

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DE INDENTACIÓN
DINÁMICA

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los bachilleres:

De Amicis C., Ana M.

Fuenmayor M., Javier H.

Para optar al Título

De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2007

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DE INDENTACIÓN
DINÁMICA

Tutor Académico: Prof. Alberto Pertuz.

Cotutor: Prof. Manuel Martínez.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los bachilleres:

De Amicis C., Ana M.

Fuenmayor M., Javier H.

Para optar al Título

De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2007

ACTA

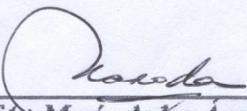
Los abajo firmantes, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Br. ANA DE AMICIS y el Br. JAVIER FUENMAYOR., intitulado:

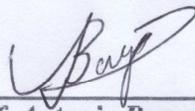
“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA DE INDENTACION DINAMICA”

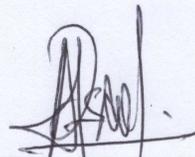
Consideran, que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Titulo de Ingenieros Mecánicos, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

En fe de lo cual se levanta la presente Acta, en la Ciudad de Caracas a los tres días del mes de Marzo del año dos mil siete.




Prof. (a) **María de los Angeles Rodríguez**
Jurado


Prof. **Antonio Barragán**
Jurado


Prof. **Alberto D. Pertuz**
Titular



Los suscritos, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres ANA DE AMICIS, Cédula de Identidad Nº V.-13.338.621 y JAVIER FUENMAYOR, Cédula de Identidad Nº V.-13.487.404, el cual lleva por título:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA DE
INDENTACION DINAMICA”**

Decidimos otorgarle:

MENCION HONORÍFICA

En reconocimiento al esfuerzo realizado y estímulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de la elaboración de este Trabajo Especial de Grado, el cual constituye un aporte importante.

En fe de lo cual, se levanta la presente Acta en la ciudad de Caracas, a los dos días del mes de marzo del año dos mil siete, dejando constancia que, de acuerdo a la normativa vigente, actuó como Coordinador del Jurado Examinador el Prof. Alberto Pertuz.

Prof. Antonio Barragán
Jurado

Prof. María de los Angeles Rodríguez
Jurado

Prof. Alberto Pertuz
Tutor-Coordinador



Ana. M. De Amicis C. y Javier. H. Fuenmayor M.
**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DE INDENTACIÓN
DINÁMICA.**

Tutor Académico: Prof. Alberto Pertuz.
Tesis. Caracas, U. C. V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
Palabras clave: Diseño, indentación dinámica, máquina de fatiga.

Resumen: La existencia de ensayos superficiales de tipo estático está muy bien definida y desarrollada, a diferencia de ensayos superficiales de tipo dinámico, fenómeno que se supone clave en el ejercicio del diseño dentro del campo ingenieril en general. Este tipo de ensayo es escaso, por no decir inexistente, por lo que no existen estudios previos. Ante esta clara necesidad existe la carencia de un equipo capacitado para realizar dicho ensayo. Por tal motivo, se desarrolló un proyecto para la construcción de una máquina de indentación dinámica que permita realizar un ensayo de fatiga superficial por indentación. Para la realización de dicha máquina se hace necesario el desarrollo de una metodología que permita obtener el diseño más óptimo, de modo que garantice una cantidad de parámetros necesarios, como la funcionabilidad, construcción y seguridad, entre otras. Para la construcción se hizo necesario realizar los cálculos de los componentes que lo conforman, evaluando en cada uno de los casos los esfuerzos para la condición más desfavorable, en cada una de las funciones a las que están diseñados. Con estas consideraciones se realizó el dimensionamiento de las piezas tomando en cuenta su funcionalidad, fácil manejo y construcción para poder obtener un resultado satisfactorio para las necesidades. Luego se determinaron los requerimientos de materiales y equipos a partir de las condiciones de funcionamiento y disponibilidad del mercado, siendo esta última muy representativa para obtener el resultado final en un tiempo razonable para la construcción. En el caso de los materiales se analizaron las cargas a las que iban a estar sometidos y luego se investigó en los principales proveedores y se eligieron los más aproximados a los requerimientos, siempre en la opción superior a la requerida para obtener resultados con un buen factor de seguridad. Cuando se analizó la parte de equipos como el motor eléctrico, se calculó la potencia requerida para la carga máxima a aplicar por el equipo que es de 0.0315 HP, a lo que se eligió el motor de $\frac{1}{2}$ HP por ser el más próximo a la necesidad.

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

A nuestros padres: Paquita y Rosalba, por el apoyo brindado.

A Adri y Carlos: por estar siempre...al primate (Domingo)... a Geffrey Gondar.

A la tía María, a la familia Federico y Yuly Moncada, por su apoyo incondicional.

Queremos expresar un agradecimiento especial al C.D.C.H de la Universidad Central de Venezuela, por su apoyo financiero a través de los proyectos: individual # P1-08-00-5668-2004 y de grupo # PG-08-00-5773-2004.

A la UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA.

A nuestro tutor Prof. Alberto Pertuz.

A la Prof. Maricely, por siempre tener una respuesta positiva.

Al prof. Berrios, prof. Borges, prof. Joaquín De Abreu, prof. Barillas y al prof. Perera (le dejo encargado el lobby).

Al sr. Franco y al sr. Raúl, por su GRAN COLABORACION para hacer posible la elaboración de este proyecto.

A: Sofía Hiller, Carolina Lucero (bruja), Amalia Fantone (Amelie) y Elena Rumisck.

A: Javier Charallave, Cabeza de perro, el gordo Germán, a los Eduardo (cabeza de motor y barriga de pájaro), Manolo (Rolando Rodríguez), Wilfredo Marín, a Darío Montilla, Bernardo Naviera, Jesús Sánchez, Amigote (Jesús Vera), Luis Eduardo Pavón, Fran Bucarelo, Erwin Felce, Dennis y Francesco, El Portu Angel, Daniel Paz (el rosca), Daniel Páez, Omar, Rathier, Chino (David), Estebán, Fran y Alcy... POR SUPUESTO NO PODIAN FALTAR...GRACIAS

Y a todas aquellas personas que de alguna u otra forma colaboraron con nuestra formación y desarrollo...Gracias...

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Índice de ilustraciones	iii
Abreviaturas y Símbolos	iv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	
1.1. Fatiga	4
1.2. Origen de la falla por fatiga	4
1.3. Evolución de la falla	7
1.4. Dureza	10
1.4.1. Principio	11
1.4.2. Ensayos de dureza por penetración (indentación)	12
1.4.2.1. Ensayo Brinell (indentador esférico)	12
1.4.2.2. Ensayo Rockwell (indentador cónico)	13
1.4.2.3. Ensayo Vickers (indentador piramidal)	14
1.4.2.4. Ensayo Knoop (indentador piramidal)	16
1.5. Antecedentes	18
1.5.1. Fatiga por indentación en vidrios	19
1.5.2. Máquina de ensayo de fatiga por choque repetido	21
1.6. Diagrama S-N	22
1.7. Curva Wohler	24
1.8. Factores que afectan la resistencia a la fatiga	26
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DEL DISEÑO	
2.1. Metodología del diseño	29
2.2. Definición del problema	29
2.3. Generación de soluciones (tormenta de ideas)	30
2.3.1. Propuesta N°1	31
2.3.2. Propuesta N°2	31
2.3.3. Propuesta N°3	32
2.3.4. Propuesta N°4	33
2.3.5. Propuesta N°5	34
2.3.6. Propuesta N°6	34
2.3.7. Propuesta N°7	35
2.3.8. Propuesta N°8	36
2.3.9. Propuesta N°9	36
2.3.10. Propuesta N°10	38
2.4. Evaluación y selección	38
2.4.1. Matriz morfológica	39
2.4.2. Selección de una propuesta	43
2.5. Mejoramiento del diseño	43
2.6. Construcción y especificaciones	43

CAPITULO III: DESARROLLO DE LA MÁQUINA DE INDENTACIÓN DINÁMICA

3.1. Desarrollo de la máquina de indentación dinámica	44
3.2. Cálculos de los componentes y sistemas que conforman la máquina	45
3.2.1. Cálculo del eje disco-motor	46
3.2.2. Cálculo de la biela	48
3.2.3. Cálculo del eje compresor del resorte	50
3.2.4. Cálculo del tornillo de la rolinera	52
3.2.5. Cálculo del resorte	52
3.2.6. Selección del motor	53
3.2.7. Cálculo y selección de los rodamientos empleados	55
3.3. Cinemática de la máquina de indentación dinámica	58
CAPITULO IV: CONTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE INDENTACIÓN DINÁMICA	
4.1. Construcción de la máquina de indentación dinámica	60
4.2. Selección de los materiales	61
4.3. Construcción de los elementos	64
4.4. Construcción acople del motor	67
4.5. Construcción del soporte	67
4.6. Construcción del sistema motor-variador	68
4.7. Calibración de equipo	69
CAPITULO V: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	
5.1. Procedimiento experimental	70
CAPITULO VI: MANUAL DE OPERACIONES	
6.1. Descripción	71
6.2. Descripción detallada	71
6.2.1. Mecanismo de accionamiento de carga	71
6.3. Instalación del equipo	72
6.3.1. Dimensiones	72
6.3.2. Peso	72
6.3.3. Montaje	72
6.3.4. Fuente de poder	72
6.4. Montaje de la probeta	72
6.5. Puesta a punto para activación	73
6.6. Activación de la máquina	74
6.7. Diseño de la probeta	75
CAPITULO VII: RECOMENDACIONES	
7.1. Recomendaciones	77
CONCLUSIONES	78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
ANEXOS	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Figura 1.1. Zonas de falla de fatiga: (a) sollicitación variable suave (b) sollicitación variable interna	6
Figura 1.2. Rotura de perno de biela (a) perfil del perno (b) sección del perno	7
Figura 1.3. Roturas por fatiga en ejes bajo efecto predominantemente torsional	7
Figura 1.4. Evolución de la falla	8
Figura 1.5. Esquema de la indentación Brinell. (a) Etapa de aplicación de carga, (b) Huella residual	13
Figura 1.6. Esquema de la indentación Rockwell C	14
Figura 1.7. Esquema de la indentación Vickers	16
Figura 1.8. Esquema del indentador Knoop	17
Figura 1.9. Tipos de penetradores	18
Figura 1.10. Fatiga por indentación de vidrios	20
Figura 1.11. Máquina Amsler	22
Figura 1.12. Diagrama S – N	23
Figura 1.13. Curva de Wohler	25
Figura 1.14. Distribuciones de vida en fatiga	25
Figura 1.15. Diagrama de Goddman modificado	27
Figura 3.1. Máquina de indentación dinámica	45
Figura 3.2. Diagrama del eje disco-motor	46
Figura 3.3. Diagrama de la biela	48
Figura 3.4. Diagrama del eje compresor del resorte	50
Figura 3.5. Resorte a compresión con caras planas	52
Figura 3.6. Biela-manivela	54
Figura 3.7. Motor eléctrico trifásico	54
Figura 3.8. Rodamiento tipo 6000.2ZR	55
Figura 3.9. Rodamiento tipo 624-2z	56
Figura 3.10. Sistema biela-manivela	59
Figura 6.1. Montaje de la probeta	73
Figura 6.2. Vista lateral máquina de indentación dinámica	74
Figura 6.3. Display del variador de frecuencia	75
Figura 6.4. Probeta sugerida.	75

