



EFECTO DE LA RUGOSIDAD DE LAS CARRETERAS EN EL DAÑO A VEHICULOS

Angélica del Valle Moreno
Jorge Terán Guillén
Francisco Javier Carrión Viramontes

Publicación Técnica No. 139
Sanfandila, Qro, 2000

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Efecto de la rugosidad de las
carreteras en el daño a
vehículos**

**Publicación Técnica No. 139
Sanfandila, Qro, 2000**

Este documento fue elaborado por Angélica del Valle Moreno¹, Jorge Terán Guillén², y Francisco Javier Carrión Viramontes¹, investigadores de la Coordinación de Equipamiento para el Transporte del Instituto Mexicano del Transporte.

Se contó con el apoyo del Coordinador de Equipamiento para el Transporte, Dr. Miguel Martínez Madrid, para la revisión y publicación de este trabajo.

Los autores agradecen los comentarios de los Doctores Alejandro Lozano y Jorge Luis González y los datos experimentales que sirvieron de base para los cálculos del estudio proporcionados por los Ingenieros David Vázquez Vega y David Vázquez Razo.

¹ Actualmente estudiante de doctorado de la División de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro

² Actualmente estudiante de doctorado de la División de Posgrado de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del Instituto Politécnico Nacional.

Resumen	VII
Abstract	IX
Resumen ejecutivo	XI
1 Introducción	1
PRIMERA PARTE	
2 La fatiga, causa de deterioro en vehículos	5
2.1 Relación de la rugosidad con las vibraciones	5
2.2 Propagación de grietas por fatiga	7
2.3 Principios generales de la mecánica de la fractura	8
2.4 Métodos experimentales	12
3 Análisis de la vida remanente por mecánica de la fractura	18
4 Metodología para estudiar la fatiga en vehículos	20
4.1 Consideraciones estáticas	21
4.2 Consideraciones dinámicas	21
4.3 Caracterización experimental del material	21
4.4 Evaluación de la condición superficial del camino	21
5 Cálculo del nivel de deterioro del muelle de una suspensión	23
5.1 Cálculo del esfuerzo estático del muelle	24
5.2 Cálculo del esfuerzo dinámico del muelle	26
5.3 Análisis de la vida residual del muelle	28
6 Conclusiones	33
7 Glosario de términos	35
Referencias	37

SEGUNDA PARTE

8	Introducción y antecedentes	39
9	Desarrollo experimental	40
9.1	Ensayos destructivos	41
9.1.1	Pruebas de tensión y dureza	41
9.1.2	Estudio metalográfico	43
9.1.3	Fatiga	44
10	La Integral J	51
10.1	Pruebas J_{IC}	53
11	Pruebas No destructivas	59
11.1	Medición experimental de la deformación dinámica	59
11.2	Determinación de esfuerzos estáticos	61
12	Evaluación de la resistencia a la fatiga	71
13	Discusión de resultados	75
14	Conclusiones	77
	Referencias	79

La comodidad en las carreteras está definida en términos de la calidad del viaje percibida por el público. Esta calidad es función de la rugosidad del pavimento, así, un índice de rugosidad bajo implica que se transita por una carretera 'buena'. Un índice alto, significa que la calidad de la carretera es baja. Esta calidad de viaje influye también sobre los componentes mecánicos del vehículo y algunas veces sobre la carga que transporta dicho vehículo. La forma en que un vehículo vibra, depende de la rugosidad de la carretera y de la velocidad a la que se transite. Un incremento en velocidad hace parecer la carretera más rugosa, lo que resulta en cargas dinámicas elevadas de las llantas, lo que produce mayor daño. A menor índice de rugosidad, se causará menor daño a los componentes mecánicos del vehículo y a la carga.

Este estudio consta de dos partes: La primera aplica la teoría de la Mecánica de la Fractura en el desarrollo de una metodología para estudiar el deterioro o reducción de vida útil de un componente mecánico sujeto a cargas cíclicas de fatiga. El procedimiento de análisis se aplica al caso del muelle de una suspensión y se analiza el efecto que tiene la rugosidad del camino sobre su vida útil. Se encuentra una reducción de vida en el componente dependiendo de las condiciones del camino y, con ello, se puede estimar el impacto económico que tiene. En general, se demuestra que esta metodología es aplicable para estudios comparativos de costos de operación en el autotransporte, mantenimiento de vehículos y para evaluar el efecto económico del deterioro de los mismos respecto al costo de cuotas y tarifas. Igualmente, se puede aplicar para mejorar los procedimientos y criterios de mantenimiento y para reducir el riesgo de fallas o accidentes.

La segunda parte presenta la evaluación analítica de los esfuerzos estáticos y la medición experimental de las deformaciones dinámicas en autotanques de dos longitudes que transportan gas LP, con el objeto de evaluar el efecto del incremento en longitud del autotanque en la vida útil del mismo. Se realizaron pruebas destructivas y no destructivas adicionalmente a las mediciones dinámicas efectuadas en tres condiciones diferentes de rugosidad del camino y mediante la ley de Coffin-Manson, se estimó el número de ciclos para falla en cada caso. Así mismo, se realizaron pruebas de fatiga experimentales para corroborar los resultados de la Ley de Coffin-Manson.

Los resultados muestran que las deformaciones dinámicas que se generan en los autotanques estudiados, en tres condiciones de rugosidad del camino, no deterioran por fatiga el material base de los autotanques.



Pavement serviceability has been defined in terms of the ride quality perceived by the traveling public. Ride quality has been considered to be a function of pavement roughness, so a low roughness index means a smooth road. A high roughness index implies a low quality road. This ride quality has an influence over the vehicle's mechanical components, and sometimes over the cargo. The way a vehicle vibrates depends on the road's roughness and the vehicle's speed. An increase in speed causes the road to seem rougher, this results in elevated dynamic wheel loads. If the roughness index were low, mechanical components and cargo damage would be lower.

The most common cause of failures on transportation vehicles is the fracture of mechanical components owed to fatigue. This is due to the cyclic loading operating conditions of the vehicles. The vibrations of the vehicle favor the fatigue crack growing up to a critical size, after this, total failure of the component occurs. This failures frequently causes considerable economic losses and even some fatalities.

The first part of the study is based on the analysis of the damage and life reduction of mechanical components under fatigue loads using fracture mechanics theory. This methodology is used to study a truck leaf suspension and the effect of the road roughness on its residual life is analyzed. It is found that the residual life is reduced according to the road surface conditions and, with it, the economic impact on transport operation cost can be estimated. In general, it is found that this type of analysis is useful on comparative studies of transport operation costs, maintenance and the effect of tolls and fees on these. It also can be used to define maintenance procedures and standards to reduce failures and accidents.

The second part of the study presents the analytic evaluation of the static stresses and the experimental measurement of the dynamic strains in tank trucks of two different longitudes that transport LP gas. The dynamic measurements were carried out in three different conditions of road's roughness and by means of the Coffin-Manson's law, the number of cycles to failure for each case was estimated. Fatigue testing was done to verify the Coffin-Manson's Law results.

The results show that, the dynamic strains that are generated in the studied tank trucks, in any of the road roughness condition, do not deteriorate by fatigue, the base material of the tank.



Resumen ejecutivo

Históricamente, la comodidad en las carreteras ha sido definida en términos de la calidad del viaje percibida por el público. Esta calidad se considera una función de la rugosidad del pavimento. En los últimos años, se ha invertido una considerable cantidad de esfuerzo y dinero para poder medir la rugosidad de los pavimentos con propósitos de administración de las carreteras. El Índice Internacional de Rugosidad (IIR) refleja los atributos de la rugosidad del pavimento que afectan la percepción de la calidad de los viajes.

La interacción entre vehículos pesados y pavimentos genera una excitación dinámica de los vehículos que resulta en cargas dinámicas que afectan a ambos, el pavimento y el vehículo. El entendimiento de temas tales como predicción de vida de las carreteras, la influencia del daño a las carreteras debido al peso de los vehículos, el efecto del espaciado de ejes, la superficie de contacto de las llantas y el efecto del tipo de suspensión entre otros, son de vital importancia para el desarrollo de vehículos que permitan minimizar el daño a las carreteras mientras la carga y el vehículo en sí, se mantienen sin deterioro.

En estudio consta de dos partes, la primera con el fin de poder estimar la vida útil en términos de las condiciones reales de trabajo y del material constitutivo de los componentes, se propone utilizar la teoría de la mecánica de la fractura. Aplicando principios que consideran la generación y el crecimiento de grietas, así como las cargas reales a las que se someten las piezas, se calcula el tiempo que tardan en propagarse las grietas y llegar a condiciones de falla crítica. Con el tiempo calculado, se estima la vida útil de las piezas y se pueden, también, definir periodos de inspección o procedimientos para detectar las grietas antes de que se llegue a una condición de riesgo. Así, un programa de mantenimiento se basa en procedimientos y métodos de inspección y la sustitución de componentes en términos del resultado de dicha inspección, asegurando que las piezas que se cambien son únicamente aquellas que lo requieren y permanecen las que todavía sirven.

La metodología propuesta se ejemplifica con el análisis de una suspensión de muelles y se demuestra que es útil también para estudios comparativos de diferentes condiciones que permiten evaluar la diferencia en el costo de operación mediante el análisis de aspectos de reposición y mantenimiento, los cuales normalmente son difíciles de estimar. Una ventaja de esta metodología es que es independiente del historial de trabajo de la pieza en estudio y sólo depende de las condiciones actuales en que se encuentre. En contraparte, el análisis es más complejo y requiere de más información, particularmente de las condiciones dinámicas en que trabaja. En el caso analizado, se encuentra el efecto de la condición superficial del camino sobre la vida útil de la hoja de la suspensión de muelles y se determina la reducción de vida útil cuando se circula sobre un camino en mal estado respecto a un camino en buen estado. En general, se concluye que

es adecuada para estimar costos de operación y valorar aspectos de operación del autotransporte como son sobrecarga, cuotas, etc.

La segunda parte presenta la evaluación analítica de los esfuerzos estáticos y la medición experimental de las deformaciones dinámicas en autotanques de dos longitudes que transportan gas LP, con el objeto de evaluar el efecto del incremento en longitud del autotanque en la vida útil del mismo. Se realizaron pruebas destructivas y no destructivas adicionalmente a las mediciones dinámicas efectuadas en tres condiciones diferentes de rugosidad del camino y mediante la ley de Coffin-Manson, se estimó el número de ciclos para falla en cada caso. Así mismo, se realizaron pruebas de fatiga experimentales para corroborar los resultados de la Ley de Coffin-Manson.

Los resultados muestran que las deformaciones dinámicas que se generan en los autotanques estudiados, en tres condiciones de rugosidad del camino, no deterioran por fatiga el material base de los autotanques.

1 Introducción

Recientemente en México se ha impulsado la construcción de nuevas carreteras de cuota que, a pesar de sus altas especificaciones, presentan el problema de que los conductores de vehículos (principalmente de transporte pesado) no las utilizan. Lo anterior, se debe fundamentalmente a que los transportistas no aprecian la ventaja económica que su uso tiene en cuanto al ahorro en combustible, tiempo o deterioro del vehículo, respecto al costo adicional que representa el pago de las cuotas. Uno de los principales obstáculos para esto, es el hecho de que el beneficio por transitar en carreteras de cuota se obtiene en un mediano plazo, como puede ser el incremento en la vida útil de los vehículos por un menor deterioro por fatiga de los materiales constitutivos de éstos. Otros aspectos, como la reducción del daño a la carga o el incremento en los niveles de seguridad y confiabilidad del servicio de transporte, que repercuten en una mayor eficiencia y competitividad de la empresa, no se reflejan directamente en los costos de operación y para apreciarse requieren de un nivel de organización que no siempre se tiene entre los transportistas.

En general, no es fácil conocer el costo adicional del transporte debido a la mala condición superficial del camino, ya que el deterioro de los componentes mecánicos del vehículo no es inmediato ni es igual para todos. Si bien, es evidente que esto repercute en los costos de mantenimiento y en la vida útil del vehículo, no es claro hasta qué grado repercute en los costos de operación si se compara con el caso de un camino en buen estado superficial. Por lo tanto, es necesario tener una referencia técnica objetiva que permita evaluar el deterioro del vehículo para inferir el costo de mantenimiento y reposición. Para esto, se propone desarrollar un marco teórico que correlacione las propiedades de los materiales constitutivos con las condiciones dinámicas de operación y así, evaluar su deterioro.

Para esto, se parte del hecho de que en vehículos de transporte, la falla o fractura de componentes mecánicos se debe a la fatiga, la cual ocurre como consecuencia de las condiciones de carga cíclica en que operan estos vehículos y que favorecen el crecimiento paulatino de una grieta hasta alcanzar un tamaño crítico, después del cual, sobreviene la ruptura total de la pieza^[1]. Estas fallas, por lo general, son causa de pérdidas económicas considerables e inclusive, de consecuencia fatales.

Para minimizar las posibilidades de fallas se puede estimar cuantitativamente el efecto de la fatiga aplicando modelos analíticos de la mecánica del medio continuo o de la mecánica de la fractura^[2].

La mecánica del medio continuo considera que los materiales son homogéneos y no presentan defectos o imperfecciones. Para estimar la vida remanente de un componente sujeto a cargas variables utiliza el método denominado "vida-

esfuerzo", el cual requiere del conocimiento de la historia de los esfuerzos a los que se ha sometido el material y no considerar la existencia de grietas o defectos.

La ventaja del método "vida-esfuerzo" es la relativa facilidad con que se pueden realizar los experimentos en el laboratorio para obtener los datos de prueba para construir las curvas S-N (Esfuerzos versus Número de Ciclos) y conocer la resistencia a la fatiga del material. El problema es que se basa en datos estadísticos que se realizan bajo condiciones de amplitud de esfuerzos y frecuencias constantes, pero en las condiciones reales de servicio los componentes se someten a valores de amplitud de esfuerzos y frecuencias variables.

La segunda forma de estimar el efecto de la fatiga es utilizando la mecánica de fractura, la cual supone la existencia de pequeñas grietas, defectos, impurezas o imperfecciones en el material de un componente mecánico; estos defectos o pequeñas grietas actúan como zonas de concentración de esfuerzos y eventualmente como generadores de fracturas. Este modelo teórico nos permite determinar la vida remanente en fatiga del componente con base al tiempo que tarda en crecer una grieta de tamaño inicial hasta alcanzar el tamaño crítico para el cual la grieta se propague inestablemente. Para establecer el tamaño de grieta crítica es necesario determinar las propiedades fracto-mecánicas del material que corresponden a los parámetros de mecánica de la mecánica de la fractura tales como, $\frac{da}{dN}$ y J_{IC} . Dependiendo del comportamiento lineal o no lineal de los materiales, el análisis por mecánica de fractura se puede dividir en Mecánica de la Fractura Lineal Elástica (MFLE) y Mecánica de la Fractura Elasto-Plástica (MFEP)^[3].

Una de las mayores ventajas del uso de la mecánica de fractura respecto a la mecánica del medio continuo, es que los datos experimentales que se obtienen para determinar los parámetros que describen las propiedades de un material presentan menor dispersión y, por tanto, se logra una mayor precisión en el cálculo del número de ciclos de falla. Por otro lado, cuando no se presenta deformación plana o esfuerzos planos, los cálculos resultan muy complicados.

El objetivo de la primera parte de este estudio es desarrollar una metodología con base en la mecánica de fractura para conocer el efecto de la rugosidad en el daño por fatiga en vehículos y sus componentes, estimando las expectativas de vida de éstos cuando transitan en diferentes tipos de pavimentos con diferentes niveles de rugosidad. Las cargas de fatiga a que se somete el vehículo se pueden calcular a partir de modelos que relacionen las vibraciones con el índice internacional de rugosidad del camino o bien, se pueden obtener de mediciones experimentales con el vehículo.

Se ejemplificará la metodología propuesta analizando el caso de un componente automotriz donde la falla por fatiga es muy común y fácilmente identificable. Para determinar la vida útil en las diferentes condiciones de operación, se estimará la

velocidad de propagación de grietas por fatiga del material y se calculará la expectativa de vida del componente aplicando modelos que consideran crecimiento de grietas en la fase inicial y de crecimiento estable.

La segunda parte está centrada en los semirremolques tipo tanque de vehículos T3-S2 que transportan gas LP. En particular se analiza el efecto que tiene el incremento en el largo de dichos vehículos sobre la fatiga del material; ya que de acuerdo al Código ASME Sección VII para la fabricación de recipientes a presión, no se requiere cambiar las especificaciones de espesor y tipo de acero con que se fabrican. Sin embargo es importante destacar que en este código se contemplan puramente condiciones de operación estáticas, no obstante en los autotánques, objetos de estudio, trabajan adicionalmente bajo condiciones dinámicas.



PRIMERA PARTE

**METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DEL DETERIORO
DE UN COMPONENTE MECÁNICO SUJETO A FATIGA.**

2 La Fatiga, causa de deterioro en vehículos

2.1 Relación de la rugosidad con las vibraciones

En cualquier tipo de vehículo terrestre, como son los automóviles, autobuses y camiones de carga, se presentan vibraciones mecánicas generadas por diversas causas. Entre las más importantes, se encuentra la debida a las irregularidades de los caminos, ya que son responsables de un gran número de daños en los vehículos. En este caso, se identifican al menos dos formas de deterioro; la primera, cuando se excede la resistencia máxima del material por impacto, particularmente en baches o accidentes y la segunda, se debe a la aplicación de cargas cíclicas que eventualmente producen fractura por fatiga en el material.

Para evaluar el deterioro en un vehículo por fatiga ocasionado por la condición superficial de la carretera, es necesario establecer una relación entre la rugosidad del camino y el nivel de vibraciones que se presentan en éste. Suponiendo que un determinado tipo de camión desarrolla una velocidad promedio en un recorrido específico, se encuentra que la amplitud promedio de las vibraciones que experimenta es inversamente proporcional con la rugosidad de la carretera y, como consecuencia, a mayor rugosidad mayores cargas dinámicas sobre el vehículo y la carretera, incrementando el deterioro del pavimento y del vehículo o la carga^[4]. Las frecuencias típicas de vibración de un vehículo se mantienen constantes en la mayoría de los casos; sin embargo, existen efectos no lineales que hacen que varíen con la amplitud de la vibración. Así, para este tipo de estudios es importante identificar las características dinámicas de los vehículos y su correlación con la condición superficial del pavimento, ya que de esto se pueden establecer los modelos de deterioro, tanto para la carretera, como para el camión.

Para establecer criterios de calidad y comportamiento de los pavimentos que indicarán las condiciones actuales y futuras del estado superficial de un camino, se emplea el Índice Internacional de Rugosidad (IIR) [5].

El IIR fue adoptado como estándar de medida de regularidad superficial de las carreteras por el Banco Mundial en 1986. El IIR permite evaluar con cualquier equipo de medición la rugosidad de un pavimento e indicarla en valores IIR, permitiendo referirse a una sola escala de medición que puede identificar en qué condiciones superficiales se encuentra la red nacional y detectar anomalías en algunos tramos.

El IIR se reporta en términos de la acumulación de desplazamientos en valor absoluto, de la masa superior con respecto a la masa inferior de un cuarto de

carro, por unidad de longitud recorrida, en unidades de m/Km, mm/Km, pulgadas/milla, etc. El sistema del cuarto de carro calcula la deflexión de la suspensión de un sistema mecánico simulado como una respuesta similar a la que tuviera el pasajero.

Para el caso del vehículo, los parámetros más significativos son los asociados con el comportamiento dinámico de las llantas, de la suspensión, el volumen de carga, el tipo de vehículo y la distribución de carga^[6]. De manera global, es posible medir experimentalmente el nivel de vibraciones en el componente o elemento de interés; sin embargo, estos datos están limitados únicamente a las condiciones particulares en que se midieron y se requiere de un modelo analítico que permita extrapolar estos datos a la gran diversidad de condiciones que se presentan en la realidad.

En mediciones realizadas por el Instituto Mexicano del Transporte^[7], se establecieron los rangos del IIR para los diferentes tipos de camino mostrados en la Tabla No. 1.

Tabla No. 1 IIR relacionado al tipo de camino

Tipo de camino	IIR m/Km
Bueno	2.8-3.5
Regular	3.5-4.5
Malo	4.5-5.0

2.2 Propagación de grietas por fatiga

La fatiga es un fenómeno que se asocia con la disminución de la resistencia mecánica de un material en el tiempo cuando se le aplican esfuerzos dinámicos que, en promedio, son inferiores al valor de cedencia. De acuerdo con la teoría de elasticidad lineal de los materiales, en estos casos no se debería presentar modificación alguna en las propiedades mecánicas en el tiempo; sin embargo, en la práctica así ocurre. Esto último se explicó en la teoría del medio continuo como un fenómeno en el que los materiales se “fatigaban” o deterioraban cuando se someten a cargas cíclicas y cuyo comportamiento obedece a la relación establecida en las llamadas curvas S-N (esfuerzo-número de ciclos) o en las ecuaciones de Coffin-Manson^[6]; las cuales están basadas en pruebas empíricas que toman valores estadísticos y que suponen que las características microestructurales del material son constantes y uniformes. En realidad, la fatiga es un fenómeno que tiene su origen en la no-linealidad o no-uniformidad del material y que, de manera local, contiene defectos, impurezas o discontinuidades que actúan como concentradores de esfuerzos muy localizados y que sobrepasan la capacidad de resistencia del material en esas zonas. Por lo general, al inicio de la vida de un componente, estas imperfecciones son muy pequeñas y no tienen ningún efecto sobre el desempeño de la pieza, pero con el tiempo, a partir de éstas se generan grietas que pueden crecer y degradar al material e inclusive, llegar a fracturarse totalmente.

Una herramienta muy útil que nos permite conocer el cómo se generan, crecen y se propagan las grietas, es la mecánica de la fractura. Aplicando esta teoría, es posible evaluar el efecto de una grieta sobre la resistencia de un componente considerando sus características propias y particulares, y en general, puede resolver cuantitativamente aspectos^[7] tales como el conocer la resistencia de un material en función del tamaño de grieta, saber el tamaño de grieta máximo que puede ser tolerado en un material en servicio, estimar el tiempo que tarda una grieta determinada para alcanzar el tamaño máximo permisible, calcular la vida en servicio de estructuras cuando se sabe que tienen defectos preexistentes con determinados tamaños y saber con qué frecuencia y cómo se debe inspeccionar un elemento mecánico para detectar una grieta y evitar una falla catastrófica.

Para cada uno de los aspectos antes mencionados, debemos conocer el nivel de esfuerzos en el elemento mecánico o estructural de interés, que a su vez, depende de su geometría y las condiciones de carga. De manera particular, nos interesa analizar las regiones de mayor concentración de esfuerzos que se presentan por razones de diseño, carga o presencia de defectos microestructurales en el material. Por otra parte, es importante determinar propiedades de la mecánica de la fractura que se asocian con el valor límite o umbral para el inicio de crecimiento de grietas, la velocidad de crecimiento de las mismas y el valor crítico a la ruptura.

