

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS ESTADO DE MEXICO



**METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACION DE DURABILIDAD DE
MUELLES MULTI-HOJAS**

**TESIS QUE PARA OPTAR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS DE MANUFACTURA
PRESENTA**

JESÚS PEDRO ESCALONA PÉREZ

Asesor: Dr. JOAQUIN E. OSEGUERA PEÑA

**Comité de tesis: M. en C. IGNACIO ADRIAN ROMERO
M. en C. ULISES FIGUEROA LOPEZ**

Jurado: Dr. SERGEI KANAOUN MIRONOV	Presidente
M. en C. IGNACIO ADRIAN ROMERO	Secretario
Dr. JOAQUIN E. OSEGUERA PEÑA	Vocal
M. en C. ULISES FIGUEROA LOPEZ	Vocal

Atizapán de Zaragoza, Edo. Méx., Marzo de 1998.

RESUMEN.

Con el objeto de reducir el tiempo y costo del diseño de muelles automotrices, se desarrolló un método analítico para estimar la durabilidad de una muelle multi - hojas sometida a una prueba de fatiga de amplitud constante.

Este método requiere como datos de entrada la geometría de la muelle y las condiciones de carga que experimentará la misma durante la prueba de fatiga. A partir de estos datos y con los resultados de la caracterización de las propiedades mecánicas y de fatiga del acero SAE-5160 se determinan los esfuerzos que experimenta el componente durante la prueba. Los esfuerzos se obtienen por medio del método que se desarrolló empleando un programa para análisis estructurales por el método del elemento finito.

Por último con los resultados del análisis de esfuerzos y las propiedades de fatiga del material (esfuerzo - durabilidad) se obtiene una estimación de la durabilidad media de la muelle en base a la teoría de iniciación de grietas.

Los métodos para determinar los esfuerzos y estimar la durabilidad del componente fueron completamente automatizados en un programa CAD/CAE.

Los resultados de las estimaciones de durabilidad obtenidos con el método propuesto son mayores alrededor de un 9% de la durabilidad media de la muelles sometidas a pruebas de fatiga.

CONTENIDO.

RESUMEN.....	3
CONTENIDO.....	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	7
1 INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 CICLO DE DESARROLLO DEL PRODUCTO.....	10
1.2 METAS DE DISEÑO Y PLANEACIÓN DEL PRODUCTO.....	12
1.3 ANÁLISIS DE USO DEL PRODUCTO.....	12
1.4 CONSIDERACIÓN DE MODOS DE FALLA.....	12
1.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	13
1.6 PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS.....	13
1.7 PROCESO DE INGENIERÍA DE DISEÑO Y DESARROLLO.....	13
1.7.1 EVALUACIÓN DEL DISEÑO.....	15
1.8 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.9 OBJETIVO.....	18
1.9.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2 MUELLES MULTI HOJAS.....	19
2.1 FUNCIÓN Y APLICACIÓN.....	19
2.2 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS.....	20
2.2.1 CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS.....	20
2.2.2 DURABILIDAD (N).....	23
2.3 CLASIFICACIÓN.....	24
2.3.1 MUELLE CONVENCIONAL.....	24
2.3.2 MUELLE PROGRESIVA.....	25
2.4 MATERIAL PARA FABRICACIÓN DE MUELLES MULTI HOJAS.....	27
2.4.1 ACERO.....	28
2.4.2 PROPIEDADES MECÁNICAS.....	28
2.5 PROCESOS DE FABRICACIÓN.....	29
2.5.1 PRE - ESFUERZO MECÁNICO.....	29

2.5.2 COMPARATIVO DE LA DURABILIDAD DE MUELLES MULTI HOJAS CON EL PROCESO DE GRANALLADO CONVENCIONAL Y REFORZADO.....	32
3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	34
3.1 PROPIEDADES ESTÁTICAS ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....	34
3.1.1 PROCEDIMIENTO.....	34
3.1.2 PROBETAS.....	34
3.1.3 EQUIPO.....	35
3.1.4 RESULTADOS.....	35
3.2 PROPIEDADES CÍCLICAS (ESFUERZO - DURABILIDAD).....	38
3.2.1 PROCEDIMIENTO.....	38
3.2.2 PROBETAS.....	38
3.2.3 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA.....	38
3.2.4 RESULTADOS.....	39
4. ANÁLISIS DE ESFUERZOS.....	42
4.1 SUPOSICIONES.....	42
4.2 PROCEDIMIENTO.....	43
4.2.1 CONSTRUIR EL MODELO.....	44
4.2.2 APLICAR CARGAS Y OBTENER LA SOLUCIÓN.....	47
4.2.3 REVISIÓN DE RESULTADOS.....	48
4.3 RESULTADOS.....	49
5. ESTIMACIÓN DE DURABILIDAD.....	54
5.1 ENFOQUES DE INICIACIÓN Y PROPAGACIÓN DE GRIETAS PARA ESTIMAR LA DURABILIDAD.....	55
5.2 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE DURABILIDAD.....	56
5.2.1 MÉTODO DE ESFUERZO - DURABILIDAD PARA CARGAS DE AMPLITUD CONSTANTE.....	56
5.2.2 ESTIMACIONES DE DURABILIDAD.....	57
5.3 PRUEBAS DE DURABILIDAD DE MUELLES MULTI -HOJAS.....	58
5.3.1 PROCEDIMIENTO.....	58
5.3.2 PROBETAS.....	58
5.3.3 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA.....	58
5.3.4 RESULTADOS.....	59
5.4 CORRELACIÓN DE RESULTADOS.....	59
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
6.1 CONCLUSIONES.....	61
6.2 RECOMENDACIONES.....	62
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA.....	63
ANEXO A. GLOSARIO DE TERMINOS.....	65
A.1 RELACIONADOS CON MUELLES MULTI HOJAS.....	65
A.2 COMPONENTES DE UNA MUELLE MULTI HOJAS.....	68
A.3 ACABADOS DE LOS EXTREMOS DE LAS HOJAS.....	69
A.4 ACABADOS DE LOS EXTREMOS DE LA MUELLE.....	70
A.5 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES [12].....	71

ANEXO B. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	76
B.1 PROPIEDADES ESTÁTICAS ESFUERZO – DEFORMACIÓN.....	78
<i>B.1.1 RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES INGENIERILES Y VERDADERAS.....</i>	<i>80</i>
B.2 PROPIEDADES CÍCLICAS.....	81
<i>B.2.1 PROPIEDADES DE ESFUERZO CÍCLICO.....</i>	<i>81</i>
<i>B.2.2 PROPIEDADES DE DEFORMACIÓN CÍCLICA.....</i>	<i>83</i>
<i>B.2.3 CURVA CÍCLICA ESFUERZO - DEFORMACIÓN.....</i>	<i>83</i>
<i>B.2.4 RELACIÓN ENTRE AMPLITUD DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA Y AMPLITUD DE ESFUERZO.....</i>	<i>85</i>
<i>B.2.5 CURVA DEFORMACIÓN - DURABILIDAD.....</i>	<i>86</i>
ANEXO C. ANÁLISIS DE ESFUERZOS POR LA TEORÍA DE RESISTENCIA DE MATERIALES.....	89
C.1 ANÁLISIS DE ESFUERZOS DE MUELLES MULTI HOJAS.....	89
<i>C.1.1 MÉTODO DE EXPANSIÓN (CURVATURA COMÚN).....</i>	<i>92</i>
<i>C.1.2 MÉTODO DE CONTACTO EN LOS EXTREMOS (PUNTOS DE CONTACTO).....</i>	<i>98</i>
ANEXO D. DESCRIPCION DE LOS TIPOS DE ELEMENTOS [9].....	99
D.1 ELEMENTO SOLIDO ESTRUCTURAL BIDIMENSIONAL.....	99
D.2 ELEMENTO DE CONTACTO 2-D (PUNTO - SUPERFICIE).....	100
D.3 VIGA 2-D.....	100
ANEXO E. DIBUJOS DE DEFINICIÓN.....	102
E.1 MUELLE TIPO 1.....	103
E.2 MUELLE TIPO 2.....	104
E.3 MUELLE TIPO 3.....	105

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.

FIG. 1.1 - CICLO DE DESARROLLO DEL PRODUCTO.	11
FIG. 1.2 - PROCESO DE INGENIERÍA DE DISEÑO Y DESARROLLO.	14
FIG. 1.3 - PROCESO DE EVALUACIÓN DE UN PRODUCTO.	15
FIG. 2.1 - SUSPENSIÓN TIPO HOTCHKISS.	20
FIG. 2.2 - GRÁFICA CARGA - ALTURA TÍPICA DE UNA MUELLE MULTI - HOJAS.	21
FIG. 2.3 - EQUIPO DE MEDICIÓN DE CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS (ORIGINAL EN COLORES).	22
FIG. 2.4 - ESLABÓN PARA ENSAMBLE DE LA MUELLE EN EL CHASIS (COLUMPIO).	22
FIG. 2.5 - PLACAS DE ASIENTO PARA FIJACIÓN DE LA MUELLE AL EJE DEL VEHÍCULO.	23
FIG. 2.6 - EQUIPO DE PRUEBAS DE DURABILIDAD (ORIGINAL EN COLORES).	24
FIG. 2.7 - GRÁFICA CARGA - ALTURA Y ESQUEMA DE UNA MUELLE CONVENCIONAL.	25
FIG. 2.8 - GRÁFICA CARGA - ALTURA Y ESQUEMA DE UNA MUELLE PROGRESIVA DE 2 ESTACIONES.	26
FIG. 2.9 - GRÁFICA CARGA - ALTURA Y ESQUEMA DE UNA MUELLE PROGRESIVA CON CONSTANTE ELÁSTICA VARIABLE.	27
FIG. 2.10 - SECCIÓN TRANSVERSAL DE SOLERA PARA UNA HOJA DE UNA MUELLE MULTI - HOJAS.	27
TABLA 2.1 - CORRELACIÓN ENTRE ESPESOR Y GRADO DEL ACERO.	28
TABLA 2.2 - PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO PARA MUELLES MULTI - HOJAS.	28
FIG. 2.11 - DISTRIBUCIÓN TÍPICA DE ESFUERZOS RESIDUALES DEBAJO DE LA SUPERFICIE DESPUÉS DEL GRANALLADO.	30
FIG. 2.12 - ESFUERZOS RESIDUALES PRODUCIDOS POR EL GRANALLADO CONTRA RESISTENCIA ÚLTIMA A LA TENSIÓN DEL ACERO.	30
FIG. 2.13 - PROFUNDIDAD DE ESFUERZOS DE COMPRESIÓN CONTRA INTENSIDAD ALMEN PARA ACERO.	31
FIG. 2.14 - COMPARATIVO DE DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES.	32
FIG. 2.15 - ESFUERZOS RESIDUALES Y DESEMPEÑO EN FATIGA DE MUESTRAS DE MUELLES MULTI - HOJAS CON GRANALLADO REFORZADO.	33
FIG. 3.1 - PROBETA RECTANGULAR PARA ENSAYOS DE TENSIÓN.	34
TABLA 3.1 - RESULTADOS DE MEDICIÓN DE DUREZA DEL MATERIAL DE LAS PROBETAS.	35

TABLA 3.2 - DIMENSIONES ORIGINALES DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA PROBETA.	36
TABLA 3.3 - DIMENSIONES ORIGINALES DE LA DISTANCIA ENTRE MARCAS DE LA PROBETA.	36
TABLA 3.4 - DIMENSIONES FINALES DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA PROBETA.	36
TABLA 3.5 - DIMENSIÓN FINAL DE LA DISTANCIA ENTRE MARCAS DE LA PROBETA.	36
TABLA 3.6 - RESUMEN DE RESULTADOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE TENSIÓN.	37
FIG. 3.2 - GRÁFICA ESFUERZO - DEFORMACIÓN DE LA PROBETA NO. 1.	37
FIG. 3.3 - PROBETA PARA ENSAYOS DE FATIGA DE FLEXIÓN EN 3 PUNTOS.	38
FIG. 3.4 - ESQUEMA DEL MONTAJE DE LAS PROBETAS EN LOS ENSAYOS DE FATIGA DE FLEXIÓN EN 3 PUNTOS.	39
TABLA 3.7 - RESULTADOS DE PRUEBAS DE FATIGA DE PROBETAS.	40
FIG. 3.5 - GRÁFICA ESFUERZO - DURABILIDAD.	41
FIG. 4.1 - PROCEDIMIENTO DE UN ANÁLISIS ESTRUCTURAL.	43
TABLA 4.1 - CONSTANTES REALES DE LOS ELEMENTOS.	45
TABLA 4.2 - PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE LOS ELEMENTOS.	46
TABLA 4.3 - CONDICIONES DE CARGA.	49
FIG. 4.2 - PUNTOS DEL MODELO SÓLIDO (ORIGINAL EN COLORES).	49
FIG. 4.3 - LÍNEAS DEL MODELO SÓLIDO (ORIGINAL EN COLORES).	50
FIG. 4.4 - ÁREAS DEL MODELO SÓLIDO (ORIGINAL EN COLORES).	50
FIG. 4.5 - MODELO DE ELEMENTOS FINITOS (ORIGINAL EN COLORES).	51
FIG. 4.6 - ACERCAMIENTO A ELEMENTOS DEL MODELO (ORIGINAL EN COLORES).	51
FIG. 4.7 - CONDICIONES DE FRONTERA (ORIGINAL EN COLORES).	52
FIG. 4.8 - GRÁFICA DE ESFUERZOS EQUIVALENTES A CARGA MÍNIMA (ORIGINAL EN COLORES).	52
FIG. 4.9 - GRÁFICA DE ESFUERZOS EQUIVALENTES A CARGA MÁXIMA (ORIGINAL EN COLORES).	53
TABLA 5.1 - RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE DURABILIDAD	57
TABLA 5.2 - RESULTADOS DE PRUEBAS DE DURABILIDAD DE MUELLES MULTI - HOJAS.	59
FIG. 5.1 - GRÁFICA DE ESTIMACIÓN DE DURABILIDAD - RESULTADOS DE PRUEBAS DE DURABILIDAD.	60
FIG. A.1 - TÉRMINOS RELACIONADOS (1).	67
FIG. A.2 - TÉRMINOS RELACIONADOS (2).	68
FIG. A.3 - TIPOS DE ABRAZADERAS.	68
FIG. A.4 - TIPOS DE ACABADOS DE LOS EXTREMOS DE LAS HOJAS.	70
FIG. A.5 - TIPOS DE ACABADOS DE LOS EXTREMOS DE LAS MUELLES.	71
FIG. A.6 - RELACIÓN ENTRE EL FACTOR DE CORRECCIÓN DE BRIDGMAN $\sigma_F / (P/A)$ Y LA DEFORMACIÓN VERDADERA EN TENSIÓN	72
TABLA B.1 - PRUEBAS COMUNES Y APLICACIONES EN ANÁLISIS DE FATIGA.	78
FIG. B.1 - GRÁFICA ESFUERZO - DEFORMACIÓN	79
FIG. B.2 - GRÁFICA DE ESFUERZO VERDADERO - DEFORMACIÓN PLÁSTICA	79
TABLA B.2 - RESUMEN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE TENSIÓN	81

FIG. B.3 - GRÁFICA DE AMPLITUD DEL ESFUERZO CONTRA NÚMERO DE CAMBIOS DE ESFUERZO PARA FALLA	82
FIG. B.4 - CICLO ESTABLE DE HISTÉRESIS DE ESFUERZO - DEFORMACIÓN.	84
FIG. B.5 - CURVA CÍCLICA ESFUERZO - DEFORMACIÓN DIBUJADA A TRAVÉS DE LOS EXTREMOS DE CICLOS ESTABLES DE HISTÉRESIS.	84
FIG. B.6 - GRÁFICA ESFUERZO - DEFORMACIÓN PLÁSTICA CÍCLICA	85
FIG. B.7 - GRÁFICA AMPLITUD DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA CONTRA NÚMERO DE CAMBIOS DE DEFORMACIÓN PARA FALLA.	87
FIG. B.8 - GRÁFICA AMPLITUD DE DEFORMACIÓN CONTRA NÚMERO DE CAMBIOS DE DEFORMACIÓN PARA FALLA.	87
TABLA B.3 – RESUMEN DE LAS PROPIEDADES CÍCLICAS.	88
FIG. C.1 - DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE UNA MUELLE MULTI - HOJAS.	91
FIG. C.2 - VIGA EN VOLADIZO DE UNA MUELLE MULTI - HOJAS.	93
FIG. C.3 - DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE UNA VIGA EN VOLADIZO DE UNA MUELLE.	93
FIG. D.1 - ELEMENTO ESTRUCTURAL SÓLIDO 2-D.	99
FIG. D.2 - ELEMENTO DE CONTACTO 2-D (PUNTO - SUPERFICIE).	100
FIG. D.3 - VIGA 2-D.	101
FIG. E.1 - MUELLE TIPO 1.	103
FIG. E.2 - MUELLE TIPO 2.	104
FIG. E.3 - MUELLE TIPO 3.	105

1 INTRODUCCIÓN.

1.1 CICLO DE DESARROLLO DEL PRODUCTO.

Los procedimientos de ingeniería utilizados por la industria automotriz para mejorar la integridad estructural en los vehículos están evolucionando continuamente.

Los primeros ingenieros utilizaron muchos métodos de prueba y error en sus diseños de máquinas, esto provocó el desarrollo de pruebas experimentales y procedimientos; asimismo, a la par del desarrollo de la ingeniería, muchas tecnologías analíticas también fueron introducidas para lograr mejoras en los procedimientos de diseño.

Actualmente, cambios significativos están llevándose a cabo en instrumentación, procedimientos de análisis, métodos de manejo y análisis de datos, entre otros. Como es el caso de las tecnologías de asistencia computarizada CAD y CAE, y los nuevos instrumentos y técnicas utilizados para la caracterización de materiales. Mientras éstas y otras tecnologías continúen evolucionando, los ingenieros tendrán la oportunidad de utilizar estos nuevos recursos para lograr mejoras en sus procedimientos de diseño.

La práctica actual en esta área, y los desarrollos futuros, pueden ser mejor entendidos revisando el proceso total de desarrollo de un producto que es utilizado por muchas compañías en la industria automotriz. La figura 1.1 muestra una serie de pasos típica que es usada en el desarrollo de un nuevo producto.

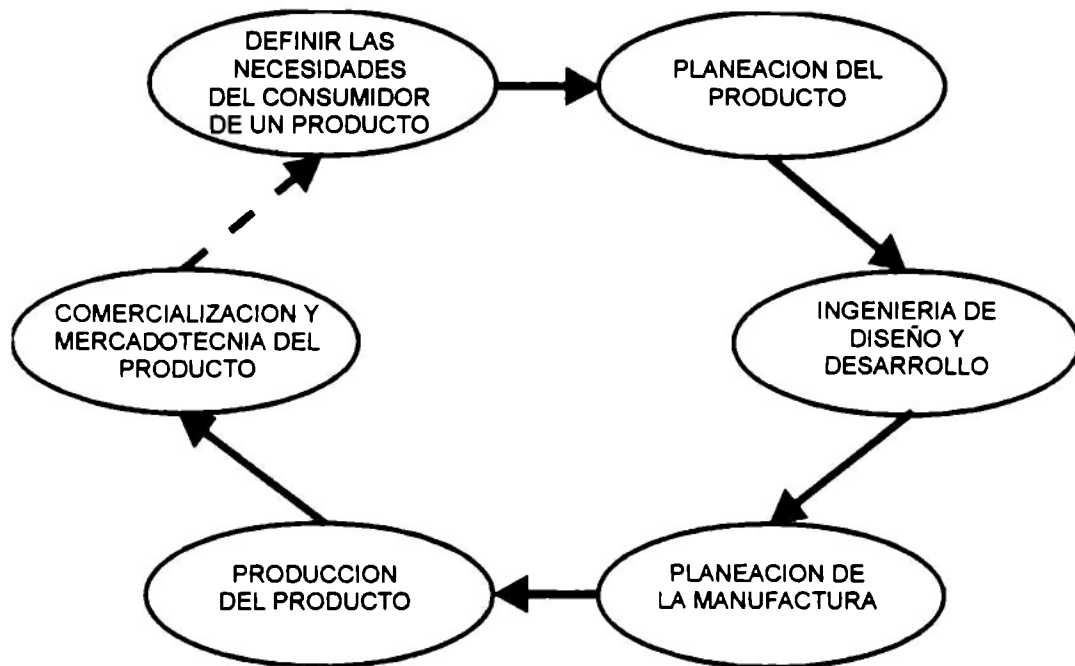


Fig. 1.1 - Ciclo de desarrollo del producto.

El elemento en la posición superior izquierda sugiere que el proceso de diseño debe iniciar con una percepción clara de las necesidades del cliente. El siguiente paso de la planeación del producto es necesario para asegurar que la familia de productos que será producida, sea competitiva en costo y para asegurar que las necesidades del cliente serán satisfechas en cualquier parte del mundo donde el producto se venda.

El siguiente paso en la figura es el que este trabajo describirá extensivamente, el proceso de ingeniería de diseño y desarrollo. Los siguientes dos bloques en la figura se refieren a la planeación de las instalaciones de manufactura requeridas para hacer los componentes y las dificultades que se pueden encontrar en la producción y ensamble del producto.

El paso final en el ciclo es la comercialización y mercadotecnia del producto para satisfacer las necesidades que fueron definidas al inicio del ciclo.

Cada uno de los pasos en esta figura se muestran en serie, esto no significa que algunos de ellos no puedan ser realizados en paralelo. En realidad, muchas compañías están realizando una integración de sus actividades de diseño, análisis y pruebas en el proceso de desarrollo del producto. Una integración efectiva de estos pasos puede reducir los costos y el tiempo del ciclo de desarrollo, además de asegurar la obtención de productos optimizados desde el punto de vista del diseño, la manufactura y el ensamble.

1.2 METAS DE DISEÑO Y PLANEACIÓN DEL PRODUCTO.

Para planear adecuadamente un producto, el ingeniero puede necesitar realizar encuestas para determinar las necesidades del cliente. Esto es frecuentemente realizado a través de centros de ventas, organizaciones técnicas, reportes de universidades, o alguna organización relacionada con los clientes. En esas encuestas es importante considerar las diferentes funciones que se espera que un producto realice en su región de venta. Debería realizarse una encuesta a clientes en cada área para determinar el rango de usos esperados.

Los resultados de tales encuestas pueden ser usados por un departamento de ingeniería para especificar una familia de productos que satisfagan varias necesidades de diferentes clientes. Esta estimación también debe incluir la vida de servicio deseada o la vida de ingeniería de diseño para los diversos tipos de clientes que usan el producto.

1.3 ANÁLISIS DE USO DEL PRODUCTO.

La forma de uso de muchos productos primordialmente resulta de las diferentes aplicaciones para las cuales el producto fue diseñado para realizar. Es esencial que el diseñador entienda cómo las cargas físicas son producidas en el producto mientras éste está siendo usado por el consumidor.

La manera en la cual un producto interactúa con el ambiente en servicio produce fuerzas en éste, las cuales cargan su estructura interna. Antes de que el diseñador pueda analizar la importancia de estas cargas, es necesario caracterizar sus magnitudes, frecuencia, etc.

Para evaluar la durabilidad de un producto para cualquier configuración específica, área de uso y tipo de consumidor, el diseñador debe obtener y evaluar la información de cargas para las diferentes series de operación del producto.

Diferentes conjuntos de operaciones pueden ser realizadas con el mismo diseño del producto dependiendo de la multiplicidad de funciones, áreas de uso, y tipos de consumidores. Si hay información disponible de cada operación, el problema puede ser reducido a considerar los conjuntos de operaciones apropiados y su porcentaje de uso total correspondiente.

1.4 CONSIDERACIÓN DE MODOS DE FALLA.

El conocimiento de como un producto es sometido a cargas ayudará al entendimiento de los potenciales modos de falla que deben ser considerados en la fase de análisis del diseño. Las sobrecargas pueden causar fluencia. Las cargas cíclicas pueden eventualmente iniciar grietas de fatiga en las áreas con esfuerzos elevados y cargas cíclicas adicionales pueden ocasionar que estas grietas se propaguen y eventualmente causar la falla del producto.

Dependiendo del tipo de uso, condiciones del medio ambiente, etc., la apariencia y la corrosión también pueden ser potenciales modos de falla a considerar. Estos mecanismos de daño también son acumulativos, y el uso continuo puede ocasionar una eventual falla.

El principal modo de falla que los diseñadores de la industria automotriz deben de considerar es fatiga, ya que los componentes de los vehículos están sometidos a diversas cargas variables durante su funcionamiento.

1.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.

Históricamente, los ingenieros han usado la resistencia a la fluencia y la resistencia última de los materiales como información en la fase inicial del diseño de productos. Esto fue hecho para prevenir fallas estáticas que podrían haber resultado cuando un producto experimental fuera probado en campo y sujeto a las cargas máximas anticipadas. El uso de tales procedimientos de diseño no toma en cuenta la importancia de las cargas cíclicas de pequeña amplitud. El daño por fatiga resultado de estas cargas cíclicas es generalmente acumulativo y puede ser requerido un tiempo de vida de prueba para determinar si ocurrirá un inicio de grieta. Por lo tanto, es esencial caracterizar las propiedades de fatiga del material que será utilizado, como también las formas de uso del producto; basándose en las propiedades de fatiga apropiadas y la historia de cargas esperada se puede hacer una estimación de la vida en fatiga (durabilidad).

Se pueden utilizar diferentes procedimientos de análisis de fatiga dependiendo de los modos de falla y carga anticipados, así como de las características del material del producto. Dependiendo de los modos de falla anticipados, un ingeniero puede hacer cambios de materiales para mejorar el diseño. Un ingeniero debe conocer con precisión los diferentes mecanismos de falla y realizar una selección del material que optimizará el diseño.

1.6 PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS.

El bloque de ingeniería de diseño y desarrollo presentado en la figura 1.1 es un punto clave en el desarrollo de un producto. Un ingeniero puede utilizar un diferente número de herramientas de análisis para facilitar este proceso. Como se mencionó anteriormente, la precisión de estos procedimientos depende del conocimiento del campo de cargas y de las propiedades del material. Un balance apropiado de la información de servicio en campo, las propiedades del material y técnicas de desarrollo de diseño deben ser utilizados por un departamento de ingeniería para desarrollar productos con una integridad estructural adecuada y que sean competitivos en el mercado.

Si un ingeniero carece de la información de servicio o propiedades del material, el análisis estará incompleto y el resultado será cuestionable.

1.7 PROCESO DE INGENIERÍA DE DISEÑO Y DESARROLLO.

La figura 1.2 muestra un diagrama de bloques del proceso de ingeniería de diseño y desarrollo. Se puede observar que la historia de cargas de servicio y las propiedades del material son las dos

entradas básicas necesarias para hacer análisis tanto experimentales como analíticos de un diseño propuesto durante la fase de ingeniería de desarrollo.

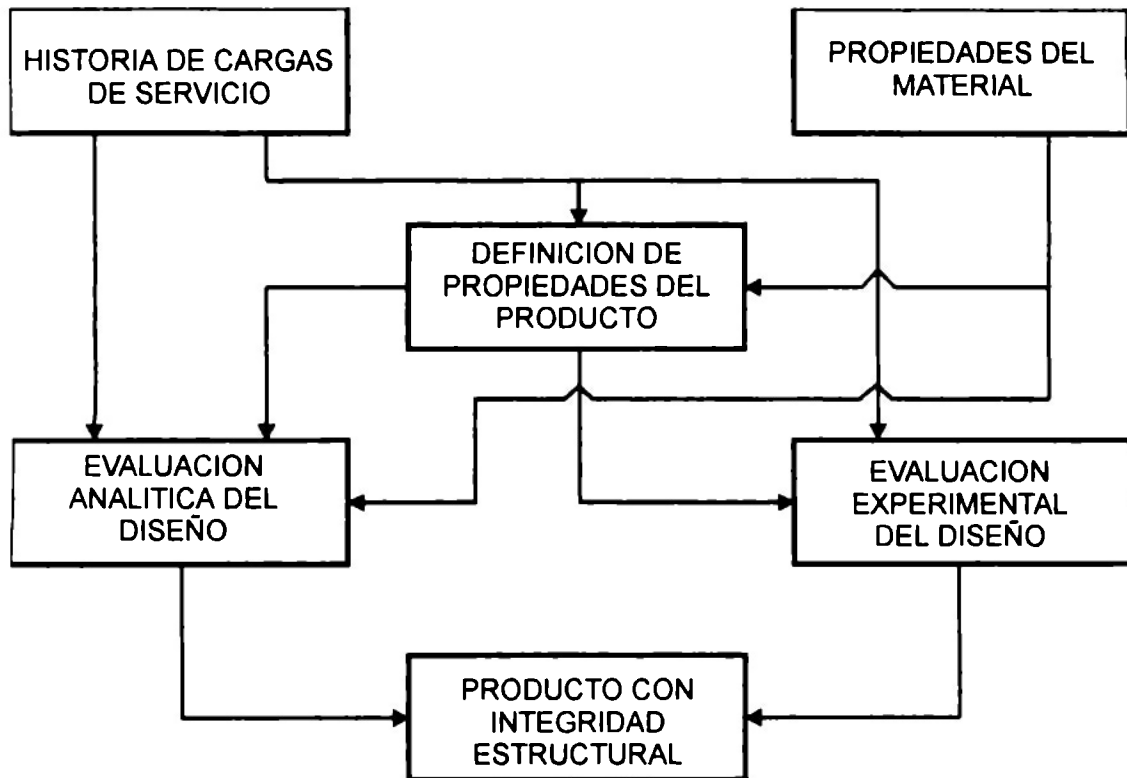


Fig. 1.2 - Proceso de ingeniería de diseño y desarrollo.

1.7.1 EVALUACIÓN DEL DISEÑO.

La figura 1.3 muestra un diagrama de bloques de la evaluación tanto experimental como analítica del diseño propuesto de un producto [1].

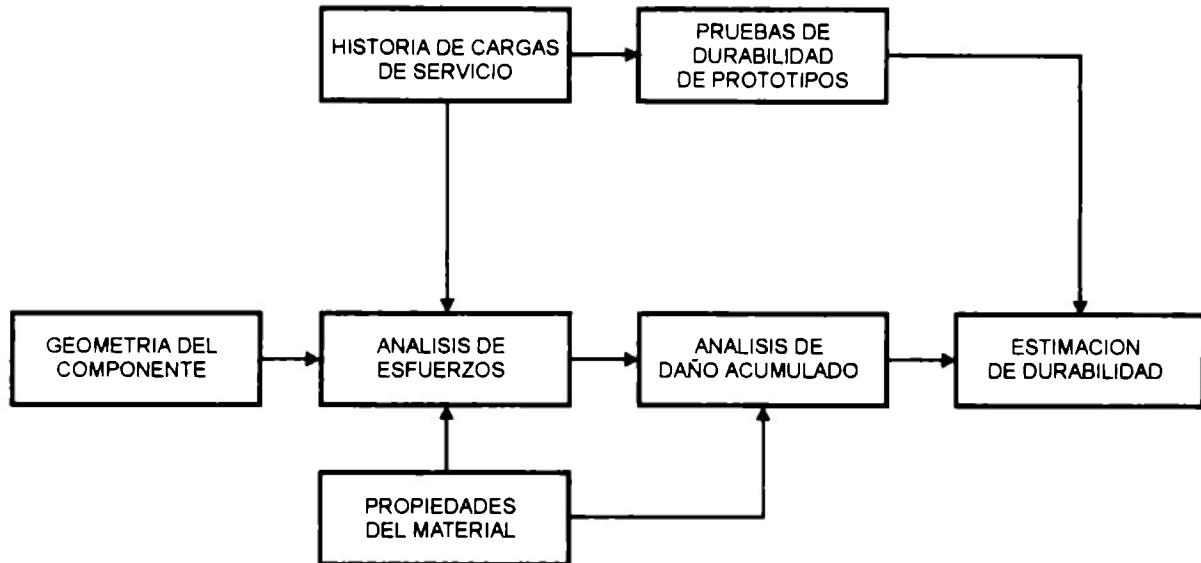


Fig. 1.3 - Proceso de evaluación de un producto.