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

S	Área Superficial.
P	carga aplicada.
ε	Deformación.
H	Dureza.
d	Diámetro.
HB	Dureza Brinell.
HR	Dureza Rockwell.
HV	Dureza Vickers
HK	Dureza Knoop.
σ	Esfuerzo.
F	Fuerza.
ψ	Factor de seguridad.
τ	Fuerza de corte.
HP	Horse power.
Hz	Hertz (unidad de frecuencia).
kg	Kilogramo.
m	Metro.
Mt	Momento torsor.
mm	Milímetro.
M	Momento.
N	Newton.
h	Profundidad.
Sut	Resistencia última a la tracción.
r	Radio.
rpm	Revoluciones por minuto.
A	Superficie representativa de la huella.
V	Voltaje.

σ_y	Esfuerzo en el eje Y.
σ_m	Esfuerzo Medio.
σ_a	Esfuerzo Alternante.
S _y	Resistencia a la Fluencia.
S _e	Resistencia a la Fatiga.
I _p	Momento Polar de Inercia.
Y	Distancia Mas Corta a la Fibra de Estudio.
y	Deflexión.
l	Longitud Elemento i.
τ_{xy}	Esfuerzo Cortante en el plano XY.
P _{cr}	Carga Crítica.
E	Modulo de Elasticidad.
AISI	Asociación Internacional Americana de Ingeniería .
SAE	Asociación Automotriz de Ingeniería.
DIN	Normas Internacionales Alemanas.

INTRODUCCIÓN

En el estudio de los materiales en servicio, como componentes de órganos de máquinas o estructuras, debe tenerse en cuenta que las sollicitaciones predominantes a que generalmente están sometidos no resultan estáticas ni cuasi estáticas, muy por lo contrario en la mayoría de los casos se encuentran afectados a cambios de tensiones, que se repiten sistemáticamente y producen la rotura del material para valores de la misma considerablemente menores que las calculadas en ensayos estáticos.

Este tipo de rotura que necesariamente se produce en el tiempo, se denomina de *fatiga* aunque es común identificarla como *roturas por tensiones repetidas*, tensiones que pueden actuar individualmente o combinadas.

Se ha determinado que en piezas sometidas a trabajos livianos, se presentan fallas después de algún tiempo no previsto, comprobando que éstas fueron sometidas a excesos de carga, lo que implicaría que se ha superado la dureza del material o su límite de fluencia. Dicha falla es atribuida al uso repetido y constante de estas piezas, sin poder predecir con exactitud este tiempo de vida, por uso constante. “El 90% de los fallas por fatiga se originan en la superficie”

A través de los ensayos de dureza se puede conocer cual es la resistencia de un material causada por su deformación plástica, lo que implicaría una falla en el material, pero no se puede predecir en cuantos ciclos va a fallar el material si dichas cargas no producen una deformación plástica sino elástica.

El ensayo de dureza en un ensayo de tipo estático y esta muy bien definido, pero igualmente sería interesante estudiar cual es el comportamiento de los materiales ante un ensayo de dureza de tipo dinámico. Para poder estudiar el comportamiento de los materiales ante un ensayo de este tipo, es necesario realizar un equipo.

En este Trabajo Especial de Grado se realizará la máquina para ensayos de indentación dinámica (inédita), a través del cual se puede determinar el número de ciclos a los cuales el material iniciará una grieta, esto a partir de múltiples deformaciones elásticas consecutivas; logrando calcular así la vida útil de piezas sometidas a trabajos livianos pero repetitivos y prolongados.

Como objetivos de esta investigación se ha propuesto lo siguiente:

Objetivo general

Diseñar y construir una máquina de ensayo de indentación dinámica.

Objetivos específicos

- Estudio de la tecnología existente para el desarrollo de una máquina para ensayos de indentación dinámica.
- Determinar las especificaciones técnicas de una máquina para ensayos de indentación dinámica.
- Aplicar la metodología del diseño en el proceso, utilizando técnicas como la tormenta de ideas, analogías, identificación de los usuarios y análisis de los parámetros ergonómicos. Para obtener la mejor solución
- Seleccionar los materiales adecuados para la construcción de una máquina para ensayos de indentación dinámica.
- Elaboración de los planos de la máquina.
- Construcción de una máquina para ensayos de indentación dinámica.
- Elaboración de un manual de operación.

Alcances

Tomando en cuenta los recursos disponibles, como: académicos, financieros y de tiempo; los alcances de este trabajo serán:

- Estudio de los aspectos ergonómicos y tecnológicos del proceso de fabricación, para determinar las especificaciones de la máquina a diseñar.
- Determinar la solución más favorable en base a las especificaciones establecidas.
- Determinar los materiales y equipos adecuados según las condiciones de trabajo.
- Elaboración de los planos.
- Construir la máquina para ensayos de indentación dinámica.
- Elaboración de un manual de operación.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Fatiga

Fatiga: es la disminución de la resistencia mecánica de los materiales al someterlos a esfuerzos repetidos; en general, al deterioro gradual de un material que está sujeto a cargas repetidas.

Las Normas ASTM (American Society of Testing and Materials) definen a la fatiga como: “Término general usado para describir el comportamiento de materiales sometidos a ciclos repetidos de tensión o deformación que ocasiona un deterioro del material que ocasiona una fractura progresiva”.

1.2. Origen de la falla por fatiga

Para que la rotura o falla por fatiga se inicie en un punto, es preciso admitir que los esfuerzos locales sobrepasan la resistencia de cohesión del metal (probeta), bien sea a consecuencia de tensiones internas que se superponen a los esfuerzos aplicados, o bien, a causa de efectos internos o externos que crean puntas de tensión.

Un material sometido a tensiones repetidas o fluctuantes fallará a una tensión mucho más baja que la necesaria para producir la fractura bajo carga constante, es decir, la aplicación repetida de una tensión ocasiona el deterioro progresivo de un material, siendo que la misma tensión aplicada estáticamente no tiene ningún efecto permanente. Este deterioro se manifiesta a través de la formación de fisuras en el material, que eventualmente pueden llevar a la rotura. Cabe recalcar que la fatiga ocurre bajo toda clase de cargas y tensiones tanto altas como bajas; pero este fenómeno sólo afecta a las piezas cuando están sometidas a sollicitaciones repetidas de una cierta amplitud. El 90% de las fallas por fatiga se originan en la superficie.

El trayecto de la fisura se relaciona en particular con las líneas de menos resistencia del metal y sigue las discontinuidades provocadas por las entallas, estrías, taladros y, en escala microscópica, las inclusiones.

A medida que se aplican esfuerzos alternados, se observa también la formación de bandas de deslizamiento en los cristales, con mucha rapidez al comienzo y más lentamente a continuación. Llega un momento en que ya no se producen nuevos planos de deslizamiento, alcanzando el metal de esta forma un estado estable.

La modificación comienza desde la iniciación de la aplicación de los esfuerzos. Se traduce por deslizamientos plásticos locales más o menos extensos, actuando sobre la flecha y temperatura, y visibles sobre los ciclos de deformación que se ensanchan progresivamente.

Esto ocurre durante todo el primer período, en el cual el metal se adapta a la fatiga. En este período el metal ve aumentado su potencial de resistencia y adquiere la capacidad de resistir esfuerzos de fatiga más elevados mientras el ciclo tiende hacia una forma estable.

Pero si la amplitud es demasiado fuerte o si el esfuerzo es demasiado prolongado, se excede la facultad de deslizamiento plástico y se produce la rotura por descohesión: es el comienzo de la fisuración, en este momento la fisura excede las dimensiones de los defectos internos del metal. A partir de este momento, la fisura se desarrolla cada vez más hasta la rotura.

A medida que el área sometida a esfuerzo disminuye de tamaño, la magnitud del esfuerzo se incrementa, hasta que al fin, el área restante falla de manera repentina. Por lo tanto, una falla por fatiga se caracteriza por dos tipos: el primero se debe al desarrollo progresivo de la grieta, en tanto que el segundo a causa de la fractura repentina. La zona de fractura repentina tiene una apariencia muy similar a la fractura de un material frágil, tal como una fundición de hierro que ha fallado por tensión.

El aspecto que las piezas rotas por fatiga presentan en su superficie son dos zonas características, como se observa en la figura 1.1, las cuales son:

- Zona de rotura por fatiga neta (sección 1), donde puede apreciarse un granulado liso y fino.
- Zona de rotura súbita (sección 2), es aquella parte de la sección resistente original que por ser menor que la sección necesaria a la carga nominal se rompe abruptamente, dejando una superficie de grano gruesa y deforme con un cierto brillo en los aceros.