2.3 Principios generales de la mecánica de la fractura

En la mecánica de la fractura el parámetro más importante que se tiene que establecer es el factor de intensidad de esfuerzos K , el cual se relaciona con el tamaño de un defecto o grieta y el nivel de esfuerzos a que se somete el material. De manera general este factor se expresa de la siguiente forma:

$$K = \sigma \sqrt{\frac{\pi a}{q}} Y \quad (1)$$

Donde :

- K = Factor de intensidad de esfuerzos
- a = Longitud de la grieta o defecto
- σ = Esfuerzo aplicado
- q = Parámetro de forma de la grieta
- Y = Factor geométrico

El factor geométrico es adimensional y depende de la geometría del componente y de la grieta [7], pero es independiente del tipo de material. La Figura No. 1 presenta algunos casos de geometrías de probetas típicas y sus factores geométricos correspondientes.

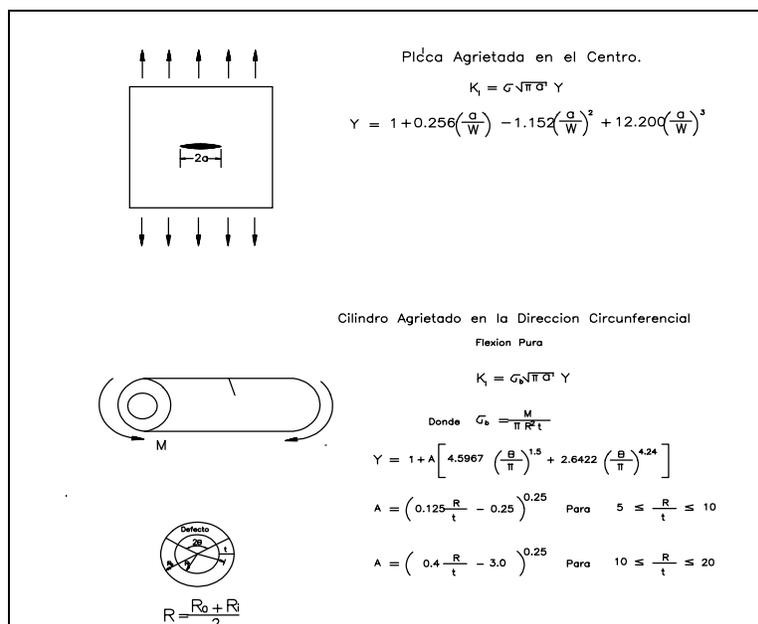


Figura No. 1 Factores geométricos de acuerdo al tipo de probeta

Cuando en una grieta el factor de intensidad de esfuerzos llega a un valor crítico K_{IC} , que es una propiedad del material y no depende de la geometría ni de las condiciones de carga, se presenta el crecimiento inestable de la grieta y, por consiguiente, la fractura total. Este valor crítico es el que define la tenacidad o resistencia a la fractura de un material y se asocia a un tamaño de grieta crítico a_c a través de la ecuación (1). Se puede ver claramente que existe una relación de proporcionalidad entre el valor de tenacidad y el tamaño crítico de grieta y, por lo tanto, si se desea incrementar la resistencia a la fractura de un componente, es necesario utilizar un material con el mayor valor de K_{IC} .

Al analizar el fenómeno de fatiga mediante la mecánica de la fractura, hay que considerar adicionalmente los valores de esfuerzo máximo σ_{max} , esfuerzo mínimo σ_{min} y la razón de esfuerzos mínimo a máximo $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$, ya que mediante éstos se toma en cuenta el efecto dinámico del problema. Dependiendo de la forma en que se aplican las cargas dinámicas y estáticas, R toma valores de -1 a $+1$, siendo que en ciclos de compresión-compresión $R > 0$, tensión-tensión $R = 0$, tensión-compresión $R < 0$ y tensión-compresión completamente reversa $R = -1$. Por otra parte, la expresión que relaciona la fluctuación del factor de intensidad de esfuerzos con la variación de esfuerzos es:

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} Y \quad (2)$$

donde

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}$$

$$\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

Para describir el proceso de propagación de grietas por fatiga, se deben considerar tres etapas: la de iniciación de grietas, la de crecimiento estable y la de crecimiento inestable. La Figura No. 2 muestra el comportamiento típico del crecimiento de grieta en la que la velocidad de crecimiento de grietas $\frac{da}{dN}$ se grafica como función de la variación del factor de intensidad de esfuerzos ΔK . En la primera etapa, para que se presente la iniciación del crecimiento de grietas, se requiere que el valor de ΔK sea mayor que un determinado valor que es propio del material y que se denota como ΔK_{th} y se identifica como el valor del umbral para el crecimiento de grietas. Una vez que este valor límite es superado, ya sea porque el tamaño de grieta es suficientemente grande o porque el nivel de esfuerzos llega al valor mínimo requerido, el crecimiento de grieta se presenta con una velocidad muy lenta pero con una razón de cambio alta (ver Figura No. 2) y que corresponde a la fase de iniciación de grietas o etapa I.

La etapa II o de crecimiento estable (ver Figura No. 2) describe el crecimiento de una grieta por fatiga en un amplio rango de valores de ΔK que cubre tamaños muy pequeños de grieta hasta muy poco antes de alcanzar el valor crítico de ruptura. Se puede decir que esta etapa es la más importante, ya que comprende, en la mayoría de los casos, tamaños de grieta que comienzan a ser detectados por las técnicas tradicionales de inspección no destructiva, hasta tamaños cercanos al crítico.

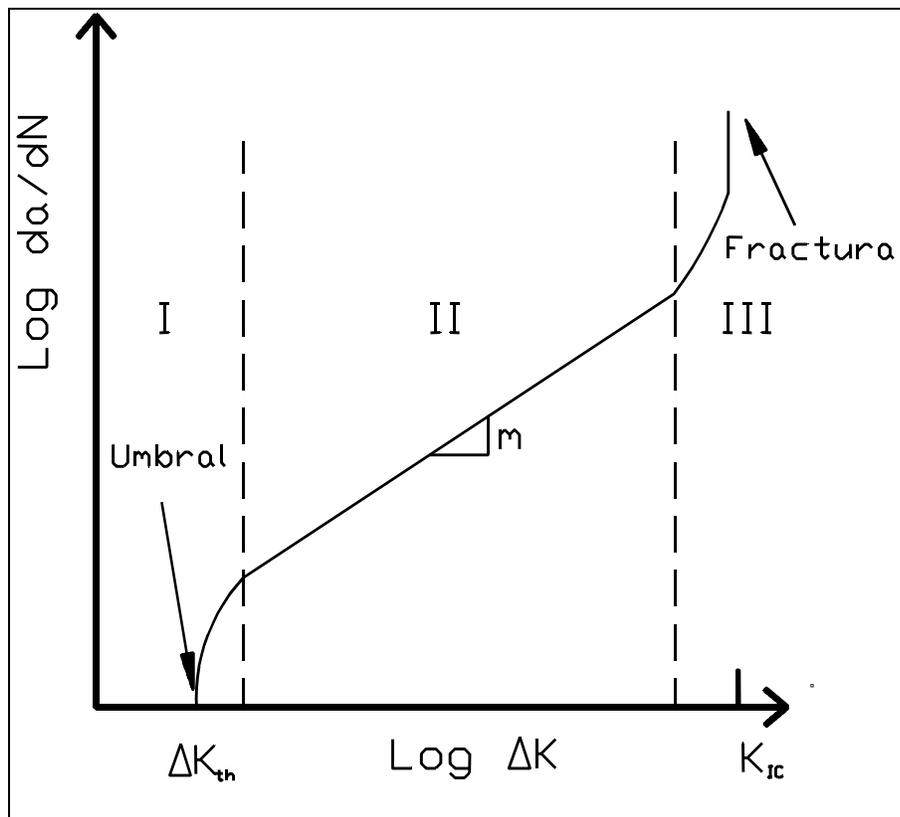


Figura No. 2 Crecimiento de grieta por fatiga en metales

El modelo más común para describir el comportamiento de grietas por fatiga en la etapa estable es el propuesto por Paris ^[8], que se representa por la ecuación siguiente:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \quad (3)$$

donde C y m son propiedades constantes del material que se determinan experimentalmente.

Con la ecuación (3) se puede estimar, a partir de un valor inicial de grieta a_i , el número de ciclos de fatiga necesarios para llegar al valor crítico a_c , con lo que se determina la vida útil o remanente de una pieza bajo ciertas condiciones determinadas. Es importante notar que en el modelo de Paris la razón de esfuerzos R no tiene influencia sobre la velocidad de crecimiento y que es válida cuando ésta toma valores cercanos a 0.1 [9]. En la realidad, la velocidad de crecimiento de grietas es afectada por la relación R ; entre más positiva sea esta razón, los valores de crecimiento son más altos debido a que disminuye el efecto del fenómeno llamado cerradura de la grieta. La cerradura de la grieta se define como el proceso en el que las dos superficies de la fractura en la zona de la punta de la grieta, se ponen en contacto antes de que alcance el esfuerzo mínimo en un ciclo tensión-tensión o se llegue al esfuerzo cero en un ciclo tensión-compresión [9].

Por último, en la región III, la curva de velocidad de crecimiento de grieta por fatiga incrementa súbitamente su pendiente, ya que el factor de intensidad de esfuerzos máximo en un ciclo de carga se acerca cada vez más al factor de intensidad de esfuerzos crítico K_{IC} , lo que significa que cada vez se acerca a la condición inestable con velocidades de crecimiento muy altas.

Para describir el crecimiento por fatiga existen, además del modelo de Paris ya mencionado, otros modelos que consideran las etapas de crecimiento inicial y de crecimiento crítico, por lo que toman en cuenta el valor de R . De estos, podemos mencionar el modelo de Donahue [8] que se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K - \Delta K_{th})^m \quad (4)$$

o bien, el modelo de Foreman [8] cuya velocidad de crecimiento de grieta se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C\Delta K^m}{(1-R)K_I - \Delta K} \quad (5)$$

donde:

$$\Delta K = (1 - R)K_I$$

El valor crítico es $\Delta K_C = (1 - R)K_{IC}$. Como se puede observar en la ecuación (5) se toma en cuenta el efecto de la relación R .

Estas expresiones suponen el crecimiento de la grieta en condiciones elásticas, ninguna incorpora una dependencia histórica y por consiguiente, son estrictamente válidas para amplitud de carga constante.

2.4 Métodos experimentales

El fenómeno de propagación de grietas por fatiga depende muy fuertemente de aspectos propios del material tales como microestructura, tamaño y concentración de inclusiones e impurezas, composición química, presencia de microaleantes, etc. Por esto, para explicar el proceso de crecimiento de grieta, no basta establecer los parámetros propios de la mecánica de la fractura, sino que se debe tener una caracterización más amplia del material que permita correlacionar y tomar en cuenta todos esos factores adicionales.

Así, por ejemplo, cuando se estudia un componente que por razones de conformado o tratamiento termomecánico su microestructura adquiere características que dependen de la orientación de la aplicación de dicho proceso^[10], se encuentra que la velocidad de propagación de grietas es diferente en las diferentes direcciones. Por consiguiente, es necesario obtener probetas que permitan analizar las propiedades de mecánica de la fractura en las direcciones de interés, que en general pueden ser longitudinal (L), transversal (T), transversal longitudinal (T-L), longitudinal transversal (L-T) o transversal radial (T-R).

2.4.1 Análisis químico

La determinación de la composición química de un material es fundamental en la caracterización del mismo. En el caso de aceros, no tan sólo se debe conocer el porcentaje de concentración de carbono, sino también de elementos como manganeso, níquel, cromo, azufre, fósforo, vanadio, molibdeno, cobre, aluminio y, en general, de microaleantes como niobio y titanio, ya que todos estos influyen de manera significativa en las propiedades mecánicas.

Existen varias técnicas para conocer la composición química de una muestra en particular. Entre las más comunes se destacan las llamadas por vía húmeda, las

que emplean espectrómetros o las que aplican el fenómeno de la difracción de rayos X. Cuando es necesario establecer la composición química de inclusiones o impurezas, se utiliza los microscopios electrónicos con microanálisis. Los procedimientos que se deben seguir dependen del tipo, características y elementos que se quieran determinar del material y, en todos los casos, se deben apegar a normas previamente establecidas como son las de la ASTM^[11].

2.4.2 Pruebas de tensión

Las pruebas de tensión se realizan de acuerdo a la norma ASTM E-8 y sirven para determinar las propiedades en tensión, esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción, resistencia a la ruptura^[12]. En general el procedimiento se realiza a temperatura ambiente, aplicando la carga de tracción lentamente hasta la ruptura del material. La Figura No. 3 es un diagrama que muestra la geometría y dimensiones típicas de las probetas que se utilizan en esta prueba.

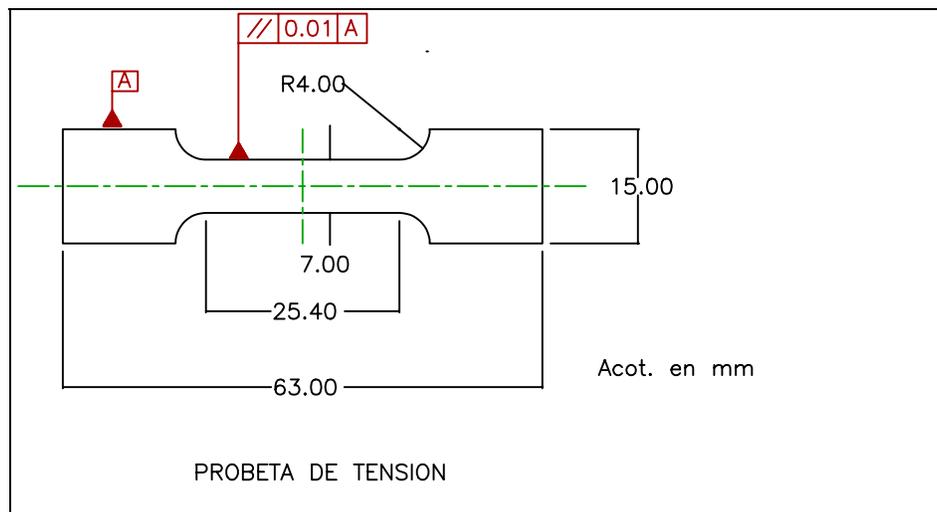


Figura No. 3 Geometría y dimensiones de la probeta de tensión

2.4.3 Dureza

La dureza es una característica mecánica de los materiales que mide la resistencia a la deformación plástica o permanente de éstos y está relacionada con la microestructura, punto de fluencia y resistencia última del material; en otras palabras, cuanto mayor es la dureza, el punto de fluencia y resistencia última aumentan. Esto es importante porque el K_{IC} es inversamente proporcional al punto de fluencia, es decir, que los materiales que tengan un punto de fluencia relativamente alto, tendrán menor resistencia a la fractura.

El concepto de dureza depende del profesionalista que trate de definirlo, por ejemplo, un metalúrgico define la dureza como la resistencia a la indentación, mientras que para un minero representa la resistencia a la rayadura. Por otro lado, existen diferentes tipos de pruebas para medir la dureza, como son: pruebas de indentación, pruebas dinámicas y pruebas de rayadura.

Dentro de las pruebas de indentación, que es la más común para materiales metálicos y plásticos, existen escalas de dureza que se seleccionan dependiendo del grado de dureza o suavidad del material (VICKERS, BRINELL, ROCKWELL C, etc.). Un caso especial de las pruebas de indentación es la microdureza, que es una medida muy localizada de la indentación y es tan pequeña que debe ser medida con un microscopio y proporciona información relacionada con la microestructura.

Las pruebas dinámicas de dureza se realizan con un escleroscopio, el cual es un instrumento que permite medir la altura de rebote de un pequeño martinete que lleva en la punta un diamante y que se deja caer desde una altura determinada sobre la superficie que se va a medir.

Para las pruebas de rayadura se fija una escala de 10 minerales de dureza creciente. El número 1 es el talco (más suave) hasta el 10 para el diamante (más duro). La prueba se realiza de manera comparativa entre dos materiales de dureza consecutiva para los cuales uno lo raya y el otro no, estableciendo su valor dentro de la escala mencionada.

2.4.4 Metalografía

La metalografía es una ciencia que estudia, por medio del microscopio, las características microestructurales de un material. Para ello, es necesario preparar y pulir la probeta para el ataque químico, ya que esto nos permite revelar la microestructura y hacerla visible al microscopio. Además de determinar la microestructura de un material se pueden detectar grietas, poros e impurezas en las que se deben aplicar técnicas metalográficas, como son la iluminación por campo oscuro, la microscopía de luz polarizada, la microscopía de contraste de fase y contraste de interferencia diferencial (NOMASKI).

2.4.5 Pruebas de mecánica de la fractura

Para determinar las propiedades de mecánica de la fractura como el K_{IC} , J_{IC} , ΔK_{th} y $\frac{da}{dN}$, existen varias normas estandarizadas por la ASTM. Así, la norma E-399 ^[13] define el procedimiento para determinar el K_{IC} , la norma E-813 ^[14] establece lo propio para el valor de J_{IC} y la norma E-647 ^[15] sirve para determinar los valores de ΔK_{th} y $\frac{da}{dN}$. Para realizar estas pruebas existen varias geometrías y tamaños de probetas y que, de manera genérica, se denomina de flexión en 3

puntos, tensión compacta, en forma de arco, en forma de disco y de tensión con grieta en el centro. Por lo general, en estas pruebas influyen en el tipo de probeta que se va a utilizar, el tamaño y la geometría del componente, la orientación de la grieta y la dirección de la carga aplicada. Los detalles específicos, incluyendo el procedimiento de prueba, la aplicación de la carga y la determinación de K , no es la misma para cada caso, pero de forma general los aspectos más importantes que se deben considerar son los que se mencionan a continuación:

I Preagrietamiento

La función del preagrietamiento es proporcionar la forma inicial de la grieta, con un tamaño adecuado y asegurar una trayectoria recta y simétrica. Se puede usar cualquier frecuencia en la aplicación de las cargas cíclicas, siempre que el sistema permita mantener la precisión en la carga requerida para el tamaño del preagrietamiento. El preagrietamiento no debe ser menor a $0.10B$ o 1.0 mm, donde B es el espesor de la probeta.

II Número de pruebas

Se recomienda al menos repetir 3 veces las pruebas para cada condición del material. Esto, evidentemente, depende de la uniformidad del material y de la variación de cada una de las características que lo definen.

III Medición

La longitud de la grieta, como una función de los ciclos transcurridos, generalmente se mide utilizando una técnica visual o equivalente, capaz de resolver extensiones de grieta de 0.10 mm (0.004 in.), o $0.002W$ (donde W es el ancho de la probeta). Para las mediciones visuales es conveniente pulir el área de la probeta y utilizar luz indirecta para la observación de la grieta. Se recomienda que antes de la prueba, se dibujen marcas de referencia en lugares equidistantes a lo largo de la dirección del agrietamiento para evitar o reducir errores acumulativos en las mediciones. Existen otras formas indirectas que permiten medir el crecimiento de la grieta que se basan en mediciones de la resistencia eléctrica de la probeta o por técnicas de ultrasonido.

IV Cálculo

Para poder determinar el valor de K en unidades del Sistema Internacional (SI), $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, es importante conocer la geometría del tipo de probeta. Por ejemplo, en

una probeta de flexión en tres puntos (Figura No. 4), se usa la siguiente expresión[11]:

$$K = \frac{PS}{BW^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (6)$$

donde:

- P = Carga determinada en KN
- B = Espesor de la muestra en cm
- S = Distancia entre los rodillos de apoyo en cm
- W = Ancho de la muestra en cm
- a = Longitud de la grieta en cm
- $f\left(\frac{a}{W}\right)$ = Factor geométrico adimensional

En la que $f\left(\frac{a}{W}\right)$ se define como:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left[\left(1.99 - \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2.5 - 3.94 \frac{a}{W} + 2.7 \left(\frac{a}{W}\right)^2\right) \right]}{2 \left(1 + \frac{2a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \quad (7)$$

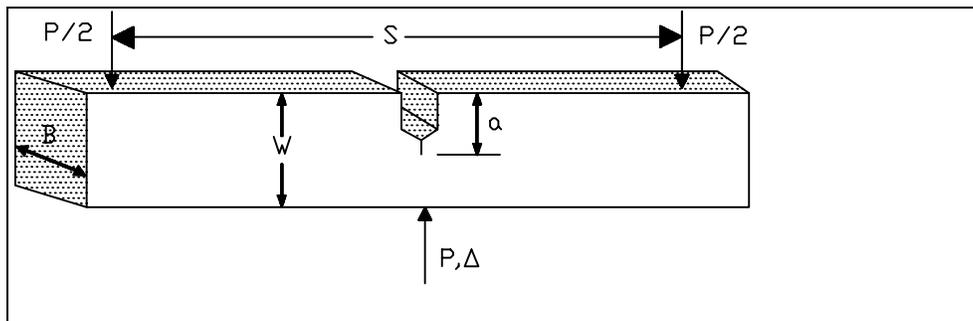


Figura No. 4 Probeta de flexión en tres puntos para pruebas de fatiga

V Fractografía

Para analizar las características de la fractura de tal manera que se pueda relacionar la topografía de la superficie de ésta con las causas o mecanismos de fractura, se realiza un estudio fractográfico. Cuando se trata del análisis de falla de un componente particular, este estudio se realiza tanto de la pieza fallada, como en las probetas obtenidas de la misma. En este proceso es importante tener

cuidado en los procesos de corte y limpieza para evitar alteraciones en las superficies. Por lo general, las observaciones se realizan en un estereomicroscopio y en un microscopio electrónico de barrido (MEB) y se toman fotografías de la zona de propagación por fatiga y de la fractura final por sobrecarga^[16].

VI Equipo

Para el desarrollo de las pruebas experimentales en mecánica de la fractura (preagrietamiento y crecimiento de grieta en probetas), se utiliza un sistema servohidráulico, Figura No. 5. Esta máquina se caracteriza por tener un pistón (actuador) controlado que da mayor precisión y versatilidad a la prueba que se quiere realizar, pues permite controlar la amplitud de la carga o el desplazamiento, así como el tipo de onda de carga.