A continuación se hará una breve descripción de cada uno de los pasos necesarios para realizar una predicción o estimación de la vida en fatiga (durabilidad) de un producto.

1.7.1.1 Cargas de servicio.

Primero tiene que obtenerse una descripción del ambiente de servicio. El objetivo es conseguir una representación precisa de las cargas, deflexiones, etc., que podría experimentar el componente durante su vida total.

1.7.1.2 Análisis de esfuerzos.

La forma del componente o estructura define cómo responderá éste a las cargas de servicio en términos de esfuerzos, deformaciones y deflexiones. Existen diversos métodos analíticos y experimentales disponibles para cuantificar este comportamiento. Actualmente se utilizan diversos métodos numéricos como el método del elemento finito con el cual se pueden obtener resultados muy precisos y pueden llevarse a cabo en un tiempo relativamente corto en diferentes programas comerciales (Tecnologías CAE).

1.7.1.3 Propiedades del material.

Un requerimiento fundamental para cualquier estimación de durabilidad es el conocimiento de la relación entre esfuerzo y deformación, y la vida en fatiga del material bajo consideración. La fatiga es un fenómeno altamente localizado que depende de los esfuerzos y deformaciones que se presentan en las regiones críticas de las estructuras o componentes.

La relación entre esfuerzo y deformación uniaxial es única para cada material, consistente y en muchos casos, independiente de la localización. Por lo tanto, una muestra probada en el laboratorio bajo condiciones uniaxiales simples puede ser usada para representar adecuadamente el comportamiento de un elemento del mismo material en una área crítica de un componente o estructura.

La relación entre esfuerzo y deformación que debe ser modelada es la respuesta cíclica del material en lugar de la estática. La curva esfuerzo - deformación cíclica toma en cuenta el comportamiento de endurecimiento o ablandamiento de los materiales cuando son expuestos a cargas cíclicas.

La información de fatiga (rango de esfuerzo o deformación contra ciclos para la falla) normalmente debe ser desarrollada sobre el rango total de vida (durabilidad), desde el límite de fatiga aparente en el rango de vida larga hasta el régimen de fatiga de bajos ciclos. Para analizar adecuadamente una estructura es necesaria la información de fatiga que cubra un rango amplio de durabilidad, ya que muchos conceptos de diseño basados únicamente en el límite de fatiga son demasiado conservadores.

1.7.1.4 Análisis de daño acumulado.

El proceso de predicción o estimación de durabilidad o análisis de daño acumulado de regiones críticas en un componente o estructura consiste en varios pasos estrechamente relacionados. Una combinación de la historia de cargas en servicio, análisis de esfuerzos y las propiedades cíclicas esfuerzo-deformación del material pueden ser utilizadas para simular la respuesta uniaxial de esfuerzo - deformación en regiones críticas, a través de este proceso es posible lograr buenas estimaciones de las amplitudes de esfuerzos locales, esfuerzos medios y deformaciones elásticas y plásticas para cada evento de la historia de cargas. La contribución de daño de estos eventos es comparada con los datos de fatiga del material generados en pruebas de laboratorio en pequeñas muestras. Las fracciones de daño de cada evento son sumadas linealmente para obtener una estimación del daño total para una historia de cargas en particular.

1.7.1.5 Pruebas de durabilidad.

Las pruebas de durabilidad en laboratorio a escala natural (1:1) son un aspecto esencial para cualquier evaluación de vida en fatiga de un componente o estructura. Deben de llevarse a cabo en algún paso del desarrollo de un producto para obtener confianza en el desempeño en servicio del producto. Las pruebas de componentes son particularmente importantes en la industria actual, donde el diseño de reducción de peso y costos de producción deben ser balanceados con la necesidad de evitar costosas fallas al poner en servicio el componente.

La etapa en la cual las pruebas de durabilidad se deben ejecutar y el grado de complejidad de las mismas, debe basarse en el conocimiento de la función y la importancia del componente. Se pueden realizar pruebas simples y rápidas cerca del final del proceso de desarrollo cuando el ambiente de operación y los productos están comprensivamente entendidos y cuando se han usado métodos analíticos de evaluación, anteriormente probados, para realizar evaluaciones preliminares del producto.

En situaciones donde los métodos analíticos están aún en desarrollo o los mecanismos de falla, materiales, distribución de esfuerzos o la historia de cargas son complejos, puede ser apropiado realizar experimentos de laboratorio en la fase inicial del desarrollo.

1.8 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En el mercado competitivo actual, las compañías están buscando cómo mejorar la calidad de sus productos, el desempeño y la durabilidad, como también disminuir el tiempo para llevar un producto al mercado. La complejidad de los productos actuales demanda el uso de las tecnologías más avanzadas para optimizar el diseño de los productos e incrementar la competitividad.

Frecuentemente la durabilidad del producto no es analizada en detalle sino hasta la fase de pruebas de durabilidad de prototipos. Además, el uso únicamente de pruebas no permite evaluar todos los parámetros de diseño y normalmente las fallas relacionadas con fatiga no son descubiertas sino hasta que el producto ha estado en servicio por algún tiempo. En este caso los problemas de fatiga pueden tener efectos indeseables, incluyendo demandas de sustitución del producto y daño en la reputación del mismo. Por lo tanto, la predicción o estimación analítica de la durabilidad de un producto es un paso importante en el proceso de diseño del mismo.

Por otra parte, el uso de las técnicas CAD - CAE en la evaluación analítica de un diseño propuesto, proporciona la capacidad de variar los parámetros de diseño permitiendo explorar los efectos de estos parámetros sin construir prototipos, reduciendo los costos y el tiempo de desarrollo.

En conclusión, la habilidad de estimar la durabilidad realizando un análisis confiable de fatiga en la fase de diseño del producto, ofrece grandes beneficios: reduce los costos de desarrollo y pruebas con prototipos, disminuye el tiempo para que el producto llegue al mercado y mejora la durabilidad del mismo.

Las muelles multi - hojas son un componente muy utilizado en los sistemas de suspensión de diversos vehículos automotrices, las cuales tienen que ser diseñadas para satisfacer una especificación de durabilidad, por lo tanto, es necesario contar con un método analítico para estimar su durabilidad durante la etapa de diseño.

1.9 OBJETIVO.

Desarrollar una metodología analítica asistida por técnicas CAD - CAE para la estimación de la durabilidad de muelles multi - hojas sometidas a una prueba de fatiga de flexión en 3 puntos de amplitud constante.

1.9.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Obtener las propiedades del material empleado para la fabricación de muelles multi - hojas necesarias para realizar una estimación de durabilidad:
 1. Curva esfuerzo - deformación (s-e).
 2. Curva esfuerzo - ciclos para falla (s-n).
- Desarrollar un método para determinar los esfuerzos que experimenta una muelle multi - hojas durante una prueba de fatiga utilizando un programa comercial para realizar análisis estructurales (técnicas CAD - CAE).
- Sistematizar el método desarrollado para el análisis de esfuerzos de muelles multi - hojas.
- Desarrollar un método analítico para la estimación de durabilidad de muelles multi - hojas a partir de las propiedades del material y los resultados del análisis de esfuerzos.
- Establecer parámetros de correlación entre los resultados de la estimación de durabilidad obtenidos por el método propuesto y resultados experimentales de pruebas de durabilidad de muelles multi - hojas.

2 MUELLES MULTI HOJAS.

2.1 FUNCIÓN Y APLICACIÓN.

Una muelle multi - hojas, como cualquier otra muelle, sirve para absorber y almacenar energía que posteriormente emitirá.

Durante este ciclo los esfuerzos de la muelle no deben exceder un límite para evitar una deformación permanente o falla prematura. Esta consideración limita la cantidad de energía que puede ser almacenada por una muelle.

Comparando la energía por unidad de masa que pueden almacenar distintos tipos de muelles (resortes helicoidales, barras de torsión y muelles multi - hojas) se puede observar que las muelles multi - hojas pueden almacenar menor energía por unidad de masa que los otros tipos de muelles.

A pesar de esta desventaja, las muelles multi - hojas poseen la ventaja de que pueden ser utilizadas como un elemento estructural o de fijación. Para poder ser competitivas desde el punto de vista económico, las muelles multi - hojas deben ser diseñadas para que esta ventaja sea ampliamente utilizada.

Dentro de la industria automotriz, las muelles multi - hojas son utilizadas como un componente del sistema de suspensión de vehículos de diversas aplicaciones y capacidades. En su mayoría se emplean en los vehículos con sistema de suspensión dependiente de eje rígido y muelle multi - hojas longitudinal (suspensión Hotchkiss, ver figura 2.1). Su función principal es servir como un elemento de unión flexible entre el eje y el chasis, evitando que los impactos recibidos por el eje sean transmitidos directamente al vehículo. También son utilizadas en vehículos con sistema de suspensión independiente con muelle multi hojas - transversal.

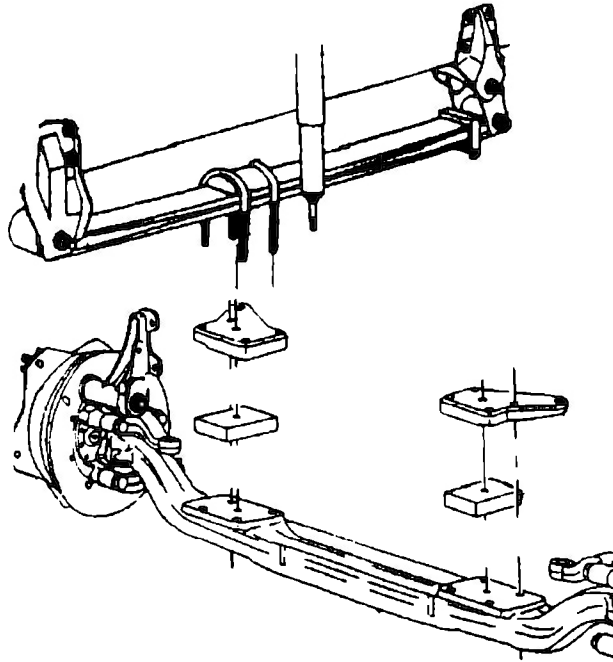


Fig. 2.1 - Suspensión tipo Hotchkiss.

2.2 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS.

2.2.1 CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS.

Los términos que usualmente son empleados para describir las características elásticas básicas de una muelle multi - hojas son la carga y la constante elástica [11].

2.2.1.1 Carga (P).

Es la fuerza que se requiere aplicar a la muelle para obtener una altura o altura total especificada. Esta fuerza es mayor durante la aplicación de carga en la muelle (carga de compresión) que durante la descarga. La carga debería ser el promedio de la carga de compresión y la carga de descarga.

Por razones prácticas, la carga como la constante elástica son medidas solamente en términos de carga de compresión.

La tolerancia de la carga es usualmente expresada como un rango de carga el cual equivale a una deflexión (diferencia de altura) a la constante elástica nominal.

2.2.1.2 Constante elástica (k).

Es el cambio en carga por unidad de deflexión de la muelle, se expresa en unidades de fuerza por unidad de longitud. Para muelles multi - hojas ésta es determinada midiendo la carga a una altura mayor de 25 mm y menor de 25 mm de la altura especificada para la carga.

$$k = \frac{\Delta P}{\delta} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (2.1)$$

Donde:

δ - deflexión del centro de la muelle en unidades de longitud.

$\Delta P = P2 - P1$ - diferencia de cargas en unidades de fuerza.

$\Delta A = A2 - A1$ - diferencia de alturas en unidades de longitud.

En lugar de medir las cargas en la altura especificada y 25 mm arriba y abajo de ésta, algunos fabricantes acostumbra medir cargas en más de 3 puntos durante la carga y descarga construyendo una gráfica carga - altura (carga - deflexión) completa. Estos diagramas son obtenidos preferiblemente cargando y descargando continuamente y graficando los datos con un graficador x - y, la carga y la constante elástica pueden ser obtenidas de la gráfica (ver figura 2.2).

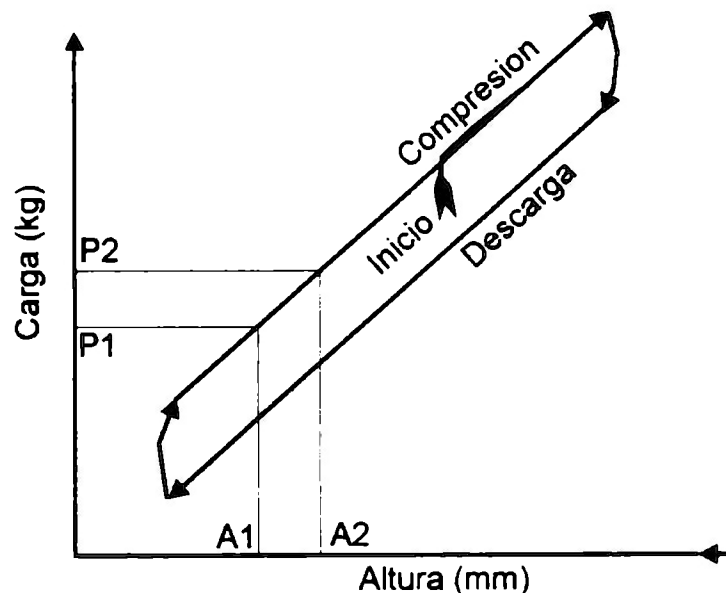


Fig. 2.2 - Gráfica carga - altura típica de una muelle multi - hojas.

Cuando se mide la carga, los extremos de la muelle deben estar libres para moverse en dirección horizontal. Los extremos están usualmente montados en carros con ruedas que se desplazan sobre una mesa rígida. La muelle debe estar soportada en sus extremos y la carga debe aplicarse verticalmente arriba de la hoja más corta en el centro de la muelle (ver figura 2.3).

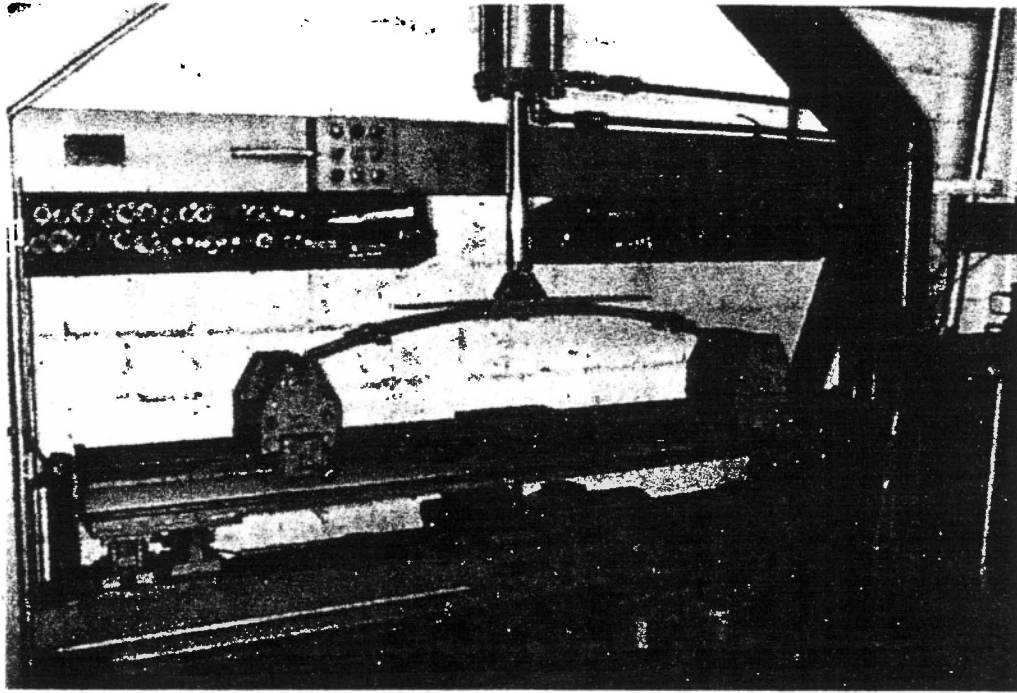


Fig. 2.3 - Equipo de medición de características elásticas (Original en colores).

Cabe destacar, que si estas propiedades son medidas sin emplear las placas de asiento y el eslabón para ensamble, que normalmente se emplean en el ensamble de la muelle en el vehículo, se obtendrían las propiedades a muelle libre. No serían las mismas propiedades que la muelle presentará instalada en el vehículo (propiedades a muelle ensamblada). Si es necesario obtener las propiedades a muelle ensamblada es indispensable emplear las placas de asiento y el eslabón para ensamble (columpio) durante las pruebas (ver figuras 2.4 y 2.5).

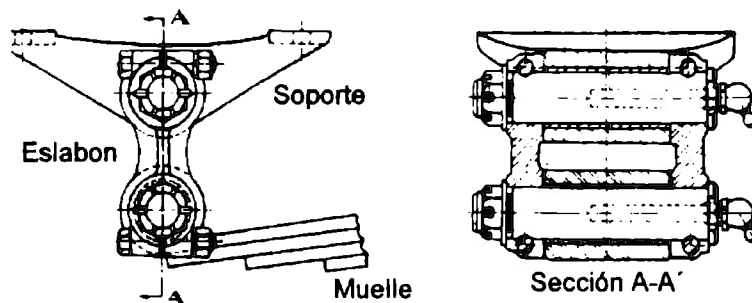


Fig. 2.4 - Eslabón para ensamble de la muelle en el chasis (columpio).

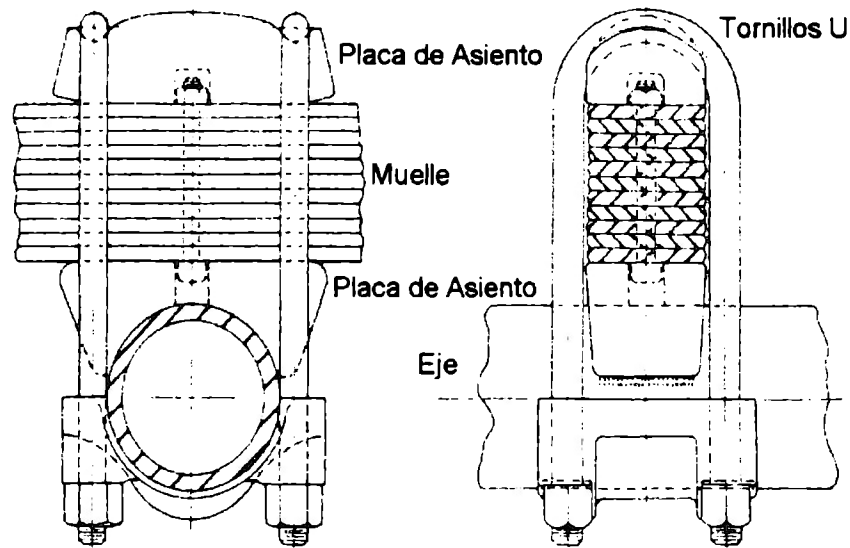


Fig. 2.5 - Placas de asiento para fijación de la muelle al eje del vehículo.

2.2.2 DURABILIDAD (N).

La durabilidad es expresada como el número de ciclos de flexión en los que una muelle se mantendrá sin presentar falla bajo una prueba de durabilidad equivalente, definiéndose como falla la fractura de alguna de sus hojas [11].

Debe entenderse que el número de ciclos de durabilidad estimados es un promedio estadístico y que los resultados de durabilidad mostrarán cierta dispersión a pesar de que las pruebas se realicen bajo condiciones controladas. La magnitud de la dispersión dependerá de la consistencia de la condición superficial, fabricación y calidad general de las muelles que estén siendo evaluadas.

Una prueba de durabilidad equivalente se define como una prueba de fatiga de amplitud constante que produce la misma durabilidad media que la historia real de cargas. Son un método acelerado para examinar las muelles para propósitos de evaluación del diseño y control de calidad.

En pruebas de campo, una muelle utilizada en un sistema de suspensión de un vehículo estará sometida a un número muy elevado de ciclos de pequeña amplitud cerca de la posición de carga de diseño. Por lo que una prueba de amplitud constante de unos pocos cientos de miles de ciclos de máxima deflexión posible, reproducirá la historia de campo de manera apropiada. Las razones para esto son: 1) grandes amplitudes generan mayor daño de fatiga y 2) el uso en campo es tan diverso que cualquier historia de campo sería tan equivocada como una prueba de amplitud constante.

Además, a grandes amplitudes (esfuerzos elevados) la dispersión de los resultados es teóricamente reducida, lo que significa que un número menor de pruebas producirá un cierto grado de precisión en la durabilidad estimada de la población. Mientras que a esfuerzos bajos se obtendrían resultados más realistas, ya que simularían con mayor precisión las condiciones reales de servicio de la muelle, los resultados tendrían una mayor dispersión.

Durante las pruebas de durabilidad, se simula el montaje de la muelle en el vehículo utilizando las placas de asiento y el columpio (ver figura 2.6).

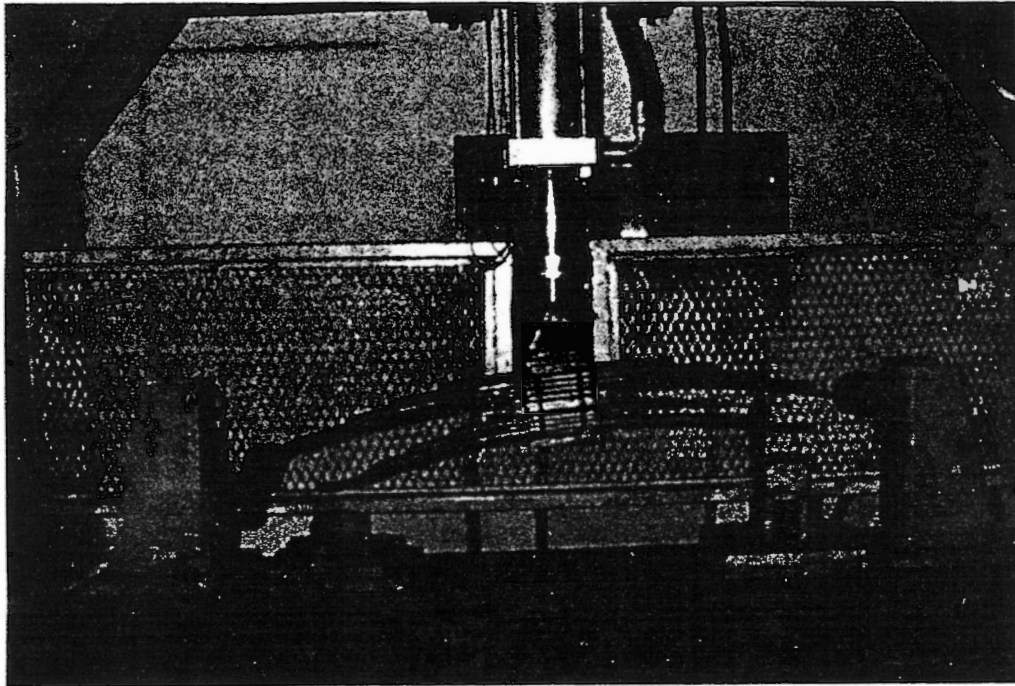


Fig. 2.6 - Equipo de pruebas de durabilidad (Original en colores).

2.3 CLASIFICACIÓN.

Las muelles se pueden clasificar por sus características elásticas en [11]:

2.3.1 MUELLE CONVENCIONAL.

Poseen la característica de que su constante elástica es constante a lo largo de todo el rango de carga de funcionamiento. Su comportamiento elástico queda completamente definido con los siguientes parámetros: altura de diseño (A_d), carga de diseño (P_d) y constante elástica (k), el cual puede ser representado por la ecuación de una recta (figura 2.7):

$$P(A) = P_d + k(A_d - A) \text{ en } A_m \leq A \leq A_l$$

(2.2)

Donde :

A_l - Altura libre o altura de la muelle sin carga.

$$A_l = \frac{P_d}{k} + A_d$$

(2.3)

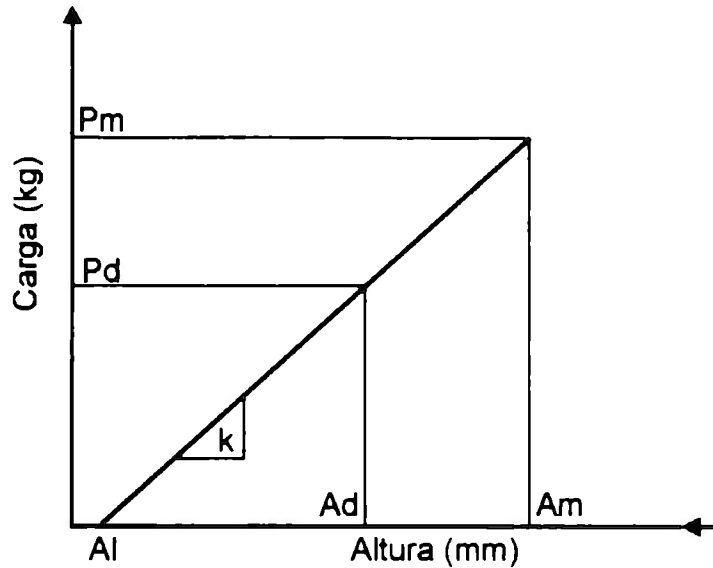


Fig. 2.7 - Gráfica carga - altura y esquema de una muelle convencional.

2.3.2 MUELLE PROGRESIVA.

2.3.2.1 Muelle progresiva de varias estaciones.

Son muelles que normalmente poseen 2 rangos de carga donde su constante elástica es constante pero diferente en cada uno de ellos. Su comportamiento elástico queda completamente definido con los siguientes parámetros: constante elástica de la primera estación (k_1), constante elástica de la segunda estación (k_2), primera altura (A_c), altura de diseño (A_d), primera carga (P_c) y carga de diseño (P_d), el cual puede ser definido por las ecuaciones de las rectas (figura 2.8):

$$P(A) = P_c + k_1(A_c - A) \text{ en } A_t \leq A \leq A_l$$

(2.4)

$$P(A) = P_d + k_2(A_d - A) \text{ en } A_m \leq A \leq A_t$$

(2.5)

Donde :

A_t - altura teórica de transición o inicio de contacto.

$$A_t = \frac{P_d + k_2 \cdot A_d - P_c - k_1 \cdot A_c}{(k_2 - k_1)} \quad (2.6)$$

$$A_l = \frac{P_c}{k_1} + A_c \quad (2.7)$$

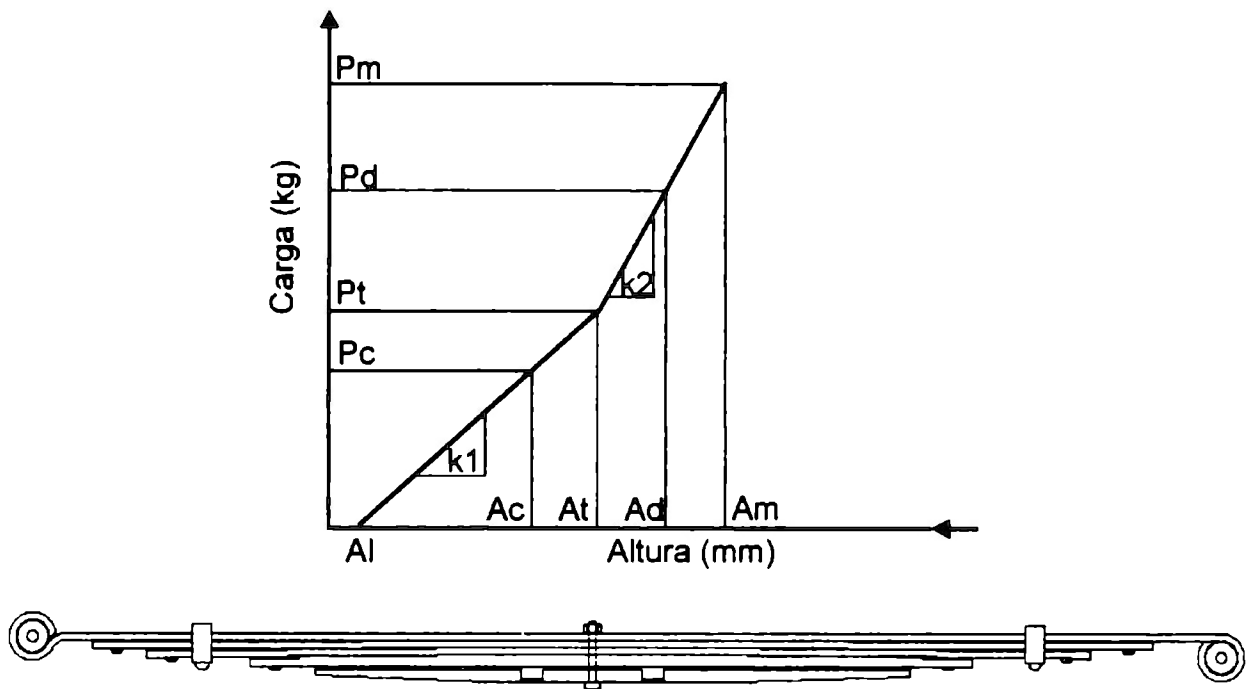


Fig. 2.8 - Gráfica carga - altura y esquema de una muelle progresiva de 2 estaciones.

2.3.2.2 Muelle progresiva con constante elástica variable.

Estas muelles se caracterizan por presentar una constante elástica variable a lo largo de su rango de carga de función. Puesto que la longitud efectiva de trabajo de la muelle es variable debido a que se apoyan sus extremos sobre camas que permiten el deslizamiento de los mismos. Su comportamiento elástico queda definido por: constante elástica a altura de diseño (k), carga de diseño (P_d) y altura de diseño (A_d), la cual puede ser representada por la ecuación de la curva (figura 2.9):

$$P(A) = a + b \cdot A + c \cdot A^2 + d \cdot A^3 \quad (2.8)$$

Donde:

a , b , c y d - son constantes que están determinadas por la geometría de los apoyos y las dimensiones de la muelle.

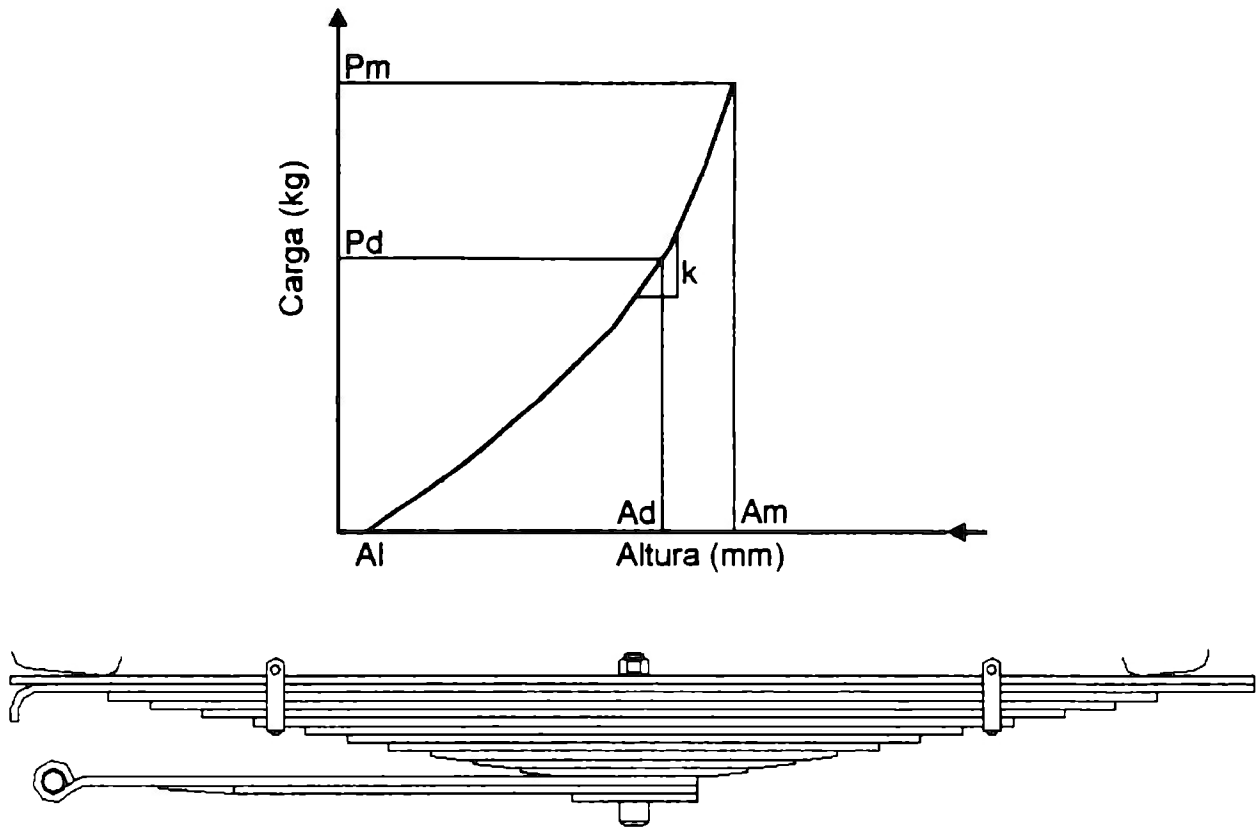


Fig. 2.9 - Gráfica carga - altura y esquema de una muelle progresiva con constante elástica variable.

2.4 MATERIAL PARA FABRICACIÓN DE MUELLES MULTI HOJAS.

Para la fabricación de muelles automotrices se debe emplear una placa laminada en caliente con 2 caras planas y 2 caras redondeadas (convexas). Esto fue adoptado por SAE en 1938 [11]. La redondez de las caras convexas debe tener un radio de curvatura que puede variar de 65-85% del espesor de la barra (figura 2.10).

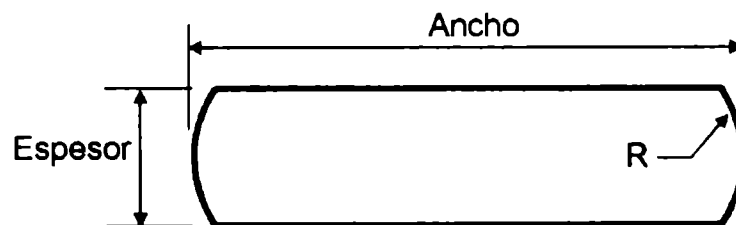


Fig. 2.10 - Sección transversal de solera para una hoja de una muelle multi - hojas.

2.4.1 ACERO.

El requerimiento básico del acero de una muelle es una templabilidad suficiente para asegurar una estructura completamente martensítica en toda su sección, ya que transformaciones no martensíticas producen disminución de las propiedades de fatiga.

Las muelles automotrices han sido fabricadas de varios aceros aleados de grano fino: SAE 9260, SAE 4068, SAE 4161, SAE 6150, SAE 8660, SAE 5160, SAE 51B60, SAE 5160H SAE 50B60. Actualmente en los Estados Unidos y México casi todas las muelles son fabricadas de aceros aleados con cromo como el SAE 5160 y SAE 5160H [11].

En términos generales, es necesario mayor contenido de aleantes para asegurar una alta templabilidad cuando se utilizan secciones de solera con espesores mayores. La siguiente regla puede ser de ayuda para correlacionar el tamaño del espesor con el grado del acero:

Tabla 2.1 - Correlación entre espesor y grado del acero.

Espesor (mm)	Acero
8.0 max.	SAE 5160
16.0 max.	SAE 5160H
37.5 max.	SAE 51B60

2.4.2 PROPIEDADES MECÁNICAS.

Los aceros con la misma dureza en su condición martensítica tienen aproximadamente la misma resistencia última a la tensión y resistencia a la fluencia, además de que la ductilidad, medida por la elongación y la reducción de área, es inversamente proporcional a la dureza. Basándose en la experiencia, las propiedades mecánicas óptimas para aplicaciones en muelles se obtienen en un rango de dureza de 388-461 BHN (42-49 Rockwell C) [11]. Una especificación para muelles normalmente consiste de un rango que cubre 4 números estándar de dureza Brinell, por ejemplo: 415-461 para espesores delgados.

Las propiedades mecánicas típicas del acero para muelles multi - hojas son las siguientes:

Tabla 2.2 - Propiedades mecánicas del acero para muelles multi - hojas.

Propiedad	Especificación
Dureza	BHN 388-461 (3000 Kg.) Rockwell C 42-49
Resistencia última a la tensión	1200-1700 MPa.
Resistencia a la fluencia (0.2%)	1170-1550 MPa.
Reducción de área	25% min.
Elongación	7% min.

2.5 PROCESOS DE FABRICACIÓN.

2.5.1 PRE - ESFUERZO MECÁNICO .

El pre - esfuerzo mecánico puede hacerse por diferentes métodos. Todos ellos producen fluencia (deformación plástica) en tensión y trabajo en frío cerca de las superficies con mayores esfuerzos o más vulnerables. El regreso a su forma original del material elástico que no fue sujeto a fluencia produce esfuerzos de compresión en las regiones con fluencia.

El objetivo entonces es producir esfuerzos residuales de compresión en las regiones que están más expuestas al daño por fatiga. Ellos también pueden ser usados para eliminar los efectos dañinos de esfuerzos residuales de tensión que podrían haber existido en esas regiones. Existe un beneficio adicional asociado con un aumento local de la dureza que puede contarse como una parte significativa del incremento de durabilidad.

Cuando una carga es aplicada a un muelle multi - hojas, las superficies externas de las hojas están sujetas a los esfuerzos máximos de flexión. Una superficie de la hoja estará en tensión y la opuesta en compresión. La superficie que es cóncava cuando no existen cargas estará generalmente en tensión bajo cargas, mientras que la superficie convexa estará generalmente en compresión.

Las fallas por fatiga en las hojas de una muelle usualmente inician en o cerca de la superficie del lado de tensión. Ya que los esfuerzos son algebraicamente aditivos a los esfuerzos de carga, la introducción de esfuerzos residuales de compresión en la superficie a tensión por pre - esfuerzo mecánico reduce el nivel de esfuerzo operativo, por lo cual se incrementa la durabilidad [15].

2.5.1.1 Granallado¹.

El granallado es el método más versátil de producir esfuerzos residuales. Pequeñas esferas son lanzadas a gran velocidad contra la parte. Ellas producen fluencia local, evidenciada por pequeños cráteres. El regreso del material de la superficie a su estado anterior después de la deformación plástica produce esfuerzos de compresión. El proceso es descrito en detalle en SAE-J808a. La intensidad del granallado es especificada en términos de números Almen, de acuerdo a SAE2442.

La intensidad del granallado aplicada a muelles del tipo ligero o medianas es usualmente de 10A - 20A. Para muelles de alta capacidad, la intensidad usual es de 6C-14C. El cubrimiento en ambos casos debe ser de por lo menos 90%.

Una distribución de esfuerzos típica, producida por el granallado, se muestra en la figura 2.11, la relación del esfuerzo pico contra la dureza del material obtenida por Brodrick [15], se muestra en la figura 2.12, y la profundidad esperada de los esfuerzos residuales en acero como una función de la intensidad pueden verse en la figura 2.13.

¹ Traducción al español de “shot peening”.

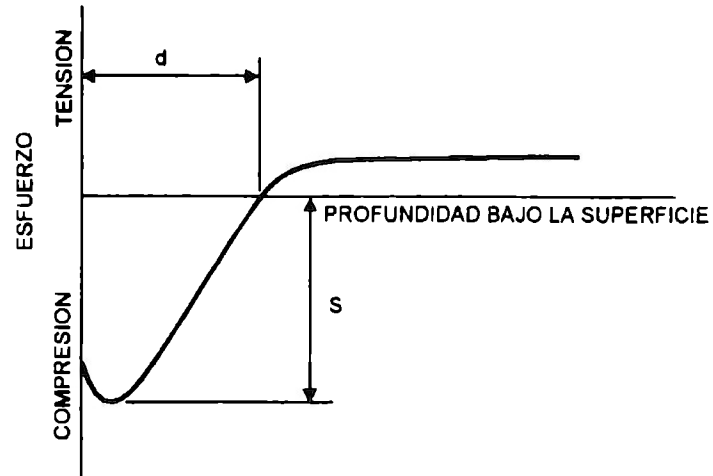


Fig. 2.11 - Distribución típica de esfuerzos residuales debajo de la superficie después del granallado.

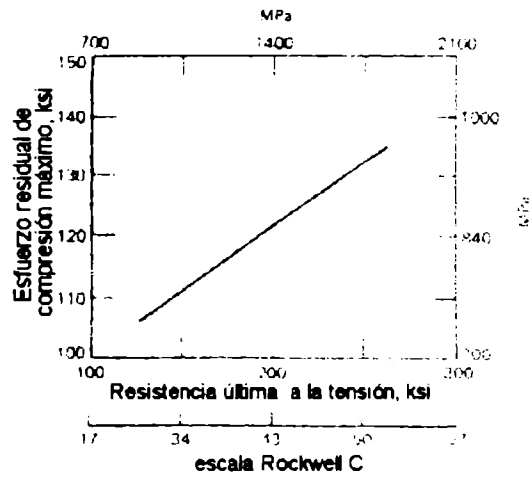


Fig. 2.12 - Esfuerzos residuales producidos por el granallado contra resistencia última a la tensión del acero.

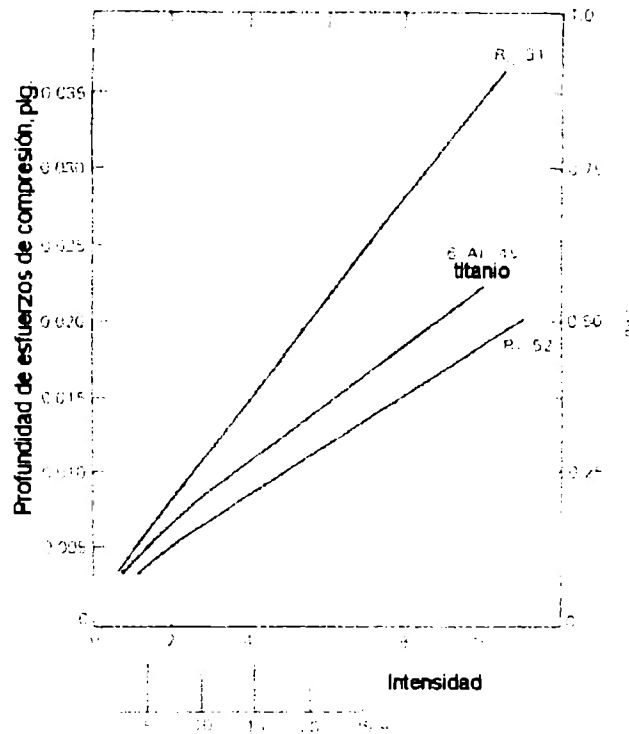


Fig. 2.13 - Profundidad de esfuerzos de compresión contra intensidad Almen para acero.

2.5.1.2 Granallado reforzado².

El granallado reforzado es un medio para inducir esfuerzos residuales mayores que los posibles con el granallado, con la hoja en posición libre (sin carga). El granallado reforzado se realiza dando el proceso convencional de granallado mientras la hoja está bajo carga (bajo cierto esfuerzo) en la dirección de las cargas subsecuentes en servicio.

A las partes que trabajarán bajo esfuerzos unidireccionales puede aplicarse el granallado reforzado para incrementar la durabilidad o resistencia a la fatiga.

La distribución de esfuerzos residuales inducida por este proceso es comparada con la del proceso de granallado convencional en la figura 2.14 [11].

² Traducción al español de "stress shot peening" o "strain peening".

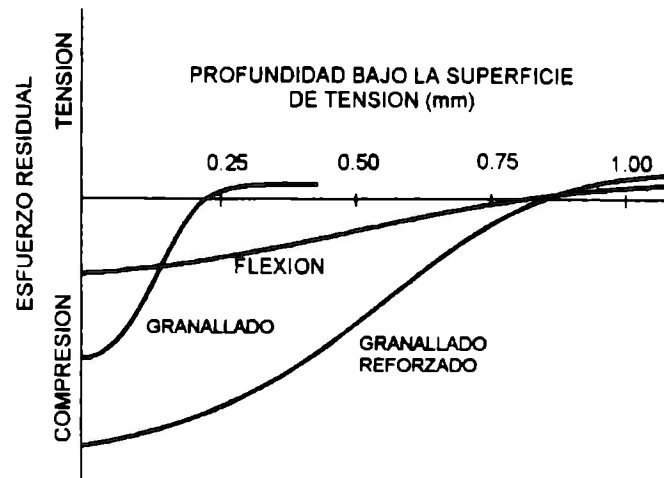


Fig. 2.14 - Comparativo de distribución de esfuerzos residuales.

2.5.2 COMPARATIVO DE LA DURABILIDAD DE MUELLES MULTI HOJAS CON EL PROCESO DE GRANALLADO CONVENCIONAL Y REFORZADO.

Muestras de muelles multi - hojas de acero SAE-5160 y dureza 50Rc fueron procesadas con el granallado reforzado. A las muestras inicialmente planas se les aplicó el granallado reforzado en la cara que estará en tensión durante las pruebas de fatiga mientras que están bajo cierta curvatura longitudinal fija. Después del granallado reforzado, la curvatura de la hoja variará, dependiendo de la cantidad y el signo del esfuerzo aplicado durante el proceso, y los esfuerzos residuales variarán sistemáticamente a lo largo de la longitud de la hoja e influirán altamente el límite de fatiga.

Las curvas S-N de la figura 2.15 indican que el límite de fatiga de muestras convencionales con granallado puede ser incrementado por 1/3 aproximadamente con el proceso de granallado reforzado [15].

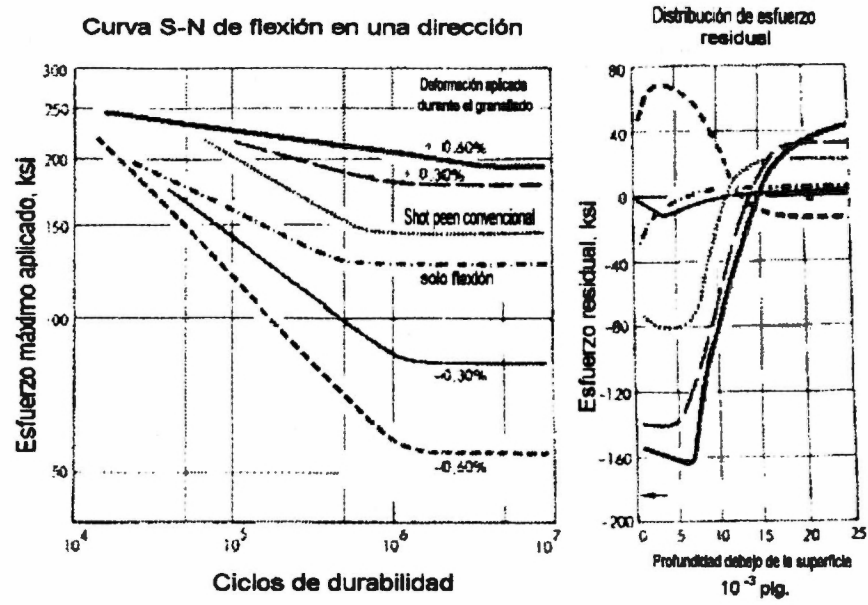


Fig. 2.15 - Esfuerzos residuales y desempeño en fatiga de muestras de muelles multi - hojas con granallado reforzado.

3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.

3.1 PROPIEDADES ESTÁTICAS ESFUERZO - DEFORMACIÓN.

3.1.1 PROCEDIMIENTO.

Se obtuvo las propiedades esfuerzo - deformación de acuerdo a las siguientes normas:

a) Método estándar de pruebas de tensión de materiales metálicos (ASTM E-8).

Este método cubre las pruebas de tensión de materiales metálicos en alguna forma a temperatura ambiente, especialmente, los métodos para determinar la resistencia a la fluencia, la resistencia última a la tensión, la elongación y la reducción de área.

b) Método de prueba para determinar el módulo de Young a temperatura ambiente (ASTM E-111).

Este método cubre el equipo, probetas y procedimiento utilizado para determinar el módulo de Young a temperatura ambiente.

3.1.2 PROBETAS.

a) Tipo: probeta rectangular para ensayos de tensión según ASTM E-8.

b) Dimensiones: Ver figura 3.1.

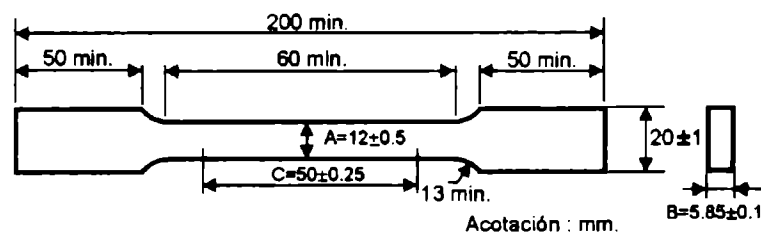


Fig. 3.1- Probeta rectangular para ensayos de tensión.

c) Material: Acero SAE-5160.

d) Condición: Probeta fabricada a partir de solera rolada en caliente para muelle multi - hojas. Maquinada en torno vertical. Austenizada a 900°C, templada en aceite mineral a 90°C y revenida a 450°C en equipo de proceso para la manufactura de muelle multi - hojas. Finalmente, pulida con lija de grano fino No. 6.

e) Dureza: Ver tabla 3.1.

Tabla 3.1 - Resultados de medición de dureza del material de las probetas.

No. de Probeta	Dureza Rc.		
	Medición 1	Medición 2	Medición 3
1	42	43	43
2	45	46	45
3	46	45	46

f) Origen del material: Proveedor (AHMSA).

g) Orientación de la probeta: longitudinal.

h) Tamaño de grano: ASTM 6

i) Composición química en %: 0.56 C, 0.75 Mn, 0.030 P, 0.035 S, 0.015 Si y 0.7 Cr.

3.1.3 EQUIPO.

a) Máquina universal de ensayos Instron modelo 8502.

b) Juego de mordazas tipo cuña.

3.1.4 RESULTADOS.

Las mediciones de la sección transversal y la distancia entre las marcas de la probeta antes de la prueba se muestran en las tablas 3.2 y 3.3.

Tabla 3.2 - Dimensiones originales de la sección transversal de la probeta.

No. de Probeta	(A) Ancho de la sección (mm)				(B) Espesor de la sección (mm)				Área de Sección
	Centro	Extremo a	Extremo b	Promedio	Centro	Extremo a	Extremo b	Promedio	
1	12.07	12.34	11.99	12.13	5.82	5.84	5.85	5.84	70.82
2	11.92	11.75	12.12	11.93	5.85	5.84	5.86	5.85	69.79
3	12.13	12.33	11.86	12.11	5.84	5.82	5.84	5.83	70.62

Tabla 3.3 - Dimensiones originales de la distancia entre marcas de la probeta.

No. de probeta	(C) Distancia (mm)
1	49.90
2	49.93
3	50.10

Las mediciones de la sección transversal y la distancia entre las marcas de la probeta después de la prueba se muestran en las tablas 3.4 y 3.5.

Tabla 3.4 - Dimensiones finales de la sección transversal de la probeta.

No. de Probeta	(A) Ancho de la sección (mm)				(B) Espesor de la sección (mm)				Área de sección
	Centro	extremo a	extremo b	promedio	Centro	extremo a	extremo b	promedio	
1	9.71	9.72	9.72	9.72	4.37	4.38	4.36	4.37	42.48
2	9.52	9.53	9.56	9.54	4.24	4.23	4.24	4.24	40.45
3	9.68	9.69	9.69	9.69	4.23	4.22	4.25	4.23	40.99

Tabla 3.5 - Dimensión final de la distancia entre marcas de la probeta.

No. de probeta	(C) Distancia (mm)
1	54.52
2	53.81
3	54.76

El resumen de los resultados de la propiedades mecánicas de tensión del material se muestra en la tabla 3.6 y en la figura 3.2.

Tabla 3.6 - Resumen de resultados de propiedades mecánicas de tensión.

No. de probeta	Modulo de Young (GPa)	Resistencia fluencia (MPa)	Resistencia última (MPa)	% Reducción de área	% Elongación	Ductilidad a la fractura	Resistencia a fractura (MPa)
1	250.607	1222.35	1279.78	40.01	9.25	0.510	1936.784
2	256.595	1218.82	1271.25	42.04	7.77	0.545	2222.620
3	260.268	1275.27	1288.40	41.95	9.24	0.544	1886.703
Promedio	255.824	1238.81	1279.78	41.33	8.75	0.533	2015.369

Los resultados anteriores fueron calculados empleando las ecuaciones del Anexo A.

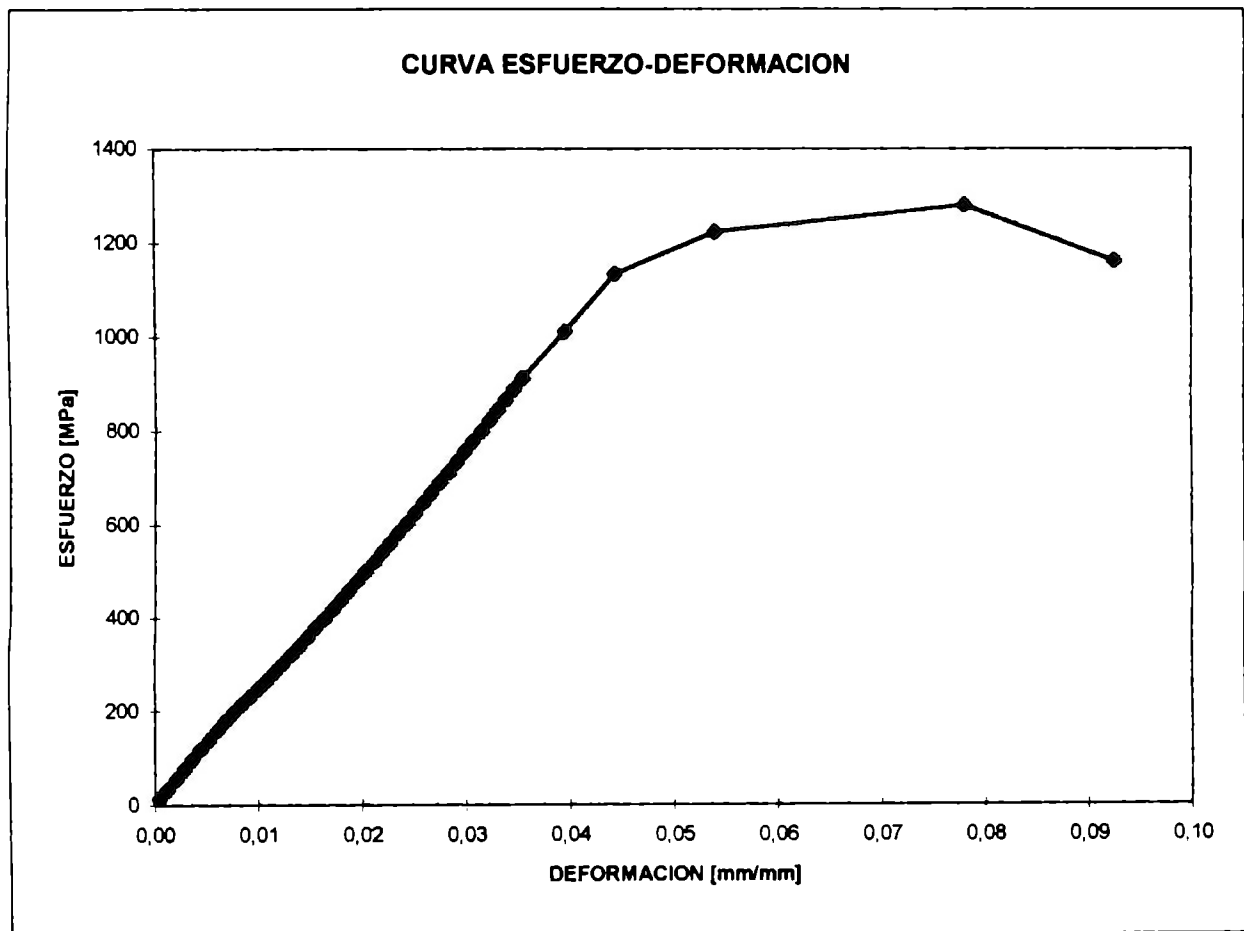


Fig. 3.2 - Gráfica esfuerzo - deformación de la probeta No. 1.

3.2 PROPIEDADES CÍCLICAS (ESFUERZO - DURABILIDAD).

3.2.1 PROCEDIMIENTO.

Se obtuvieron las propiedades esfuerzo - durabilidad de acuerdo a las siguientes normas:

- Práctica estándar recomendada para pruebas de fatiga de amplitud constante de materiales metálicos (ASTM E-466).
- Método estándar para pruebas de flexión de materiales metálicos planos para aplicaciones en muelles (ASTM E-855).
- Práctica estándar recomendada para la presentación de resultados de pruebas de fatiga de amplitud constante de materiales metálicos (ASTM E-468).

3.2.2 PROBETAS.

- Dimensiones: Ver figura 3.3.

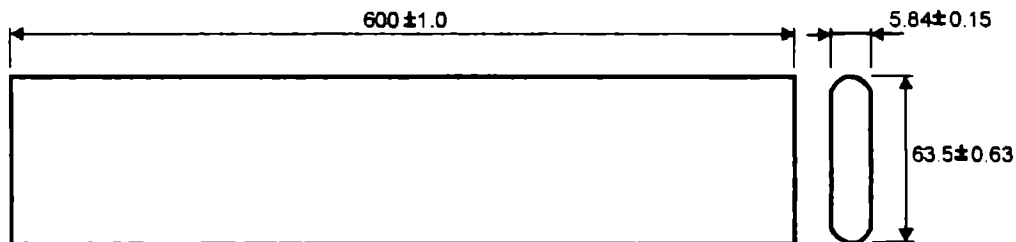


Fig. 3.3 - Probeta para ensayos de fatiga de flexión en 3 puntos.

- Material: Acero SAE-5160 (ver propiedades del material en la sección 3.1).
- Preparación: Probeta fabricada a partir de solera rolada en caliente para muelle multi - hojas. Austenizada a 900°C, templada en aceite mineral a 90°C y revenida a 450°C en equipo de proceso para la manufactura de muelle multi - hojas. Finalmente, se sometió al proceso de granallado con una intensidad de 0.33mm Almen A y un cubrimiento de 0.95% en la superficie plana de la probeta que trabajara bajo esfuerzos de tensión.

3.2.3 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA.

- Máquina: equipo electro - hidráulico para pruebas de fatiga de muelles multi - hojas.
- Tipo de prueba: flexión en 3 puntos.
- Número de máquinas utilizadas: 1.

- d) Frecuencia de prueba: 1Hz.
- e) Función de aplicación de carga: triangular
- f) Monitoreo de cargas: celda de carga.
- g) Criterio de falla: fractura completa.
- h) Número de probetas ensayadas: 18
- i) Proporción del esfuerzo, R: 0 .
- j) Temperatura del laboratorio: promedio, 22°C; rango, ±1.
- k) Humedad relativa del laboratorio: promedio, 40%; rango, ±3%.
- l) Observaciones: probetas fijadas en el centro al cilindro hidráulico de la máquina con las placas de asiento y apoyadas en los extremos con soportes. Los esfuerzos fueron calculados aplicando la carga estática equivalente a la carga dinámica al modelo desarrollado en ANSYS para el análisis de esfuerzos de muelles multi - hojas. Son los esfuerzos equivalentes (Von Mises) máximos experimentados por las probetas.

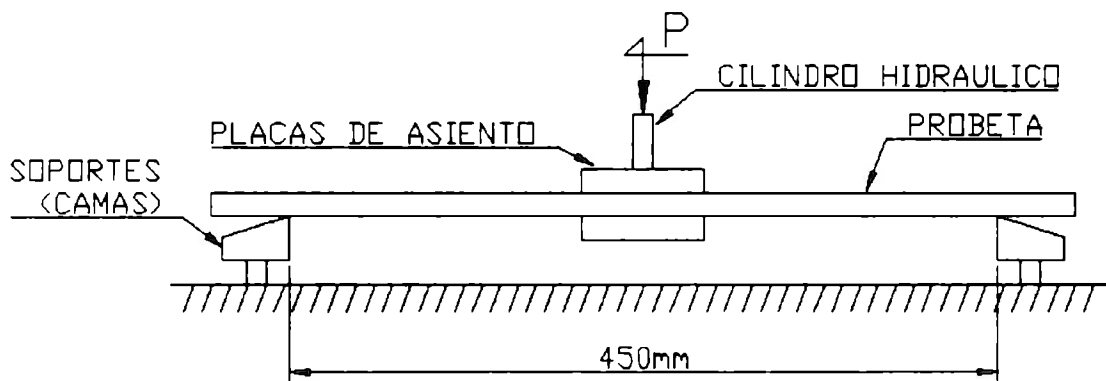


Fig. 3.4 – Esquema del montaje de las probetas en los ensayos de fatiga de flexión en 3 puntos.

3.2.4 RESULTADOS.

Los resultados de las pruebas se muestran en la tabla 3.7 y en la figura 3.5.

El resultado del análisis de regresión de las 18 muestras, de acuerdo a lo descrito en el Anexo B, es el siguiente:

$$S_a = (\sigma_f - \sigma_o) (N_f)^b$$

Donde:

S_a = amplitud del esfuerzo en MPa.

σ_f = 3321 MPa

σ_o = 637 MPa

N_f = ciclos para fractura

b = -0.146045

Con un coeficiente de correlación de 0.9937 y un error típico para la estimación de S_a de 1.007.

Tabla 3.7 - Resultados de pruebas de fatiga de probetas.

No. de probeta	Esfuerzo equivalente (Von Mises) máximo (MPa)				Durabilidad (ciclos)	Observaciones
	A carga máxima (σ_{MAX})	A carga mínima (σ_{MIN})	Medio (σ)	Amplitud (S_a)		
1	1190	84	637	553	48,912	Fractura
2	1190	84	637	553	53,518	Fractura
3	1190	84	637	553	52,196	Fractura
4	1190	84	637	553	51,754	Fractura
5	1190	84	637	553	49,128	Fractura
6	1190	84	637	553	44,492	Fractura
7	1137	137	637	500	95,318	Fractura
8	1137	137	637	500	97,127	Fractura
9	1137	137	637	500	98,556	Fractura
10	1137	137	637	500	102,655	Fractura
11	1137	137	637	500	103,227	Fractura
12	1137	137	637	500	103,117	Fractura
13	1088	186	637	451	188,356	Fractura
14	1088	186	637	451	194,286	Fractura
15	1088	186	637	451	199,763	Fractura
16	1088	186	637	451	207,561	Fractura
17	1088	186	637	451	209,153	Fractura
18	1088	186	637	451	200,881	Fractura

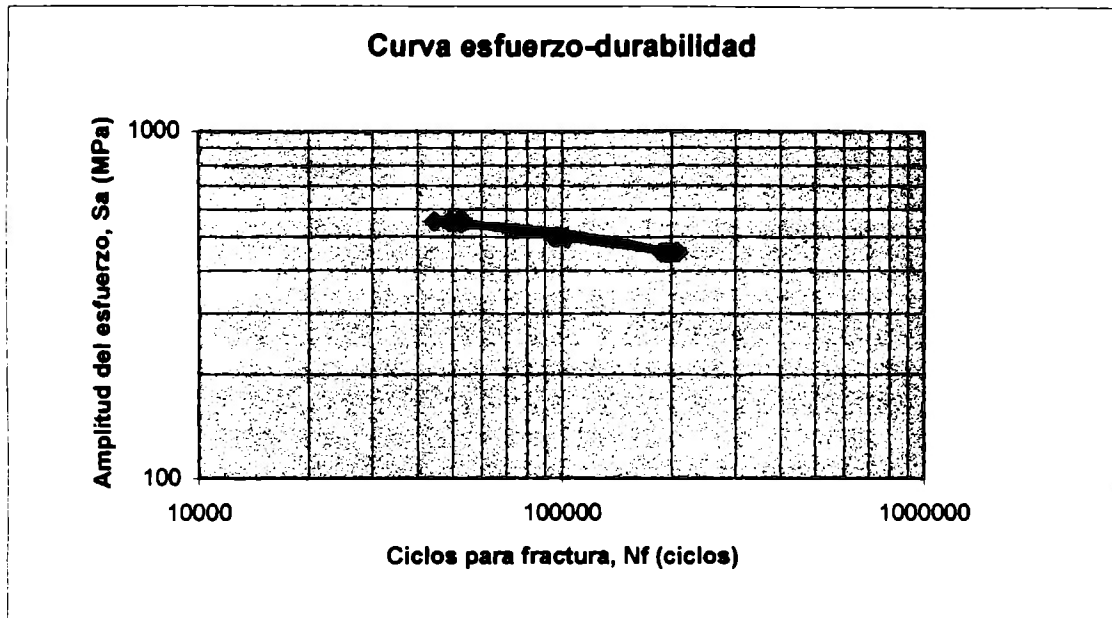


Fig. 3.5 - Gráfica esfuerzo - durabilidad.

4 ANÁLISIS DE ESFUERZOS.

4.1 SUPOSICIONES.

a) Análisis estructural, estático, no - lineal bidimensional.

Un análisis estructural estático es usado para determinar los desplazamientos, esfuerzos, deformaciones, y fuerzas en estructuras o componentes debidos a cargas que no inducen efectos de inercia y amortiguamiento significativos. Se asumen condiciones de carga y respuesta en estado estable, las cargas y la respuesta se asumen que varían muy lentamente con respecto al tiempo. Además, si cargas dinámicas pueden ser aproximadas por su carga estática equivalente, sus efectos también pueden ser evaluados usando un análisis estático. Los tipos de cargas que pueden aplicarse en un análisis estático incluyen fuerzas y presiones externas, fuerzas inerciales en estado estable (fuerzas de gravedad o debidas a velocidad rotacional), desplazamientos impuestos, y temperaturas (para deformaciones térmicas).

Un análisis estático puede ser lineal o no lineal. Todos los tipos de no linealidades son permitidos, como, grandes deformaciones, plasticidad, resistencia dependiente de esfuerzos, elementos de contacto, elementos hiper - elásticos, etc.

Se emplearán cargas estáticas equivalentes a las cargas dinámicas que producirán los mismos esfuerzos que experimenta la muelle en una prueba de durabilidad

Las no linealidades que se presentarán en el análisis se deben al contacto entre las hojas y las grandes deformaciones que sufren estas.

b) Esfuerzo plano.

Existe esfuerzo plano por la razones siguientes: a) todas las hojas de la muelle tienen el mismo ancho; b) todas las cargas consideradas se encuentran en el mismo plano; c) el ancho de las hojas de la muelle es de un orden de magnitud mayor que el espesor de las mismas. Por lo tanto, no existe un gradiente de esfuerzos en la dirección del ancho de la muelle, lo que reduce el análisis a un modelo bidimensional (2-D).

c) Material elástico e isotrópico.

La muelle está hecha de un material metálico, el cual no sufrirá deformaciones plásticas, de lo contrario esto originaría que la muelle pierda su capacidad de carga ; además, de que presenta las mismas propiedades mecánicas en cualquier dirección.

d) Fuerzas de fricción despreciable entre las hojas adyacentes.

4.2 PROCEDIMIENTO.

El procedimiento para un análisis estático consiste en 3 grandes pasos, los cuales se presentan en la figura 4.1 [8].

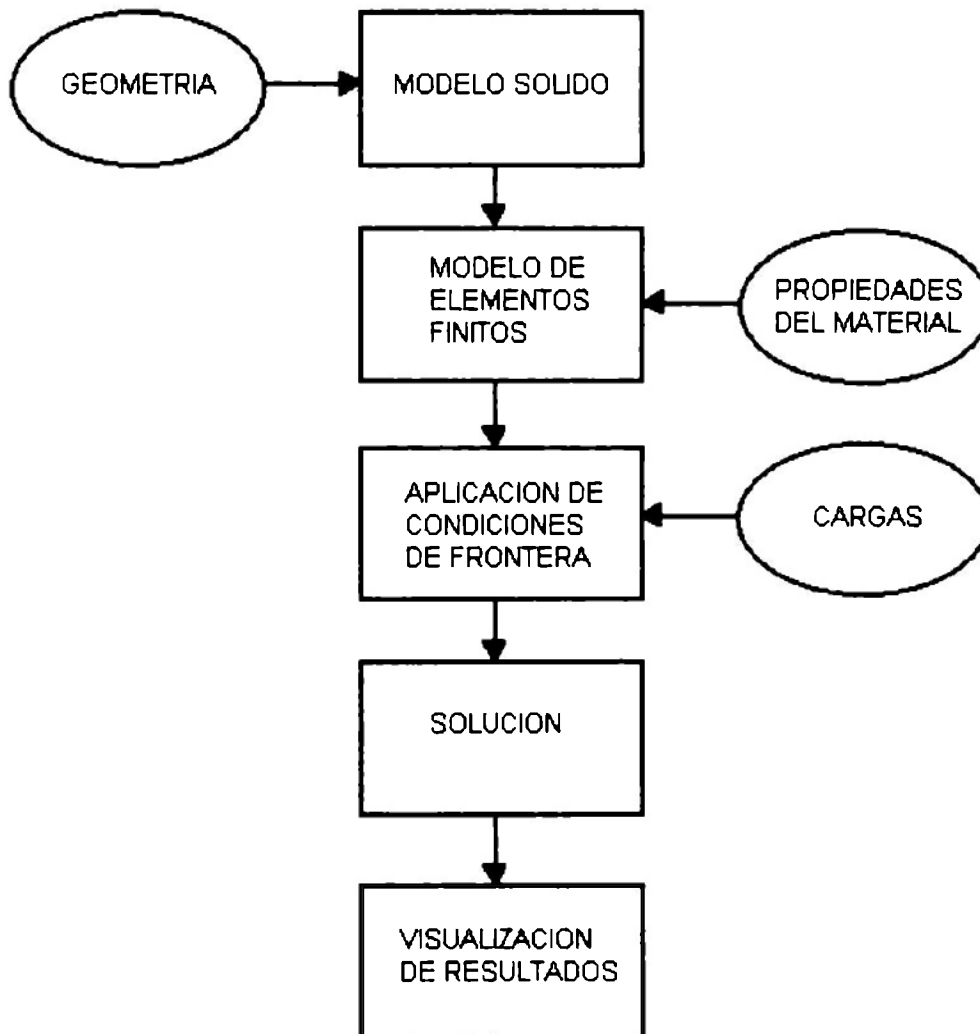


Fig. 4.1 - Procedimiento de un análisis estructural.

4.2.1 CONSTRUIR EL MODELO.

En este paso se definen los tipos de elementos, las constantes reales de los elementos, las propiedades de los materiales y la geometría del modelo.

4.2.1.1 Tipos de elementos.

El tipo de elemento determina, además de otras cosas, los grados de libertad (lo que implica el tipo de análisis: estructural, térmico, magnético, eléctrico, fluidos, entre otros), las formas características de los elementos (línea, cuadrilátero, etc.), y si el elemento se encuentra en un espacio bidimensional o tridimensional.

Se emplearan 3 tipos de elementos (ver Anexo D):

- Sólido estructural bidimensional.

Es usado para simulación en 2-D de estructuras sólidas, en este caso es empleado para discretizar las hojas de la muelle. El elemento puede ser usado como un elemento plano para esfuerzo plano o deformación plana.

- Elemento de contacto 2-D (punto - superficie).

Este elemento puede ser utilizado para representar contacto y deslizamiento entre 2 superficies en 2 dimensiones, en este caso para simular el contacto entre las diferente hojas de la muelle.

- Viga 2-D.

Este es un elemento uniaxial con capacidad para soportar tensión, compresión y flexión. En este caso es empleado para simular la función del tornillo central de la muelle y, si es necesario, las placas de asiento (clamp).

4.2.1.2 Constantes reales.

Las constantes reales del elemento son propiedades que son específicas de cada tipo de elemento. A continuación se describirán las constantes reales de los tres tipos de elementos empleados:

Tabla 4.1 - Constantes reales de los elementos.

TIPO DE ELEMENTO	CONSTANTE REAL	DESCRIPCIÓN
SOLIDO 2-D OPCION(3)=3 (ESFUERZO PLANO CON ESPESOR)	ESPESOR [mm]	ANCHO DE LA HOJA (ANCHO EQUIVALENTE DE UNA HOJA CON SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR)
CONTACTO 2-D OPCION(2)=1 (PENALTY F. + LAGRANGE M) OPCION(3)=0 (SIN FRICCIÓN) OPCION(7)=1 (T./CARGA INC)	KN	RIGIDEZ NORMAL DE CONTACTO, ES USADA PARA DETERMINAR LAS FUERZAS DE CONTACTO.
	TOLN	TOLERANCIA ABSOLUTA APLICADA , ES USADA PARA DETERMINAR SI LA COMPATIBILIDAD DE PENETRACIÓN ES SATISFECHA.
	TOOLS	TOLERANCIA PARA INCREMENTAR LA LONGITUD DE LA LÍNEA OBJETIVO.
VIGA 2-D	AREA [mm ²]	ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL (DEL TORNILLO O DE LA PLACA DE ASIENTO)
	IZZ [mm ⁴]	MOMENTO DE INERCIA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL
	ALTURA [mm]	ALTURA TOTAL DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

4.2.1.3 Propiedades de los materiales.

Las propiedades del material son requeridas para la mayoría de los elementos. Dependiendo de la aplicación, las propiedades del material pueden ser lineales, no lineales, isotrópicas o anisotrópicas. Las propiedades empleadas para nuestro análisis son las siguientes:

Tabla 4.2 - Propiedades de los materiales de los elementos.

No. DE MATERIAL	PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN
MATERIAL No.1	EX	MÓDULO DE YOUNG
	NUXY	COEFICIENTE DE POISSON
MATERIAL No.2	EX	MÓDULO DE YOUNG
	NUXY	COEFICIENTE DE POISSON
	ALPX	COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA

El MATERIAL No.1 tendrá las propiedades mecánicas del acero SAE-5160 y se utilizará en los elementos que forman las hojas (sólido 2-D), los elementos de contacto (contacto 2-D) y para los elementos de las placas de asiento (viga 2-D).

El MATERIAL No.2 tendrá las propiedades mecánicas del acero SAE-5160 y se utilizará en los elementos que representan al tornillo de centro (viga 2-D), además, de un coeficiente de expansión térmica de -1 porque al simular el ensamble de la muelle aplicaremos una diferencia de temperatura de 1°C y éste reducirá su longitud a cero, lo que significará que las hojas adyacentes estarán en contacto en la zona cercana al tornillo de centro.

4.2.1.4 Geometría del modelo.

El principal objetivo de este paso es generar un modelo de elementos finitos (nodos y elementos) que describan adecuadamente la geometría del modelo.

Primero hay que describir las fronteras geométricas del modelo (modelo sólido) y posteriormente instruir al programa para que automáticamente discretice la geometría con nodos y elementos (modelo de elementos finitos).

a) Modelo sólido.

Para construir la geometría de cada una de las hojas de la muelle, primero se definen ciertos puntos que definen la geometría de cada hoja, posteriormente se unen estos puntos con líneas (rectas o curvas) y por último se crea un área a partir de las líneas que definen cada hoja.

b) Modelo de elementos finitos.

Estas áreas se discretizan automáticamente con elementos sólidos estructurales 2-D. Los elementos que simulan el tornillo de centro y las placas de asiento (viga 2-D) y los elementos de contacto (punto - superficie) se generan manualmente sobre los nodos de las hojas de la muelle.

4.2.2 APLICAR CARGAS Y OBTENER LA SOLUCIÓN.

En este paso, se define el tipo y las opciones del análisis, se aplican las cargas, se especifican las opciones de pasos de carga, y se inicia la solución del problema.

4.2.2.1 Definir el tipo y las opciones del análisis.

El tipo de análisis se escoge en base a las condiciones de carga y a la respuesta que queremos calcular. En este caso se trata de un análisis estructural estático.

Las opciones del análisis permiten personalizar el tipo de análisis. Las opciones típicas son el método de solución. Utilizaremos un análisis no lineal.

4.2.2.2 Aplicar cargas (condiciones de frontera).

Las cargas están divididas en 6 categorías: restricciones de desplazamiento, fuerzas, cargas superficiales, cargas al cuerpo, cargas de inercia y cargas de acoplamiento.

La mayoría de estas pueden ser aplicadas tanto en el modelo sólido (puntos, líneas y áreas) como en el modelo de elementos finitos (nodos o elementos).

- Restricciones de desplazamiento.

Los desplazamientos (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ) o restricciones de grados de libertad son usualmente especificadas en las fronteras del modelo para definir puntos de soporte rígido. También son utilizadas para indicar condiciones de frontera de simetría y puntos de movimiento conocido. Emplearemos restricciones de desplazamiento en X y Y en un nodo de un extremo de la muelle y restricción de desplazamiento en Y en un nodo del otro extremo para simular las condiciones de soporte del modelo.

- Fuerzas.

Las fuerzas (FX, FY, FZ) y los momentos (MX, MY, MZ) son cargas concentradas usualmente especificadas en el exterior del modelo. Aplicaremos la fuerza en dirección Y en el centro de la muelle que experimenta ésta durante una prueba de durabilidad.

- Cargas al cuerpo.

Una de éstas es la temperatura. Las temperaturas son aplicadas para estudiar los efectos de la expansión o contracción térmica. En nuestro análisis aplicaremos una carga de temperatura de un grado al elemento que simula el tornillo de centro para que experimente una contracción (reducción de su longitud a cero) y se lleve a cabo el ensamble de las hojas de la muelle (contacto entre hojas adyacentes en el centro de las mismas).

4.2.2.3 Especificar las opciones de pasos de carga.

Existen 2 términos importantes relacionados con las cargas: los pasos de carga y los sub-pasos de carga. Un paso de carga es simplemente una configuración de cargas para las cuales se obtendrá una solución. Los pasos de carga son también útiles en dividir una curva de historia de carga transitoria en varios segmentos. Los sub-pasos son incrementos tomados dentro de un paso. Son muy utilizados para propósitos de convergencia y precisión en análisis transitorios y no lineales. En el análisis para la estimación de durabilidad se emplearán 2 pasos de carga, uno para la carga máxima aplicada a la muelle y otro para la carga mínima (rango cargas de amplitud constante); cada uno de estos pasos estará dividido en un número de sub-pasos que el programa calculará automáticamente con el propósito de lograr la convergencia del análisis.

4.2.2.4 Inicio de solución.

Se ejecuta el comando de acción para iniciar los cálculos de solución. Cuando se usa este comando, el programa toma la información del modelo y de las cargas de la base de datos y calcula los resultados. Los resultados se escriben en un archivo de resultados y también en la base de datos.

4.2.3 REVISIÓN DE RESULTADOS.

Los resultados de un análisis estático son escritos en un archivo de resultados estructurales. Consisten de los siguientes datos:

- Datos primarios: desplazamientos nodales (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)
- Datos secundarios: esfuerzos de nodos y elementos, deformaciones de nodos y elementos, fuerzas de elementos, fuerzas de reacción de nodos, etc.

Se pueden revisar los resultados de un sub-paso de todo el modelo y obtener despliegues de contornos, figuras deformadas, y listas tabulares para revisar e interpretar los resultados del análisis. Algunas otras funciones están disponibles como: estimación del error, combinación de casos de carga, cálculos sobre los datos de resultados, etc.

También se pueden revisar los resultados en puntos específicos del modelo de todos los pasos de carga y obtener las gráficas de los datos de resultados contra alguna otra variable como el tiempo, carga, etc.

Los resultados de este análisis que emplearemos posteriormente, serán los vectores de esfuerzos resultantes de la aplicación de la carga mínima y la carga máxima ($\{\sigma_{MIN}\}_i$ y $\{\sigma_{MAX}\}_i$, respectivamente) de todos los nodos del modelo.

4.3 RESULTADOS.

Se realizo el análisis de esfuerzos de 3 diferentes muelles, las cuales se encuentran actualmente en producción, siguiendo el método propuesto. En el anexo E se pueden ver los dibujos de definición de las mismas. Las condiciones de carga a las que se realizaron los análisis de esfuerzos pueden verse en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 - Condiciones de carga.

Tipo de muelle	Carga mínima (N)	Carga máxima (N)
I	2,219	11,682
II	2,626	12,034
III	2,156	12,456

A continuación se presenta una serie de gráficas del proceso de análisis de esfuerzos por el método propuesto y los resultados obtenidos de la muelle tipo I.

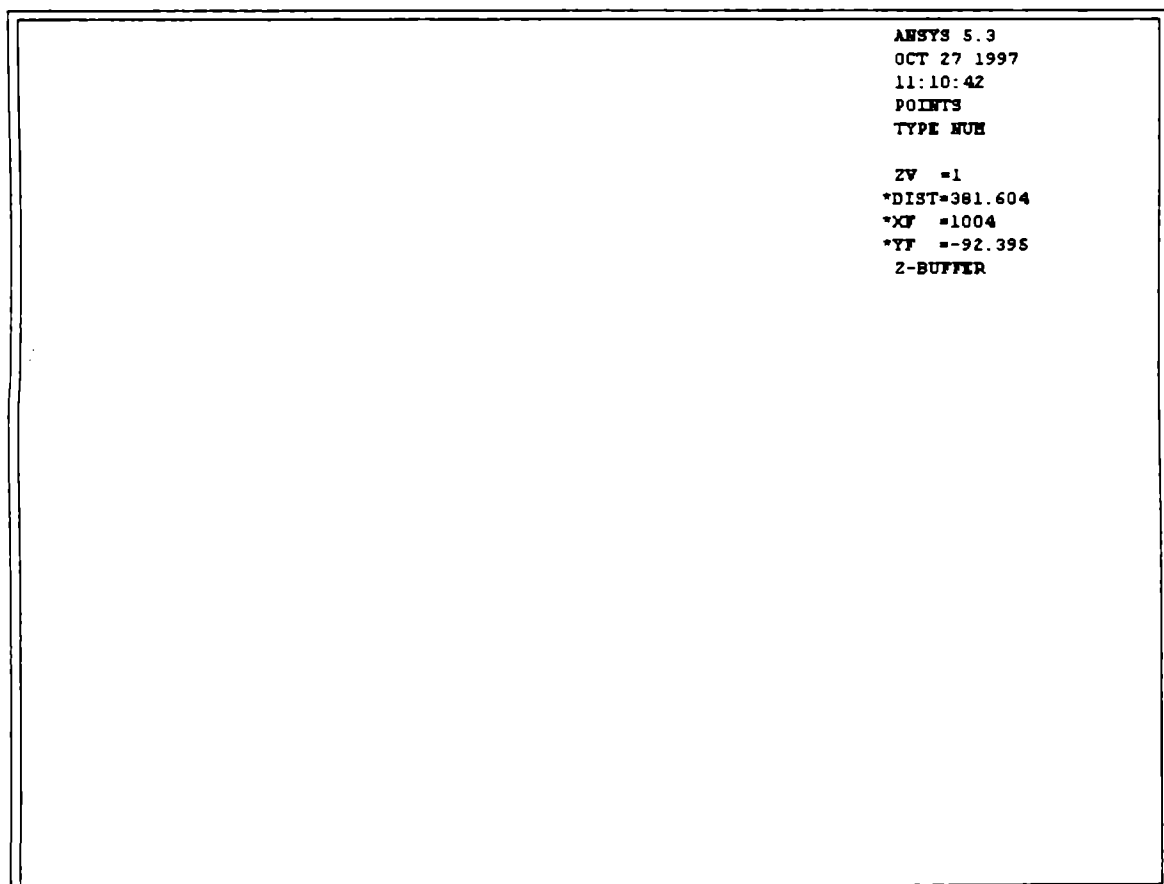


Fig. 4.2 - Puntos del modelo sólido (Original en colores).

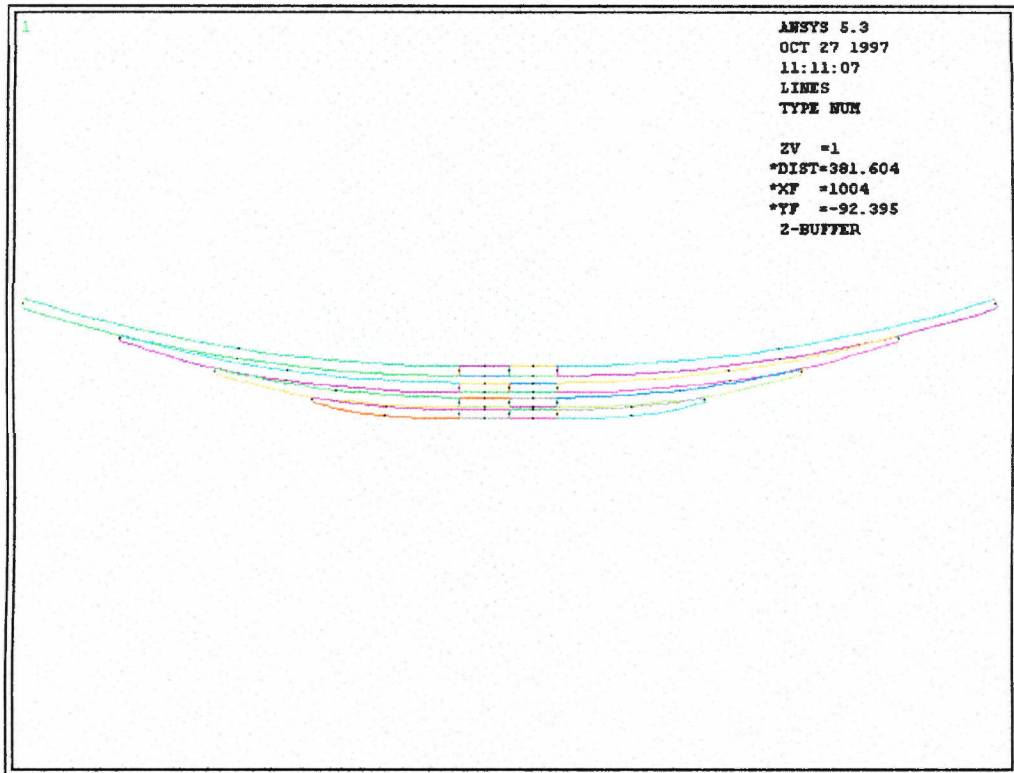


Fig. 4.3 - Líneas del modelo sólido (Original en colores).

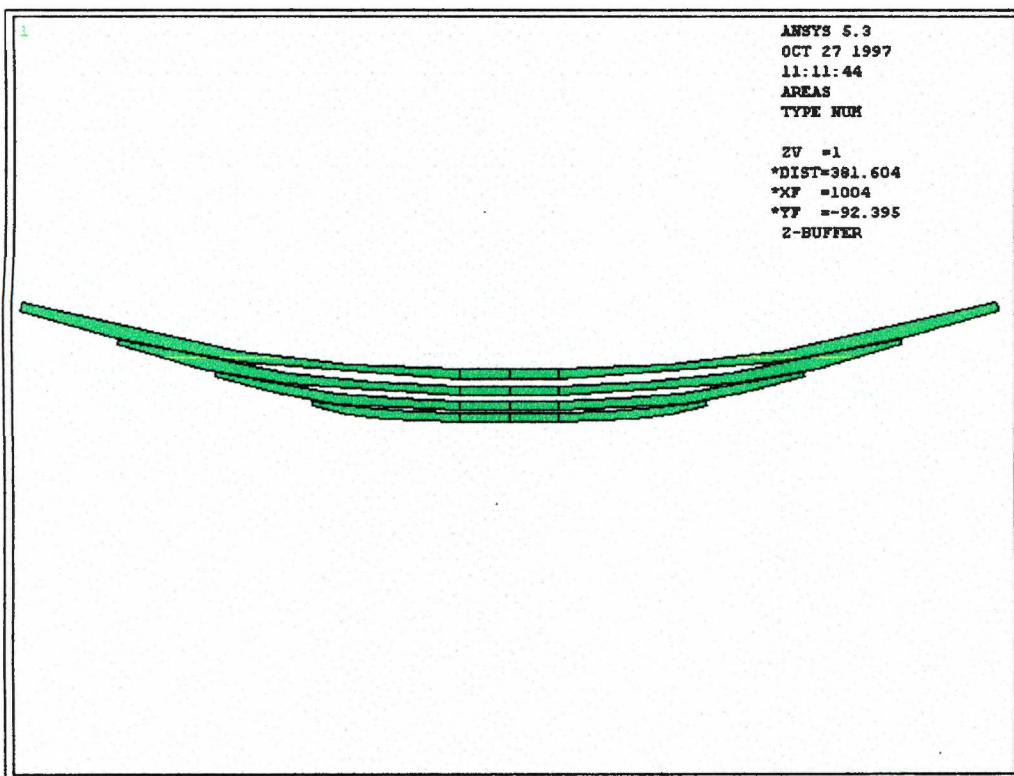


Fig. 4.4 - Áreas del modelo sólido (Original en colores).

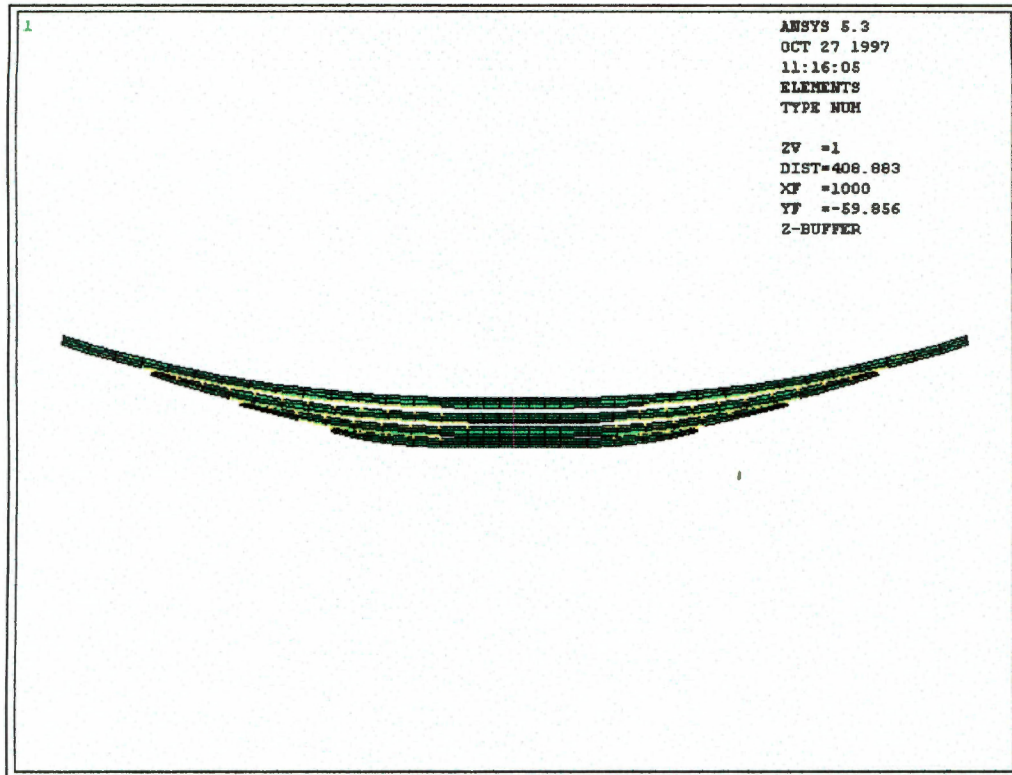


Fig. 4.5 - Modelo de elementos finitos (Original en colores).

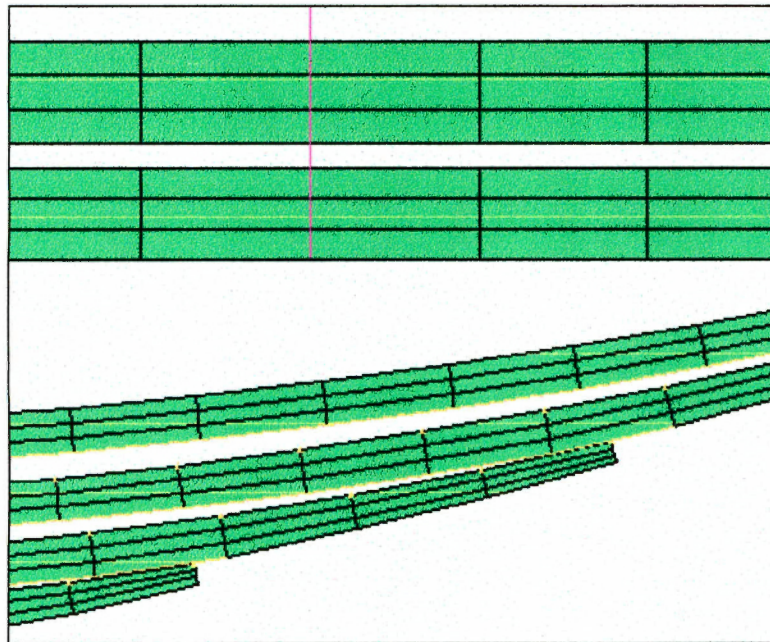


Fig. 4.6 - Acercamiento a elementos del modelo (Original en colores).

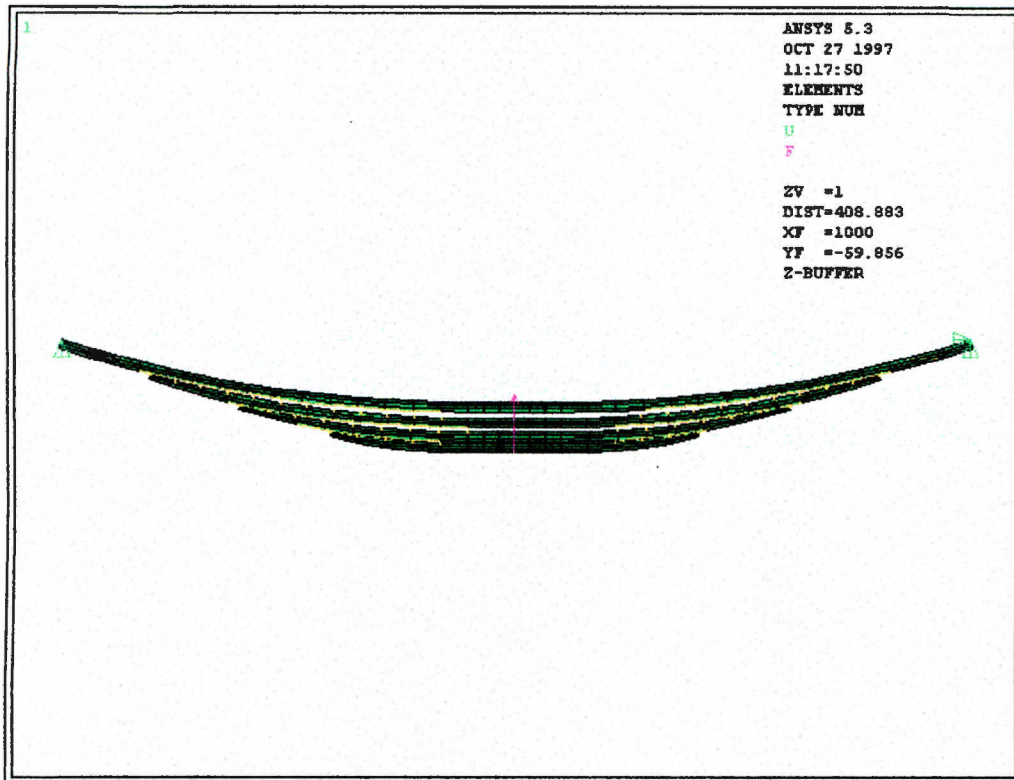


Fig. 4.7 - Condiciones de frontera (Original en colores).

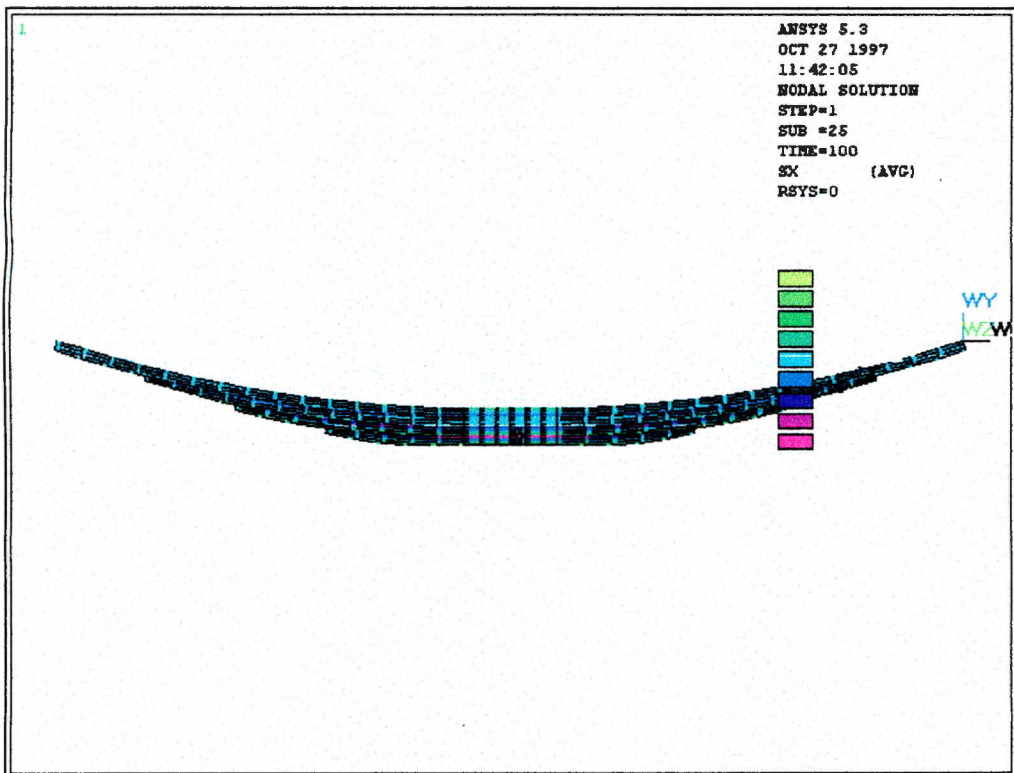


Fig. 4.8 - Gráfica de esfuerzos equivalentes a carga mínima (Original en colores).

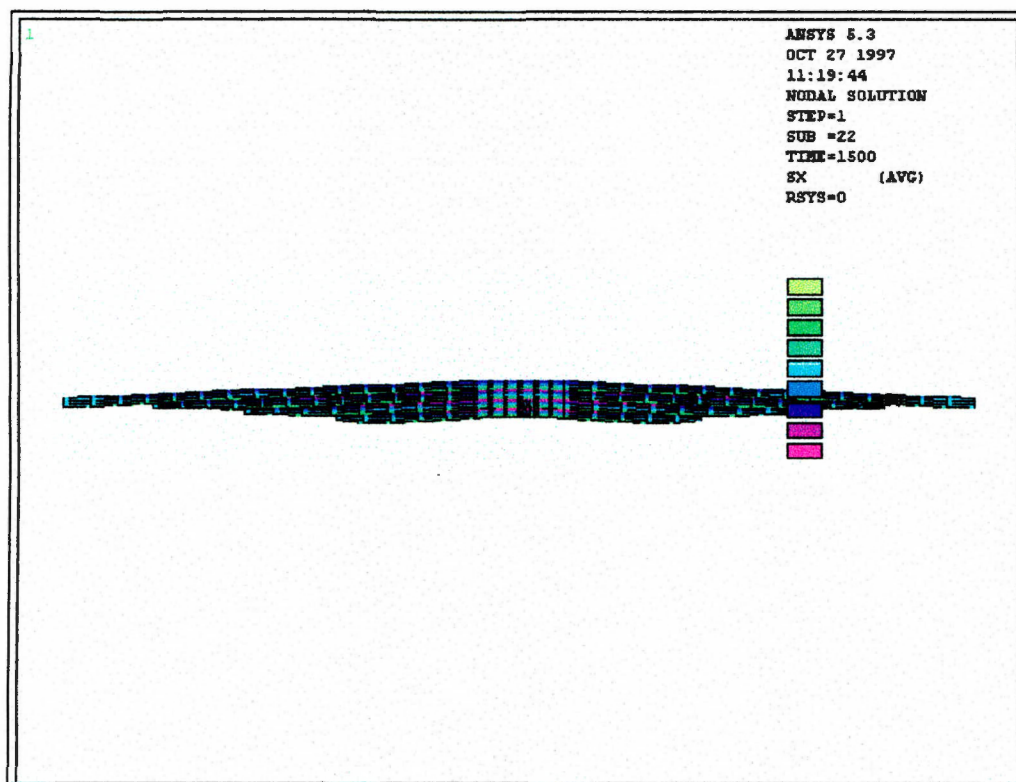


Fig. 4.9 - Gráfica de esfuerzos equivalentes a carga máxima (Original en colores).

Los resultados de esfuerzos obtenidos con el método propuesto en este capítulo son de un orden de magnitud similar a los obtenidos por otros métodos, como el método de resistencia de materiales descrito en el anexo C. La magnitud de los esfuerzos difiere a la obtenida con otros métodos debido a que éste toma en cuenta la geometría curva de las hojas y los esfuerzos producidos durante el ensamble de las mismas, los cuales son despreciados en los demás métodos.

5 ESTIMACIÓN DE DURABILIDAD.

Las técnicas de estimación de durabilidad juegan un papel muy importante en el diseño de componentes en la industria automotriz. Muchas compañías emplean estas técnicas en el diseño preliminar y en los subsecuentes ciclos de evaluación de rediseños (primero en papel, posteriormente en pruebas de laboratorio de componentes, y finalmente en pruebas de campo de ensambles o del vehículo completo).

En los metales de interés para la industria automotriz, el daño de fatiga y el crecimiento de grietas típicamente ocurre por el proceso de deformación plástica cíclica. La cantidad de deformación plástica que resulta de la acción de una deformación dada depende de qué tan fácil es para dos planos de átomos moverse con respecto del otro a lo largo del plano de deformación. Por otra parte, la componente de la fuerza normal al plano de deformación hace mas fácil la deformación plástica si ésta es de tensión, por la separación de los planos, y mas difícil si es de compresión. Por esta razón, correlacionar la durabilidad con la deformación y el esfuerzo es muy lógico, y es mas consistente con la física de proceso que el empleo únicamente de la deformación.

El proceso de deformación plástica cíclica es el responsable de la nucleación de grietas y el proceso de crecimiento de micro y macro grietas. Las diferencias claves en el comportamiento de la deformación plástica durante la nucleación y el crecimiento están en la magnitud de la deformación plástica y el volumen del material que está bajo deformación plástica. En la nucleación de grietas, el nivel de deformación es pequeño, pero está distribuido en un volumen mayor comparado con el crecimiento de grietas, en el cual se concentran altas deformaciones en una pequeña zona plástica en el vértice de la grieta.

La estimación de durabilidad se basa en el cálculo de esfuerzos y deformaciones en áreas altamente esforzadas donde se concentra la deformación plástica como resultado de las cargas de entrada para un material y una geometría dados. Los esfuerzos y deformaciones calculadas son transformados en daño de fatiga. Integrando el daño sujeto a un criterio de falla empírico, a través de una historia de cargas, se obtiene un estimación de durabilidad.

Se debe tener cuidado en la estimación de durabilidad para tomar en cuenta los procesos y otros factores que alteren la superficie del material, ya que la deformación plástica ocurre con mayor facilidad en la superficie y se concentra por los factores de concentración del material o la geometría. También se deben de tomar en cuenta los factores ambientales que puedan producir concentración de esfuerzos o afecten la deformación plástica. Finalmente, ya que la fatiga

involucra deformaciones plásticas, el esfuerzo no debe ser relacionado linealmente con la deformación y los esfuerzos y deformaciones actuales pueden depender de la historia de deformación anterior [1].

5.1 ENFOQUES DE INICIACIÓN Y PROPAGACIÓN DE GRIETAS PARA ESTIMAR LA DURABILIDAD.

El proceso de fatiga ocurre en cualquier lugar de un cuerpo donde los esfuerzos y deformaciones sean suficientemente largos para causar una deformación plástica cíclica continua. El proceso de fatiga es problemático en áreas donde los esfuerzos y deformaciones son grandes, ya que el proceso es proporcional a la magnitud de la deformación plástica. Mientras que la fatiga puede incurrir a lo largo de un componente, el servicio continuo es amenazado en las áreas que tienen los esfuerzos y deformaciones más altos. Estas áreas están localizadas en concentradores de esfuerzos y son críticas para la durabilidad del componente. El proceso de fatiga involucra un periodo de daño acumulado anterior a la iniciación de grieta seguido por un periodo de crecimiento de grieta, hasta que el tamaño crítico de la grieta es alcanzado. Por lo tanto la durabilidad total es la suma de una fase de iniciación y una propagación.

El hecho de que la iniciación y propagación de la grieta ocurren es importante en la estimación de durabilidad, porque la presencia de la grieta altera el campo de esfuerzos en el componente. Una vez que el campo de esfuerzos es significativamente alterado por la grieta, el proceso de deformación plástica se concentra en el vértice de la grieta. Los esfuerzos y deformaciones localizados a una pequeña distancia del vértice de la grieta ya no caracterizarán la magnitud de la deformación plástica que ahora estará concentrada en el vértice de la grieta. Por lo tanto, una vez que la grieta es lo suficientemente grande para alterar significativamente el campo de esfuerzos, el enfoque utilizado para estimar la durabilidad debe incluir el efecto de la grieta en el campo de esfuerzos y relacionarlo con el daño. El enfoque que toma en cuenta los efectos de las grietas en el campo de esfuerzos involucra el uso de la mecánica de la fractura. Estos enfoques son utilizados para caracterizar la resistencia del material en fatiga en términos del comportamiento del crecimiento de grietas medido en probetas inicialmente con grietas.

Hasta que una grieta es lo suficientemente grande para afectar el campo de esfuerzos, un enfoque basado en los esfuerzos y deformaciones en el lugar donde la grieta se desarrollará puede ser utilizado para simular el proceso de fatiga. Este enfoque para estimación de durabilidad es basado en datos de fatiga desarrollada en probetas sin grietas o ranuras iniciales.

Los enfoques basados en la presencia de grietas son llamados métodos de crecimiento de grietas, mientras que los que están basados en el daño durante la iniciación (formación de grietas de pocos milímetros de tamaño) son llamados métodos de iniciación de grietas.

Como se mencionó antes, la durabilidad total de un componente es la suma de las fases de iniciación y crecimiento. La estimación de durabilidad, en tales casos, involucra la estimación secuencial de una durabilidad de iniciación de grieta y una durabilidad de propagación. En algunos componentes en los cuales los procesos de fabricación producen imperfecciones (pequeñas grietas), las imperfecciones nucleas grietas que empiezan a crecer casi

inmediatamente, así que la durabilidad está dominada por la propagación de la grieta. En estos casos la estimación de durabilidad involucra el enfoque de crecimiento de grietas. Muchos otros componentes, que están hechos de materiales de alta calidad y que están producidos con procesos cuidadosamente controlados no contienen defectos significativos inicialmente, en estos casos, se utiliza el enfoque de iniciación de grietas para la estimación de durabilidad.

Debe tenerse en cuenta que las grietas no siempre crecen a tamaños críticos. Hay algunas situaciones en las cuales las grietas se forman, crecen un poco y se detienen. Esto puede pasar si la grieta se propaga desde la superficie hacia un gradiente decreciente de esfuerzos o si la grieta crece en un campo de esfuerzos residuales de compresión de suficiente magnitud y profundidad bajo la superficie [1].

5.2 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE DURABILIDAD.

El enfoque de iniciación de grietas involucra dos operaciones para convertir las entradas de la historia de cargas, la geometría del componente y las características del material en la estimación de durabilidad. Estas operaciones deben llevarse a cabo en secuencia. Primero, los esfuerzos y deformaciones son calculados en las áreas críticas, entonces, los esfuerzos y deformaciones locales son usados para calcular el daño que se agrega algebraicamente a través de la historia de cargas hasta que la sumatoria de daño crítico (criterio de falla) es alcanzado. El punto en la historia de cargas donde el criterio de falla es alcanzado es la durabilidad estimada.

5.2.1 MÉTODO DE ESFUERZO - DURABILIDAD PARA CARGAS DE AMPLITUD CONSTANTE.

Una vez que se ha obtenido la solución del modelo de elementos finitos para las dos condiciones de carga (límites del rango de carga de amplitud constante), se realiza la estimación de durabilidad de la siguiente manera [10]:

- 1) Para cada nodo del modelo se calcula lo siguiente:
 - a) Primero, se calcula el esfuerzo equivalente (Von Mises) del vector de esfuerzos resultado de la aplicación de la carga mínima.

$$\sigma_{\text{MIN},i} = \left(\frac{1}{2} \left[(\sigma_{1i} - \sigma_{2i})^2 + (\sigma_{2i} - \sigma_{3i})^2 + (\sigma_{3i} - \sigma_{1i})^2 \right] \right)^{1/2} \quad (5.1)$$

Donde:

$\sigma_{1,2,3}$ - esfuerzos principales del vector de esfuerzos $\{\sigma_{\text{MIN}}\}$ del i - ésimo nodo.

- b) Posteriormente, se calcula el esfuerzo equivalente (Von Mises) del vector de esfuerzos resultado de la aplicación de la carga máxima:

$$\sigma_{\text{MAX},i} = \left(\frac{1}{2} \left[(\sigma_{1i} - \sigma_{2i})^2 + (\sigma_{2i} - \sigma_{3i})^2 + (\sigma_{3i} - \sigma_{1i})^2 \right] \right)^{1/2} \quad (5.2)$$

Donde:

$\sigma_{1,2,3}$ - esfuerzos principales del vector de esfuerzos $\{\sigma_{MAX}\}$ del i - ésimo nodo.

c) Se calcula la amplitud del esfuerzo:

$$Sa_i = (\sigma_{MAX,i} - \sigma_{MIN,i})/2 \quad (5.3)$$

d) Se obtiene el esfuerzo medio:

$$\sigma_{O,i} = (\sigma_{MAX,i} + \sigma_{MIN,i})/2 \quad (5.4)$$

e) Enseguida se obtiene la durabilidad estimada de cada nodo del modelo:

$$Nf_i = (Sa_i / (\sigma_f - \sigma_{O,i}))^{1/b} \quad (5.5)$$

Donde:

σ_f, b - son las propiedades de resistencia a la fatiga del material.

Nf_i - es la durabilidad estimada en el i - ésimo nodo.

2) Finalmente, se calcula la durabilidad estimada de la muelle multi hojas, Nfe :

$$Nfe = \text{MIN}(Nf_i); 1 \leq i \leq n \quad (5.6)$$

Donde:

n - número de nodos del modelo.

5.2.2 ESTIMACIONES DE DURABILIDAD.

Siguiendo el método descrito en 5.2.1 se estimó la durabilidad de los 3 tipos de muelles de los cuales se realizaron los análisis de esfuerzos (ver capítulo 4). Los resultados se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 - Resultados de la estimación de durabilidad

Tipo de muelle	No. de Nodo	Esfuerzo a carga mínima σ_{MIN} (MPa)	Esfuerzo a carga máxima σ_{MAX} (MPa)	Esfuerzo medio σ (MPa)	Amplitud del esfuerzo Sa (MPa)	Durabilidad estimada Nfe (ciclos)
I	48	228	1196	712	484	102,238
II	127	205	1143	674	469	140,033
III	74	195	1161	678	483	113,309

5.3 PRUEBAS DE DURABILIDAD DE MUELLES MULTI -HOJAS.

5.3.1 PROCEDIMIENTO.

Se realizaron pruebas de durabilidad de 6 muestras de 3 diferentes tipos de muelles multi - hojas de acuerdo a la siguiente norma:

a) Procedimiento de pruebas de fatiga de muelles multi - hojas para sistemas de suspensión (SAE J1528).

5.3.2 PROBETAS.

a) Dimensiones: en el anexo E se muestran los dibujos de definición de los 3 diferentes tipos de muelles ensayadas.

b) Material: Acero SAE-5160.

c) Preparación: fabricadas a partir de solera rolada en caliente para muelle multi - hojas. Austenizada a 900°C, templada en aceite mineral a 90°C y revenida a 450°C en equipo de proceso para la manufactura de muelle multi - hojas. Finalmente, se sometió al proceso de granallado con una intensidad de 0.33mm Almen A y un cubrimiento de 0.95% en la superficie plana de las hojas de la muelle que trabajaran bajo esfuerzos de tensión.

5.3.3 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA.

a) Máquina: equipo electro - hidráulico para pruebas de fatiga de muelles multi - hojas.

b) Tipo de prueba: flexión en 3 puntos.

c) Número de máquinas utilizadas: 1.

d) Frecuencia de prueba: 1Hz.

e) Función de aplicación de carga: triangular

f) Monitoreo de cargas: celda de carga.

g) Criterio de falla: fractura completa de alguna de las hojas que forman la muelle.

h) Número de probetas ensayadas: 18

i) Proporción del esfuerzo, R: 0 .

j) Temperatura del laboratorio: promedio, 22°C; rango, ± 1 .

k) Humedad relativa del laboratorio: promedio, 40%; rango, $\pm 3\%$.

l) Observaciones: las condiciones de carga de las pruebas se describen en la tabla 4.3.

5.3.4 RESULTADOS.

Los resultados de las pruebas se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 - Resultados de pruebas de durabilidad de muelles multi - hojas.

No. de muestra	Tipo de muelle	Durabilidad (ciclos)
1	I	85,125
2	I	94,029
3	I	89,128
4	I	91,771
5	I	95,356
6	I	93,962
7	II	130,576
8	II	132,404
9	II	122,570
10	II	128,932
11	II	129,067
12	II	130,564
13	III	101,168
14	III	107,468
15	III	102,129
16	III	104,652
17	III	106,647
18	III	105,735

5.4 CORRELACIÓN DE RESULTADOS.

Correlacionando los resultados de la estimación de durabilidad con los resultados de las pruebas de durabilidad de los 3 diferentes tipos de muelles multi - hojas, se obtiene la siguiente ecuación:

$$N_f = 0.9766 N_{fe} - 7343 \quad (\text{ver figura 5.1}) \quad (5.7)$$

Con un coeficiente de correlación de 0.960 y un error típico para la estimación de N_f de 3352.

Donde :

N_{fe} = durabilidad estimada (ciclos)

N_f = resultados de pruebas de durabilidad (ciclos)

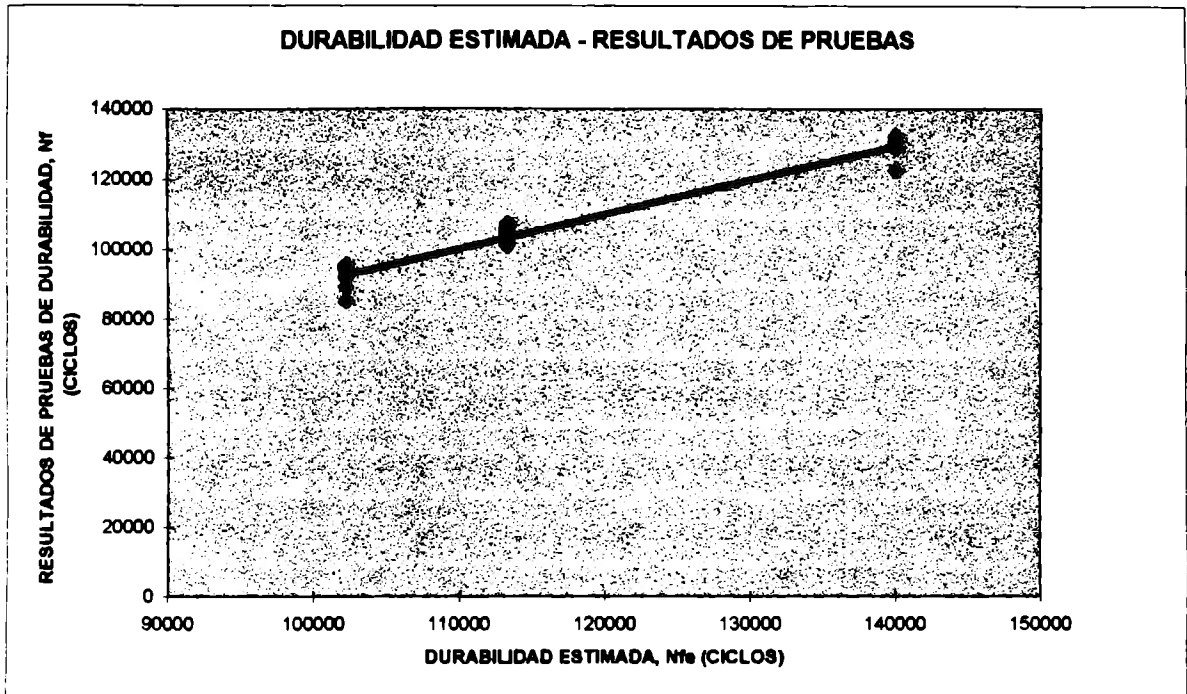


Fig. 5.1 - Gráfica de estimación de durabilidad - resultados de pruebas de durabilidad.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 CONCLUSIONES.

Se logró desarrollar un método analítico para la estimación de la durabilidad media de muelles multi - hojas sometidas a una prueba de fatiga de flexión en tres puntos de amplitud constante. Este método será empleado para la verificación de un nuevo diseño, permitiendo reducir el tiempo y los costos del desarrollo de nuevos productos al disminuir el número de pruebas de durabilidad para la verificación de los mismos.

El método analítico está basado en la caracterización del material SAE-5160, de las propiedades mecánicas (esfuerzo - deformación) y las propiedades de fatiga (esfuerzo - durabilidad). Además del método desarrollado para el análisis de esfuerzos de muelles multi - hojas con el auxilio de un programa de tecnologías CAD-CAE utilizando el método de elementos finitos, el cual, emplea como datos de entrada la geometría de la muelle y las condiciones de carga que experimentará bajo la prueba de durabilidad (historia de cargas).

Por último, con el resultado del análisis de esfuerzos y las propiedades de fatiga del material se estima una durabilidad siguiendo el método propuesto según la teoría de iniciación de grietas.

El empleo de las tecnologías CAD-CAE permitió la sistematización del procedimiento para el análisis de esfuerzos y la estimación de durabilidad, logrando reducir el tiempo para la ejecución de los mismos.

Los resultados de las estimaciones de durabilidad obtenidos con el método propuesto son mayores alrededor de un 9% de los resultados obtenidos en pruebas de durabilidad, esta diferencia puede ser el resultado de los siguientes factores:

- 1) Las probetas empleadas para la caracterización de las propiedades de fatiga fueron fabricadas bajo condiciones mucho mas controladas que las que se emplean para la fabricación de muelles multi - hojas, por lo que las condiciones estructurales y de acabado superficial del material después de los procesos de temple y granallado son mas uniformes, lo que originó que la durabilidad media de las probetas resultara mucho mayor que las de las muelles multi - hojas.

2) Al despreciar algunos fenómenos en el análisis de esfuerzos, como el de fricción entre las hojas, la magnitud de los esfuerzos resultantes en la muelle multi - hojas es menor que los esfuerzos experimentados por las mismas en las pruebas de durabilidad, por lo cual, los resultados de la estimación de durabilidad son mayores.

6.2 RECOMENDACIONES.

Con el objeto de mejorar los resultados de las estimaciones de durabilidad, se proponen las siguientes actividades:

- 1) Obtener los coeficientes estático y dinámico de fricción entre hojas experimentalmente para integrar este fenómeno en el análisis de esfuerzos.
- 2) Correlacionar los esfuerzos resultantes del método analítico con mediciones experimentales con galgas extensométricas en muelles multi - hojas.
- 3) Aumentar el número de pruebas de fatiga de probetas para mejorar la relación esfuerzo - durabilidad del material SAE 5160 y analizar estos datos con alguna de las distribuciones de probabilidad existentes para datos de fatiga, y así poder obtener la confianza de las estimaciones.
- 4) Con el objeto de obtener resultados mas precisos se podría desarrollar otro método basado en la teoría de la mecánica de la fractura, para lo cual sería necesario obtener propiedades de fatiga de propagación de grietas.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA.

- [1] RICE, R.C., *Fatigue design handbook*. Second edition.
USA : Society of Automotive Engineers, Inc., 1988. 369p.
- [2] SHIGLEY, J. E., *Mechanical engineering design*. Fifth edition.
USA : McGraw-Hill, 1992. 883p.
- [3] BEER, F. P., *Mechanics of materials*. First edition.
USA : McGraw-Hill, 1991. 618p.
- [4] ASKELAND, D. R., *The science and engineering of materials*. First edition.
USA : PWS Publishers, 1987. 556p.
- [5] ESTERMAN, M., *Robust design for fatigue performance*.
1996 ASME Design technical conference.
- [6] ALMEN, J. O., *Residual stresses and fatigue in metals*. First edition.
USA : McGraw-Hill, 1963. 342p.
- [7] FARRAHI, G. H., *Effect of shot peening on residual stress and fatigue life of spring steel*.
Fatigue & Fracture of Engineering material & structures., 1995, Vol. 18, No. 2, p. 211-220.
- [8] ANSYS User's Manual for revision 5.3. Volume I Procedures.
USA : Swanson Analysis Systems, Inc., 1996. 2524p.
- [9] ANSYS User's Manual for revision 5.3. Volume III Elements.
USA : Swanson Analysis Systems, Inc., 1996. 1891p.
- [10] ANSYS User's Manual for revision 5.3. Volume IV Theory.
USA : Swanson Analysis Systems, Inc., 1996. 2156p.
- [11] *Spring design manual*. Second edition.
USA : SAE International, Inc., 1996. 403p.

- [12] Technical report on fatigue properties SAEJ1099. *1997 SAE Handbook.*,
USA : SAE international, Inc., 1997, Vol. 1.
- [13] Test strip, holder and gage for shot peening SAEJ422. *1997 SAE Handbook.*
USA : SAE international, Inc., 1997, Vol. 1.
- [14] Procedure for using standard shot peening test strip SAEJ443. *1997 SAE Handbook.*
USA : SAE international, Inc., 1997, Vol. 1.
- [15] Surface rolling and other methods for mechanical pre-stressing of metals SAEJ811.
1997 SAE Handbook. USA : SAE international, Inc., 1997, Vol. 1.
- [16] Leaf springs for motor vehicle suspension SAEJ1123. *1997 SAE Handbook.*,
USA : SAE international, Inc., 1997, Vol. 2.
- [17] Leaf springs for motor vehicle suspension SAEJ510. *1997 SAE Handbook.*,
USA : SAE international, Inc., 1997, Vol. 2.
- [18] Fatigue testing procedure for leaf springs SAEJ1520. *1997 SAE Handbook.*,
USA : SAE international, Inc., 1997, Vol. 2.
- [19] SAE Manual on shot peening SAEJ808a
USA : SAE International, Inc., 1967, 25p.
- [20] Standard test method for bend testing of metallic materials for spring applications
E855-90. *Annual book of ASTM standards.* USA : ASTM, 1995.
- [21] Youngs' modulus at room temperature E111-61. *Annual book of ASTM standards.*
USA : ASTM, 1995.
- [22] Presentation of constant amplitude fatigue test results for metallic materials E468-76.
Annual book of ASTM standards. USA : ASTM, 1995.
- [23] Brinell hardness of metallic materials E10-78. *Annual book of ASTM standards.*
USA : ASTM, 1995.
- [24] Definition of terms relating to methods of mechanical testing E6-81.
Annual book of ASTM standards. USA : ASTM, 1995.
- [25] Constant amplitude fatigue testing of metallic materials E466.
Annual book of ASTM standards. USA : ASTM, 1995.
- [26] Tension testing of metallic materials E-8. *Annual book of ASTM standards.*
USA : ASTM, 1995.

ANEXO A. GLOSARIO DE TERMINOS.

A.1 RELACIONADOS CON MUELLES MULTI HOJAS.

Los siguientes términos son recomendados para usarse en dibujos y especificaciones para evitar confusiones (figuras A.1 y A.2) [11]:

Hojas.

Son cada una de las placas que forman la muelle. Las hojas son designadas por números, empezando por la hoja principal (normalmente la hoja de mayor longitud) la cual es la número 1, la hoja adyacente es la número 2 y así hasta llegar a la hoja más pequeña.

Superficie de tensión.

Superficie de una hoja que durante su trabajo estará expuesta a esfuerzos normales de tensión, normalmente es la superficie cóncava de la hoja.

Línea base.

Línea que sirve de referencia de diversas dimensiones. En muelles con roleos, la línea base atraviesa por los centros de éstos. En muelles sin roleos esta línea cruza por los puntos en los extremos de la muelle donde se aplican las cargas.

Línea base del ángulo de asiento.

Línea de referencia dibujada a través de los puntos terminales de la longitud activa en cada extremo de la muelle, tomados a lo largo de la superficie de tensión de la hoja principal (No. 1). En muelles sin roleos la línea base coincide con la línea base del ángulo de asiento.

Longitud con carga (Lc).

Distancia entre los centros de los roleos cuando la muelle es flexionada a la posición de carga especificada. En muelles sin roleos, es la distancia entre los puntos en los extremos de la muelle donde se aplican las cargas.

Longitud recta (L).

Distancia entre los centros de los roleos cuando la superficie de tensión de la hoja principal, en la línea de centro del tornillo de centro, está en el lugar de la línea base del ángulo de asiento.

Longitud de asiento (Ls).

Longitud de la muelle que está en pleno contacto con la placa de asiento cuando la muelle se encuentra ensamblada en el vehículo. Siempre es mayor que la longitud inactiva.

Longitud inactiva (Li).

Longitud de la muelle que se mantiene inactiva (sin deformación) por la acción de las placas de asiento y los pernos "U". Cuando se utilizan placas de asiento de metal, esta longitud se asume a ser igual a la distancia entre la parte interior de los pernos "U".

Ángulo de asiento (θ_a).

Ángulo entre la tangente de la superficie de tensión de la hoja No. 1 en el centro de la muelle y la línea base del ángulo de asiento.

Espesor de paquete (Ep).

Suma de los espesores nominales de todas las hojas de la muelle, incluyendo a cualquier espaciador o placa que sea parte de la muelle en el área de asiento.

Altura (A).

Distancia de la línea base al punto en la superficie de tensión de la hoja No. 1 donde esta situada la línea de centro del tornillo de centro.

Altura total (H).

Altura más el espesor del paquete. La altura y la altura total pueden ser positivas y/o negativas.

Posición metal - metal (AM).

Altura o altura total de máxima deflexión a la que estará expuesta la muelle en funcionamiento.

Claro (c).

Diferencia en altura, o altura total, entre la altura de diseño y la posición metal - metal.

Curvatura (1/R).

Es el recíproco del radio de curvatura de la superficie de tensión de una hoja. La curvatura es cero si la hoja está recta ("plana"), la curvatura se considera positiva en la dirección en la cual ésta se reduce cuando la carga se incrementa (corresponde a altura positiva).

Números Almen.

Estos números sirven para especificar la intensidad del proceso de granallado. La intensidad de este proceso se especifica de la siguiente manera [13]:

XXX mm X.

Donde :

XXX - indica la altura del arco producido a una placa Almen después de someterse al proceso de granallado.

mm - unidades en que se mide el arco (milímetros).

X - tipo de placa Almen empleada en la medición (A, C o N).

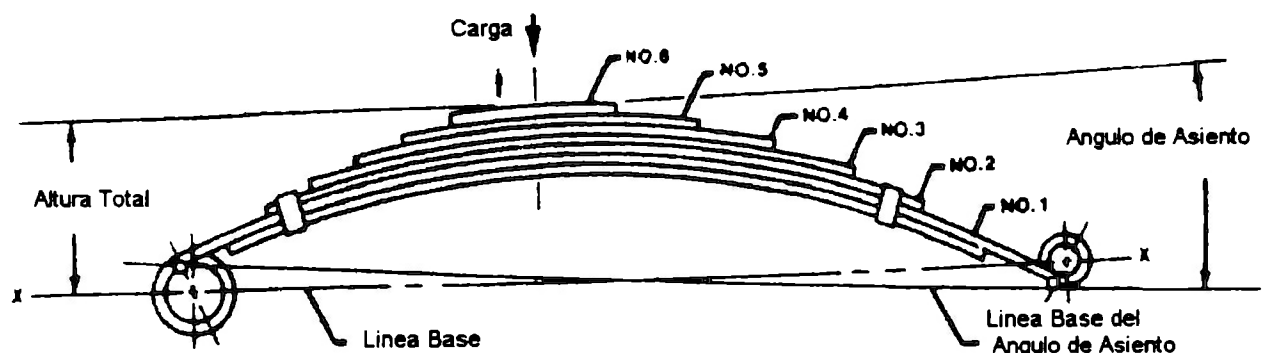


Fig. A.1 - Términos relacionados (1).

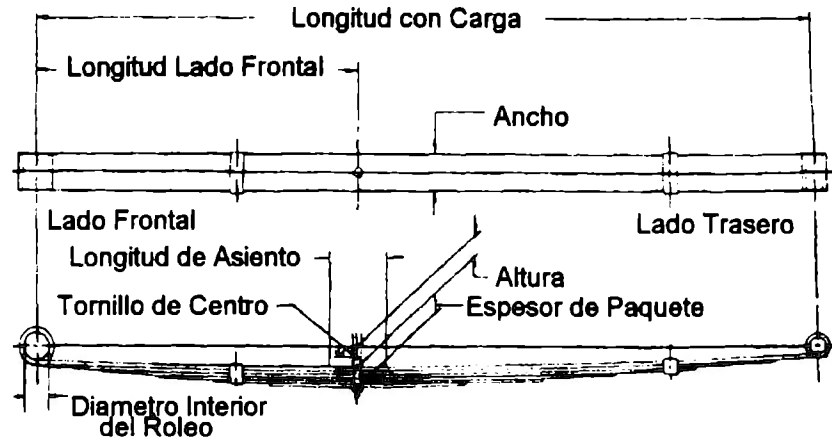


Fig. A.2 - Términos relacionados (2).

A.2 COMPONENTES DE UNA MUELLE MULTI HOJAS.

Tornillo de centro.

El tornillo de centro es requerido para mantener las hojas de la muelle en contacto con el centro de la misma, y la cabeza del tornillo se utiliza como una referencia durante la instalación de la muelle en el vehículo.

Abrazaderas.

Las abrazaderas son utilizadas para evitar que las hojas giren. Existen diferentes tipos de éstas las cuales se utilizan para diferentes aplicaciones (figura A.3).

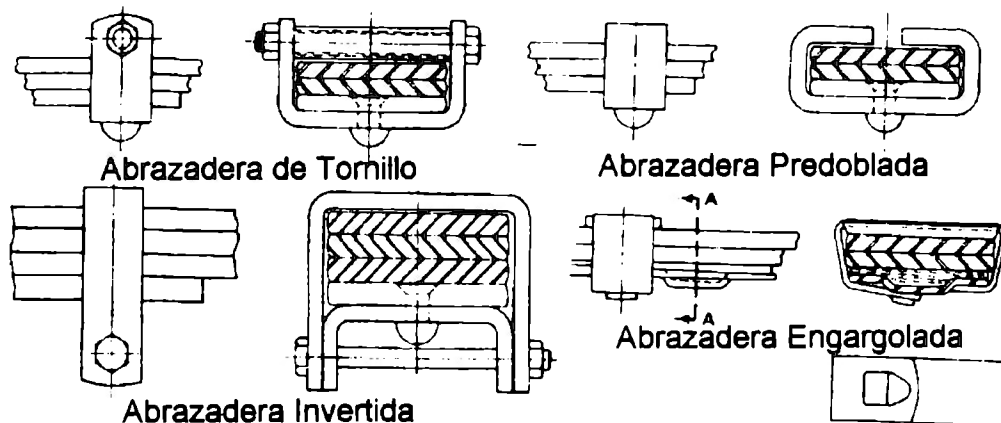


Fig. A.3 - Tipos de abrazaderas.

Bujes.

Los bujes son elementos que se insertan en los extremos circulares (roleos) de las muelles, los cuales permiten un fácil ensamble de la muelle en el vehículo y forman parte de la articulación en los extremos de cada muelle. Existen diferentes tipos de bujes de diferentes materiales los cuales se emplean dependiendo de la aplicación de la muelle.

A.3 ACABADOS DE LOS EXTREMOS DE LAS HOJAS.

Hay diferentes acabados de extremos o formas de extremos los cuales se emplean dependiendo de la aplicación de la muelle (figura A.4) [11].

Corte Recto.

Es el acabado más fácil de producir, pero es usualmente insatisfactorio, ya que causa concentración en la presión entre las hojas, dando como resultado una fricción elevada. Con este tipo de acabado se obtiene una pobre aproximación de la muelle teórica triangular de resistencia uniforme, y por lo tanto una muelle más pesada de lo necesario.

Despunte.

Este acabado logra una mejor aproximación a la muelle de resistencia uniforme omitiendo el exceso de material, éste mejora la distribución de presión entre las hojas.

Despalme.

Este acabado puede realizarse para aproximar de una manera cercana la forma ideal de la muelle de resistencia uniforme. Debido a la flexibilidad del extremo de la hoja, la distribución de presión en las áreas de contacto es mejorada y la fricción entre las hojas es altamente reducida.

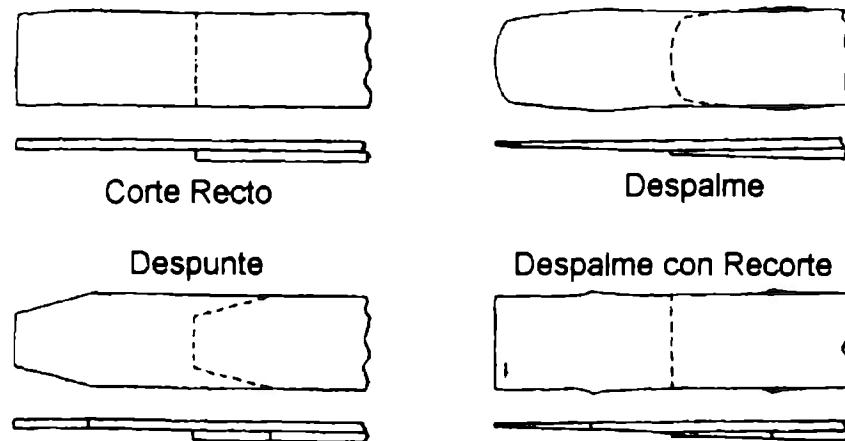


Fig. A.4 - Tipos de acabados de los extremos de las hojas.

A.4 ACABADOS DE LOS EXTREMOS DE LA MUELLE.

Los acabados de los extremos de una muelle multi - hojas son las formas de los extremos de la primera y segunda hoja que definen el tipo de ensamble de la muelle en el vehículo (figura A.5) [11].

Roleos.

Estos acabados son de forma circular u ovalada, se emplean con el objeto de obtener un alojamiento para un buje, lo cual nos permitirá conseguir una articulación en el ensamble de la muelle en el vehículo. La forma y tamaño de roleo dependen del tipo de buje, espacio disponible para el ensamble de la muelle, aplicación de la muelle, etc.

Extremo plano.

Este acabado es construido con una hoja recta sobre un apoyo curvo, o una hoja curva sobre un apoyo recto, lo emplean las muelles progresivas de constante elástica variable ya que permite que la primera hoja se deslice sobre el apoyo, originando un cambio en el punto de aplicación de la carga (cambio de la longitud efectiva de la muelle).

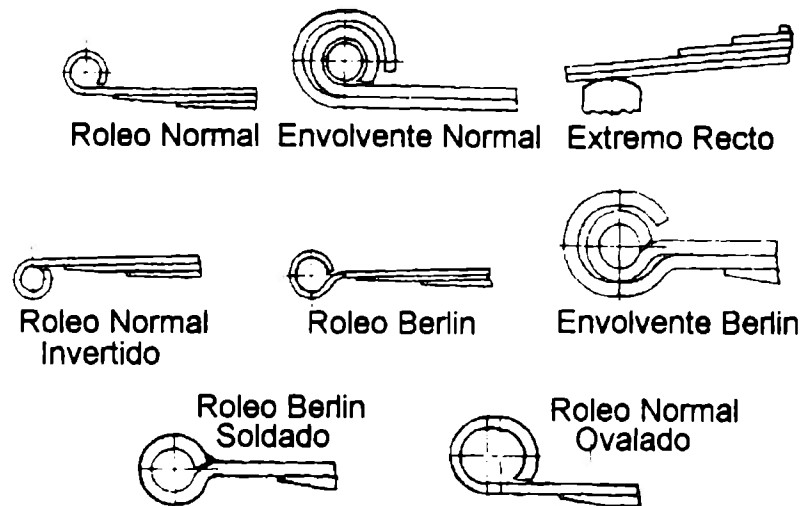


Fig. A.5 - Tipos de acabados de los extremos de las muelles.

A.5 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES [12].

Módulo de elasticidad (E).

Es la proporción del esfuerzo normal a la deformación para esfuerzos de tensión o compresión abajo del límite proporcional del material.

$$\sigma = E \epsilon \quad (\text{A.1})$$

Donde:

σ = esfuerzo axial de tensión o compresión
 ϵ = deformación

Coefficiente de Poisson (ν).

Es el valor absoluto de la proporción de la deformación transversal a la correspondiente deformación axial resultado de una distribución uniforme de esfuerzo axial abajo del límite proporcional del material.

$$\nu = \epsilon_y / \epsilon_x \quad (\text{A.2})$$

Resistencia última a la tensión (S_u).

Es el esfuerzo ingenieril a carga máxima. En un material dúctil, éste es gobernado por el cuello de la probeta.

$$S_u = P_{\max} / A_o \quad (A.3)$$

Donde:

P_{\max} = carga máxima

A_o = área de sección transversal original

Resistencia a la fractura verdadera (σ_f).

Es el esfuerzo verdadero a la tensión requerido para causar fractura.

$$\sigma_f = P_f / A_f \quad (A.4)$$

Donde:

P_f = carga para fractura

A_f = área de sección transversal mínima después de fractura

El valor debe ser corregido por el efecto del esfuerzo triaxial presentado debido al cuello de la probeta. Esta corrección sugerida por Bridgman es ilustrada en la figura A.6. En esta figura, el cociente del valor corregido entre el no corregido ($\sigma_f / (P_f/A_f)$) es graficado contra la deformación verdadera a la tensión.

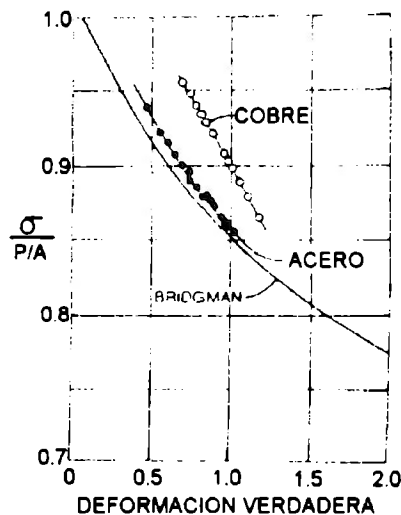


Fig. A.6 - Relación entre el factor de corrección de Bridgman $\sigma_f / (P/A)$ y la deformación verdadera en tensión

Resistencia de fluencia a la tensión (S_{ys} , σ_{ys}).

Es el esfuerzo para causar una cantidad de deformación plástica, usualmente 0.2%. Ésta es usualmente determinada construyendo una línea con una pendiente E que cruza el eje de las abscisas en 0.2% de deformación. El esfuerzo donde la línea construida intersecta a la curva esfuerzo - deformación es tomado como la resistencia de fluencia. (E = módulo de elasticidad).

Porcentaje de reducción de área (%RA).

Es el porcentaje de reducción del área de la sección transversal después de fractura.

$$\%RA = 100 (A_o - A_f) / A_o \quad (A.5)$$

Ductilidad verdadera a la fractura (ϵ_f).

Es la deformación plástica verdadera después de la fractura.

$$\epsilon_f = \ln (A_o / A_f) = \ln (100 / (100 - \%RA)) \quad (A.6)$$

Exponente de endurecimiento de deformación monótona (n).

Es el exponente al cual la deformación plástica verdadera debe ser elevada para ser proporcional al esfuerzo verdadero. Ésta es generalmente tomada como la pendiente de la gráfica del $\log(\sigma)$ contra $\log(\epsilon_p)$.

$$\sigma = K \epsilon_p^n \quad (A.7)$$

Coefficiente de resistencia (K).

Es el esfuerzo verdadero que origina una deformación plástica unitaria. Si la ductilidad a la fractura es menor que 1, éste es necesariamente obtenido por extrapolación.

Número de ciclos para fractura (Nf).

Es el número de ciclos de esfuerzo alterno de amplitud constante (tensión y compresión) para causar fractura en una probeta.

Cambio completamente revertido (2Nf).

Un cambio completamente revertido es contado cada vez que el esfuerzo o la deformación cambia de dirección. En pruebas de amplitud constante un ciclo es igual a dos cambios.

Exponente de resistencia a la fatiga (b).

Es la potencia a la cual la durabilidad (número de cambios completamente revertidos) debe ser elevada para ser proporcional a la amplitud del esfuerzo verdadero. Ésta es tomada como la pendiente de la gráfica del $\log(\Delta\sigma / 2)$ contra el $\log (2Nf)$.

Coefficiente de resistencia a la fatiga (σ'_f).

Es el esfuerzo verdadero requerido para causar falla en un cambio del esfuerzo. Éste es tomado como la intersección del $\log(\Delta\sigma / 2)$ contra $\log(2Nf)$ en $2Nf = 1$.

Resistencia a la fluencia cíclica ($0.2\%\sigma_{ys}$).

Es el esfuerzo para causar 0.2% de deformación plástica medida sobre la curva esfuerzo deformación cíclica. Es usualmente determinada construyendo una línea paralela a la pendiente de la curva esfuerzo - deformación que cruza el eje de las abscisas en el punto de 0.2% de deformación. El esfuerzo donde la línea construida intersecta la curva cíclica esfuerzo - deformación es tomado como la resistencia a la fluencia cíclica al 0.2%.

Exponente de endurecimiento de deformación cíclica (n').

Es el exponente al cual la amplitud de deformación plástica verdadera debe ser elevada para ser proporcional a la amplitud del esfuerzo. Ésta es tomada como la pendiente de la gráfica del $\log(\Delta\epsilon_p/2)$ contra el $\log(\Delta\sigma/2)$, donde $\Delta\epsilon_p/2$ y $\Delta\sigma/2$ son medidos de ciclos estables de histéresis.

$$\Delta\sigma / 2 = K' (\Delta\epsilon_p / 2)^{n'} \quad (\text{A.8})$$

Donde:

$\Delta\epsilon_p / 2$ = amplitud de deformación plástica verdadera

Coefficiente de resistencia cíclica (K').

Es el esfuerzo verdadero al cual se produce una deformación plástica verdadera unitaria. Debe ser necesariamente obtenido por extrapolación.

Exponente de ductilidad de fatiga (c).

Es el exponente al cual la durabilidad en número de cambios de deformación completamente revertidos debe ser elevada para ser proporcional a la amplitud de la deformación verdadera. Ésta es tomada como la pendiente de la gráfica del $\log(\Delta\epsilon_p / 2)$ contra el $\log(2 Nf)$.

Coefficiente de ductilidad de fatiga (ϵ'_f).

Es la deformación verdadera requerida para causar falla en un cambio. Ésta es tomada como la intersección del $\log(\Delta\epsilon_p / 2)$ contra el $\log(2 Nf)$ en $2Nf = 1$.

Durabilidad de transición en fatiga (2Nt).

Es la durabilidad donde las componentes de la deformación plástica y elástica son iguales. Ésta es la durabilidad a la cual las líneas de deformación plástica y elástica contra la durabilidad se cruzan (ver fig. B.8).

ANEXO B. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

Las propiedades de los materiales importantes para análisis de fatiga y fractura han evolucionado desde el siglo pasado donde se empleaban diagramas de durabilidad, definiendo rangos de seguridad de esfuerzo operativo, hasta detallados compendios de datos de la resistencia del material por iniciación y propagación de grietas debido a la fatiga, como también relaciones muy complejas para ser empleadas en los análisis estructurales. Estos datos se utilizan en gran variedad de aplicaciones, por ejemplo, en el desarrollo de aleaciones, selección de materiales y procesos, análisis de diseño, y análisis de fatiga.

El análisis de deformación - durabilidad se ha convertido en una herramienta muy efectiva en la industria automotriz para la predicción de fallas en máquinas y herramientas bajo condiciones típicas de campo.

Establecer las bases para el diseño de un componente que debe cumplir una durabilidad especificada o investigar la causa de falla inesperada de un componente requiere un gran desarrollo en procedimientos analíticos. Con el uso del diseño asistido por computadora, un ingeniero puede evaluar una gran cantidad de diseños antes de construir prototipos. Estos procedimientos analíticos dependen en gran medida de los datos sobre las propiedades de los materiales.

Los primeros intentos de cuantificar el desempeño de un material en fatiga fueron desarrollados hace más de un siglo por Wohler. Usando una máquina de pruebas de flexión rotatoria. Él desarrolló pruebas en probetas lisas y con ranuras, graficando los resultados en forma de amplitud de esfuerzo contra el número de ciclos para lograr la falla en el material. Encontró que si la amplitud del esfuerzo era reducida las probetas no fallaban en un número de ciclos determinado. Un límite de fatiga de esfuerzo operativo fue definido basado en esta condición de no falla.

Muchos esfuerzos han sido llevados a cabo a lo largo de los años en la caracterización del comportamiento en fatiga de los metales siguiendo las teorías de Wohler. Estudios más recientes han explorado la influencia de otras variables, como esfuerzo medio, medio ambiente y acabado superficial.

También se han hecho intentos de relacionar el desempeño en fatiga, con propiedades más fáciles de determinar como las propiedades mecánicas de tensión. Con esta aproximación para estimar la resistencia a la fatiga con esfuerzo cíclico se construye una curva esfuerzo - durabilidad a partir

de la resistencia última a la tensión del material. Entonces la porción de alta durabilidad de la curva de fatiga puede ser reducida por factores relacionados con el modo de carga, ambiente y geometría. Los esfuerzos medios se toman en cuenta en los diagramas de durabilidad constante los cuales proveen de combinaciones de esfuerzo medio y amplitud que se supone resultan en durabilidades semejantes.

La naturaleza empírica de este enfoque basado en esfuerzos no puede ser generalizada, una demanda de alta precisión en la predicción de la durabilidad de estructuras complejas requiere un mayor entendimiento del proceso de fatiga.

Ahora es conocido que la fatiga ocurre por deformaciones plásticas cíclicas que causan cambios irreversibles en la estructura de los materiales. Los tipos de cambios irreversibles de la estructura del material cambian según progresa el proceso de fatiga. Basado en estos cambios, es posible para muchos materiales, dividir el proceso en pasos parcialmente traslapados como sigue:

- (a) Endurecimiento o ablandamiento cíclico, depende de las condiciones iniciales del material y la magnitud de la amplitud del esfuerzo o deformaciones. El volumen entero del material puede ser afectado por el cambio en la estructura.
- (b) Nucleación de micro - grietas, en la capa adyacente a la superficie del material debido a efectos de concentración de esfuerzos.
- (c) Propagación de grietas pequeñas (el orden de magnitud del tamaño de las grietas corresponde al tamaño de grano del material).
- (d) Propagación de grietas (tamaño de grietas significativamente mayores al tamaño de grano del material), finalizan en la fractura total.

Una gran variedad de técnicas y probetas de prueba han sido desarrolladas para generar datos de fatiga. Los resultados obtenidos dependen de lo siguiente:

- Tipo de probeta (lisa, con ranuras).
- Modo de carga (axial, flexión, torsión).
- Rango de esfuerzos o deformaciones cíclicas.
- Nivel de esfuerzo medio.
- Dirección del grano dentro de la probeta (láminas, placas o barras pueden proporcionar resultados drásticamente diferentes en propiedades de fatiga en diferentes planos relativos a la dirección primaria del trabajo en frío).

Las herramientas modernas del diseño nos permiten determinar de una manera muy precisa los esfuerzos en estructuras, esto es importante ya que las propiedades de fatiga del material deben estar presentadas en términos de los métodos actuales del cálculo de esfuerzos.

Además de las curvas tradicionales de esfuerzo - durabilidad, los análisis modernos de fatiga hacen uso de:

- Relaciones cíclicas esfuerzo - deformación para el análisis estructural y modelado de materiales.
- Curvas de relajación de esfuerzo para obtener la estabilidad del esfuerzo medio.
- Curvas de crecimiento de grietas para estimar los grados de propagación en estructuras.

Tabla B.1 - Pruebas comunes y aplicaciones en análisis de fatiga.

Pruebas	Uso
Tensión	Comparación de materiales
Esfuerzo cíclico	Curvas esfuerzo - durabilidad Efectos del esfuerzo medio
Deformación cíclica	Curva cíclica esfuerzo - deformación Curva deformación - durabilidad Relajación del esfuerzo medio
Fatiga con ranuras	Sensibilidad de cortes o ranuras en fatiga
Crecimiento de grietas en fatiga	Grado de crecimiento cíclico contra rango de intensidad de esfuerzos

B.1 PROPIEDADES ESTÁTICAS ESFUERZO – DEFORMACIÓN.

Los ensayos de tensión son generalmente usados para proporcionar datos básicos para el diseño, como son la resistencia y la ductilidad del material. Éstos también son utilizados para probar si el material cumple con las especificaciones para una aplicación dada. El análisis de fatiga proporciona una curva base esfuerzo - deformación para evaluar la naturaleza y extensión de cualquier cambio cíclico subsecuente en la resistencia a la deformación (como un endurecimiento o ablandamiento cíclico).

Las propiedades estáticas esfuerzo - deformación son generalmente determinadas por pruebas en probetas lisas bajo carga axial. La carga, el diámetro y/o deformación en la sección uniforme de prueba es medida durante la prueba para determinar la respuesta esfuerzo - deformación del material. Las propiedades, la mayoría de las cuales son puntos discretos de la curva esfuerzo - deformación pueden ser definidos para describir el comportamiento de un material como se muestra en las gráficas B.1 y B.2.

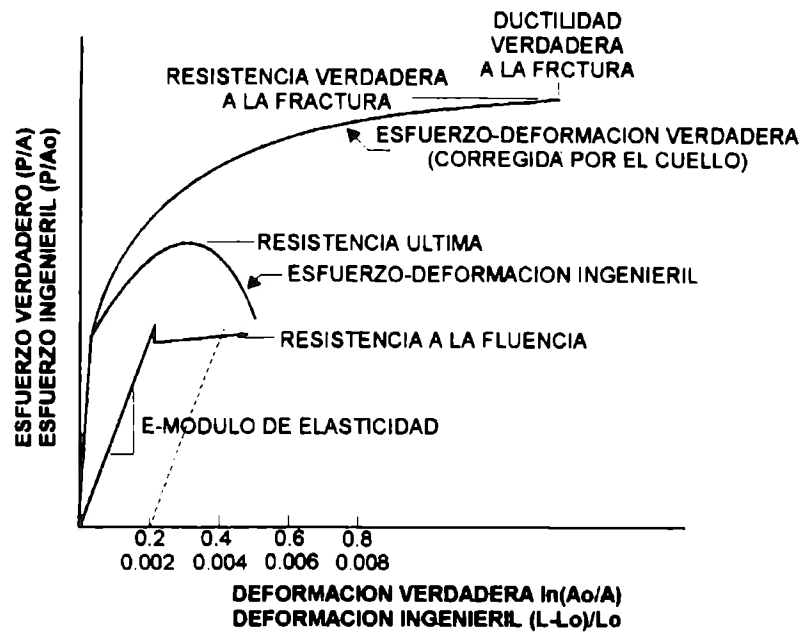


Fig. B.1 - Gráfica esfuerzo - deformación

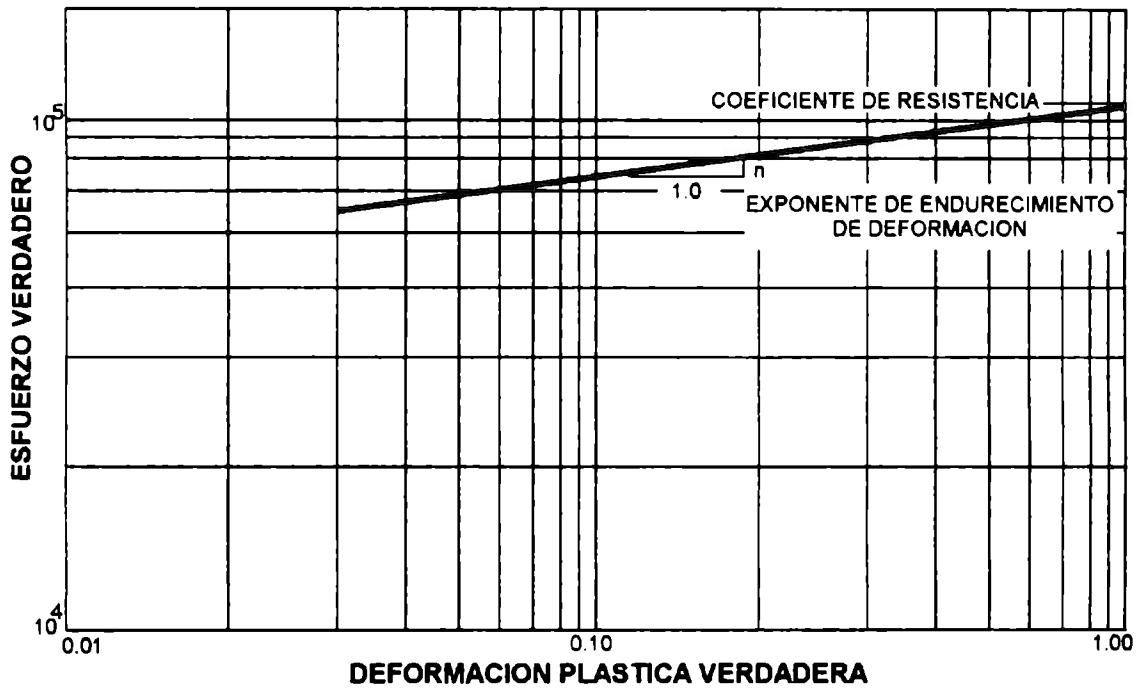


Fig. B.2 - Gráfica de esfuerzo verdadero - deformación plástica

B.1.1 RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES INGENIERILES Y VERDADERAS.

Las propiedades mecánicas a la tensión de un material pueden ser clasificadas en dos grupos, propiedades ingenieriles esfuerzo - deformación y propiedades verdaderas esfuerzo - deformación.

Las propiedades ingenieriles son asociadas con el área de sección original de la probeta en prueba y los valores verdaderos están relacionados con el área actual mientras la probeta está bajo carga. La diferencia entre los valores verdaderos e ingenieriles son insignificantes en la región de baja deformación, menor de 0.2% de deformación.

Hasta que en la probeta empieza a generarse el cuello, algunas relaciones simples existen entre los valores ingenieriles y verdaderos esfuerzo - deformación. La relación entre la deformación ingenieril y verdadera es la siguiente:

$$\epsilon = \ln (1 + e) \quad (B.1)$$

Donde:

ϵ = la deformación verdadera

e = la deformación ingenieril

De forma similar la relación esfuerzo verdadero a esfuerzo ingenieril es la siguiente:

$$\sigma = S (1 + e) \quad (B.2)$$

Donde:

σ = esfuerzo verdadero

S = esfuerzo ingenieril

La siguiente tabla resume las propiedades ingenieriles y verdaderas esfuerzo - deformación obtenidas en una prueba de tensión. Además se muestran las normas ASTM pertinentes a las pruebas de tensión de materiales metálicos.

Tabla B.2 - Resumen de las propiedades mecánicas de tensión

Propiedad	Definición	Norma ASTM
E, módulo de elasticidad	Pendiente de la curva esfuerzo deformación en esfuerzo bajo	E-111 E-231
S _y , resistencia a la fluencia	Esfuerzo en el cual una línea con pendiente E intersecta la curva σ vs ϵ	E-8
S _u , resistencia última a la tensión	Esfuerzo a carga máxima	E-8
%RA, porcentaje de reducción de área		E-8
σ_f , resistencia verdadera a la fractura	Carga de fractura dividida ente el área mínima de fractura	E-8
ϵ_f , ductilidad verdadera a la fractura	Deformación plástica verdadera en fractura	E-8
n, exponente de endurecimiento de deformación	Pendiente de la gráfica del $\log(\sigma)$ vs $\log(\epsilon_p)$	E-646
K, coeficiente de resistencia	Esfuerzo verdadero que origina una deformación plástica unitaria.	E-646
ν , coeficiente de poisson	Proporción de ϵ_x y ϵ_y bajo esfuerzo axial	E-132

B.2 PROPIEDADES CÍCLICAS.

B.2.1 PROPIEDADES DE ESFUERZO CÍCLICO.

Como fue descrito antes, este método de definir el comportamiento en fatiga de un metal es la técnica más antigua.

Las curvas de esfuerzo contra ciclos para falla pueden ser generadas aplicando carga axial, flexión rotatoria o flexión alternada. Los resultados obtenidos dependen de la técnica empleada en las pruebas. La diferencia en el comportamiento se cree que ocurre por la diferencia en la distribución del esfuerzo, las ecuaciones por las cuales son calculados los esfuerzos aplicados y el área de la sección transversal que experimenta los esfuerzos aplicados.

Las probetas axiales, por ejemplo, experimentan una distribución de esfuerzos uniforme sobre su sección transversal, mientras que una probeta en flexión experimenta un gradiente de esfuerzos lineal desde la superficie externa de la probeta a la superficie interna.

Si la durabilidad de la porción finita de la curva de fatiga (durabilidad inferior al límite de fatiga) es graficada como la amplitud del esfuerzo verdadero contra el número de ciclos de esfuerzo en una escala logarítmica, la curva es linealizada como se muestra en la figura B.3. Este comportamiento es caracterizado por la ecuación:

$$\sigma_a = \sigma_f' (2 Nf)^b \quad (B.3)$$

Donde b es la pendiente de la curva y σ_f' la intersección con el eje vertical y son consideradas propiedades de fatiga del material. Morrow modificó la ecuación para considerar el esfuerzo medio σ_o como sigue:

$$\sigma_a = (\sigma_f' - \sigma_o) (2 Nf)^b \quad (B.4)$$

Actualmente está bien establecido que el esfuerzo medio a tensión en el caso de una prueba de esfuerzo cíclico disminuye la durabilidad, mientras que un esfuerzo medio de compresión la incrementa. El esfuerzo medio a tensión puede ser considerado como un efecto reductivo en el coeficiente de resistencia a la fatiga.

Datos como éstos pueden ser utilizados en conjunto con un análisis de esfuerzo estructural para estimar la durabilidad en fatiga de un componente.

Este enfoque es utilizado únicamente para problemas de durabilidad donde las deformaciones elásticas son dominantes. En los regímenes de fatiga de baja durabilidad donde las grandes deformaciones plásticas determinan la proporción del daño acumulado, los análisis basados en esfuerzos se convierten en altamente imprecisos. El método de deformación en el comportamiento de fatiga es el método más adecuado bajo estas condiciones [12].

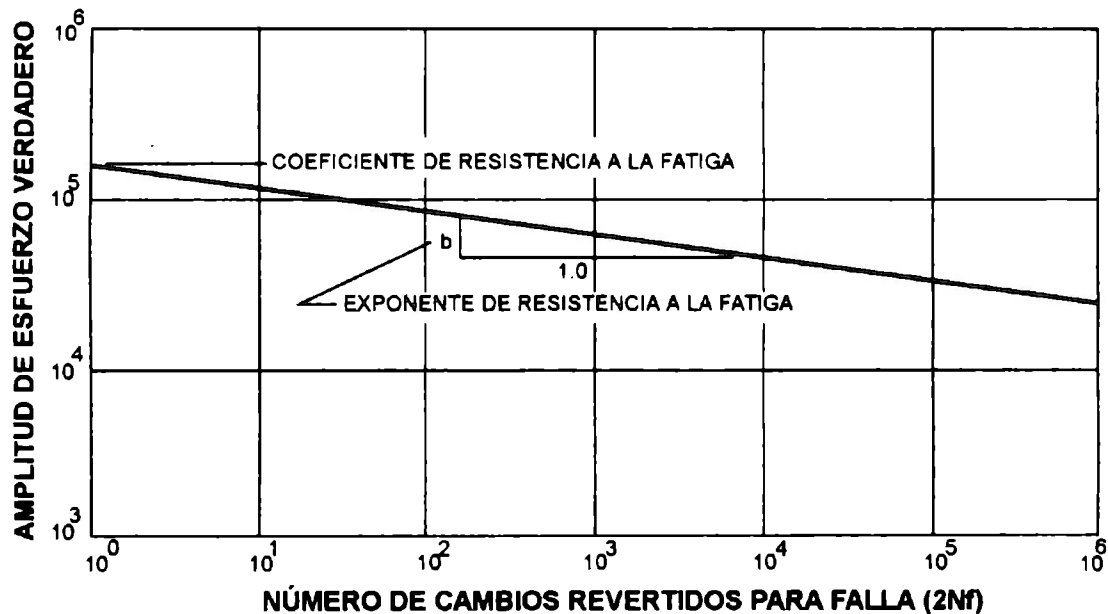


Fig. B.3 - Gráfica de Amplitud del esfuerzo contra número de cambios de esfuerzo para falla

B.2.2 PROPIEDADES DE DEFORMACIÓN CÍCLICA.

Una de las más recientes innovaciones, la cual es extensivamente usada en la industria automotriz en las pruebas de fatiga y la cual ha logrado obtener gran aceptación utiliza las deformaciones, en vez de los esfuerzos, como la variable de control.

Un transductor de deformación unido a la probeta es empleado para medir y controlar los límites apropiados de deformación. Un dato de particular interés es que los esfuerzos y deformaciones pueden ser monitoreados simultáneamente durante la prueba, además de que la respuesta a la deformación puede ser completamente documentada desde el ciclo inicial, a través de la respuesta en estado estable, hasta la formación y crecimiento de grietas críticas de fatiga.

B.2.3 CURVA CÍCLICA ESFUERZO - DEFORMACIÓN.

Para la determinación de las propiedades cíclicas, varias probetas son sometidas a deformaciones controladas completamente revertidas.

Después del endurecimiento o ablandamiento inicial (dependiendo de la condición inicial del material), la forma y tamaño de los ciclos de histéresis serán obtenidos ciclo tras ciclo. Los extremos de estos ciclos estables de varias probetas ensayadas a lo largo de un rango de deformaciones, genera la curva cíclica esfuerzo - deformación.

Un ciclo típico de histéresis estable es ilustrado en la figura B.4 y un grupo de ciclos estables con una curva cíclica esfuerzo - deformación son ilustrados en la figura B.5. Como es ilustrado, la altura del ciclo de extremo a extremo es definido como el rango de esfuerzo ($\Delta\sigma$). Para pruebas completamente revertidas una mitad en el rango de esfuerzo es generalmente igual a la amplitud del esfuerzo mientras que una mitad del ancho de extremo a extremo es definida como la amplitud de deformación ($\Delta\epsilon/2$). La amplitud de la deformación plástica es determinada restando la amplitud de la deformación elástica ($\Delta\epsilon_e/2$) de la amplitud de la deformación total:

$$\Delta\epsilon_p / 2 = \Delta\epsilon / 2 - \Delta\epsilon_e / 2 \quad (B.5)$$

De acuerdo con la ley de Hooke:

$$\Delta\epsilon_e / 2 = \Delta\sigma / 2 E \quad (B.6)$$

Donde:

E = módulo de elasticidad.

$\Delta\epsilon_p$ = amplitud de la deformación plástica.

Sustituyendo la ecuación B.6 en B.5:

$$\Delta\epsilon_p / 2 = \Delta\epsilon / 2 - \Delta\sigma / 2 E \quad (B.7)$$

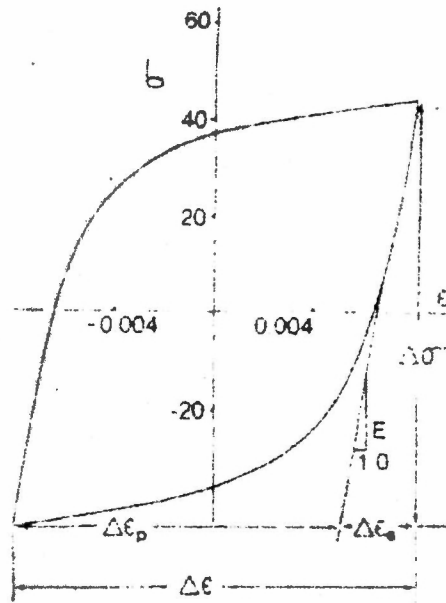


Fig. B.4 - Ciclo estable de histéresis de esfuerzo - deformación.

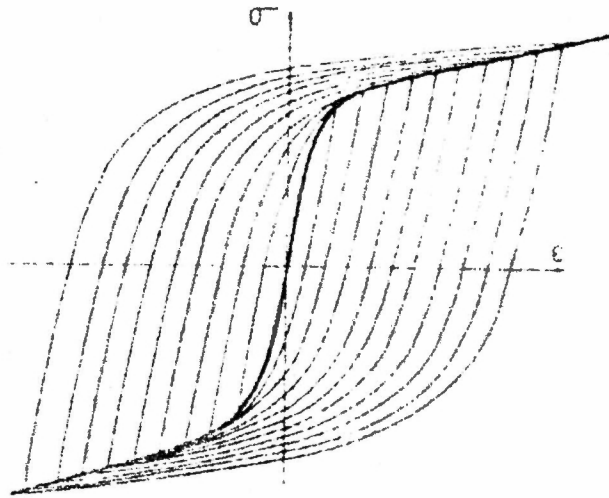


Fig. B.5 - Curva cíclica esfuerzo - deformación dibujada a través de los extremos de ciclos estables de histéresis.

Una técnica para aproximar el comportamiento cíclico esfuerzo-deformación utilizando una sola probeta es la siguiente:

La probeta es sometida a varios ciclos de gran deformación completamente revertidos, y la deformación es gradualmente reducida en 40 pasos aproximadamente hasta el punto de cero esfuerzo y cero deformación. Entonces la deformación es incrementada al mismo valor, luego reducida y así hasta que la probeta falle.

Después de que el endurecimiento o ablandamiento inicial pase, la gráfica de esfuerzo-deformación es una aproximación a la localización de los extremos de los ciclos estables. Los datos obtenidos por este método pueden tener una pequeña diferencia con los datos obtenidos por el método normal.

Además de las diferencias debidas a los métodos de prueba, se sugiere que el comportamiento esfuerzo-deformación sea representado en forma separada para regímenes de fatiga de alta y baja durabilidad con diferentes K' y n' .

Mughrabi ha demostrado que en muchos casos la curva cíclica esfuerzo - deformación puede ser dividida en 3 regiones representando diferente comportamiento de deformación. Las 3 regiones pueden ser identificadas graficando los datos esfuerzo-deformación en una escala semi-logarítmica [12].

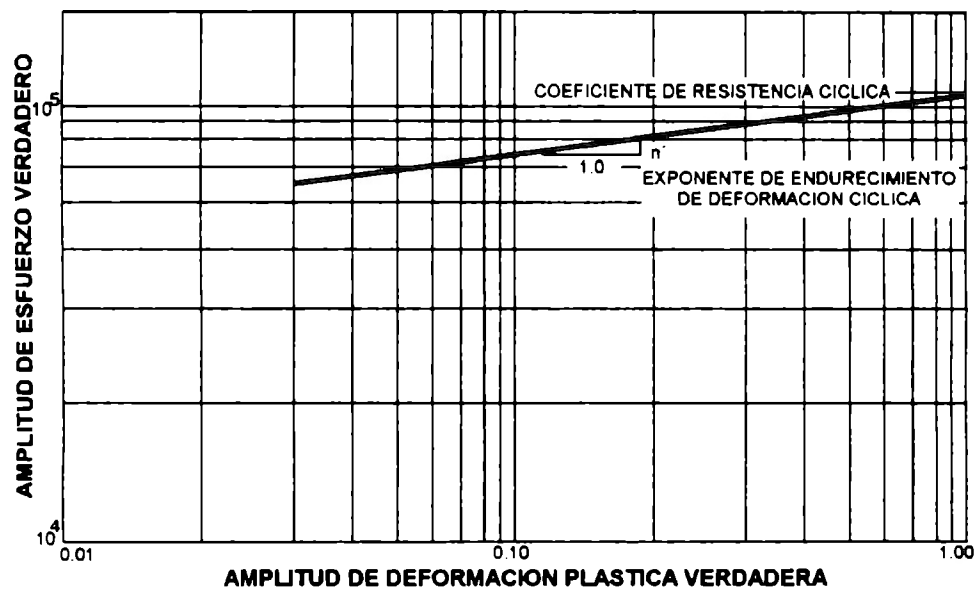


Fig. B.6 - Gráfica esfuerzo - deformación plástica cíclica

B.2.4 RELACIÓN ENTRE AMPLITUD DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA Y AMPLITUD DE ESFUERZO.

La respuesta esfuerzo-deformación para algunos aceros puede cambiar significativamente cuando se está sometido a deformaciones plásticas, esto puede ocurrir cerca de perforaciones o zonas de concentración de esfuerzos debido a la carga cíclica. Cuando la falla por fatiga ocurre, particularmente fatiga de bajo ciclo, el cambio en la respuesta esfuerzo-deformación generalmente se presenta. De aquí que, la curva cíclica esfuerzo - deformación puede representar mejor la respuesta esfuerzo - deformación que la curva monótona esfuerzo-deformación.

En muchas situaciones de prueba en campo puede ser deseable convertir deformaciones medidas a esfuerzos para estimar la durabilidad en fatiga. La curva cíclica esfuerzo-deformación puede ser descrita con la ecuación A.8 utilizando las propiedades cíclicas.

Reacomodando los términos de la ecuación A.8 se obtiene la relación entre la amplitud de la deformación plástica y la amplitud de esfuerzo:

$$\Delta\epsilon_p / 2 = (\Delta\sigma / 2 K')^{1/n'} \quad (\text{B.8})$$

Sustituyendo esta ecuación en la ecuación B7 se obtiene una ecuación que relaciona la amplitud de la deformación cíclica y la amplitud del esfuerzo en términos de las propiedades definidas y el módulo de la elasticidad:

$$\Delta\epsilon / 2 = \Delta\sigma / 2 E + (\Delta\sigma / 2 K')^{1/n'} \quad (\text{B.9})$$

B.2.5 CURVA DEFORMACIÓN - DURABILIDAD.

La relación deformación - durabilidad es caracterizada por la siguiente ecuación:

$$\Delta\epsilon / 2 = (\sigma' f / E) (2 Nf)^b + \epsilon' f (2 Nf)^c \quad (\text{B10})$$

La diferencia en el comportamiento en fatiga de una prueba de esfuerzo a una prueba de deformación como variable de control es aparente. Las curvas esfuerzo - durabilidad para un acero estructural difieren de su contraparte curva deformación - durabilidad. En particular la ductilidad del material toma un rol muy importante en la región de baja durabilidad resultando en una intersección de las dos curvas en la región de durabilidad media. Una diferencia mayor radica en la estabilidad de la prueba corriendo bajo esfuerzos medios positivos. Las pruebas de esfuerzo como variable de control tienden a mostrar inestabilidad tanto como la deformación plástica aumenta.

Un aspecto importante es que el concepto del límite de fatiga que se asume en la técnica de esfuerzo - durabilidad en el comportamiento del material, en la técnica de deformación - durabilidad no se asume la existencia del mismo. Es muy bien conocido que bajo ciertas condiciones de carga de servicio no existe el límite de fatiga para la mayoría de los materiales.

También ha sido discutido que la técnica de deformación cíclica simula con mayor aproximación las condiciones de control en regiones locales de una estructura.

El enfoque de deformación local para análisis de fatiga usando las relaciones de deformación - durabilidad asume que la fractura que ocurre durante pruebas de deformación uniaxial controlada es aproximadamente equivalente a la que ocurre en los componentes de ingeniería durante la iniciación de grietas.

Mientras que la falla en una probeta de laboratorio puede ser definida como la fractura completa o una visible grieta o algún otro indicador en los parámetros de control, la falla para un componente de ingeniería estará definido en la habilidad de cumplir con la función indicada. Para una muelle, por ejemplo, el ablandamiento cíclico y la relajación del esfuerzo medio produciendo

deformaciones excesivas o pérdida de resistencia puede constituir una falla a pesar de que no se presenten grietas de fatiga. La importancia de esta idea es que la durabilidad estimada de un componente de ingeniería debe de estar relacionada a la habilidad del componente a cumplir su función sin importar el criterio de falla determinado para una probeta de laboratorio. En general, el diseño automotriz se basa primordialmente en el criterio de iniciación de grietas [12].

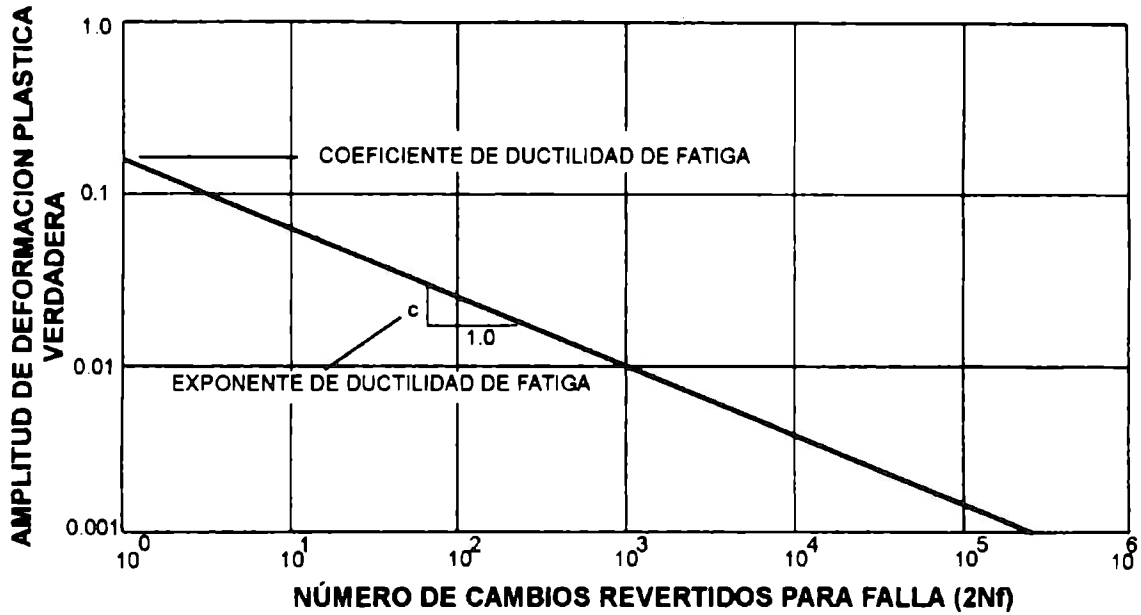


Fig. B.7 - Gráfica amplitud de la deformación plástica contra número de cambios de deformación para falla.

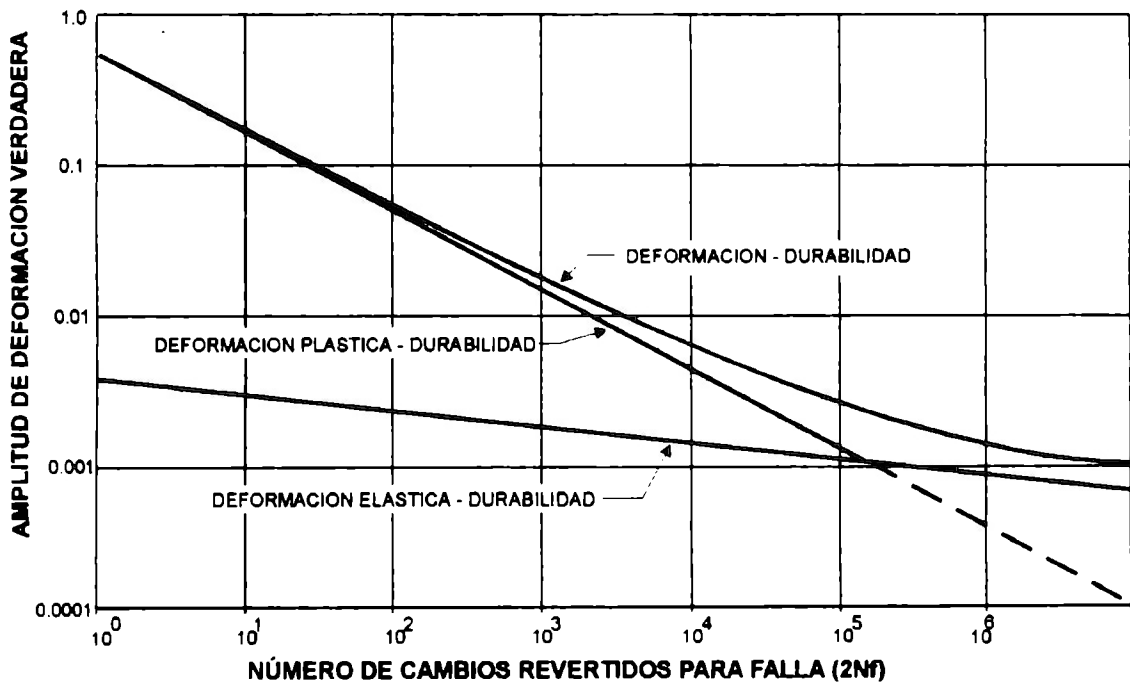


Fig. B.8 - Gráfica amplitud de deformación contra número de cambios de deformación para falla.

Las propiedades y los procedimientos para obtenerlas experimentalmente están resumidos en la siguiente tabla:

Tabla B.3 – Resumen de las propiedades cíclicas.

Propiedad	Definición	Norma ASTM
S'_y , resistencia a la fluencia cíclica	Esfuerzo al cual una línea con un pendiente E intersecta la curva cíclica esfuerzo - deformación	
n' , exponente de endurecimiento de deformación cíclica	Pendiente del $\log(\Delta\sigma/2)$ vs $\log(\Delta\epsilon_p/2)$	E-606
K' , coeficiente de resistencia cíclica	Esfuerzo en el que $\Delta\epsilon_p/2=1$ en $\log(\Delta\sigma/2)$ vs $\log(\Delta\epsilon_p/2)$	E-606
σ'_f , coeficiente de resistencia en fatiga	Esfuerzo en el que $2N_f=1$ en $\log(\Delta\sigma/2)$ vs $\log(2N_f)$	
b , exponente de resistencia en fatiga	Pendiente del $\log(\Delta\epsilon_e/2)$ vs $\log(2N_f)$	E-606
ϵ'_f , coeficiente de ductilidad en fatiga	Deformación plástica en que $2N_f=1$ en $\log(\Delta\epsilon_p/2)$ vs $\log(2N_f)$	
c , exponente de ductilidad en fatiga	Pendiente de $\log(\Delta\epsilon_p/2)$ vs $\log(2N_f)$	E-606

ANEXO C. ANÁLISIS DE ESFUERZOS POR LA TEORÍA DE RESISTENCIA DE MATERIALES.

La teoría de resistencia de materiales es esencialmente un procedimiento para el análisis estático de cuerpos elásticos. Las ecuaciones de la estática ($\Sigma F=0$, $\Sigma M=0$) son combinadas con ecuaciones de deformación, basados en la geometría de la estructura ($\delta=F/ K$) para obtener las fuerzas en algún componente de la misma. El componente desarrolla esfuerzos internos que equilibran las fuerzas, los cuales se asumen ser proporcionales a la deformación. Esta teoría es aplicada al cálculo de esfuerzos nominales en elementos estructurales como vigas y ejes. Ya que las deformaciones y los esfuerzos están relacionados linealmente, la superposición de condiciones de carga simples puede emplearse para obtener la solución de configuraciones más complejas. La aplicación de la superposición y la teoría de resistencia de materiales es limitada a problemas en el rango elástico del material, en el cual, las deformaciones y rotaciones en la estructura son muy pequeñas comparadas con las dimensiones de la misma.

C.1 ANÁLISIS DE ESFUERZOS DE MUELLES MULTI HOJAS.

A partir de la forma en que se encuentra ensamblada una muelle en el vehículo y del diagrama de cuerpo libre de la misma, una muelle multi - hojas puede ser considerada como una viga de resistencia uniforme compuesta de varias hojas con igual ancho y diferentes espesores, longitudes y radios de curvatura. Esta viga de resistencia uniforme está sometida a una carga transversal concentrada en el centro y apoyada sobre sus extremos en dos articulaciones, una fija y la otra móvil.

Esta aproximación es justificada para la mayoría de las muelles con una precisión adecuada (con ciertos factores de corrección) para estimar la longitud necesaria, espesores, ancho y número de hojas de la misma. También puede servir como una base para cálculos más detallados.

Las longitudes de las hojas, junto con los espesores y los radios de curvatura individuales, determinan la distribución de esfuerzos a lo largo de cada hoja. Además éstos también determinan la forma de la muelle bajo cargas.

En la práctica automotriz, las muelles están compuestas de hojas de 2 ó 3 espesores diferentes. Normalmente la primera hoja junto con las adyacentes a ésta son del espesor mayor mientras que las hojas más pequeñas o últimas son de los espesores menores.

Esto es así por varias razones, para dar a la primera hoja mayor resistencia en los extremos que son los puntos donde la muelle recibe las cargas, para permitir mayores tolerancias en los radios de curvatura de las hojas más cortas, para compensar en los esfuerzos la diferencia en los radios individuales de las hojas y porque con las combinaciones de diferentes espesores se tiene una mayor flexibilidad para obtener un valor muy cercano al especificado de la constante elástica de la muelle.

La curvatura individual de las hojas sin ensamblar, que forman una muelle, son diferentes. Los radios de curvatura van reduciéndose a partir del mayor para la primera hoja hasta el menor para la última. Cuando la muelle es ensamblada, las hojas son presionadas una contra la otra y se establece una curvatura común.

Las hojas de la muelle ensamblada en la posición libre (sin carga) están bajo cierto esfuerzo. En la primera hoja los esfuerzos de ensamble son de signo contrario a los esfuerzos de carga; en las hojas más cortas los esfuerzos de ensamble son de igual signo a los esfuerzos de carga. Esto es así, para reducir los esfuerzos en la primera hoja, ya que los esfuerzos son aditivos, y para asegurar que los extremos de las hojas estén en contacto con las hojas adyacentes. Además ayuda para obtener una distribución de esfuerzos uniforme a lo largo de las hojas.

La longitud de cada una de las hojas se determina con el fin de obtener una viga de resistencia uniforme con una constante elástica determinada, que junto con una buena distribución de esfuerzos de ensamble permite obtener una distribución uniforme de esfuerzos a lo largo de la longitud de cada hoja a una determinada carga y obtener una forma circular o recta según se requiera.

Ya que la distribución de esfuerzos puede ser mejorada con una buena combinación de espesores, radios de curvatura y longitud de las hojas, la constante elástica de la muelle es la misma para una muelle con o sin esfuerzos de ensamble, es decir, con diferentes radios de curvatura individuales en las hojas. Lo que significa que la constante elástica de la muelle depende únicamente de los espesores, la longitud y el acabado de las hojas.

Existen 2 métodos diferentes para el análisis de esfuerzos en muelles multi - hojas utilizando la teoría de resistencia de materiales, los cuales se describirán a continuación.

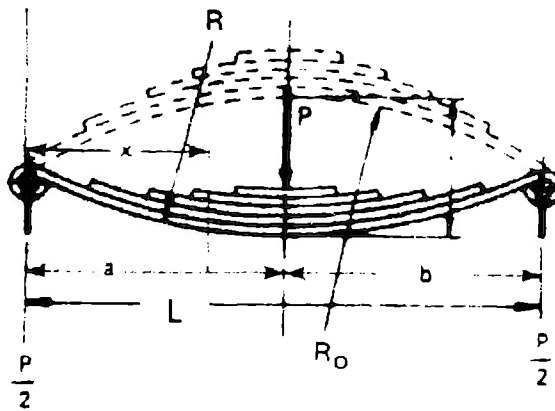


Fig. C.1 - Diagrama de cuerpo libre de una muelle multi - hojas.

En la figura C.1 se presenta el diagrama de cuerpo libre de una muelle multi - hojas y algunas otras características que a continuación se describen:

a) P - Carga transversal aplicada al centro de la muelle.

b) $P/2$ - Reacciones originadas en los extremos de la muelle debido a la aplicación de la carga P . En este caso, ya que la muelle es simétrica, las fuerzas de reacción son de igual magnitud y corresponden a la mitad de la carga aplicada P . En el caso de muelles asimétricas las cargas de reacción en los extremos deben calcularse por medio de las ecuaciones de estática:

$$\sum Ma = 0 = -P \cdot a + Pb \cdot L \quad (C.1)$$

$$\sum Fy = 0 = -P + Pa + Pb \quad (C.2)$$

Donde:

Pa - fuerza de reacción originada en el extremo a de la muelle.

Pb - fuerza de reacción originada en el extremo b de la muelle.

a - longitud del centro de la muelle al extremo a.

b - longitud del centro de la muelle al extremo b.

L - longitud total de la muelle.

c) R_0 - Radio de curvatura inicial de la muelle sin carga (curvatura establecida después de ensamble de las hojas).

d) R - Radio de curvatura de la muelle a una carga P .

e) f - deflexión del centro de la muelle provocada por la aplicación de la carga P .

C.1.1 MÉTODO DE EXPANSIÓN (CURVATURA COMÚN).

C.1.1.1 Suposiciones.

- a) Todas las hojas de la muelle están en contacto con las hojas adyacentes en toda su longitud.
- b) La curvatura de todas las hojas es igual en cada sección de las mismas.

Estas suposiciones llevan a cálculos muy simples. Esto es justificado en todos los puntos de una hoja donde está rodeada por otras.

C.1.1.2 Procedimiento [11].

Normalmente, para simplificar los cálculos, se acostumbra dividir a la muelle en 2 elementos que se analizan por separado. Obteniéndose así dos vigas en voladizo empotradas en uno de sus extremos y con una carga transversal concentrada en su extremo libre. Esto se justifica ya que idealmente la derivada de la deflexión de la muelle en su centro es cero, que es la misma condición que se presenta en el extremo fijo de una viga empotrada.

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=a=b} = 0 \quad (C.3)$$

La idea general y básica de una muelle multi - hojas es la siguiente:

La figura C.2 muestra una viga en voladizo de hojas y la misma viga reorganizando las hojas para hacer la comparación con la viga triangular de resistencia uniforme, la cual es mostrada con líneas ocultas.

Ya que la curvatura de la muelle y de las hojas es pequeña, es decir, el radio de curvatura es grande comparado con la altura de su sección transversal, puede obtenerse una buena aproximación suponiendo que estos elementos son rectos.

De la figura C.3 se puede observar que una muelle puede ser considerada como una viga en voladizo con una sección transversal variable sometida a una carga concentrada en su extremo libre.

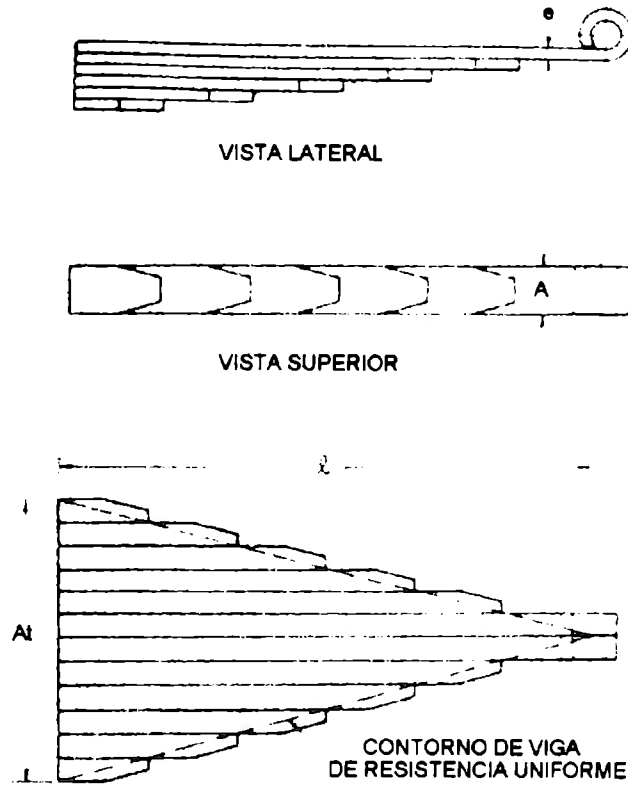


Fig. C.2 - Viga en voladizo de una muelle multi - hojas.

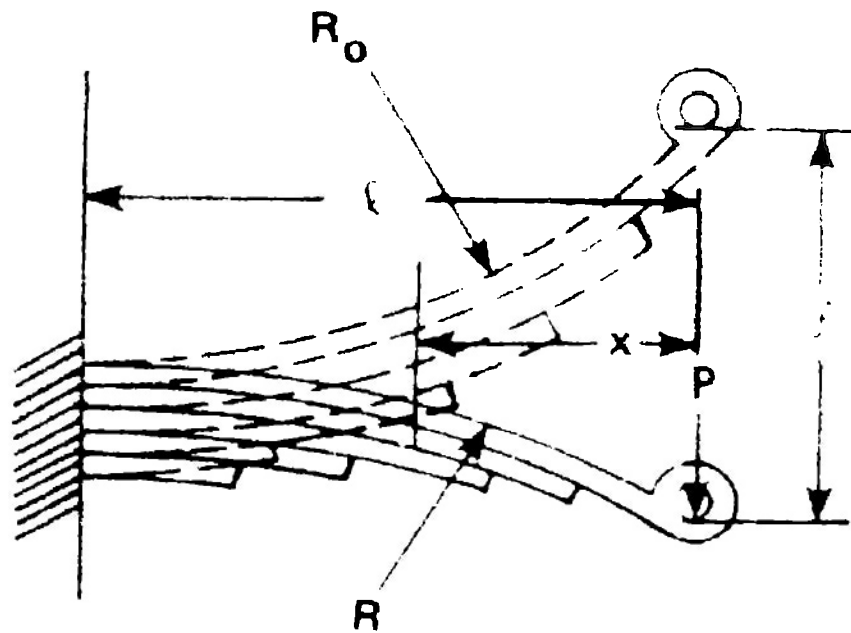


Fig. C.3 - Diagrama de cuerpo libre de una viga en voladizo de una muelle.

Cuando la viga es sujeta a una carga transversal, ésta ocasiona tanto esfuerzos normales σ_x como cortantes τ_{xy} en una sección transversal cualquiera de la viga, los cuales pueden calcularse con las siguientes ecuaciones:

a) Esfuerzos normales:

$$\sigma_x(x,y)_i = M(x) \cdot y / I_x(x) \quad (C.4)$$

Donde:

$\sigma_x(x,y)$ = esfuerzo normal longitudinal en una sección transversal cualquiera de la i -ésima hoja.

$M(x)$ = momento flector en la sección transversal, y para este caso $M(x) = P \cdot x$

$I_x(x)$ = momento de inercia de la sección transversal de la muelle. Esta sección transversal puede estar constituida por una o varias hojas, dependiendo del valor x .

Como la sección transversal de una hoja es aproximadamente rectangular

($I = A \cdot e^3 / 12$), el momento de inercia de la sección transversal es igual a:

$$I_x(x) = \frac{A}{12} \sum_{i=0}^n e(x)_i^3 \quad (C.5)$$

x = distancia del extremo de la muelle a una sección transversal cualquiera.

y = distancia del eje neutro de una hoja a cualquier punto de la misma.

P = carga aplicada en un extremo de la muelle.

A = ancho de las hojas.

$e(x)_i$ = espesor de la i -ésima hoja en una sección dada.

n = número de hojas presentes en la sección transversal.

Dentro del intervalo elástico, el esfuerzo normal longitudinal $\sigma_x(x,y)_i$ en una sección dada de una hoja varía linealmente contra la distancia al eje neutro y es máximo en el punto más alejado del eje y , que es en la superficie externa de las hojas ($y = \pm e(x)/2$).

Así el valor máximo $\sigma_x(x)_{\max,i}$ del esfuerzo normal longitudinal en cualquier sección de una hoja de la muelle puede obtenerse:

$$\sigma_x(x)_{\max,i} = \pm P \cdot x \cdot e(x)_i / 2 I_x(x) \quad (C.6)$$

b) Esfuerzos cortantes:

$$\tau_{xy}(x,y)_i = V \cdot Q(x) / I_x(x) \cdot y \quad (C.7)$$

Donde:

$Q(x)$ = momento de primer orden del área de la sección transversal de la muelle.

V = carga transversal ($V=P$)

Para una viga con sección prismática:

$$\tau_{xy}(x,y)_i = 3 P \cdot (1 - y^2 / c(x)^2) / 2Ar(x) \quad (C.8)$$

Donde :

$Ar(x)$ = área de la sección transversal.

$c(x)$ = altura de la sección transversal

El esfuerzo cortante τ_{xy} en una sección transversal es máximo en el eje neutro ($y=0$). Como τ_{xy} depende de la fuerza cortante V y el área de la sección, su valor máximo ocurrirá donde la sección transversal sea mínima, ya que el valor de V es constante a lo largo de la muelle. Así el valor máximo del esfuerzo cortante en la i -ésima hoja puede obtenerse:

$$\tau_{xy}(x)_{\max,i} = 3 P / 2Ar(x) \quad (C.9)$$

Por el método de superposición los esfuerzos axiales totales son iguales a la suma del esfuerzo axial de carga más el esfuerzo axial de ensamble, solamente cuando todas las hojas tienen la misma curvatura, el esfuerzo total axial es igual al esfuerzo de carga. Así el esfuerzo total axial máximo de la i -ésima hoja en cualquier sección es :

$$\sigma_{xt}(x)_{\max,i} = \sigma_x(x)_{\max,i} + \sigma a(x)_{\max,i} \quad (C.10)$$

Donde:

$\sigma a(x)_{\max,i}$ = esfuerzo de ensamble máximo de la i -ésima hoja en una sección cualquiera.

En la mayoría de las muelles multi - hojas las curvaturas individuales de las hojas son diferentes. En el ensamble una curvatura común se establece, la cual es variable a lo largo de la muelle a pesar de que todas las hojas tienen forma de arcos circulares.

La curvatura común puede ser calculada de la condición de que todos los momentos internos de flexión de todas las hojas deben cancelarse mutuamente cuando la muelle está ensamblada pero sin carga.

$$\sum \sigma a(x,y)_i \cdot e(x)_{,i}^2 = 0 \quad (C.11)$$

$$q_0(x) = \sum (q_{,i} \cdot e(x)_{,i}^3) / \sum e(x)_{,i}^3 \quad (C.12)$$

Donde:

$\sigma a(x,y)_i$ = esfuerzo de ensamble de la i -ésima en una sección cualquiera.

$q_{,i}$ = curvatura individual de la i -ésima hoja antes del ensamble (inverso del radio de curvatura $q_{,i} = 1/ R_{,i}$)

$q_0(x)$ = curvatura de la muelle después de ensamble. $q_0(x) = 1/R_0(x)$

El esfuerzo de ensamble puede ser calculado para cada hoja en cada sección, obteniendo la deformación de la hoja a partir del cambio de la curvatura y multiplicándolo por el módulo de elasticidad del material E, de la siguiente manera:

$$\sigma_a(x,y)_i = E \cdot y \cdot (q_0(x) - q_i) \quad (C.13)$$

Donde :

y = distancia del eje neutro a cualquier punto de la hoja y es máxima en la superficie externa de la misma $y = \pm e(x)_i / 2$

De aquí que los esfuerzos axiales máximos de ensamble en una sección transversal dada de cualquier hoja se encuentran en las superficies externas del material y puede obtenerse con la siguiente ecuación:

$$\sigma_a(x)_{\max,i} = \pm E \cdot e(x)_i \cdot (q_0(x) - q_i) / 2 \quad (C.14)$$

Las deflexiones pueden ser calculadas a partir de la ecuación de la curva elástica, como sigue:

La curvatura de una curva plana en un punto S(x,y) puede expresarse como:

$$\frac{1}{R} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (C.15)$$

Donde:

y(x) = función representada por dicha curva
R = radio de curvatura.

Ya que una viga sometida a flexión pura adquiere una forma circular y que, dentro del intervalo elástico, la curvatura de la superficie neutra puede obtenerse por :

$$1 / R = M / E \cdot I \quad (C.16)$$

Cuando una viga está sometida a una carga transversal, la ecuación anterior continúa siendo válida para cualquier sección transversal siempre que se aplique el principio de Saint-Venant³. Sin embargo, el momento flector, el momento de inercia y la curvatura de la superficie neutra variarán de una sección a otra:

³ "Excepto en la inmediata vecindad de los puntos de aplicación de cargas, la distribución de esfuerzos puede suponerse independiente de la forma como se aplican las cargas".

$$\frac{1}{R} = \frac{\frac{d^2 f}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{df}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} = \frac{M(x)}{E \cdot Ix(x)} = \frac{P \cdot x}{E \cdot Ix(x)} \quad (\text{C.17})$$

Realizando el cambio de variable:

$$u = \frac{df}{dx} \quad (\text{C.18})$$

en la ecuación C.17, se obtiene una ecuación diferencial de primer orden, lo cual puede resolverse empleando diferentes métodos numéricos.

$$0 = \left[1 + u\right]^{3/2} \frac{P \cdot x}{E \cdot Ix(x)} - \frac{du}{dx} \quad (\text{C.19})$$

C.1.2 MÉTODO DE CONTACTO EN LOS EXTREMOS (PUNTOS DE CONTACTO).

C.1.2.1 Suposiciones [11].

a) Las hojas están en contacto unas con otras únicamente en los puntos de contacto y en el centro. Esto está basado en observaciones de las áreas cercanas a los extremos de las hojas donde se produce un desgaste muy elevado por el contacto con la hoja adyacente.

La suposición de puntos de contacto es justificada cuando las hojas son libres de tomar la forma que corresponde a la distribución de cargas. Esto no es posible para todas las hojas de una muelle a menos que existan separadores entre ellas.

b) Las hojas de una muelle están en pleno contacto con las hojas adyacentes en una relativamente pequeña área cerca al extremo de la hoja.

El centro de presión de esta área (línea de centro de contacto) está a una distancia pequeña del extremo de la hoja. La magnitud de estas distancias depende del acabado (forma) de los extremos de la hoja y varía en un rango que va de 10 mm para hojas con corte recto a 50 mm para hojas con despalme.

Con esta suposición, es posible calcular las cargas de contacto entre las hojas adyacentes de la condición de que las 2 hojas deben tener una carga y una deflexión igual en el punto de contacto.

Después de que las cargas de contacto han sido calculadas; cada hoja puede ser considerada como una viga simple.

Este método es utilizado por varios diseñadores de muelles, pero la solución es más compleja y requiere un mayor número de cálculos comparados con el método anterior.

En muchos casos los métodos de puntos de contacto y curvatura común llegan a resultados similares. Para un análisis cercano a la realidad es necesario usar cada suposición solamente donde éstas son aplicables.

ANEXO D. DESCRIPCION DE LOS TIPOS DE ELEMENTOS [9].

D.1 ELEMENTO SOLIDO ESTRUCTURAL BIDIMENSIONAL.

El elemento está definido por 4 nodos con 2 grados de libertad en cada uno de ellos: translación en las direcciones nodales x y y . El elemento tiene capacidad para presentar plasticidad, resistencia dependiente del esfuerzo, deflexiones y deformaciones grandes. Los datos de entrada del elemento deben incluir 4 nodos, las constantes reales (espesor, para la opción de esfuerzo plano), las propiedades del material y las cargas superficiales (presión) o las cargas al cuerpo (temperaturas y flujos).

Las salidas de la solución asociadas con el elemento se dan en 2 formas: 1) desplazamientos nodales incluidos en la solución nodal total, y 2) salidas adicionales del elemento (esfuerzo equivalente, intensidad del esfuerzo, deformaciones elásticas, deformaciones elásticas principales, esfuerzos x , y , z y xz (para esfuerzo plano y esfuerzos principales)).

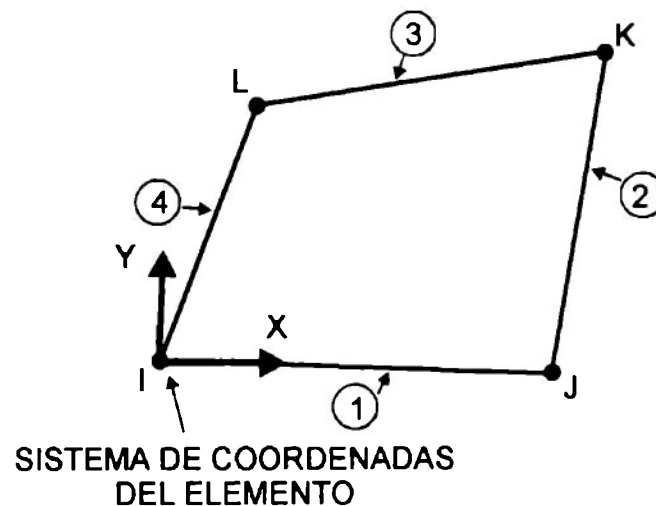


Fig. D.1 - Elemento estructural sólido 2-D.

D.2 ELEMENTO DE CONTACTO 2-D (PUNTO - SUPERFICIE).

El elemento tiene 2 grados de libertad en cada nodo: translación en las direcciones nodales x y y . El contacto ocurre cuando el nodo de contacto penetra la línea objetivo.

La geometría del elemento es un triángulo con una base que es la línea entre 2 nodos en una superficie (llamada la superficie objetivo) y el vértice opuesto que es un nodo en la otra superficie (llamada la superficie de contacto). La línea en la superficie objetivo es llamada la línea objetivo, y los nodos en los extremos de la línea son los nodos objetivo. El nodo en la superficie de contacto que completa el triángulo es llamado el nodo de contacto. Los datos de entrada del elemento son 3 nodos, las constantes reales, las propiedades del material, y las cargas al cuerpo (temperaturas).

Las salidas de la solución asociadas con el elemento son de 2 formas: 1) desplazamientos nodales incluidos en la solución nodal total, y 2) salidas adicionales del elemento (estatus del contacto, componentes del vector normal a la superficie, fuerza normal total, longitud de la línea, tamaño de la penetración o de la abertura).

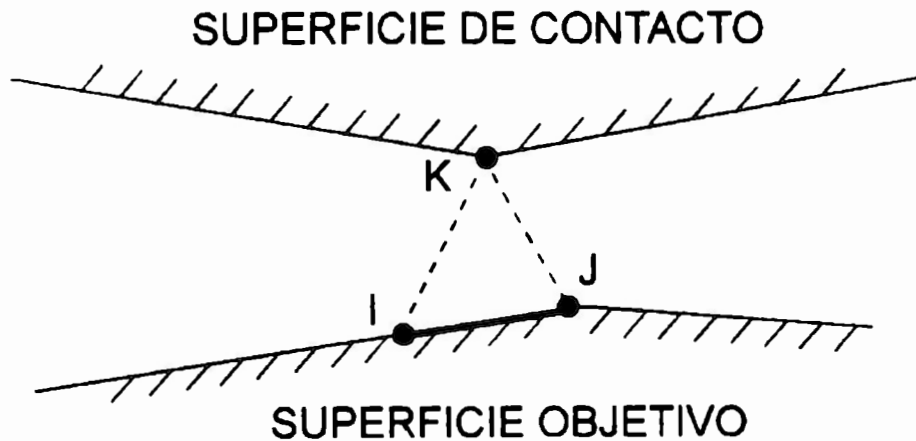


Fig. D.2 - Elemento de contacto 2-D (punto - superficie).

D.3 VIGA 2-D.

El elemento tiene 3 grados de libertad en cada nodo: translación en las direcciones nodales x y y , y rotación alrededor del eje nodal z . Los datos de entrada son 2 nodos, las constantes reales, las propiedades del material, las cargas de superficie (presión) y las cargas al cuerpo (temperaturas).

Las salidas de la solución asociadas con el elemento son de 2 formas: 1) desplazamientos nodales incluidos en la solución nodal total, y 2) salidas adicionales del elemento (esfuerzo axial y cortante deformaciones elásticas axiales y de flexión, deformaciones térmicas, deformación axial inicial, fuerzas y momentos del elemento).

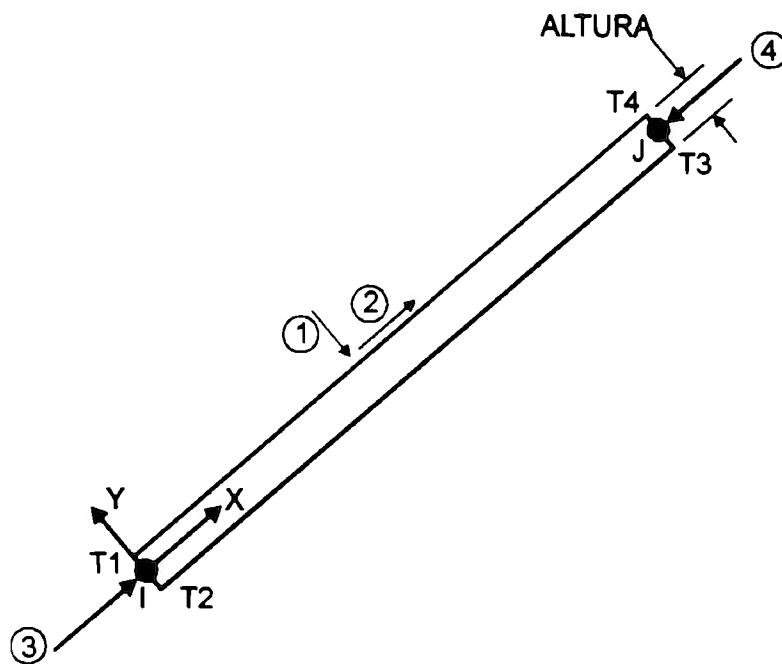


Fig. D.3 - Viga 2-D.

ANEXO E. DIBUJOS DE DEFINICIÓN.

En este anexo se presentan los dibujos de definición de los 3 diferentes tipos de muelles, de las cuales, se realizó la estimación de durabilidad y las pruebas de durabilidad.

E.1 MUELLE TIPO 1.

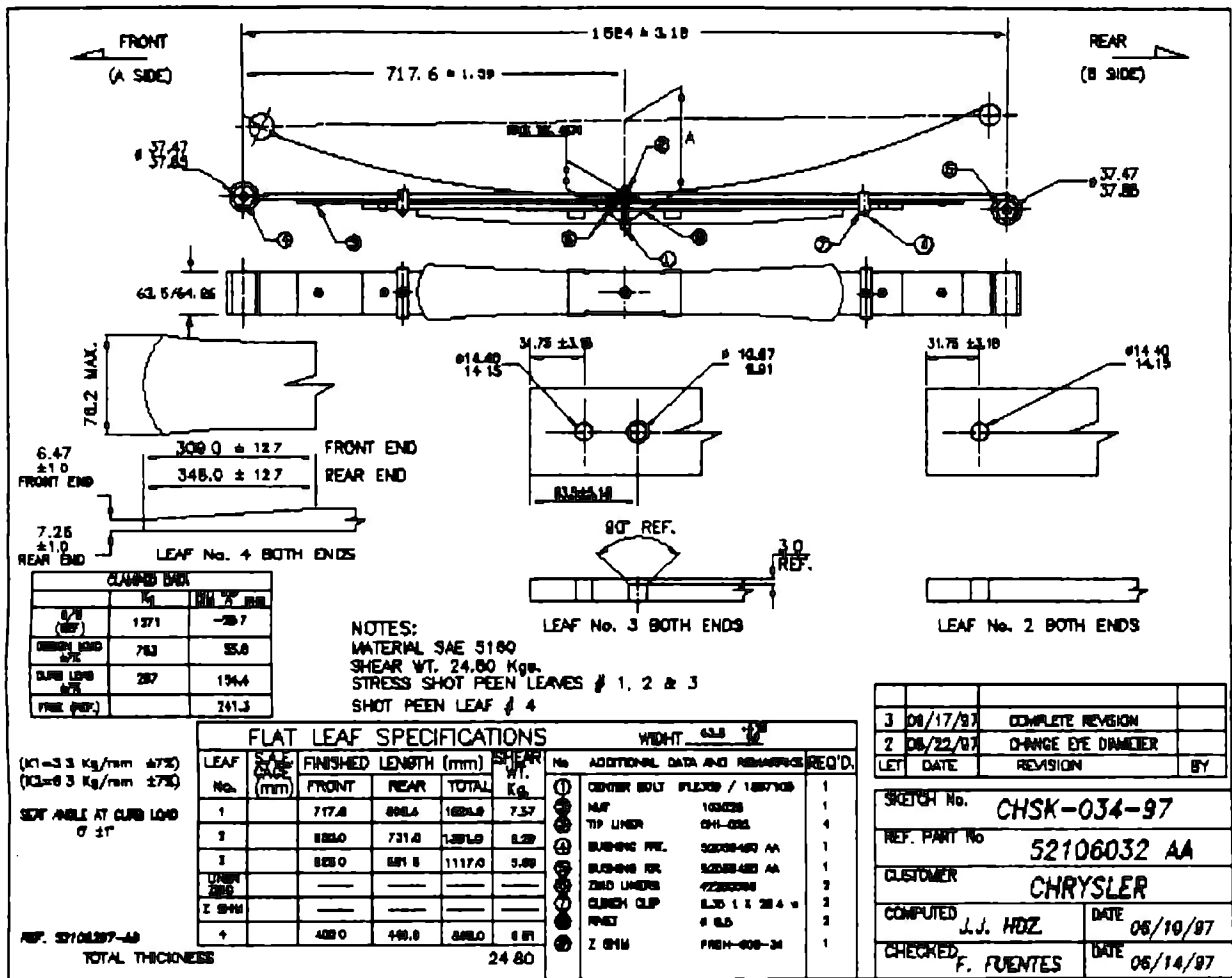


Fig. E.1 - Muelle Tipo 1.

E.2 MUELLE TIPO 2.

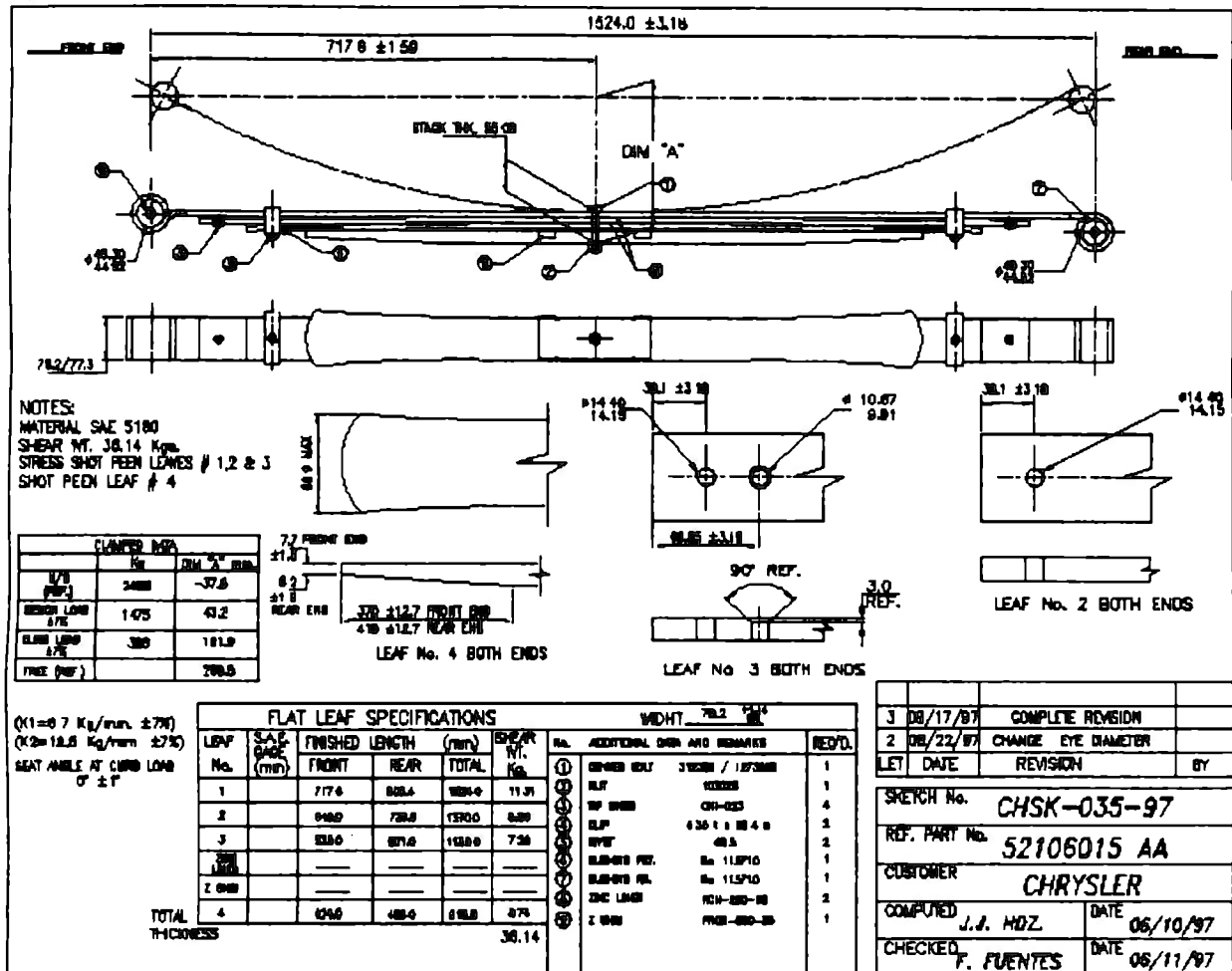


Fig. E.2 - Muelle Tipo 2.

E.3 MUELLE TIPO 3.

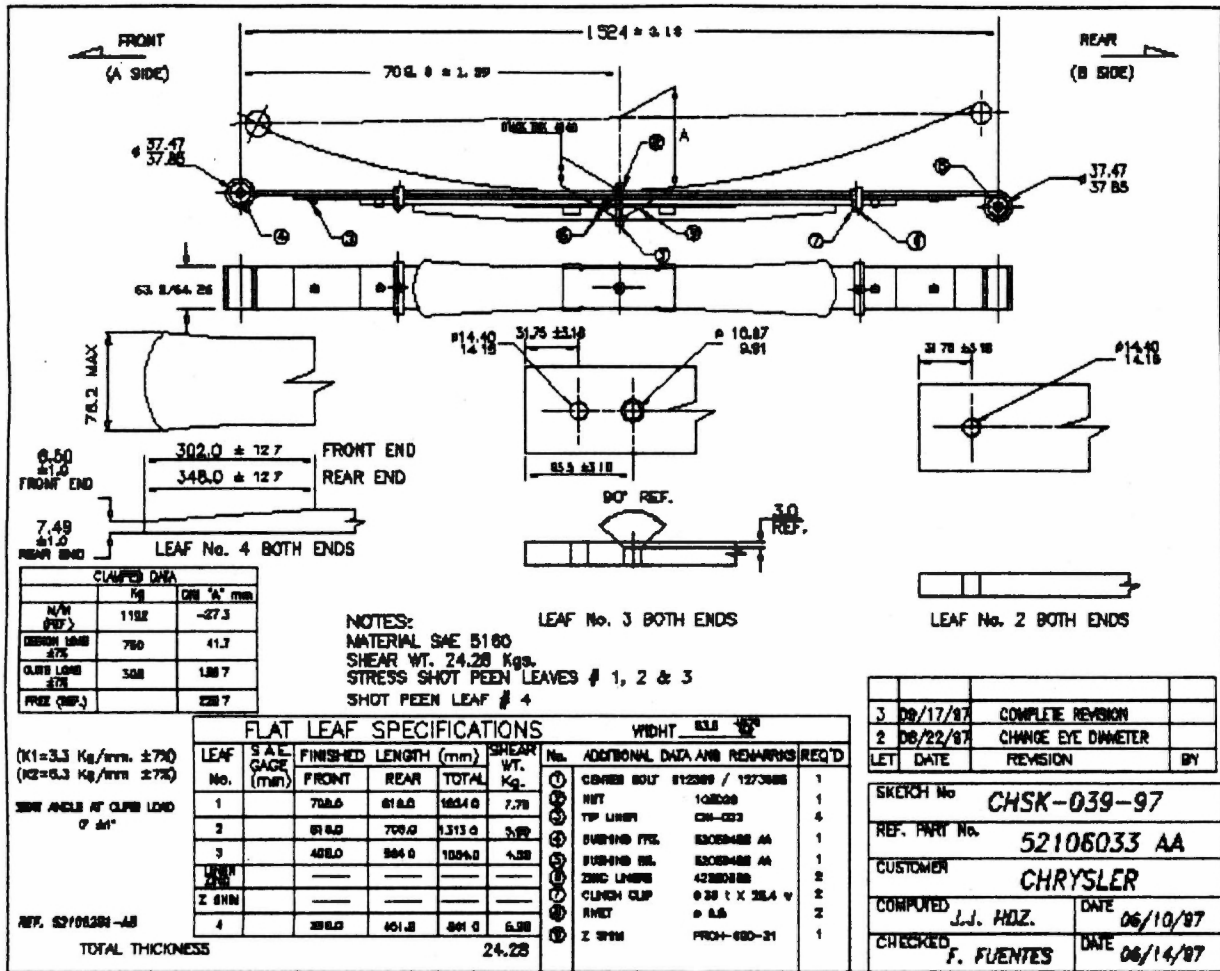


Fig. E.3 - Muelle Tipo 3.