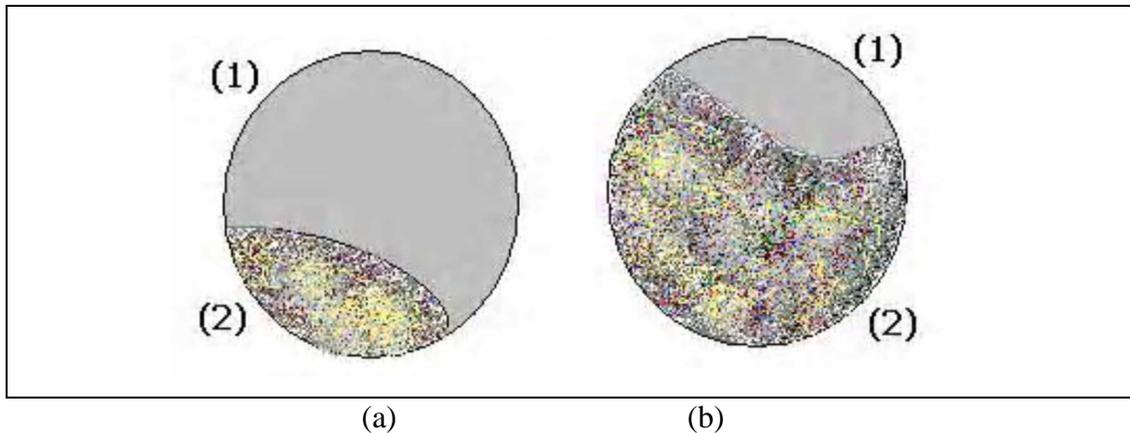


Figura 1.1: Zonas de falla de fatiga: (a) sollicitación variable suave (b) sollicitación variable interna

Sin embargo la sección (2) puede presentar dos sub-zonas, una característica y apariencia superficial gruesa en comparación con la zona (1), luego la zona de falla final puede presentar un aspecto que da la idea de una fractura frágil o bien presentar un aspecto de ligero deslizamiento fibroso que sugiere una rotura dúctil.

En la figura 1.2, se evidencia la zona de rápido deslizamiento, entendiéndose que la falla evoluciona en el sentido de la flecha en tres secuencias: la primera con el típico aspecto grano cristalográfico fino, la segunda con aspecto más grueso y la final con patrones de deslizamiento. En la figura 1.3 se muestran algunos patrones de rotura por fatiga en piezas sometidas a la acción de esfuerzos predominantemente torsionales.

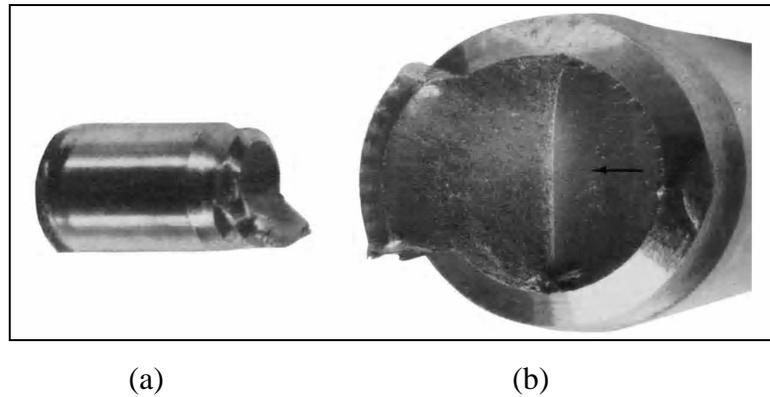


Figura 1.2: Rotura de perno de biela (a) perfil del perno (b) sección del perno

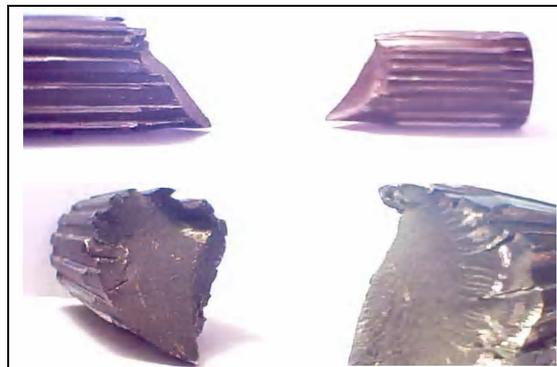


Figura 1.3: Roturas por fatiga en ejes bajo efecto predominantemente torsional

1.3. Evolución de la falla

El proceso de evolución de la falla se presenta en tres etapas denominadas: nucleación (a), propagación o crecimiento de la fisura (b y c) y rotura (d).

Nucleación (a: origen de la fisura o grieta): se produce en los metales cuando el nivel de tensión aplicada es menor que el límite elástico estático. Aparece una deformación masiva generalizada, hasta que el metal endurece lo suficiente como para resistir la tensión aplicada (acritud total) en un punto determinado denominado Punto de

Iniciación, que suele estar situado en zonas de concentración de tensiones como ser entallas, cantos vivos, rayas superficiales o bien en inclusiones y poros.

Propagación o crecimiento de la fisura (b y c): abarca la mayor parte de la duración del proceso fatiga y se extiende desde el momento en que se produjo el endurecimiento por deformación generalizada (acritud total) hasta la formación de una grieta visible.

Rotura (d): es la propagación de la grieta hasta que es lo suficientemente grande como para producir la rotura.

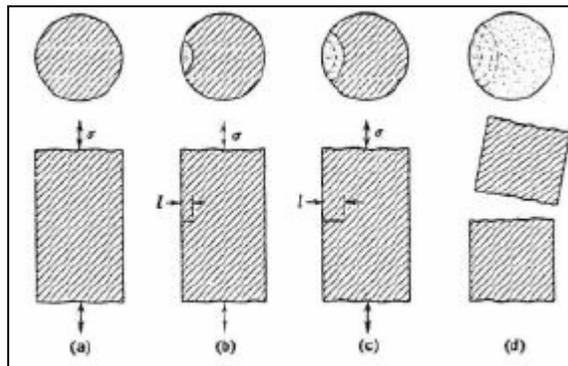


Figura 1.4: Evolución de la falla

Condiciones básicas para la aparición de la falla por fatiga:

- Valor elevado de tensión (σ) o deformación (ϵ) (este sólo válido si $\sigma = E\epsilon$);
- Fluctuación en el valor de la tensión aplicada, y;
- Mayor o menor número de ciclos de aplicación de carga o deformación.

Las circunstancias que influyen en la rotura por fatiga de un material metálico son:

- Estado de la superficie: el estado de esta tiene gran importancia sobre la rotura por fatiga.
- Variaciones de sección: el límite de fatiga se reduce por los cambios bruscos de sección no acordados con radios amplios, entalladuras de cualquier otra clase.

- Temperatura: en casi todos los materiales metálicos el aumento de temperatura por encima de cierto valor, disminuye el límite de fatiga.
- Tratamientos térmicos: las temperaturas internas provocadas por tratamientos térmicos, crean localización de esfuerzos que pueden originar fisuras.
- Homogeneidad de la estructura cristalina: cuando la estructura no es homogénea puede suceder que los cristales más pequeñas, se acuñen entre las más grandes, originando fisuras.
- Corrosión: cuando la corrosión existe no tiene tanto problema., pero si va actuando, cada punto de corrosión se convierte como si fuera una entalle rebajando notablemente el límite de fatiga.

La superficie de la fractura tiene dos zonas características:

a) Zona Lisa: aparece debido al roce por la propagación de la grieta a través de la sección. Esta propagación se indica con una serie de marcas anulares (llamadas líneas de parada o de reposo, similares a las marcas que dejan las olas sobre la playa), que se generan a partir del Punto de Nucleación (punto de concentración de tensiones). A su vez, podemos distinguir:

- Marcas de Playa: se forman en el frente de la fisura al producirse un reposo en el funcionamiento de la pieza. Consecuentemente no aparecerán en el caso de probetas, que generalmente se ensayan sin interrupción.
- Líneas Radiales: a veces las fisuras que se generan en la superficie progresan según frentes a niveles levemente escalonados; en un momento dado de su desarrollo, sin embargo, estas líneas radiales quedan como huellas de las diferencias de nivel iniciales.

b) Zona Rugosa: aparece al romper la pieza por disminución de la sección efectiva sana ante el mismo valor de carga actuante. La rotura final, contrariamente a la zona con marcas de playa que es lisa y suave, presenta una superficie fibrosa y de relieve muy accidentado. Se trata de la zona remanente sana, demasiado pequeña para aguantar un ciclo más de sollicitación, que termina rompiéndose frágilmente.

1.4. Dureza

La dureza se define como la resistencia mecánica que un material opone a la penetración, por un cuerpo más duro que dicho material, bajo la acción de una carga dada. La elección del indentador, se hace de manera que su deformación con relación a la del material a probar sea insignificante. El contacto entre estos dos cuerpos da como resultado una modificación superficial del material que se somete a prueba.

Dicha modificación no sólo depende de las características intrínsecas del material, sino también de la forma y las condiciones de aplicación del indentador. De esto se infiere, que la dureza es en realidad una propiedad compleja que no se puede relacionar directamente con otras propiedades mecánicas. Sin embargo, el valor de dureza obtenida mediante el ensayo de indentación, es una información cuantificada obtenida por normas precisas. Así, aplicar la norma, permite comparar materiales o determinar el efecto de un tratamiento térmico o mecánico. Además, la zona superficial del material no se ve afectada pues dicha prueba o ensayo es considerado como no destructivo.

Generalmente, las técnicas de medida se podrían clasificar en cuatro categorías según el modo de aplicación del indentador. Entre ellas se tiene:

La Dureza Por Ralladura: esta es la resistencia que opone un material a ser rayado. Este tipo de prueba dio lugar a la primera escala de dureza. Para la prueba de ralladura o “scratch test”, se utiliza una punta de diamante que se coloca en contacto con el material y luego se desplaza sobre la superficie, es decir, pasa de una carga constante a una carga variable, generalmente de manera continua. En este tipo de prueba, la resistencia a la ralladura se cuantifica por la geometría de la ralladura generada por el contacto o por las singularidades de la curva de carga – desplazamiento.