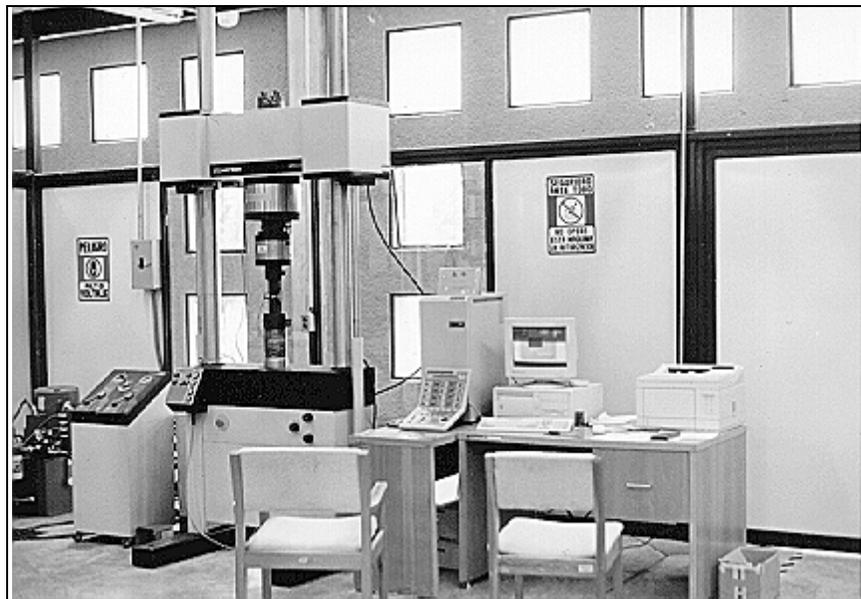


Figura No. 5 Máquina servohidráulica para pruebas de fatiga

3 Análisis de vida remanente por mecánica de la fractura

La vida útil de un componente mecánico o estructural es el tiempo que debe permanecer la pieza en servicio, bajo las condiciones de operación, sin que varíen significativamente sus propiedades mecánicas o de diseño y que no alteren o pongan en riesgo la operación de un equipo. La vida remanente o vida residual, es el tiempo que le falta a una pieza que ha estado en servicio, para llegar al término de su vida útil.

Normalmente la vida útil de un componente se define desde el diseño y se determina con base en las propiedades del material con que se fabrica y las condiciones de operación a las que será sometido. Cuando se determina la vida útil para una pieza que se somete a cargas cíclicas, ésta se determina en términos del número de ciclos que puede soportar, más que en términos del tiempo en servicio.

Cuando se diseña una pieza utilizando los conceptos de la mecánica del medio continuo, el criterio para determinar la vida útil se fundamenta en términos de datos estadísticos del material y el nivel de esfuerzos a que se somete la pieza en cuestión. Como resultado de esto, normalmente al final de la vida útil de la pieza se encuentra que ésta puede seguir en operación sin que se sepa por cuánto tiempo más. Además, cuando ocurre un evento inesperado de sobrecarga o que sobrepasara las condiciones supuestas en el diseño, es muy difícil evaluar la reducción de la vida remanente de la pieza. Igualmente, ocurre que algunas piezas fallan antes de llegar a cumplir con el tiempo total especificado por diseño.

Por otra parte, cuando se diseña aplicando los conceptos de la mecánica de la fractura, se puede establecer, a partir de las condiciones reales de operación, el tiempo o vida de la pieza; esto, siempre y cuando se pueda establecer mediante evaluaciones no destructivas la presencia y tamaño de grietas o la condición real de la pieza.

En todo caso, la vida remanente de un componente mecánico o estructural se establece en términos del número de ciclos que puede soportar antes de llegar a fallar. Si tomamos los conceptos de la mecánica de la fractura, que equivale a calcular el número de ciclos que deben transcurrir para que un tamaño de grieta inicial conocido alcance el tamaño de grieta crítico o de ruptura, se puede estimar la vida remanente de una pieza integrando las ecuaciones (3), (4) o (5), según el modelo que se elija. Así, se tiene para el modelo de Paris:

$$N = \frac{1}{C\Delta\sigma^m \left(\sqrt{\frac{\pi}{q}}\right)^m} \int_{a_i}^{a_f} \frac{a^{-\frac{m}{2}}}{Y^m} da \quad (8)$$

Para el modelo de Donahue:

$$N = \frac{1}{C} \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{\left(\Delta\sigma \sqrt{\frac{\pi a}{q}} Y - \Delta K_{th}\right)^m} \quad (9)$$

y para el de Foreman:

$$N = \frac{(1-R)K_{IC}}{C\Delta\sigma^m \left(\sqrt{\frac{\pi}{q}}\right)^m} \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{(\sqrt{a})^m Y^m} - \frac{1}{C\Delta\sigma^{m-1}} \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{\left(\sqrt{\frac{\pi a}{q}}\right)^{m-1} Y^{m-1}} \quad (10)$$

donde:

- N = Número de ciclos
- a_i = Tamaño inicial de grieta
- a_f = Tamaño de grieta final
- $\Delta\sigma$ = Rango de esfuerzos
- C, m = Constantes del material
- q = Parámetro de forma de la grieta
- Y = Factor geométrico adimensional

4 Metodología para estudiar la fatiga en vehículos

En esencia, para aplicar la metodología que se está proponiendo, se requiere conocer el grado de deterioro del componente mecánico en estudio, identificando las zonas más vulnerables por estar sometidas a las condiciones máximas de esfuerzos estáticos, la frecuencia a la que vibra y las cargas dinámicas producidas por la rugosidad del camino. En estas condiciones, para determinar la vida útil de un componente mecánico aplicando la teoría de la mecánica de la fractura, se propone lo siguiente:

- a) Identificar las condiciones de operación. Esto implica, conocer los niveles de carga estática y dinámica a las que se somete y, con base en esto, calcular los esfuerzos correspondientes para cada caso.
- b) Determinar las propiedades mecánicas del material constitutivo de la pieza. Esto se realiza mediante pruebas de laboratorio e identificando los parámetros de la mecánica de la fractura, como la tenacidad a la fractura y el umbral a la fractura.
- c) Conocer la condición real de la pieza en estudio. Para esto, se utilizan técnicas no destructivas que permiten detectar zonas donde se presentan defectos e imperfecciones que pueden ser causas que originen grietas que posteriormente se propaguen. En el caso de que existan grietas, se debe determinar la localización y tamaño de la misma.
- d) Determinar, de acuerdo con las condiciones de operación y las propiedades del material, si existe la posibilidad de que se presente un crecimiento inestable de grieta antes de que ésta pueda ser detectada.
- e) Definir procedimientos y periodos de inspección no destructiva, atendiendo al tamaño de grieta que se puede detectar y las velocidades de crecimiento que se pueden tener de acuerdo a las condiciones de operación.
- f) Variar las condiciones de operación (nivel de carga, rugosidad, velocidad, etc.) para determinar, de forma comparativa, el efecto en el incremento o reducción de vida útil del componente.

Para el estudio del deterioro o vida útil de componentes de vehículos de transporte utilizando la metodología propuesta, es necesario tener en cuenta las consideraciones que se mencionan a continuación.

4.1 Consideraciones estáticas

Los aspectos que tienen una influencia estática en el nivel de deterioro de un vehículo son: el peso y tipo del vehículo, la distribución de la carga en los ejes, el tipo de material del componente mecánico. Todos estos aspectos afectan principalmente en los niveles de esfuerzos y deformaciones del componente mecánico.

4.2 Consideraciones dinámicas

Los parámetros dinámicos que influyen sobre el nivel de deterioro del vehículo son la velocidad del vehículo, el estado superficial del pavimento, las características dinámicas del vehículo, la amplitud y la frecuencia de deformación del componente mecánico debido a las cargas dinámicas que se transmiten de los ejes, así como el tipo de suspensión. Estos parámetros influyen en los valores picos de las cargas dinámicas, así como en la frecuencia.

4.3 Caracterización experimental del material

Para caracterizar un material es necesario obtener un número suficiente de muestras que sea representativo para el análisis químico y las pruebas mecánicas. Se debe mencionar que, aunque las muestras se prueben en condiciones idénticas, los resultados mostrarán un rango de variabilidad. Por este motivo, es necesaria una interpretación estadística de los resultados. El número de ensayos se realizarán con un muestreo representativo del componente que se está estudiando. Evidentemente, cuanto mayor sea el número de muestras, los resultados reflejarán más exactamente el comportamiento de la población.

4.4 Evaluación de la condición superficial del camino

Siendo la condición superficial del pavimento una parte fundamental de la problemática de la interacción vehículo pesado-pavimento y de la compleja relación de las variables de prueba, es necesario realizar mediciones específicas para conocer el IIR.

Actualmente en el mundo existen gran variedad de equipos de medición de la rugosidad, de diversos costos, rendimientos y sistemas de adquisición de datos. Cada equipo tiene su propia escala de medición y se emplea una correlación al IIR y así es posible obtener un solo parámetro de medición para conocer el estado de

un tramo específico de una manera cuantitativa. Esto permite registrar la evolución de cada tramo a la frecuencia deseada.

Para este estudio, se instrumentó el vehículo con un acelerómetro con el cual se registran los niveles de aceleración del componente mecánico en forma de funciones en el tiempo. Después, por medio de un tratamiento matemático, se transforman a espectros en frecuencia que permiten conocer las frecuencias a las que vibra y la amplitud de cada una de ellas. También, por medio de galgas extensométricas, se pueden medir los niveles de deformación local del componente. Estos procedimientos se realizan en diferentes condiciones de operación, tipos de camino, velocidades, tipos de vehículos, sistemas suspensión, etc., de tal manera que la correlación de los resultados permite conocer el efecto de las variables importantes sobre el nivel de vibraciones y, por ende, sobre el deterioro del camino, del vehículo y de la carga.

5 Cálculo del nivel de deterioro del muelle de una suspensión

Como ejemplo de aplicación de la metodología propuesta, se estudia el efecto de la fatiga del muelle de una suspensión de un camión T3-S2 debido a la rugosidad del pavimento (ver Figura No. 6). En este caso, el vehículo transportaba 20 toneladas de cemento en bultos y tenía un peso en vacío de 14.11 toneladas. Lo anterior corresponde a un peso bruto vehicular (PBV) de 34.11 toneladas.

El tipo de muelle que se analiza está conformado por 3 hojas de acero 5160, tiene una longitud total de 1 metro, un espesor por hoja de 2 cm y un ancho de 10 cm (ver Figura No. 7). Las características geométricas, mecánicas y de operación que se están considerando para este análisis se muestran en la tabla No. 2.

Tabla No. 2

Propiedades mecánicas del material	Peso del Camión	Datos geométricos del muelle
$\sigma_{YS} = 1,262 \text{ MPa}$	Cargado = 34,110 Kg	L = 500 mm
$\sigma_{max} = 1,567 \text{ MPa}$	Vacío = 14,110 Kg	n = 3
$K_{IC} = 80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$		n' = 1
$E = 2.07 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		b = 20 mm
$\Delta K_{th} = 6.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$		W = 100 mm

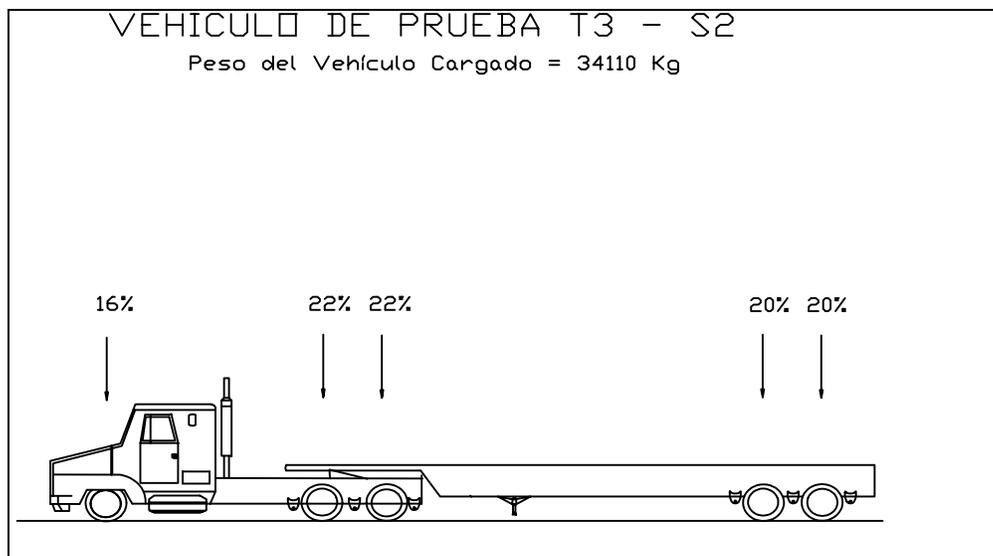


Figura No. 6 Distribución de carga en un camión T3-S2

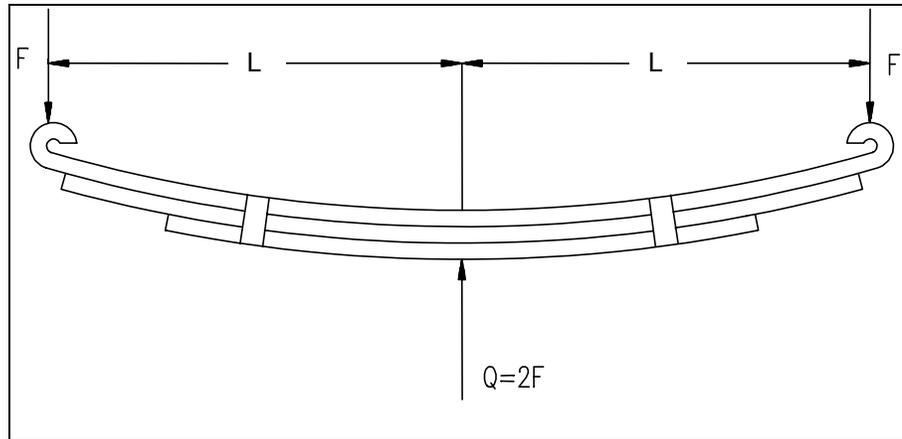


Figura No. 7 Muelle de hojas que utiliza un camión T3-S2

5.1 Cálculo del esfuerzo estático del muelle

Para determinar la variación en la vida útil del muelle por las distintas condiciones de rugosidad del camino, se compara, para cada caso, el tiempo que una grieta de tamaño inicial alojada en la hoja superior, tarda en alcanzar el tamaño crítico o de ruptura. El tamaño de grieta no es el mismo en cada condición, ya que depende del nivel de esfuerzos a los que se somete el muelle, como se explicará más adelante. Las condiciones de operación que se consideran son camino bueno, malo y regular, clasificados de manera genérica y que corresponden a una carretera de cuota, una carretera federal libre y una carretera secundaria estatal, respectivamente y que son diferentes ya que están sujetas a distintas condiciones de mantenimiento.

Para calcular las cargas estáticas a las que se somete el muelle se supone una distribución de carga de acuerdo con lo indicado en la Figura No. 6. Como resultado, se tiene que el peso que soporta cada uno de los ejes del tandem trasero es de 6,822 Kg y, como cada eje tiene dos muelles (derecha e izquierda), el peso que soporta cada muelle Q , es de:

$$Q = \frac{\text{Peso en un eje del tandem}}{2} = \frac{6,822}{2} \text{ Kg} = 3,411 \text{ Kg} = 33,461.91 \text{ N} \quad (11)$$

Una vez que se conoce la carga Q que soporta el muelle, es necesario establecer una relación de ésta con el esfuerzo al que es sometida la hoja superior. Para ello, se determina la constante del muelle^[17] c_m , que depende de su forma y representa el incremento en la flexión por carga aplicada y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$c_m = \frac{\left(2 + \frac{n'}{n}\right) n E W b^3}{6L^3} \quad (12)$$

donde:

- n' = Número de hojas en el apoyo del muelle
- n = Número total de hojas
- E = Módulo de Young del material
- b = Espesor de la Hoja
- W = Ancho de la Hoja
- L = Mitad de la longitud total del muelle

Así, para nuestro caso:

$$c_m = \frac{\left(2 + \frac{1}{3}\right) \left(2.07 \times 10^5 \frac{N}{mm^2}\right) (3)(100mm)(20mm)^3}{6(500mm)^3} = 1,545.6 \frac{N}{mm}$$

Por otra parte, por definición, la flexión del muelle S, se calcula a partir de la expresión siguiente ^[17]:

$$S = \frac{Q}{c_m} \quad (13)$$

donde:

- S = Flexión del muelle
- Q = Peso por eje
- c_m = Constante del muelle

En el caso que se está considerando, se encuentra que la flexión del muelle es S = 21.65 mm .

Por otra parte, es posible expresar el esfuerzo al que se somete la hoja superior en términos de la carga Q_s que soporta individualmente. Para ello, se utiliza la siguiente ^[17] ecuación:

$$Q_s = \frac{\sigma W b^2}{3L} \quad (14)$$

Asimismo, si suponemos que la flexión del muelle en la hoja superior es igual al de todo el muelle, se puede emplear la siguiente expresión para calcular la carga individual Q_s :

$$\frac{Q_s}{S} = \frac{E W b^3}{4L^3} \quad (15)$$

Sustituyendo la ecuación (14) en la ecuación (15), se obtiene una ecuación que relaciona la flexión con el esfuerzo y de donde resulta:

$$\sigma = \frac{3 E b}{4 L^2} S \quad (16)$$

De esta ecuación (16), se calcula el esfuerzo estático en la hoja superior del muelle y que resulta en nuestro caso igual a 268.89 MPa.

5.2 Cálculo del esfuerzo dinámico del muelle

Los esfuerzos dinámicos en el muelle, debido a la rugosidad del camino, se obtuvieron de un estudio experimental ^[18] en el que se instrumentó el apoyo del muelle con galgas extensométricas y se hicieron mediciones de microdeformaciones dinámicas en recorridos a velocidad constante de 80 Km/h y circulando sobre tres tipos de camino. En estas pruebas, las mediciones se hicieron respecto a la condición estática y el camino se clasificó de forma genérica de acuerdo a la Tabla No. 1. Los valores de microdeformaciones medidos se obtuvieron como funciones en el tiempo, las cuales se procesaron mediante un análisis de Fourier para obtener los espectros en frecuencia. De los espectros obtenidos se calculó el valor cuadrático medio y posteriormente los valores RMS que corresponden a la raíz cuadrada de ese primer valor. Es importante destacar que los valores RMS representan el contenido energético de las vibraciones y, por tanto, pueden ser tomados como valores de la amplitud equivalente de las vibraciones a las que se somete el elemento instrumentado.

Los esfuerzos dinámicos del muelle se infieren a partir de los esfuerzos dinámicos medidos experimentalmente en el apoyo suponiendo que tienen la misma amplitud relativa con respecto al esfuerzo estático, es decir, que el porcentaje de variación en el apoyo y en el muelle es el mismo.

5.2.1 Análisis de los esfuerzos dinámicos del apoyo

Los datos experimentales de deformaciones medidos en el apoyo del muelle para cada caso son:

Camino Bueno	:	17 $\mu\epsilon$
Camino regular	:	30 $\mu\epsilon$
Camino malo	:	48 $\mu\epsilon$

Para obtener el valor equivalente de microdeformación en términos de amplitud pico a partir del valor RMS, es necesario utilizar la siguiente relación ^[19] $X = \frac{A}{\sqrt{2}}$. Aquí, X es el valor promedio de las microdeformaciones en RMS y A es la amplitud pico de la onda senoidal.

Así, los valores obtenidos para la amplitud pico en el apoyo para las tres condiciones estudiadas son:

Camino Bueno	:	$\pm 2.40 \times 10^5 \epsilon$
Camino Regular	:	$\pm 4.24 \times 10^5 \epsilon$
Camino Malo	:	$\pm 6.78 \times 10^5 \epsilon$

Estableciendo la relación entre esfuerzos y deformaciones mediante un modelo lineal, se obtiene los esfuerzos picos o máximos para los diferentes tipos de camino y que son:

Camino Bueno	:	$\pm 4.97 \text{ MPa}$
Camino Regular	:	$\pm 8.78 \text{ MPa}$
Camino Malo	:	$\pm 14.03 \text{ MPa}$

El valor estático del esfuerzo en el apoyo se calcula conociendo la carga que soporta el muelle (33,461,91 N) y dividiendo este valor entre dos. Posteriormente, de la geometría del apoyo (100 mm de ancho y 10 mm de espesor), se calcula el área para luego obtener el valor del esfuerzo que en este caso corresponde a 17.43 MPa .

Al comparar el valor del esfuerzo estático en el apoyo y tomando los valores de amplitud de esfuerzos dinámicos, se determina el porcentaje de variación dinámica con respecto al valor estático, que resulta ser de:

Camino Bueno	:	$\pm 28.5 \%$
Camino Regular	:	$\pm 50.4 \%$
Camino Malo	:	$\pm 80.5 \%$

5.2.2 Estimación de los esfuerzos dinámicos del muelle

Los cálculos anteriores fueron para conocer los esfuerzos dinámicos y estáticos en el apoyo del muelle. Sin embargo, el objetivo de este trabajo es analizar la vida útil del muelle; por lo tanto, es necesario relacionar estos valores con los que soporta el muelle. Para establecer esta relación, se toman los valores de la condición estática calculados en la sección anterior y luego se supone que el porcentaje de carga dinámica es el mismo en ambos elementos, ya que están relacionados proporcionalmente. Así, los incrementos dinámicos de esfuerzo $\Delta\sigma$ en la hoja superior del muelle, para cada condición de camino son:

Camino Bueno	:	153.2 MPa
Camino Regular	:	271.0 MPa
Camino Malo	:	433.0 MPa

En la Tabla No. 3 se presentan los resultados obtenidos para el muelle.

Tabla No. 3
Valores de los parámetros de operación en los diferentes caminos

CAMINO	% de variación*	A (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)
Bueno	± 28.5	76.6	153.2
Regular	± 50.4	135.5	271.0
Malo	± 80.5	216.5	433.0

* Con respecto al estático

En donde:

A (Mpa) = Amplitud pico de la onda

$\Delta\sigma$ (Mpa) = Incremento en esfuerzo dinámico

5.3 Análisis de la vida residual del muelle

Con los valores de $\Delta\sigma$, ΔK_{th} y ΔK_{IC} , se calculan el tamaño de grieta inicial (a_i) y el tamaño de grieta crítica (a_c), en cada caso con las ecuaciones (17) y (18).

$$\frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma} = \sqrt{\frac{\pi a_i}{q}} Y \quad (17)$$

ó

$$\frac{\Delta K_{IC}}{\Delta\sigma} = \sqrt{\frac{\pi a_c}{q}} Y \quad (18)$$

Donde Y se define [7]:

$$Y = \left[1 + 0.256 \left(\frac{a_c}{W} \right) - 1.152 \left(\frac{a_c}{W} \right)^2 + 12.200 \left(\frac{a_c}{W} \right)^3 \right] \quad (19)$$

Substituyendo la ecuación (19) en las ecuaciones (17) y (18), se obtienen las siguientes expresiones:

$$\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma} = \sqrt{\frac{\pi a_i}{q}} \left[1 + 0.256 \left(\frac{a_i}{W} \right) - 1.152 \left(\frac{a_i}{W} \right)^2 + 12.200 \left(\frac{a_i}{W} \right)^3 \right] \quad (20)$$

$$\frac{\Delta K_c}{\Delta \sigma} = \sqrt{\frac{\pi a_c}{q}} \left[1 + 0.256 \left(\frac{a_c}{W} \right) - 1.152 \left(\frac{a_c}{W} \right)^2 + 12.200 \left(\frac{a_c}{W} \right)^3 \right] \quad (21)$$

Suponiendo el valor $q = 1$ y resolviendo las ecuaciones (20) y (21) por iteración, se encuentra que para el caso del camino bueno el valor de a_i es 0.564 mm y el de a_c es 13.09 mm. Para el camino regular se tiene que a_i es 0.178 mm y a_c es 9.89 mm y, finalmente, para el camino malo, a_i es 0.0694 mm y a_c es de 6.89 mm.

