la máquina en kW.

La cantidad máxima posible de viruta se obtiene multiplicando la cantidad admisible por la potencia de la máquina.

Cantidad máxima posible en  $\text{cm}^3/\text{min}$ .  $V=V' \cdot N$ .

En el fresado de desbaste se trata de eliminar el exceso de material en el tiempo más corto posible. Por esta razón se elige una velocidad de avance grande. Para el trabajo siguiente, afinar quedan de 0.5 a 1mm de material. Para lograr una mayor duración de la fresa se elige una velocidad de corte pequeña.

Mediante el fresado de afinado la mesa obtendrá prácticamente sus dimensiones finales y la calidad superficial deseada. Para esto es necesario una mayor velocidad de corte y una velocidad de avance pequeña. Cuando el exceso de material no es demasiado grande, la pieza puede obtener sus dimensiones

definitivas y su calidad superficial con una sola pasada. En este caso se eligen unos valores intermedios para las velocidades de corte y de avance.

En el cepillado, es importante el filo que tenga el buril. Para el desbaste, se recomienda una forma robusta del filo, para arrancar en el menor tiempo posible la mayor cantidad de material.

Para el afinado, el buril ha de dar a la superficie trabajada un aspecto limpio y por esta razón los filos son redondos o planos.

El número de dobles carreras a establecer por minuto se rige por la velocidad de corte admisible y por la longitud de la carrera.

El número de dobles carreras por minuto puede leerse en la tabla correspondiente de la máquina, teniendo en cuenta la velocidad de corte adoptada, pero puede obtenerse también por cálculo. Según sea el tipo de la máquina pueden establecerse diversas dobles carreras por minuto.

Cálculo de las dobles carreras/minuto:

$$\text{Dobles carreras/minuto (n)} = \frac{\text{velocidad media (en m/min)}}{\text{carrera doble (en m)}} \quad n = \frac{vm}{2 \cdot L}$$

VALORES PRACTICOS PARA LA VELOCIDAD DE CORTE (m/min)  
DURANTE EL CEPILLADO.

Herramienta de	Fundición gris
Acero de herramientas	12
Acero rápido	14

tabla 7.2.

El ajuste del avance y de la profundidad de corte, se rigen por el tipo de mecanizado que haya de realizarse.

Sección de viruta = profundidad de corte x avance;  $F = a \cdot s$ .

La sección de la viruta debe ser proporcional a la potencia de la máquina.

Al desbastar, debe ser la profundidad de corte de 3 a 5 veces mayor que el avance.

Al afinar, hay que mantener tanto la profundidad de corte como el avance con un valor pequeño.

### 7.1.3. Rectificado.

Para la mesa se recomienda una muela de carburo de silicio de grano fino, con una velocidad periférica pequeña y con una profundidad de 0.0025 a 0.005mm para obtener una superficie de gran calidad.

Las máquinas con árbol o husillo de esmerilar vertical son adecuadas para trabajar piezas cuya superficie de apoyo sea paralela a la superficie que se va esmerilar.

En el esmerilado frontal, en virtud de la gran superficie de contacto que existe entre la muela y la pieza, toman parte muchos granos abrasivos y por esta razón en el se obtiene gran rendimiento de producción.

Se recomienda usar una muela de segmentos, que es más ventajosa para el esmerilado de superficies anchas y completas, porque los espacios intermedios entre segmento y segmento facilitan una buena afluencia del líquido refrigerante y una buena salida de virutas.

El diámetro de la muela debe ser mayor que la anchura a esmerilar. La gran superficie de contacto exige muelas blandas.

La velocidad de corte (de 20 a 25 m/s), la velocidad de la pieza (hasta 14 m/min) y el avance en profundidad dependen de la anchura y de la calidad superficial deseada.

La sujeción de las piezas que han de someterse al esmerilado plano ha de realizarse cuidadosamente. Para el caso de la mesa se recomienda una plato magnético puesto que la superficie inferior va mecanizada. Aparte, este tipo de sujeción aminora considerablemente el tiempo empleado en la sujeción. Después del esmerilado, deben desimantarse las piezas de acero o de fundición de hierro que hayan sido sujetadas magnéticamente.

Con objeto de que la sujeción sea buena, hay que limpiar muy bien el plato magnético y la pieza.

Para esmerilar el exceso que trae la pieza bastan, por lo general, dos pasadas. El esmerilado final se da con muy poco avance en profundidad.

Aunque la mesa puede terminar su proceso de mecanizado con el rectificado, existe otras técnicas para obtener superficies de mayor calidad y por ser estas menos conocidas que los procesos anteriormente mencionados de desprendimiento de material, se profundiza en ellas un poco más.

## 7.2.ACABADO SUPERFICIAL DE LAS MESAS METALICAS.

Las calidades de mayor precisión se obtienen por rasqueteado, y la de menor precisión (calidad 3) se obtiene generalmente por mecanizado.

Las operaciones de acabado es preferible realizarlas con herramientas cortantes (cepillado, rasqueteado) antes que con herramientas abrasivas (esmerilado, lapeado) que pueden dejar restos perjudiciales de abrasivo en las cavidades de la fundición. Sin embargo, ello obliga a que las durezas superficiales sean inferiores.

La tolerancia de planitud afecta a los puntos de la superficie portante de la mesa, esta superficie portante debe estar uniformemente distribuida sobre la superficie de trabajo y presentar unos valores que no sean excesivamente bajos para asegurar un apoyo correcto de piezas e instrumentos sobre la superficie portante y evitar un desgaste prematuro; pero tampoco debe ser demasiado elevados para que no exista peligro de arañazos.

El porcentaje de superficie portante respecto a la superficie de trabajo se determina extendiendo un tinte de color sobre la mesa y frotando a continuación con la superficie plana de un bloque de ciertas dimensiones.

Con este frotamiento, ciertas partes de la mesa habrán perdido el tinte mientras que otras lo habrán conservado. Las partes limpias son las pertenecientes a la superficie portante de la mesa.

El grado de planitud de la superficie con que se frota la mesa no influye decisivamente en la determinación de la superficie portante, aunque es recomendable emplear una superficie de un grado de calidad similar a la de la mesa.

En función del grado de calidad de la mesa, deberá existir el siguiente número de puntos en un área de 25mm X 25mm =625mm<sup>2</sup> situada en cualquier zona de la superficie de trabajo (Norma Francesa E11-101 nov. 1977).

CALIDAD	NUMERO DE PUNTOS DE CONTACTO
00	25
0	20
I	12
II	8
III	6(*)

tabla 7.3.

(\*) En el caso de superficies mecanizadas (no rasqueteadas) sólo se obtienen líneas en vez de puntos.

Excepto la superficie de trabajo, las laterales y las de los puntos de apoyo, las demás superficies pueden tener el acabado propio de fundición, pero deben protegerse contra la oxidación mediante pintura protectora.

### 7.2.1. Rasquetado.

El rasquetado es un trabajo de acabado sacando virutas de superficies previamente mecanizadas, para conseguir cierto grado de calidad y lisura. El rasquetado es más preciso que el rectificado a la muela.

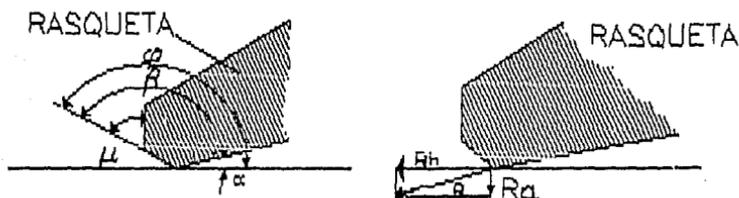
#### CAMPOS DE APLICACION ECONOMICA DEL RASQUETEADO Y DEL RECTIFICADO A LA MUELA.

Rasquetado	Rectificado
Perfiles sencillos de hasta=2 m de largo, con dureza Brinell $HB \leq 200 \text{ kg/mm}^2$ .	Piezas con dureza Brinell $HB > 200 \text{ kg/mm}^2$ .
Contrapiezas de elementos ya rectificadas (p. ej. patines sobre guías).	Perfiles sencillos de más de 2 m de largo.
Superficie de la máxima precisión (p. ej. taladros a calibre).	Perfiles complicados sin precisión máxima.
Superficies imposibles de rectificar con muela.	

tabla 7.4.

El efecto del rasquetado, o sea el mejoramiento de la superficie, eliminando un mínimo del material se consigue por recalado y aplastamiento ante la cara de salida de la

rasqueta con ángulo negativo  $\mu$  de salida. Las fuerzas  $Ph$  y  $Pa$  se han de vencer por el esfuerzo manual del operario, de manera que sólo son posibles virutas de pequeña sección transversal y escasa profundidad.



Ángulos en el rasquete:  $\alpha$  ángulo libre  $\approx 15^\circ$ ,  $\gamma$  ángulo de salida. hasta  $-30^\circ$ ,  $\beta$  ángulo del filo  $\approx 105^\circ$ ,  $\varphi$  ángulo de ataque  $\approx 120^\circ$  con acero  $\alpha \approx 10^\circ$ ,  $\beta \approx 85^\circ$   $\mu$  hasta  $\approx -5^\circ$ ; con fundición dura  $\alpha = 25^\circ$ .

Fuerzas ejercidas por la rasqueta:  
 $R_h$  fuerza principal de corte,  
 $R_a$  presión;  
 $R$  fuerza resultante

figura 7.1.

Los distintos rasqueteados, según la calidad de la superficie, son: rasqueteado previo, rasqueteado por puntos o toques y rasqueteado hermético al aceite; según el fin: alisado, rasqueteado de dirección, rasqueteado de cojinetes y rasqueteado a muestra.

El rasqueteado previo elimina en primer lugar las estrias producidas por la herramienta del mecanizado; luego se sigue trabajando con largas pasadas de rasqueta hasta que las superficies queden uniformes. Variando la dirección del rasqueteado (trabajo cruzado) se evita el atasque de la rasqueta.

DISTRIBUCION DE LOS PUNTOS DE TOQUE, SUPLEMENTOS DE TRABAJO Y PROFUNDIDAD DE LA VIRUTA EN EL RASQUETEADO.