Dureza Por Rebote: esta medida se caracteriza por la capacidad del material a restituir la energía recibida por el impacto de una esfera o bola. Estas pruebas se utilizan esencialmente en materiales polimerados.

Dureza Por Penetración: esta es la resistencia que opone un material a la penetración de otro cuerpo de mayor dureza. Estos tipos de pruebas son las más numerosas y las más extendidas. Se diferencian por la forma geométrica del indentador. La dureza se calcula por la relación entre fuerza aplicada y la superficie representativa de la zona indentada.

Entre los diferentes tipos de ensayos por penetración, se tiene:

- Dureza Brinell.
- Dureza Rockwell.
- Dureza Vickers.
- Dureza Knoop.
- Dureza Berkovich.

Las pruebas por penetración, casi siempre llamadas “pruebas de indentación” permiten obtener, además de la dureza, información con respecto a las propiedades mecánicas del material como, por ejemplo, la tenacidad.

A continuación, se detallaran el principio y las características de las pruebas de indentación.

1.4.1. Principio

El principio de la prueba de indentación consiste en aplicar un indentador de forma conocida (pelota, cono o pirámide) a la superficie del material que se somete a prueba. Bajo la acción de la carga de indentación, el indentador se hunde dentro del material produciendo una deformación elástica y plástica dentro de la zona de contacto. Al retirar el indentador, queda huella residual persistente en el material.

Mientras mayor sea la carga de indentación, mayor será la huella residual. La dureza se calcula a partir de la relación entre la carga aplicada (P) y una superficie representativa de la huella (A). La relación general se escribe:

$$H = \frac{P}{A} \quad (1.1)$$

Según la naturaleza de la prueba, el área que se considera será el área real de indentación o la proyección de la huella impresa.

La aplicación de la carga de indentación puede ser discreta o continua. En el primer caso, la huella residual se observará después de retirar el indentador con ayuda de un microscopio óptico. Una regla graduada permite medir las diferentes longitudes características de la impresión o huella sobre el material. Para la indentación continua, la carga será aplicada progresivamente, midiendo en tiempo real, el desplazamiento de la punta del indentador en función de la carga. El cálculo de la dureza se halla de la relación entre la carga máxima y la profundidad correspondiente a esta carga.

1.4.2. Ensayos de dureza por penetración (indentación)

1.4.2.1. Ensayo Brinell (indentador esférico)

El objeto penetrante es una esfera de acero templado, de carburo de tungsteno o de diamante, de diámetro D . La prueba consiste en indentar el material con la esfera bajo la acción de una carga P , sobre la superficie (Figura 1.5). La carga se aplicará durante unos cuantos segundos. Después de retirar el indentador, se mide el diámetro de la huella con la ayuda de un microscopio.

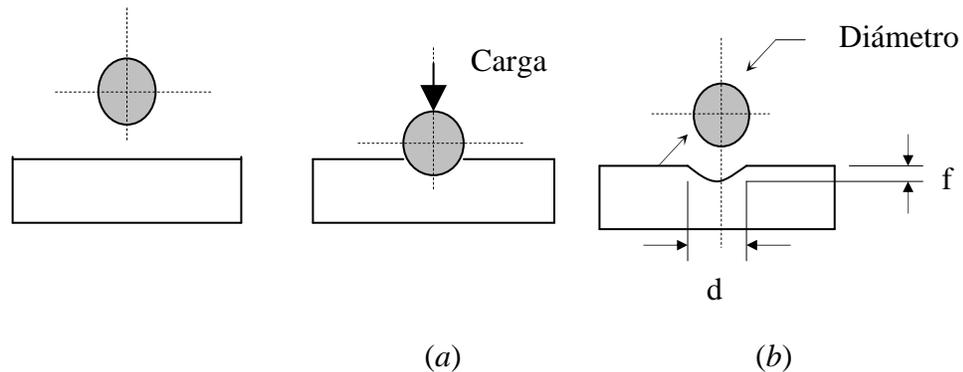


Figura 1.5: Esquema de la indentación Brinell. (a) Etapa de aplicación de carga, (b) Huella residual.

El área superficial S de la hendidura en forma de casquete esférico, que queda por la penetración del indentador, está en función del diámetro inicial D de la esfera y del diámetro d de huella residual. La superficie se calcula según la siguiente relación:

$$S = \pi Df \quad \text{con} \quad f = \frac{1}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)$$

Reemplazando se tiene:

$$S = \frac{\pi D}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \quad (1.2)$$

La dureza se halla, reemplazando lo anterior en la relación (4.1), obteniéndose así:

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (1.3)$$

En el caso del ensayo Rockwell, que se describe a continuación, se puede utilizar también esferas de acero templado de 1/8 y 1/16 de pulgada.

1.4.2.2. Ensayo Rockwell (indentador cónico)

El indentador es un diamante en forma de cono con un ángulo de 120° en el vértice. La profundidad de la huella se determina según la diferencia entre las posiciones de la punta del indentador, desde la precarga hasta llegar a la carga máxima. La Figura 1.6 esquematiza el principio de la prueba.

La prueba Rockwell C consiste en aplicar una carga de 100 N , de modo que el cono penetra una profundidad h_1 . Luego se le aplicará una fuerza de $100\text{ N} + P$, con $P = 1400\text{ N}$, con una duración de 3 a 8 segundos. El cono se hunde hasta una profundidad h_2 . Al retirarse la carga, debido a la recuperación elástica del material, el cono queda a una profundidad h_3 menor que h_2 . La profundidad remanente ($h_3 - h_1$) permite calcular la dureza Rockwell C (HRC) según la fórmula siguiente:

$$HRC = (100 - (h_3 - h_1)) \cdot 500 \quad (1.4)$$

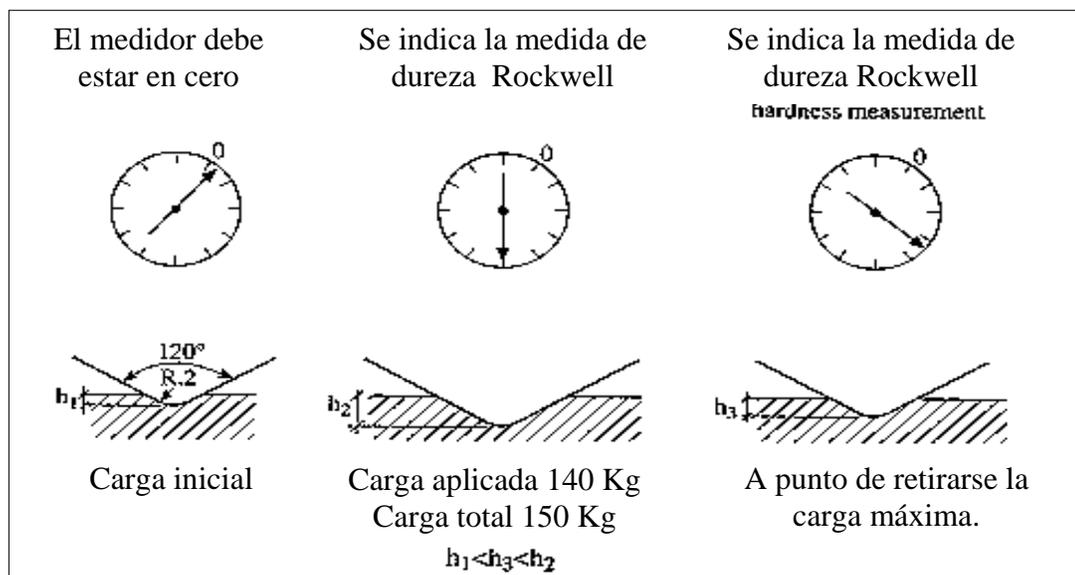


Figura 1.6: Esquema de la indentación Rockwell C.

Una de las ventajas de la prueba Rockwell es que el valor de dureza se puede leer directamente en un medidor graduado, en el durómetro correspondiente.

1.4.2.3. Ensayo Vickers (indentador piramidal)

En la prueba Vickers, el objeto penetrante es un diamante en forma de pirámide de base cuadrada. El ángulo entre las caras triangulares opuestas es de 136° y entre las líneas opuestas es de 148° (Figura 1.7).

La relación de los ángulos medidos entre los lados y las caras es la siguiente:

$$\frac{AM}{BM} = \frac{\operatorname{tg} 74^\circ}{\operatorname{tg} 68^\circ} = \sqrt{2} \quad (1.5)$$

Luego de haber penetrado la superficie del material con el indentador, la huella residual queda en forma de cuadrado (Figura 1.7). El valor de dureza se calcula a partir de la relación entre la carga y la superficie real de contacto.

El área real de contacto de la pirámide con el material (S) representa cuatro veces el área del triángulo coloreada en gris de la Figura 1.7. Así, S es equivalente a:

$$S = 4 \frac{\overline{AC} \cdot \overline{VB}}{2} = \frac{4 \cdot a \cdot \overline{VB}}{2}$$

$$\text{Con } \left\{ \begin{array}{l} \frac{a}{2} = \overline{VB} \cdot \sin 68^\circ \Rightarrow \overline{VB} = \frac{a}{2 \cdot \sin 68^\circ} \\ a^2 + a^2 = d^2 \Rightarrow 2 \cdot a^2 = d^2 \Rightarrow a = \frac{\sqrt{2}}{2} d \end{array} \right\} \Rightarrow \overline{VB} = \frac{\sqrt{2} \cdot d}{4 \cdot \sin 68^\circ} \quad (1.6)$$

Así, la superficie S se puede expresar únicamente en función de la huella diagonal d según la relación:

$$S = \frac{4 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} d \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} d}{4 \sin 68^\circ} = \frac{d^2}{2 \sin 68^\circ} \quad (1.7)$$

De las relaciones (1.5) y (6), se obtiene la expresión general de la dureza Vickers :