Dado que se supone que la condición es de una grieta en el centro de la hoja, la longitud total de la grieta es en realidad el doble de los valores antes calculados. Así, tomando los valores críticos de ruptura a_c de cada caso, se tiene que el tamaño de las grietas es de 26.18 mm para camino bueno, 19.78 mm para camino regular y de 13.78 mm para camino malo (ver Tabla No. 4). Dado que la hoja del muelle tiene 100 mm de ancho, en los 3 casos analizados existe la posibilidad de crecimiento crítico; sin embargo, como los tamaños de grieta son suficientemente grandes, con un programa regular de inspección es posible detectarla antes de que se presente la condición crítica de falla.

Tabla No. 4
Tamaños de grieta en los diferentes caminos

Tipo de camino	a_i (mm)	a_v (mm)	a_{int} (mm)	a_c (mm)
Bueno	0.5640	0.740	2.900	26.18
Regular	0.1782	0.232	1.778	19.78
Malo	0.0694	0.090	0.189	13.78

Como la ecuación de Donahue describe la etapa I y II, la ecuación de Foreman describe las etapas II y III, se igualan ambas ecuaciones para obtener un valor de ΔK de intersección (ΔK_{int}), encontrándose los valores de 16, 12.5 y 12 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ para los caminos bueno, regular y malo, respectivamente. Con estos valores, se determina por iteración el tamaño de grieta de intersección a_{int} , de la misma manera que se encontraron los valores para a_i y a_c (ver Tabla No. 4). Con este valor de a_{int} se integran numéricamente las ecuaciones (9) y (10) por el método del trapecioide de segmentos múltiples en dos intervalos. En el primer intervalo se aplica el modelo de Donahue con los valores de $\Delta\sigma$ correspondientes al tipo de camino y un tamaño de grieta inicial de avance a_v (obtenido tomando un valor de ΔK igual a 8 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ con el objeto de evitar un error en la ecuación 9), utilizando $q = 1$, $C = 1 \times 10^{-11}$, $m = 3$. En el segundo intervalo se aplica el modelo de Foreman integrando a partir de a_{int} hasta a_c , se utiliza un valor de $q = 1$, $C = 3.5 \times 10^{-11}$, $m = 3$ y los valores de R y $\Delta\sigma$, para cada tipo de camino y una frecuencia de 5 Hz. En la tabla No. 5 se presentan los resultados de los números de ciclos totales y el kilometraje para los diferentes caminos obtenidos como se explicó. En la Figura No. 8 se muestra la gráfica de velocidad de propagación de grietas por fatiga al sumar los resultados de las dos integrales.

Tabla No. 5
Valores del número de ciclos totales y su equivalente en kilómetros

IIR m/Km	TIPO DE CAMINO	N_{total} (ciclos)	Km
2.8 – 3.5	Bueno	9.87×10^6	43,906
3.5 – 4.5	Regular	3.33×10^6	14,828
4.5 – 5.0	Malo	1.49×10^6	6,659

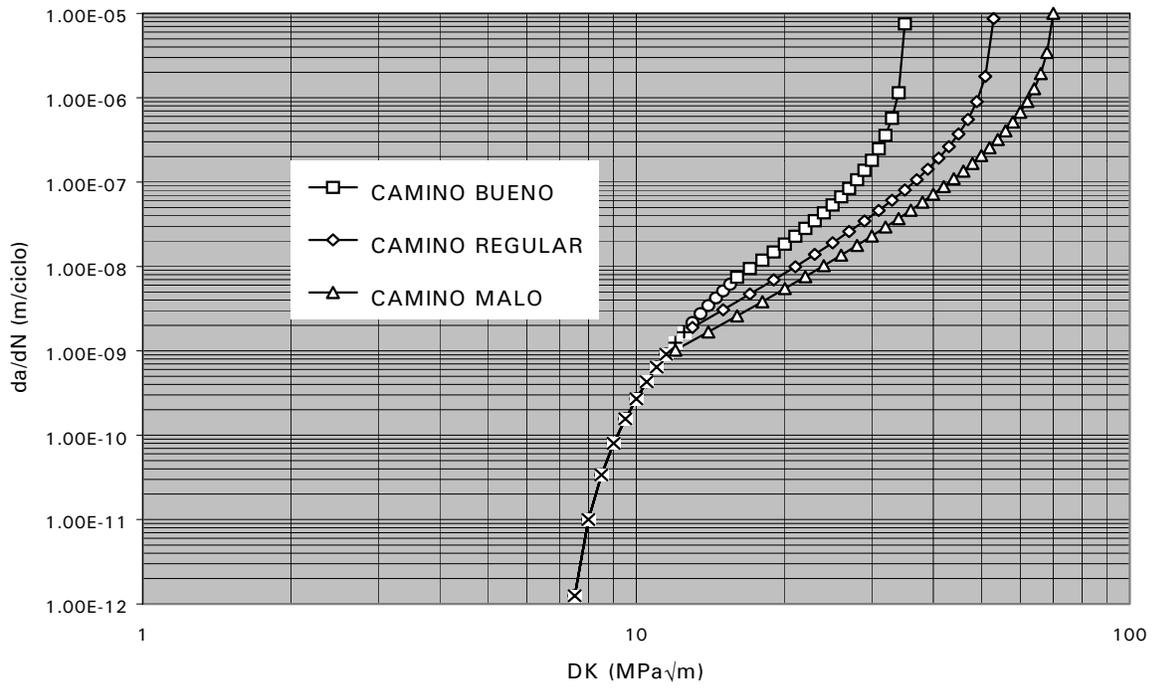


Figura No. 8 Gráficas de propagación de grieta para las tres condiciones superficiales del camino

6 Conclusiones

Para la suspensión de muelle analizada en este estudio, se encuentra que existe una reducción en su vida útil de 68% para el camino regular (IIR 3.5 – 4.5 m/Km) y de un 86% para el camino malo (IIR = 4.5 – 5.0 m/Km), respecto al camino bueno (IIR = 2.8 – 3.5 m/Km) (100% de la vida útil). Con base en lo expuesto anteriormente, se concluye que la evaluación cuantitativa del deterioro de suspensiones y, en general, de componentes mecánicos sujetos a cargas de fatiga, es posible utilizando modelos de la mecánica de la fractura. Esto no sólo permite analizar aspectos de vida útil, también proporciona información que permiten establecer criterios y periodos de mantenimiento e inspección de componentes críticos, reduciendo el riesgo de accidentes. En general, también se puede concluir que a partir de esta metodología se puede estimar el efecto de las cargas dinámicas debido a la condición superficial de un camino sobre la fatiga de cualquier componente estructural o mecánico de un vehículo pesado, siempre y cuando se conozcan sus propiedades mecánicas y las condiciones reales de operación.

La metodología basada en la mecánica de la fractura es útil para estimar cuantitativamente el costo por deterioro de los vehículos debido a las diferentes condiciones de operación e incide en aspectos de seguridad, inspección y selección de equipos y materiales para incrementar la eficiencia y productividad de las empresas de autotransporte. Igualmente, la autoridad tiene, con esta metodología, una base de criterio para evaluar el efecto real de las mejoras en la infraestructura carretera y las cuotas que se cobran en las autopistas.

7 Glosario de términos

AMPLITUD DE CARGA (ΔP)- Se obtiene de la diferencia algebraica entre las cargas máxima y mínima en un ciclo, se expresa como $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$.

AMPLITUD DE LA VIBRACION- Se define como el valor más alto que alcanza un punto con referencia a su posición de equilibrio en un sistema vibratorio.

AMPLITUD DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZOS (ΔK)- Es la diferencia algebraica entre los factores de intensidad de esfuerzos máximo y mínimo en un ciclo, esto es, $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$.

CARGA MAXIMA (P_{\max})- Se considera a la carga que tiene el mayor valor algebraico en el ciclo, la carga tensil se considera positiva y la carga compresiva negativa.

CARGA MINIMA (P_{\min})- Es la carga que tiene el menor valor algebraico en el ciclo.

CICLO- Es el segmento más pequeño de la carga de la función tiempo esfuerzo, el cual se repite periódicamente. En este método "N" es utilizado para representar el número de ciclos.

FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZOS MAXIMO (K_{\max})- Es el valor algebraico máximo para el factor de intensidad de esfuerzos en un ciclo de carga. Este valor corresponde a la carga máxima.

FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZOS MINIMO (K_{\min})- Se considera al valor algebraico mínimo del factor de intensidad de esfuerzos en un ciclo. Al igual que en el caso anterior, la grieta se considera constante y, por lo tanto este valor corresponde a la carga mínima cuando la relación de carga (R) es mayor que cero, cuando R es menor o igual que cero se establece este valor igual que cero.

FRECUENCIA- La frecuencia de una vibración es el número de ciclos que ocurren por unidad de tiempo.

FRECUENCIA NATURAL- La frecuencia natural de un cuerpo o sistema es una propiedad que depende de la distribución de la masa y rigidez del sistema que vibra libremente.

LONGITUD DE GRIETA (a)- Es el tamaño físico de la grieta.

RELACION DE CARGA (R)- Es la razón de la carga mínima con respecto a la máxima en un ciclo, esto es, $R = \frac{P_{\text{mín}}}{P_{\text{máx}}}$.

VELOCIDAD DE CRECIMIENTO DE LA GRIETA POR FATIGA ($\frac{da}{dN}$)- Es el incremento en el tamaño de una grieta causada por un ciclo de carga de fatiga y se expresa en milímetros por ciclo (mm/ciclo).

Referencias

1. ASM International Handbook Committee, (1992), ***Fatigue failure and prevention.***, ASM Handbook. Vol. 11, 10th Edition, Materials Park, Ohio.
2. Carrión, F.J., Del Valle, A. y Terán, J., (1996), ***Aproximación de la mecánica de la fractura en la fatiga de la infraestructura del transporte.***, Memorias del Seminario México-Japón 1996, Materiales y Procesos Avanzados, Proyectos de Estudios Conjunto y Cooperación IPN-JICA, México D.F.
3. Hertzberg, R.W., (1989), ***Deformation and fracture mechanics of engineering materials.***, John Wiley & Sons, New York, NY.
4. Cebon, D., (1993), ***Interaction between heavy vehicles and roads.***, Society of Automotive Engineers, Warrendale PA.
5. Papagiannakis, A.T. and Gujarathi, M. S., (1994), ***Pavement roughness characteristics affecting the dynamic loads of heavy vehicles.***, 74th Annual Transportation Research Board Meeting, Washington, D.C.
6. Dieter, G., (1986), ***Mechanical metallurgy.***, 2nd Edition, McGraw Hill, New York, NY.
7. Arriaga, M., Garnica, P. (1998). **Indice Internacional de rugosidad, aplicación en la red carretera de México.** Publicación Técnica #108, Instituto Mexicano del Transporte.
8. Ewalds, H. L. and Wanhill, R. J. H., (1984), ***Fracture mechanics.***, Edward Arnold - Delftse Uitgevers Maatschappi Eds., Delft, Netherlands.
9. Anderson, T.L., (1991), ***Fracture mechanics.***, CRC Press, Boca Raton, FL.
10. González, J.L., (1992), ***Fractura por fatiga.***, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, E.S.I.Q.I.E., Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
11. Colangelo, V.S. and Herser, F.H., (1987), ***Analysis of metallurgical failures.***, John Wiley & Sons, New York, NY.
12. ASTM Standards, (1995), ***Analytical chemistry for metals, ores y related materials.***, Annual Book of ASTM Standards Vols. 0.3.0.5 and 0.3.0.6, W. Conshohocken, PA.
13. ASTM Standards, (1995), ***E8-95 Standard test methods for tension testing of metallic materials.***, Annual Book of ASTM Standards Vol. 0.3.0, W. Conshohocken, PA, pp 56-76.
14. ASTM Standards, (1995), ***E399-90 Standard test method for plane - strain fracture toughness of metallic materials.***, Annual Book of ASTM Standards Vol. 0.3.01, W. Conshohocken, PA, pp 412-442.
15. ASTM Standards, (1995), ***E134-89 Standard test method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness.***, Annual Book of ASTM Standards Vol. 0.3.01, W. Conshohocken, PA, pp 646-660.
16. ASTM Standards, (1995), ***E647-95 Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates.***, Annual Book of ASTM Standards Vol. 0.3.01, W. Conshohocken, PA, pp 578-614.

17. ASM International Handbook Committee, (1992). **Fracture Control Philosophy.**, ASM Handbook. Vol. 17, 10th Edition, Materials Park, Ohio.
18. SAE, (1986). **Spring Calculation.**, Bosch Automotive Handbook, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, Pag.226.
19. Lozano, A., Carrrión, F., Vázquez, D., and Escamilla, L., (1995), **Heavy duty vehicles road interaction. Experimental Assessment.**, Proc. of 7th World Conference on Transportation Research, Sydney, Australia.
20. Thompson, T. William, (1982). **Teoría de Vibraciones.**, Prentice Hall Internacional, Bogotá, Colombia.

SEGUNDA PARTE

**EVALUACIÓN ANALÍTICA DE LOS ESFUERZOS
ESTÁTICOS Y MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE LAS
DEFORMACIONES DINÁMICAS EN AUTOTANQUES.**

8 Introducción y Antecedentes

En general, en vehículos de transporte, la fractura de componentes mecánicos se debe a la fatiga, la cual ocurre como consecuencia de las condiciones de carga cíclica en que operan estos vehículos y que favorecen el crecimiento paulatino de una grieta hasta alcanzar un tamaño crítico, después del cual, sobreviene la ruptura total de la pieza^[1]. Estas fallas, frecuentemente, son causa de pérdidas económicas considerables e inclusive, de consecuencia fatales.

Para minimizar las posibilidades de fallas, se puede estimar cuantitativamente el efecto de la fatiga aplicando modelos analíticos de la mecánica del medio continuo o de la mecánica de la fractura.

La mecánica del medio continuo, considera que los materiales no presentan defectos o imperfecciones y estima la vida de un componente sujeto a cargas variables, mediante el método denominado "vida esfuerzo", el cual requiere del conocimiento de la historia de los esfuerzos a los que se ha sometido el material, sin considerar que existan grietas en éste.

Mediante el empleo de la Mecánica de la fractura, se puede establecer si el cuerpo del semirremolque tipo tanque es susceptible de fallar debido a la acción de las cargas cíclicas inducidas por las vibraciones de la carretera.

El estudio que aquí se presenta está centrado en los semirremolques tipo tanque de vehículos T3-S2 que transportan gas LP. En particular, se analiza el efecto que tiene el incremento en el largo (varió de 11.49 m, denominado autotank corto, a 14.46 m etiquetado como autotank largo) de dichos vehículos sobre la fatiga del material; ya que de acuerdo al Código ASME sección VIII [4] para la fabricación de recipientes a presión, no se requiere cambiar las especificaciones de espesor y tipo de acero con que se fabrican al variar la longitud. Sin embargo, es importante destacar que en este código se contemplan puramente condiciones de operación "estáticas", no obstante que los autotankes, objeto de nuestro estudio, trabajan adicionalmente bajo condiciones dinámicas.

El objetivo de este estudio es evaluar el efecto que tiene el incremento en la longitud de los autotankes sobre las cargas dinámicas producidas por la condición superficial del camino. A partir de este alargamiento, se evalúa la fatiga del cuerpo de los autotankes bajo diferentes condiciones de carga y para tres condiciones de rugosidad del camino (bueno, regular y malo). El estudio incluye un análisis puramente analítico de las condiciones de esfuerzos y deformaciones, tanto estáticas como dinámicas, que se presentan en la zona de máximo esfuerzo flexionante del autotank y se determina si el alargamiento de los tanques, combinado con las condiciones del camino, afecta la fatiga del cuerpo del tanque.

9 Desarrollo Experimental

El desarrollo experimental consistió en la realización de pruebas destructivas y pruebas no destructivas (PND). Las pruebas destructivas realizadas a muestras del acero de los autotankers fueron pruebas de tensión y de dureza, un análisis metalográfico y pruebas de fatiga. Adicionalmente, se obtuvieron los valores de J_{IC} tanto para el material base como para la soldadura y la zona afectada por el calor (ZAC). Las pruebas no destructivas efectuadas fueron mediciones experimentales de deformación dinámica de dos autotankers con suspensión neumática, uno largo y otro corto, mediante instrumentación con galgas extensométricas.

9.1 Ensayos destructivos

La aplicación de la Ley de Coffin-Manson para determinar la vida en fatiga del material, requiere emplear datos reales del esfuerzo último y el Módulo de elasticidad del material en estudio, para ello se realizaron pruebas de tensión y dureza tanto al material base como a la soldadura. También se realizó un estudio metalográfico para verificar la microestructura, el tamaño de grano y el tamaño y forma de las diversas fases e inclusiones presentes. Así mismo, se realizaron pruebas de fatiga para verificar los cálculos que se establecieron con la Ley de Coffin-Manson. Adicionalmente, se obtuvieron los valores de J_{IC} tanto para el material base como para la soldadura y la ZAC que sirvieron para caracterizar al acero A612.

9.1.1 Pruebas de tensión y dureza

Las pruebas de tensión se realizaron en un sistema servohidráulico Instron a desplazamiento constante y temperatura ambiente, con probetas de sección rectangular, de acuerdo a la norma ASTM E-8 (Figura No. 1) [5]. Se hicieron ensayos de tensión para el material base y para la soldadura, en ésta última, mediante probetas reducidas en la sección transversal justo en medio del cordón de soldadura, para asegurar la fractura en ese lugar, de acuerdo a la recomendación de la American Welding Society (Figura No. 10) [6].

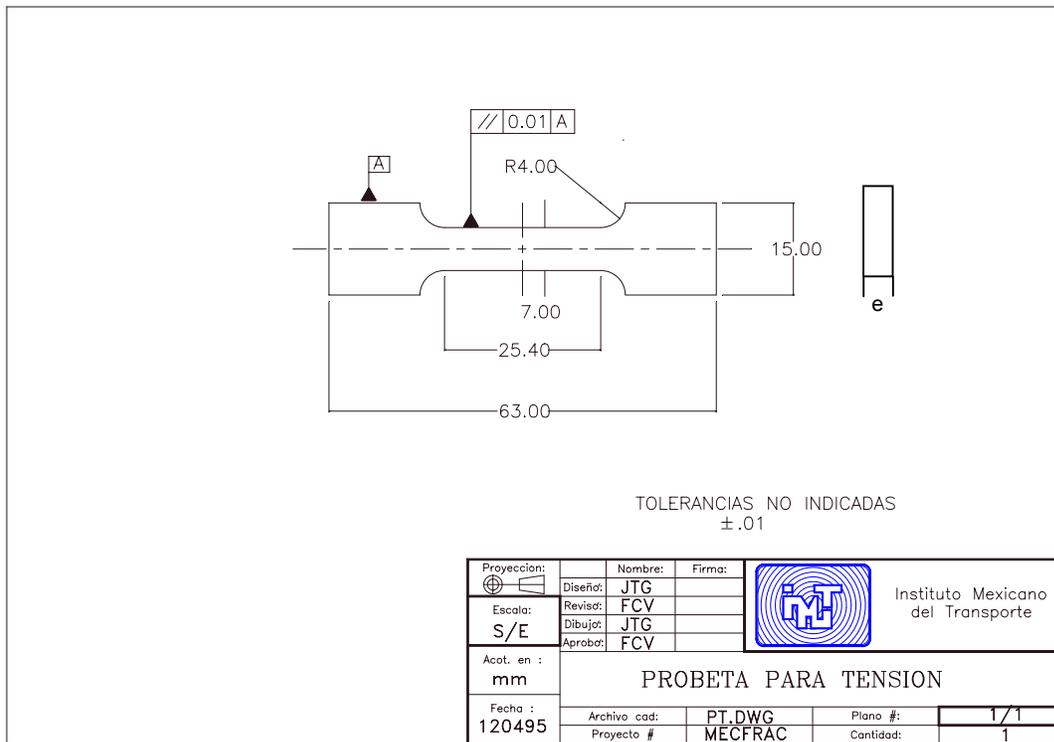


Figura No. 9 Probetas empleadas en las pruebas de tensión del material base

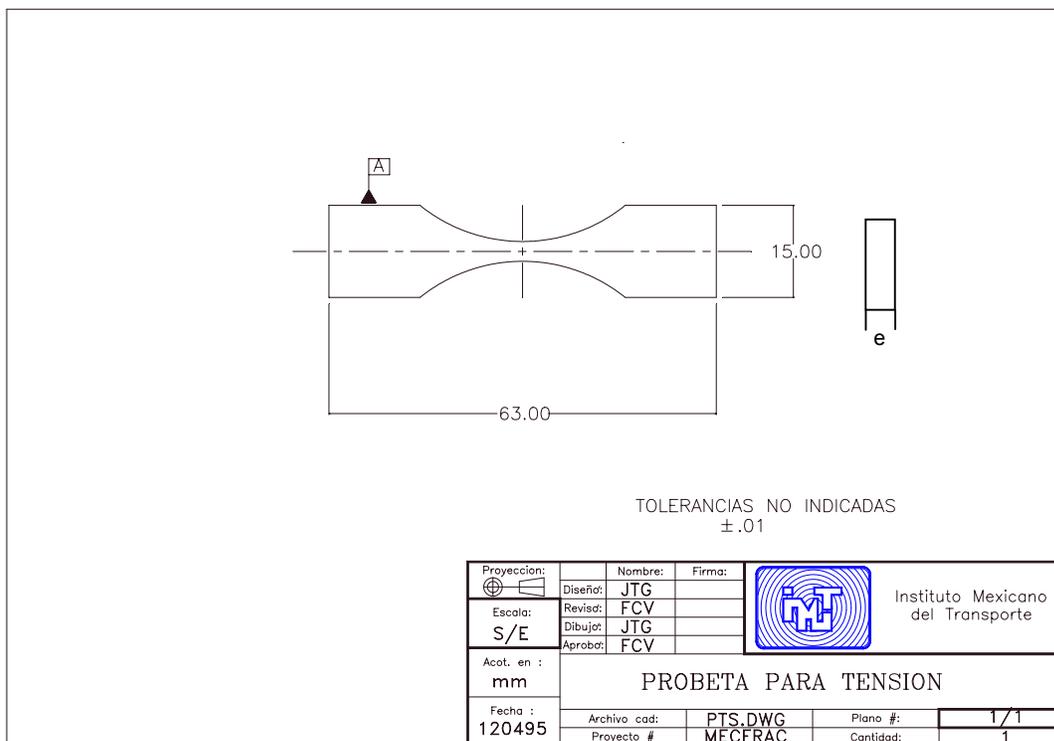


Figura No. 10 Probetas empleadas en las pruebas de tensión de la zona soldada

Las pruebas de dureza se realizaron en un microdurómetro Vickers obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla No.6, la cual es el resumen de los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente.