Calidad del trabajo	Clase de piezas	Núm. puntos de toque cada 25x25mm	Suplementos de trabajo aprox. mm.	Núm. de pasadas de rasqueta	Prof. de viruta por cada = mm.
Alisado	Superficie de apoyo y de asiento	2...3	—	3	0.03
Rasquetado previo	Superficie de toda clase	4...5	0.0...0.06	5...7	0.01
Rasquetado por puntos y de cojinetes	Guías de deslizamiento de las máquinas de cepillar y fresar al largo de más de 4m. Tornos carrusel de más de 3000mm de diámetro. Tornos con más de 500mm de altura de punto. Guías de ajuste con más de 250mm de ancho.	6...7	0.05 a 0.08	8...10	0.01 a 0.005
	Guías de deslizamiento de más de 250mm de ancho y de las máquinas de cepillar y fresar al largo hasta de 4m. Guías de ajuste de más de 100 hasta 250mm de ancho.	8...9	0.05 a 0.09	11...12	0.01 a 0.005
	Guías de deslizamiento hasta de 250mm de ancho. Guías de ajuste hasta 100mm de ancho. Cojinetes de más de 120mm de diámetro.	10...12	0.07 a 0.10	14	0.01 a 0.005
	Guías de deslizamiento y de ajuste de máquinas de trabajo muy preciso. Máquinas rectificadoras de roscas, taladros a calibre tornos de precisión, máquinas rectificadoras de engranajes. Cojinetes hasta de 120mm dian.	14...20	0.08 a 0.12	16...20	0.01 a 0.005
	Aparatos de entintar	mas de 20	0.09 a 0.13	21 a 25	0.01 a 0.005
Rasquetado her. al ace.	Superficies de toda clase				

tabla 7.5.

El rasqueteado por puntos es la operación siguiente al rasqueteado previo. Las elevaciones de la superficie se van eliminando por cortas pasadas cruzadas, hasta que el toque con tinta marque el número exigido de puntos. Distribución de los puntos de toque: ver tabla.

El rasqueteado hermético al aceite es una operación de más exactitud, es decir que exige mayor número de puntos de contacto. Superponiendo dos superficies rasqueteadas con una gota de aceite interpuesta y ejerciendo ligera presión, se extenderá el aceite por todas las superficies, de forma que al separarlas aparezcan recubiertas por una película uniforme.

En el alisado se rasqueta la superficie hasta conseguir la igualdad que garantice el asiento completo.

El rasqueteado de dirección se exige por lo general en el trabajo de guías. Las diversas superficies de las bancadas de máquinas han de quedar paralelas, formar cierto ángulo o quedar a determinada altura.

Después de un rasqueteado direccional para suprimir asperezas, se nivela el órgano de máquina y se le da un rasqueteado previo hasta comprobar con nivel, pie de rey, calibre, etc., apoyo uniforme, paralelismo, ángulos y altura convenientes; luego se comenzará el rasqueteado por puntos. La dificultad estriba en la simultaneidad de las operaciones de rasqueteado y medición de las distintas superficies que guardan relación entre sí. Al rasquetear superficies desgastadas es indispensable rasquetear primero una superficie de referencia para todas las demás.

El rasqueteado a muestra se utiliza para ornamentar el trabajo de acabado. La impresión o muestra se rasqueta tan sólo ligeramente en la superficie ya acabada, de manera que no se altere el número de puntos de toque. Este rasqueteado no tiene importancia como portador de película de aceite, ya que los huecos necesarios vienen dados por la operación. Las figuras presentan diversas muestras rasqueteadas.

La muestra se rasqueta por las partes impregnadas de la superficie con la tinta de toque.

La figura que a continuación sigue nos muestra como tomar la rasqueta, su forma y en el recuadrado el acabado que finalmente se obtiene con esta herramienta.



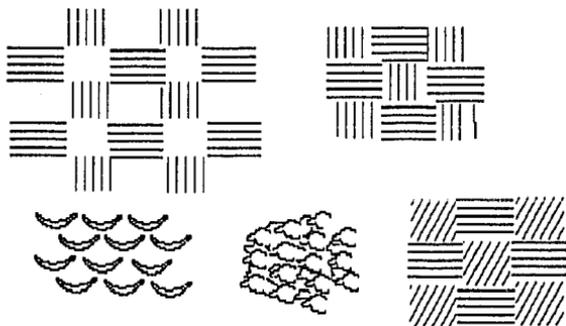
figura 7.2. Rasqueteado.

Si la rasqueta no mordiera en una fundición muy dura y aún con petróleo y golpes rápidos y enérgicos de rasqueta nada se consiguiera, se dará cierta aspereza a la superficie con lima o cuchilla.

Los puntos excesivamente duros se taladran, se cierran con tapones de fundición y se rasquetean.

La rasqueta se afilará con frecuencia en la piedra de esmeril y entre estos afilados se corregirá con muela de arsénica o de esmeril de grano fino, a gran velocidad.

Las figuras muestran distinta formas de acabado del rasqueteado.



Distintas muestras rasqueteadas  
figura 7.3. Muestras distintas de acabado por rasqueteado.

#### 7.2.2. Rasquetas.

Las rasquetas planas, triangulares y de cuchara, de aceros especiales aleados, tienen permanencia de filo. Se emplean, a veces, rasquetas con guarnición de metal duro.

El redondeo de las esquinas de la rasqueta plana atenúa el peligro de atascamiento.

En las rasquetas para acero se esmerila un chaflán en la cara de salida, conservando el ángulo  $r$ .

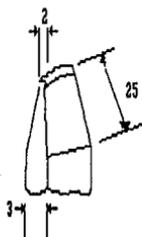


figura 7.4. Rasqueta.

### 7.2.3. Rasqueteado a máquina.

Las rasqueteadora Biax lleva una excéntrica que, por un juego de cables, transmite el movimiento de vaivén a la empuñadura que lleva la cuchilla. Un apoyo graduable al largo de la empuñadura y al bastidor de la máquina recibe los impulsos de rasqueteado. De forma análoga trabaja la rasqueteadora Andersen.

Las formas de rasquetas están establecidas en la norma DIN 8350.

### 7.2.4. Trabajos auxiliares del rasqueteado.

**Nivelación.** Las piezas de máquinas que se hayan de rasquetear, como bancadas de guías, etc., se nivelarán, en sentido longitudinal y transversal, con cuñas de acero (las de madera se contraen). Primero se colocarán las cuñas del centro de la bancada y luego las de ambos extremos. En general, será suficientemente preciso un nivel de burbuja con divisiones correspondientes a un desnivel de 0.05 mm/m. Se evitarán las exposiciones largas al sol, a causa de las deformaciones por el calor y el deslumbramiento del personal.

**Entintado.** Operación del aporte de tinta a la superficie rasquetada, movimiento de avances y retroceso del entintador y comprobación de los puntos de toque.

La tinta se compone de hollín de tea y aceite (tinte negro). La tinta azul, formada por una mezcla de colores al aceite, es más visible, e igual que la tinta roja minio se puede adquirir preparada. La tinta se aplica en película fina y uniforme, con una gamuza, pues los trapos dejan pelusa.

Se comprueba que las pequeñas superficies son planas tan sólo con el mármol o la regla de entintar, hasta conseguir el número requerido de puntos de toque. Si se prescriben alturas precisas o paralelismo, se requerirá además el tornillo micrométrico o un comparador de precisión. Las superficies que no hayan podido ser cubiertas por el entintador se comprobarán con el nivel de burbuja, el comparador de precisión y, si se exige paralelismo, el tornillo micrométrico.

Las guías de las bancadas de máquinas se verificarán con el nivel de burbuja colocada a distancias iguales en sentidos transversal y longitudinal. La flexión lateral de las guías en las bancadas largas se comprueba con microscopio instalado en el puente de medición y una cuerda de piano, tensada a lo largo de la bancada.

El tanteo con el gramil, si no se dispone de otros instrumentos de medida y no se exigen condiciones muy

severas, dará suficiente exactitud para el paralelismo de las guías. Si no se dispusiera del microscopio, puede comprobarse la flexión lateral con una regla nivelada a lo largo de la bancada. Si la regla se hace avanzar cada vez en la mitad de su longitud, para tener buen recubrimiento, se podrán verificar bancadas largas con suficiente exactitud. Para muy alta precisión se usan instrumentos ópticos.

Los aparatos de entintar se limpian de vez en cuando con petróleo. Se fregarán con la mano, pues los trapos dejan fibras. Cuando no se usan, se cubren los mármoles con marcos de madera, para evitar deterioros.

### 7.3. Procedimiento alternativo para acabado final de las mesas de planitud.

Existe un método para crear planos de planitud a partir de tres mesas de planitud.

El procedimiento consiste en:

Con los tres planos A, B, C, se ponen en contacto en las caras de trabajo de A contra B para después moverlas entre sí para después hacer lo mismo pero con A contra C y por último B contra C.

Para después pasar al lapeado y rasquetado.

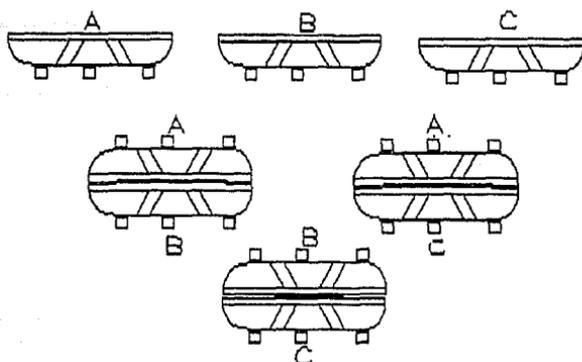


figura 7.5. Orden de pulido de las tres mesas.

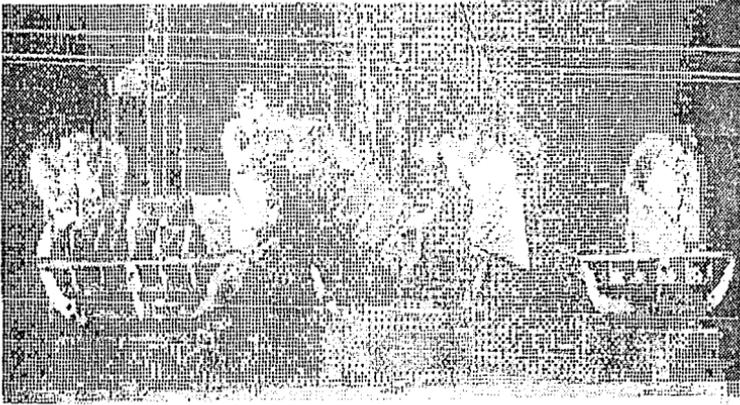


figura 7.6. Manejo de las tres mesas.

Las figuras nos muestran el manipuleo de las tres mesas para obtener 3 planos con una calidad excelente e igual.

#### 7.4. Recubrimientos protectores.

La mesa cuenta con tipos distintos de superficies. La superficie de trabajo en la cual se maquina hasta el rasqueteado, otra que aunque lleva un trabajo de máquina este es solo hasta el desbaste y las demás superficies que se dejan tal y cual salen de la fundición, por esto cada superficie se debe proteger de distinta manera.

Aunque las superficies pulidas (rasqueteadas) resisten la corrosión mucho mejor que las bastas, estas también deben llevar una sustancia protectora, la cual pueden ser grasas y sustancias protectoras de superficies metálicas brillantes, que son generalmente aceites o grasas no secantes, que permanecen blandos durante períodos prolongados; los aceites se adhieren fuertemente a los metales, pero pueden quitarse fácilmente cuando se desee. La mejor protección de los metales la proporcionan los aceites semisólidos exentos de ácidos aplicados en su estado fundido. Algunos tipos comerciales de grasas protectoras son los residuos del petróleo y óxido de hierro con residuos densos del petróleo, los compuestos similares al petrolato en emulsión son soluciones de cromato, los aceites vegetales soplatos o insuflados, los asfaltos blandos adelgazados, los materiales hechos a base de colofonia. Una especificación o relación de condiciones propuesta es la siguiente: el recubrimiento deberá adherirse firmemente a todas las temperaturas a las

que se haya expuesto; el recubrimiento deberá separarse fácilmente con trapos de algodón humedecidos con keroseno; el hierro y el acero no se empañaran al ser expuestos a la intemperie a cualquier temperatura inferior a 100°C, durante no menos de 5 días.

La lanolina es la mejor grasa para usarse como base de estas sustancias protectoras. Es aconsejable agregar una pequeña cantidad de cromato de sodio en las grasas protectoras, a menos que haya sido eliminada toda traza de agua.

Para las superficies bastas se recomienda pintarlas y relacionar estrechamente la preparación de acero para su pintado, el tipo de pintura y el medio a que ha de quedar expuesto. Los procedimientos de preparación, dispuestos en orden de escrupulosidad creciente son: 1) quitado del aceite con disolventes; 2) separación de la suciedad, de la herrumbre floja y de la cascarilla suelta de laminado con un rascador o un cepillo de alambre; 3) limpieza a la llama; 4) tratado con chorro de arena; 5) limpieza con baño químico; 6) fosfatación. Los medios a que ha de quedar expuestos, dispuestos en su orden de gravedad son: a) interiores secos o regiones áridas; b) zonas rurales o de industrias ligeras, normalmente secas; c) húmedas frecuentemente; d) continuamente húmedas; e) productos químicos corrosivos. Para el medio a), los sistemas de pintado consisten a menudo en una simple capa de pintura de bajo costo. Para otros medios, los sistemas comprenden una o dos capas de imprimación inhibitoria de la herrumbre y una o más capas de acabado, seleccionadas de acuerdo con la severidad de las condiciones.

El imprimador contiene uno o más pigmentos inhibitorios de la herrumbre, seleccionados principalmente entre minio, amarillo de zinc y polvo de zinc. También puede contener óxido de zinc, óxido de hierro y pigmentos de extensión. De igual importancia es el aglutinante, particularmente en las manos de acabado. Para superficies por encima del agua son adecuados el aceite de linaza y el barniz de alquida. Los aglutinantes resistentes a los productos químicos son los compuestos epoxi, los de caucho sintético, de caucho clorado, de vinilo y de neopreno.

## **CAPITULO 8**

### **VERIFICACION**

## VERIFICACION

### 8.1. Introducción.

Es importante tener en cuenta que la verificación de la pieza se debe realizar a lo largo de todo el proceso, pero se tienen dos fases donde su ejecución es indispensable. La primera se hace una vez que se ha realizado la colada y la pieza se encuentra a temperatura ambiente, es necesario hacer la primera verificación de la pieza, utilizando un ensayo no destructivo que nos permita determinar si está en condiciones de poder ser maquinada, así como determinar cual podrá ser su calidad máxima, conocer los defectos que pueda tener y si es posible realizar las correcciones. De otra manera, se desechara por completo esta pieza. Para ello se utilizan diversos métodos, a continuación se describen los más usados en la industria, desde el más simple, como es utilizar un líquido penetrante, hasta el ultrasonido y los rayos X.

Después del maquinado se realiza la verificación de planitud, rectitud y de rigidez. Para tal fin se cuenta con una gran cantidad de aparatos y técnicas. Generalmente la verificación se lleva a cabo en los laboratorios de metrología, pues estos cuentan con un medio ambiente controlado tanto en humedad como en temperatura.

Para ello se utilizan instrumentos como el autocolimador con espejo, nivel de burbuja y electrónico, regla con comparador e interferómetro laser.

### 8.2. Ensayos no destructivos.

#### 8.2.1. Líquidos y partículas penetrantes.

Es un ensayo no destructivo que detecta discontinuidades abiertas en la superficie del sólido en materiales esencialmente no porosos, esto es grietas sin importar orientación ni tamaño.

El tamaño mínimo que se puede detectar es de 0.10  $\mu\text{m}$  pulgadas de ancho. Actúa por la acción de la capilaridad y detecta todo tipo de imperfecciones superficiales como son: porosidades, contracciones, discontinuidades de laminación y similares.

Es aplicable a metales ferrosos y no ferrosos, fundiciones o piezas deformadas (forjadas o laminadas), etc.

El procedimiento es el siguiente:

- 1.- Limpieza de la pieza que va a ser inspeccionada.
- 2.- Aplicación del líquido o de las partículas penetrantes.

Esta puede ser, superficial con brocha o atomizador o la inmersión total de la pieza.

3.- Eliminación del líquido excedente penetrante.

4.- Aplicación del elemento revelador ( actúa como una esponja, atrayendo el líquido penetrante fuera de la grieta).

5.- Indicación. La luz negra hace que el líquido penetrante se vea fluorescente en la oscuridad.

Ventajas

Técnica muy simple.  
Menos costoso que otros ensayos no destructivos.  
Procedimientos y estándares más simples.  
No depende del arreglo de la discontinuidad.

Desventajas

Sólo detecta imperfecciones abiertas a la superficie.  
No es aplicable a materiales muy rugosos o porosos ( dan falsas indicaciones).

Indicaciones:

a.- Líneas discontinuas. Grietas (por pulido del maquinado).

b.- Indicaciones circulares (porosidades, rechupes).

c.- Puntos pequeños (microporosidades).

### 8.2.2. Partículas magnéticas.

Detecta defectos tanto abiertos como bajo la superficie, tales como grietas, porosidades e inclusiones, siendo aplicable solo a materiales ferromagnéticos.

Procedimiento

1.- Inducción de campo magnético.

2.- Aplicación de las partículas magnéticas.

3.- Indicación e inspección.

4.- Desmagnetización.

Ventajas

Detecta discontinuidades pequeñas.  
Defectos bajo la superficie.  
No requiere equipo especial.  
No importa el tamaño de la pieza.  
No requiere de preparación especial.

Desventajas

Solo aplicable a materiales ferrosos.  
Siempre se efectúa una desmagnetización.  
Utiliza grandes corrientes eléctricas.  
Requiere experiencia para distinguir.

Las partículas magnéticas pueden ser húmedas o secas. Las húmedas vienen en suspensión, en colores o fluorescentes. Sus ventajas su fácil aplicación, su sensibilidad a pequeñas fallas y la rapidez de inspección. Su desventaja es su alto costo y no son recuperables.

#### 8.4.3. Ensayo radiográfico.

Es un ensayo no destructivo de materiales, que se hace por medio de energía radiante transmitida a través del material para analizarlo por medio de la diferencia de absorción de energía.

Para lograr una mayor resolución de la imperfección, el eje de radiación debe ser perpendicular a la superficie. Se aplica fundamentalmente a fundiciones, soldaduras, equipos ensamblados (tanques), forja y metalurgia de polvos. No hay límite de espesores, siendo posible aplicar el ensayo a aceros de un espesor de hasta 16" de ancho y laminas de hasta 1/64".

Ventajas

Se utilizan equipos automáticos.  
Es rápida y exacta.  
Se obtienen registros permanentes.  
El equipo es portátil.

Desventajas

Es peligroso.  
El costo inicial es alto.  
No se detecta profundidad de defecto.  
No existen normas de referencia.  
Se requiere de personal.  
altamente capacitado.

#### 8.2.4. Ensayo de ultrasonido.

El principio, se basa en que los sólidos son conductores o transmisores de energía mecánica vibracional. Detecta propiedades mecánicas, composiciones químicas, espesores (dimensiones, recubrimientos) y defectos (discontinuidades).

Existen dos formas de aplicación, la de pulso eco y la de transmisión continua.

Ventajas

Alto poder de penetración.  
Alta sensibilidad del orden de 0.001 mm.  
Mayor exactitud en la posición, naturaleza y orientación de la imperfección.  
No requiere de mucha preparación del material.  
Sensores electrónicos, precisión, rapidez, registros permanentes y automatización.  
No es peligroso.  
Portátil.  
Gran versatilidad.

Desventajas

Requiere personal calificado.  
Experiencia del personal.  
Para piezas pequeñas se requiere inmersión  
Se necesitan normas de referencia.  
Alto costo.

#### 8.2.5. Pruebas secundarias.

Los arañazos y melladuras pueden ser no perjudiciales si su número y tamaño es pequeño, las protuberancias que circundan los cráteres producidos por los impactos se limpian y se aplanan cuidadosamente con una lima de carburo de silicio (piedra de asentar).

Son causa  
de  
rechazo

Las grietas,  
picaduras,  
melladuras,  
desconchamientos,  
protuberancias,  
marcas de mecanizado,  
irregularidades en general.

#### 8.3. Instrumentos de verificación.

Los instrumentos de medida para comprobar la planitud de una superficie de trabajo, no deberán tener contactos puntuales con dicha superficie y el área mínima de contacto aconsejable

es de 2.7 cm<sup>2</sup> (30x9 mm), especialmente en las mesas metálicas.

La verificación salvo indicación, se realiza en ausencia de cargas y a la temperatura de referencia. La verificación puede realizarse en el sitio de trabajo o transportando la mesa a un laboratorio de metrología.

En la verificación de la planitud, la mesa debe estar descansando sobre los puntos de apoyo definidos por el fabricante. Se debe encontrar en equilibrio térmico, para lo cual deberá haber estado en un ambiente a la temperatura de trabajo, el tiempo suficiente para que todos sus puntos se encuentren a la misma temperatura (igual a la del ambiente). Esta condición es necesaria, cuando de mayor calidad sea la mesa. La temperatura de referencia es de 20 °C.

Se recomienda al fabricante precisar los tiempos en que alcanza el equilibrio térmico. Salvo especificaciones particulares, la verificación de la planitud se hace en ausencia de cualquier carga ya sea térmica, dinámica o estática.

En el informe de calibración se deben recoger los datos indicados en la sección "Designación e identificación", del capítulo dos además de:

- 1.- Tolerancias de planitud (total y local).
- 2.- Gradiente térmico de calibración, indicando si la temperatura superior se encuentra en la parte superior o inferior de la mesa.
- 3.- Descripción de la sustentación.
- 4.- Método de calibración.
- 5.- Resultados y observaciones.
- 6.- Valor promedio del módulo de elasticidad.

Las mesas de planitud, sobre todo las de calidades superiores y las sometidas a desgastes de importancia, precisan de una calibración periódica con la que se determinan las zonas de mayor desgaste, su calidad real, así como la conveniencia de su sustitución o remecanizado.

El intervalo entre la calibraciones varía según la calidad de la mesa, su resistencia al desgaste y su frecuencia e intensidad de uso.

Como valores típicos se pueden indicar periodos de seis meses para mesas de inspección y de doce meses para mesas de laboratorios.

### 8.3.2. Evaluación de planitud.

Instrumentos empleados en la calibración de mesas de planitud.

- a.- Autocolimador con espejo.
- b.- Nivel (de burbuja y electrónico).
- c.- Interferómetro laser.
- d.- Regla con comparador.
- e.- Regla óptica.

Existen una gran cantidad de instrumentos y elementos metrológicos empleados para la verificación de planitud, pero no son de aplicación a la calibración de mesas.

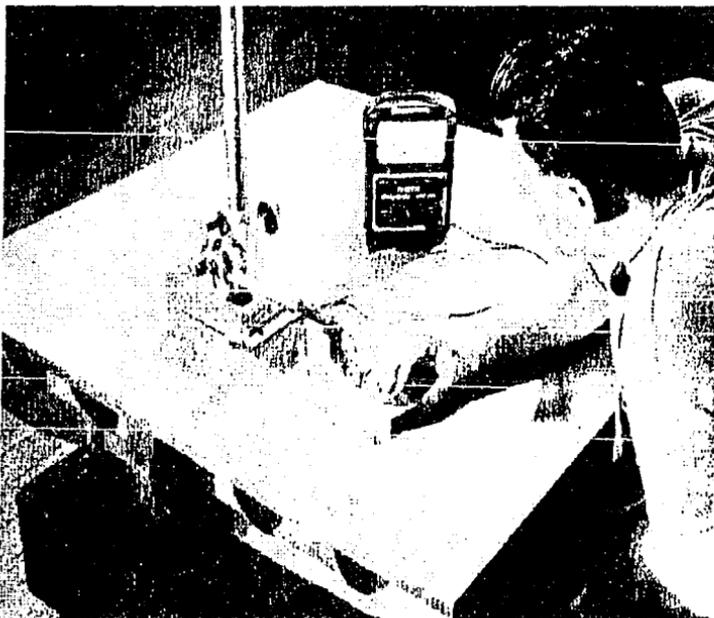


Figura 8.1. Nivel electrónico

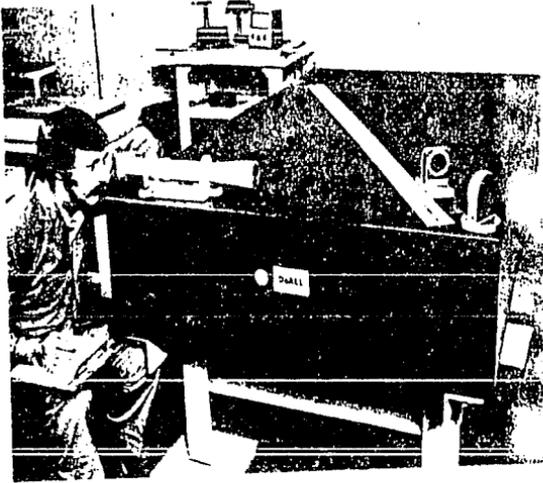


Figura 8.2. Autocolimador con espejos.

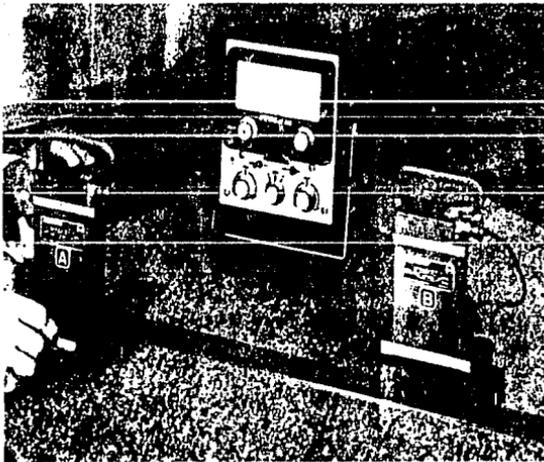
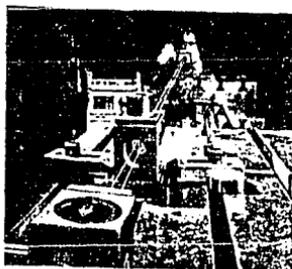
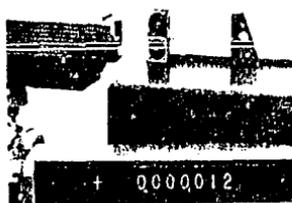


Figura 8.3. Nivel electrónico con dos cabezas independientes.



(a) Dimensionales



(b) De planitud



(c) De rectitud

Figura 8.4. Mediciones con laser.

#### 8.4. Métodos de verificación de planitudes.

##### 8.4.1. Interferencia óptica (con plano óptico).

Es de aplicación solo para superficies de reducidas dimensiones como son los bloques patrón o las puntas de micrómetros, pero tiene la característica de poseer una exactitud muy elevada.

La evaluación cuantitativa de máxima exactitud se obtiene por este método en el interferómetro.

#### **8.4.2. Nivel.**

Es un procedimiento bastante exacto (sobre todo con niveles electrónicos), con el que se pueden determinar los errores de planitud en forma bastante rápida.

Los niveles a emplear pueden ser de burbuja de precisión (con tornillo micrométrico ) o electrónicos.

#### **8.4.3. Regla y bloques patrón o comparador.**

Permite cuantificar la magnitud del error de planitud si bien es solo aplicable a las calidades inferiores. Requiere experiencia y el tiempo de ejecución es alto. El método se mejora sensiblemente empleando un reloj comparador en sustitución de los bloques patrón.

#### **8.4.4. Anteojo y mira.**

Es bastante rápido y exacto, cuantifica la magnitud del error. Es útil para calidades no elevadas y sobre todo para grandes dimensiones.

#### **8.4.5. Perfilógrafo.**

Máquina de medición en la que se obtiene un perfil de una superficie amplificándolo un determinado número de veces. Este solo es aplicable para pequeñas zonas y con una exactitud no muy elevada.

#### **8.4.6. Base con comparador.**

Indirectamente se puede obtener la magnitud del error de planitud si bien a través de mediciones anteriores, lo que hace que su exactitud no sea demasiado buena. Es un método rápido y sencillo.

#### **8.4.7. Microscopio e hilo.**

En este caso la superficie de referencia para la medición se ha sustituido por una línea materializada por un hilo (una cuerda de piano) tenso. El microscopio se utiliza para evaluar los errores.

#### **8.4.8. Entintando con bloque o con regla.**

Es también un procedimiento subjetivo que permite localizar en forma rápida los puntos de la superficie portante. Procedimiento cualitativo que requiere experiencia.

#### 8.4.9. Regla de cuchillo (rendija de luz).

Es un método poco exacto desde un punto de vista cuantitativo que requiere de una buena experiencia y habilidad del operador. La medida es por lo tanto subjetiva y el método solo es aplicables a las calidades más bajas.

#### 8.4.10. Dos escuadras.

Es un procedimiento sencillo pero muy poco exacto, pues transforma los errores de planitud en una separación de los catetos de las escuadras que es necesario medir por medio de galgas.

#### 8.5. Medida de planitud.

En la medición de planitud de una mesa de fundición, se recomienda trazar, con un lápiz graso o en forma similar, una cuadrícula sobre la superficie a verificar, con sus dos diagonales, las ordenadas de cuyos vértices serán los puntos que se midan para determinar el error de la planitud; esta cuadrícula estará formada por tramos de longitud igual a la distancia entre los apoyos de la base auxiliar del nivel en número par en cada lado, aunque no necesariamente igual, ya que la superficie puede ser de forma rectangular en lugar de cuadrada, y dejando libre una banda a lo largo de todo el bloque de la misma, donde no se recomienda trabajar. En la figura 8.5 puede verse la cuadrícula correspondiente a una mesa de fundición cuadrada de 500 mm de lado que se va a verificar con nivel, con distancia entre los apoyos  $L=100$  mm.

Los vértices de la cuadrícula se designan por dos cifras, correspondientes a su renglón y su columna respectivamente, y así el vértice superior de la figura 8.5 será el punto (04), mientras que el inferior izquierdo será el punto (40).

Se eligen a continuación tres vértices de los cuatro que posee la cuadrícula, para establecer el llamado cuadro de referencia, y a estos tres vértices se les asigna la cota cero; el triángulo así formado es el que da el nombre genérico al presente método de medición. En el ejemplo que se va a desarrollar junto con la descripción teórica, se eligen como referencia los tres vértices (00), (04), (40).

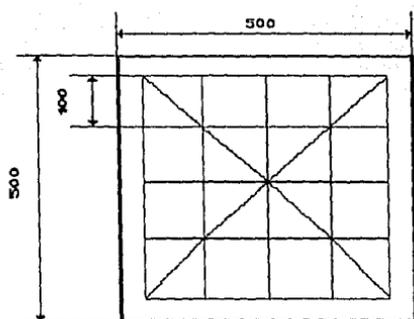


Figura 8.5. Cuadrícula de planitud.

Ahora es necesario establecer la cota, con respecto al plano de referencia, del centro punto (22). Para ello se coloca el nivel centrado sobre la regla rígida apoyada en los dos bloques patrón iguales, que se sitúan primeramente en los puntos (40) y (04) y después en los puntos (40) y (22), todos ellos pertenecientes a la diagonal del triángulo de referencia como puede verse en la figura 8.6.

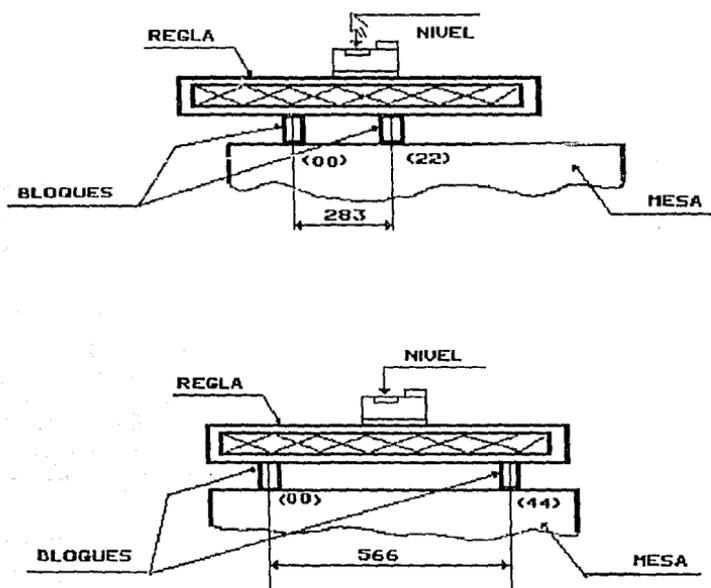


Figura 8.6. Medidas sobre la diagonal del triángulo de referencia.

Suponiendo que en el primer caso figura 8.6 se tiene una lectura de 0.02 con la burbuja desplazada hacia el punto (40), y en el segundo de 0.01 con la burbuja desplazada hacia el punto (22). Esto supone una disposición relativa de los tres puntos (40), (04) y (22) como se observa en la figura 8.7. Pero se sabe que los puntos (40) y (04) pertenecen al plano de referencia y por lo tanto tienen cota cero, es necesario girar toda la figura para, conservar las posiciones relativas, llegar a la disposición final indicada en la figura 8.7, con lo que la cota del punto central (22) viene a ser:

$$(22) \text{ girado} = +0.003 + 0.011/2 = +0.009 \text{ mm.}$$

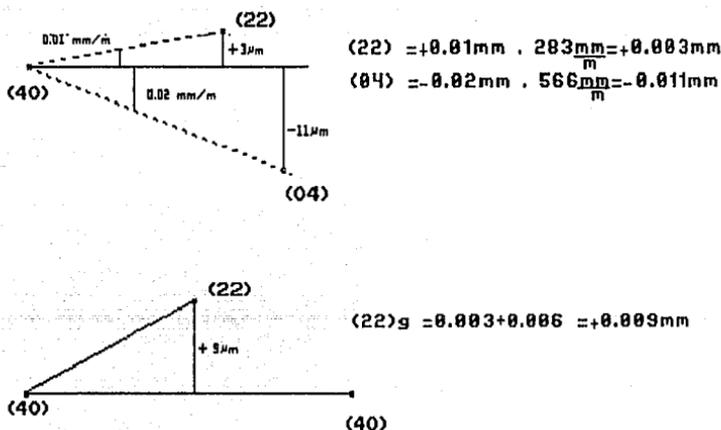


Figura 8.7. Cálculo de la posición del punto central.

Es conveniente establecer la cota con respecto al plano de referencia, del cuarto vértice punto (44). Para ello colocamos el nivel centrado sobre una regla rígida apoyada en dos bloques patrón iguales, que se sitúan una vez en los puntos (00) y (22) ver figura 8.8 y otra en los puntos (00) y (44) figura 8.8, todos ellos pertenecientes a la diagonal que no forma parte del triángulo de referencia:

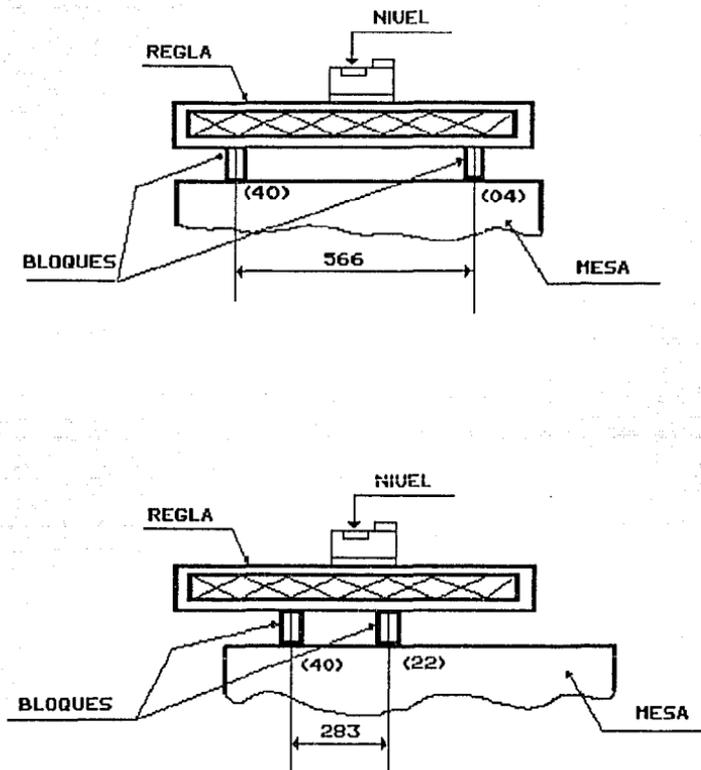
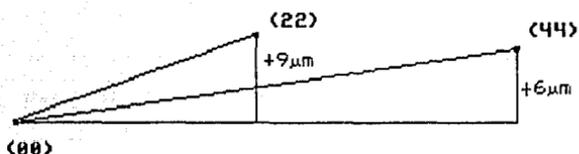
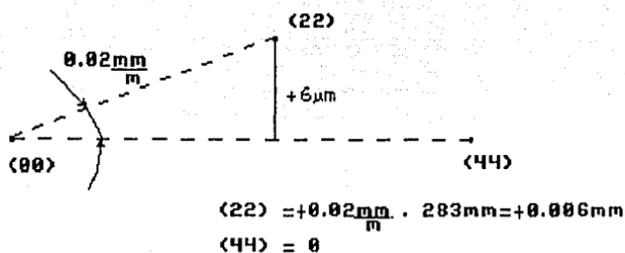


Figura 8.8. Medidas sobre la diagonal que no pertenecen al triángulo de referencia.

De la primera medida se deduce la posición relativa del punto central (22) respecto del vértice (00) y de la segunda la del cuarto vértice (44), también respecto de (00). Suponiendo que en la primera posición ha resultado una lectura de 0.02 con la burbuja desplazada hacia el punto (22), y en la segunda una lectura 0.00. Las cotas relativas de los puntos (22) y (44) resultan ser de la figura 8.8., será ahora necesario dar un giro a estas posiciones de forma que la cota final del punto (22) pase a ser +0.009 mm., según se ha determinado anteriormente, de donde resulta un valor para el punto (44) de +0.06 mm. figura 8.9.



$$(44)_g = 0 + 0.003 \cdot 2 = 0.006 \text{ mm}$$

Figura 8.9. Cálculo de la posición del cuarto vértice.

Con esto se han determinado las cotas de los cuatro vértices y en el centro de la cuadrícula, que servirán de puntos de referencia para la orientación de los sucesivos perfiles que se vayan obteniendo.

$$(00) = 0$$

$$(22) = +9 \mu\text{m}$$

$$(04) = 0$$

$$(44) = +6 \mu\text{m}$$

$$(40) = 0$$

Se obtienen a continuación los perfiles de rectitud, correspondientes a las líneas (00), (40) y (40), (44), de la figura 8.5 siguiendo las instrucciones indicadas. Por ejemplo los siguientes valores:

En la línea (00) (40) ha de darse un giro sobre (00), que lleve la cota (40) = -0.008 mm a su posición final (40) girado = 0.000.

$$(00)_{\text{girado}} = 0.000$$

$$(10)_{\text{girado}} = -0.006 + 0.008 \cdot 1/4 = -0.004$$

$$(20)_{\text{girado}} = +0.002 + 0.008 \cdot 2/4 = +0.006$$

$$(30)_{\text{girado}} = -0.007 + 0.008 \cdot 3/4 = -0.001$$

$$(40)_{\text{girado}} = -0.008 + 0.008 \cdot 4/4 = 0.000$$

En la línea (04) y (44), ha de darse un giro sobre (04), que lleve la cota (44)=+0.002 mm a su posición final (44)girado=+0.006 mm.

$$(04)\text{girado} = 0.000$$

$$(14)\text{girado} = +0.005 + (0.006 - 0.002) \cdot 1/4 = +0.006$$

$$(24)\text{girado} = +0.005 + (0.006 - 0.002) \cdot 2/4 = +0.007$$

$$(34)\text{girado} = +0.007 + (0.006 - 0.002) \cdot 3/4 = +0.010$$

$$(44)\text{girado} = +0.002 + (0.006 - 0.002) \cdot 4/4 = +0.006$$

Con esto las líneas estudiadas quedan en las posiciones finales que se observan en la figura 8.10. "Todos los giros y traslaciones de perfiles que se desarrollan pueden también realizarse gráficamente mediante papel milimétrico y papel transparente".

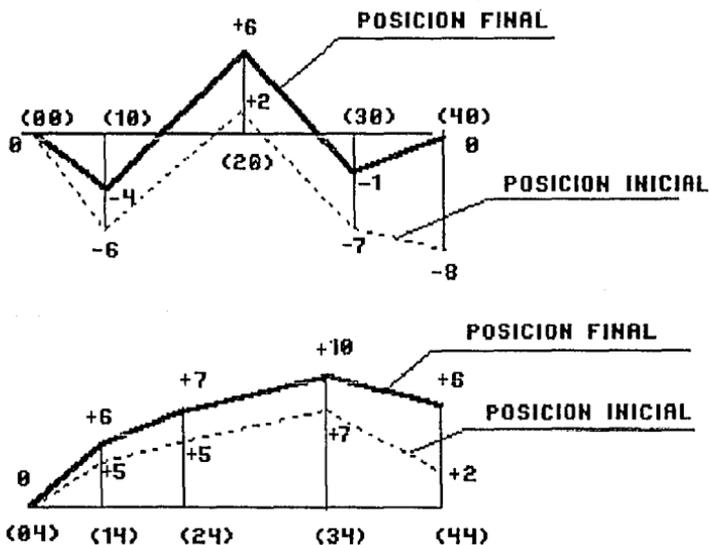


Figura 8.10. Perfiles de la líneas (00) (40) y (04) (44).

Por último, se obtienen los cinco perfiles de rectitud correspondientes a las líneas horizontales de la figura 8.5. Los extremos de cada una de estas líneas apoyan en puntos cuyas cotas finales se acaban de obtener (valores de la tabla 8.11), y por lo tanto, mediante una traslación y un giro,

pueden llevarse a sus posiciones definidas respecto al plano de referencia.

En las figuras se utilizaron las siguientes líneas, para los perfiles medido, trasladado y girado, como se indica:

Perfil medido                    - - - - -  
 Perfil trasladado               - - - - -  
 Perfil girado                    \_\_\_\_\_

Línea	Tramo	Sentido de la burbuja	Lectura (MM/M)	Perfil relativo de la línea (um)
(00) (04)	(00) (01) (01) (02) (02) (03) (03) (04)	(00) (04) (00) (04)	0.05 0.02 0.01 0.03	
(10) (14)	(10) (11) (11) (12) (12) (13) (13) (14)	(14) (14) (14) (14)	0.03 0.02 0.01 0.01	
(20) (24)	(20) (21) (21) (22) (22) (23) (23) (24)	(20) (24) (20) --	0.01 0.02 0.01 0.00	
(30) (34)	(30) (31) (31) (32) (32) (33) (33) (34)	(30) -- -- --	0.07 0.00 0.00 0.00	
(40) (44)	(40) (41) (41) (42) (42) (43) (43) (44)	(40) (44) (40) (44)	0.01 0.03 0.10 0.00	

Tabla 8.11. Perfiles de las líneas (00) (40) y (04) (44).

Cada uno de los perfiles relativos así obtenidos, se somete primeramente a una traslación que haga coincidir la cota de su extremo inicial con el valor definido que se acaba de obtener anteriormente para la misma. Después se realiza un

giro sobre este extremo, a fin de lograr que la cota del extremo final de la línea figura 8.12 recoge los pasos descritos, para cada uno de los cinco perfiles.

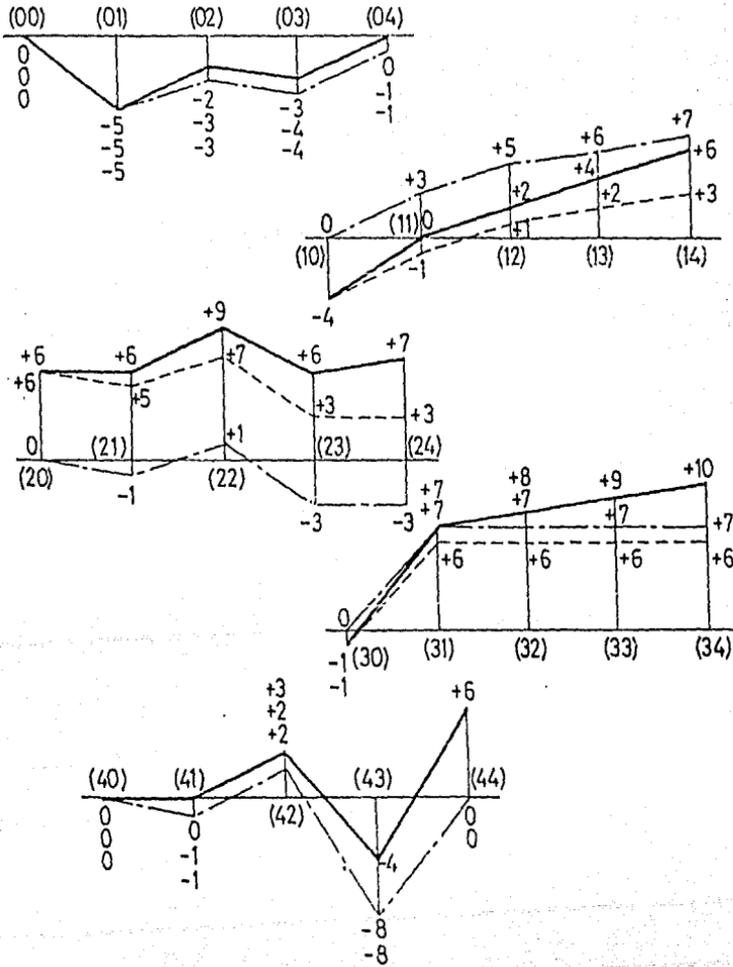


Figura 8.12. Perfiles de las líneas (00) (04) a (40) (44).

Con esto se ha completado la medición por puntos de la planitud de la mesa de fundición, obteniéndose una cota relativa al plano de referencia para cada punto vértice de la cuadrícula, excepto para el punto central (22) para el que el proceso de medida seguido proporciona dos valores de su cota, que en el ejercicio expuesto son coincidentes. En la figura 8.13 se reúnen las cotas obtenidas para todos los puntos de la cuadrícula.

	0	-5	-2	-3	0
-4	0	-2	+4	+6	
+6	+6	+3 +9	+6	+7	
-1	+7	+8	+9	+10	
0	0	+3	-4	+6	

Figura 8.13. Cotas resultantes para los vértices de la cuadrícula.

Como el error de planitud se toma la diferencia máxima de cotas entre todos los puntos de la cuadrícula; en el ejemplo desarrollado, las cota extremas corresponden a los puntos (34)=+0.010 mm y (01)=-0.005 mm, por lo que el error de planitud de la mesa de fundición resulta ser:

$$P \leq +0.010 - (-0.005) = 0.015 \text{ mm.}$$

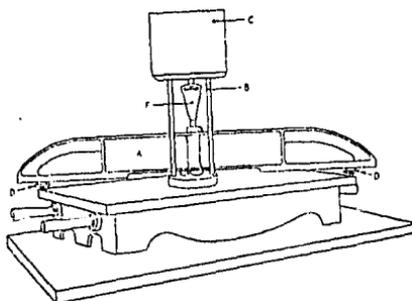
Además del método desarrollado para la medida de planitud, que establece un plano de referencia mediante tres vértices de la cuadrícula (método del triángulo), existen otros métodos para este tipo de verificación.

### 8.6. Pruebas de rigidez.

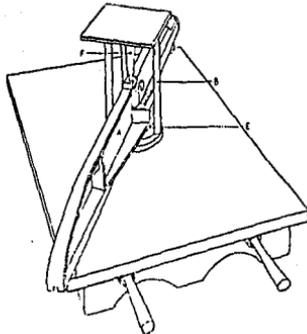
En la figura 8.14 se muestra un dispositivo que consiste en una regla A, apoyada en dos extremos D, colocados sobre los extremos de la diagonal de la mesa y sobre la que se coloca un comparador F. Sobre la plataforma superior descansa el peso empleado en la prueba que, se transmite a la superficie de trabajo de la mesa a través de las columnas B y la placa de apoyo, forman un conjunto independiente de la regla, con lo que es posible aplicar la carga en la zona que se desee de la superficie de trabajo.

Por medio del apoyo E es posible regular el desplazamiento del comparador para su puesta en cero y proporcionar a la regla una mejor estabilidad, pues está ligeramente desplazada de la línea definida por los apoyos D.

La carga aplicada será proporcional a la superficie de la mesa y tal que no provoque deformaciones superiores a  $0.5 T_t$  en el punto central, y se aplica sobre la mesa a través de la placa de apoyo cuyo diámetro será de 120 a 300 mm en función del tamaño de la mesa.



(a)



(b)

Figura 8.14. Dispositivos para la prueba de rigidez.

## **CAPITULO 9**

### **SUSTENTACION**

## SUSTENTACION.

### 9.1. Descripción general.

Las mesas de pequeñas dimensiones se soportan sobre un banco, pie o instrumento, mientras que las de grandes dimensiones lo hacen sobre unos apoyos dispuestos en un soporte especial.

La mesa debe sustentarse sobre el tipo de soportes o apoyos recomendados por el fabricante y norma francesa E11-101 colocadas en los lugares previstos. La colocación de los apoyos sobre la mesa se hace en los puntos indicados en el caso de mesas nervadas.

Las disposiciones de los apoyos son equivalentes en cuanto a estabilidad de la mesa, y determinan una sustentación isostática con la que la deformación por flexión y alabeo debidas al peso propio, son mínimos. Aparte de los puntos de apoyo las mesas tienen que contar con soportes de seguridad para prevenir el volteo de la mesa si se colocan cargas excesivamente descentradas. Estos soportes en condiciones normales, están simplemente en contacto con la mesa sin ejercer sobre ella ningún tipo de acción.

En ocasiones pueden precisarse también soportes de seguridad que impidan desplazamientos laterales de la mesa bajo el efecto de un eventual empuje lateral o de vibraciones.

Las mesas de grandes dimensiones (>1000 mm), son frecuentemente montadas sobre más de 3 puntos de apoyo. En este caso es necesario prever una regulación de los soportes para asegurar un apoyo correcto. Por medio de esta regulación de los distintos soportes se conseguirá reducir al mínimo la flecha consiguiendo un reparto uniforme de las acciones sobre los apoyos. Es preciso verificar la mesa tras su instalación, y posteriormente con una cierta periodicidad o tras cualquier incidente que pueda haber alterado el estado de cargas en los soportes.

En el caso de emplear más de tres soportes, es preciso ajustarlos convenientemente antes de la calibración de la mesa, y una vez colocada esta en su lugar habitual de trabajo, con objeto de que las cargas sobre cada soporte sean lo más parecidas posibles, con lo que se consigue reducir la deformación resultante a un valor mínimo. En estas condiciones pueden ser interesante la utilización de soportes especiales con los que sea posible determinar la carga que soportan. También es conveniente distribuir adecuadamente los soportes sobre la superficie de apoyo, especialmente bajo los puntos de carga.

En el caso de mesas de grandes dimensiones, su planitud puede ser apreciablemente mejorada con una adecuada disposición y

ajuste de sus soportes. Para ello se utilizan deportes de fulcro, neumáticos e hidráulicos.

Siempre que se empleen soportes ajustables, o en número mayor de tres, es preciso calibrar la mesa una vez montada en su lugar de trabajo. Solamente cuando se emplean soportes fijos (ajustables únicamente a efectos de nivelación) y en número de tres, es posible realizar la calibración en un lugar distinto del de trabajo (normalmente, en una sala de metrología), aunque es recomendable realizar una verificación o calibración una vez instalada definitivamente.

NUMERO DE SOPORTES RECOMENDADOS POR FABRICANTE ALEMAN DE  
MESA DE FUNDICION SEGUN TAMAÑO.

DIMENSIONES EN mm.	PLANO DE TOLERANCIA ( $\mu$ m) CALIDAD		NUMERO DE SOPORTES FIJOS	PESO EN Kg
	III	II		
1000X1000X350	80	40	4	700
1500X1000X350	100	50	4	1000
2000X1000X350	120	60	5	1350
2500X1000X350	140	70	6	1650
3000X1000X350	160	80	6	2000
3500X1000X350	180	90	6	2350
2000X1250X350	120	60	5	1650
2500X1250X350	140	70	6	2100
3000X1250X350	160	80	6	2500
3500X1250X350	180	90	6	2900
4000X1250X350	200	100	8	3300
4500X1250X350	220	110	8	3700
5000X1250X350	240	120	10	4150
2000X1500X350	120	60	5	2000
2500X1500X350	140	70	6	2500
3000X1500X350	160	80	6	3000
3500X1500X350	180	90	6	3500
4000X1500X350	200	100	8	4000
4500X1500X350	220	110	8	4450
5000X1500X350	240	120	10	4950
5500X1500X350	260	130	10	5450
6000X1500X350	280	140	12	5950
2000X1750X350	120	60	5	2350
2500X1750X350	140	70	6	2900
3000X1750X350	160	80	6	3500
3500X1750X350	180	90	6	4050
4000X1750X350	200	100	8	4650
4500X1750X350	220	110	8	5200
5000X1750X350	240	120	10	5800
5500X1750X350	260	130	10	6400

tabla 9.1.

Continuación de la tabla de la pagina anterior.

DIMENSIONES EN mm.	PLANO DE TOLERANCIA ( $\mu\text{m}$ ) CALIDADES		NUMERO DE SOPORTES FIJOS	PESO EN Kg
	III	II		
6000X1750X350	280	140	12	6950
2000X2000X350	120	60	5	2650
2500X2000X350	140	70	8	3300
3000X2000X350	160	80	8	4000
3500X2000X350	180	90	12	4650
4000X2000X350	200	100	12	5300
4500X2000X350	220	110	15	5950
5000X2000X350	240	120	15	6600
5500X2000X350	260	130	15	7300
6000X2000X350	280	140	18	7950
3000X2500X350	160	80	9	4950
3500X2500X350	180	90	12	5800
4000X2500X350	200	100	12	6600
5000X2500X350	210	110	15	7450
5000X2500X350	240	120	15	8250
5500X2500X350	260	130	15	9100
6000X2500X350	280	140	18	9900
7000X2500X350	320	160	21	11550
8000X2500X350	360	180	24	13200
3000X3000X350	160	60	9	5950
3500X3000X350	180	90	12	6950
4000X3000X350	200	100	12	7950
4500X3000X350	220	110	15	8950
5000X3000X350	240	120	15	9900
5500X3000X350	260	130	15	10950
6000X3000X350	280	140	18	11900
7000X3000X350	300	320	21	13900
8000X3000X350	360	180	24	15850

tabla 9.2.

### 9.2. Soportes antivibración.

Es preciso emplearlos cuando existe un nivel apreciable, de vibración en la zona de trabajo (producida por causas sísmicas, maquinaria, transporte, etc).

Se recomienda el empleo de tres antivibración en todas las mesas, número que puede aumentarse si el tamaño de la mesa o los pesos que van a tener que soportar lo aconsejan. Estos soportes pueden estar dotados de un mecanismo de control con el que sea posible realizar de manera cómoda y rápida

operaciones de nivelación una vez se hayan depositado cargas importantes sobre la mesa.

Estos soportes deben poseer características amortiguadoras tanto en la dirección vertical como en las horizontales. El amortiguamiento en cada dirección debe ser al menos de un 10 % del valor crítico, y no debe obtenerse por fricción entre superficies, sino que debe ser inherente al propio soporte.

Se recomienda emplear un sistema sustentador que posea una frecuencia natural menor de 3 Hz, que representa un valor aceptable para la mayoría de los casos, si bien con ciertos trabajos de precisión o cuando las vibraciones exteriores tienen una frecuencia natural del sistema sustentador, se requerirá de una mayor frecuencia natural del sustentador, para estar fuera del intervalo de interferencia.

Estos soportes antivibración no eliminan completamente la vibración exterior, pero la reducen en un grado apreciable que es función de la frecuencia de la vibración excitadora, y de la frecuencia natural del sistema mesa-elementos de sustentación, siendo tanto mayor cuanto menor sea esta última frecuencia natural.

### **9.3. Recomendaciones para el montaje de las mesas de planitud.**

Se recomienda limpiar los apoyos concienzudamente con brocha o con vació. El grupo de apoyos deben ser de idéntico largo. El ajuste normal del arreglo es un medio del intervalo de ajuste (intervalo de ajuste=10mm). La instalación se hace en un base de piedra. Después se levanta la mesa con grúa para instalarla sobre los apoyos. Comprobar si la mesa de planitud esta nivelada para alinear y ajustar los apoyos para que la mesa quede alrededor de 95mm de separación del banco.

Los apoyos son ensamblados en el banco en una base fresca de cemento mortero.

## **CAPITULO 10**

### **ACCESORIOS**

## ACCESORIOS (mesas metálicas).

### 10.1. Propios de la mesa.

Los más comunes son:

Agujeros roscados

Ranuras (normalmente en forma rectangular o en T).

Malla en V.

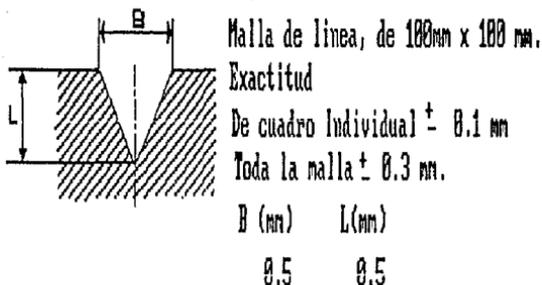


figura 10.1 Ranura en V.

Estos elementos, sirven para la fijación de piezas e instrumentos a la mesa. Su fabricación y utilización provoca distorsiones de la mesa, por lo que solamente se utilizan en mesas de calidades inferiores o medias, e incluso en estas mesas, se deben emplear con cuidado procurando que las cargas aplicadas sean las menores posibles.

Por esta razón, el momento máximo aplicable sobre tornillos roscados en agujeros de mesas de planitud se limita a los siguientes valores:

Rosca			Momento máximo
M6	X	1	10 N · m
M8	X	1	20 N · m
M10	X	1.25	27 N · m
M12	X	1.25	34 N · m
M16	X	1.5	41 N · m

tabla 10.1.

Para conseguir estos pares de apriete se utilizará una llave dinamométrica tarada con valores del momento iguales o inferiores a los indicados.

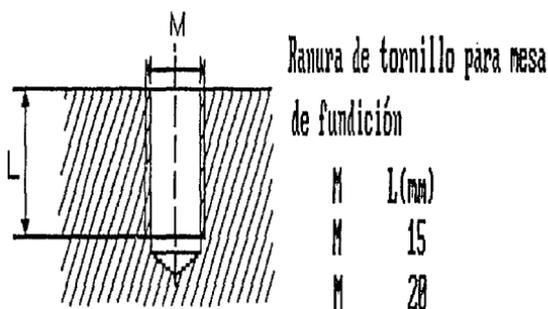


figura 10.2. Ranura de tornillo.

Según norma DIN 650 la ranura en T debe tener las siguientes dimensiones.

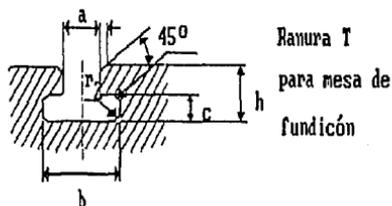


figura 10.3 Ranura en T.

DIMENSIONES DE LA RANURA T.

Dimensiones en mm.

a	b		c		h		n	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>
					máxima	mínima			
5	10	+1	3	+0.5	10	8	1	0.6	1
6	11		5		13	11			
8	14.5	+1.5	7	+1	18	15			
10	16.5		7		21	17	1	0.6	1.6
12	19.5	+1.5	8	+1	25	20			
14	23	+2	9	+2	28	23			
18	30	+2	12		36	30	1.6	0.6	0.25
22	37	+3	16	+2	45	38			
28	46	+4	20		56	48			
36	56	+4	25	+3	71	60	2.5	1	4
42	68		32	+4	85	74			
48	80	+5	36	+4	95	84	2.5	2	6
54	90		40		106	94			

tabla 10.2.

APLICACIONES DE MESAS DE PLANITUD PARA MEDICIONES DIMENSIONALES.

APLICACION	EQUIPO USADO CONJUNTAMENTE A LA MESA DE PLANITUD	COMENTARIOS
Plano de referencia para medición de paralelismo.	Indicador de cuadrante con soporte y bloques de soporte.	Soportando una de las caras de la pieza sobre la mesa de planitud directamente o usando bloques paralelos, se puede medir la distancia de la cara opuesta a la mesa Distancias uniformes a lo largo de la cara opuesta indica paralelismo.

tabla 10.3.

APLICACION	EQUIPO USADO CONJUNTAMENTE A LA MESA DE PLANITUD	COMENTARIOS
Plano de referencia para mediciones de longitud.	Indicador de cuadrante con soporte y bloques de calibración.	Mediciones comparativas de longitud se pueden realizar colocando la pieza sobre la mesa de planitud, una pila de bloques de calibración y comparador con su soporte. Método usado con frecuencia para piezas cuyo tamaño o formas impiden el uso de palpadores.
Plano basal para trazado	Medidor de alturas con rallador insertado en la cabeza ajustable.	El trazado para guiar operaciones subsiguientes de maquinado, generalmente es referido a líneas que se correlacionan al plano. La mesa con equipo auxiliar puede aumentar la adaptabilidad del proceso.
Plano de referencia para la medición de distancias lineales.	Medidor de alturas sea del tipo de medición directa o para transferencia de la medida de un calibrador maestro de alturas.	La distancia de formas, puntos sobresalientes o elementos superficiales de una pieza, se hace posicionando ésta sobre la mesa de planitud. Desde las caras de soporte se miden las distancias pertinentes con el medidor de alturas. Se repite después de girar 90° la pieza para completar las mediciones en coordenadas.

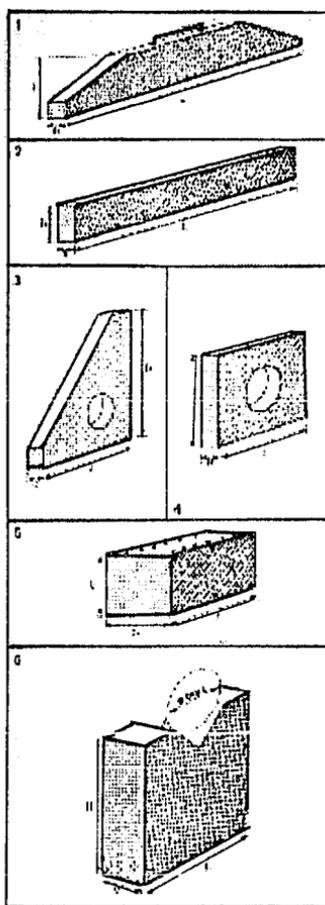
tabla 10.4. continuación de la tabla 10.3.

APLICACION	EQUIPO USADO CONJUNTAMENTE A LA MESA DE PLANITUD	COMENTARIOS
Plano de referencia para mediciones de ángulos.	Mesas de senos con bloques de calibración y medidor de alturas con su soportes.	Uso común de las mesa de planitud para mediciones de ángulos con la mesa de senos, cuando una parte cónica con ángulo nominalmente igual a la posición máxima de la mesa de senos forma un elemento superior paralelo a la superficie de la mesa de planitud. Las desviaciones se miden con el indicador soportado en la mesa de planitud.
Base estructural para instrumentos.	Elementos del instrumento funcionalmente interrelacionados.	Aplicación en la que la mesa de planitud no participa directamente en el proceso de medición. Pueden remplazar a bases de máquinas soportando sólidamente a elementos e instrumentos en una forma que asegura excelente estabilidad o interrelaciones críticas de posición.

tabla 10.5.

### 10.2. Ajenos a la mesa.

Existen una gran variedad de elementos asociados a una mesa de planitud para la realización de diversas medidas. Estos accesorios pueden construirse de acero, fundición o granito, al igual que las mesas. En la figura siguiente se representan algunos de estos accesorios.



11.1

figura 10.4.

Accesorios ajenos.

- 1.-regla de 1 cara (trapezoidal).
- 2.-regla de 2 caras.
- 3.-escuadrada triangular.
- 4.-escuadra cuadrada.
- 5.-cubo de control.
- 6.-uve.

## **CAPITULO 11**

## **CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo consistió en revisar los diferentes aspectos de diseño necesarios para fabricar mesas de planitud de fundición, por la gran utilidad que estas tienen en los talleres de fabricación, en los laboratorios de metrología, en máquinas de medición por tres coordenadas, etc.

La fabricación de estas mesas se encuentra normalizada. La norma más completa es la Alemana DIN 876 donde se encuentran normalizados los diferentes tamaños. Las formas de las nervaduras se dejan al juicio del diseñador, generalmente son de forma cuadrada pero pueden diseñarse en forma triangular, romboidal, etc., dependiendo principalmente de la facilidad que presente al momento de efectuar su fabricación, ya que un modelo muy complicado aumenta los costos considerablemente. Se deben tomar en cuenta los ángulos de salida, la contracción en la solidificación, la tolerancia de maquinado, la características de la fundición y de la arena, el material de que será fabricado el modelo, la temperatura de colado, etc. Aunado a esto también cabe recalcar que la experiencia del fundidor es de suma importancia.

La sustentación que tendrá la mesa en la solidificación tiene que ser bien planeada, de otra manera, debido al peso de la mesa (aproximadamente 250 Kg), esta se pandeara y no se podrá corregir esta deformación.

El utilizar fundición de hierro con grafito laminar proporciona muchas ventajas, entre las principales están: su bajo costo, la capacidad de absorber vibraciones, la facilidad de su maquinado, el contar con una amplia experiencia en este tipo de fundiciones (los métodos utilizados datan de hace muchos años), la materia prima que se utiliza es nacional, no requiere de infraestructura compleja para su fabricación, el maquinado se puede realizar prácticamente en cualquier taller mecánico que tenga las máquinas con dimensiones necesarias, con excepción del rasquetado, que debe ser realizado por un técnico altamente calificado. Este es un trabajo fino muy delicado y de mucha exactitud, de no realizarse correctamente, el maquinado se tendrá que realizar nuevamente, lo que representa mayores costos y una disminución del espesor del plano de trabajo.

El objetivo de comparar los resultados del análisis del (M.E.F.), no tiene como fin establecer cual de las dos mesas (la de nervaduras cuadradas o la de nervaduras triangulares) es mejor y determinar cual es la que debe fabricarse, sino caracterizar cada una de las ventajas y desventajas que ofrecen ambos modelos y de acuerdo a requerimientos del solicitante, escoger el más adecuado para llevar a cabo su fabricación.

Al analizar los resultados de las mesas sujetas únicamente a peso propio, se concluye que ambas están dentro de la tolerancia que establece la norma ( $4\mu\text{m}$ ).

La mesa con nervaduras triangulares teóricamente se deforma  $2.59\mu\text{m}$ , debido únicamente a su propio peso, mientras que la cuadrada se deforma  $3.129\mu\text{m}$  en las mismas condiciones. Pero los esfuerzos que experimenta la mesa triangular son de  $0.4155\text{ Kg/cm}^2$ , mientras que en la cuadrada son de  $0.4751\text{ Kg/cm}^2$ .

Es importante tener en cuenta que estos valores sólo son una buena aproximación de lo que se espera tener en una medición real, porque el (M.E.F.) solo proporciona soluciones aproximadas de las ecuaciones diferenciales que representan al modelo físico.

En la selección se tendrá que escoger entre tener una deformación grande y esfuerzos pequeños o una deformación pequeña y una concentración de esfuerzos grandes.

Cuando se realiza la verificación es de suma importancia que la mesa se encuentre en equilibrio térmico, ya que las deformaciones debidas a gradientes de temperatura pueden resultar muy grandes.

Cuando se aplicó el gradiente térmico, se consideró que la temperatura mayor se localizaba en la parte superior de la mesa y como los apoyos no permiten movimiento, esta se deforma en el centro y hacia arriba con un radio de curvatura. Se supuso que aplicando una carga puntual en sentido contrario, los efectos se contrarrestarían y las deformaciones obtenidas serían menores.

Al aplicar una carga puntual de  $50\text{ Kg}$  en el centro se observó que los efectos de la carga térmica prevalecen sobre la puntual y se tiene una compensación muy pequeña.

En todos los casos de carga, las que ocasionan el máximo esfuerzo son las cargas puntuales localizadas en las esquinas externas, con un valor de  $2.2205\text{ Kg/cm}^2$ .

Después de realizar el maquinado y el rasquetado de la mesa se debe hacer una verificación para determinar su calidad. Se describe el método del nivel de burbuja, porque es un método sencillo y rápido con el que se logra una buena exactitud, además de ser una opción más viable para talleres o laboratorios, porque el equipo que se utiliza es de bajo costo y fácil de utilizarse. Se debe tener en cuenta que no es el único método con que se cuenta, existen otros más complejos y costosos como el rayo laser, la verificación por interferometría, etc., que por su alto costo no se encuentran al alcance de los pequeños talleres.

## **CAPITULO 12**

## **BIBLIOGRAFIA**

## BIBLIOGRAFIA

Cook, Robert D., Malkus, David S., Plesha, Michael E. ,  
**Concepts and applications of finite element analysis.** ,  
Editorial John Wiley & Sons., U.S.A., 1989.

Gerling., **Alrededor de las máquinas y herramientas.**,  
Editorial. Reverté., Bilbao, España, 1964.

Hänchen, R., **Fundición de piezas de máquina.**, Editorial  
Urmo., España, 1975.

Hütte., **Manual del Ingeniero de taller.**, Tomo 1., Editorial  
Gustavo Gil., España, 1978.

Karlekar, B.V., y Desmond, R.M., **Transferencia de calor.**,  
Editorial Interamericana., México, 1984.

Keyser, Doyle., **Procesos y materiales de manufactura para  
Ingenieros.**, Editorial. Prentice Hall., Tercera edición.,  
México, D.F. 1988.

Le Breton., **Defectos de las piezas de fundición.**, Editorial  
Urmo., España, 1965.

Marks, y Baumeister., **Manual del Ingeniero Mecánico de  
Marks.**, Tomos I y II., Editorial. U.T.E.H.A., México, 1970.

Segerlind, L.J., **Applied finite element analysis.**, Editorial  
John Wiley & Sons, Inc., U.S.A., 1976.

Taylor, Howard F., **Fundición para Ingenieros.**, Editorial  
Continental., México, 1961.

Wayne, Moore., **Foundations of mechanical accuracy.**,  
Editorial The Moore special tool company., U.S.A., 1970.

### **Mesas y patrones de planitud.**

11 Consejos para la practica metroológica.  
Editorial. Asociación Española para el control de la  
calidad. Comité de metrología.  
España, 1983.

Norma BS 817.  
Surface plates.  
British Standard Specification.  
Inglaterra, 1988.

Norma BS 869.  
Toolmakers' flats and high precision surface plates.  
Specification  
Inglaterra, 1978.

Norma DIN 876.  
Surface plates.  
Cast iron surface plates (Requirements and testing).  
parte 2.  
Alemania, Mayo 1972.

Norma DIN 650.  
T-Nuten.  
Alemania, Junio 1966.

Norma Experimental E11-101.  
Instruments de mesure.  
Marbres de tracage et de controle.  
Francia Noviembre 1977.

Norma GGG-P-436c  
Plate, surface.  
Federal specification.  
E.U., 1977.

NISA II.  
User's Manual.  
(for PC, mini, supermini, mainframe & supercomputers).  
Versión 88.0.  
EMRC.  
Enero, 1988.

DISPLAY II.  
User's Manual.  
(for PC, mini, supermini, mainframe & supercomputers).  
Versión 88.0.  
EMRC.  
Enero, 1988.

NISA II.  
Verification problems manual.  
(for PC, mini, supermini, mainframe & supercomputers).  
Versión 88.0.  
EMRC.  
Enero, 1988.

NISA II  
Verification manual.  
Versión 88.7.  
Diciembre, 1988.

NISA II.  
User's Manual.  
(for PC, mini, supermini, mainframe & supercomputers).  
Versión 90.0.  
EMRC.  
Abril, 1990.

DISPLAY II.  
User's Manual.  
(for PC, mini, supermini, mainframe & supercomputers).  
Versión 90.0.  
EMRC.  
Abril, 1990.

NISA II.  
Verification problems manual.  
(for PC, mini, supermini, mainframe & supercomputers).  
Versión 90.0.  
EMRC.  
Abril, 1990.