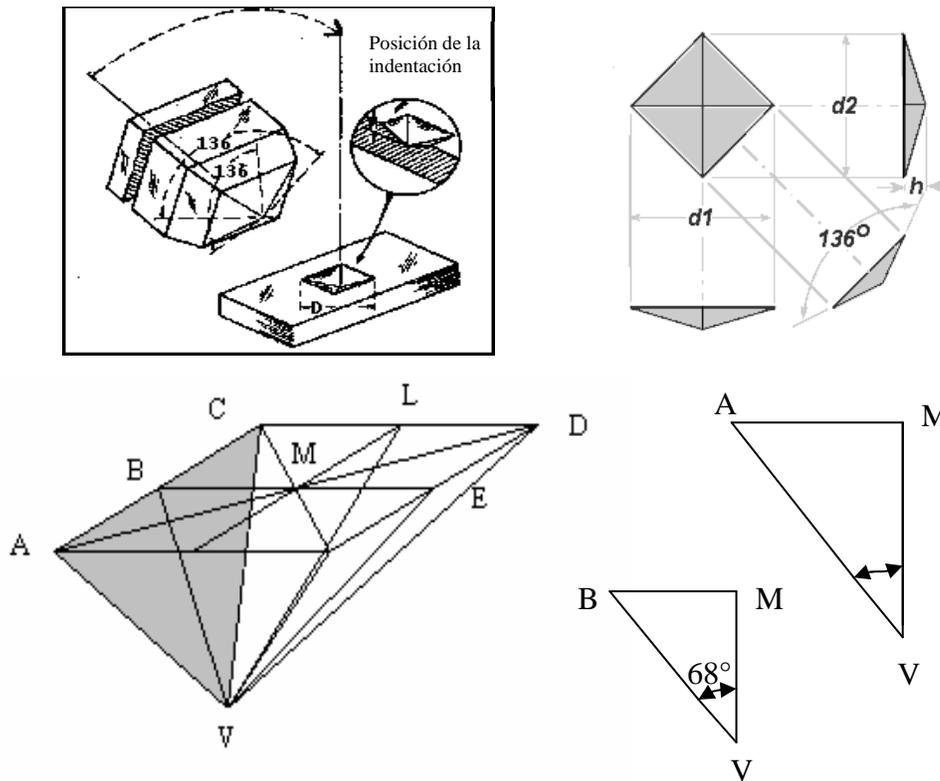


Figura 1.7: Esquema de la indentación Vickers

$$HV = \frac{1854,4 \cdot P}{d^2} \quad (1.8)$$

HV se expresa en kgf/mm^2 si la carga P se da en gf y la diagonal de la huella d en μm . A veces, la cantidad de dureza se expresa en GPa . En este caso, la carga P se expresa en Newtons (N) en la relación (1.7).

1.4.2.4. Ensayo Knoop (indentador piramidal)

El indentador Knoop es un diamante en forma de pirámide cuya base es un rombo. El menor ángulo entre líneas opuestas es de 130° y el mayor ángulo es de $172^\circ 30'$, tal como se detalla en la Figura 1.8.

La huella que deja la indentación tiene la forma de un rombo alargado (Figura 1.8).

El valor de dureza se calcula a partir de la relación entre la carga y la proyección de la huella en la superficie de contacto. El área de contacto del material proyectada sobre la superficie (S_P) representa cuatro veces la proyección del área del triángulo en gris que se ve en la Figura 1.8. Así, S_P es igual a:

$$S_P = 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot \overline{AM} \cdot \overline{BM} = 2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{w}{2} = \frac{L \cdot w}{2} \tag{1.9}$$

$$\text{con } \left\{ \begin{array}{l} \frac{L}{2} = h \cdot \tan(86^\circ 15') \Rightarrow h = \frac{L}{2 \cdot \tan(86^\circ 15')} \\ \frac{w}{2} = h \cdot \tan(65^\circ) \Rightarrow h = \frac{w}{2 \cdot \tan(65^\circ)} \end{array} \right\} \Rightarrow w = \frac{\tan(65^\circ)}{\tan(86^\circ 15')} \cdot L \Rightarrow [L = 7,11 \cdot w]$$

De esta forma, la superficie S_P se puede expresar únicamente en función de la diagonal mayor L , según la relación:

$$S_P = \frac{L}{2} \cdot \frac{\tan(65^\circ)}{\tan(86^\circ 15')} \cdot L = 0,07028 \cdot L^2 \tag{1.10}$$

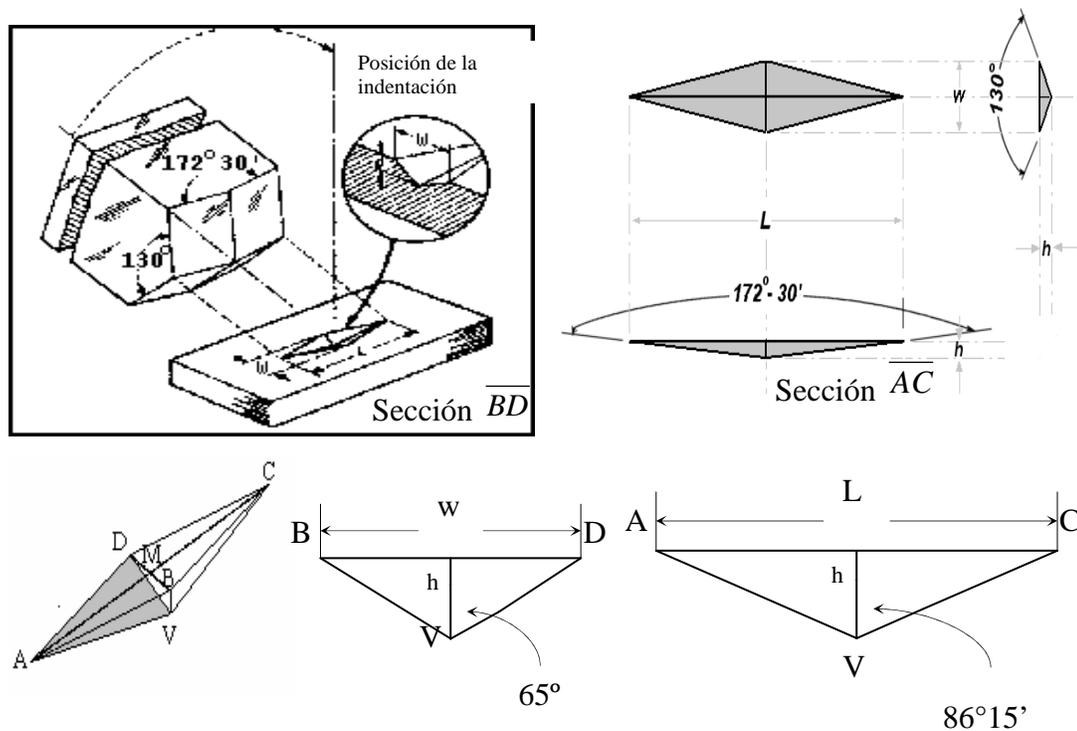


Figura 1.8: Esquema del indentador Knoop.

$$HK = \frac{14,229 \cdot P}{L^2} \tag{1.11}$$

En la práctica, es suficiente medir la longitud de la diagonal mayor (L) de la huella impresa por la penetración para obtener el valor de dureza.

A continuación un esquema representativo de los tipos de penetradores utilizados en los ensayos antes mencionados y sus cargas:

Ensayo	Penetrador	Forma de la indentación		Carga	Expresión para el índice de dureza
		Vista lateral	Vista superior		
Brinell	Esfera de 10 mm de acero o de carburo de wolframio			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D \left[D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]}$
Vickers	Pirámide de diamante			P	$VHN = 1,72P/d_1^2$
Rockwell	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>A } C } D } B } F } G }</p> </div> <div style="margin-right: 10px;"> <p>Cono de diamante</p> </div> </div> <div style="margin-top: 10px;"> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>E } H }</p> </div> <div style="margin-right: 10px;"> <p>Esfera de acero de 1/8 de pulgada de diámetro</p> </div> </div> </div>			<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <p>60 kg</p> <p>150 kg</p> <p>100 kg</p> <p>100 kg</p> <p>60 kg</p> <p>150 kg</p> </div>	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>$R_A =$</p> <p>$R_C =$</p> <p>$R_D =$</p> <p>$R_B =$</p> <p>$R_F =$</p> <p>$R_G =$</p> </div> <div style="font-size: 2em;">}</div> <div style="margin-left: 10px;"> <p>100 - 500r</p> </div> </div> <div style="margin-top: 10px;"> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>$R_E =$</p> <p>$R_H =$</p> </div> <div style="font-size: 2em;">}</div> <div style="margin-left: 10px;"> <p>130 - 500r</p> </div> </div> </div>

Figura 1.9: Tipos de penetradores

1.5. Antecedentes

En el estudio de los materiales en servicio, como componentes de órganos de máquinas o estructuras, debe tenerse en cuenta que las solicitaciones predominantes a que generalmente están sometidos no resultan estáticas ni cuasi estáticas, muy por lo contrario en la mayoría de los casos se encuentran afectados a cambios de tensiones,

que se repiten sistemáticamente y producen la rotura del material para valores de la misma considerablemente menores que las calculadas en ensayos estáticos.

Debido al problema que significaba el poder saber la capacidad de un material a resistir una penetración o deformación, se emplearon los ensayos de indentación estática (dureza). Este ensayo es el más empleado en la selección y control de calidad de los metales. En la actualidad existen muchas máquinas para esta clase de ensayos: sin embargo, no existen muchas que realicen este ensayo dinámicamente, como es nuestro caso.

Actualmente existen estudios y ensayos sobre este tema, como es el caso de R. Banerjee y B.K. Sarkar, quienes realizan un ensayo de fatiga por indentación sobre vidrios empleando el ensayo tipo Vickers, permitiendo que las muestras de vidrio sean indentadas constantemente en un punto hasta la aparición de la grieta. En septiembre de 1999 P. Hvizdos, propuso utilizar el ensayo de indentación (dureza) únicamente para generar grietas.

1.5.1. Fatiga por indentación en vidrios

La técnica de Indentación Vickers aplicada al estudio de propiedades de fatiga ha sido utilizada por Banerjee (1987), para evaluar las propiedades de diferentes vidrios. Las muestras son indentadas en un mismo punto a una carga de indentación constante justo hasta la aparición de una grieta. La curva de fatiga, análoga a la curva S-N tradicional, es obtenida representando la relación entre el número de ciclos necesarios para la aparición de una grieta y el nivel de carga. Dicha curva se puede visualizar en la figura 10.

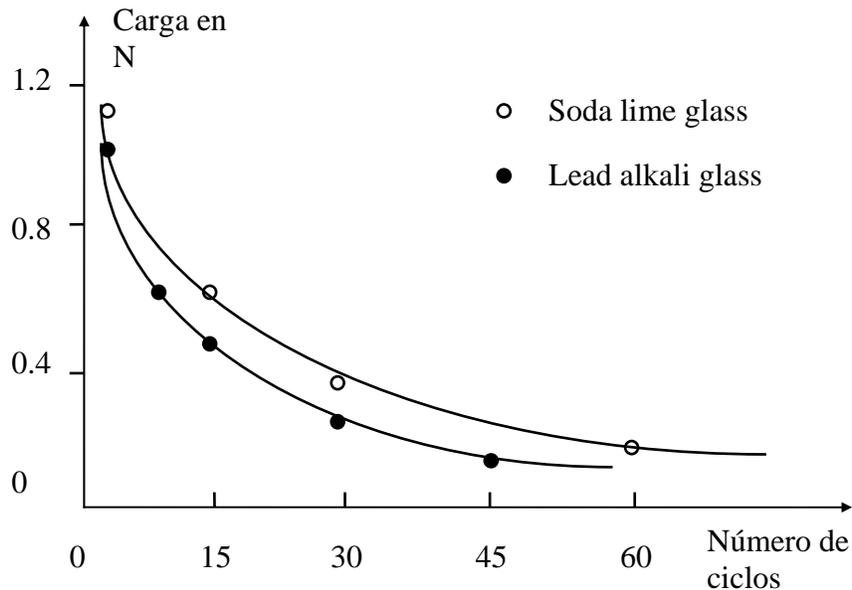


Figura 1.10: Fatiga por indentación de vidrios

En 1991, Horibe y Takakura estudiaron por este método, la influencia del tamaño de grano y del tipo de enlace atómico sobre la fatiga de cerámicas. Los autores ponen en evidencia dos tipos de comportamiento. El primero corresponde a un crecimiento de grietas laterales por ejemplo por los carburos o nitruros de silicio, y la otra a un alargamiento de las improntas a cada ciclo de indentación por el hecho de las propiedades plásticas que posee dicho material como el óxido de magnesio o el óxido de aluminio.

Hvizdos propuso utilizar el ensayo de indentación únicamente para generar grietas cortas en los extremos de la impronta. Seguidamente, el autor ensaya la muestra a fatiga por flexión en cuatro puntos y estudia la evolución de las grietas en función del número de ciclos. Este método relativamente simple de aplicar necesita, sin embargo, una estimación de los esfuerzos residuales y un análisis de la forma de las grietas en la punta de la impronta.

1.5.2. Máquina de ensayo de fatiga por choque repetido

Máquina Cambridge:

Es una de las mejores máquinas conocidas en impacto repetido para pruebas. Este sistema se compone de una masa que cae desde una altura constante sobre el centro de una probeta cilíndrica entallada circularmente y colocada entre dos apoyos. Después de cada golpe la probeta gira media vuelta (180°). La rotura por fatiga se origina en dos puntos diametralmente opuestos. Después de realizado el proceso se anota el número de choques que producen la rotura en las condiciones determinadas (peso y altura decaída de la masa).

Máquina Maybach:

Dicha máquina contiene una probeta de dimensiones 9 mm de diámetro y 150 mm de longitud. Esta se encuentra fija en sus extremos. La probeta recibe el impacto en dos puntos que se encuentran separados 70 mm entre si, este choque es simultáneo y se realiza mediante unos rodillos montados en pares sobre los dos marcos en el árbol de un motor eléctrico. Cada dos pares de choques la probeta gira 90 grados. La flecha que toma la probeta en el momento del choque se mide con un palpador solidario de un micrómetro, que se aproxima lentamente durante el ensayo. El contacto del palpador con la superficie de la probeta cierra un circuito eléctrico que acciona un auricular telefónico. Cuando la probeta rompe se corta el contacto, lo que detiene automáticamente la máquina.

Este dispositivo permite conocer los esfuerzos del metal en el momento del choque en kg/mm^2 , en lugar de la energía del choque en kg/cm . La frecuencia de los choques es de 60 a 80 por segundo. El ensayo es, de esta manera, extremadamente rápido y permite la determinación del límite de fatiga (se necesitan menos de dos días para alcanzar 10 millones de choques).

Máquina Amsler:

Esta máquina permite efectuar ensayos de choques repetidos a compresión, flexión o tracción. En esta máquina, una masa actúa como martillo pilón y está constituida por una deslizadera guiada verticalmente que se pone en movimiento por dos brazos manivela, opuestos, solidarios a un eje de rotación. La masa que actúa en el choque lleva en su cara interior un saliente que, en los ensayos de compresión o de flexión, es el que golpea la probeta de ensayo. La máquina da 600 golpes por minuto, y la energía de la masa se ajusta modificando la excentricidad de los brazos de la manivela.



Figura 1.11: Máquina Amsler

1.6. Diagrama S-N

El diagrama S-N es la forma fundamental de representar los datos de la duración de una probeta a la fatiga, ilustra la variación de vida media en fatiga con la tensión. Se le suele llamar Curva de Fatiga o Curva S-N (Stress-Number of Cycles (N)), e indica la duración de la probeta expresada en números de ciclos hasta la rotura para la máxima tensión aplicada. Representa, en las ordenadas, las tensiones máximas que

producen la rotura por fatiga; y en las abscisas, su duración en ciclos (suele representarse $\log N$ en lugar de N). Proviene de someter a ensayos una serie de probetas para determinar el número de ciclos (N) que soporta el material a distintos σ_a , es un modelo simplificado de la manera en que trabaja una pieza bajo cargas de fatiga en general.

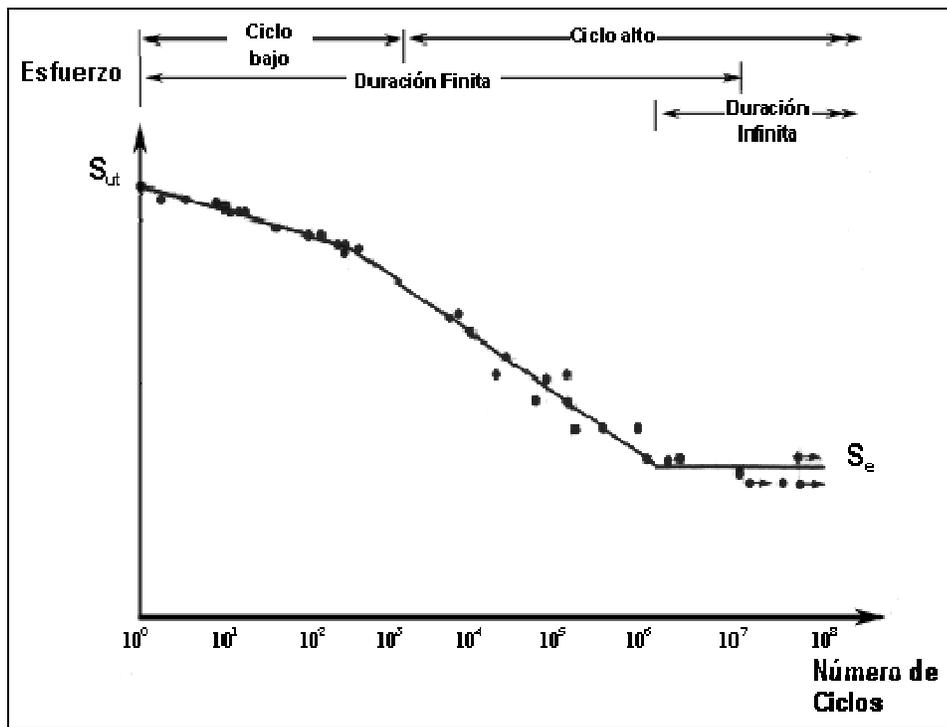


Figura 1.12: Diagrama S - N

Del análisis de la curva surge que el número N de ciclos que soporta una probeta antes de fallar aumenta al disminuir la tensión S aplicada. Algunos materiales (ferrosos, aceros, titanio) presentan un tramo horizontal a un valor de tensión bien determinado conocido como Límite de Fatiga (Endurance Límite), valor por debajo del cual se presume que el material durará un número infinito de ciclos sin romper.

En el caso de materiales no ferrosos (Al, Mg, Cu) estas curvas son asintóticas a la horizontal, lo cual implica que no existe un verdadero límite de fatiga, por lo tanto se

utiliza un número de ciclos N , convenido arbitrariamente inferior a ese valor, bajo el cual se supone que la pieza resistirá infinitos números de ciclos. En resumen, los metales ferrosos tienen generalmente límite de fatiga, mientras que los metales no-ferrosos frecuentemente no.

Debido a estas características el Límite de Fatiga constituye un criterio de diseño muy aceptable. Por ello es una magnitud frecuentemente tabulada, aunque por razones obvias debe basarse en ensayos “finitos”: 500 millones de ciclos para aleaciones de aluminio y magnesio, 100 millones para las aleaciones de base Cu y Ni. Téngase presente que para las frecuencias usuales de las máquinas de ensayo, se requieren 5 semanas para 500 millones de ciclos.

1.7. Curva de Wohler

Debido a la naturaleza estadística del fenómeno de fatiga en realidad la curva S-N no es la forma en que se presenta el problema en la mayoría de los casos, pues debido a condiciones inherentes al material, de los ensayos de fatiga obtenemos una serie de valores dispersos, siendo imposible predecir la vida de una pieza o estructura con una seguridad completa. Al existir esta indeterminación vemos que el método estadístico es la única forma de tratar el problema, llegando a la conclusión que la probabilidad P de Falla por Fatiga crece con el tiempo, pudiendo llamarse Límite de Fatiga a aquel que nos da un 90% de probabilidad de supervivencia (en aeronáutica se usa la inversa, $P = 0.1$). Al problema de la naturaleza estadística del fenómeno se le agrega la característica errática de la fluctuación de la carga cíclica, lo cual complica aun más el estudio de este fenómeno.

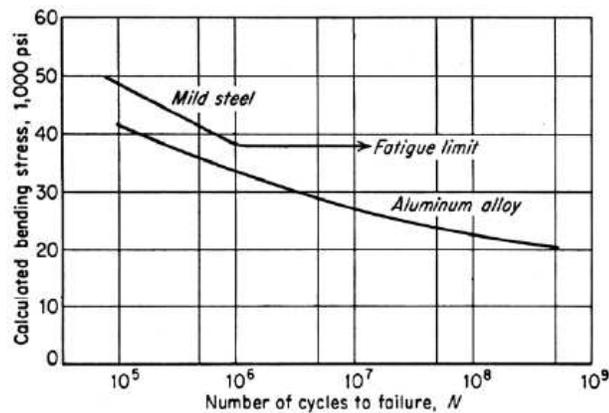


Figura 1.13: Curva de Wohler

Las curvas de Wohler constituyen una representación mucho más real del fenómeno de fatiga. Wohler tomó una serie de probetas, las cargó con $\sigma_a = \text{cte}$ y una determinada frecuencia y obtuvo una distribución normal de los valores de N en el que fallaba cada una; así determinó el número de N que soporta el material a distintos σ_a y en general con un s_m común: obteniendo un diagrama Tensión - Número de Ciclos con probabilidades, conocido como curvas de Wohler. Su representación gráfica consiste en trazar la curva correspondiente al 50 % de probabilidad de supervivencia (n_{50}), junto con las de las de n_5 y n_{95} , lo que implica definir una banda dentro de la cual se encuentran el 90% de las probetas. En los casos en que n esté en escala logarítmica, se considera que el número de ciclos para un dado nivel de tensión se distribuye en forma normal o gaussiana, como se muestra en la figura 1.14.

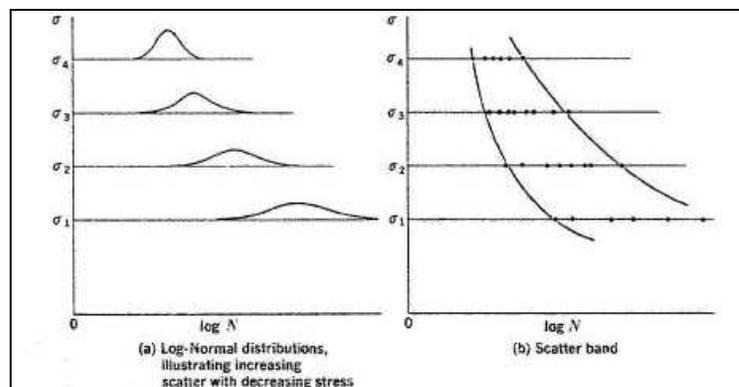


Figura 1.14: Distribuciones de vida en fatiga

1.8. Factores que afectan la resistencia a la fatiga

Diversos factores afectan el valor de la resistencia a la fatiga de un elemento mecánico, como son: el tipo de material, su grado de aleación, método de fabricación, condiciones y atmósfera de trabajo, presencia de entallas, etc.

Todos estos factores son tomados en cuenta con coeficientes de corrección que se aplican al valor de resistencia a la fatiga obtenido para la pieza ensayada en condiciones de laboratorio.

Algunos de estos factores son:

- Factor de carga (K_c): considera si la carga es axial, corte, torsión o combinación;
- Concentración de tensión o presencia de entallas (K_e , K_f): se usa ante la presencia de entallas agujeros o grietas en el material;
- Factor de tamaño (K_b): influye la forma y tamaño de la pieza;
- Factor de temperatura (K_d): dado que la temperatura de operación puede generar problemas de fragilización del material o por el contrario, las altas temperaturas afectan cuando la tensión se aproxima a la de fluencia;
- Factor de superficie (K_a): debido a que la pieza no tiene el grado de pulido y acabado de la pieza de laboratorio.

$$S_e = K_a.K_b.K_c.K_d.K_e.S'_e \quad (1.12)$$

Siendo S_e , el límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de maquina en la geometría y condición de uso. El S'_e es el límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria.

Los esfuerzos también son calculados como:

$$\text{Esfuerzo} \quad \sigma = \frac{M.t.r}{I_p} = \frac{M.t.d/2}{I_p} \leq \frac{S_y}{2\psi} \quad (1.13)$$

Esfuerzo medio
$$\sigma_m = \sqrt{(\tau_y)^2 + 3(\sigma_{xy})^2} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1.14)$$

Esfuerzo alternante
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1.15)$$

Esfuerzo máximo
$$\sigma_{\max} = \frac{F}{a} \quad (1.16)$$

En el *diagrama de Goodman modificado*, es un método para graficar los resultados de ensayos realizados para obtener la resistencia a la fatiga de partes sometidas a esfuerzos, en él se muestran todas las resistencias y los valores limites de cada uno de los componentes del esfuerzo para un esfuerzo medio (σ_m) particular.

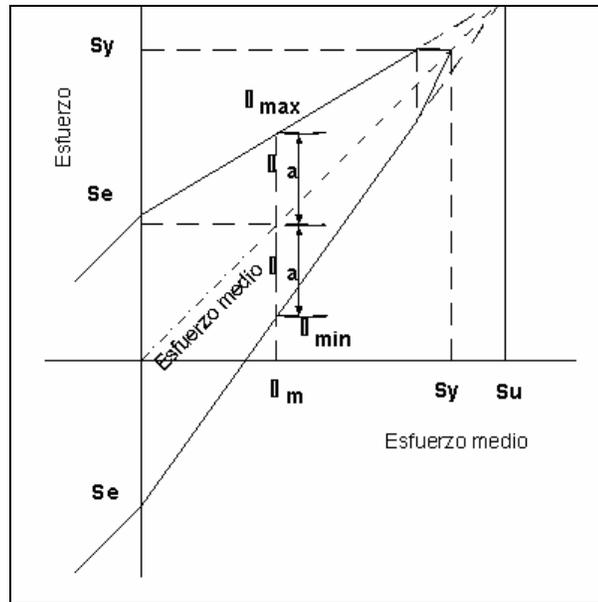


Figura 1.15: Diagrama de Goodman modificado

El diagrama se puede describir fácilmente de la siguiente manera: consiste en las rectas trazadas hasta el límite de resistencia a la fatiga (S_e), como se muestra en la Fig. 1.15, el esfuerzo medio está representado en el eje de las abscisas, los demás esfuerzos en el eje de las ordenadas. La línea de esfuerzo medio con una pendiente de 1, va del origen a la resistencia última de la pieza. La resistencia de fluencia se visualiza en ambos ejes ya que la cadencia sería el criterio de falla si σ_{\max} fuese mayor a S_y . Por Goodman

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{\psi} \quad (1.17)$$

2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

2.1. Metodología del diseño

La metodología del diseño específicamente en la ingeniería es el proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realización.

La condición básica para tener un elemento de máquina bien diseñado, es que funcione sin fallar durante su vida útil. En ocasiones es posible decidir si la pieza a diseñar durará indefinidamente (a vida infinita), o si tendrá una vida limitada, en otras no será posible.

La metodología del diseño es una respuesta directa a las necesidades específicas de un problema, englobadas en pasos y actividades a realizar para obtener la solución final de dicho problema.

De manera general, los pasos de la metodología del diseño son:

- Definición del problema.
- Generación de soluciones.
- Evaluación y selección.
- Mejoramiento del diseño.
- Construcción y especificaciones.

2.2. Definición del problema (análisis de la necesidad)

La definición del problema es consecuencia de la necesidad planteada y debe abarcar todas las condiciones para la función a la que ha sido diseñada. Las condiciones o especificaciones son todas las características y limitaciones que deben tomarse en cuenta, basado en lo que se tiene y a lo que se desea llegar.

La definición del problema se puede lograr mediante una cantidad de parámetros o pasos que permitan obtener el problema, como lo son: comprensión del problema, recopilación de datos, análisis de datos y finalmente la definición del problema.

El trabajo de diseño y construcción de una máquina que permita el estudio del comportamiento de los diferentes tipos de materiales cuando son sometidos a fatiga por indentación es muy escaso por no decir inexistentes, por tal motivo se crea la necesidad de realizarlo.

En el estudio de los materiales en servicio, como componentes de órganos de máquinas o estructuras, debe tenerse en cuenta que las sollicitaciones predominantes a que generalmente están sometidos no resultan estáticas ni cuasi estáticas, muy por lo contrario en la mayoría de los casos se encuentran afectados a cambios de tensiones, que se repiten sistemáticamente y producen la rotura del material para valores de las misma considerablemente menores que las calculadas en ensayos estáticos.

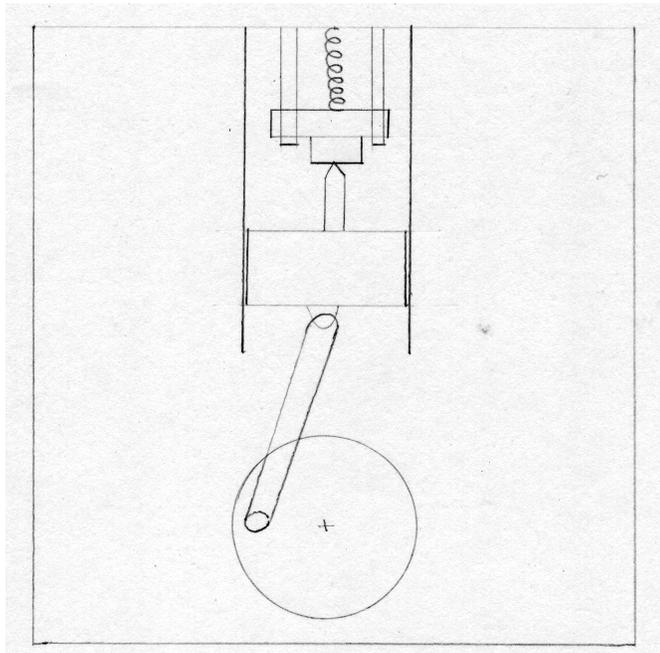
A través de los ensayos de dureza se puede conocer cual es la resistencia de un material a un impacto que cause su deformación plástica, lo que implicaría una falla en el material, pero no se puede predecir en cuantos impactos va a fallar el material si dichos golpes no producen una deformación plástica sino elástica.

2.3. Generación de soluciones (tormenta de ideas)

Para realizar el diseño de la máquina de indentación dinámica se utilizó el método de “*Tormenta de Ideas*”. El funcionamiento que debe tener la máquina se le fue explicado a: profesores, alumnos, tesisistas y posibles usuarios para que aportaran posibles soluciones o necesidades para dicho problema, de donde se obtuvo una gama de ideas que fueron resumidas en diversas propuestas que están expresadas a continuación.

2.3.1. Propuesta N°1

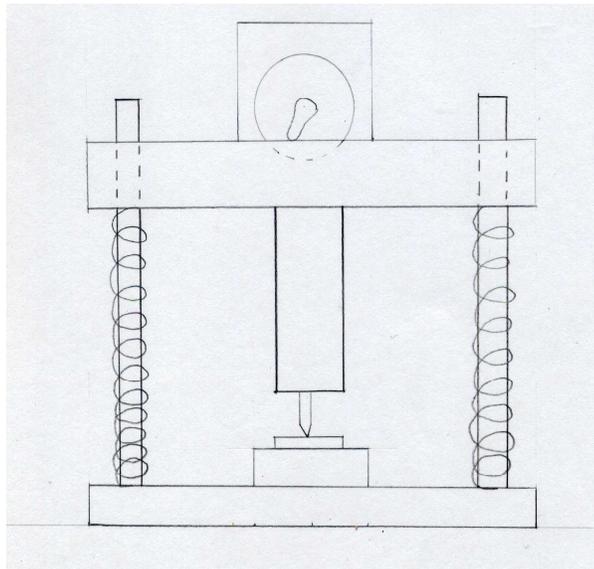
Se utiliza un sistema biela pistón para generar el movimiento en el indentador, logrando así que este tenga contacto con la probeta. Dicho sistema se logra mediante un motor que transmite su potencia hacia un disco que a su vez la transmite a la biela. Para evitar el impacto del indentador con la probeta se coloca un resorte contiguo al porta-indentador, de esta manera el resorte absorbe el impacto y permite que el sistema indentador-probeta no se separe. La máquina esta conformada, ascendentemente, por: un disco, una biela, sistema pistón, el indentador, la probeta, porta probeta con sus respectivas guías, un resorte y la base superior.



2.3.2. Propuesta N°2

Esta propuesta consta de una placa inferior a la cual están fijadas dos columnas, sobre las columnas se encuentra la placa superior, en esta se encuentra firme el porta indentador y respectivamente el indentador a emplear. Sobre la placa superior se encuentra el motor, su eje, un disco y una leva que permite el desplazamiento hacia abajo de la placa superior.

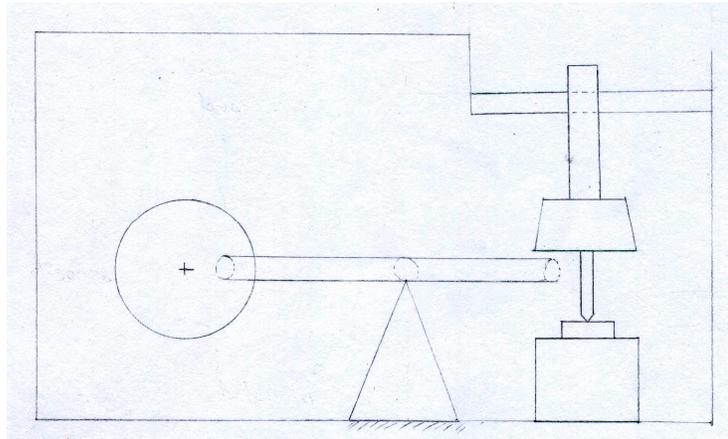
El porta-probeta se encuentra fijo en la placa inferior (base) y sobre este la muestra a tratar. Las columnas fijas a la placa inferior contienen un resorte que les permite evitar el impacto ocasionado por la placa superior y el indentador sobre la muestra o probeta, este sistema permite la indentación y evita el impacto así como la vuelta a la posición original de la placa superior.



2.3.3. Propuesta N°3

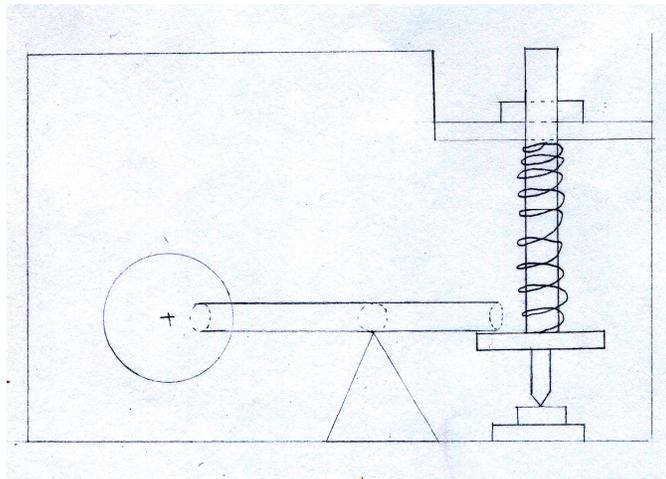
En este caso se tiene un sistema motor, eje, volante que permite el movimiento de un eje excéntrico al disco, con un apoyo a tierra. El sistema paralelo consta de una guía fija a la estructura de toda la máquina, en la que se encuentra un eje y en su extremo el porta-indentador y respectivamente el indentador; al final de este mecanismo se encuentra el porta probeta y la muestra.

En líneas generales, el motor y el disco generan movimiento en el eje y este a su vez sube y baja el porta indentador por simple contacto.



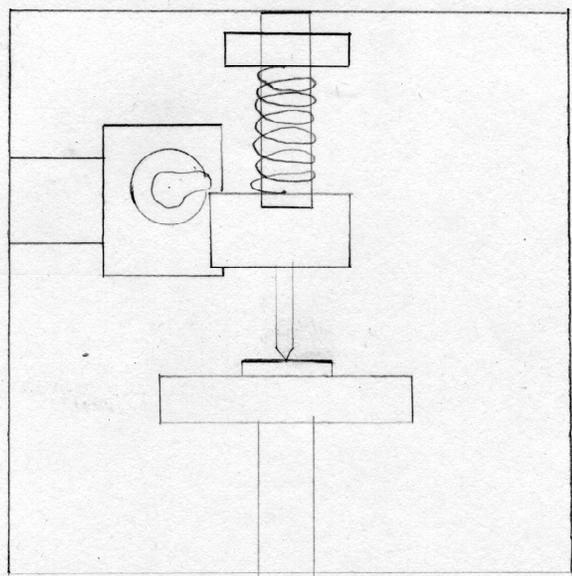
2.3.4. Propuesta N°4

En esta propuesta se observa básicamente el mismo sistema de la propuesta anterior, basando su diferencia en evitar el impacto que podría ocasionar el indentador sobre la muestra, por lo que se agrega un resorte al eje que genera el movimiento en el porta indentador. Adicionalmente se coloca el eje excéntrico al disco por encima del porta-indentador, garantizando así que no ocasione impacto.



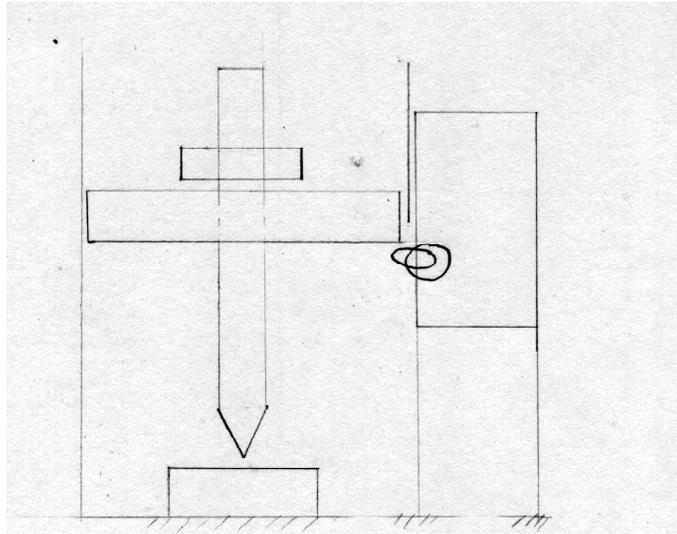
2.3.5. Propuesta N°5

Se utiliza una estructura rectangular como carcasa de la máquina, en la placa superior se encuentra un eje pasante que a su vez se desliza por una guía fija a la paredes laterales de la carcasa, dicho eje se encuentra dentro de un resorte que evitará el impacto del indentador con la probeta, el otro extremo estará fijo al porta-indentador y consecuentemente al indentador. En la parte inferior de la estructura se encuentra el porta-probeta con su respectiva muestra a tratar. En la pared izquierda de la estructura se encuentra: la base del motor, el motor y una leva; este sistema es empleado para llevar el movimiento sobre el porta-indentador y lograr que este baje (indente). El resorte además de evitar el impacto permite que el indentador regrese a su posición original para comenzar nuevamente el movimiento.



2.3.6. Propuesta N°6

En este caso el sistema es igual a la propuesta anterior, con la diferencia de que la leva sube el porta-indentador y luego regresa por caída libre.



2.3.7. Propuesta N°7

Se utiliza una estructura rectangular como carcasa de la máquina, en la placa superior se encuentra un eje pasante que tiene en su otro extremo el porta-indentador. En la pared lateral se encuentra se encuentra fija la base del motor que tiene al motor y la leva. Debido al movimiento de la leva se ejerce una fuerza sobre el porta-indentador y lo desplaza hacia abajo. En la parte inferior de la estructura se encuentra una base que contiene fija dos guías que pasan dentro de un resorte y a su vez por el porta-probeta.