Tabla No.6 Propiedades en tensión y dureza del material base y de la soldadura

	E (Mpa)	σ_o (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	HV promedio
MATERIAL BASE	$2.011 \cdot 10^5$	351.2	664	190
SOLDADURA	$2.18 \cdot 10^5$	381.7	644	229

E= Módulo de Young, σ_o = Límite elástico σ_{UTS} =Esfuerzo último HV= Microdureza Vickers.

9.1.2 Estudio metalográfico

La microestructura del material refleja las características del material a nivel microscópico, para ello se analizaron metalográficamente el material base y la soldadura. La Figura No. 11 muestra la metalografía para el material base. En ella se destacan los microconstituyentes, ferrita y perlita, el tamaño de grano ASTM es de 7-8 y presenta inclusiones de sulfuro de manganeso del tipo 2A $\sim 6 \mu\text{m}$. La Soldadura, Figura No. 12, presenta granos columnares, con la zona de tamaño de grano grueso ASTM de 0-1 y la zona de grano fino de tamaño ASTM de 9.

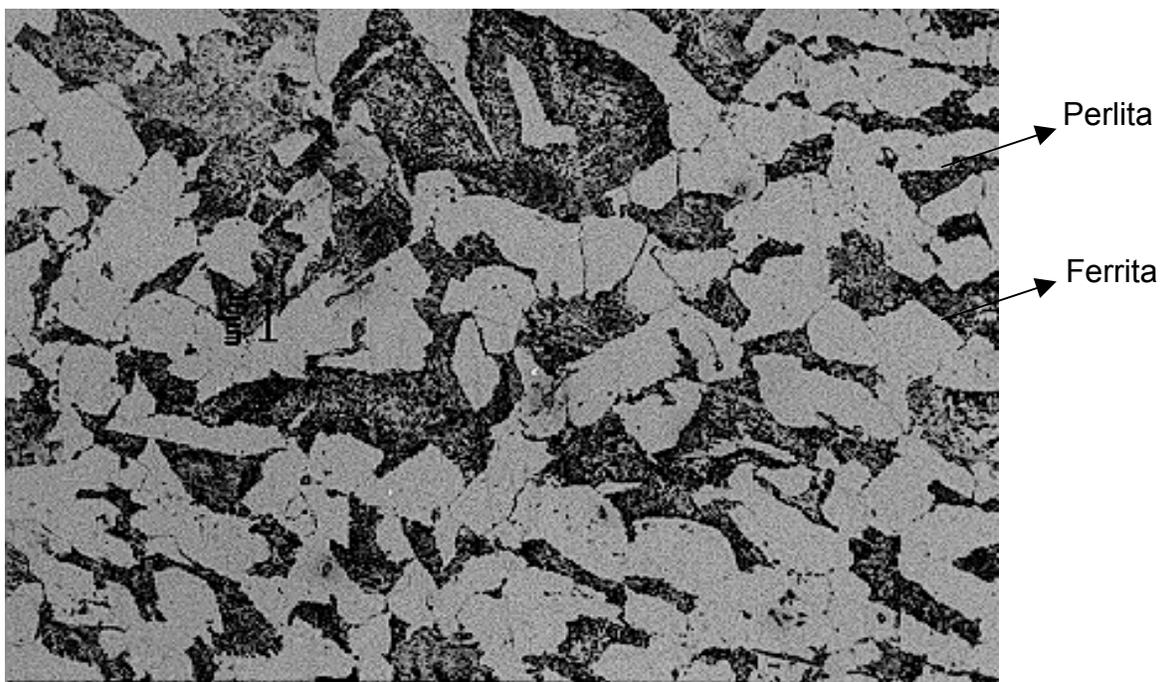


Figura No. 11 Microestructura del Material Base

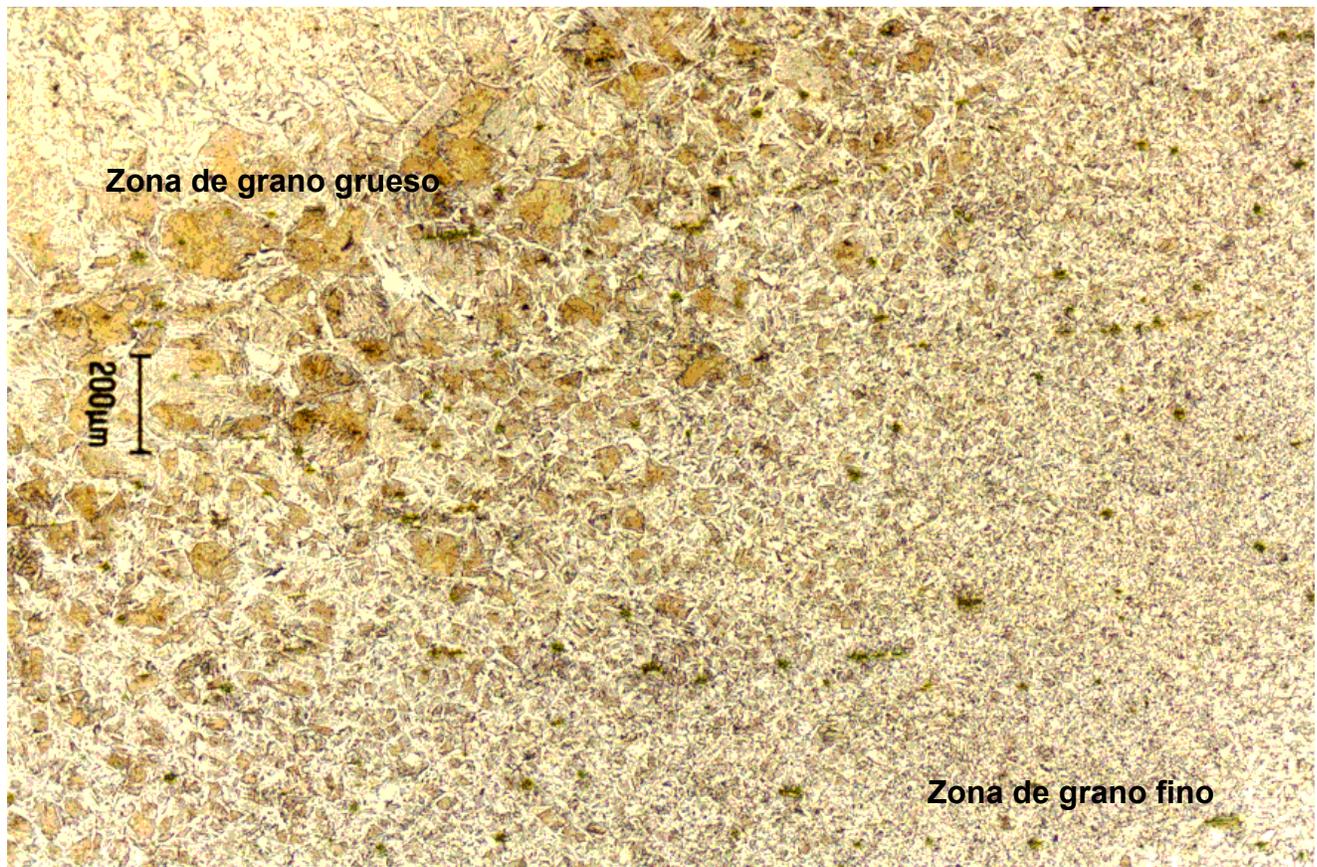


Figura No. 12 Microestructura de la soldadura (Estructura Widmastaten)

9.1.3 Fatiga

En cualquier tipo de vehículo terrestre como son los automóviles, autobuses y camiones de carga, se presentan vibraciones mecánicas generadas por diversas causas. Una de estas causas es la debida a las irregularidades de los caminos, ya que son responsables de un gran número de daños a diversos componentes de los vehículos. En este caso, se identifican al menos dos formas de deterioro; la primera, cuando se excede la resistencia máxima del material por impacto, particularmente en baches o accidentes. La segunda causa se debe a la aplicación de cargas cíclicas y que eventualmente producen fractura por fatiga en el material.

Existen muchos metales que pueden romperse bajo la acción repetida de un esfuerzo insuficiente para causar un fallo en la primera aplicación; este fenómeno, conocido como fatiga, se empezó a estudiar a mediados del siglo XIX, principalmente como consecuencia de la experiencia adquirida en la ingeniería de ferrocarriles. Rankine, en 1853, discutió las fracturas inesperadas que se daban en los ejes de las ruedas de los

ferrocarriles y atribuyó esta conducta al deterioro gradual del metal durante el curso del trabajo. Es interesante mencionar que Rankine detectó el efecto perjudicial de los bordes angulares y demostró que la introducción de un radio de curvatura mayor mejoraba la resistencia a los impactos repetidos. Otros investigadores de la época de Rankine, experimentaron con vigas de fundición empleadas en la construcción de puentes de ferrocarril y encontraron que podían resistir una carga estática casi tan grande como la carga de rotura por espacio de cuatro años sin falla, pero si las vigas eran deformadas repetidamente a sólo la mitad de la carga de rotura, se rompían en menos de 1000 deformaciones.

Wöhler diseñó entre 1858 y 1870, máquinas para realizar ensayos de fatiga con diversas condiciones de esfuerzos. Su máquina de flexión rotativa ha servido de base para la mayoría de los tipos de máquinas de fatiga actuales. A partir de sus experimentos con hierro forjado, demostró que las fallas debidas a la fatiga pueden tener lugar por debajo del límite elástico y que había una zona límite del esfuerzo bajo la cual el fallo debido a la fatiga no tendría lugar. En suma, investigó los efectos sobre la resistencia a la fatiga de una carga estática superpuesta y de las concentraciones de esfuerzos.

Bauschinger observó que los límites de proporcionalidad medidos en los ensayos de tensión y de compresión estáticos podían combinarse por la aplicación de esfuerzos fluctuantes, pero que podían alcanzar valores estables como el límite elástico.

Hasta finales del siglo XIX se tenía un conocimiento muy limitado de la estructura de los metales y la explicación más aceptada de la fatiga era que la textura fibrosa de los metales cambiaba gradualmente a una estructura cristalina. Ewing y Humfrey en 1903, observaron al microscopio la deformación provocada por esfuerzos fluctuantes y encontraron que si el límite elástico se sobrepasaba, el metal se deformaba debido al deslizamiento de algunos planos dentro de los cristales, esto representó un salto enorme para el entendimiento de los materiales frente a la fatiga. Las primeras observaciones con el microscopio electrónico fueron hechas por Craig en 1952, quien encontró que las grietas producidas por fatiga podían detectarse a un 0.1% de la vida en fatiga del metal.

El comportamiento a la fatiga del acero difiere en muchos aspectos al de otros muchos metales. El rasgo distintivo más importante es que tiene un límite a la fatiga definido; que su resistencia a la fatiga puede aumentarse apreciablemente sometiendo el metal a esfuerzos débiles seguidos de un aumento progresivo de la intensidad del esfuerzo alternante y que la resistencia a la fatiga aumenta con la elevación de la temperatura por encima de unos 100 °C, alcanzando su valor máximo entre 200 y 400 °C.

Para evaluar el deterioro en un vehículo por fatiga ocasionado por la condición superficial de la carretera, es necesario establecer una relación entre la rugosidad del camino y el nivel de vibraciones que se presentan en éste. Suponiendo que un determinado tipo de vehículo desarrolla una velocidad promedio en un recorrido específico, se encuentra que la amplitud promedio de las vibraciones que experimenta es inversamente proporcional a la rugosidad de la carretera y, como consecuencia, a mayor rugosidad mayores cargas

dinámicas sobre el vehículo y la carretera, incrementando no sólo el deterioro del pavimento, sino también el daño al vehículo y probablemente también a la carga.

Los componentes mecánicos y estructuras, frecuentemente operan bajo cargas alternantes lo suficientemente severas para hacer la resistencia a la fatiga un criterio de diseño primordial. El diseñador debe asegurarse que el componente o estructura tiene una vida en fatiga adecuada. Esto no es fácil de lograr, ya que la vida en fatiga comprende tanto la etapa de iniciación como la de propagación y, una definición exacta de la transición del inicio de la grieta al crecimiento de la misma, no es usualmente posible. Lo más que se puede decir es que el inicio de la grieta y el crecimiento de la misma, generalmente cuentan por la mayoría de la vida útil del componente, especialmente en regímenes de bajos esfuerzos.

Los factores mecánicos más comunes que afectan la vida en fatiga son los concentradores de esfuerzos, tamaño del espécimen, efectos superficiales y esfuerzos residuales superficiales. Los concentradores de esfuerzos pueden ser mecánicos, tales como filetes o cuñas, o metalúrgicos (porosidades e inclusiones) y generalmente inician las fallas en la superficie. Cualquier perturbación superficial introducida en el proceso de manufactura, puede actuar como un concentrador de esfuerzos, estas incluyen quemaduras por procesos de soldadura mal aplicados que originan segregaciones, ribetes que producen inclusiones alargadas en la superficie del metal roldado y fundido del material superficial localizado, debido a una soldadura deficiente o marcado con lápiz eléctrico.

El tamaño del espécimen influye inversamente proporcional a la vida en fatiga, esto es debido a que, normalmente las fallas por fatiga se inician en la superficie, al haber mayor área, aumentan las posibilidades de que existan defectos que pudieran iniciar la falla y reducir los ciclos necesarios para el inicio de la grieta. Si los defectos están distribuidos en forma dispersa, la resistencia a la fatiga dependerá de la probabilidad de que se encuentre un defecto en la región del esfuerzo máximo. Se ha propuesto que algunas formas de porosidad o constituyentes intermetálicos pueden actuar en algunos materiales como defectos dispersos.

Los fallos por fatiga se propagan casi siempre a partir de una superficie libre, de modo que el estado superficial tiene un efecto considerable en la resistencia a la fatiga. Esto se debe a que los esfuerzos son, normalmente, mucho mayores en la superficie, en particular cuando se encuentran presentes concentraciones de esfuerzos; por otra parte, la superficie puede ser de por sí menos resistente y puede, además, encontrarse debilitada por un ataque producido por corrosión. Por lo tanto es posible lograr una mejora considerable en la resistencia a la fatiga de los materiales por aplicación de tratamientos superficiales. El acabado superficial juega un papel muy importante en la vida en fatiga de los materiales, ya que las marcas de maquinado son pequeñas hendiduras y al incrementarse la rugosidad del material, se incrementa la profundidad de las hendiduras y la vida en fatiga tiende a disminuir.

La rugosidad superficial puede cambiar las propiedades del material y afectar significativamente la vida en fatiga ya sea en forma benéfica o adversamente. La resistencia a la fatiga aumenta a medida que la calidad de la superficie pulida es mejor y, en general, es más elevada cuando la dirección del pulido es paralela a la dirección del esfuerzo aplicado. El electroplateado por ejemplo, disminuye la vida en fatiga ya que al hacer las deposiciones, se desarrollan esfuerzos de tensión que causan agrietamiento. La descarburización del acero que ocurre en los tratamientos térmicos sin atmósfera protectora reduce la vida en fatiga de los aceros. La carburización, nitruración y el endurecimiento superficial por inducción, incrementan la vida en fatiga.

Los esfuerzos compresivos residuales superficiales disminuyen el efecto de los esfuerzos de tensión aplicados, resultando en un incremento de la vida en fatiga, siendo esta forma la más efectiva manera de incrementar la vida en fatiga.

Los factores metalúrgicos más importantes que afectan la vida en fatiga son: Tamaño de grano, microestructura y orientación de las fibras. El tamaño de grano afecta en forma variable la vida en fatiga de acuerdo al tipo de material empleado, para materiales no ferrosos y acero normalizado, la resistencia a la fatiga se incrementa al disminuir el tamaño de grano. En términos generales, en la etapa I de fatiga, el tamaño más fino restringe el crecimiento de la grieta debido a la existencia de mayor cantidad de límites de grano que interactúan con las grietas.

Con referencia al acero, la misma resistencia puede obtenerse con diferentes microestructuras, es así que, a resistencia constante, la vida en fatiga es menor para una perlita gruesa que la que se obtendría con una microestructura esferoidal, esto se debe a la forma de los carburos, ya que estos, debido a su forma redonda, tienen efectos concentradores de esfuerzos menores, lo que resulta en vida más larga. En general, las microestructuras bastas y angulares tienen menor vida en fatiga que las microestructuras finas y redondas. Sucede lo mismo con las inclusiones. Las inclusiones redondas son menos dañinas que las angulares. La vida más larga en fatiga se obtiene con martensita templada, si el temple fue incompleto y se obtiene una microestructura mixta de bainita o ferrita y martensita, la vida en fatiga disminuye.

El trabajado mecánico de los metales causa la obtención de fibras mecánicas, o sea la alineación de los granos, áreas de segregación e inclusiones en la dirección de rolado. La vida en fatiga es anisotrópica, la vida en fatiga es menor en la sección transversal a la dirección de rolado. Una relación general muestra que la vida en dirección transversal es aproximadamente 0.6 a 0.7 veces que la vida en la dirección longitudinal.

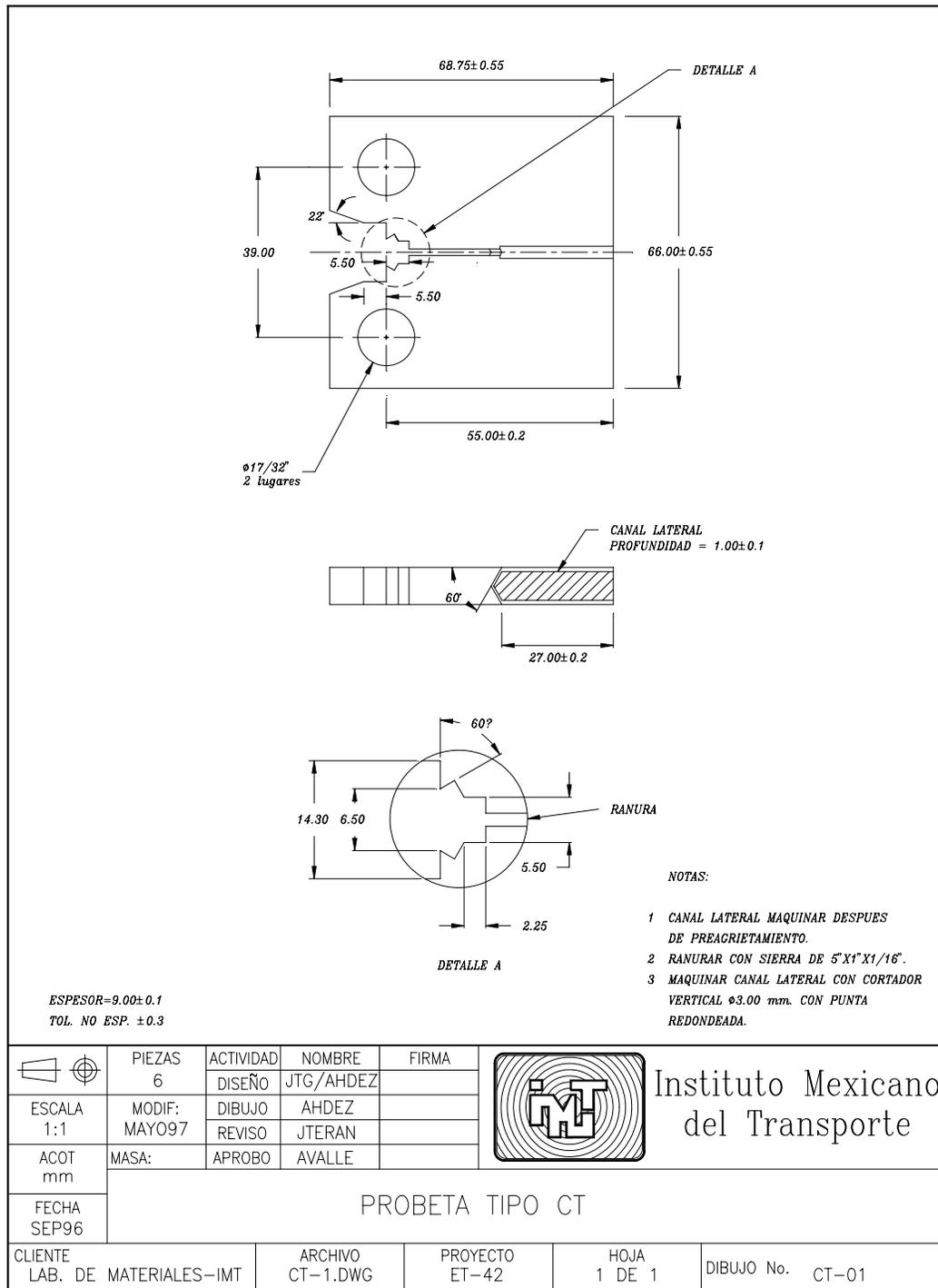


Figura No. 14. Probetas empleadas en las pruebas de fatiga.

10 La Integral J

En el siglo XIX la Revolución Industrial trajo como resultado un incremento enorme en el uso de metales, principalmente acero, para aplicaciones estructurales. Desgraciadamente, con su uso también se incrementaron los accidentes debido a la falla de esas estructuras, en particular, hubo numerosos accidentes relacionados con explosiones de máquinas de vapor y equipo de ferrocarriles. Algunos de estos accidentes se debieron a un pobre diseño, pero se fue encontrando gradualmente que los materiales tenían deficiencias en forma de fallas que podían iniciar el agrietamiento y la posterior fractura. La Segunda Guerra Mundial trajo la construcción de estructuras propensas a fallar, tales como los barcos Liberty y los Tanques T-2. De los 2500 barcos Liberty construidos, 145 se fracturaron en dos y casi 700 sufrieron fallas serias. Muchos puentes y otras estructuras también fallaron. Las fallas ocurrían bajo esfuerzos muy pequeños, por ejemplo cuando los barcos se encontraban anclados. Estas anomalías llevaron a realizar investigaciones que revelaron que las fracturas eran frágiles y que se debían a defectos preexistentes y a la concentración de esfuerzos. El objetivo de la Mecánica de la fractura es proporcionar respuestas cuantitativas a problemas específicos concerniendo grietas en estructuras.

La mecánica de la fractura Lineal Elástica (LEFM) es válida sólo cuando la deformación no lineal del material en la punta de la grieta, esté confinada a regiones pequeñas. En muchos materiales, es virtualmente imposible caracterizar el comportamiento de la fractura con LEFM, por lo que se requiere un modelo alternativo de mecánica de la fractura.

La mecánica de la fractura elasto-plástica se aplica a materiales que exhiben comportamiento no lineal (deformación plástica). La aplicación práctica de la LEFM es la habilidad para predecir el inicio del agrietamiento mediante la Integral J. La Integral J es un parámetro elasto-plástico que describe las condiciones de la punta de la grieta y que puede usarse como criterio de fractura. Los valores críticos de J ofrecen mediciones cercanas al valor real de la tenacidad a la fractura, aún para plasticidades en la punta de la grieta relativamente largas.

La Integral J fue desarrollada por Rice para determinar la energía de fractura de un material involucrando deformaciones tanto elásticas como plásticas, por lo tanto, éste parámetro caracteriza el comportamiento en estas condiciones. Rice aplicó la plasticidad de la deformación al análisis de una grieta en un material no lineal. El demostró que la velocidad de liberación de energía no lineal podía describirse como una línea integral. Rice y Rosebren también mostraron que J caracteriza en forma única las tensiones y deformaciones en la punta de la grieta de materiales no lineales, por lo que la Integral J puede ser vista como un parámetro de energía y también como un parámetro de intensidad de esfuerzos.

Físicamente, la Integral J representa el balance de energía en la vecindad de la punta de una grieta. Los valores de J pueden ser usados para el análisis de la fractura. La equivalencia entre K y J está dada por la siguiente relación, que es válida siempre y cuando la plasticidad no sea muy extensa.

$$J = \frac{K^2}{E} \quad \text{Esfuerzo Plano} \quad [6]$$

Donde:

J = Integral J

K =Factor de Intensidad de Esfuerzos

E = Módulo de Young

$$J = \frac{K^2}{E(1-\nu^2)} \quad \text{Deformación Plana} \quad [7]$$

Donde:

J = Integral J

K =Factor de Intensidad de Esfuerzos

E = Módulo de Young

ν = Constante de Poisson

Esto quiere decir que J describe la fuerza motriz en la punta de la grieta, en forma análoga a como lo hace K. El valor de J puede ser calculado para diferentes geometrías y condiciones de carga por varios métodos tales como complianza, modelado por elementos finitos, etc.

Para entender las condiciones bajo las cuales se puede usar J para el análisis de fractura, debe recordarse que J es la solución del problema elástico no lineal; lo que ocurre es que el comportamiento de la carga P contra el desplazamiento cuando existe plasticidad limitada es no lineal, de aquí que J se haya adoptado como un parámetro que caracteriza el comportamiento elasto-plástico de cuerpos agrietados.

El uso de J en el análisis de fractura es ilustrado en la Figura No. 15. Para un material elasto-plástico con una grieta de tamaño a_0 , al comienzo $P=0$, $J=0$ (Punto 1). Conforme la carga aumenta, J aumenta ($J>0$) y la punta de la grieta pierde su agudeza (Punto 2). Al alcanzar un cierto valor de J, la grieta comienza a propagarse de forma estable (Punto 3). Este punto se refiere como J crítico J_C y puede usarse como una medida conservadora de la tenacidad a la fractura dúctil del material, debido a que se presenta inmediatamente antes de la inestabilidad. Al continuar aumentando la carga, la grieta continúa creciendo, al igual que J. Es claro, por tanto, que J_{IC} es el criterio de inicio de la propagación estable (abultamiento), de manera que el criterio de inicio de grietas con base en la Integral J es cuando:

$$J > J_C$$

Sin embargo, dependiendo de las propiedades del material, la grieta puede propagarse en forma estable considerablemente antes de que comience a crecer de manera rápida, o sea, antes de la inestabilidad. De acuerdo con el criterio de energía, la propagación inestable ocurrirá cuando la rapidez de conversión de energía disponible en la punta de la grieta sea mayor que la demanda de energía para propagar la grieta.

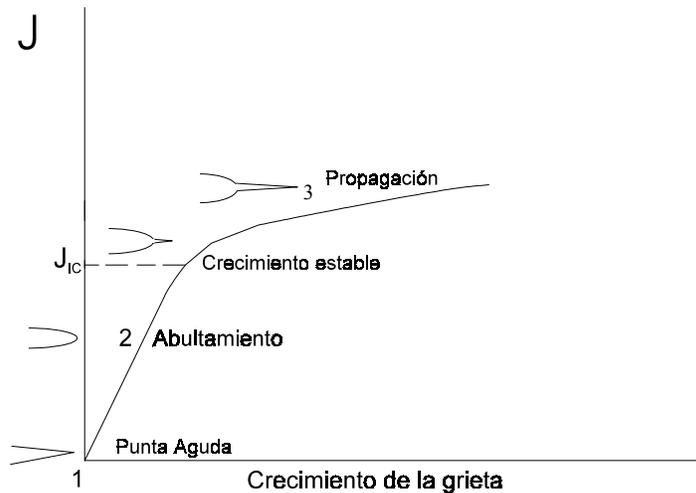


Figura No. 15 Etapas de la fractura dúctil relacionadas con J

10.1 Pruebas J_{IC}

Landes fue de los primeros en describir la metodología para valorar experimentalmente J_{IC} , la cual se encuentra ahora detallada en la norma ASTM-E-803. La geometría del espécimen recomendada es la CT (Compact Tension por sus siglas en inglés) modificada en la entalla para poder colocar un extensómetro COD (Crack Opening Displacement por sus siglas en inglés) que permita medir el desplazamiento de la grieta en la línea de carga. El objetivo de la prueba es obtener la curva carga P contra desplazamiento de abertura v , para diferentes extensiones de la grieta (Δa) de una o varias probetas con tamaño de grieta inicial constante. A continuación, se calcula J con la ecuación [8]:

$$J = \frac{K^2}{E} (1 - \nu^2) + \frac{2A}{B(W - a)} \quad [8]$$

Donde:

J = Integral J

E = Módulo de Young

B = Espesor de la probeta

a = Tamaño de la grieta

K = Factor de Intensidad de Esfuerzos

ν = Constante de Poisson

W = Ancho de la probeta

A = Área bajo la curva carga-desplaz., sin considerar la porción elástica

Para evaluar al acero A612, se realizaron pruebas J_{IC} en un sistema servohidráulico Instron siguiendo la norma ASTM E-813, de donde el valor de J_{IC} se obtiene de la intersección de la recta que mejor ajusta los puntos J contra Δa y una línea de plasticidad definida por:

$$J = 2\sigma_0\Delta a \quad [9]$$

Donde:

J = Integral J

σ_0 = Esfuerzos

Δa = Tamaño de la grieta

El procedimiento para construir la gráfica J contra Δa (Figura No. 17) es el siguiente:

1. Graficar los puntos J - Δa .
2. Dibujar la línea teórica de abultamiento $J = 2\sigma_0\Delta a$
3. Dibujar líneas límite paralelas a la línea de abultamiento a 0.15 y 1.5 mm. Estas líneas son el límite de la región aceptable para los valores J .
4. Graficar la curva que mejor ajuste los puntos J - Δa aceptables. Esta línea es llamada Línea-R.
5. La intersección de la línea R con la línea de abultamiento es designada como J_Q .
6. Verificar la validez de $J_Q=J_{IC}$.

En la Figura No. 16 se muestra un ejemplo de cómo se grafican los resultados de J contra Δa para evaluar J_{IC} del material.

Las pruebas de J_{IC} se realizaron en un sistema servohidráulico Instron (ver Figura No. 5) usando una sola probeta, de acuerdo a la norma ASTM E-813-89, acuerdo con la cual, la probeta se descargaba 10% desde la carga máxima, como se muestra en la Figura No. 17. Los valores de carga contra desplazamiento se registran automáticamente mediante una tarjeta adquisitora de datos, los cuales se almacenan en el sistema computarizado que controla la prueba.

Empleando el método de la complianza se determina el crecimiento de la grieta y se obtienen valores numéricos de J . El software propietario del Sistema Servohidráulico Instron empleado en la realización de las pruebas, está basado en la norma ASTM E-813. Método para de medición de la tenacidad a la fractura JIC, el cual determina un valor provisional de JIC denominado J_Q , después de realizar la prueba, el programa de software automáticamente determina su validez, los parámetros que evalúa el programa se resumen como sigue:

La prueba será válida si:

1. Espesor $B > 25J_Q / \sigma_y$.
2. El ligamento inicial, $B_0 > 25J_Q / \sigma_y$.
3. La probeta no muestra fractura frágil por clivaje a la velocidad y temperaturas usadas.
4. Ninguna de las nueve mediciones físicas difiere más del 7% del tamaño de grieta promedio físico.

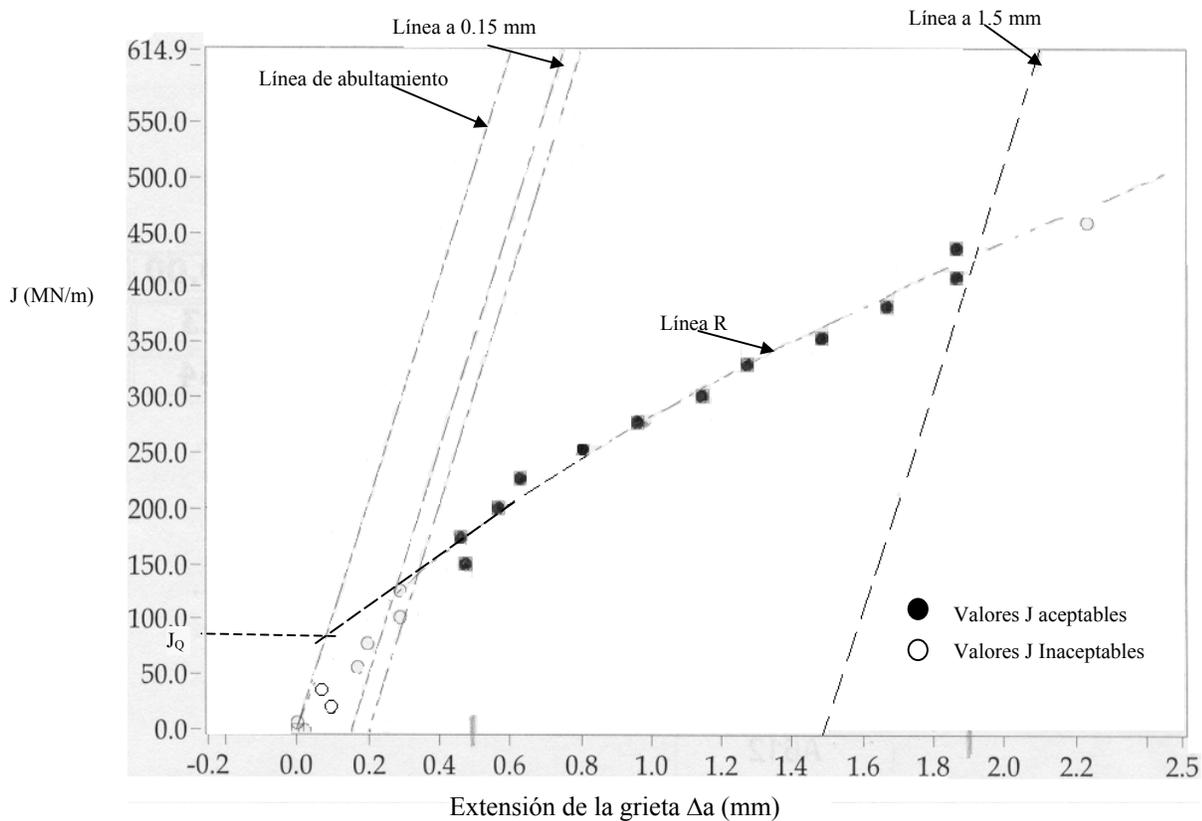


Figura No. 16 Integral J (KJ/m²) en función del avance de grieta Δa (mm)

Se analizaron 18 probetas para la determinación de J_Q , siguiendo las especificaciones de la norma ASTM E-813. Cinco para el material base en dirección longitudinal, tres para el material base en dirección transversal, cinco para la soldadura y cinco para la ZAC.

Una de las etapas críticas de la prueba, es obtener un agrietamiento que asemeje una grieta que pudiera encontrarse originalmente en el material. La función del preagrietamiento es proporcionar la forma inicial de la grieta, con un tamaño adecuado y

asegurar una trayectoria recta y simétrica. Se puede usar cualquier frecuencia en la aplicación de las cargas cíclicas, siempre que el sistema permita mantener la precisión en la carga requerida para el tamaño del preagrietamiento. El preagrietamiento no debe ser menor a $0.10B$ o 1.0 mm, donde B es el espesor de la probeta.

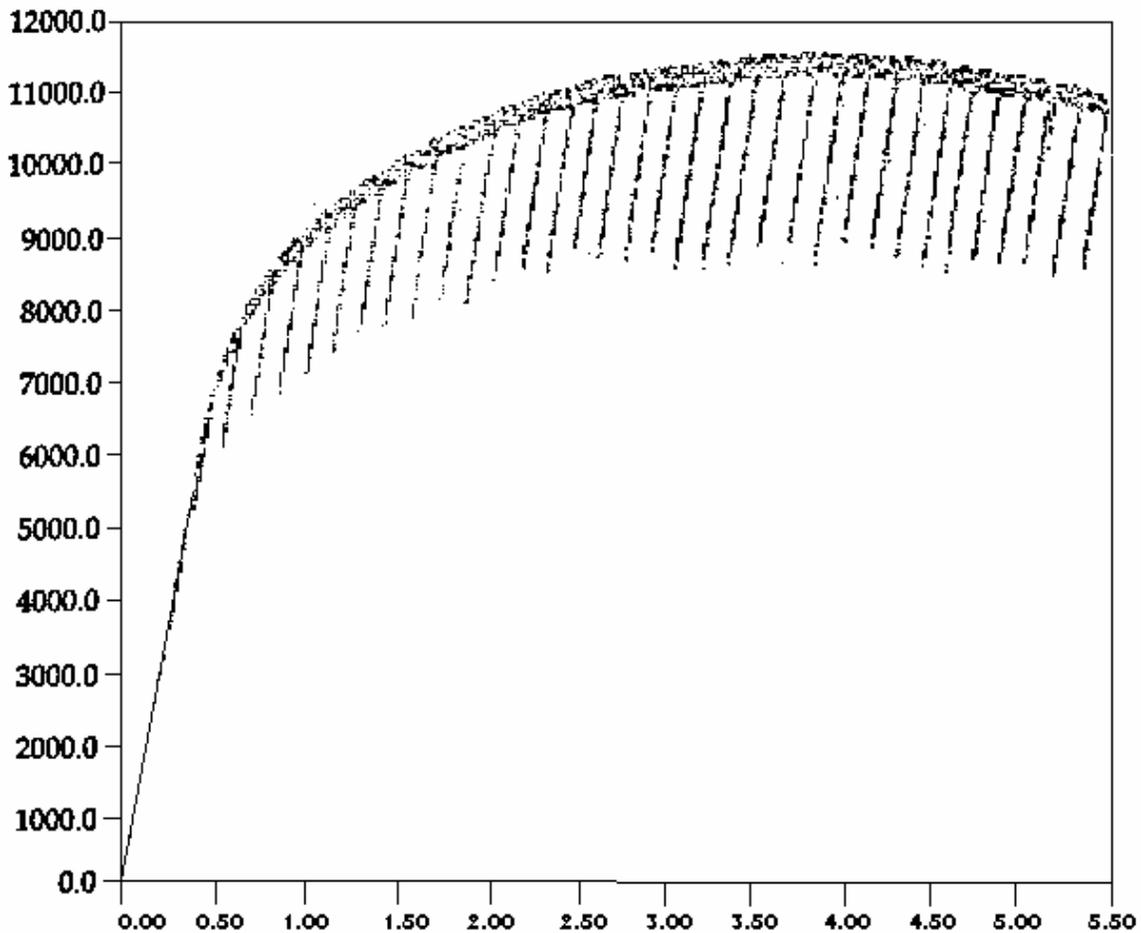


Figura No. 17 Carga aplicada (N) contra desplazamiento de la grieta (mm)

La Tabla No.7 muestra los promedios de los resultados de las pruebas J_Q . El equivalente a K_{IC} , factor de intensidad de esfuerzos, K_{JC} , se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$K_{JC} = \sqrt{J_Q E} \quad (10)$$

Donde:

K_{JC} = Factor de Intensidad de Esfuerzos

E = Módulo de Young

J_Q = Integral J provisional

Tabla No.7 Equivalentes de K_{IC} (K_{JC}) a partir de valores J_Q

Material	J_Q (KJ/m ²)	K_{JC} (MPa) \sqrt{m}
Base Longitudinal	141.47	168.67
Base Transversal	51.36	101.63
Soldadura	119.12	161.15
ZAC	46.21	96.40

11 Pruebas No destructivas

Para evaluar el efecto que tiene la rugosidad del pavimento en la fatiga de los autotanques, en función del tamaño de los mismos y bajo diferentes condiciones de carga, se midieron experimentalmente las deformaciones a las que se someten dichos tanques mediante el uso de galgas extensométricas (strain gages).

11.1 Medición experimental de la deformación dinámica

Los parámetros dinámicos que influyen sobre el nivel de deterioro del vehículo son la velocidad del vehículo, el estado superficial del pavimento, la amplitud y la frecuencia de deformación del componente mecánico debido a las cargas dinámicas que se transmiten de los ejes, así como el tipo de suspensión. Estos parámetros influyen en los valores picos de las cargas dinámicas.

El empleo de galgas extensométricas para medir deformaciones dinámicas, está bien fundamentado y es un método muy útil, porque se obtienen datos reales de los esfuerzos a los que se somete un cuerpo. Para las mediciones realizadas, se utilizaron cuatro extensómetros del tipo resistivo que se colocaron en la parte media baja del autotanque (Figura No. 18) obteniéndose un puente de Wheatstone completo, de tal manera que únicamente se registraron deformaciones en la dirección longitudinal. Los extensómetros se conectaron empleando un puente de Wheatstone completo, el cual se balanceaba a cero en condiciones estáticas, por lo que la medición únicamente registraba las deformaciones debidas al comportamiento dinámico del tanque.

Se seleccionaron cualitativamente, atendiendo a la rugosidad característica del pavimento, tres secciones de carreteras etiquetadas como caminos regular, bueno y malo. Una carretera de cuota fue clasificada como camino bueno, una carretera libre como camino regular y una carretera secundaria como camino malo. Para realizar las pruebas, la velocidad crucero se estableció en 90 Km/h para los caminos bueno y regular. Para el tramo de camino catalogado como malo la velocidad crucero fue la que permitía ese tramo, normalmente entre 65 y 80 Km/h y se procuró mantenerla constante.

El trayecto de pruebas se dividió en seis tramos. Las condiciones y número de mediciones que se realizaron se muestran en la Tabla No.8, cabe destacar que el número de mediciones realizadas se hizo de acuerdo a la longitud de cada tramo.

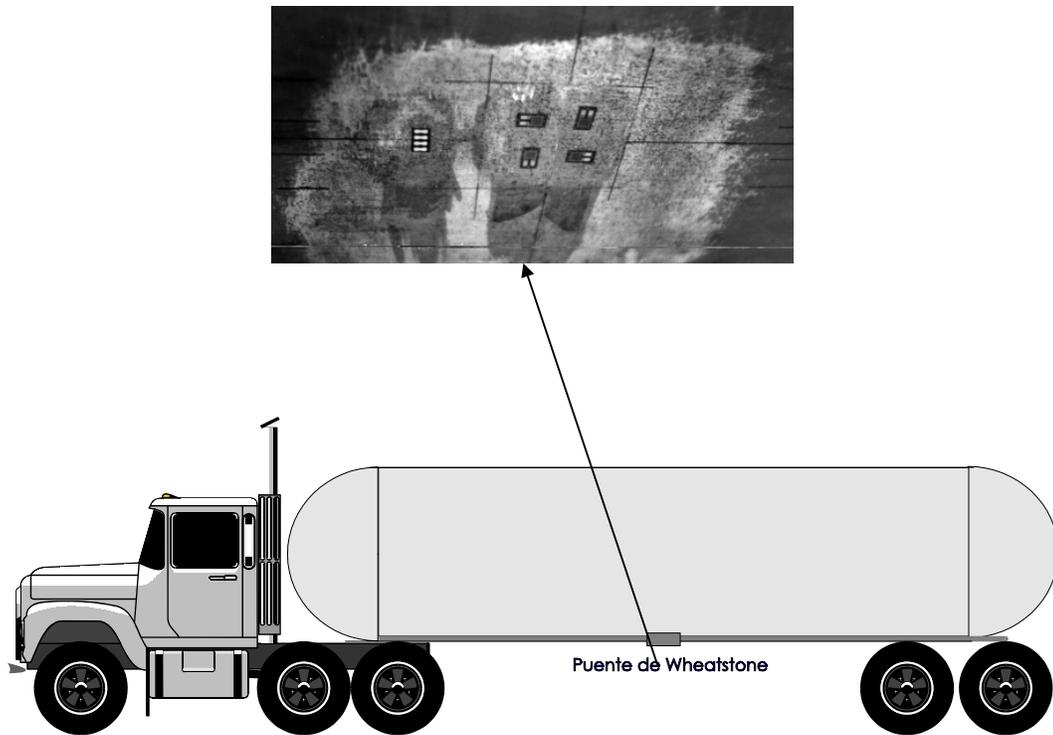


Figura No. 18. Instrumentación de autotankue para medir deformaciones dinámicas.

Tabla No.8 Número de mediciones respecto a las condiciones de trabajo de los autotankues

TRAMO No.	CONDICIONES		# MEDICIONES	
	CAMINO	VEHÍCULO	TANQUE CORTO	TANQUE LARGO
1	Regular	Vacío	22	25
2	Bueno	Vacío	32	34
3	Malo	Vacío	16	15
4	Malo	Cargado	16	13
5	Bueno	Cargado	36	33
6	Regular	Cargado	23	25

Cada medición duró 1.6 seg y arrojó un total de 1598 datos, a los que se les dio un tratamiento matemático con el programa de cómputo 'Intelli-Trend' v.3.22 de Technology for Energy Corp., el cual exporta los datos obtenidos experimentalmente como espectros de tiempo y/o frecuencia, en donde el eje de las ordenadas es la amplitud equivalente y el eje de las abscisas puede ser la frecuencia en Hertz o el tiempo en segundos. Estos espectros son ajustados matemáticamente mediante el

programa de cómputo PC DSP (Personal Computer Digital Signal Processing) de la Universidad del Sur de Illinois, el cual emplea técnicas de ventaneo Hanning y la Transformada de Fourier para obtener muestras que puedan compararse. Una vez ajustados los valores de los espectros, se les trató estadísticamente en el programa de cómputo que maneja hojas de cálculo 'Excel', obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla No.9, expresados ya como deformaciones en la dirección longitudinal. Esta misma tabla muestra datos tomados durante situaciones especiales como son baches y las deformaciones máximas registradas durante la descarga del gas. Los niveles de deformación más importantes registrados en los tanques se deben a los cambios de presión durante los ciclos de carga y descarga del gas LP.

Tabla No.9 Medición experimental de deformaciones dinámicas

CAMINO	DEFORMACIONES			
	AUTOTANQUE CORTO		AUTOTANQUE LARGO	
	VACÍO	CARGADO	VACÍO	CARGADO
BUENO	0.000019	0.000008	0.000044	0.000016
REGULAR	0.000036	0.000016	0.000063	0.000019
MALO	0.000037	0.000021	0.000082	0.000026
BACHES, TOPES		0.000400		0.000420
DESCARGA		0.000450		0.000450

11.2 Determinación de esfuerzos estáticos

Los aspectos que tienen una influencia estática en el nivel de deterioro de un vehículo son: el peso y tipo del vehículo, la distribución de la carga en los ejes, el tipo de material del componente mecánico. Todos estos aspectos afectan principalmente en los niveles de esfuerzos y deformaciones del componente mecánico.

Se estudiaron dos tipos de autotanques: el largo, de ~14 m y el corto de ~11 m. Ambos trabajan en las mismas condiciones de presión de operación : 10 Kg/cm² cuando se encuentran cargados y 3 Kg/cm² cuando están descargados. La Tabla No.10 muestra las características físicas de los dos tipos de autotanques.

Tabla No.10 Comparación de las características físicas de los autotanques

TANQUE	Longitud Total (m)	Capacidad al 100% (l)	Espesor cuerpo (mm)	Espesor extremos (mm)	Diámetro tanque (m)	Acero ASTM
LARGO	14.46	52,295	10.82	6.35	2.26	A612
CORTO	11.49	40,984	11.23	6.35	2.34	A612

El esfuerzo se calculó por superposición del efecto causado por la presión interna, considerando al tanque como un cilindro de pared delgada, la flexión de un cilindro de peso w con apoyos libres en los extremos y una longitud de claro igual a la distancia entre ejes.

En ingeniería de resistencia de materiales, la placa se considera como delgada si el espesor de la pared es pequeño comparado con las otras dos dimensiones y la relación de espesor t , al radio de curvatura principal mínimo R_t es de $R_t/t > 10$. Esto también significa que los esfuerzos de tensión, compresión y corte producidos por cargas externas, puedan asumirse como uniformemente distribuidas sobre todo el espesor de las paredes. Más aún, las placas más usadas en construcción de recipientes a presión son placas delgadas, con un rango de $10t \leq R_t \leq 500t$, en donde la característica más importante es que los esfuerzos de flexión debido a cargas externas concentradas son de alta intensidad sólo en el área cercana al área donde se aplican las cargas.

La Tabla No.11 muestra las deformaciones calculadas, en la dirección longitudinal, a las que son sometidos los autotankes estudiados considerando el peso propio del autotankes, el peso del gas transportado y la presión de trabajo durante el transporte del gas.

Tabla No.11 Deformaciones a los que se somete el autotankes en condiciones estáticas

	DEFORMACIONES			
	TANQUE CORTO		TANQUE LARGO	
	CARGADO	VACIO	CARGADO	VACÍO
Por Peso del tanque	0.000015	0.000015	0.000023	0.000023
Por Presión de trabajo	0.000357	0.000076	0.000357	0.000076
Por Peso del gas	0.000033	0	0.000053	0
TOTAL	0.000406	0.000092	0.000433	0.000099

Las Figuras No. 19a a 19h muestran los registros de deformaciones obtenidos para dos tipos de caminos, para los dos tamaños de autotankes y en condiciones de carga total y vacíos.

Tanque Largo Cargado
Camino Bueno

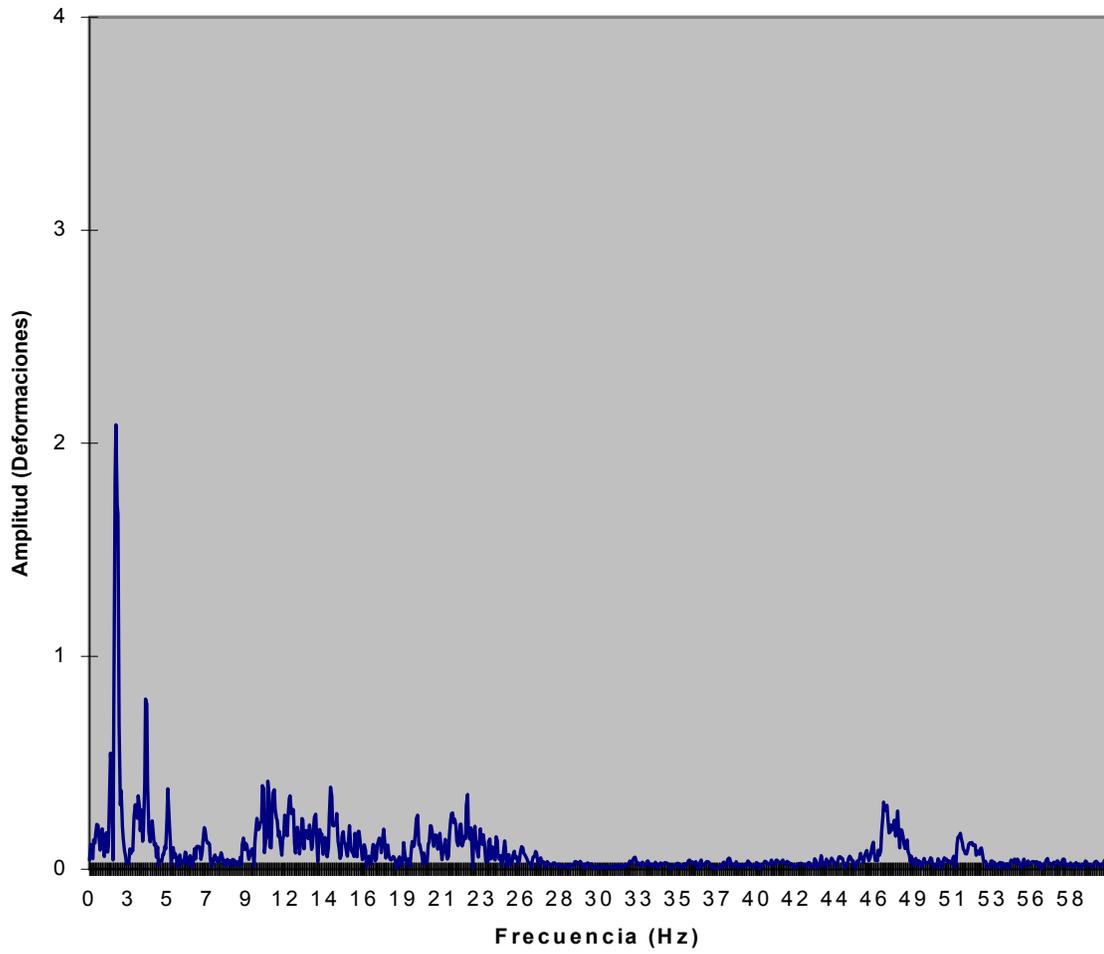


Figura No. 19a Tanque Largo Cargado, Camino Bueno

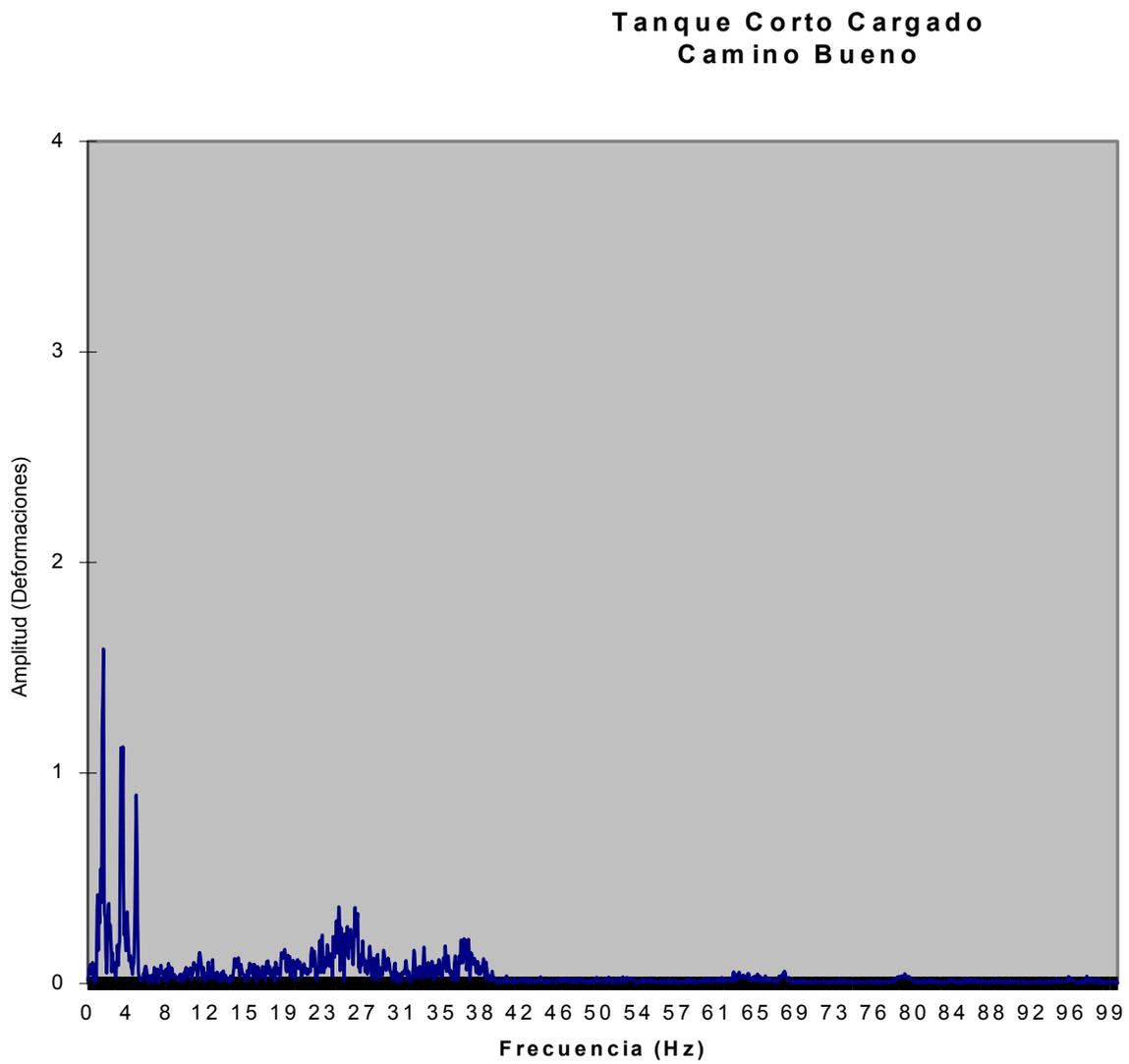


Figura No. 19b Tanque Corto Cargado, Camino Bueno

Tanque Corto Vacío
Camino Bueno

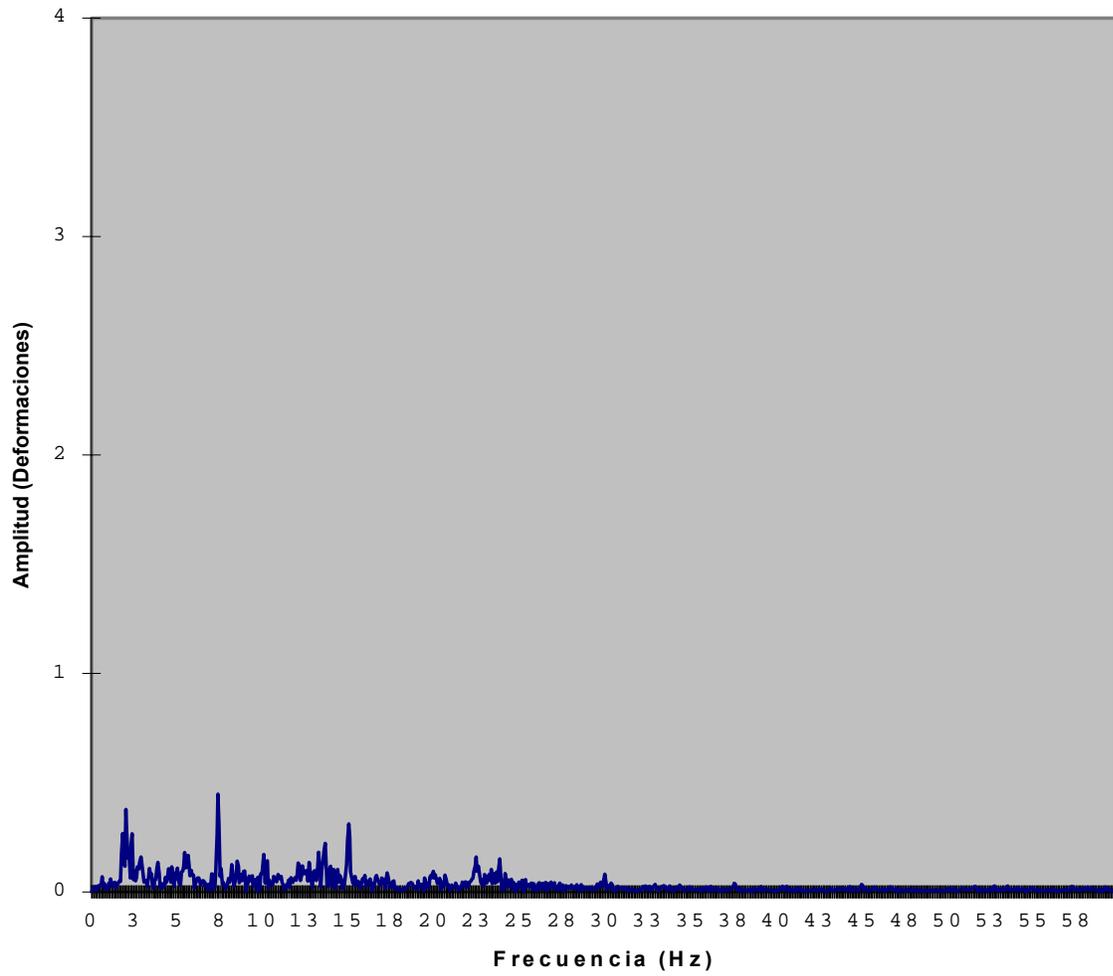


Figura No. 19c Tanque Corto Vacío, Camino Bueno

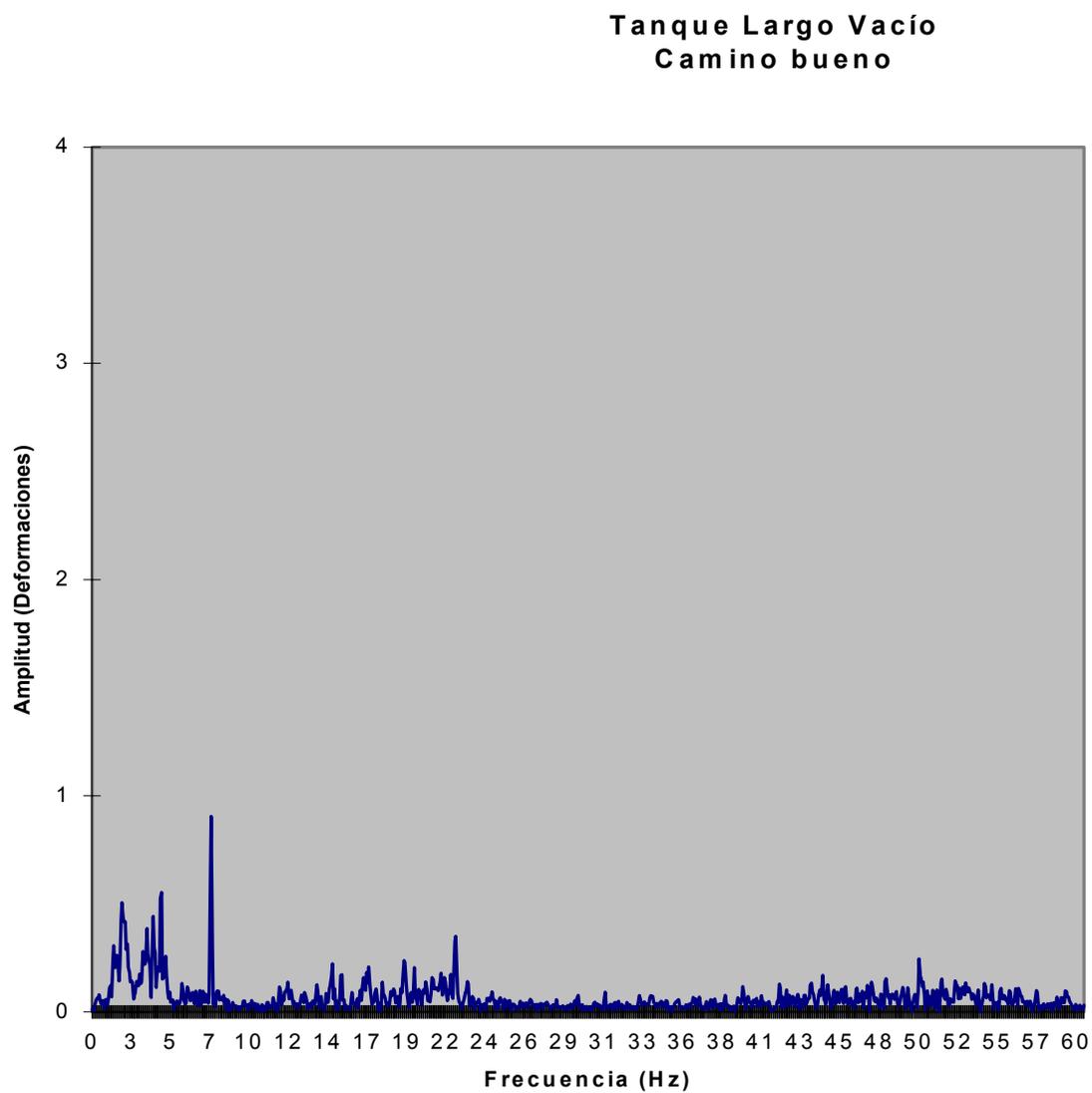


Figura No. 19d Tanque Largo Vacío, Camino Bueno

Tanque Corto Cargado
Camino Malo

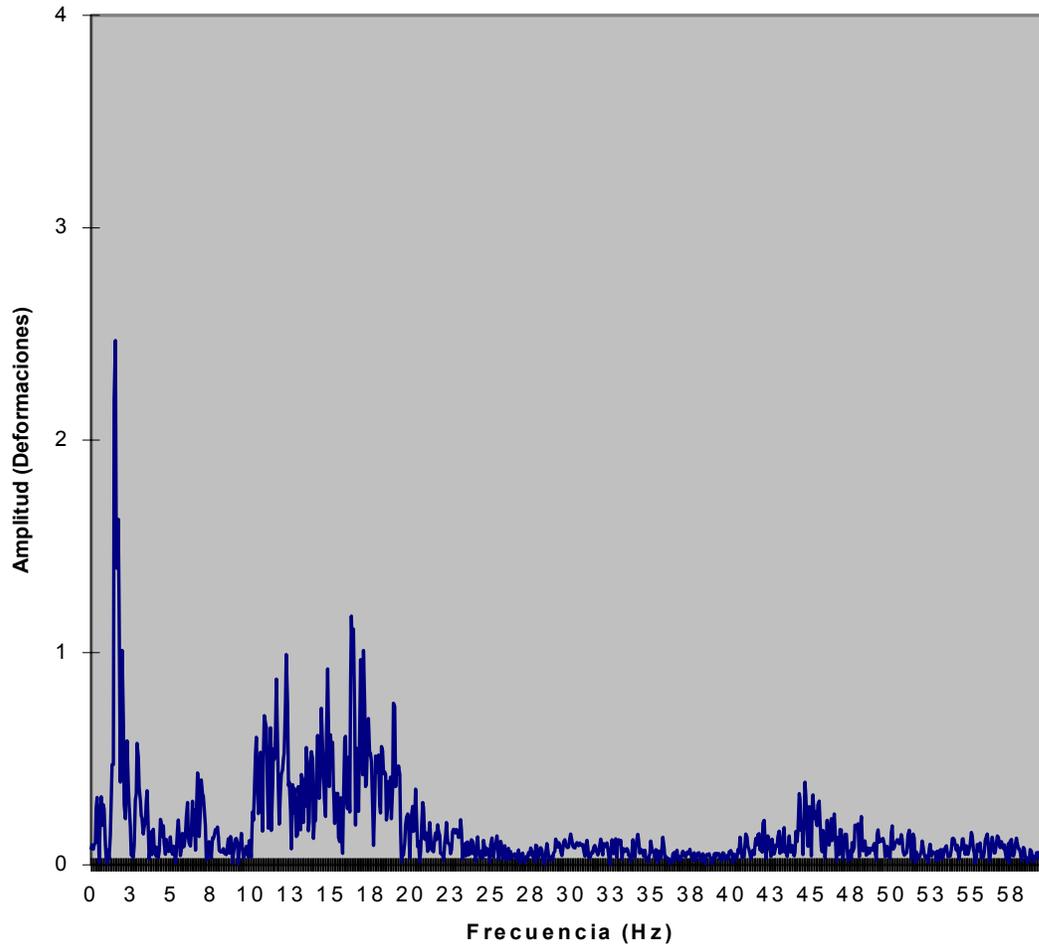


Figura No. 19e Tanque Corto Cargado, Camino Malo

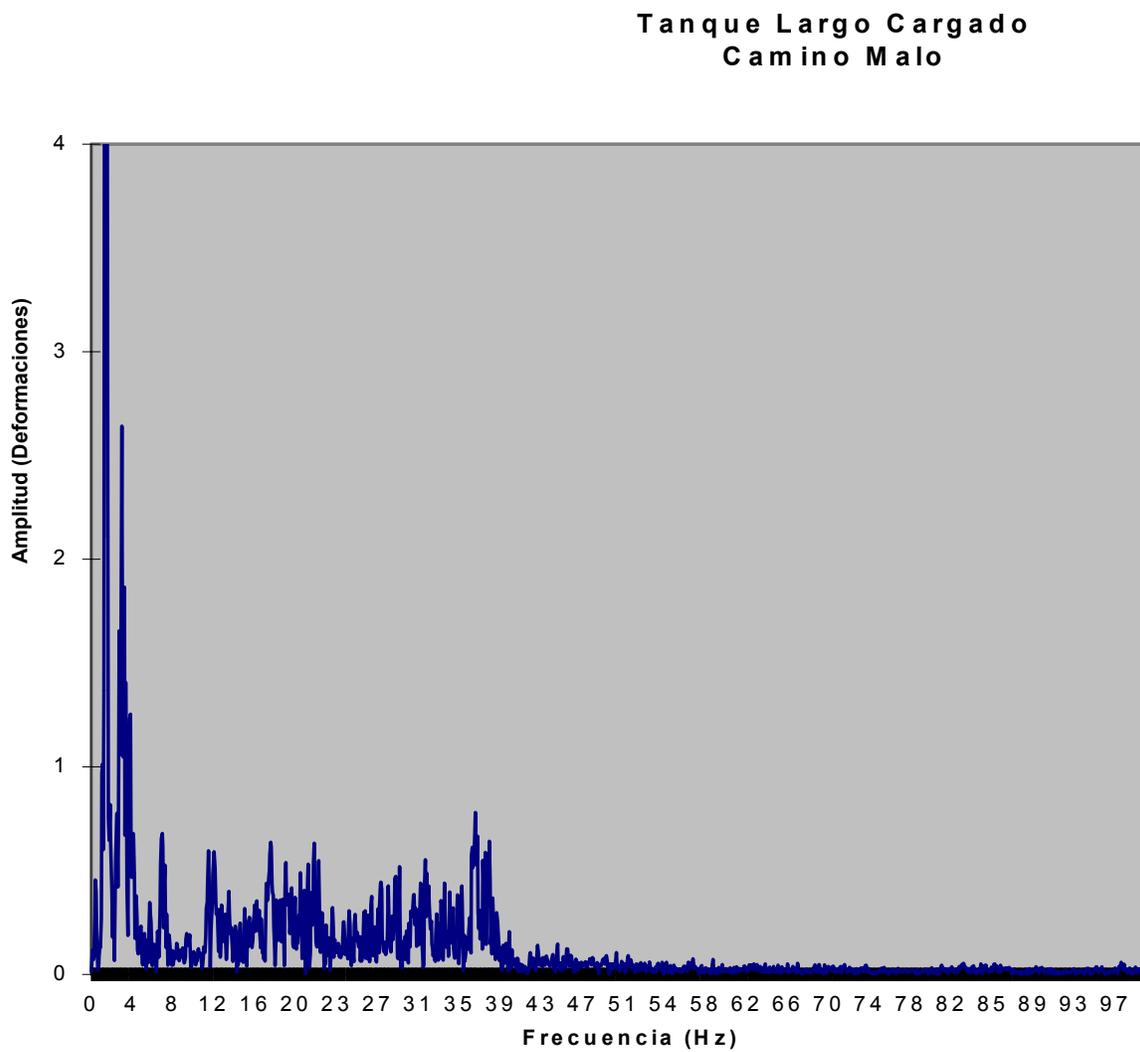


Figura No. 19f Tanque Largo Cargado, Camino Malo

Tanque Largo Vacío
Camino Malo

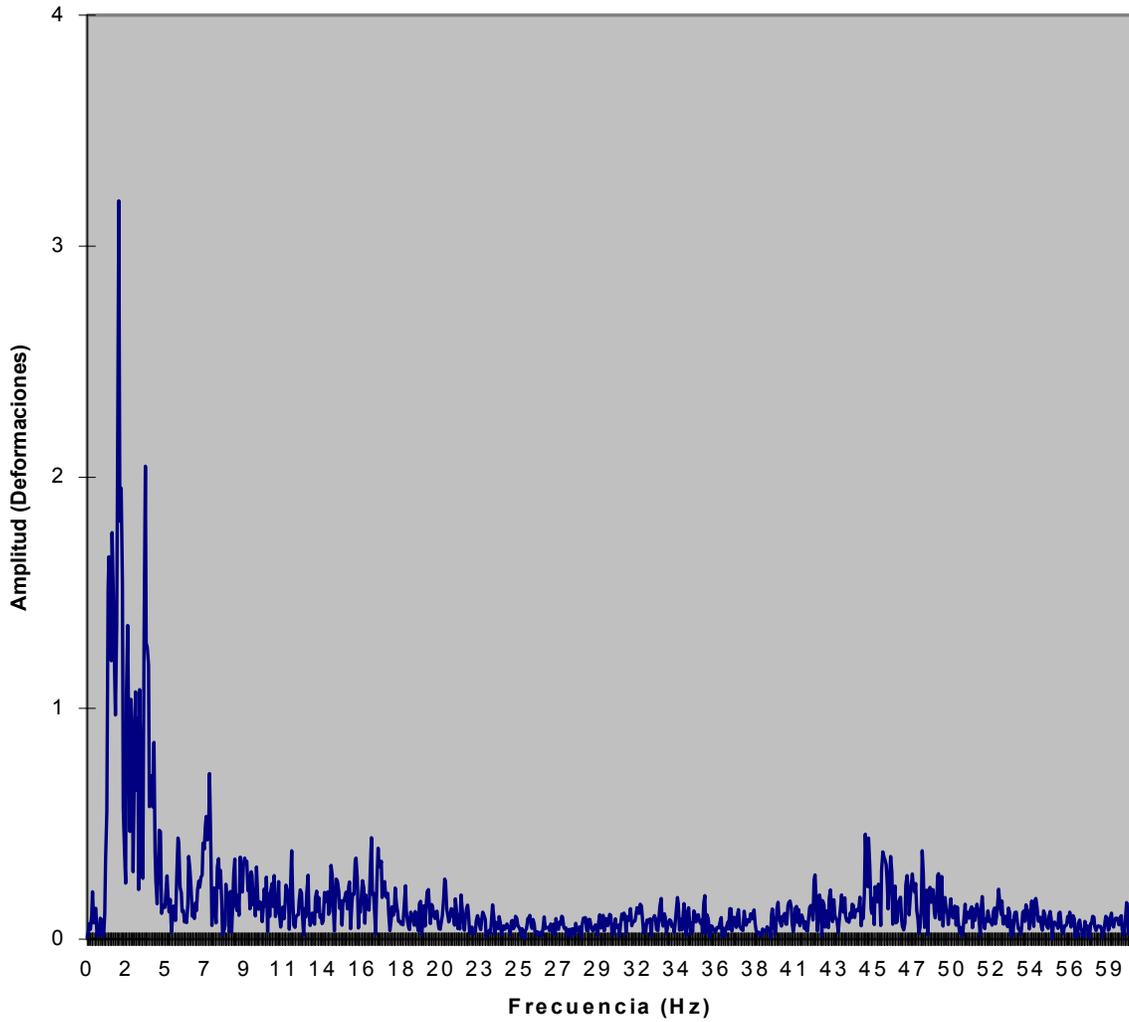


Figura No. 19g Tanque Largo Vacío, Camino Malo

**Tanque Corto Vacío
Camino Malo**

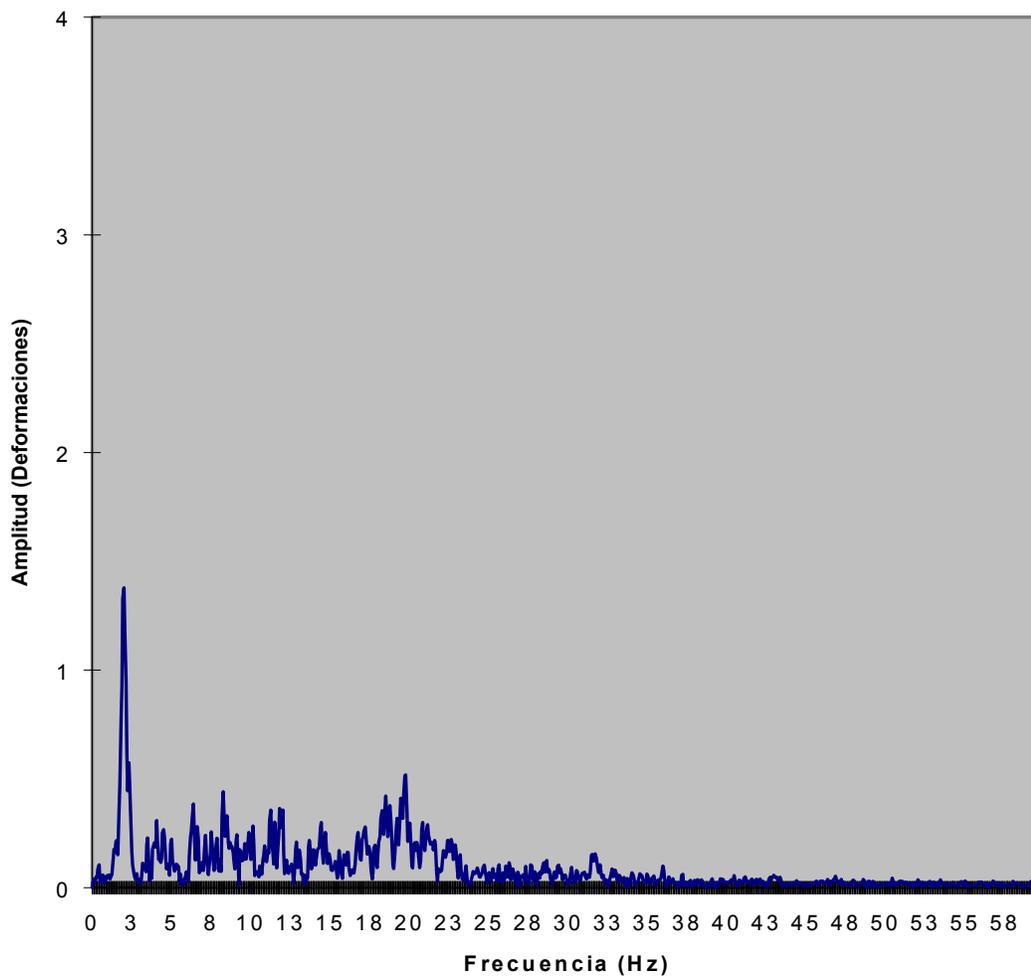


Figura No. 19h Tanque Corto Vacío, Camino Malo

12 Evaluación de la Resistencia a la fatiga

Los autotankes en estudio se fabrican de un acero A612, el cual es un acero de alta resistencia y baja aleación comúnmente utilizado en la fabricación de recipientes a presión. Para calcular la vida en fatiga de este tipo de materiales se utilizó la Ley de Coffin-Manson, la cual se basa en pruebas empíricas que toman valores estadísticos y que presuponen que las características microestructurales del material son constantes y uniformes. Sin embargo, en la realidad, la fatiga es un fenómeno que tiene su origen en la carencia de uniformidad del material y que, de manera local, contiene defectos, impurezas o discontinuidades que actúan como concentradores de esfuerzos muy localizados y que sobrepasan la capacidad de resistencia del material en esas zonas. Por lo general, al inicio de la vida de un componente, estas imperfecciones son muy pequeñas y no tienen ningún efecto sobre el desempeño de la pieza, pero con el tiempo, a partir de éstas se generan grietas que pueden crecer y degradar al material e inclusive, llegar a fracturarse totalmente. La ley de Coffin-Manson permite estimar el número de ciclos que tarda el material en fallar debido a fatiga, partiendo de la deformación total (deformación plástica + deformación elástica) [7]. Una limitante de esta ley es que estudia al material como un continuo y no considera imperfecciones, puesto que no incluye la deformación en la raíz de una imperfección o discontinuidad, sin embargo, su aplicación es una buena aproximación a la estimación de la vida en fatiga de este tipo de autotankes, ya que su manufactura debe cumplir estrictas medidas de calidad, lo que minimiza las imperfecciones y defectos microestructurales.

Coffin y Manson establecieron la fórmula general [11] para determinar las curvas vida-deformación. En ellas se utilizan los resultados experimentales de esfuerzos últimos (σ_{UTS}), y deformación (ϵ), obtenidos de pruebas de tensión realizadas experimentalmente (Ver Figura No. 21).

$$\Delta\epsilon = \frac{\sigma_u}{E} N^c + \frac{\epsilon_f}{2} N^{-b} \quad [11]$$

Donde:

$\Delta\epsilon$ = Deformación total

σ_u = Esfuerzo último

ϵ_f = Deformación plástica

E = Módulo de elasticidad

N = Número de ciclos para falla

-b = Constante

c = Pendiente de la curva $\log \Delta\epsilon_f$ vs $\log N$

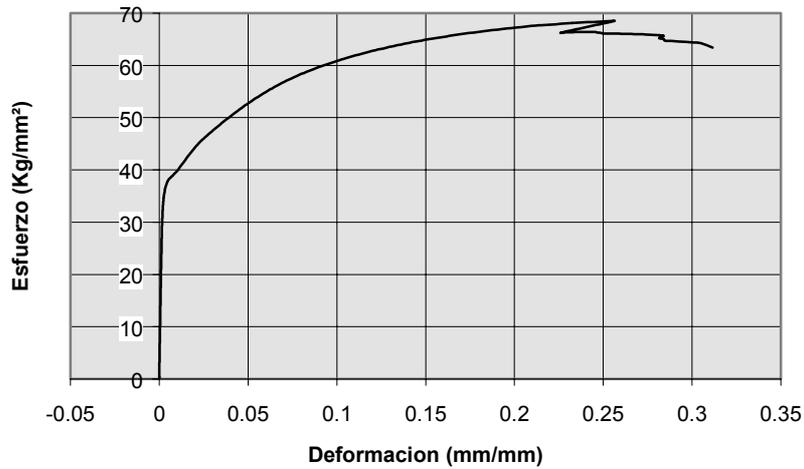


Figura No. 21 Curva Tensión vs. Deformación Real

Sustituyendo en la ecuación [11] los valores de las constantes $b = 0.5$ y $c = -0.008$, característicos de materiales metálicos [8] y los valores del esfuerzo último (σ_{UTS}) y deformación (ϵ) obtenidos de las pruebas experimentales de tensión de muestras tomadas de los autotanques, se obtuvo para el material base la función que se presenta en la Figura No. 22.

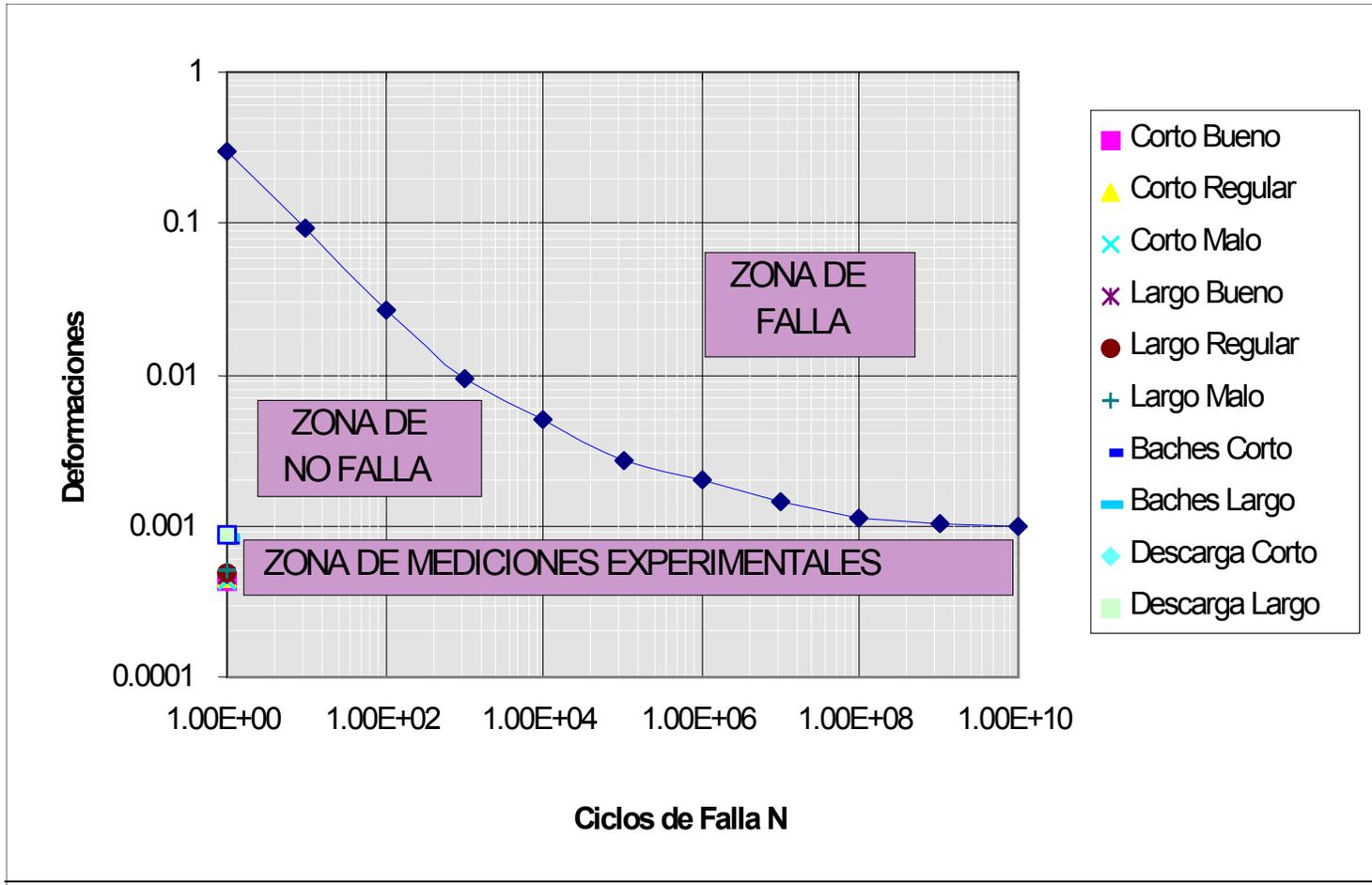


Figura No. 22 Curva Vida-Deformación para el material base

13 Discusión de resultados

De la medición experimental de deformaciones dinámicas se encontró que la rugosidad de la carretera influye sobre la amplitud de las deformaciones, esta influencia se debe a las condiciones físicas propias del tanque como son su masa y longitud.

Si comparamos el autotankero largo cargado contra el corto cargado, (Figuras No. 12a y 12b respectivamente) ambos en el camino bueno, se puede apreciar que existe una diferencia de 0.5 deformaciones, esta diferencia se agrava cuando se hace esta misma comparación para el camino malo (Figuras No. 12e y 12f), en donde la diferencia es 1.5 deformaciones, más del doble que para el camino bueno. Al comparar el tanque corto vacío contra el largo vacío, en el camino bueno, se encuentra que hay la misma diferencia entre ellos (0.4 deformaciones), sin embargo, para estos mismos autotankeros en el camino malo hay una diferencia de 1.8 deformaciones, la mayor diferencia de todas las mediciones.

Si se comparan los tanques cortos respecto a los largos puede observarse que, en general, la amplitud aumenta cuando se compara en el mismo tipo de camino. En contraste, si comparamos el tanque largo cargado contra el mismo tanque vacío en el camino bueno, se puede observar en las Figuras No. 12a y 12d, que la variación va de 0.4 deformaciones para el tanque vacío a 2.1 deformaciones para el tanque cargado, o sea, una diferencia de 1.7 deformaciones. Para este mismo tanque largo, pero en el camino malo el nivel de deformación sube a 3.2 deformaciones para el tanque vacío y a 4.0 para el tanque cargado, por lo tanto la diferencia es de 0.8 deformaciones. Si comparamos el autotankero corto cargado contra el mismo autotankero vacío, en el camino bueno y en el camino malo, vemos que hay una diferencia de 1.1 deformaciones en ambos casos, aunque al igual que para el autotankero largo, el nivel es más alto para el camino malo.

También puede observarse que las frecuencias dominantes en ambos tanques se mueven de una frecuencia de 4 Hz en el tanque corto cargado a una de 6 Hz en el tanque largo cargado, por efectos de la masa del tanque. En la Figura No. 12b se puede ver cómo el tipo de camino afecta las condiciones dinámicas del tanque excitándolo en frecuencias altas.

En resumen, la medición experimental de deformaciones corroboró que las mayores deformaciones se presentan cuando el autotankero se encuentra cargado y presurizado, así también, se encontró que la contribución de las deformaciones totales son 6% mayores en el autotankero largo respecto al autotankero corto.

Los resultados de las pruebas JIC denotan la energía necesaria para que inicie el crecimiento estable de las grietas y por ello se pueden emplear como una aproximación a la tenacidad a la fractura del material empleado en la construcción de los autotanques, de acuerdo con la tabla No. 2, en la dirección longitudinal tiene la más alta tenacidad a la fractura y la zona afectada por el calor es la parte de mayor susceptibilidad a la fractura.

En la Figura No. 13 se graficaron las deformaciones totales a las que se someten los autotanques largo y corto transitando cargados y vacíos por los tres tipos de caminos seleccionados y también se graficaron las situaciones especiales como son baches y descarga del gas. No obstante, los valores son muy similares y es difícil especificar su posición exacta en la gráfica (sección marcada como una franja entre los valores 0.0004 y 0.0008), fácilmente puede observarse que todos los valores obtenidos aún con las condiciones más severas, se encuentran por debajo del límite de fatiga del material y aunque las deformaciones originadas por baches y cargas/descargas se acercan al límite de fatiga, prácticamente tendrían que ocurrir 10,000,000 ciclos de esta naturaleza para que el material iniciara la falla, lo que implica que el material base del autotanque no fallará por fatiga mientras sea sometido a los esfuerzos normales de operación.

14 Conclusiones

En los autotanques estudiados las cargas dinámicas debidas a la rugosidad del camino son prácticamente despreciables; lo que realmente afecta a este tipo de vehículos son los ciclos de carga-descarga, ya que es cuando se presentan las mayores deformaciones en la dirección longitudinal (~450 microdeformaciones). Por otro lado, se ha observado que cuando las condiciones del camino son extremas, como por ejemplo un bache grande o topes, se alcanzan estos mismos niveles de deformación, sin embargo, como ya se mencionó, estos valores se encuentran por debajo del límite a la fatiga del material. El alargamiento de 2.4 m de longitud de los autotanques estudiados no tiene un efecto significativo en las deformaciones que sufren los autotanques. De acuerdo con la ley de Coffin-Manson no existe fatiga debido a la rugosidad del camino en este tipo de estructuras que emplean los materiales estudiados.

Referencias

1. Martínez, R., Segura, C. J. (1995). Manual estadístico del sector transporte 1993. Instituto Mexicano del transporte. pp. 82, 120.
2. NOM-012-SCT-2-1995. Norma Oficial Mexicana sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal.
3. Código ASME
4. Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials E-8-81. (1996) Annual Book of ASTM Standards. Part 3.01.
5. ANSI/AWS D1.1-90 Structural Welding Code. Steel. Section 5. Qualification.
6. Harvey, F. J. (1980). Pressure component construction. Nostrand Reinhold Co. EUA.
7. Shingley, E. J. & Mische R. (1990). Diseño en Ingeniería Mecánica. 5° Edición. McGraw Hill.
8. Ewalds H.L., Wanhill, R.J.H. (1984). Fracture mechanics. Edward Arnold. EUA
9. Madayag, A.F. (1969). Metal Fatigue: Theory and Design. John Wiley & Sons. EUA.
10. Dieter, J.E. (1996). Mechanical Metallurgy. McGraw Hill. Tokio, Japón.

**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx