

## **RESUMEN**

El objetivo principal de este trabajo es avanzar en la puesta en funcionamiento de una máquina de ensayos de creep y su modificación para realizar ensayos de creep-fatiga. Estas actividades incluyen la puesta en funcionamiento o el diseño de dispositivos de medición, control y adquisición necesarios para realizar estos ensayos según la norma ASTM E 1457-00 (Método de Prueba para la Medición de la Velocidad de Crecimiento de Fisuras por Creep en Metales).

El paso inicial fue el aprendizaje por parte de los autores, de todo lo referido a la normativa antes mencionada, dado que es un tema que no es visto con profundidad en las materias del programa de estudios. Este estudio permitió además reconocer y definir todos los requisitos que la máquina debe cumplir. También se estudió el fenómeno de propagación de fisuras por creep y creep-fatiga y los temas asociados a las técnicas y metodologías involucradas en el ensayo. Ejemplos de estos temas son: extensometría eléctrica, diseño de celdas de carga, sistemas de medición de desplazamientos (LVDTs), programación de módulos lógicos, conocimiento general de circuitos eléctricos, entre otros.

Se partió de una máquina de ensayos por creep existente pero fuera de servicio, con algunos dispositivos faltantes y otros obsoletos. Se realizaron modificaciones, se le agregaron nuevos elementos y también se dejaron planteados para un futuro diferentes trabajos a realizar.

Entre las tareas desarrolladas se encuentran el diseño y construcción de un sistema automático de aplicación y medición de carga, el diseño de un dispositivo para la medición de la apertura de la boca de la fisura (COD – Crack Opening Displacement), y el análisis del sistema de adquisición de datos y control.



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Dedicado a nuestras familias

## **Agradecimientos**

Agradecemos al director de este proyecto, Dr. Ing. Mirco D. Chapetti, por su confianza al asignarnos la realización de este trabajo, guiándonos continuamente de manera de obtener el mejor de los resultados, estando siempre dispuesto a atender cualquier tipo de consulta como así también dedicarle tiempo a las correcciones fuera de la universidad, ayudándonos a finalizar el informe en el tiempo estipulado.

No podemos dejar de agradecer al Ing. Raúl Rivera, quien participó en el proyecto inicial, en el año 1995, y en esta nueva etapa, nos brindó su ayuda incondicional para entender parte del funcionamiento de la máquina, como así también nos estimuló a seguir adelante en todo momento.

Agradecemos al cuerpo docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata, por brindarnos los conocimientos que nos ayudarán a llevar adelante nuestra vida profesional.

No podemos dejar de agradecer a nuestras familias y amigos, que fueron el apoyo incondicional para llegar a este momento, guiándonos por el camino de la vida de la mejor manera y ayudándonos a sobrellevar los momentos difíciles.

## Índice de temas

<b>CAPITULO 1</b>	<b>11</b>
<i>Introducción</i> .....	11
1.1. Objetivos. Motivación y alcance .....	11
1.2. El mecanismo de daño mecánico por fluencia lenta a alta temperatura en metales (creep).....	11
1.3. Los ensayos de propagación de fisuras por creep-fatiga.....	12
1.4. Breve descripción de las tareas generales desarrolladas .....	12
1.5. Breve descripción de la estructura de este informe .....	13
 <b>CAPITULO 2</b>	 <b>15</b>
<i>Fluencia lenta a alta temperatura (Creep)</i> .....	15
2.1. El problema de los materiales para temperaturas elevadas .....	15
2.2. La curva de fluencia lenta .....	16
2.3. Deformación a temperatura elevada .....	19
2.4. Fractura a temperaturas elevadas.....	20
2.5. Teorías sobre la fluencia lenta.....	22
Bajas Temperaturas .....	22
Altas temperaturas .....	22
2.6. Aleaciones resistentes al creep .....	23
 <b>CAPITULO 3</b>	 <b>26</b>
<i>Propagación de fisuras por creep y creep-fatiga</i> .....	26
3.1. Introducción .....	26
3.2. Creep y creep-fatiga.....	26
3.3. Mecanismos de propagación de fisuras por creep .....	27
 <b>CAPITULO 4</b>	 <b>33</b>
<i>Ensayos de propagación de fisura por creep y creep-fatiga</i> .....	33
<i>Requerimientos</i> .....	33
4.1. Introducción .....	33
4.2. Equipamiento necesario .....	33
Máquina de ensayo. Control de la sollicitación.....	33
Configuración de la probeta .....	35
Control de la temperatura de ensayo.....	35
Accesorios.....	36
La prefisuración de la probeta a partir de la entalla .....	36
4.3. Mediciones requeridas .....	37
Medición de longitud de fisura (El Método de la Caída de Potencial Eléctrico -PD- “Potencial Drop”).....	37
Medición de la apertura de la boca de la fisura (COD).....	39
Medición de la Carga aplicada .....	39
Adquisición de datos.....	39
4.4. Procedimientos típicos de ensayo .....	39
Configuración de ensayo.....	39
Mediciones y cálculos post ensayo .....	40
 <b>CAPITULO 5</b>	 <b>43</b>
<i>Actualización y Potenciación de la máquina de ensayos</i> .....	43
<i>Descripción de la máquina y los dispositivos necesarios</i> .....	43
5.1. Introducción .....	43
5.2. Funcionamiento de la máquina de creep utilizada.....	43
5.3. Breve descripción de las tareas generales desarrolladas .....	45

<b>CAPITULO 6</b>	<b>49</b>
<i>Actualización y Potenciación de la Máquina de Ensayos</i> .....	49
<i>Tareas Desarrolladas</i> .....	49
6.1. Sistema de control de carga.....	49
6.1.1. Descripción general de sistema mecánico.....	50
6.1.2. Modulo lógico.....	51
6.1.3. Diagrama de flujo de funcionamiento del programa.....	54
6.1.4. Celda de carga.....	54
Diseño de la celda de carga.....	55
Cálculos para diseño de celda de carga.....	55
6.2. Sistema de medición de la longitud de fisura.....	58
Multímetro digital.....	59
Fuente de corriente.....	59
6.3. Sistema de medición de la apertura de la boca de la fisura.....	61
Diseño del dispositivo.....	62
Cálculo de las deformaciones en el dispositivo de medición.....	64
Varilla interna.....	64
Tubo externo.....	65
Cálculo de la deformación del clip superior.....	65
LVDT.....	66
6.4. Sistema de Adquisición, control y cálculo de datos.....	68
Descripción general del sistema.....	68
6.5. Sistema eléctrico.....	71
<b>CAPÍTULO 7</b>	<b>74</b>
<i>Comentarios finales</i> .....	74
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>75</b>
<i>Referencias</i> .....	75
<b>Anexos</b>	<b>76</b>
<i>ANEXO A- Método de prueba para la medición de la velocidad de crecimiento de fisuras por creep en metales. ASTM E 1457-00</i> .....	77
1. Alcance.....	78
2. Documentos de referencia.....	79
3. Terminología.....	80
4. Resumen del método de prueba.....	82
5. Significado y uso.....	82
6. Equipo.....	84
7 Configuración de la probeta, dimensiones y preparación.....	87
8 Calibración y Standardización.....	89
9 Procedimiento.....	90
10 Cálculos.....	91
11 Reporte.....	95
12 Precisión y tendencias.....	96
13. Anexo.....	98
Referencias de esta norma.....	101
<i>ANEXO B- Guía para la determinación del tamaño de la fisura mediante diferencia de potencial eléctrico</i> .....	103
B.1. Aplicaciones.....	104
B.2. Principio fundamental.....	104
B.3. Métodos básicos.....	104
B.3.1. Método de corriente continua:.....	105
B.3.2. Método de la corriente alterna:.....	106

B.3.2.1 Método de corriente alterna de baja frecuencia .....	106
B.3.2.2 Método de corriente alterna de alta frecuencia: .....	106
B.4. Equipos de generación de corriente .....	107
B.5. Equipo de medición de tensión: .....	107
B.5.1. Equipos de medición de tensión de corriente continua.....	107
B.5.2. Equipamiento de medición de tensión de corriente alterna:.....	107
B.6. Relaciones entre la longitud de la fisura y la diferencia de potencial .....	108
B.7. Geometrías de la probeta: .....	109
B.7.1. Relación entre C (T) voltaje de geometría vs. el tamaño de la fisura: .....	109
B.7.2. Relación entre la geometría de la tensión vs. el tamaño de la fisura: .....	110
B.8. Consideraciones gripping .....	111
B.9. Selección de cables y accesorios.....	112
B.9.1. Cables de entrada de corriente: .....	112
B.9.2. Cables de medición de tensión:.....	112
B.10. Resolución de sistemas de potencial eléctrico: .....	112
B.11. Técnicas para reducir: .....	113
B.11.1 Campo electromagnético inducido:.....	113
B.11.2 Conocimientos eléctricos:.....	113
B.11.3. Efectos térmicos:.....	113
B.11.4. Selección de la magnitud de corriente de entrada: .....	113
B.11.5. Periodo de estabilización de corriente continua: .....	114
B.12. Precauciones .....	114
Referencias de esta norma .....	117
ANEXO C_ <u>Módulo Lógico</u> .....	119
C.1. Resolución de la entrada analógica .....	121
ANEXO D_ <u>Celda de carga</u> .....	122
D.1. Bases teóricas relacionadas con celda de carga .....	123
D.1.1. Descripción sobre el análisis experimental de tensiones .....	123
D.1.2 Extensometría Eléctrica .....	123
D.1.3. Los extensómetros eléctricos.....	125
D.1.4 El puente Wheatstone .....	126
ANEXO E_ <u>Especificaciones del Aluminio Camplo</u> .....	127
ANEXO F_ <u>Explicación teórica del funcionamiento de un LVDT</u> .....	129
F.1. Teoría de operación .....	130
F.2. Efecto no lineal de un LVDT .....	132
F.3. Demodulador de portadora.....	132
F.4. Características de diseño.....	132
F.5. Soporte electrónico .....	135
F.6. Características y ventajas de un LVDT .....	135
ANEXO G_ <u>Catálogo LVDT</u> .....	137
ANEXO H_ <u>Dispositivo de medición de apertura de boca de fisura</u> .....	139
H.1 Planos de fabricación .....	140
H.2 Fotos simuladas en 3D .....	141
ANEXO I_ <u>Placa adquisidora y placa HPIB</u> .....	145
I.1. Introducción a las plaquetas de adquisición basadas en pc.....	146
I.1.1. Entradas Analógicas .....	146
I.1.2. Conversores A/D.....	147
I.1.3. Disparo de la adquisición.....	147

I.1.4. Entradas diferencial y desbalanceada .....	147
I.1.5. Modo de transferencia de datos.....	148
I.2. Interconexión de instrumentos programables-Norma IEEE-488- .....	149
I.2.1. Introducción.....	149
I.2.2. Descripción general .....	149
I.2.3. Handshake (protocolo de comunicación).....	151
I.2.4. Líneas de control .....	151
I.2.5. Mensajes y comandos.....	152
I.2.6. Características eléctricas.....	152
I.2.7. Limitaciones .....	153
I.2.8. Software de control .....	153
<i>ANEXO J- Horno y controlador de horno.....</i>	<i>154</i>

## Índice de figuras

<b>CAPITULO 2</b>	<b>15</b>
<i>Fluencia lenta a alta temperatura (Creep)</i> .....	15
Figura 2.1. Curva típica de fluencia lenta .....	16
Figura 2.2. Procesos que intervienen para determinar la curva de creep .....	17
Figura 2.3. Efecto de la tensión en las curvas de creep .....	19
Figura 2.4 Formación de un pliegue en un punto triple.....	20
Figura 2.5. Temperatura equicohesiva.....	21
Figura 2.6. Esquemas de formación de grietas intergranulares como consecuencia del resbalamiento de los límites de grano .....	21
Figura 2.7. Curvas de tensión de rotura en 1000 h en función de la temperatura .....	24
 <b>CAPITULO 3</b>	 <b>26</b>
<i>Propagación de fisuras por creep y creep-fatiga</i> .....	26
Figura 3.1. Metodología para predecir la propagación de fisuras usando mecanismos de fractura dependientes del tiempo.....	27
Figura 3.2. Formación de zonas de deformación delante de la punta de la fisura bajo carga en régimen de creep.....	28
Figura 3.3. Evolución de la zona de creep. ....	29
a) Condiciones de creep primarias a pequeña escala. ....	29
b) Comienzo de la evolución de la zona de creep secundaria. ....	29
c) Zona de creep secundaria comparable en tamaño con la zona de creep primaria. ....	29
d) Zona de creep secundario desarrollado en todo el ligamento remanente. ....	29
Figura 3.4. Esquema de la integral de contorno usado para definir la integral $C^*$ . $n$ es el vector normal unitario.....	30
 <b>CAPITULO 4</b>	 <b>33</b>
<i>Ensayos de propagación de fisura por creep y creep-fatiga</i> .....	33
<i>Requerimientos</i> .....	33
Figura 4.1. Formas de onda usadas durante el ensayo de creep-fatiga. ....	34
Figura 4.2. Comparación de ensayos bajo formas de onda de carga trapezoidal .....	34
a) Carga controlada.....	34
b) Desplazamiento controlado.....	34
Figura 4.3. Dimensiones típicas de la probeta compacta.....	35
Figura 4.4. Localización de los conectores de entrada de corriente y salida de tensión .....	38
a) Probeta compacta .....	38
b) Probeta de tensión prefisuradas en el centro.....	38
Figura 4.5 Configuración típica de una probeta compacta (CT specimen) para ensayos de propagación de fisuras por creep-fatiga.....	40
Figura 4.6. Velocidad de propagación de fisuras por fatiga en función del parámetro fractomecánico $C^*$ para un acero inoxidable 304 a 594 °C.....	41
 <b>CAPITULO 5</b>	 <b>43</b>
<i>Actualización y Potenciación de la máquina de ensayos</i> .....	43
<i>Descripción de la máquina y los dispositivos necesarios</i> .....	43
Figura 5.1. Fotografía y ubicación de las partes principales de la máquina.....	44
Figura 5.2. Diagrama general de la máquina .....	46
 <b>CAPITULO 6</b>	 <b>49</b>
<i>Actualización y Potenciación de la Máquina de Ensayos</i> .....	49
<i>Tareas Desarrolladas</i> .....	49
Figura 6.1. Representación esquemática de la máquina-Sistema de control de carga.....	49

Figura 6.2. Sistema de relajación y aplicación de carga .....	50
Figura 6.3. Módulo lógico utilizado para automatizar el sistema de carga.....	52
Figura 6.4. Esquema con el ciclo de carga.....	53
Figura 6.5. Diagrama de flujo del el ciclo de carga.....	54
Figura 6.6. Fotografías de celda de carga y encastres roscados .....	56
Figura 6.7. Fotografía de celda de carga con extensómetros .....	57
Vista de extensómetros longitudinales .....	57
Vista de extensómetros transversales .....	57
Figura 6.8. Fotografía de celda de carga terminada.....	57
Figura 6.9. Representación esquemática de la máquina-Sistema de medición de longitud de fisura.....	58
Figura 6.10. Multímetro utilizado en el sistema de adquisición de datos .....	59
Figura 6.11. Fuente de corriente utilizada en el sistema de adquisición de datos .....	60
Figura 6.12 Representación esquemática de la máquina-Sistema de medición de apertura de la boca de la fisura.....	61
Figura 6.13. Detalles de la parte superior e inferior del dispositivo de medición de la deflexión de de línea de carga. ....	62
Figura 6.14. Ubicación del dispositivo de medición de la deflexión de de línea de carga. ....	62
Figura 6.15. dimensiones del LVDT utilizado.....	64
Figura 6.16. Representación esquemática de la máquina-Sistema de adquisición, control y cálculo de datos.....	68
Figura 6.17. Diagrama en bloques del sistema de adquisición de datos.....	70
Figura 6.18. Esquema eléctrico de la máquina al inicio del proyecto .....	71
Figura 6.19. Esquema eléctrico de la máquina al final .....	72
<b>Anexos</b>	<b>76</b>
<i>A- Método de prueba para la medición de la velocidad de crecimiento de fisuras por creep en metales. ASTM E 1457-00.....</i>	<i>78</i>
<i>B Guía para la determinación del tamaño de la fisura mediante diferencia de potencial eléctrico.....</i>	<i>104</i>
<i>C-Módulo lógico.....</i>	<i>120</i>
Figura C.1. Referencias del Módulo Lógico.....	120
<i>D-Celda de carga.....</i>	<i>123</i>
Figura D.1. Conductor adherido a un sólido deformable.....	124
Figura D.2. Esquema de extensómetro. ....	125
Figura D.3. Esquema del puente de Wheatstone.....	126
<i>E-Especificaciones del aluminio Camplo .....</i>	<i>128</i>
<i>F-Explicación teórica del funcionamiento de un LVDT.....</i>	<i>130</i>
Figura F.1. Esquema básico de LVDT .....	130
Figuras F.2 y F.3. Corte esquema de LVDT .....	131
Figura F.4. Relación entre la entrada y la salida al LVDT .....	131
Figura F.5. Efecto no lineal del LVDT .....	132
Figura F.6. Características de diseño.....	133
Figura F.7. Características según posición axial .....	133
Figura F.8. Variación de la tensión de salida según posición de núcleo.....	134
<i>G-Catálogo LVDT .....</i>	<i>138</i>

<i>H-Dispositivo de medición de apertura de boca de fisura.....</i>	<i>140</i>
Figura H.2.1.1 Muestra de la parte superior del dispositivo- Lateral derecho .....	141
Figura H.2.1.2 Muestra de la parte superior del dispositivo- Lateral Izquierdo.....	141
Figura H.2.2.1 Muestra de la parte inferior del dispositivo. ....	142
Figura H.2.2.2 Muestra de la parte inferior del dispositivo .....	142
Figura H.2.2.3 Muestra de la parte inferior del dispositivo sin porta LVDT .....	143
Figura H.2.3.1 Vista lateral del dispositivo armado .....	143
Figura H.2.3.2 Vista desde el lado inferior del dispositivo armado .....	144
<i>I-Placa adquisidora y placa GPIB .....</i>	<i>146</i>
Fig. I.1: conector GPIB (a) norma europea (IEC) y (b) norma americana (IEEE).....	149
Fig. I.2: Diagrama de interconexión a través del GPIB.....	150
<i>J Horno y controlador de horno.....</i>	<i>155</i>
Figura J.1. Horno eléctrico.....	155
Figura J.2. Controlador de horno.....	155

# CAPITULO 1

## Introducción

## CAPITULO 1

### **Introducción**

#### **1.1. Objetivos. Motivación y alcance**

El presente trabajo tiene su motivación en la necesidad de recuperar una máquina de ensayos de propagación de fisuras por creep (mecanismo de daño mecánico por fluencia lenta a elevada temperatura). Esta máquina, diseñada hace 15 años por personal de la división Soldadura y Fractomecánica del INTEMA, es única en el país por sus características y su bajo costo de construcción, ya que permite realizar ensayos que requieren el monitoreo de variables con elevada precisión y que en general se realizan con máquinas servo hidráulicas cuyo costo es 10 veces mayores.

Por otro lado, además de avanzar en la recuperación, potenciación y actualización de los sistemas asociados existentes, se busca avanzar en su modificación para incorporarle un sistema de control de carga que permita realizar ensayos más complejos de creep-fatiga.

Para poder realizar estas tareas, es necesario en primer lugar, entender el mecanismo a estudiar mediante estos ensayos, conocer los parámetros que gobiernan los mismos, y las variables que deben ser medidas y con qué precisión. Una vez dominados estos conceptos se debe tratar con diferentes sistemas que involucran problemas técnicos que abarcan áreas de electrónica, mecánica, electricidad, informática, resistencia de materiales, análisis experimental de tensiones, deformaciones y desplazamientos, etc. La cantidad y complejidad de tareas necesarias para lograr concluir con estos objetivos hacen que las desarrolladas y documentadas en el presente informe correspondan a una porción importante del total necesario, quedando para una segunda parte tareas de construcción de algunos dispositivos ya diseñados y la puesta a punto final del sistema que requerirá de personal experto en mecánica de materiales.

#### **1.2. El mecanismo de daño mecánico por fluencia lenta a alta temperatura en metales (creep)**

A temperaturas elevadas la resistencia mecánica depende mucho de la velocidad de carga y del tiempo de exposición. Un metal sujeto a una carga de tracción constante a alta temperatura fluye lentamente (creep) y sufre un aumento de longitud en función del tiempo.

La resistencia mecánica de los materiales disminuye al aumentar la temperatura debido al aumento de la movilidad atómica. La elevación de la temperatura favorece el desplazamiento de las dislocaciones y aumenta la concentración de equilibrio de las vacantes y pueden entrar en juego nuevos mecanismos de deformación. Estas consideraciones ponen de manifiesto la importancia del empleo satisfactorio de los metales a temperaturas elevadas.

Una característica importante de la resistencia mecánica a temperaturas elevadas es que siempre se debe relacionar con una escala de tiempo. Recordemos que las propiedades de tracción a la temperatura ambiente de la mayoría de los metales empleados en ingeniería, es independiente del tiempo para todos los fines prácticos.

A pesar de los métodos sofisticados de detección de falla disponibles en la actualidad, en todos los componentes industriales existen comúnmente defectos e impurezas que pueden potencialmente quedar por debajo del umbral de detección de dichos métodos. En estos casos, bajo la acción de tensiones y alta temperatura, muchos componentes pueden fallar por la acumulación de daño por creep a partir de estos defectos, generándose fisuras que propagan en el

tiempo hasta producir la fractura de aquellos. Estas fallas resultan en pérdidas financieras importantes así como posibles pérdidas de recursos humanos. Este fenómeno de propagación de fisuras por creep puede estudiarse en laboratorios con procedimientos estandarizados utilizando equipos especiales.

### **1.3. Los ensayos de propagación de fisuras por creep-fatiga**

Las condiciones de servicio experimentadas por algunos componentes pueden también involucrar cargas y descargas cíclicas a elevadas temperaturas. Por lo tanto, en estas situaciones, el crecimiento de fisura ocurre no solo bajo cargas estáticas (condiciones de creep), sino también por la acción de ciclos de carga (fatiga mecánica), generándose interacciones de creep-fatiga en la iniciación y la propagación de fisuras.

El crecimiento de fisura por creep y creep-fatiga ocurre comúnmente en la mayoría de los materiales ingenieriles que operan a altas temperaturas. Estos son los materiales considerados en este trabajo, conocidos como materiales de comportamiento dúctil al creep. Ejemplos de materiales dúctiles incluyen aceros al Cr-Mo, aceros inoxidable y aceros al Cr-Mo-V. Estos materiales tienen la habilidad de sostener cantidades significantes de crecimiento de fisura antes de la falla.

Los ensayos de propagación de fisura por creep son llevados a cabo de acuerdo con normas internacionales, como la ASTM E1457<sup>1</sup> “Método de ensayo para la medición de la velocidad de crecimiento de fisuras por creep en metales” [6]. El procedimiento de ensayo involucra calentar probetas fractomecánicas pre-entalladas a la temperatura preestablecida y aplicar una carga constante. El ensayo se extiende hasta que la longitud de la fisura alcanza una parte importante de la probeta o hasta que ocurre su falla. Durante el ensayo es necesario monitorear en el tiempo diferentes variables, como la carga total aplicada, la longitud de la fisura y la deflexión de la línea de carga. Los datos de ensayo se reducen a comparar la velocidad de crecimiento de fisura,  $da/dt$ , en términos de un parámetro de crecimiento de fisura a elevada temperatura, como el parámetro  $C^*$ , que debe ser calculado utilizando las variables mencionadas.

### **1.4. Breve descripción de las tareas generales desarrolladas**

A la máquina de creep sobre la que se trabajó, diseñada para realizar ensayos de propagación de fisuras por creep, se le debió realizar modificaciones para transformarla de manera tal de poder realizar ensayos de creep-fatiga, para lo cual es necesario poder aplicar ciclos de carga y controlar los parámetros de dicho ciclo, como tiempo de permanencia de las cargas máximas y mínima por ciclo y rampas de carga y descarga.

Por otro lado, la máquina, construida hace 15 años y fuera de servicio, poseía partes de sus sistemas descompuestos, otros obsoletos, y otros ausentes o inadecuados. Luego de su construcción, la máquina solo se logró utilizar en un ensayo, donde se detectaron fallas en algunos dispositivos que debían rediseñarse, como el sistema de medición de la apertura de la boca de la fisura.

Entre las tareas desarrolladas se encuentran el diseño y construcción de un sistema automático de aplicación y medición de carga, el diseño de un dispositivo para la medición de la apertura de la boca de la fisura (COD – crack opening displacement), y el análisis del sistema de adquisición y control. También se estudió el fenómeno de propagación de fisuras por creep y los temas asociados a las técnicas y metodologías involucradas, y a los problemas y conocimientos

---

<sup>1</sup> Ver norma **traducida al español** completa en anexo A

técnicos asociados con los distintos dispositivos y equipos utilizados. Ejemplos de estos temas son: extensometría eléctrica, diseño de celdas de carga, sistemas de medición de desplazamientos (LVDTs), programación de módulos lógicos, conocimiento general de circuitos eléctricos, entre otros.

### **1.5. Breve descripción de la estructura de este informe**

En el segundo capítulo se realiza una breve introducción al fenómeno de daño mecánico por creep, donde se describen los fundamentos necesarios para entender la problemática relacionada con los ensayos a realizar con la máquina. En el tercer capítulo se avanza en el análisis de la propagación de fisuras por el mecanismo de creep y creep fatiga, para luego pasar al capítulo 4 donde se describe el ensayo de propagación y se analizan los parámetros que deben considerarse y las variables que deben ser medidas durante el ensayo. Luego, en el capítulo 5 se realiza un resumen de las tareas desarrolladas y se detallan las tareas restantes para la finalización de la puesta en funcionamiento de la máquina de ensayos. Finalmente, en el capítulo 6, el más extenso, se describen las tareas desarrolladas sobre los diferentes dispositivos de la máquina de ensayos.

# CAPITULO 2

## Fluencia lenta a alta temperatura (Creep)

## CAPITULO 2

### **Fluencia lenta a alta temperatura (Creep)**

#### **2.1. El problema de los materiales para temperaturas elevadas**

La resistencia mecánica de los materiales disminuye al aumentar la temperatura debido al aumento de la movilidad atómica. La elevación de la temperatura favorece el desplazamiento de las dislocaciones y aumenta la concentración de equilibrio de las vacancias y pueden entrar en juego nuevos mecanismos de deformación. En algunos metales cambia el sistema de deslizamiento o se introducen sistemas adicionales al elevarse la temperatura. La deformación en los límites de grano es otra posibilidad adicional para la deformación de los metales. Otro factor importante que hay que tener en cuenta es el efecto de la exposición prolongada a temperaturas altas sobre la estabilidad metalúrgica de los metales y las aleaciones. Así, por ejemplo, los metales endurecidos por deformación en frío recrystalizan y sufren aumentos del tamaño de grano, mientras que las aleaciones pueden sobrepasar el grado de precipitación que causa el endurecimiento por envejecimiento y perder resistencia por engrosamiento de las partículas de segunda fase. Otro aspecto importante es la reacción del metal con el medio ambiente a temperatura elevada; es necesario evitar oxidación y penetraciones intergranulares de óxido que pueden resultar catastróficas.

Estas consideraciones ponen de manifiesto la importancia del empleo satisfactorio de los metales a temperaturas elevadas. Durante mucho tiempo las plantas de energía, refinerías de petróleo y la industria química han sido las que requerían de manera más urgente materiales adecuados para el servicio a temperaturas elevadas. Las temperaturas de trabajo en equipos tales como calderas, turbinas de vapor etc., raramente exceden los 550°C (1000°F). La aparición de motores de turbina de gas demandó materiales para piezas que trabajen en temperaturas cercanas a 800°C (1500°F). El diseño de motores más potentes ha elevado este límite a los 1000°C (1800°F). No hay duda de que los materiales disponibles para la construcción limitan el rápido avance de la tecnología de las temperaturas elevadas.

Una característica importante de la resistencia mecánica a temperaturas elevadas es que siempre se debe relacionar con una escala de tiempo. Las propiedades de tracción a la temperatura ambiente de la mayoría de los metales empleados en ingeniería, es independiente del tiempo para todos los fines prácticos. En un ensayo de tracción, los resultados son prácticamente los mismos cuando el ensayo se tarda en completar 2 horas como 2 minutos. **A las temperaturas elevadas la resistencia mecánica depende mucho de la velocidad de carga y del tiempo de exposición.** Un metal sujeto a una carga de tracción constante a alta temperatura fluye lentamente (creep) y sufre un aumento de longitud en función del tiempo.

Los ensayos para medir la resistencia mecánica a temperaturas elevadas deben elegirse de acuerdo con la escala de tiempos adecuada a la duración en servicio que los materiales deban tener. Por esta razón, un ensayo de tracción a temperatura elevada puede proporcionar información útil sobre el comportamiento de un objeto cuya duración o vida en servicio haya de ser corta, pero los resultados no son aplicables para predecir el comportamiento en servicio de una tubería de vapor de la que se exige que aguante durante 100.000 horas a temperatura elevada. El *ensayo de fluencia lenta (creep test)* mide la variación de dimensiones que se produce durante la exposición a temperatura elevada, mientras que los ensayos *de tensión hasta la rotura (stress-rupture test)* miden el efecto de la temperatura en la capacidad para soportar cargas durante tiempos largos.

## 2.2. La curva de fluencia lenta

Llamaremos fluencia lenta a la deformación progresiva (creep) de un material sometido a una tensión constante y a una dada temperatura  $T$ . El tipo más sencillo de deformación de este tipo es el flujo viscoso. Se dice que un material experimenta flujo viscoso puro si la velocidad de distorsión  $\dot{\gamma}$  es proporcional a la tensión de corte  $\tau$  aplicada (2.1):

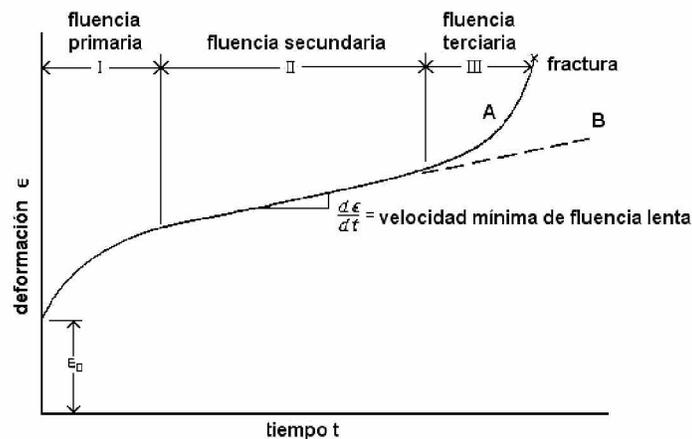
$$\frac{d\gamma}{dt} = f(\tau) \quad (2.1)$$

Cuando la proporcionalidad entre estas dos magnitudes se puede expresar por una simple constante, se dice que el material muestra viscosidad newtoniana:

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (2.2)$$

Donde  $\eta$  es el coeficiente de viscosidad. Esta ley de viscosidad, que la mayoría de los líquidos obedecen, es solo cumplida en parte por los metales.

Para determinar la curva tecnológica de la fluencia lenta de un metal se aplica una carga constante a una probeta de tracción, que se mantiene a temperatura constante, y se mide la deformación como función del tiempo. Aunque la operación es, en principio, muy sencilla, exige en la práctica un equipo de laboratorio considerable. El tiempo transcurrido en un ensayo puede ser de varios meses, y algunos ensayos continúan en curso después de más de diez años. Los procedimientos generales para el ensayo de la fluencia lenta están especificados en la norma ASTM E139-58T.



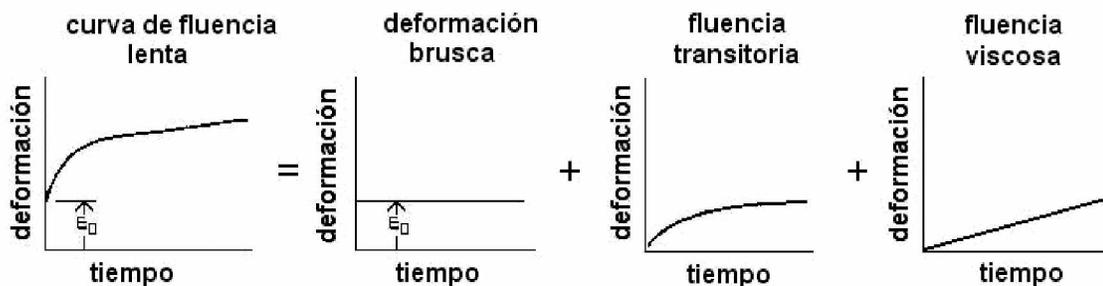
**Figura 2.1. Curva típica de fluencia lenta**

La curva A de la figura 2.1 es la forma ideal que se obtiene en los ensayos de fluencia lenta o creep. La pendiente de la curva ( $d\epsilon / dt = \dot{\epsilon}$ ) se denomina *velocidad de fluencia*. Después de un alargamiento rápido inicial de la probeta,  $\epsilon_0$ , la velocidad de fluencia disminuye con el tiempo hasta alcanzar un estado estacionario en que dicha velocidad apenas varía en el tiempo. Finalmente, en la última etapa, la velocidad aumenta rápidamente hasta producirse la fractura. En principio parece fácil el poder dividir la curva de fluencia en las tres etapas mencionadas, pero

hay que tener en cuenta que esto dependerá, en gran medida, de la tensión aplicada y de la temperatura utilizada en el ensayo.

En el ensayo de fluencia, es usual mantener constante la carga a lo largo del mismo, por lo que, como al alargarse la probeta disminuye su sección transversal, la tensión axial aumenta continuamente. La relación inicial entre la carga constante y la sección de la probeta, es decir, la tensión inicial, es la que se registra usualmente como valor de la tensión. Hay métodos para compensar las variaciones de las dimensiones a lo largo del ensayo, de manera de poder realizar ensayos a tensión constante. Cuando se hacen ensayos a tensión constante, a veces en las curvas de fluencia no aparece la etapa de velocidad de fluencia creciente (región III, Fig. 2.1) y se obtiene una curva como la B de la figura 2.1. Se encuentra, sin embargo, fluencia acelerada en los ensayos realizados a tensión constante cuando se producen cambios metalúrgicos en el metal. La curva B debe considerarse como la curva fundamental de fluencia de un metal.

El trabajo inicial de Andrade [2] sobre la fluencia lenta ha sido de mucha importancia en el estudio de este tema. Andrade consideró que la curva de fluencia a tensión constante representa la superposición de dos procesos independientes que ocurren después de la deformación brusca resultante de la aplicación de la carga. El primer componente es la fluencia transitoria, que tiene una velocidad de fluencia decreciente con el tiempo, y a este se superpone un proceso de fluencia a velocidad constante, llamado fluencia viscosa. La forma de superposición de estos dos procesos puede verse en la figura 2.2.



**Figura 2.2. Procesos que intervienen para determinar la curva de creep**

Andrade encontró que la curva de fluencia podría ser la representación de la siguiente ecuación:

$$L = L_0(1 + \beta \cdot t^{1/3}) e^{kt} \quad (2.3)$$

Donde:

- L: longitud de la probeta en el tiempo t,
- $L_0$ ,  $\beta$  y k: constantes a determinar empíricamente.

La constante  $L_0$  se aproxima a la longitud de la probeta después de la deformación brusca producida por aplicación de la carga. La fluencia transitoria está representada por la constante  $\beta$ . En el caso de ser  $k=0$ , la ecuación (2.3) conduce a una velocidad de fluencia que tiende a cero al aumentar el tiempo:

$$L = L_0(1 + \beta \cdot t^{1/3}) \quad (2.4)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{dL}{dt} = \frac{1}{3} L_0 \beta \cdot t^{-2/3}$$

Cuando  $\beta = 0$

$$\frac{L}{L_0} = e^{kt}$$

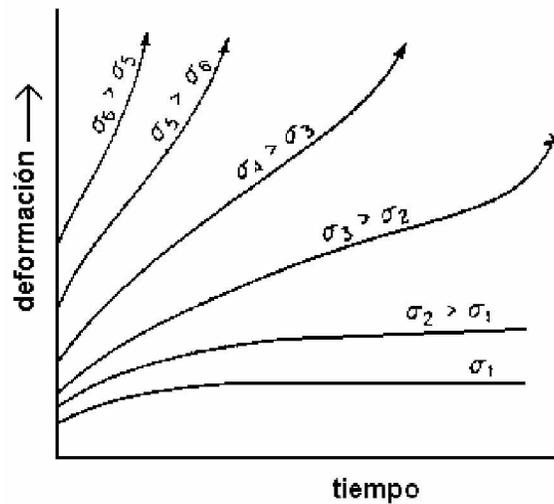
$$\frac{dL}{dt} = kL_0 e^{kt} = kL \qquad k = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} \qquad (2.5)$$

El exponente  $k$  representa, por lo tanto, un alargamiento por unidad de longitud, que aumenta a velocidad constante. Sirve para expresar el componente viscoso de la fluencia. Estrictamente hablando,  $k$  representa un flujo cuasi-viscoso, porque la velocidad de variación de la longitud no es proporcional a la tensión como exige la ecuación (2.2). Algunas veces la fluencia transitoria se denomina flujo  $\beta$ , y la fluencia viscosa (del estado estacionario) flujo  $k$ , manteniendo la forma del análisis de Andrade de la curva de fluencia. Las ecuaciones de Andrade se han verificado con ensayos de centenares de horas, resultando alargamientos totales con diferencias por exceso del 1%.

Explicando más detalladamente la figura 2.2 diremos que la deformación representada por  $\epsilon_0$  se produce prácticamente de manera instantánea al aplicar la carga, pero aunque la tensión aplicada sea inferior al límite elástico, no toda la deformación instantánea es elástica. La mayor parte de la deformación se recupera instantáneamente al suprimir la carga, pero otra solo se recupera con el tiempo (carácter inelástico) y el resto no es recuperable (carácter plástico). Aunque la deformación instantánea no es realmente fluencia lenta, tiene gran interés porque constituye una fracción considerable de la deformación total admisible en las piezas de una máquina. Algunas veces, para obtener la deformación debida exclusivamente a la fluencia lenta, se resta la deformación instantánea de la deformación total de la probeta.

La primera etapa de la fluencia lenta, llamada fluencia primaria, corresponde a una región de velocidad de fluencia decreciente. La fluencia primaria es un periodo de fluencia transitoria preponderante en el que la resistencia del material a la fluencia lenta aumenta por efecto de la propia deformación. La fluencia primaria es el proceso principal cuando las temperaturas y las tensiones son bajas, como es el caso del plomo a temperatura ambiente. La segunda etapa de la fluencia, es conocida como fluencia secundaria, es un período de velocidad de fluencia casi constante, como resultado de un equilibrio entre los procesos en competencia de endurecimiento por deformación y recuperación. Por esta razón a la fluencia secundaria se la llama muchas veces fluencia estacionaria o de estado estacionario. El valor medio de la velocidad de fluencia durante la fluencia secundaria se denomina velocidad mínima de fluencia lenta. La tercera etapa, o fluencia terciaria, se presenta principalmente en los ensayos a carga constante, para tensiones elevadas a temperaturas altas. No se conocen con exactitud las razones de la aceleración de la deformación que conducen a una rotura rápida. Es improbable que el aumento de la velocidad de fluencia en la tercera etapa se deba solamente a la estricción de la probeta, porque muchos materiales fallan en fluencia lenta a tensiones demasiado pequeñas para producir estricción.

La figura 2.3 muestra el efecto de la variación de la tensión aplicada sobre las curvas obtenidas a temperatura constante. Puede observarse con claridad que una curva de fluencia lenta con tres etapas bien definidas solo puede encontrarse bajo ciertas condiciones de tensión y de temperatura. Una familia de curvas parecidas se obtiene en los ensayos realizados a la misma tensión y diferentes temperaturas. Cuanto más alto es valor de la temperatura, mayor es la velocidad de fluencia. Una diferencia fundamental entre las curvas de tensión constante y las de temperatura constante es que las primeras se inician todas en el mismo punto del eje de las deformaciones.



**Figura 2.3. Efecto de la tensión en las curvas de creep**

El parámetro más importante que se deduce de las curvas de fluencia lenta y el cual es utilizable para fines de diseño, es la velocidad mínima de fluencia en diferentes condiciones de tensión y temperatura. Para el diseño es importante conocer la tensión máxima que produce una determinada velocidad mínima en ciertas condiciones de temperatura. Pueden utilizarse dos criterios para caracterizar los materiales desde el punto de vista de la fluencia lenta:

- 1) La tensión que produce una velocidad de fluencia correspondiente a un alargamiento del 0,0001% en cada hora (0,001%/h o 1%/10.000h)
- 2) La tensión a la que la velocidad de fluencia alcanza un 0,00001% de alargamiento en cada hora (0,00001%/h o 1%/100.000h); 100.000 horas son aproximadamente 11 años y medio.

El primer criterio se utiliza por ejemplo para los materiales de los motores de reacción y el segundo es posible utilizarlo para los materiales de turbinas de vapor y equipos similares. Si, para temperatura constante, se representa en escala doble logarítmica la tensión como función de la velocidad mínima de fluencia lenta, se obtiene una línea recta para cada temperatura. Esta clase de representación es muy útil para fines de diseño y nos ocuparemos más detalladamente luego.

### 2.3. Deformación a temperatura elevada

Los procesos de deformación más importantes que se producen a temperatura elevada son el deslizamiento, la formación de subgranos y el resbalamiento de los límites de grano. La deformación a temperatura elevada se caracteriza por su extrema heterogeneidad. La medida del alargamiento local de fluencia en diferentes puntos de una probeta muestra que la deformación local experimenta variaciones periódicas en el tiempo que no se registran en la variación de la deformación en la distancia total entre los puntos de la probeta.

En los metales a alta temperatura se han observado varios procesos secundarios de deformación. Entre estos pueden incluirse el deslizamiento múltiple, la formación de bandas de deslizamiento de espesor excesivo, bandas de plegado, formación de pliegues en los límites de grano y traslación de los límites de grano.

*Deformación por deslizamiento:* Cuando los metales se deforman a temperatura elevada se observan nuevos sistemas de deslizamiento. Aunque a temperaturas elevadas pueda iniciarse el deslizamiento como bandas espaciadas con relativa uniformidad, cuando la deformación progresa

hay tendencia a que el cizallamiento posterior se restrinja a unas pocas bandas de deslizamiento. La tendencia al deslizamiento cruzado y la formación de bandas de deformación aumentan con la temperatura.

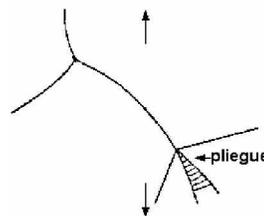
*Formación de subgranos:* La deformación por fluencia lenta es muy heterogénea, por lo que se ofrecen muchas oportunidades para que la red se flexione. Se producen bandas de plegado, bandas de deformación y flexión local en la proximidad de los límites de grano. La poligonización puede coincidir con la flexión de la red, porque a temperatura elevada se facilita el trepado de las dislocaciones. La formación de celdas o subgranos cuando progresa la fluencia lenta se ha observado con la utilización de diferentes técnicas, entre ellas la técnica metalográfica. El tamaño de los subgranos depende de la tensión y de la temperatura. Los subgranos grandes o celdas se producen a temperaturas altas y a baja tensión o velocidad de fluencia. La disminución de la velocidad de fluencia en la primera etapa es el resultado de la formación de un mayor número de subgranos al progresar la deformación. El incremento en el número de límites de grano de ángulo pequeño es una creación continua de barreras que se oponen al movimiento de las dislocaciones y por eso disminuye la velocidad de deformación.

*La deformación en los límites de grano:* La relajación en los límites de grano, que se mide por los efectos de fricción interna a temperatura elevada, indican que esos límites tienen carácter viscoso en esas condiciones. Los principales procesos que se observan en los límites de grano durante la fluencia lenta a temperatura elevada son el resbalamiento en los límites de grano, la migración de los límites de grano y la formación de pliegues.

El resbalamiento en los límites de grano es un proceso de cizallamiento en la dirección de estos límites el cual es favorecido por la elevación de temperatura, la disminución de la velocidad de fluencia o por el efecto simultáneo de ambos factores.

La migración de los límites de grano es un desplazamiento de dichos límites en una dirección inclinada respecto a ellos. Se la puede considerar como un crecimiento de grano inducido por la tensión. La migración de los límites de grano supone una restauración durante la fluencia lenta, que es muy importante porque permite al material distorsionado, adyacente a los límites de grano, quedar en disposición de sufrir nuevas deformaciones. Los límites de grano ondulados, que se observan frecuentemente en la fluencia lenta a temperatura elevada, son el resultado de la deformación heterogénea en dichos límites y de su migración.

Para que se produzca la deformación de los límites de grano, sin que se originen grietas, es necesario que la deformación sea continua a lo largo de los límites. Una forma de acoplarse la deformación de los límites de grano a temperatura elevada es la formación de pliegues en el extremo de un límite. La figura 2.4 muestra el esquema de un pliegue.

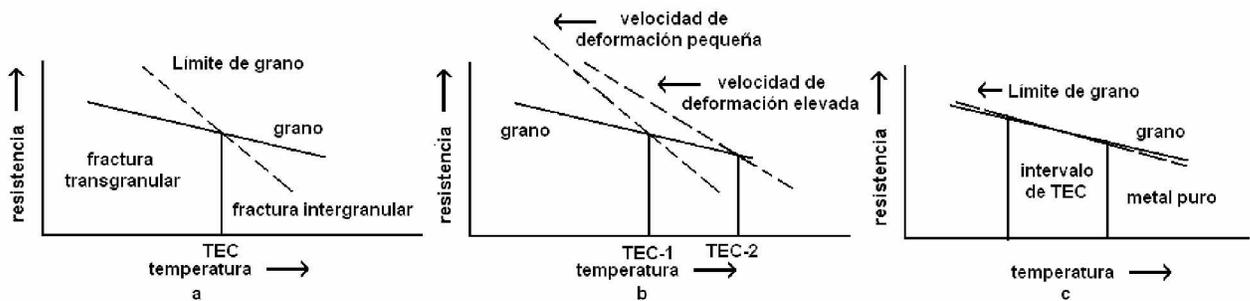


**Figura 2.4 Formación de un pliegue en un punto triple**

## **2.4. Fractura a temperaturas elevadas**

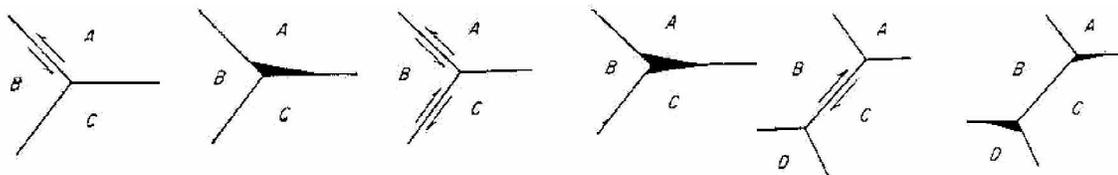
Al elevarse la temperatura hay una transición de fractura transgranular a intergranular. La fractura transgranular se produce cuando los granos son más débiles que sus límites, mientras que

en la fractura intergranular los límites de grano son los de mayor debilidad. Para definir este límite se introdujo el concepto de *temperatura equicohesiva*, que se definió como la temperatura a la que los granos y los límites de grano tienen la misma resistencia, figura 2.5(a). Lo mismo que la temperatura de recrystalización, la temperatura equicohesiva no es un punto fijo. Además de la tensión y la temperatura, también influye la velocidad de deformación. La figura 2.5 (b) muestra que al reducirse la velocidad de deformación disminuye la temperatura equicohesiva y aumenta con ello la tendencia a la fractura intergranular. El efecto de la velocidad de deformación sobre la relación resistencia mecánica-temperatura parece que es más intenso sobre la resistencia de los límites de grano que para la de los granos. Puesto que la superficie de los límites de grano aumenta cuando disminuye el tamaño de grano, un material de grano grande tendrá más resistencia, por encima de la temperatura equicohesiva, que uno de grano fino. Por debajo de dicha temperatura se cumple la relación inversa. En muchas ocasiones para materiales de alta pureza hay un intervalo amplio de temperaturas en el que la resistencia mecánica de los granos y la de los límites de grano se diferencian por muy poco, figura 2.5(c) y la fractura transgranular puede ocurrir a temperaturas más elevadas.



**Figura 2.5. Temperatura equicohesiva**

En las condiciones de fluencia lenta se han observado dos tipos de fractura intergranular. En condiciones en que es posible el resbalamiento en los límites de grano, se pueden iniciar las grietas en los puntos triples que se forman cuando coinciden tres límites. En la figura 2.6 se muestran varios esquemas de la formación de grietas como resultado del resbalamiento en los límites de grano.



**Figura 2.6. Esquemas de formación de grietas intergranulares como consecuencia del resbalamiento de los límites de grano**

El segundo tipo de fractura intergranular se caracteriza por la formación de huecos en los límites de grano, especialmente en aquellos que son transversales a las tensiones de tracción. Los huecos crecen y coalescen en una grieta intergranular. Este tipo de fractura es predominante cuando la tensión es baja y la rotura se produce después de transcurrido un largo tiempo. Diversos

experimentos indican que no pueden formarse huecos intergranulares si no se produce resbalamiento en los límites de grano.

## 2.5. Teorías sobre la fluencia lenta

### *Bajas Temperaturas*

La fluencia lenta se produce cuando se pueden vencer los obstáculos que se oponen a la deformación por la acción combinada de la tensión y las fluctuaciones térmicas. Los procesos de difusión adquieren importancia a temperaturas superiores a la mitad del punto de fusión, aproximadamente. A temperaturas más bajas intervienen principalmente los procesos de restauración que no dependen de la difusión, por ejemplo, el deslizamiento cruzado. La fluencia lenta a temperatura elevada es predominantemente fluencia viscosa o de estado estacionario, mientras que por debajo de  $T_f/2$  prepondera la fluencia transitoria o primaria.

Cottrell ha propuesto una ecuación general diferente a al de Andrade para las leyes temporales de la fluencia lenta [3]:

$$\dot{\epsilon} = At^{-n'} \quad (2.6)$$

En la que A y  $n'$  son constantes empíricas. Los distintos tipos de fluencia descritos en la ecuación anterior dependen del valor de  $n'$ . Si  $n'=0$ , la velocidad de fluencia es constante y la ecuación anterior representa la fluencia estacionaria. Si  $n'=1$ , la ecuación convierte (2.6) en

$$\epsilon = \alpha \ln t \quad (2.7)$$

En la que  $\alpha$  es una constante. Esta es la ley logarítmica de la fluencia lenta para temperaturas bajas. Si  $n'=2/3$ , la ecuación se convierte en la ecuación de Andrade para la fluencia lenta transitoria

$$\epsilon = \beta \cdot t^{1/3} \quad (2.8)$$

La fluencia lenta logarítmica se produce a temperaturas y tensiones bajas, a las que no existe recuperación. Se cree que es un proceso de agotamiento en el que la fase determinante de la velocidad es la adquisición, por una dislocación, de la energía de activación necesaria para moverse. En la aplicación inicial de la tensión se mueven las dislocaciones que necesitan menos energía de activación y producen la deformación inicial de fluencia. Cuando se agotan estas dislocaciones de movimiento fácil, solo puede continuar la fluencia lenta por el movimiento de dislocaciones que necesitan mayor energía de activación. La energía de activación necesaria es cada vez mayor y la velocidad de fluencia disminuye.

La fluencia logarítmica de baja temperatura obedece a una ecuación mecánica de estado, es decir, que la deformación en un instante dado, solo depende de los valores instantáneos de la tensión y de la deformación y no de la historia anterior de la deformación. La fluencia lenta a alta temperatura, por el contrario, depende fuertemente de la deformación anterior y de la historia térmica, por lo que no satisface a una ecuación mecánica de estado.

### *Altas temperaturas*

A temperaturas superiores a  $T_f/2$  prepondera la fluencia secundaria o de estado estacionario. Aunque hay ciertas dudas de si se consiguen verdaderas condiciones de estado estacionario para todas las combinaciones de tensión y temperatura, se tienen pruebas experimentales abundantes que indican el establecimiento de condiciones aproximadas de estado

estacionario, después de un corto periodo de fluencia lenta, en las zonas de temperaturas altas. La fluencia lenta de estado estacionario es la consecuencia de un equilibrio entre el endurecimiento por deformación y la restauración. Los efectos de endurecimiento por deformación se eliminan por el escape de las dislocaciones helicoidales por deslizamiento cruzado y de las de cuña por trepado. Puesto que el trepado requiere una energía de activación mayor que el deslizamiento cruzado, será el primero el que determine la velocidad de fluencia en la etapa estacionaria.

## 2.6. Aleaciones resistentes al creep

Las aleaciones resistentes a la fluencia lenta o creep constituyen una clase particular de materiales complejos que se han desarrollado para aplicaciones muy específicas.

Las aleaciones primeramente desarrolladas para temperatura elevada fueron las ferríticas, y su finalidad era atender a las exigencias crecientes en temperatura de servicio de las plantas de energía de vapor. Son esencialmente aceros al cromo y molibdeno para formar carburos que resistan al ablandamiento. El molibdeno es particularmente eficaz para mejorar la resistencia a la fluencia lenta del acero. Por la tendencia a la oxidación y la inestabilidad de la fase carburo, no se emplean estas aleaciones a temperaturas superiores a 550 °C (1000 °F) aproximadamente.

Las superaleaciones para los motores a reacción son aleaciones a base de níquel o cobalto, o de ambos, que, en general, contienen cromo en cantidad apreciable para mejorar la resistencia a la oxidación.

El contenido de carbono de las aleaciones para elevada temperatura es decisivo y se debe controlar muy cuidadosamente. Aumentando la cantidad de carbono hasta cierto límite, aumenta la cantidad de carburos y se incrementa la resistencia a la rotura. Si el contenido de carbono es excesivo, los carburos ya no se presentan como partículas discretas, si no que forman redes compactas de carburos y disminuye la resistencia. Algunos sistemas que forman carburos pueden sufrir reacciones complejas de envejecimiento, con el consiguiente aumento adicional de la resistencia.

Una forma de abordar el problema de los materiales a altas temperaturas las constituyen los *cermentos*, en las que se combinan partículas de productos cerámicos, tales como boruros, carburos y siliciuros, con un aglutinante metálico, por los métodos de la metalurgia de polvos. Los cermentos presentan resistencias muy elevadas hasta los 1000°C, aproximadamente (1800°F), pero su empleo está limitado por su escasa ductilidad y su poca resistencia a los choques mecánicos y térmicos.

La resistencia a temperatura elevada de los metales está relacionada con el punto de fusión. Así, por ejemplo, el aluminio es más resistente que el cinc, y el cobre más que el aluminio. Titanio, cromo, niobio, molibdeno, tantalio y volframio, en orden de puntos de fusión creciente, son metales relativamente corrientes con puntos de fusión superiores a los del hierro, el cobalto y el níquel, componentes principales de algunas de las superaleaciones actuales. El molibdeno y sus aleaciones tienen la mejor resistencia a temperatura elevada de todos los metales comunes actualmente disponibles. La figura 2.7, que reproduce las tensiones de rotura en 1000 h a diferentes temperaturas, permite reconocer esta superioridad del molibdeno. Por desgracia, el empleo de este está limitado porque el citado metal sufre oxidaciones catastróficas a temperaturas altas.

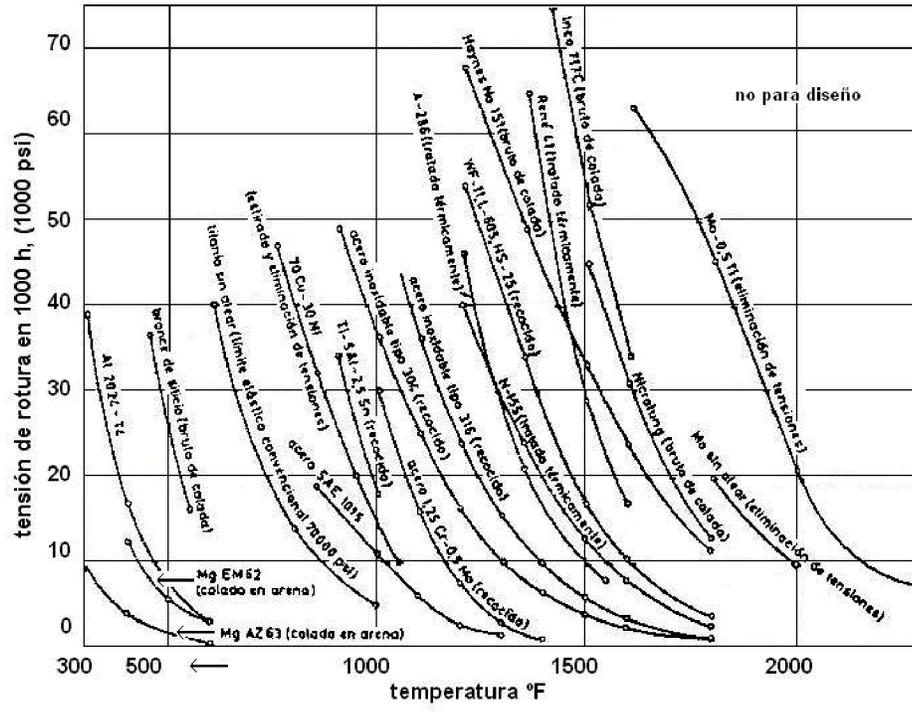


Figura 2.7. Curvas de tensión de rotura en 1000 h en función de la temperatura

# CAPITULO 3

## Propagación de fisuras por creep y creep-fatiga

## CAPITULO 3

### **Propagación de fisuras por creep y creep-fatiga**

#### **3.1. Introducción**

Los requisitos de operación a elevada temperatura para piezas y equipos se han ido incrementado desde hace 20 a 30 años. En la industria de generación de energía, por ejemplo, los componentes operan por grandes períodos de tiempo a temperaturas entre 0,3 a 0,5 de su temperatura absoluta de fusión y tienen una vida de diseño que está limitada por el fenómeno de daño por creep. Aplicaciones en áreas de defensa, energía, aeroespaciales, entre otras, confían en materiales que mantienen su integridad en la presencia de combinaciones de alta temperatura y tensión.

A pesar de los métodos sofisticados de detección de falla disponibles en la actualidad, en todos los componentes industriales existen comúnmente defectos e impurezas que pueden potencialmente quedar por debajo del umbral de detección de dichos métodos. En estos casos, bajo la acción de tensiones y alta temperatura, muchos componentes pueden fallar por la acumulación de daño por creep a partir de estos defectos, generándose fisuras que propagan en el tiempo hasta producir la fractura de aquellos. Estas fallas resultan en pérdidas financieras importantes así como posibles pérdidas de recursos humanos. Este fenómeno de propagación de fisuras por creep puede estudiarse en laboratorios con procedimientos estandarizados utilizando equipos especiales. En este trabajo trataremos con la actualización y potencialización de una máquina de ensayos de propagación de fisuras por creep y creep-fatiga, por lo que es necesario introducir una breve descripción del fenómeno de daño involucrado en el proceso de propagación, las teorías utilizadas para estudiarlo y las variables que gobiernan dicho proceso que deberán ser medidas durante el ensayo.

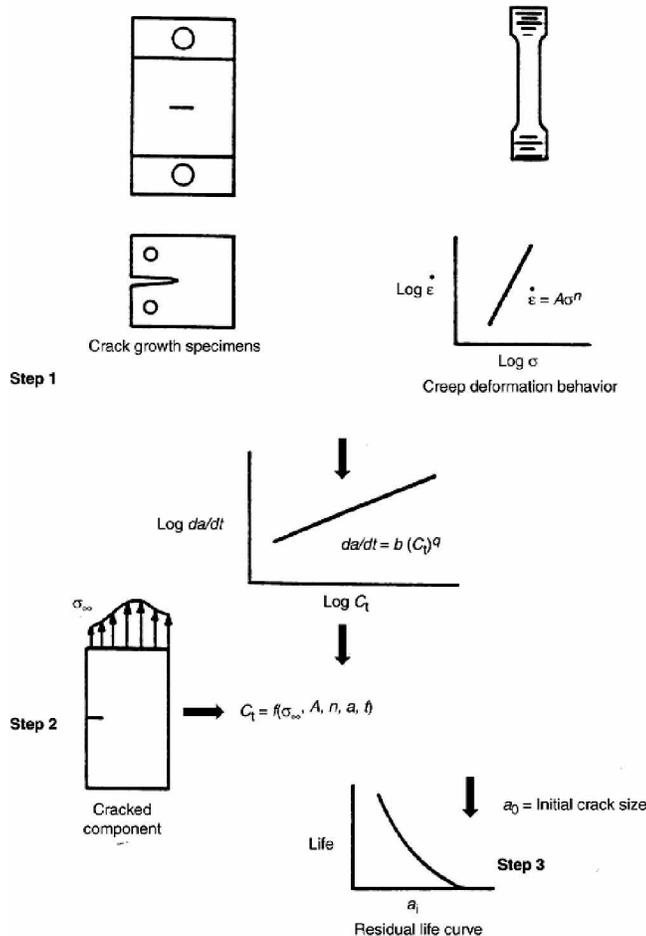
#### **3.2. Creep y creep-fatiga**

Las fallas que son atribuidas al creep resultan del daño por creep extenso o localizado. Si un componente es sometido a tensión o temperaturas uniformes, el daño es probablemente extenso y será propenso a falla por rotura por creep generalizado. Esto es comúnmente observado en componentes de sección delgada tales como caños de vapor. Componentes con daño localizado, el cual es un resultado de una distribución no uniforme de tensión y temperatura, como ocurre más comúnmente en grandes estructuras, son más propensos a fallar como un resultado de la propagación de fisuras por creep por localización del daño en determinados defectos.

Las condiciones de servicio experimentadas por algunos componentes pueden también involucrar cargas y descargas cíclicas a elevadas temperaturas. Por lo tanto, en estas situaciones, el crecimiento de fisura ocurre no solo bajo cargas estáticas (condiciones de creep), sino también por la acción de ciclos de carga (fatiga mecánica), generándose interacciones de creep-fatiga en la iniciación y la propagación de fisuras.

El crecimiento de fisura por creep y creep-fatiga ocurre comúnmente en la mayoría de los materiales ingenieriles que operan a altas temperaturas. Estos son los materiales que consideraremos en este trabajo, conocidos como materiales de comportamiento dúctil al creep. Estos materiales tienen la habilidad de sostener cantidades significantes de crecimiento de fisura antes de la falla. También, el crecimiento de fisura en estos materiales es acompañado por

cantidades significantes de deformación por creep en el extremo de la fisura. Por lo tanto, se requiere un entendimiento completo de los mecanismos de crecimiento de fisura y mecanismos de daño para realizar predicciones confiables de vida de los componentes sometidos a tensiones y altas temperaturas. Un típico diagrama de flujo de la metodología de ensayo utilizada es mostrado en la figura 3.1. Ejemplos de materiales dúctiles incluyen aceros al Cr-Mo, aceros inoxidables y aceros al Cr-Mo-V.



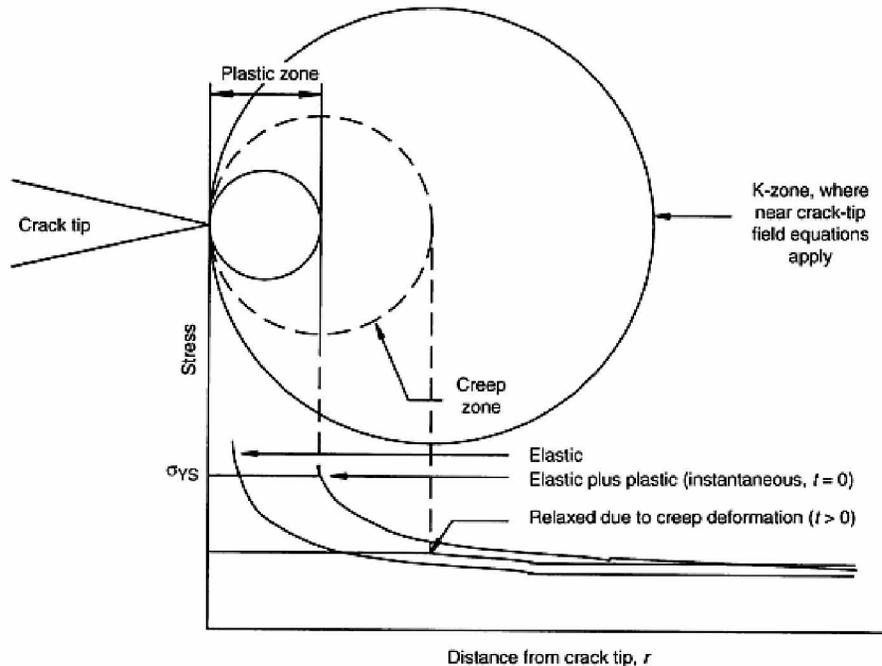
**Figura 3.1. Metodología para predecir la propagación de fisuras usando mecanismos de fractura dependientes del tiempo**

El fenómeno de daño por creep en materiales dúctiles involucra usualmente cavitación en el límite de grano. El inicio de la cavitación ha sido observado más comúnmente en partículas de segunda fase o defectos en los límites de grano. La nucleación y el crecimiento de estas cavidades llevan a la coalescencia de los huecos que se generan, dando lugar a pequeñas fisuras que crecen y coalescen.

### 3.3. Mecanismos de propagación de fisuras por creep

Para poder estudiar el fenómeno de propagación de fisuras por creep es necesario utilizar parámetros fractomecánicos que permitan caracterizar y/o determinar en función del tiempo, los

campos de tensiones y deformaciones asociados a la punta de la fisura [4-5]. La Figura 3.2 esquematiza estos campos generados frente a la punta de una fisura de un componente fisurado sometido a campos tensionales nominales y altas temperaturas.

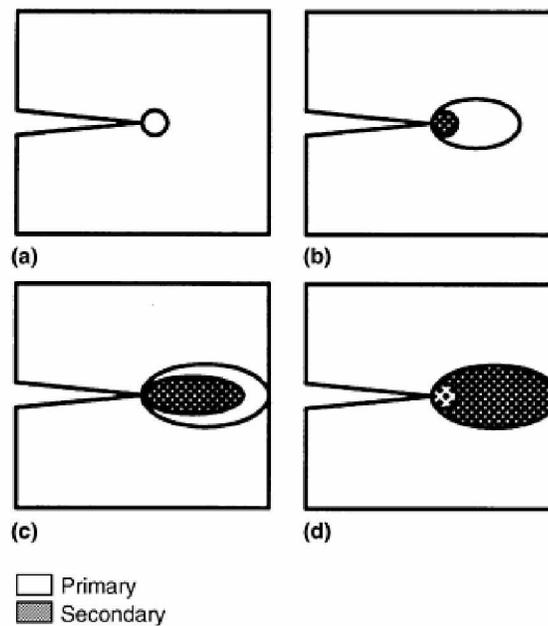


**Figura 3.2. Formación de zonas de deformación delante de la punta de la fisura bajo carga en régimen de creep**

Según la teoría de la mecánica de fractura [4-5], la respuesta inicial de un componente cuando es sometido a tensiones crecientes es elasto-plástica, y el campo de tensiones en el extremo de la fisura puede ser descrito utilizando el factor de intensidad de tensiones,  $K$ . Esto es así siempre y cuando la escala de plasticidad asociada a la punta de la fisura sea pequeña, comparada con, el tamaño de la misma. Si la zona plástica no es pequeña, puede utilizarse la integral  $J$  como único parámetro para caracterizar los campos de tensiones y deformaciones en la punta de la fisura para una dada configuración geométrica y una dada tensión nominal. Con el incremento del tiempo, la deformación por creep causa la relajación de las tensiones en la vecindad inmediata del extremo de la fisura, resultando en la formación de una zona de creep, cuyo tamaño se incrementa continuamente con el tiempo. Debido a que los parámetros  $K$  y  $J$  son independientes del tiempo, en general no son capaces de caracterizar los campos de tensiones y deformaciones en el extremo de la fisura dentro de la zona de creep. Los parámetros  $C^*$ ,  $C(t)$  y  $C_t$  han sido desarrollados como alternativas para describir la evolución de las deformaciones por creep dependientes del tiempo en la región de la punta de la fisura, como veremos más adelante. Dentro de estas regiones de creep los campos de tensiones y deformaciones se asemejan a los campos de Hutchinson-Rice-Rosengren observados en la mecánica de fractura elasto-plástica.

La evolución del comportamiento de un componente fisurado sometido a daño por creep puede resumirse en cuatro etapas, como muestra la figura 3.3. Durante la etapa inicial de creep a pequeña escala, la zona de creep es pequeña comparada con el tamaño de la fisura y el ligamento remanente. La deformación por creep primario se acumula a una velocidad más rápida que las deformaciones por creep secundario, por lo que las deformaciones por creep primario inicialmente

dominan esta región. Luego la zona de creep primario continúa expandiéndose, y la zona de creep secundario comienza a desarrollarse dentro de la zona de creep primario. Eventualmente, la zona de creep secundario alcanza a todo el ligamento remanente. En muchos casos la zona de creep terciario comienza como una zona pequeña cerca del extremo de la fisura, pero puede eventualmente alcanzar a cubrir todo el ligamento remanente. En aceros al cromo-molibdeno la cavitación es usualmente limitada a regiones pequeñas cerca del extremo de la fisura, y la consideración de deformación por creep terciario no es relevante al estimar los parámetros fractomecánicos.



**Figura 3.3. Evolución de la zona de creep.**

- a) Condiciones de creep primarias a pequeña escala.
- b) Comienzo de la evolución de la zona de creep secundaria.
- c) Zona de creep secundaria comparable en tamaño con la zona de creep primaria.
- d) Zona de creep secundario desarrollado en todo el ligamento remanente.

Cuando dominan condiciones de creep de estado estacionario, como se muestra en la figura 3.3 (d), la relación entre la velocidad de deformación y la tensión, el campo de deformaciones longitudinales, según la línea de carga, puede ser expresado por la relación de Norton simplificada:

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \quad (3.1)$$

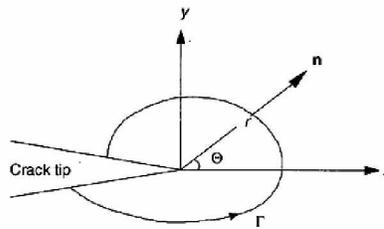
Para estas condiciones, Landes, Begley y Nikbin, Webster y Turner definieron el parámetro  $C^*$ , utilizando la analogía con la integral  $J$ . La integral  $C^*$  es definida como sigue:

$$C^* = \int_{\Gamma} W^* dy - T_i \left( \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x} \right) ds \quad (3.2)$$

Donde

$$W^* = \int_0^{\dot{\epsilon}_{nm}} \sigma_{ij} d\dot{\epsilon}_{ij} \quad (3.3)$$

es la variación de densidad de energía de deformación asociada con el punto de tensión y la tasa de deformación. En la ecuación 3.2,  $\Gamma$  define el contorno de integración, considerado en dirección contraria a las agujas del reloj en la superficie de fisura más baja,  $T_i$  es la componente del vector tracción en dirección de la normal saliente, y  $ds$  es el incremento del contorno de integración. La figura 3.4 ilustra esta integral sobre un sistema de coordenadas ubicado en el extremo de la fisura de referencia.



**Figura 3.4. Esquema de la integral de contorno usado para definir la integral  $C^*$ .  $n$  es el vector normal unitario.**

$C^*$  es una integral independiente del camino cuyo valor puede ser obtenido por cálculo de la integral a lo largo de un camino arbitrario, como se mencionó antes. La integral  $C^*$  es también relacionada con la variación de energía o la diferencia de energía entre dos probetas idénticamente cargadas teniendo incrementos de longitudes de fisuras diferentes. Por lo tanto,  $C^*$  puede ser medida utilizando el desplazamiento de la línea de carga, de la siguiente manera:

$$C^* = -\frac{1}{B} \frac{dU^*}{da} \quad (3.4)$$

Donde  $B$  es el espesor de la probeta y  $U^*$  es la diferencia del índice de energía de estado estacionario (o energía de tensión) entre dos probetas en las cuales las longitudes de fisura difieren por una cantidad incremental  $da$ . La integral  $C^*$  también describe los campos de tensiones y deformaciones en entorno de la punta de la fisura:

$$\sigma_{ij} = \left( \frac{C^*}{I_n A r} \right)^{1/(n+1)} \bar{\sigma}_{ij}(\Theta) \quad (3.5)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = A \left( \frac{C^*}{I_n A r} \right)^{1/(1+n)} \dot{\epsilon}_{ij}(\Theta) \quad (3.6)$$

Donde  $r$  es la distancia desde el extremo de la fisura,  $\Theta$  es el ángulo desde el plano de la fisura, y  $\bar{\sigma}_{ij}(\Theta)$  y  $\dot{\epsilon}_{ij}(\Theta)$  son funciones angulares.  $A$  es el coeficiente de la ley de Norton en la relación entre la velocidad de tensión y creep de estado estacionario.  $I_n$  es una constante dependiente del exponente de creep de estado estacionario,  $n$ , cuyo valor puede ser encontrado en tablas.  $C^*$  caracteriza el campo de tensiones y deformaciones en el entorno de la punta de la fisura conocida comúnmente como singularidad de Hutchinson-Rosengren-Rice (HRR).

Usando la variación de deflexión en la línea de carga, la cual puede ser medida directamente desde la probeta, la carga aplicada y la longitud de fisura,  $C^*$  puede ser determinada por:

$$C^* = \frac{PV_{ss}}{BW} \eta \left( \frac{a}{W} n \right) \quad (3.7)$$

Donde  $W$  es el ancho de la probeta,  $B$  es el espesor de la probeta,  $V_{ss}$  es la variación de la línea de carga de estado estacionario, y  $\eta$  es una función geométrica que también depende de la relación entre la longitud de la fisura y el ancho,  $a/W$ , y el exponente de creep secundario,  $n$ . Este método de determinación de  $C^*$  ha sido usado con éxito bajo condiciones de laboratorio con probetas de ensayo, más comúnmente paneles de fisura centrada y **probetas de tensión compacta, que es la que utilizaremos en la máquina de ensayo que se busca poner en funcionamiento**. Para la geométrica de tensión compacta, el valor de  $\eta$  puede ser aproximado como sigue:

$$\eta = \frac{n}{n+1} \left[ \frac{2 + 0.522 \left( 1 - \frac{a}{W} \right)}{1 - \frac{a}{W}} \right] \quad (3.8)$$

Donde el término  $\frac{n}{n+1}$  en el lado derecho de la ecuación es estrictamente válido solo para creep secundario y es reemplazado por  $\frac{n_1}{n_1+1}$  donde la mayoría del tiempo de ensayo es usado bajo condiciones de creep primario. La integral  $C^*$  puede también ser determinada desde expresiones análogas a las expresiones analíticas para estimar la porción plástica completa de la integral  $J$ . Este método es útil cuando los valores experimentales de las variaciones en la deflexión de línea de carga no están disponibles y prevalecen tanto condiciones de tensión plana como de deformación plana. Cuando son frecuentes condiciones planas (suponiendo para miembros en servicio muy gruesos o muy delgados)  $C^*$  puede ser calculada como sigue para probetas de tensión compacta:

$$C^* = A(W-a)h_1 \left[ \frac{P}{\beta \xi B(W-a)} \right]^{n+1} \quad (3.9)$$

Donde  $h_1$  depende de  $a/W$ ,  $n$ , y el estado de tensión.  $\beta$  es igual a 1,455 o 1,071 para condiciones de deformación plana o tensión plana, respectivamente, y:

$$\xi = \left[ \left( \frac{2a}{W-a} \right)^2 + 2 \left( \frac{2a}{W-a} \right) + 2 \right]^{1/2} - \left[ \left( \frac{2a}{W-a} \right) + 1 \right] \quad (3.10)$$

# CAPITULO 4

Ensayos de  
propagación de  
fisura por creep y  
creep-fatiga.  
Requerimientos

## CAPITULO 4

### **Ensayos de propagación de fisura por creep y creep-fatiga. Requerimientos**

#### **4.1. Introducción**

Los ensayos de propagación de fisura por creep son llevados a cabo de acuerdo con normas internacionales, como la ASTM E1457 “**Método de ensayo para la medición de la velocidad de crecimiento de fisuras por creep en metales**” [6]. El procedimiento de ensayo involucra calentar probetas fractomecánicas pre-entalladas hasta una temperatura preestablecida y aplicar una carga constante. El ensayo se extiende hasta que la longitud de la fisura alcanza una parte importante de la probeta o hasta que ocurre su falla. Durante el ensayo es necesario monitorear en el tiempo diferentes variables, como la carga total aplicada, la longitud de la fisura y la deflexión de la línea de carga. Los datos de ensayo se reducen a comparar la velocidad de crecimiento de fisura,  $da/dt$ , en términos de un parámetro de crecimiento de fisura a elevada temperatura, como el parámetro  $C^*$ , que debe ser calculado utilizando las variables mencionadas.

#### **4.2. Equipamiento necesario**

##### *Máquina de ensayo. Control de la sollicitación*

El ensayo de crecimiento de fisura por creep o creep-fatiga debería ser realizado en máquinas de ensayo de peso muerto o servo-mecánicas que son capaces de mantener una carga constante durante un período de tiempo extenso. Durante la duración del ensayo, las variaciones en la carga no deberían exceder en cualquier momento  $\pm 1\%$  del valor nominal. Al usar máquinas de ensayo de creep de peso muerto del tipo en voladizo es importante que la palanca permanezca tan horizontal como sea posible. Las condiciones para carga en voladizo se realizan tales que las relaciones de las cargas son 20 a 1 o 10 a 1, dependiendo de la longitud de nivel. Una desviación importante del voladizo de la posición de nivel (referencia) resulta en una desviación importante en la carga sobre la probeta. La norma ASTM E 4 “Prácticas para la verificación de la carga de máquinas de ensayo” detalla la exactitud requerida para los equipos de ensayo [7]

Los ensayos de creep fatiga pueden ser controlados bajo otros controladores de carga o condiciones de control de desplazamiento. La figura 4.1 muestra varias formas de onda usadas para ensayos de control de carga en el cual la probeta es ciclada entre un valor fijo máximo y un valor de carga mínima. El desplazamiento vs. el tiempo y el tamaño de fisura vs. el tiempo responden esquemáticamente como se muestra en la figura 4.2(a). Los ensayos de control de desplazamiento involucran ciclar entre valores de desplazamientos fijos como se muestra esquemáticamente en las figuras 4.2 (b) junto con el correspondiente cambio en el desplazamiento de la línea de carga y la carga vs. el tiempo y el tamaño de fisura vs. la respuesta al tiempo. Los ensayos de carga controlada son convenientes para velocidades de crecimiento de fisura bajas, y ensayos de amplitud de desplazamiento son convenientes para velocidades de crecimiento de fisuras más altas ( $<4 \times 10^{-6}$  mm/ciclo) y tiempos de mantenimiento más largos. La mayoría de los ensayos de creep fatiga realizados hasta la fecha han sido bajo condiciones de control de carga, en gran medida porque es más conveniente. Este es el caso que analizaremos y que corresponde al tipo de máquina con la que estamos trabajando.

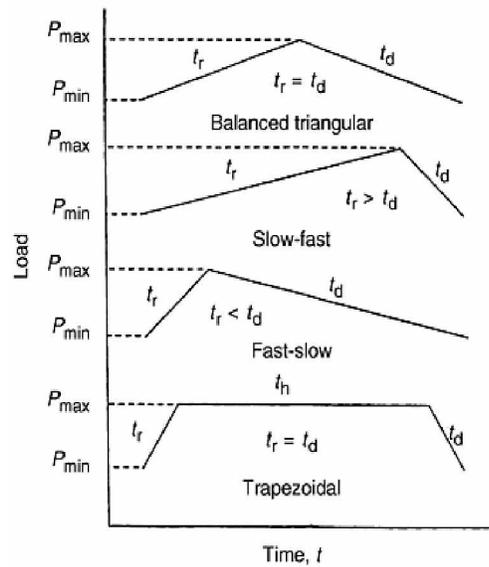


Figura 4.1. Formas de onda usadas durante el ensayo de creep-fatiga.

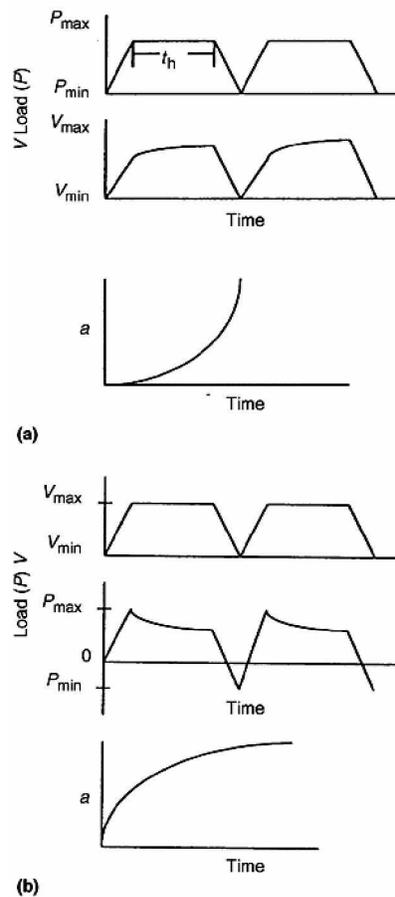
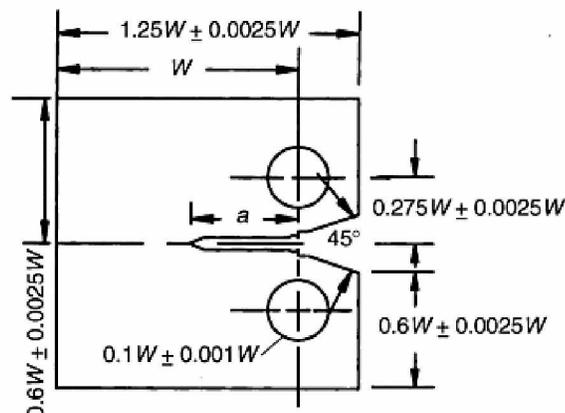


Figura 4.2. Comparación de ensayos bajo formas de onda de carga trapezoidal  
 a) Carga controlada.  
 b) Desplazamiento controlado

En los ensayos de carga controlada (constante) el factor de intensidad de tensiones (o en su defecto el parámetro  $J$ , o  $C^*$ , parámetros que como vimos caracteriza el campo de tensiones y deformaciones en el entorno de la punta de la fisura) se incrementa continuamente con el incremento de la longitud de la fisura. Mientras tanto, el tamaño del ligamento remanente decrece y la escala de plasticidad o creep en la probeta se incrementa con el progreso del ensayo, causando la acumulación de deflexiones inelásticas en la probeta luego de cada ciclo.

### Configuración de la probeta

La configuración de la probeta más ampliamente usada para ensayos de crecimiento de la entalla por creep y creep fatiga es la probeta de tipo compacta (CT), como se muestra en la figura 4.3. Los cuidados especiales en requerimientos dimensionales tales como la configuración de la entalla y la relación ancho espesor de la probeta pueden ser encontrados en las especificaciones ASTM E1457 [6]. Otras configuraciones de probeta tales como la center-cracked tensile panel (CCT) y la single-edge notch (SEN) también pueden ser usadas. Sin embargo, debido a razones de conveniencia la geometría de la probeta CT es la geometría más adecuada para ensayos de crecimiento de fisura por creep y creep fatiga. Al principio, el tiempo de transición para condiciones de creep importantes en la probeta CT es más grande que en la probeta CCT para similares valores de  $K$  y  $a/W$  y probetas del mismo ancho  $W$ . A causa de la transición más larga de tiempo en la probeta CT la condición de  $T_c/T_1 \ll 1$  durante el ensayo de creep fatiga, donde  $T_c$  es el tiempo del ciclo, es más fácilmente satisfecho. Otra ventaja de la probeta CT es que el dispositivo de medición de la apertura de la boca de la fisura (clip-gage), necesario para medir el desplazamiento de la línea de carga y la deflexión, puede ser convenientemente ubicado en la línea de carga. Quizás la ventaja más importante de la probeta CT es que la magnitud de la carga aplicada para el mismo valor aplicado de  $K$  es significativamente más baja que para probetas CCT. Así, para el ensayo se pueden usar máquinas de menor capacidad de carga y accesorios más pequeños.



**Figura 4.3. Dimensiones típicas de la probeta compacta.**

### Control de la temperatura de ensayo

El calentamiento de la probeta (y el control de la temperatura de ensayo) es usualmente llevado a cabo en hornos de resistencia eléctrica o en hornos de convección de laboratorio. Los controles de temperatura deberían estar entre  $\pm 2^\circ\text{C}$  ( $\pm 3^\circ\text{F}$ ) para ensayos llevados a cabo a temperaturas de hasta  $1000^\circ\text{C}$  ( $1800^\circ\text{F}$ ), que es el caso que consideraremos en nuestro trabajo, y de  $\pm 3^\circ\text{C}$  ( $\pm 5^\circ\text{F}$ ) para ensayos por encima de los  $1000^\circ\text{C}$  ( $1800^\circ\text{F}$ ). Si bien las probetas son usualmente testeadas en aire a presión atmosférica, para algunas aplicaciones se utilizan

ambientes de atmósfera inertes y condiciones de vacío a efectos de reducir los efectos de oxidación y otras formas de corrosión. Generalmente se utilizan termocuplas para monitorear la temperatura de la probeta, las que deben ser localizadas en el ligamento no fisurado dentro de los 2 a 5 mm (0.08 hasta 0.2 in) de la región alrededor del plano de la entalla. En general se recomienda aislante cerámico para aislar las líneas individuales y prevenir cortes en el circuito de temperatura.

### **Accesorios**

A efectos de soportar las probetas de ensayo en los marcos (planos) de carga se utilizan pernos y horquillas, en ambas caras (de arriba y fondo), que permiten rotar el plano durante la carga de la probeta y durante la subsiguiente extensión de la fisura. Los materiales usados en este tipo de accesorios deben ser resistentes al creep y capaces de soportar la carga y temperatura empleada. Los accesorios pueden ser fabricados desde grados 304 y 316 de acero inoxidable, grado A286 de acero, Inconel 718 e Inconel X-750 en estado recocido o con tratamientos especiales para lograr resistencia a la deformación por creep.

### **La prefisuración de la probeta a partir de la entalla**

A efectos de lograr una fisura real, es decir, campos de tensiones y deformaciones que correspondan realmente al entorno de la punta de una fisura real, es necesario generar una fisura a partir de la preentalla de la probeta compacta (ver figura 4.3). El procedimiento de prefisuración es descrito detalladamente en la norma ASTM E 399 “Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials” [8], y también brevemente en el artículo “Fracture Toughness Testing” de ese mismo volumen. La preentalla puede ser hecha entre la temperatura ambiente y la temperatura de ensayo. El equipo usado para prefisurar debería permitir que el máximo factor de intensidad de tensión durante la operación,  $K_{max}$ , pueda ser controlado en un rango de +/-5%. El procedimiento puede ser realizado a cualquier frecuencia que permita una aplicación de carga precisa y la probeta debe prefisurarse al menos una longitud  $\Delta a = 2.54\text{mm}$ . (0.100 in).

La prefisura debe ser generada a factores de intensidades suficientemente altos como para permitir la iniciación y crecimiento de la fisura a partir de la entalla pero debe tratarse de que sean lo más pequeño posible. Una vez que la fisura se ha generado se recomienda disminuir progresivamente el factor de intensidad de tensiones. Los valores de la carga para la prefisura,  $P_f$ , son determinados de manera de no exceder el siguiente valor:

$$P_f = \frac{0.4B_N(W - a_0)^2 \sigma_{YS}}{(2W + a_0)} \quad (4.1)$$

Donde  $B_N$  es el espesor corregido de la probeta,  $W$  es el ancho de la probeta,  $a_0$  es la longitud inicial de la fisura medida desde la línea de carga y  $\sigma_{YS}$  es la tensión de fluencia. Durante los últimos 0,64 mm (0,025 in) de extensión de la prefisura por fatiga, la carga máxima no debería ser más grande que la  $P_f$  determinada más arriba, ni más grande que la carga  $P$  para la cual la relación del factor de intensidad de tensión con el módulo de Young's ( $\Delta K/E$ ) es igual a  $0,0025\text{mm}^{1/2}$  ( $0,0005\text{in}^{1/2}$ ). Al hacer esto aseguramos que el la carga de prefisuración final no exceda la carga inicial usada durante el ensayo de crecimiento de fisura por creep.

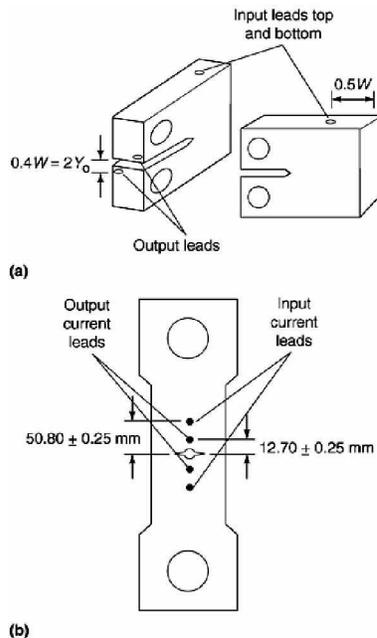
La longitud de fisura durante el preentallado puede ser medida óptimamente con un microscopio portátil, si es que el ensayo esta siendo llevado a cabo a temperatura ambiente, o mediante la técnica de caída de potencial eléctrico, si la prefisuración es realizada a elevada temperatura. La medición de la prefisura debería tener una precisión de al menos 0,1mm (0,004 in). Las mediciones deben ser hechas en ambas superficies de la probeta y los valores medidos no deben diferir en más de 1,25 mm (0,05 in). Si la superficie fisurada excede este rango, es necesario proseguir con la propagación de la prefisura hasta que esos criterios sean cumplidos.

### 4.3. Mediciones requeridas

#### ***Medición de longitud de fisura (El Método de la Caída de Potencial Eléctrico -PD- “Potencial Drop”)***

En el monitoreo de la propagación de la fisura durante el ensayo de creep a temperatura elevada, las extensiones de fisura deben resolverse al menos en intervalos de 0,1 mm (0,004 in). Debido a que las técnicas de medición ópticas dentro de un horno cerrado no son posibles y los frentes de fisura a través del espesor a veces difieren significativamente de las longitudes de superficie observada, en estos casos las mediciones de longitud de fisura son más comúnmente realizadas usando la técnica de potencial eléctrico. El método consiste en la medición de la caída de potencial que experimenta una corriente que circula por el ligamento remanente de la probeta, la cual depende de la longitud de la fisura. Al aplicar una corriente eléctrica fija, cualquier incremento en la longitud de la fisura (o lo que es lo mismo, una disminución en el ligamento remanente no fisurado) resulta en un aumento de la resistencia, la cual es notada como un aumento de la tensión de salida a través de transductores adecuados.

Los conectores de entrada de corriente y salida de tensión para probetas típicas CT y CCT son mostrados en la figura 4.4. Estos conectores pueden ser tanto soldados sobre la probeta o conectados con tornillos. La elección del método de aplicación depende del material y la temperatura de ensayo. Para materiales más blandos ensayados a temperaturas más bajas, conectores roscados podrían ser aceptables, pero para materiales más duros y especialmente a más altas temperaturas, se recomiendan conectores soldados. Los conectores deberían ser suficientemente largos para permitir que los instrumentos de medición de entrada de corriente y salida de tensión estén bien alejados del horno para evitar el calentamiento excesivo. Los conectores deberían ser también aproximadamente de la misma longitud y contener uniones similares para evitar excesiva resistencias de juntas, las cuales contribuyen a la tensión térmica  $V_{th}$  como se describe más abajo. El uso de cables de acero inoxidable de 2mm (0,08in) de diámetro ha demostrado ser adecuados debido a su superior resistencia a la oxidación a elevada temperatura. Sin embargo, cualquier material resistente a la oxidación capaz de portar una corriente que sea estable a la temperatura de ensayo puede ser utilizado como conector. Cables de níquel y cobre han sido usados satisfactoriamente como materiales de unión para temperaturas de ensayos más bajas.



**Figura 4.4. Localización de los conectores de entrada de corriente y salida de tensión**  
**a) Probeta compacta**  
**b) Probeta de tensión prefisuradas en el centro**

Al usar el método de potencial eléctrico de corriente continua, la tensión instantánea  $V$  y la tensión inicial  $V_o$  usualmente se desvían de las lecturas indicadas. Esto es debido a la tensión térmica  $V_{th}$  la cual es causada por varios factores, tales como diferencias en las propiedades de las uniones de los conectores usados, diferencias en la resistencia de los conectores de salida, longitudes de conectores de salida diferentes, y diferencia de temperatura en ellos. Las mediciones deberían ser tomadas antes de la aplicación de la carga y en varios instantes durante el ensayo. Estas mediciones son hechas apagando la fuente de corriente y grabando la tensión de salida. Antes de analizar los datos de longitud de fisura, los valores de  $V_{th}$  deberían ser restados de la respectiva  $V$  y  $V_o$  para determinar la extensión de la fisura real.

Conociendo la tensión original correcta,  $V_o$ , y la correcta variación instantánea en la tensión durante la extensión de la fisura,  $V$ , la longitud de fisura en una probeta CT puede ser computada usando la siguiente ecuación:

$$a_i = \frac{2W}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \frac{\cosh\left(\frac{\pi Y_0}{2W}\right)}{\cosh\left[\frac{V}{V_0} \cosh^{-1}\left(\frac{\cosh\left(\frac{\pi Y_0}{2W}\right)}{\cos\left(\frac{\pi a_0}{2W}\right)}\right)\right]} \right\} \quad (4.2)$$

Donde  $a_i$  es la longitud instantánea de la fisura,  $a_0$  es la longitud original de la fisura después de la preentalla,  $Y_0$  es la mitad de la distancia de separación entre los terminales de salida,  $V_o$  es la tensión de salida inicial antes de la aplicación de la carga,  $V$  es la tensión de salida instantánea, y  $W$  es el ancho de la probeta.

### ***Medición de la apertura de la boca de la fisura (COD)***

En la determinación de los parámetros de la punta de la fisura durante la duración del ensayo, son necesarias mediciones continuas del desplazamiento de los planos de la entalla en su posición más externa. Al desplazamiento relativo entre los bordes de los planos de la entalla se lo denomina comúnmente COD (crack opening displacement). Este desplazamiento corresponde a una medida proporcional al desplazamiento de la carga aplicada, pudiéndose entonces calcular el trabajo generado por esta.

La medición del desplazamiento puede ser directamente realizada conectando sobre la boca de la entalla un calibre de mordaza de alta temperatura (extensómetros para temperaturas por encima de 150°C (300°F) o sensores capacitivos para más altas temperaturas). En este caso el montaje del sistema se lleva a cabo por completo dentro del horno. Si este tipo de aparatos no está disponible, los desplazamientos pueden ser transferidos fuera del horno con un montaje de varilla y tubo que es conectada a un transductor de desplazamiento (tanto como un transductor de desplazamiento de corriente continua –DCDT-, transductor de desplazamiento de variable lineal –LVDT-, o sensor capacitivo), lo que permite montar el sensor fuera del horno. En este tipo de dispositivos de transferencia de desplazamiento las varillas y tubos deberían ser fabricados de material que experimente baja expansión térmica y sea térmicamente estable. La resolución de estos aparatos de medición de deflexión debería ser de un mínimo de 0.01 mm (0.004 in) o menor.

### ***Medición de la Carga aplicada***

La medición de la carga aplicada es necesaria para poder conocer instante a instante la fuerza a la cual está siendo sometida la probeta de ensayo. Conocer el valor exacto de la misma da la posibilidad de, mediante un sistema de control, aplicar la forma de onda de carga deseada, si se realiza un ensayo de creep combinado con fatiga.

El valor de la carga es obtenido generalmente mediante celdas de carga que, midiendo la deformación de un sólido acoplado a la línea de carga, entregan un valor analógico (en volts) proporcional a esta última, la cual, como ya sabemos es directamente proporcional a la carga aplicada.

### ***Adquisición de datos***

Las mediciones tomadas durante el ensayo, tensión de potencial eléctrico, desplazamiento de la línea de carga y ciclos de carga en los ensayos de creep-fatiga pueden ser grabados con el uso de adquirentes y acondicionadores de señales y sistemas computacionales. La resolución de estos sistemas de adquisición debería ser por lo menos de un orden de magnitud mejor que los transductores utilizados.

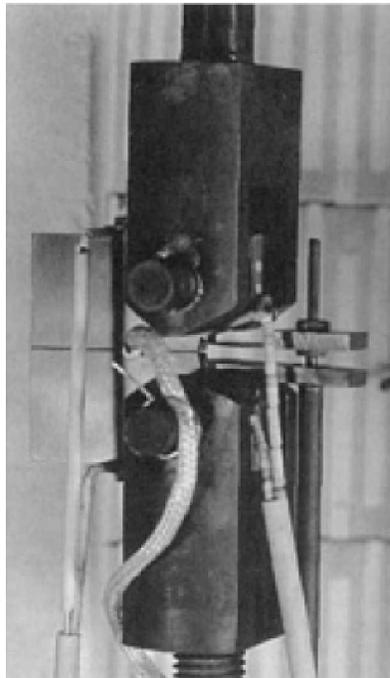
## **4.4. Procedimientos típicos de ensayo**

### ***Configuración de ensayo***

Debido a la inherente dispersión observada en la mayoría de las situaciones de ensayo, se sugiere más de un ensayo por condición para que puedan ser obtenidos intervalos confiables de datos. En los ensayos de crecimiento de fisura por creep y creep-fatiga, variables tales como diferencias microestructurales, precisión de carga, control ambiental, y, en menor grado procesamiento de datos contribuyen a dispersión observada.

Antes de la instalación en la máquina de ensayo, la probeta a ensayar debería estar equipada con los terminales de los sensores de potencial eléctrico. La superficie expuesta a los sensores, que estarán en el interior del horno, pueden ser recubiertos con aisladores cerámicos para evitar el contacto directo con los elementos del horno y otros componentes (termocuplas, extensometría, etc.). Luego de realizar las conexiones y de asegurar la probeta de ensayo en las

mordazas correspondientes, se aplica una carga leve que no supere el 10% de la carga de ensayo para mejorar la estabilidad axial del tren de carga. Las termocuplas son luego ubicadas en contacto con la probeta sobre el plano de fisura en la región de ligamento no fisurada. La figura 4.5 muestra de cerca una probeta de ensayo 0.25T-CT antes del calentamiento del horno. El horno es entonces ubicado en posición, sellado y encendido. La corriente en el sistema de potencial eléctrico debería también ser encendida durante el calentamiento del horno debido a que ocurre un calentamiento adicional debido al paso de la corriente aplicada sobre la probeta. Una vez que la temperatura de ensayo es lograda y equilibrada, la probeta es dejada temperatura de ensayo por lo menos una hora por cada 25 mm (1 in) de espesor de probeta, antes de aplicar la carga. Finalmente, deben grabarse un conjunto de mediciones en la condición descargada, a fin de poseer datos de las condiciones de referencia. Luego, la carga elegida es aplicada. Inmediatamente luego de aplicada la carga deben realizarse otro conjunto de mediciones, las cuales constituirán las condiciones iniciales de carga (tiempo = 0).



**Figura 4.5 Configuración típica de una probeta compacta (CT specimen) para ensayos de propagación de fisuras por creep-fatiga.**

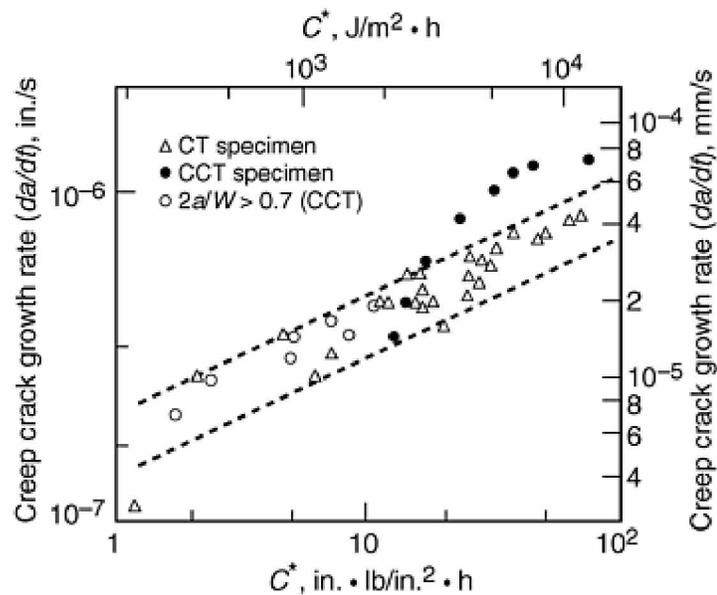
Para ensayos de crecimiento de fisura por creep-fatiga, consideraciones adicionales son dadas para la carga de la probeta debido a que se requieren ensayos cíclicos. El tiempo de mantenimiento debería ser seleccionado en conjunto con el nivel carga tal que la extensión de la fisura sea de aproximadamente 5 mm (0.2 in) durante la duración planeada del ensayo. El tiempo de mantenimiento debería ser seleccionado tal que el COD que se acumule durante el tiempo de carga máxima sea aproximadamente de tres a cinco veces la sensibilidad del sistema amplificador de desplazamiento usado. La forma de onda de la carga debería simular las condiciones de la carga de servicio.

#### ***Mediciones y cálculos post ensayo***

Una vez que el ensayo es completado, o debido a la falla de la probeta o luego de lograrse un crecimiento de fisura dado, la carga se quita, se apaga el horno, y la probeta se deja enfriar al

aire. La longitud original de la fisura (luego de la precarga) y la longitud final de la fisura (resultado del crecimiento de la fisura por creep) son medidas a nueve ubicaciones igualmente espaciadas a lo largo del frente de la fisura. Todos los datos son procesados usando programas de computación que utilizan el método de la secante o el método polinomial de siete puntos para calcular las velocidades de COD,  $dv/dt$ , velocidades de crecimiento de la fisura,  $da/dt$  y los parámetros del extremo de la fisura discutidos previamente, como el parámetro  $C^*$ . Los detalles de estos métodos pueden ser encontrados en la norma ASTM E 1457.

La figura 4.6 muestra resultados típicos de un ensayo de propagación de fisuras por creep-fatiga en un acero inoxidable 304 a 594 °C.



**Figura 4.6. Velocidad de propagación de fisuras por fatiga en función del parámetro fractomecánico  $C^*$  para un acero inoxidable 304 a 594 °C.**

# CAPITULO 5

Actualización y  
Potenciación de la  
máquina de  
ensayos.  
Descripción de la  
máquina y los  
dispositivos  
necesarios

## CAPITULO 5

# **Actualización y Potenciación de la máquina de ensayos**

## **Descripción de la máquina y los dispositivos necesarios**

### **5.1. Introducción**

El objetivo principal de este trabajo es el avance en la puesta en funcionamiento de una máquina de ensayos de creep y creep-fatiga y los dispositivos de medición, control y adquisición necesarios para realizar los ensayos según la norma ASTM E 1457-00. Para esto se partió de una máquina de ensayos por creep existente pero fuera de servicio, con algunos dispositivos faltantes y otros obsoletos. A continuación se describe el funcionamiento básico de la máquina de ensayo, los dispositivos necesarios para la medición, control y adquisición de las variables de ensayo, y finalmente el estado de dichos sistemas y las tareas que se desarrollaron en el marco del presente trabajo. La Figura 5.1 muestra una fotografía de la máquina y la Figura 5.2 es un diagrama con detalles y esquemas de los dispositivos de ensayo.

### **5.2. Funcionamiento de la máquina de creep utilizada**

Como se muestra en la Figura 5.1, la máquina de creep cuenta con un sistema básico de palanca con un dispositivo para soportar discos calibrados de distintos pesos pero de igual diámetro por lo cual son de diferentes espesores. Estos son los responsables de aplicar la carga en uno de los extremos de la palanca como peso muerto, por lo antes explicado, la máquina es del tipo de control por carga.

La máquina cuenta además con un horno donde se coloca la probeta a ensayar ensamblada a la línea de carga mediante dos agarres o grips. La temperatura de este horno debe estar controlada y mantenida durante el ensayo con una precisión de +/- 0.5%. La misma en este caso es sensada por medio de termocuplas que se ubican dentro del horno, y seteada en el controlador, antes del ensayo.

El horno<sup>II</sup> está compuesto por una aislación de fibra cerámica compactada de baja inercia térmica y recubierto internamente por ladrillo refractario. El gabinete esta construido de acero inoxidable.

A su vez el horno se encuentra comandado por un controlador<sup>III</sup> marca Schaevitz MP-1000 que es el que comanda la temperatura del mismo.

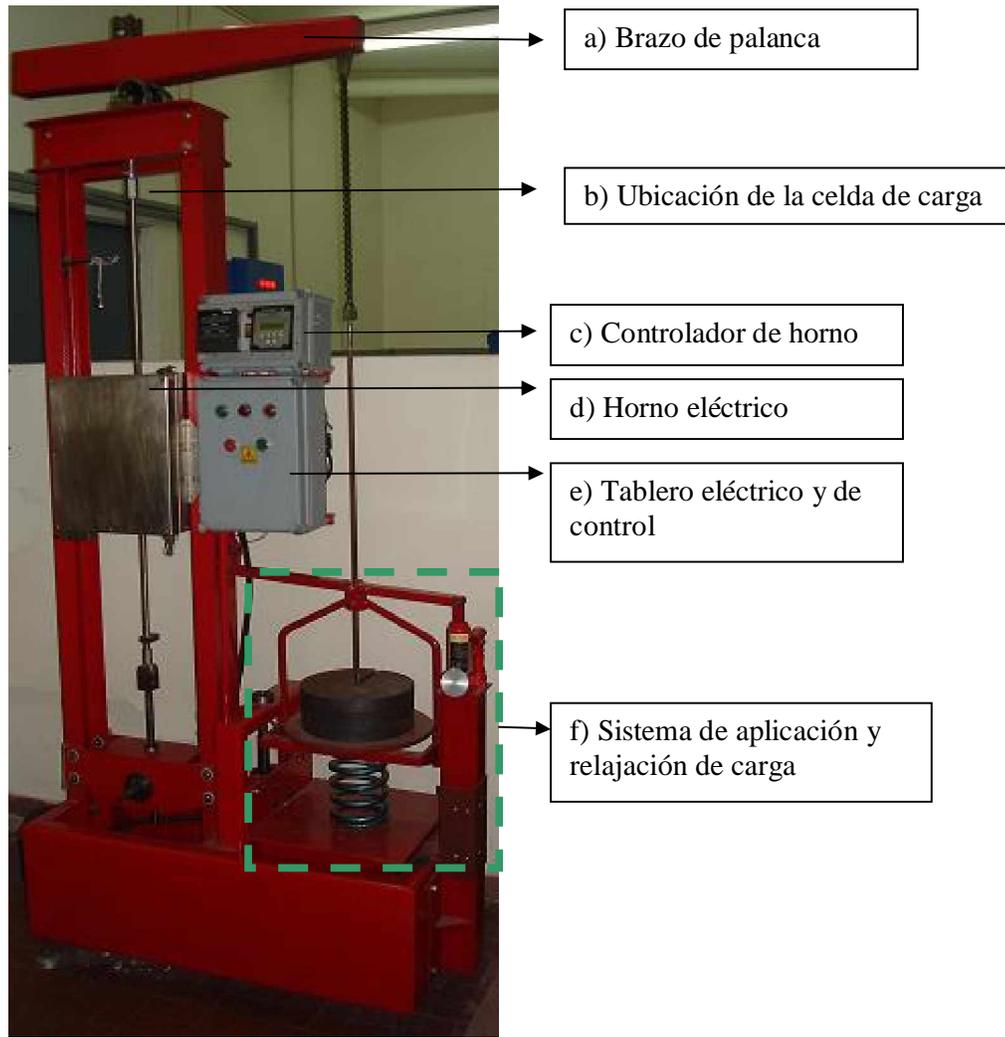
La fuente de alimentación tanto para el horno como para el controlador es de corriente alterna estándar (220 VAC). Los datos de la salida (temperatura instantánea de ensayo) pueden ser vistos en la exhibición del LCD que posee el dispositivo controlador de temperatura.

A fin de lograr aplicar cargas cíclicas con ciclos de rampas regulables, fue necesario desarrollar y construir un dispositivo basado en la estructura existente. La aplicación de la carga debió ser automatizada mediante la implementación de un módulo lógico que utiliza una entrada analógica proveniente de una celda de carga y un acondicionador de señales (no existentes al momento de iniciar el proyecto). Este dispositivo lógico deberá controlar el incremento, mantenimiento o disminución de carga, como así también contará la cantidad de ciclos de la misma.

---

<sup>II</sup> Ver anexo J para más información

<sup>III</sup> Ver anexo J para más detalle



**Figura 5.1. Fotografía y ubicación de las partes principales de la máquina**

El sistema también requiere realizar la medición de la apertura de la boca de la fisura, lo que se lleva a cabo con un dispositivo mecánico telescópico que permite medir dicha apertura utilizando instrumentos fuera del horno. Si bien existía un dispositivo diseñado y construido para este fin, pruebas realizadas hace 15 años mostraron ineficiencia en su funcionamiento, lo que requirió la consideración del diseño de un nuevo prototipo. A modo de resumen, podemos decir que el dispositivo diseñado en este trabajo está compuesto por una varilla y tubo cuya parte superior, compuesta por dos cuchillas, es solidaria a la probeta de manera de poder ir midiendo instantáneamente la apertura de la boca de la fisura. Para poder hacer esta medición se acopló el núcleo de un LVDT en la parte inferior de la varilla interior, mientras que la carcasa de aquel queda solidaria al tubo exterior, produciendo así un movimiento relativo entre carcasa y núcleo que copia fielmente el movimiento relativo entre tubo externo y varilla. Veremos en más detalle este tema en el próximo capítulo.

En relación con este último dispositivo, vale aclarar que para evitar la presencia de un gran número de elementos accesorios, se decidió utilizar un LVDT que pueda ser alimentado

directamente con una tensión continua y que a su vez entregue de manera directa (sin paso por amplificadores o rectificadores) una tensión también continua proporcional al desplazamiento, la cual puede ser directamente ingresada a una placa de adquisición.

Otra de las mediciones requeridas por el ensayo instante a instante, es la longitud de la fisura. Para ello se contaba con un sistema que utilizaba el método de caída de potencial (Potencial Drop, PD). Este método se basa en hacer circular una corriente eléctrica por la probeta fisurada, cuyo valor será una función de la geometría de la muestra y del tamaño de la fisura. La caída de tensión que atraviesa el plano de la fisura se incrementará con el incremento del tamaño de la misma debido a una modificación del campo eléctrico y a una perturbación asociada a las líneas de corriente. El cambio de tensión puede ser relacionado con el tamaño de la fisura a través de relaciones de calibración analíticas o experimentales. La técnica para realizar la medición está compuesta principalmente por un multímetro digital y una fuente de corriente que son comandados por los dispositivos del sistema de adquisición y control. El método de PD, al inicio del trabajo, no se encontraba en funcionamiento debido a que el sistema de adquisición y control (que en el caso del PD funciona controlando el mismo) no se encontraba en funcionamiento. Al no poder ser recuperados por su avanzado estado de destrucción y su obsolescencia, se debió comenzar a elaborar un plan de tareas para la adquisición y construcción de los componentes necesarios.

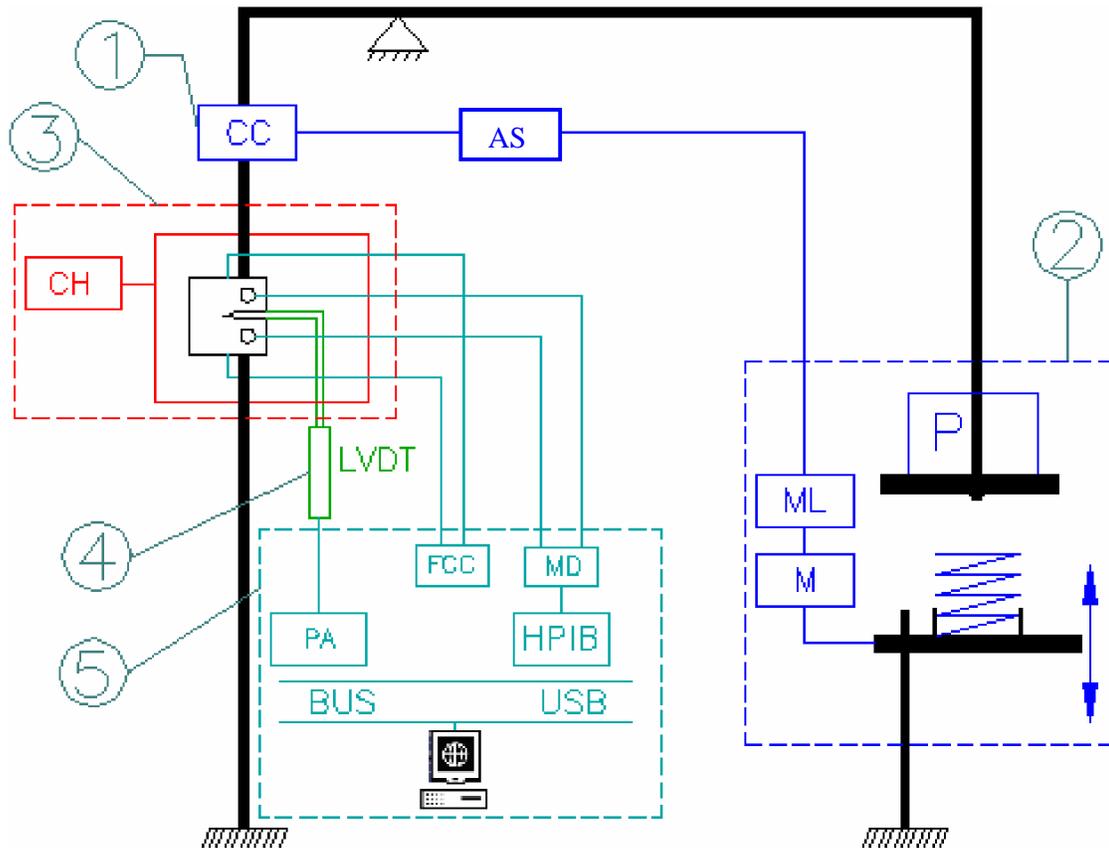
El equipo de ensayo se completa con un sistema de adquisición, control y análisis de datos utilizando una PC, donde se almacenan los datos medidos y calculados durante el ensayo. Este sistema está compuesto por un programa de PC, que setea los parámetros iniciales de ensayo y realiza los cálculos necesarios. El programa se comunica con los dispositivos de la máquina mediante dos placas, una HPIB y una adquisidora. La primera, envía al programa el valor de la caída de tensión medido por el multímetro digital del sistema de caída de potencial (PD). En tanto, la placa adquisidora recibe el dato de la apertura de la boca de la fisura medido por un LVDT colocado en el dispositivo para tal fin. Además de esta función, esta placa es la encargada de dar la orden a la fuente de corriente para enviar un pulso de corriente a la probeta produciendo la caída de potencial medida por el multímetro ya nombrado. El sistema deberá además adquirir los valores de carga en el tiempo.

Con estos valores medidos se logra mediante el programa calcular la longitud de fisura y trazar las curvas de este valor en función del tiempo, velocidades de propagación y cualquier otra curva que sea necesaria.

### **5.3. Breve descripción de las tareas generales desarrolladas**

En la Figura 5.2 puede verse un diagrama general de la máquina de ensayo con los sistemas que la componen. A esta máquina, diseñada para realizar ensayos de propagación de fisuras por creep, se le debió realizar modificaciones para transformarla de manera tal de poder llevar a cabo ensayos de creep-fatiga, con lo cual es necesario, como ya se dijo, poder aplicar ciclos de carga y controlar los parámetros de dicho ciclo, como ser: tiempo de permanencia de las cargas máximas y mínima por ciclo y rampas de carga y descarga.

Por otro lado, la máquina, construida hace 15 años y fuera de servicio, poseía parte de sus sistemas descompuestos, otros obsoletos, y otros ausentes o inadecuados. Luego de su construcción, la máquina de ensayo solo se logró utilizar en un ensayo, donde se detectaron fallas en algunos dispositivos que debían rediseñarse, como el sistema de medición de la apertura de la boca de la fisura (Sistema de medición de COD).



**Figura 5.2. Diagrama general de la máquina**

A continuación se resumen las condiciones de los distintos dispositivos de la máquina de ensayo y las tareas que se realizaron en este trabajo para avanzar en su puesta en funcionamiento.

**(1)- Sistema de medición de la carga.** La máquina no contaba con este elemento, por lo que tuvo que ser diseñado e implementado en la máquina de ensayo. Es un dispositivo que sensa la fuerza aplicada, y consta de una celda de carga y de un acondicionador de señales.

**(2)- Sistema automático de aplicación y variación de carga.** Al momento del inicio del trabajo, la máquina no poseía un sistema automatizado para la aplicación de la carga, por lo que tuvo que ser diseñado e implementado. El nuevo sistema cuenta con un dispositivo mecánico, que utiliza la estructura existente y un dispositivo de sostén de las pesas al aplicarlas, también existente en el diseño inicial. Este se complementa con el sistema de medición de carga, un motor eléctrico y un módulo lógico que controla el dispositivo mecánico.

El sistema consta entonces de cinco partes principales: la celda de carga anteriormente mencionada, el acondicionador de señales, el módulo lógico que recibe una señal proporcional a la fuerza aplicada y la controla, un motor eléctrico trifásico marca Corradi cuya potencia es de 0,37 Kw y el dispositivo donde es colocada la carga. El motor trabajará según lo decida el módulo lógico moviendo en dirección ascendente o descendente el dispositivo de aplicación de carga, liberando, aplicando o manteniendo la misma, como se indica esquemáticamente en la Figura 5.2.

**(3)- Sistema de Horno y Controlador de horno.** Este es el único sistema que se encontraba en buen estado y en funcionamiento en el momento del inicio del proyecto, lo que se realizó fue una verificación de los mismos con termocuplas externas al controlador, dando como resultado un funcionamiento adecuado.

**(4)- Dispositivo para la medición de la apertura de la boca de la fisura (COD).** Este sistema, si bien existía, debió ser desechado porque las pruebas iniciales habían mostrado su ineficacia. Por esto es que se debió diseñar y calcular uno nuevo siguiendo las recomendaciones de la norma E1457-00

**(5)- Sistema de adquisición de datos y cálculo de parámetros de ensayo.** Por un lado, este sistema está compuesto por los elementos encargados de realizar la medición de caída de potencial (Potencial Drop – PD) para la medición de la longitud de fisura y por otro lado se encuentran las placas adquisidora y HPIB, que con el software de adquisición y control, completan este subgrupo de elementos.

Este sistema se encontraba obsoleto y sin posibilidad de ser recuperado, incluidas las placas de adquisición y el software de adquisición y control. El mismo fue analizado y se definieron nuevas características para su construcción, que quedará en manos de especialistas. En el próximo capítulo se describen algunos análisis realizados, las características generales de las placas de adquisición necesarias, y un resumen del funcionamiento del sistema y del programa de adquisición y control.

En el próximo capítulo se podrá ver en detalle las tareas desarrolladas sobre los dispositivos de la máquina de ensayos. Se trabajó fundamentalmente sobre los sistemas 1, 2, y 4. Los sistemas 1 y 4 requirieron la mayor atención debido a que debieron ser diseñados y/o construidos. El sistema 2 se encuentra construido en su totalidad, mientras que el sistema 4 se ha diseñado, para una construcción en el corto plazo y su puesta a punto.

Es necesario remarcar que este trabajo requirió, además del estudio del fenómeno de propagación de fisuras por creep y de los temas asociados a las técnicas y metodologías involucradas, conocer lo referente a los problemas y conocimientos técnicos asociados con los distintos dispositivos y equipos utilizados. Ejemplos de temas que se han tenido que estudiar para su aplicación son: extensometría eléctrica, diseño de celdas de carga, sistemas de medición de desplazamientos (LVDTs), programación de módulos lógicos, conocimiento general de circuitos eléctricos, entre otros.

# CAPITULO 6

## Actualización y Potenciación de la Máquina de Ensayos Tareas Desarrolladas

CAPITULO 6

## Actualización y Potenciación de la Máquina de Ensayos Tareas Desarrolladas

En este capítulo se detallan las tareas desarrolladas correspondientes a cada uno de los dispositivos del equipo de ensayo.

### 6.1. Sistema de control de carga

Como fue mencionado en el capítulo anterior, la carga es aplicada mediante un sistema de brazo de palanca y peso muerto (tipo balanza), mediante la utilización de pesas calibradas de distintos valores, representado en la figura 6.1 como P. A fin de lograr aplicar cargas cíclicas con ciclos de rampas regulables, se desarrolló y construyó un dispositivo que se basó en el que contenía la máquina para sostener las pesas antes de ser aplicadas. La aplicación de la carga fue automatizada mediante la implementación de un modulo lógico (ML) que utiliza una entrada analógica proveniente de la celda de carga (CC) y un acondicionador de señales (AS). Este dispositivo lógico comanda el motor eléctrico (M), controlando el incremento, mantenimiento o disminución de carga, como así también cuenta la cantidad de ciclos aplicados a la muestra en estudio.

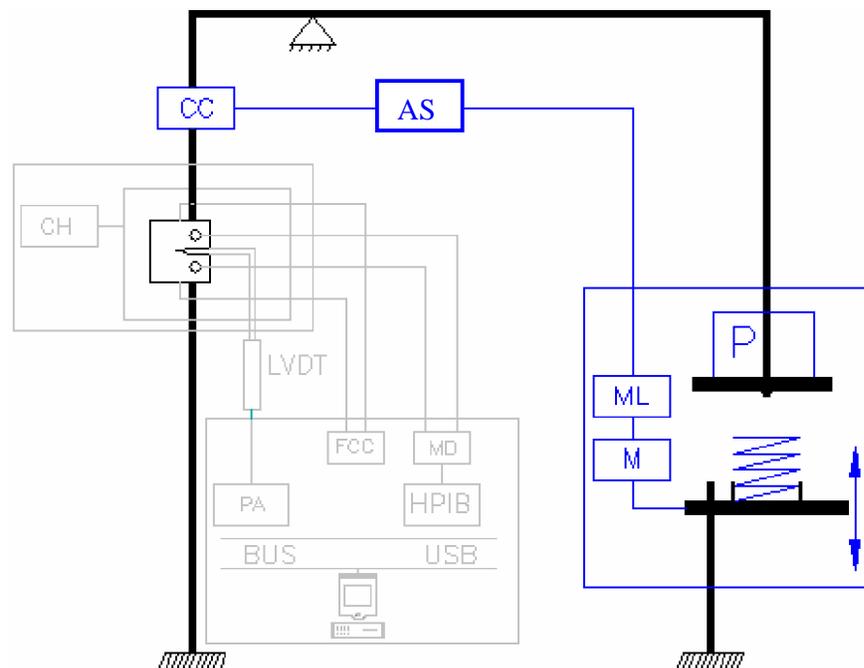
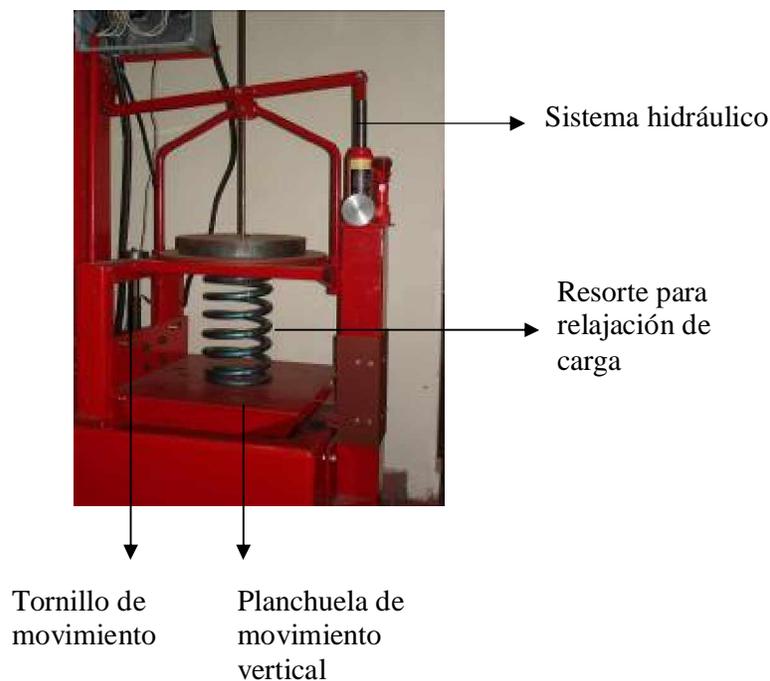


Figura 6.1. Representación esquemática de la máquina-Sistema de control de carga

### 6.1.1. Descripción general del sistema mecánico

Como es necesario aplicar ciclos de fatiga, se utilizó un sistema que aplique y relaje de carga en forma cíclica, el cual se ubica debajo del dispositivo que sostiene la carga. Este mecanismo consta de un resorte dispuesto en forma vertical, ubicado sobre una planchuela que puede realiza un movimiento vertical de ascenso y descenso, liberando y aplicando carga respectivamente. El movimiento vertical de dicha planchuela se realiza con un tornillo de movimiento impulsado mediante un reductor a la salida de un motor eléctrico como se muestra en la figura 6.2.

En esta última también se observa el sistema de aplicación hidráulico, de manera que la primera aplicación de carga sobre la probeta, sea lo más estática posible, de forma de no producir deformación plástica inicial que pueda afectar las conclusiones finales del ensayo.

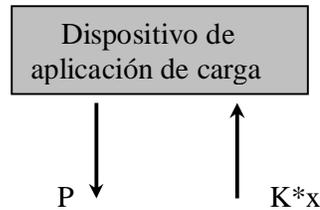


**Figura 6.2. Sistema de relajación y aplicación de carga**

Una vez aplicada la carga en el dispositivo para este fin, todo el tren de carga que va desde el peso aplicado hasta la línea de carga, pasando por la probeta, sufre una deformación que no es posible calcular analíticamente, pero que afectará al sistema. Llamaremos de aquí en adelante a esta deformación  $\Delta L$ . Esta deformación es importante tenerla en cuenta en el momento en que comienza a trabajar el resorte en forma cíclica.

El resorte, controlado mediante el sistema automático de carga, libera parte de la fuerza aplicada hasta un determinado límite mínimo, manteniendo dicha carga por un lapso de tiempo dado por el instante en el que el sistema inicia su descenso. Este descenso realiza el trabajo opuesto, aplicando la carga hasta alcanzar nuevamente el valor máximo seteado en el módulo lógico.

Suponiendo aplicada la carga máxima, desde el instante en que el resorte comienza a tener contacto con el sistema de aplicación de carga, se tiene sobre este último, el siguiente diagrama de cuerpo aislado:



Donde:

P: carga aplicada

K\*x: efecto de relajación del resorte

$x = n \cdot p$  = reducción de la longitud del resorte

Con:

p: paso del tornillo de movimiento

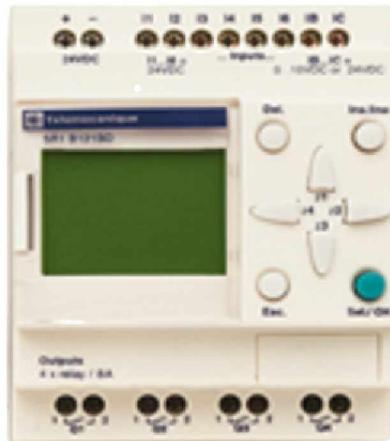
n: vueltas del reductor

K: constante del resorte y sistema

Aquí es donde es importante la aclaración de que la probeta no verá una liberación de carga solo proporcional a  $K \cdot x$ , sino que la misma será proporcional  $K \cdot (x - \Delta L)$ , ya que parte del movimiento del resorte se invierte en anular la deformación producida en la línea de carga por el peso muerto, y no solo en la liberación de la carga aplicada por la acción de la carga de soporte provista por el resorte (que debe deformarse para lograrlo). Como la constante del resorte también puede cambiarse (cambiando el diseño del resorte), y de esta manera es posible variar las rampas de cargas y descargas, es necesario independizarse de la influencia del tren de carga en el cálculo del accionamiento mecánico necesario para aplicar una determinada variación de carga. Se pensó entonces en el desarrollo de un sistema cerrado que defina el tiempo de accionamiento del motor utilizando la medición directa de la carga aplicada mediante una celda de carga ubicada en la línea de carga principal. De esta manera el dispositivo puede controlar en forma automática el rango de carga aplicado cíclicamente. Para poder realizar la acción se pensó en utilizar un módulo lógico de control, el que se describe a continuación.

### 6.1.2. Módulo lógico

Para llevar adelante en la automatización del sistema de control del ciclo de carga, se utilizó un Zelio, nombre comercial del módulo lógico programable de la marca Telemecanique cuyo principal objetivo es facilitar el cableado eléctrico de soluciones inteligentes con una instalación muy sencilla. El mismo se muestra en la figura 6.3.



**Figura 6.3. Módulo lógico utilizado para automatizar el sistema de carga.**

En el momento de la elección del tipo de módulo, se tuvieron en cuenta los requisitos que debía luego cumplir el programa, los cuales son:

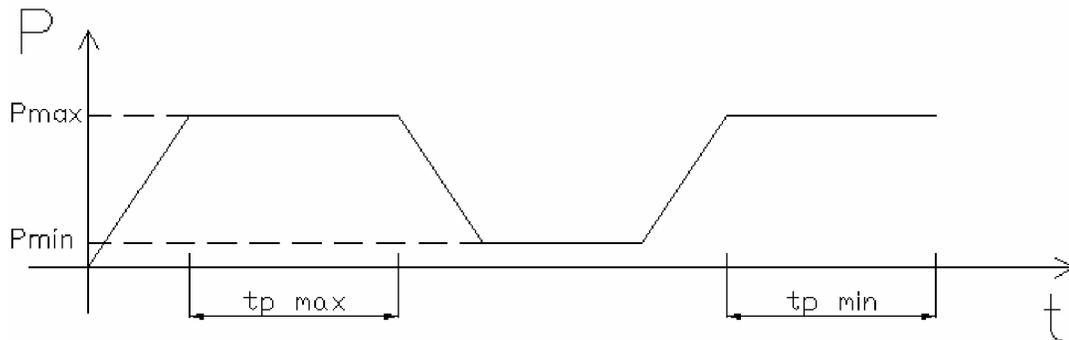
- Poder someter a la probeta a un ciclo de carga, manteniendo el peso máximo y el mínimo aplicados por un lapso de tiempo determinado el cual pudiera ser modificado según necesidades del ensayo.
- Contar la cantidad de ciclos aplicados.

El primer punto hace necesario que el módulo cuente con una entrada analógica, la cual sea proporcional instantáneamente a la carga que se aplica. También debe contar con 2 temporizadores, uno para mantener el tiempo de carga máxima y otro para mantener el tiempo de carga mínima, dado que suelen ser tiempos diferentes. Por último, el segundo punto implica la utilización de un contador.

La carga aplicada se obtiene mediante una celda de carga descrita más adelante, la cual, a través de un acondicionador de señal, brinda un valor de tensión en volts (es decir, un valor analógico), proporcional a la fuerza que se aplica sobre ella (fuerza efectivamente aplicada a la probeta).

Por estos requisitos se seleccionó el módulo SR1-B121BD<sup>IV</sup>, pues es el modelo que cuenta con al menos una entrada analógica entre 0 y 10V, pudiendo mediante su software crear un programa que actúe en base a un cambio externo de dicho valor. En nuestro caso se configuró de manera que para cierto valor de tensión máximo, que está directamente ligado con la carga máxima aplicada, se pare el motor que aplica peso y dicho peso sea mantenido durante un tiempo determinado. Así mismo, cuando se tenga en la entrada analógica el valor mínimo (carga mínima) el motor debe parar, esperando un intervalo de tiempo dado. Esta carga mínima corresponde al “piso” del ciclo de carga aplicado. La figura 6.4 muestra la forma de onda del ciclo de carga aplicado.

<sup>IV</sup> Ver características técnicas del módulo en anexo C



**Figura 6.4. Esquema con el ciclo de carga**

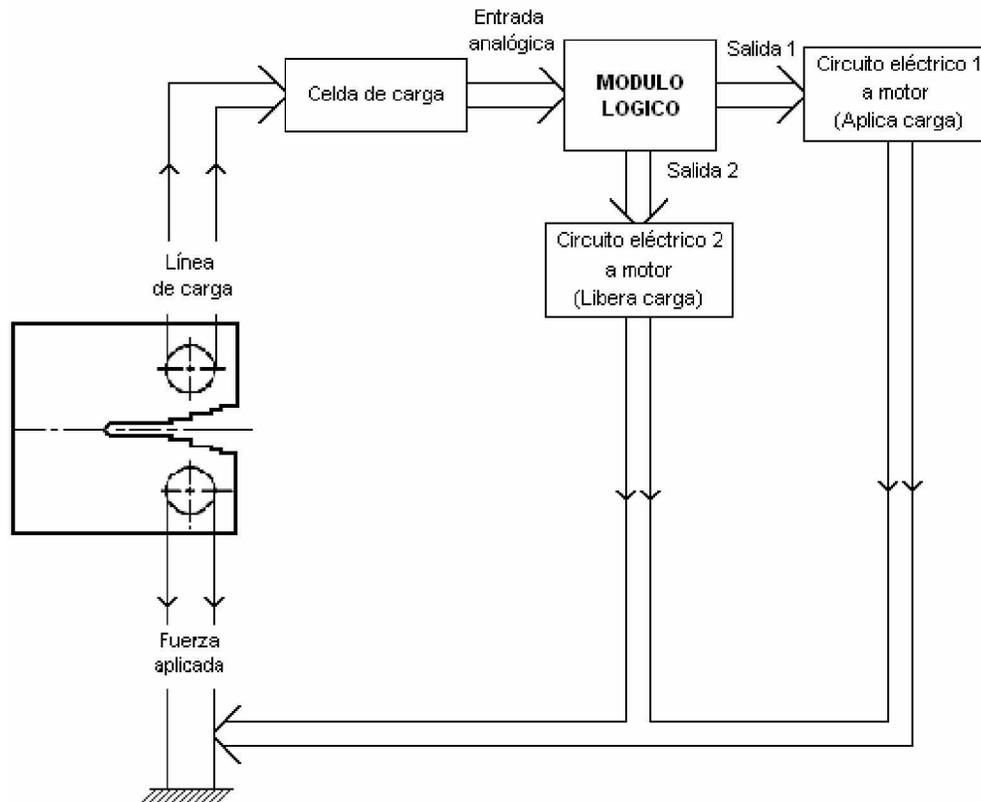
Estos valores, tanto de periodos de tiempo de carga máxima y mínima, como así también los valores de la entrada analógica para que el módulo actúe, son de fácil variación desde el mismo relé, pudiendo ir adaptando el software programado según el ensayo. También es posible, mediante un menú de visualización que posee el módulo, ir leyendo en el momento la cantidad de ciclos de carga aplicados, siendo esto una gran ventaja en el momento de cómputo de datos.

Se programó entonces el soft mediante un simulador de PC, para luego transferir dicho programa al hardware, poniéndolo luego en marcha sobre la máquina para la verificación de su correcto funcionamiento.

El programa cuenta con 3 entradas: 2 entradas TON (todo o nada) y una entrada analógica. Una de las entradas TON es para el encendido del sistema, el cual actuará (aplicará o liberará carga) dependiendo del valor de la entrada analógica en ese momento. La otra entrada TON es para el apagado al momento de finalizar o necesitar interrumpir el ensayo, y la entrada analógica que hace aplicar, liberar o mantener carga.

Se trabajó luego con dos salidas, de manera que estas interrumpen un circuito que da alimentación a contactores, los cuales alimentan a las bobinas del motor de manera de hacerlo girar en un sentido u otro, pudiendo así aplicar o liberar peso sobre la probeta.

### 6.1.3. Diagrama de flujo de funcionamiento del programa



**Figura 6.5. Diagrama de flujo del el ciclo de carga**

La carga aplicada a la probeta es convertida a un valor de tensión mediante la celda de carga y un acondicionador de señales para puente Wheatstone, señal que el módulo lógico utiliza como valor de decisión. A partir de este valor, el módulo decidirá si debe alimentar al circuito eléctrico 1 o 2, aplicando o liberando carga para luego realimentar el sistema mediante la celda antes mencionada y volver a realizar el ciclo.

### 6.1.4. Celda de carga

A fin de poder medir la carga aplicada en el tiempo, fue necesario diseñar y construir una celda de carga<sup>V</sup>, la cual fue ubicada en serie con la probeta, en el tren principal de carga (ver Figura 6.1). La decisión de diseñar y construir una celda de carga se debió a la dificultad de comprar una en tiempo y forma y a la posibilidad de construirla por contar con personal con el conocimiento necesario para el supervisado de dichas tareas. El tipo de celda requerida (compacta, circular, tipo probeta de tracción) no es común en el mercado, por lo que su adquisición requiere meses y costos elevados.

<sup>V</sup> Para más detalle sobre teoría aplicada ver punto D del anexo

La celda de carga fue realizada a partir de una barra de aluminio Camplo e instrumentada con extensómetros eléctricos formando un puente Wheatstone, para luego pasar a través de un amplificador y obtener el resultado deseado.

### **Diseño de la celda de carga**

La celda de carga debía ubicarse en una posición que estuviera alejada lo más posible del calor generado por el horno. Se decidió hacer una primera prueba con un diseño de un elemento de tracción, con la forma de una probeta, para lo cual debió diseñarse de tal manera de poder intercalarla en el tren de carga sin modificar su longitud. Luego de elegirla se pasó a la etapa de elección y verificación del material, para la cual había varias posibilidades: el mismo material que la línea de carga (acero inoxidable), aluminio u otros.

Ante la experiencia del personal técnico y una evaluación analítica, se decidió confeccionarla de una material con menor módulo elástico, E, que la línea de carga, para así tener a igual área y carga (igual  $\sigma$ ) una deformación mayor en la celda, teniendo así mayor sensibilidad de medida.

Se inclinó la elección por aluminio, utilizándose un tipo de aluminio conocido en el mercado como Aluminio Camplo, cuyo nombre técnico es Aluminio 2005 T3<sup>VI</sup>, el cual es una aleación de aluminio, cobre y plomo como principales aleantes, trefilada y envejecida naturalmente. Este tipo de aluminio tiene dos características fundamentales, excelente maquinabilidad y alta resistencia.

El máximo diámetro que podía tener la celda era de 16mm, que es el diámetro de la línea de carga conformada de acero inoxidable, pero para poder aumentar más la sensibilidad del instrumento, se pensó en reducir esta medida. Para ello se hicieron algunos cálculos, determinando que la sección más favorable para sensibilidad y seguridad es de 10mm

### **Cálculos para diseño de celda de carga**

Los cálculos realizados están basados en determinar la deformación que sufrirá el extensómetro, la cual, como se explica en punto E del anexo, es la manera de obtener la deformación del sólido sobre el cual este trabajando.

Se decidió hacer un primer cálculo con una sección de 10mm de diámetro, para obtener el valor de deformación que sufrirá la celda de carga y ver si está dentro de los valores aceptables, debiendo verificar que la tensión aplicada esté por debajo de la tensión de fluencia del material pero que a su vez produzca una deformación que pueda ser fácilmente detectada por el sistema.

Tomando una carga máxima de 1000Kg aplicada a la probeta tenemos:

Calculando la tensión  $\sigma_{\max} = \frac{P_{\max}}{A} = \frac{1000kg}{\pi \cdot r^2} = \frac{1000kg}{\pi \cdot (5mm)^2} = 12,73 \frac{kg}{mm^2}$ , vemos que su valor esta muy por debajo de la tensión de fluencia, casi con un factor de seguridad de 2 y de esta

manera,  $\epsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} = \frac{12,73 \frac{kg}{mm^2}}{7500 \frac{kg}{mm^2}} = 1697,65 * 10^{-6} \epsilon$  (1700  $\mu\epsilon$ ) un valor que esta dentro del rango

el cual puede ser fácilmente detectado por este método.

Este valor de deformación producirá en el extensómetro que esté midiendo según el mismo eje de la aplicación de la carga un valor de  $\frac{\Delta R}{R} = k\epsilon_{\max} \approx 2 * 1697,65 * 10^{-6} = 3395,3 * 10^{-6}$

<sup>VI</sup> Ver especificaciones del material en el anexo E.

A fin de maximizar la sensibilidad de la celda de carga se utilizó un puente Wheatstone completo sobre ella, utilizando 4 extensómetros (método de puente completo, autocompensado por temperatura). Para obtener una mayor sensibilidad los 4 extensómetros que conforman el puente fueron colocados de la siguiente manera: dos de ellos en dirección longitudinal, en coincidencia con el eje de la línea de carga, de tal manera de que experimenten una elongación longitudinal, y otros dos fueron colocados transversalmente de manera de que por Poisson experimenten compresión en el sentido de mayor sensibilidad del extensómetro, lo que la convierte en deformación “negativa”. De la ecuación (13) del anexo D, todos los términos quedan sumando aumentando la sensibilidad del elemento:

$$\Delta V = \frac{V_{aplicado}}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{V_{aplicado}}{4} \left( 2 \frac{\Delta R_1}{R_1} - (-)2 \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) = \frac{V_{aplicado}}{4} \cdot 2K(\epsilon_{xx} + \nu\epsilon_{xx}) =$$

$$= \frac{V_{aplicado}}{4} 2K\epsilon_{xx}(1 + \nu) = \frac{V_{aplicado}}{2} K\epsilon_{xx}(1 + 0,33) =$$

$$= \frac{V_{aplicado}}{2} * 2 * 1697,65 * 10^{-6} * 1,33 = \boxed{2257,87 * 10^{-6} * V_{aplicado}}$$

Para la resolución anterior se tuvo en cuenta un valor de  $K=2$ , que como se muestra en el anexo D es un valor común de factor de sensibilidad.

La forma de unir la celda a la línea de carga fue mediante dos encastres roscados de acero inoxidable de 20 mm, uno en la parte superior y otro en la parte inferior como muestra la figura 6.6.



**Figura 6.6. Fotografías de celda de carga y encastres roscados**

Una vez finalizado el proceso de mecanizado se continuó con la instrumentación, instalando y conectando los Strain Gages (extensómetros) adecuadamente. Estos Strain Gages son marca Vishay, del Measurements Group, Inc y sus características son:

- Tipo: EA-06-125AD-120
- Resistencia en ohms a 24°C: 120,0±0,15%
- Gage factor a 24°C: 2,07±0,5%
- Sensibilidad transversal: (+1,2±0,2)%

La serie EA de extensómetros, es una serie ampliamente utilizada en el análisis experimental de tensiones, que pueden trabajar en un rango de  $-75^{\circ}\text{C}$  a  $175^{\circ}\text{C}$  para mediciones estáticas. Tienen un límite de deformación de aproximadamente  $3000\ \mu\epsilon$ .

La Figura 6.7 muestra la celda de carga con los extensómetros instalados.



**Figura 6.7. Fotografía de celda de carga con extensómetros**  
**Vista de extensómetros longitudinales**  
**Vista de extensómetros transversales**

Por último, se conectaron los extensómetros formando un puente Wheatstone y se los cubrió mediante un tubo de aluminio de manera de protegerlos de cualquier golpe o vibración externa, la disposición final de la celda es como se muestra a continuación:

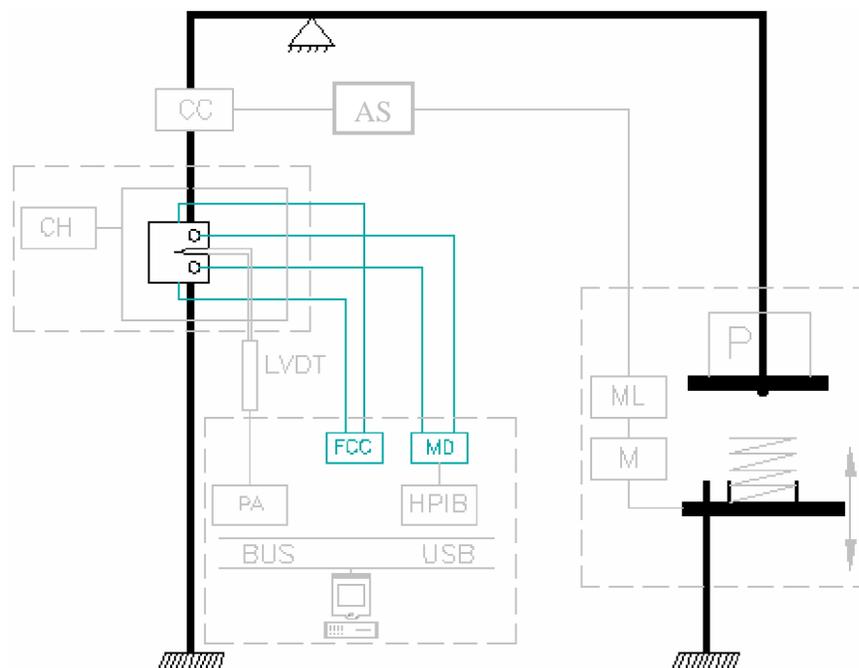


**Figura 6.8. Fotografía de celda de carga terminada**

El acondicionador de señales elegido y adquirido para el sistema de medición de carga tiene salidas analógicas ( $\pm 10\text{V}$ ) para la alimentación del módulo lógico, y una señal digital que será utilizada por el sistema de adquisición.

## 6.2. Sistema de medición de la longitud de fisura

Para realizar la medición de la longitud de fisura instantánea se implementó el método de caída de potencial (Potencial Drop). Este método se basa en hacer circular una corriente eléctrica por la muestra, cuyo valor será una función de la geometría de la misma y del tamaño de la fisura. El valor de tensión puede ser relacionado con el tamaño de la fisura a través de relaciones de calibración analíticas o experimentales. El sistema para realizar la medición está compuesto principalmente por un multímetro digital (MD) y una fuente de corriente continua (FCC) que son comandados por los dispositivos del sistema de adquisición, control y cálculo de datos, figura 6.9.



**Figura 6.9. Representación esquemática de la máquina-Sistema de medición de longitud de fisura**

El sistema completo, explicado con más profundidad en el punto 6.4, es el encargado de inyectar una corriente continua e instantáneamente tomar una medición de caída de tensión en el ligamento remanente de la probeta, induciendo mediante cálculos el valor de la fisura instantánea. Este método es conocido como método de Potencial Drop.

El método de la caída de potencial, Potencial Drop, se basa en determinar el tamaño de la fisura con mediciones de potencial eléctrico sobre el principio que el campo eléctrico en la muestra fisurada, con un flujo de corriente a través de esta, es una función de la geometría de la muestra, y en particular del tamaño de la fisura. Para un flujo de corriente constante, el potencial eléctrico o la caída de tensión que atraviesa el plano de la fisura se incrementará con el incremento del tamaño de la fisura debido a una modificación del campo eléctrico y a una perturbación asociada a las líneas de corriente. El cambio de tensión puede ser relacionado con el tamaño de la fisura a través de relaciones de calibración analíticas o experimentales.

Los procedimientos de diferencia de potencial eléctrico (PD) para la determinación del tamaño de la fisura son aplicables prácticamente a cualquier material conductor eléctrico en una amplia gama de ambientes de prueba. Los materiales no conductores pueden ser ensayados usando el método de potencial eléctrico con un accesorio firme de papel conductor o una película, y tratándola como una muestra réplica. Este método es aceptable siempre y cuando esa película duplique la fisura en la muestra de ensayo, y la película no altere la propiedad de velocidad de crecimiento de la fisura de fatiga de la muestra de ensayo.

El sistema para realizar la medición está compuesto principalmente por un multímetro digital y una fuente de corriente que son comandados por los dispositivos del Sistema de Adquisición, Control y Cálculo de datos (punto 6.4)

A continuación se explican y describen los elementos seleccionados para formar parte de dicho sistema:

### **Multímetro digital**

Es el elemento encargado de medir la caída de tensión producida por el impulso de corriente que circula por el ligamento remanente de la probeta.

Se cuenta con un multímetro Agilent 34401A, figura 6.10, el cual posee una escala con fondo de 100mV, que es la escala que se utilizará para el ensayo, en la cual el instrumento posee una resolución de 100nV, lo que lo hace que pueda ser utilizado tranquilamente en el ensayo, pues nos brinda una resolución de 0,0001 %, resultando entonces en una resolución de medición de longitud de fisura acorde a lo necesario por norma de manera que el ensayo tenga validez.



**Figura 6.10. Multímetro utilizado en el sistema de adquisición de datos**

### **Fuente de corriente**

Es el elemento que inyectará el pulso de corriente con el valor seteado en el momento que la placa adquisidora le envíe la orden de realizar dicha acción.

Esta etapa es realizada con una fuente de corriente HP 6451A. La misma puede ser controlada desde el panel frontal o bien mediante un soft como nuestro caso.

Las características de la misma son las siguientes:

- Salida de voltaje: 0 a 8V
- Salida de corriente: 0 a 20A

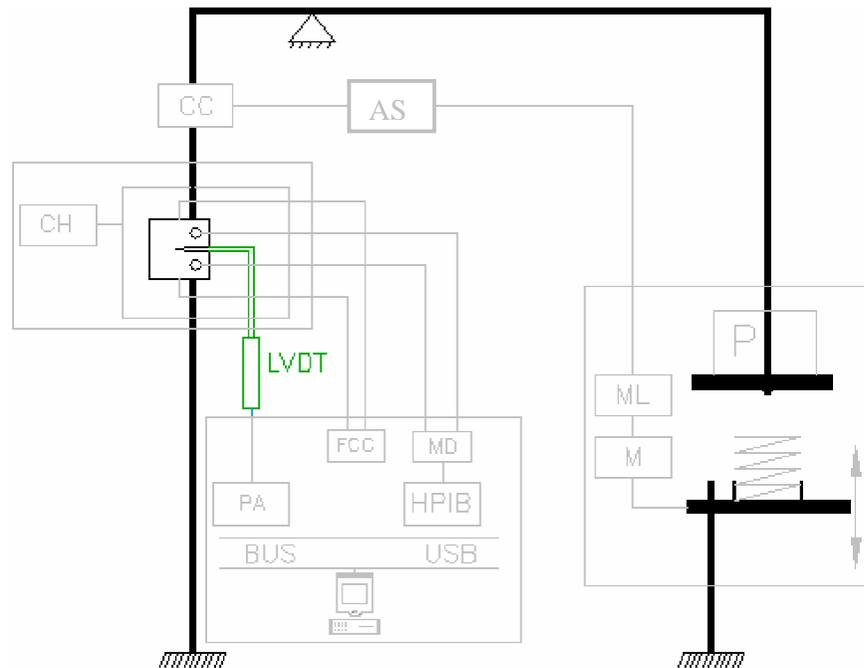
Estas características nos dejan por seguro que es posible la utilización de este dispositivo, pues su tensión de salida supera en varios rangos la máxima necesaria y la corriente máxima es de un valor más que aceptable para producir sobre el ligamento remanente de la probeta una caída de tensión que pueda ser detectada por el multímetro digital con el que se cuenta.



**Figura 6.11. Fuente de corriente utilizada en el sistema de adquisición de datos**

### 6.3. Sistema de medición de la apertura de la boca de la fisura.

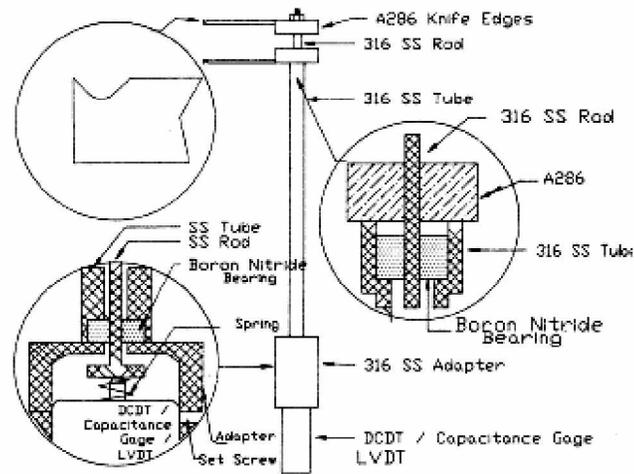
Para realizar la medición de la apertura de la boca de la fisura, se diseñó un dispositivo mecánico telescópico que permite medir dicha apertura utilizando instrumentos fuera del horno. El dispositivo está compuesto por una varilla y tubo cuya parte superior, compuesta por dos cuchillas, es solidaria a la probeta de manera de poder ir midiendo instantáneamente la apertura de la boca de la fisura. Para poder hacer esta medición se acopló en la parte inferior de la varilla interior, el núcleo de un LVDT que copia fielmente el movimiento relativo entre la varilla y el tubo externo.



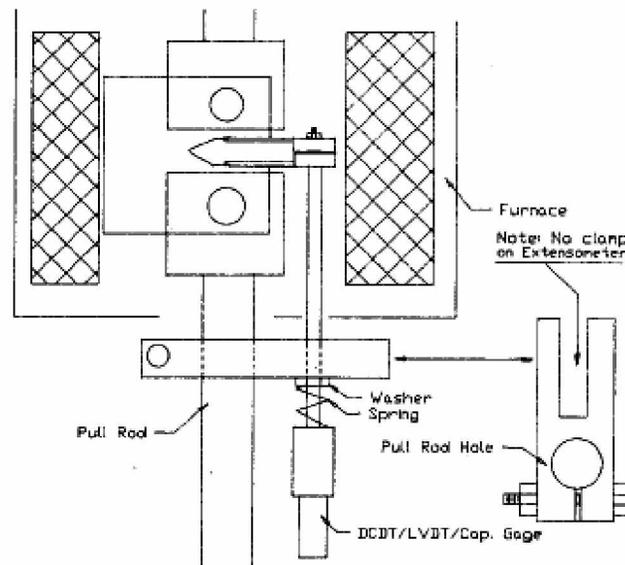
**Figura 6.12 Representación esquemática de la máquina-Sistema de medición de apertura de la boca de la fisura**

Parte de los objetivos del trabajo, como ya se mencionó, fue el diseño de dicho elemento, el cual debía estar en su parte superior dentro del horno, dado que el mismo posee dos cuchillas que hacen contacto directo con la probeta, estando entonces sometido a la temperatura de ensayo que podría ser algo superior a los 500°C.

Para iniciar el diseño, se siguió en parte la sugerencia de la norma del ensayo, E-1457-00, dichas sugerencias son mostradas en las figuras 6.13 y 6.14.



**Figura 6.13. Detalles de la parte superior e inferior del dispositivo de medición de la deflexión de de línea de carga.**



**Figura 6.14. Ubicación del dispositivo de medición de la deflexión de de línea de carga.**

### ***Diseño del dispositivo***

El dispositivo debe poder medir instantáneamente la longitud de la apertura de la boca de fisura, lo cual es igual a decir que debe medir la deflexión de la línea de carga.

Este dispositivo está formado por una varilla interior, a la cual es solidario el núcleo de un LVDT y un tubo exterior al cual debe ser solidaria la carcasa del mismo. Ambos elementos están separados por un buje cerámico el cual resiste altas temperaturas y tiene como función evitar el engrane del dispositivo, separando una distancia mínima necesaria que debe superar a la suma de la expansión térmica de ambos elementos, impidiendo entonces, el roce de la varilla y el tubo exterior dentro del horno, lugar donde los elementos sufrirán la dilatación antes mencionada.

Otro detalle muy importante es que debido a que los bordes de las cuchillas, ver figura 6.13, deben hacer contacto todo el tiempo con la probeta, el dispositivo cuenta con 2 resortes. Uno que hace que el tubo exterior sea “empujado” hacia abajo y con ello el clip inferior, solidario a este, también y otro resorte que se encarga de mantener el clip superior todo el tiempo en contacto con la superficie superior de la entalla. El primer resorte trabaja por fuera del tubo exterior, entre un elemento que se une a la máquina externamente y el alojamiento para el LVDT, figura 6.14, mientras que el segundo está ubicado entre la carcasa del LVDT y la varilla que tiene como elemento solidario al núcleo del mismo, figura 6.13.

En nuestro caso, se adaptó el diseño del dispositivo al tamaño del buje cerámico disponible. Luego de varias averiguaciones se encontró la posibilidad de la utilización de un tubo de alúmina, disponible en el mercado el cual resiste por encima de 600°C. Las medidas de diámetros de este tubo cerámico son: diámetro exterior 10mm y su diámetro interior de 6mm.

Se buscó entonces medidas comerciales de tubos y varillas de acero inoxidable 316 acorde a nuestra necesidad, y se encontraron varias posibilidades, entre ellas dos posibles a utilizar en cuanto a tubos, cada uno con distintos espesores:

Diámetro nominal del tubo	Diámetro exterior en mm	Espesor Schedule			
		Schedule 5 S	Schedule 10 S	Schedule 40 S	Schedule 80 S
1/8"	10,3	-----	1,25	1,75	2,4
1/4"	13,75	-----	1,65	2,25	3

De ambos se seleccionó el tubo de diámetro nominal 1/4" con espesor Sch 80 s (3mm), dado que nos brinda la posibilidad de maquinarle un orificio de longitud igual a la del buje cerámico (10mm) y de un diámetro tal que el buje entre perfectamente en dicho orificio. A su vez era el tubo que más espesor nos dejaba luego del maquinado anterior. Este espesor es necesario para la soldadura del clip que hará contacto con la parte inferior de la boca la fisura y que en nuestro diseño hace a su vez de tope para impedir la salida del buje.

La forma de soldar el tubo de acero 316 al clip inferior es mediante soldadura TIG, al igual que el clip superior a la varilla interna.

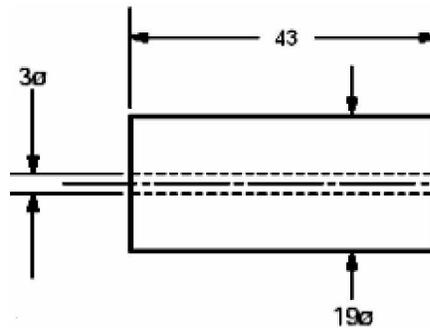
Por otro lado, varillas de acero inoxidable de 6mm, se encuentran con facilidad en el mercado, lo cual era algo fácil a resolver. A esta varilla, también se le debe soldar la cuchilla (clip) superior.

Algo importante a tener en cuenta en el diseño del dispositivo es la deformación por temperatura que sufrirá en aquellas partes sometidas al calor del horno. Esto no puede obviarse, dado que tanto la varilla interna como así también el tubo externo sufrirán este tipo de deformaciones. El buje cerámico superior que separa los dos antes mencionados también estará sometido a estas temperaturas, pero dado su bajo coeficiente de dilatación térmica no es algo crítico para el diseño.

Las deformaciones que se calcularon al momento del diseño solo fueron las que ocurrirán en el diámetro de los elementos, debido a que aquellas que afectan en la longitud son iguales para la varilla y el tubo y como la medición comienza en el momento que se haya llegado a la temperatura del ensayo, esta no es una fuente de error.

Dado las longitudes de la máquina, el dispositivo se diseñó con una longitud final de 361mm de los cuales 69mm corresponden al lugar donde se coloca al LVDT.

Esta parte del dispositivo fue diseñada en base al LVDT a utilizar, el cual tiene las siguientes dimensiones:



**Figura 6.15. dimensiones del LVDT utilizado**

Se encontró en el mercado una barra redonda de 25,4mm (1”) la cual será perforada y luego maquinada, de manera de que el LVDT entre perfectamente alojado en este dispositivo. Luego se le realizarán 4 orificios que irán roscados de manera de ajustar y alinear el LVDT

Como se dijo, la carcasa del LVDT debe ajustarse al dispositivo de manera que no haya entre ambos un movimiento siendo entonces esta última solidaria al tubo exterior, de manera que se mueva solo relativamente a la varilla interior que mueve al núcleo del LVDT. El ajuste se realiza mediante los 4 tornillos que están a 90° de manera de poder regular su altura y linealidad con respecto a la línea de carga al momento que la temperatura del horno llegue al valor de temperatura de ensayo.<sup>VII</sup>

***Cálculo de las deformaciones en el dispositivo de medición***

Se calcula a continuación las deformaciones que sufrirán las varillas de acero inoxidable en lo que respecta a sus diámetros, no así al largo, pues como se explicó anteriormente esto no afecta las mediciones posteriores.

Se utilizó para el cálculo el coeficiente de dilatación térmica del acero inoxidable, cuyo valor es:

$$\alpha = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$$

y la temperatura de ensayo como máxima de 600°C

***Varilla interna***

Esta varilla trabaja dentro del buje cerámico (cuya deformación por temperatura se desprecia por ser prácticamente nula) el cual tiene un diámetro interno de 6mm. Se tomó entonces la idea de calcular que diámetro inicial debería tener la varilla para que una vez a temperatura de ensayo su diámetro final sea de 5,8mm, dejando un huelgo entre buje y varilla a dicha temperatura de 0,1mm, evitando así el engrane del dispositivo, dando el resultado abajo justificado:

$$\frac{\Delta R_i}{R_i} = \alpha \cdot \Delta T \Rightarrow R_i = \frac{R_f}{1 + \alpha \cdot \Delta T} = \frac{2,9\text{mm}}{1 + 1,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\text{mm}^\circ\text{C}} \cdot 600^\circ\text{C}} \Rightarrow$$

$$R_i = 2,874\text{mm}$$

Dando entonces un diámetro inicial de 5,75mm.

<sup>VII</sup> Ver **planos de construcción y muestras en 3D** del dispositivo en anexo H

Para llevar desde la varilla comercial de 6 mm a la medida necesaria, se realiza un pulido sobre el extremo superior e inferior de la misma, midiendo periódicamente el diámetro de la que se va obteniendo.

### **Tubo externo**

En este caso se partió del tubo comercial ya seleccionado de diámetro exterior 13,75mm, al cual se le realizó un orificio de 10mm para la colocación del buje a presión.

A diferencia del caso anterior, aquí encontramos dos deformaciones a tener en cuenta, deformación en el diámetro y deformación en el espesor del tubo. El primero se calculó a partir de un diámetro medio, es decir un diámetro comprendido entre el exterior y el interior, en nuestro caso tiene un valor de 11,875mm.

Luego se continuó con el cálculo de la deformación en espesor, y una vez obtenido el espesor final (a 600°C) se le sumó y restó la mitad de este valor al radio medio obtenido a 600°C, obteniendo el radio exterior final e interior final respectivamente.

Los cálculos se muestran a continuación:

$$\frac{\Delta R_m}{R_{m_0}} = \alpha \cdot \Delta T \Rightarrow R_{m_{600^\circ C}} = R_{m_0} + R_{m_0} \cdot \alpha \cdot \Delta T = R_{m_0} (1 + 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mm/mm}^\circ \text{C} \cdot 600^\circ \text{C}) \Rightarrow$$

$$R_{m_{600^\circ C}} = 5,9375 \text{ mm} \cdot 1,009 = 5,99 \text{ mm}$$

$$\frac{\Delta t}{t_0} = \alpha \cdot \Delta T \Rightarrow t_f = t_0 + t_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T = t_0 (1 + 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mm/mm}^\circ \text{C} \cdot 600^\circ \text{C}) \Rightarrow$$

$$t_f = 1,875 \text{ mm} \cdot 1,009 = 1,892 \text{ mm}$$

Como se comento más arriba el paso próximo fue el siguiente cálculo:

$$R_{\text{ext. final}} = R_{m_{600^\circ C}} + \frac{t_f}{2} = 5,99 + \frac{1,892}{2} = 6,936 \text{ mm} \Rightarrow$$

$$\phi_{\text{ext. final}} = 13,872 \text{ mm}$$

$$R_{\text{int. final}} = R_{m_{600^\circ C}} - \frac{t_f}{2} = 5,99 - \frac{1,892}{2} = 5,044 \text{ mm} \Rightarrow$$

$$\phi_{\text{int. final}} = 10,088 \text{ mm}$$

Se observa en este caso que el aumento en el valor del radio medio es mayor en proporción que el incremento del espesor, produciendo un aumento final del valor del diámetro exterior e interior. Por esto último queda confirmado que el buje debe entrar a presión a temperatura ambiente, dado que a temperatura de ensayo el huelgo entre buje y tubo se incrementará.

### **Cálculo de la deformación del clip superior**

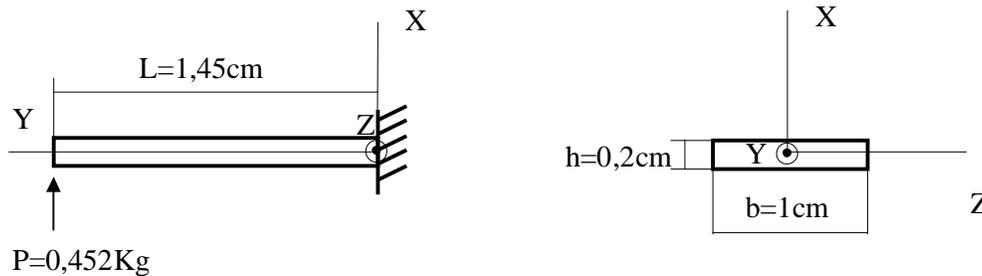
Debido a que el peso del dispositivo es soportado por el clip inferior del mismo, se realizó un cálculo de verificación tal que la deformación de dicho elemento se mantenga dentro de valores tales que no afecten la medición, como así tampoco la estanqueidad del dispositivo en la probeta.

Se comenzó calculando los pesos de cada elemento dando los siguientes resultados:

- Varilla interior: 66,62gr
- Tubo exterior: 226,24gr
- Porta LVDT: 115,65gr
- Tope para resorte interno: 1,3gr
- Clips: 10gr
- LVDT: 32gr

Dando un valor total de: 451,81gr. Este valor fue obtenido para acero inoxidable 316 cuyo peso específico es de 7700Kg/m<sup>3</sup>.

Se prosiguió con el cálculo de la flecha máxima considerando al clip inferior como una viga empotrada en un de sus extremos (extremo soldado al dispositivo) y con la fuerza del peso aplicada en el otro extremo (extremo apoyado en la parte inferior de la boca de la fisura de la probeta), siendo el esquema el que se muestra a continuación:



Para calcular la flecha máxima en nuestro caso es:  $y_{\max} = \frac{M_z L^2}{2EI_{zz}}$

Con:

- $M_z = PL = 0,452\text{Kg} * 1,45\text{cm} = 0,655\text{kg} * \text{cm}$
- $E = 21 * 10^5 \text{Kg/cm}^2$
- $I_{zz} = (b * h^3) / 12 = (1 * 0,2^3) / 12 = 6,66 * 10^{-4} \text{cm}^4$

Resultando entonces  $y_{\max} = \frac{M_z L^2}{2EI_{zz}} = 4,92 * 10^{-4} \text{cm} = 4,92 * 10^{-3} \text{mm}$ . Lo que resulta en un

valor apropiado para realizar la medición sin provocar inconvenientes.

### **LVDT**

El Transformador Diferencial Variable Lineal es un dispositivo de sensado de posición que provee un voltaje de salida de CA proporcional al desplazamiento de su núcleo que pasa a través de sus arrollamientos. Los LVDT proveen una salida lineal para pequeños desplazamientos mientras el núcleo permanezca dentro del bobinado primario.<sup>VIII</sup>

El LVDT en nuestro caso, se utiliza para medir en el ensayo la longitud de apertura de boca de fisura. Se seleccionó un LVDT que puede ser alimentado directamente con una tensión continua y que a su vez entregue de manera directa (sin paso por amplificadores o rectificadores) una tensión también continua proporcional al desplazamiento, la cual puede ser directamente ingresada a la placa adquisidora eliminando de esta manera fuentes de error.

<sup>VIII</sup> Para mayor detalle sobre el funcionamiento de este elemento ver anexo F.

El LVDT debe proporcionar un rango de medición acorde a nuestras necesidades. Si bien no es importante, en tamaño lo que este debe medir, sí lo es en el momento de la calibración, dado que el tren de carga de la máquina posee varios elementos que deben ser alineados perfectamente y si contamos con solo unos milímetros para el LVDT, se estaría en una situación de compromiso en el momento de iniciar el ensayo y dejarlo en su posición de cero. El LVDT elegido fue un modelo de la Serie DF (DF5<sup>IX</sup> en nuestro caso) de la marca Solartron, el cual entre otras características posee incorporado un oscilador, un demodulador y un filtro, lo que forma un conjunto cuya alimentación y medida de salida se realiza en corriente continua.

---

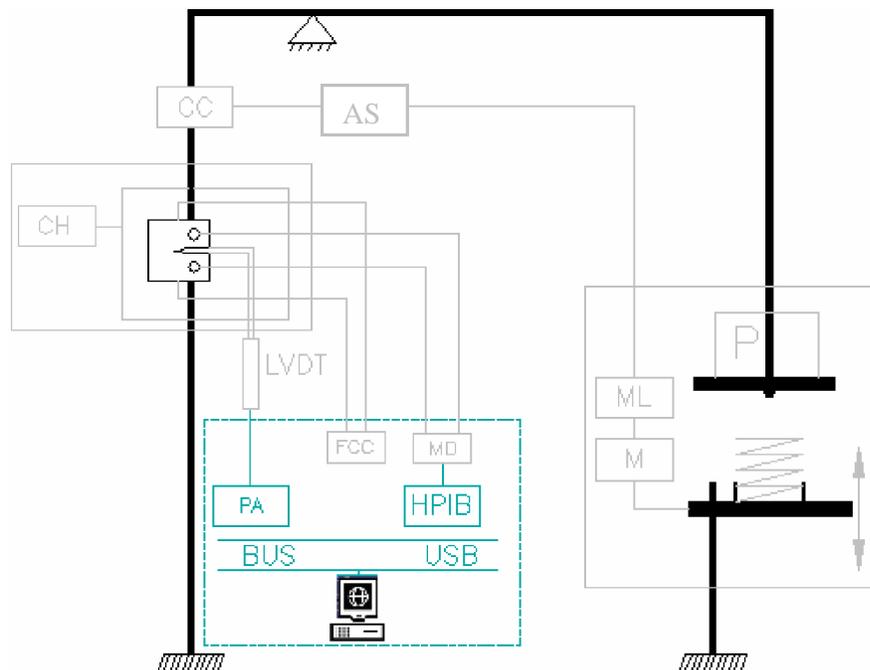
<sup>IX</sup> Ver catálogo en anexo G.

## 6.4. Sistema de Adquisición, control y cálculo de datos

El sistema de adquisición de datos es el encargado de tomar ciertos valores que provienen desde el ensayo para, algunos de ellos, almacenarlos o mostrarlos directamente y otros utilizarlos en el cálculo de los parámetros necesarios.

Dicho sistema es uno de los pilares de la máquina, pues el mismo, releva (según un tiempo de muestreo) todos los datos, que luego de ser elaborados, llevarán a una conclusión final, con lo cual debe de ser preciso como así también de fácil utilización para el personal que este operando la máquina en ese momento.

Forman parte de este sistema una placa adquisidora (PA), una placa HPIB (HPIB) y el programa que comanda todo el sistema.



**Figura 6.16. Representación esquemática de la máquina-Sistema de adquisición, control y cálculo de datos**

Se explica a continuación, con la ayuda del diagrama de flujo del sistema, figura 6.17, el funcionamiento del sistema antedicho.

### **Descripción general del sistema**

Nuestro sistema de adquisición de datos, está compuesto por:

- Programa
- Una placa adquisidora
- Una placa HPIB

Mediante la utilización de un programa, se comanda el sistema. Al inicio del ensayo se carga en el soft un tiempo de muestreo, que es el tiempo que pasará entre una medición y otra, como así también el valor de longitud inicial de fisura,  $a_0$ , que debe ser medida antes de comenzar el ensayo. Sobre esta última medida, cargada en el procesador, estarán basados los demás cálculos de longitud de fisura. También se debe decidir un valor de corriente a inyectar en la probeta en el momento del muestreo, este valor de corriente, es seteado al igual que los demás parámetros antes de iniciar el ensayo.

Al cargar esto en el programa, según el tiempo de muestreo que hayamos configurado, la placa adquisidora (que también actúa comandando la inyección de corriente) manda una señal a la fuente de alimentación para que envíe el pulso de corriente continua con el valor programado y un valor de tensión el cual debe superar la caída de tensión que se produce en la probeta, este último requisito no es crítico, pues es un valor bajo de tensión, que no supera algunas milésimas de Volt

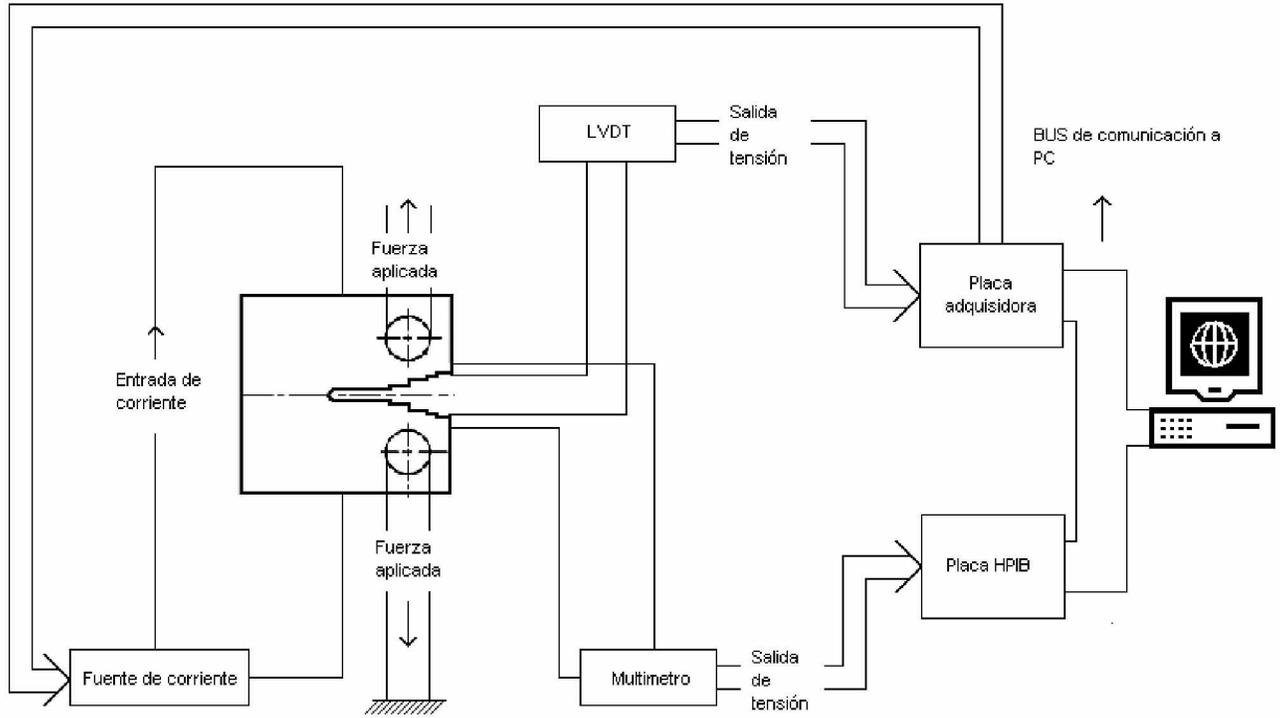
Una vez inyectada la corriente en la probeta compacta, la cual ingresa por dos terminales roscados, el multímetro es el encargado de sensar la diferencia de potencial producida en el ligamento remanente de la misma. Para esto se cuenta con un multímetro que esta conectado a la muestra mediante cables que hacen contacto con esta última a través de una soldadura capacitiva.

Este valor de tensión medido es enviado a la pc. Para poder hacer esta comunicación multímetro-pc, se cuenta con una placa HPIB, que es el bus entre ambos elementos. Luego este valor de tensión es procesado por el sistema, el cual calcula el valor de fisura instantáneo y lo muestra en la pantalla.

En la misma pantalla, se puede apreciar el valor de longitud de apertura de boca de la fisura, que se mide mediante el LVDT y cuyo valor ingresa a la pc mediante la misma placa que envía la orden de inyección de corriente, es decir, mediante la placa adquisidora.

Los datos que son tomados por el sistema de adquisición desde el ensayo son entonces: la apertura de la boca de la fisura y la caída de tensión en la probeta.

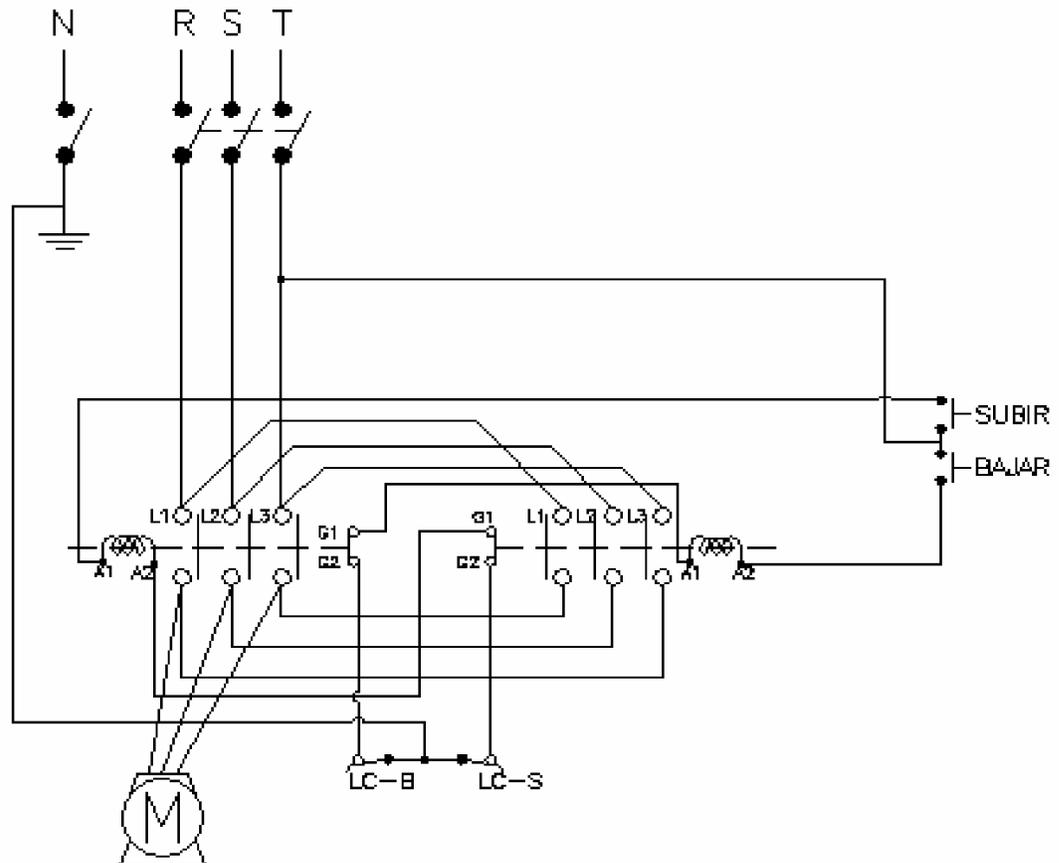
El primero, como ya se comentó, es mostrado directamente en una pantalla de pc, pero en cambio, con la caída de tensión (además de los otros datos medidos y cargados en el programa al inicio del ensayo) se calcula la longitud de fisura instantánea, dato que finalmente también es mostrado en la pantalla de la pc.



**Figura 6.17. Diagrama en bloques del sistema de adquisición de datos**

## 6.5. Sistema eléctrico

En el comienzo del proyecto, se realizó un relevamiento del circuito eléctrico de la máquina, obteniendo el siguiente esquema en cuanto a la alimentación eléctrica de la misma:



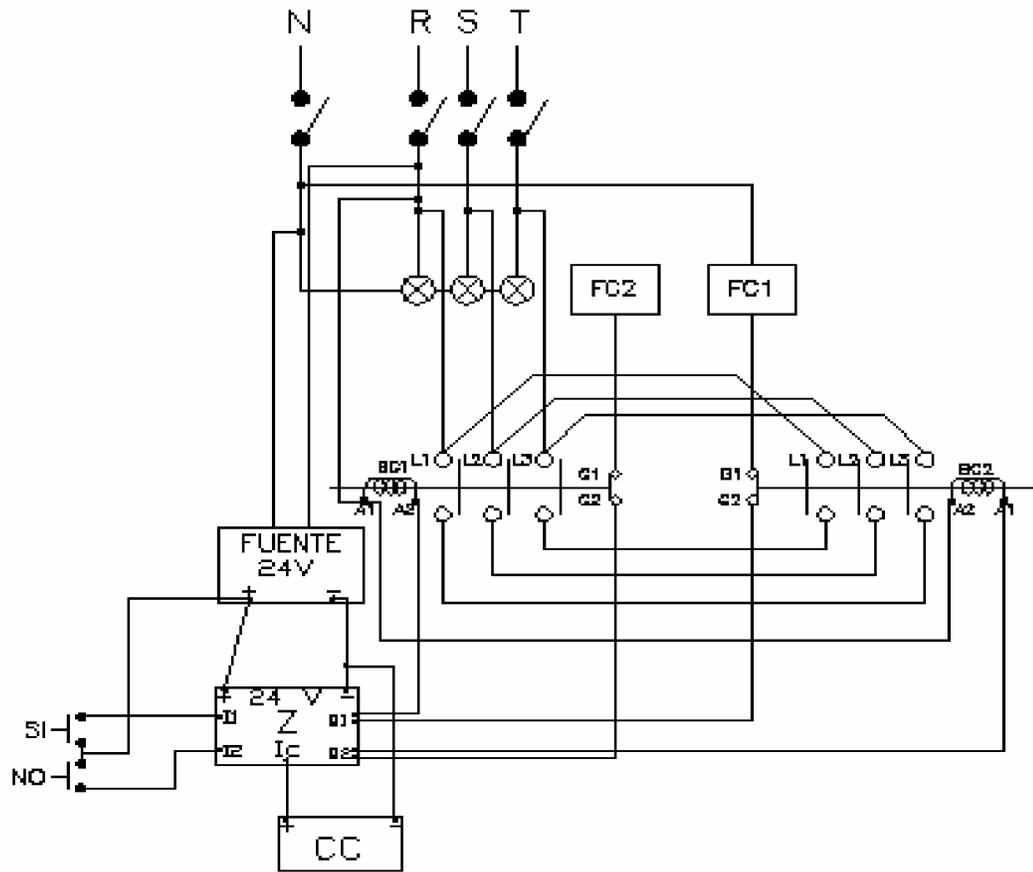
**Figura 6.18. Esquema eléctrico de la máquina al inicio del proyecto**

Se puede observar en este que la alimentación trifásica, pasa por una llave térmica, de allí se pasando por dos contactores, se comandaba el motor eléctrico. Con uno de ellos, el motor giraba en uno de los sentidos, haciendo lo opuesto cuando el segundo contactor se encontraba operando.

Este trabajo, era comandado por dos pulsadores externos (I1, I2) los cuales eran manejados manualmente, por lo cual nunca pudo ser realizado un ensayo automatizado.

Se contaba también con un sistema de enclavamiento, el cual era el encargado de que un contactor no alimente al motor, si este último estaba siendo alimentado por el otro.

El circuito antes descrito fue modificado, debido al agregado de: lámparas indicadoras de fase, sistema de aplicación automático de carga y finales de carrera de seguridad, los cuales aseguran que la planchuela que mueve verticalmente la carga, no pase de ciertos límites ocasionando la rotura del sistema de liberación y aplicación de carga. Con lo cual resulta el siguiente esquema unifilar:



**Figura 6.19. Esquema eléctrico de la máquina al final**

# CAPÍTULO 7

## Comentarios finales

## CAPÍTULO 7

### Comentarios finales

- Se realizaron tareas tales como relevamiento del estado de la máquina en el momento inicial del trabajo y sus sistemas, encontrando algunos en buen estado (horno y controlador) a los cuales solo se les debió hacer un chequeo de funcionamiento mientras que otros, fueron diseñados e implementados por completo, (sistema automático de aplicación y variación de carga). Había también dispositivos necesarios para el ensayo que fueron diseñados, como ser el dispositivo de medición de apertura de boca de fisura, como así también, se resolvió la modificación del sistema de adquisición de datos y control, el cual está siendo estudiado por especialistas para su futura cotización y realización. El trabajo realizado referente a este sistema fue establecer, en base al tipo de ensayo, todos los requisitos que el mismo debía cumplir.
- Es importante resaltar, como uno de los comentarios finales, que gracias al aporte de este trabajo estamos próximos a contar con la **única** máquina existente en el país, para realizar ensayos de crecimiento de fisura por creep, favoreciéndose de esta manera el estudio en detalle de este fenómeno.
- Podemos concluir que es de importancia realizar este ensayo a nivel industrial, como por ejemplo en generación de energía, en componentes que operan por grandes períodos de tiempo a temperaturas entre 0,3 y 0,5 de su temperatura absoluta de fusión y tienen una vida de diseño que está limitada por el fenómeno de daño por creep. Además de aplicaciones en calderas y turbinas, entre otras, los materiales de fabricación deben mantener sus propiedades mecánicas y su integridad estructural en presencia de combinaciones de elevada temperatura y tensión. La utilidad de predecir el tiempo de vida en servicio de estos elementos, daría como resultado una disminución de las pérdidas financieras, ya sea por falla o cambio innecesario de piezas que pueden aún continuar en servicio, además de evitar posibles daños catastróficos si la falla de algún componente ocurre.
- Personalmente, podemos afirmar que este trabajo nos dio la posibilidad de ampliar nuestros conocimientos tanto técnicos como teóricos relacionados con el fenómeno estudiado, que solo ha sido visto durante la carrera con menor profundidad.
- Podemos agregar que fueron aplicados de manera satisfactoria conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera como ser: circuitos y aparatos eléctricos, análisis y cálculo de resistencia de materiales, instrumentos de medición y control, entre otros.

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **Referencias**

- [1] CREEP AND CREEP RUPTURE TEST, ASM METALS HANDBOOK, AGOSTO, 1955. VOL 68 NRO 2A PAG 175-84
- [2] E. N. DA C. ANDRADE. "CREEP AND RECOVERY", 1957, PAG 176-98
- [3] A. H. COTTRELL. "J. MECH. AND PHUS. SOLIDS" VOL. 1. PAG 53-63, 1952
- [4] A. SAXENA, "FRACTURE MECHANICS" ASTM, 1980, P 131
- [5] J.L. BASSANI AND F.A. MCCLINTOCK, "CREEP RELAXATION OF STRESS AROUND A CRACK TIP" VOL 7, 1981, P 479-492
- [6] STANDARD TEST METHOD FOR MEASUREMENT OF CREEP CRACK GROWTH RATES IN METALS. E 1457-00. PUBLISHED NOVEMBER 2000
- [7] "PRACTICES OF LOAD VERIFICATION OF TESTING MACHINES", E4-94, ANNUAL BOOK OF STANDARDS, VOL 3.01, ASTM, 1994
- [8] "TEST METHOD FOR PLANE-STRAIN FRACTURE TOUGHNESS OF METALLIC MATERIALS," E399, ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, VOL 03.01, ASTM, 1994, P 680-714
- [9] MIRCO DANIEL CHAPETTI, "MECANICA DE MATERIALES" CAP - 21

# Anexos

## **ANEXO A**

**Método de prueba para la medición de la velocidad de  
crecimiento de fisuras por creep en metales.  
ASTM E 1457-00**

## **A- Método de prueba para la medición de la velocidad de crecimiento de fisuras por creep en metales. ASTM E 1457-00**

### **1. Alcance**

1.1 Este método de prueba abarca la determinación de velocidad de crecimiento de una fisura en fluencia lenta en metales a alta temperatura usando probetas de tipo compacta C (T) (ver Fig.1) sometida a condiciones de carga estática o cuasi-estática. El velocidad de crecimiento de la fisura  $\dot{a}(t)$  o  $\frac{\partial a(t)}{\partial t}$ , es expresada en términos de la magnitud de los parámetros relacionados con la velocidad de crecimiento de la fisura,  $C^*(t)$ ,  $C_t$  o  $K$ .

1.1.1 La elección del parámetro relacionado con la velocidad de crecimiento de la fisura  $C^*(t)$ ,  $C$  o  $K$  depende del comportamiento del material. Se observan generalmente dos tipos de comportamiento durante las pruebas de crecimiento de la fisura en fluencia lenta, creep dúctil y creep frágil. En materiales creep dúctil, el crecimiento de la fisura por creep está acompañado por una sustancial deformación dependiente del tiempo en la punta de la fisura y la velocidad de crecimiento de la fisura es correlacionado por  $C^*(t)$  y/o  $C_t$  (1-4).<sup>2</sup> En materiales creep frágiles el crecimiento de la fisura ocurre con una ductilidad baja. Consecuentemente, las deformaciones por creep dependientes del tiempo son comparables a o dominadas por deformaciones elásticas locales en la punta de la entalla. Bajo tales condiciones de creep frágil,  $K$  es elegido como parámetro de correlación (5).

1.1.2 En materiales de creep dúctil, se obtiene fluencia lenta generalizada cuando el ligamento no fisurado entero sufre deformación por creep. Tales condiciones son distintas de las de las condiciones de creep de pequeña escala y la transición de creep (4-6). En el caso de creep generalizado, la región dominada por la deformación de creep es significativa en tamaño, en comparación con el tamaño de la fisura y con el tamaño del ligamento remanente. En creep de pequeña escala solo una pequeña región del ligamento no fisurado cerca de la punta de la fisura experimenta deformación por creep. La velocidad de crecimiento de la fisura por creep en el caso de creep en pequeña escala puede describirse con el parámetro  $C_t$ , mientras que en el caso de creep en gran escala es necesario trabajar con la integral  $C^*(t)$ .

1.1.3 Mediante este método se abarca solamente el comportamiento en el cual la velocidad de crecimiento de la fisura llega al estado estacionario. Durante el estado estacionario, existe una única correlación entre  $\dot{a}(t)$  y el parámetro relacionado con la velocidad de crecimiento de la fisura. Las condiciones de crecimiento de la fisura transitorias ocurren en las primeras etapas del ensayo y este método no contempla ese comportamiento.

1.1.4 El estado de tensiones en la punta de la fisura puede que tenga una influencia sobre el comportamiento en el crecimiento de la fisura y puede causar fisuración sub-superficial en el caso que se utilicen probetas con una geometría del tipo plane-sided. El tamaño de la probeta y su geometría afectará el estado de tensiones en la punta de la fisura y son factores fundamentales para determinar la velocidad de crecimiento de la fisura.

1.1.5 La probeta recomendada es la probeta de tensión compacta C (T) (compact tension) con  $B/W=0,5$ , para casos de ensayos en condiciones de carga constante, Fig. 1. Las dimensiones de la probeta han sido fijadas proporcionalmente con un tamaño de fisura inicial,  $a_0/W$ , de 0,45 a 0,55. Probetas con entallas laterales son recomendadas para promover una propagación de la fisura uniforme a través del espesor de la probeta (7).

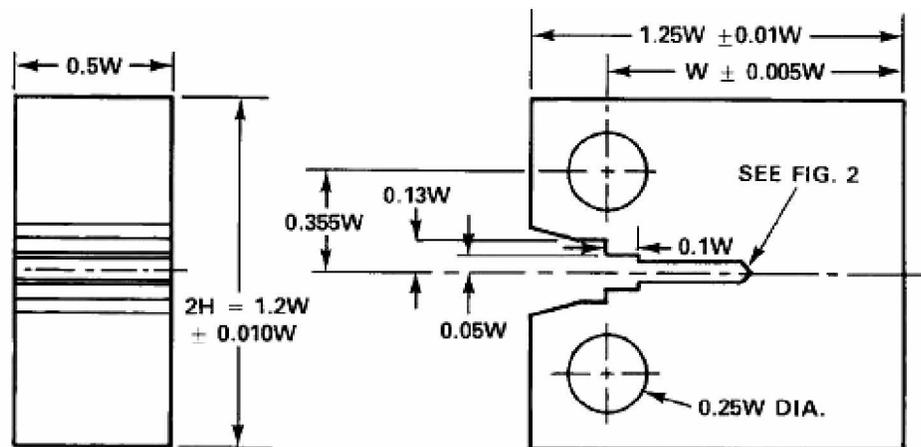
1.1.6 La presencia de tensiones residuales pueden influenciar la medición de las propiedades del crecimiento de la fisura (8). El efecto puede ser importante cuando se usan muestras que fueron extraídas a partir de cuerpos que se encontraban sometidos a tensiones; por ejemplo: soldaduras, piezas forjadas, extrudadas, etc.

Las probetas tomadas de productos que contienen tensiones residuales también contendrán tensiones residuales. La extracción de probetas en sí, alivian y redistribuyen los patrones de tensión residual, sin embargo, la magnitud remanente puede aún causar efectos importantes en la siguiente prueba. La tensión residual es sumada a la tensión aplicada y resulta en una intensidad de tensión en la punta de la fisura que es diferente de las fuerzas o desplazamientos aplicados externamente. La distorsión durante el maquinado de la probeta a menudo indica la presencia de tensiones residuales, estas tensiones no se tienen en cuenta en esta norma

1.1.7 Otras configuraciones diferentes a la probeta C (T) puede que involucren diferentes requisitos de validación de los que serán explicados en esta norma. Sin embargo el uso de otras geometrías que la C (T) es permitida por este método a condición de que los datos sean comparados con los datos obtenidos de probetas C (T). Otras probetas usadas en ensayos de crecimiento de fisura por creep son: la probeta Single Edge Notch Bend (SENB), probeta Single Edge Notch Tension (SENT) y la probeta Middle Cracked Tension M (T)

1.2 El sistema internacional de unidades (SI) es el considerado como standard. Las unidades dadas en pulgadas por libra en paréntesis son para información solamente.

1.3 *Esta norma no pretende tratar todo lo relacionado con aspectos de seguridad. Es responsabilidad de los usuarios de esta norma establecer la seguridad apropiada y prácticas saludables y determinar la aplicación de limitaciones de regulación previa al uso.*



COMPACT TEST SPECIMEN FOR PIN OF  $0.24W (+0.000W/ -0.005W)$  DIAMETER  
FIG. 1 Drawing of a Standard C(T) Specimen

## 2. Documentos de referencia

- 2.1 *ASTM Standards:*
- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines
  - E 74 Practices for Calibration of Force-Measuring Instruments for Verifying the Force Indication of Testing Machines
  - E 83 Practices for Verification and Classification of Extensometers
  - E 139 Practice for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials
  - E 220 Method for Calibration of Thermocouples by comparison Techniques

E 399 Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials  
E 647 Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates  
E 1820 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness  
E 1823 Terminology Relating to Fracture Testing

### 3. Terminología

#### 3.1 Definiciones

3.1.1 La terminología relacionada con la prueba de fractura contenida en Terminology E1823 se aplica para este método de prueba.

#### 3.2 Definiciones o términos específicos de esta norma:

3.2.1 La integral de  $C^*(t)$  [FL-IT-1], [fuerza/(long\*t)] una expresión matemática, una integral lineal o de superficie que encierra el frente de la fisura desde una superficie de la fisura a otra, usada para caracterizar los campos locales de tensión- velocidad de deformación que se presenta en cualquier instante alrededor del frente de la fisura en un cuerpo sometido a condiciones de creep extenso.

3.2.1.1 *Discusión.* La expresión  $C^*(t)$  para una fisura bidimensional en el plano x-z con el frente de la entalla paralelo al eje z es la integral lineal:

$$C^*(t) = \int_r \left( W^*(t) dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \right) \quad (1)$$

Donde

$W^*(t)$ : energía de tensión instantánea o velocidad de energía por unidad de volumen

r: camino de la integral que encierra la punta de la entalla

ds: incremento en el contorno del camino

T: vector tracción hacia afuera sobre ds

$u$ : vector de tasa de desplazamiento en ds

x, y, z: sistema de coordenadas rectangular y

$T \frac{\partial u}{\partial x} ds$ : tasa de entrada de energía de tensión al área encerrada por r.

El valor de  $C^*(t)$  de esta ecuación es independiente del camino para materiales que deforman de acuerdo a la siguiente ley constitutiva, que es separable en funciones de deformación y de tiempo de la forma:  $\dot{\epsilon} = f_1(t)f_2(\sigma)$  donde  $f_1$  y  $f_2$  representan funciones del tiempo transcurrido, t, y la tensión aplicada,  $\sigma$  respectivamente,  $\dot{\epsilon}$  es la tasa de deformación.

3.2.1.2 *Discusión.* Para materiales que muestran deformación por creep, para los cuales la ecuación de arriba es independiente del camino, la integral  $C^*(t)$  es igual al valor obtenido desde dos probetas iguales las cuales solo difieren infinitesimalmente en el área fisurada. Este valor es la diferencia en la energía de deformación por unidad de variación de área de fisura a un valor fijo del tiempo y velocidad de desplazamiento, o a un valor fijo de tiempo y carga aplicada.

3.2.1.3 *Discusión.* El valor de  $C^*(t)$  que corresponde a condiciones de estado estacionario es llamado  $C_s^*$ . Se dice que el estado estacionario se alcanza cuando se produce alrededor de la punta de la fisura una distribución de tensiones completamente desarrollada.

3.2.2 *Parámetro  $C_t$ ,  $C_t$  [FL-IT-1]*, es un parámetro igual al valor obtenido de 2 cuerpos idénticos con áreas de entalla que difieren infinitesimalmente, cada una sometida a tensión, como la diferencia en la energía de tensión por unidad de diferencia en el área de la entalla a un valor

fijo de tiempo y velocidad de desplazamiento o un valor fijo de tiempo y fuerza aplicada para una ley constitutiva arbitraria.

3.2.2.1 *Discusión*. El valor  $C_t$  es independiente del camino y es igual a  $C^*(t)$  para condiciones de creep cuando la ley constitutiva descripta en 3.2.1 se aplica.

3.2.2.2 *Discusión*. Bajo condiciones de creep a escala pequeña,  $C^*(t)$  no es independiente del camino y esta relacionado con los campos de deformación y tensión en la punta de la fisura solo para caminos cercanos a la punta de la fisura y bien adentro de la zona límite de creep (ver sección 3.2.3 para la definición). Bajo estas circunstancias,  $C_t$  es relacionado únicamente con la velocidad de expansión del tamaño de la zona de creep (**9, 10**). Hay evidencia experimental considerable que el parámetro  $C_t$  (**4, 7, 10**) el cual extiende el concepto de la integral  $C^*(t)$  a creep a pequeña escala y los regímenes de transición creep y es igual a  $C^*(t)$  en el régimen creep extenso, se correlacionan principalmente con la velocidad de crecimiento de la fisura de creep en las investigaciones de régimen entero dentro de régimen de creep extenso a pequeña escala.

3.2.3 *Límite de la zona de creep*. El límite de la zona de creep es definido como el área formada por los puntos delante de la fisura donde la deformación equivalente causada por la deformación de creep es igual a 0,002 (0.2%) (**11**)

3.2.3.1 *Discusión*. Bajo condiciones de creep a pequeña escala, la dilatación de la zona de creep con el tiempo ocurre manteniendo similitud (**6**). Así, el tamaño de la zona de creep,  $r_c$ , puede ser definido por la distancia de la zona límite de creep desde la punta de la fisura hasta un ángulo  $\theta$  con respecto al plano de la fisura.

3.2.4 *Tamaño de la fisura [L]* en este método de ensayo, el tamaño de la fisura físico se representa como  $a_p$ . El subíndice p está en todos lados supuesto.

3.2.5 *Orientación del plano de la entalla*. Una identificación del plano y la dirección del crecimiento de la entalla de la probeta del ensayo en relación con la configuración del producto. Esta identificación es designada mediante un código donde la primera letra/s representa la dirección normal al plano de la entalla y la segunda letra/s designa la dirección esperada de la propagación de la entalla.

3.2.6 *Comportamiento del crecimiento de la entalla creep*. Gráfico de la velocidad (tasa) de tiempo del crecimiento de la entalla,  $\frac{da}{dt}$ , como una función de  $C^*(t)$ ,  $C_t$  o K.

3.2.7 *Integral J. J [EL-1]*. Expresión matemática. Una integral de línea o superficie que encierra el frente de la fisura desde una superficie de la fisura a otra, usada para caracterizar el campo de deformación-tensión local alrededor al frente de la fisura.

3.2.8 *Desplazamiento en la línea de carga debido al creep*.  $V_c$  [L]. Desplazamiento adicional en los puntos de carga debido al crecimiento de la fisura, lo que está directamente asociado con la acumulación de deformaciones por creep.

3.2.8.1 *Discusión*. En cuerpos que experimentan creep, el desplazamiento del punto de carga adicional causado por la fisura,  $V$ , puede ser dividido en una parte instantánea,  $V_i$ , y en una parte de creep dependiente del tiempo,  $V_c$ , luego  $V = V_i + V_c$

3.2.8.2 *Discusión*. El símbolo para la tasa de desplazamiento de línea de carga relacionado con creep es llamado  $\dot{V}_c$

3.2.9 *Espesor neto BN [L]*. Distancia entre los límites de las entallas laterales

3.2.10 *Tamaño de la fisura original  $a_o$  (L)*. Tamaño de fisura al inicio del ensayo.

3.2.11 *Espesor de la probeta B [L]*. Distancia entre los lados de la probeta

3.2.12 *Ancho de la probeta W [L]*. Distancia entre el plano de referencia y la superficie trasera de la probeta. El plano de referencia en probetas C (T) es el plano normal a los lados que contienen la línea de carga.

3.2.13 *Factor de intensidad de tensión*  $K$  [FL-3/2]. La magnitud del campo de deformación ideal de la punta de la fisura (un campo de tensión extraordinario) para el Modo 1 en un cuerpo elástico-lineal homogéneo.

3.2.14 *Tiempo de transición*,  $t_T$  [T]. Tiempo requerido por condiciones de creep extensas para desarrollar un cuerpo fisurado. Para las probetas del ensayo, este es normalmente el tiempo requerido por la zona de deformación por creep para propagar a través de una porción importante del ligamento no fisurado o en una región la cual esta debajo de la influencia de una fisura, en el caso de una fisura finita en un medio semi infinito.

3.2.15 *Tensión de fluencia*  $\sigma_{YS}$  [FL-2] Es la tensión a la cual el material muestra una desviación igual a una deformación del 0,002 de la zona elástica en una curva tensión-deformación.

3.2.16 *Período de iniciación de la fisura*  $t_0$  [T]. Tiempo previo al inicio de 0,2 mm (0,008in) de extensión de fisura para creep.

## 4. Resumen del método de prueba

4.1 El objetivo del ensayo de crecimiento de fisura por creep es la determinación de la relación entre el crecimiento de la entalla y tiempo,  $\frac{da}{dt}$ , debido al creep y el valor aplicado del parámetro que relaciona la velocidad de crecimiento de la fisura, como el indicado en 1.1.1. Este método de prueba involucra la carga de probetas entalladas o muestras pre-fisuradas por fatiga. La fuerza aplicada es mantenida constante en el tiempo o variada lentamente, como para ser considerada cuasi-estática. El tamaño de la fisura y los desplazamientos lineales de la carga serán registrados continuamente, digital o autográficamente en función del tiempo. La temperatura deber ser monitoreada para asegurar que permanece constante dentro de los límites permitidos durante el ensayo. Si sistemas de carga servo mecánicos son usados para mantener la fuerza constante, o si la prueba es conducida bajo condiciones diferentes que fuerza constante, un registro de fuerza vs tiempo debe también mantenerse.

4.2 La fuerza, el desplazamiento de la línea de carga y los datos del tamaño de la entalla son procesados numéricamente como discusión más tarde para obtener la relación de tasa de crecimiento de la entalla vs.  $C^*(t)$ ,  $C_t$  o  $K$ .

4.3 Tres métodos de carga diferentes están disponibles para el ensayo. La carga de peso muerto es altamente recomendada y es el método más comúnmente usado para la carga de las probetas. Además carga de desplazamiento constante (**12**) y ritmo de desplazamiento constante (**1,3**) pueden ser usados pero no son recomendados cuando se trabaja con materiales extremadamente frágiles. Para ensayos llevados a cabo bajo otras condiciones que la de peso muerto, el usuario debe comparar los resultados, verificar los análisis para los datos y analizar desde ensayos realizados bajo condiciones de carga de peso muerto.

## 5. Significado y uso

5.1 La velocidad del crecimiento de fisuras por creep expresada como una función de la integral de  $C^*(t)$ ,  $C^*(t)$ , o  $K$  caracteriza la resistencia de un material al crecimiento de fisuras bajo condiciones de deformaciones por creep extenso. Información de apoyo sobre el fundamento para emplear los mecanismos de fractura aproximados en el análisis de datos de crecimiento fisuras por creep es dada en los puntos 7, 9, 13, 14.

5.1.1 Ambientes agresivos como temperaturas altas pueden afectar de manera importante el comportamiento del crecimiento de la fisura por creep. Debe ponerse atención en la selección y

control de la temperatura y el ambiente en los estudios de investigación y en la generación de datos de diseño.

5.1.2 La expresión  $da/dt$  como una función de un parámetro apropiado que relaciona la velocidad de crecimiento de la fisura, como se discutió en 1.1.1, generalmente proporciona resultados que son independientes del tamaño de la probeta y la geometría para el mismo estado de tensión en la punta de la fisura. Así la correlación apropiada permitirá cambios y comparaciones de datos obtenidos desde una variedad de configuraciones de probetas y condiciones de carga. Además esta característica permite datos de tasa de crecimiento de fisura por creep para ser usadas en el diseño y evaluación de estructuras ingenieriles que operan a elevadas temperaturas donde la deformación por creep es de interés. El concepto de similitud se asume, lo que implica que fisuras de tamaños diferentes sometidas a la misma  $C^*(t)$ ,  $Ct$  o  $K$  nominales avanzará con iguales incrementos de extensión de fisura por unidad de tiempo, proveyendo las condiciones para la validación de los parámetros específicos relacionados con la velocidad de crecimiento de la fisura que son encontrados.

5.1.3 Los efectos de aumento de restricción en la punta de la fisura que surgen de las variaciones en el tamaño de probeta, la geometría y la ductilidad del material pueden influenciar a  $da/dt$ . Por ejemplo, las velocidades de crecimiento de fisura al mismo valor de  $C^*(t)$ ,  $Ct$  en material con creep dúctil puede que generalmente aumentar con el aumento del espesor. Es por lo tanto necesario mantener las dimensiones de los componentes en mente al seleccionar el espesor, geometría y tamaño de la probeta para pruebas de laboratorio.

5.1.4 Las diferentes geometrías como se menciono en 1.1.7 puede que tengan requisitos de tamaño diferentes para obtener datos de la variación del crecimiento de la fisura por creep independiente del tamaño y geometría. Es por lo tanto necesario justificar esos factores al comparar los datos de  $da/dt$  para diferentes geometrías o al predecir la vida de los componentes usados en datos de laboratorio. Por estas razones, el alcance de esta norma esta restringido al uso de probetas C (T) y un conjunto completo de condiciones de validación específica para esta probeta. Si probetas con otras geometrías tales como las mencionadas en 1.1.7 son usadas para generar datos de crecimiento de fisura por creep, luego los datos  $da/dt$  obtenidos deben ser comparados con los datos de prueba derivados de las pruebas con C (T).

5.1.5 Se observó crecer a velocidades diferentes fisuras por creep al comienzo de ensayos comparados con las velocidades para fisuras que han sufrido un previo aumento de fisura por creep a valores equivalentes de  $C^*(t)$ ,  $Ct$  o  $K$  (15). La duración de esta condición transitoria varía con el material y el nivel de fuerza aplicado inicialmente. Estos transitorios se deben a los cambios rápidos en los campos de tensión en la punta de la fisura después de la carga elástica inicial y/o debido a un periodo inicial durante el cual una zona con daño de creep encierra la punta de la fisura y propaga de un modo similar con el resto del crecimiento de la fisura (16). La extensión de la fisura en estado estacionario el cual sigue a este periodo es caracterizado por una única relación de  $da/dt$  con respecto a  $C^*(t)$ ,  $Ct$  o  $K$ . La región transitoria, especialmente en materiales con creep-frágil, puede estar presente por una fracción importante de la vida total. (17). En esta norma son dados los criterios para distinguir el estado transitorio del estado estable en el crecimiento de fisura por creep.

5.2 Los resultados de este método de ensayo puede ser usado como sigue:

5.2.1 Establecer la influencia del crecimiento de la fisura por creep en la vida de componentes bajo condiciones de carga mantenida a elevada temperatura donde la deformación por creep puede ocurrir, dado que los datos experimentales son generados bajo cargas y

condiciones de estado de tensión representativas y combinadas con criterios apropiados de colapso plástico o fractura, datos de caracterización de defectos e información de análisis de tensiones (18).

5.2.2 Establecer criterios de selección de materiales y requerimientos de inspección para aplicaciones de tolerancia de daños.

5.2.3 Establecer, en términos cuantitativos, los efectos individuales y combinados relacionados con la metalurgia, fabricación, temperatura de operación y variables de carga sobre la vida de crecimiento de la entalla de creep.

5.3 Los resultados obtenidos desde este método de prueba están designados para regímenes dominantes de fisura de falla por creep y no deberían ser aplicados para fisuras en estructuras con daño de creep propagado a lo ancho alrededor de la fisura. El daño en una zona pequeña alrededor de la punta de la entalla es permitido, pero no en una zona que es comparable en tamaño con el tamaño de la entalla o el tamaño de ligamento remanente. El daño de creep para los propósitos de aquí, es definido por la presencia de cavitación de bordes de grano

## 6. Equipo

### 6.1 Máquina de prueba

6.1.1 Máquinas de peso muerto o máquinas de carga servo-mecánicas capaces de mantener una fuerza constante o mantener tasas de desplazamientos constantes en el rango de  $10^{-5}$  a 1mm/h pueden ser usadas para el ensayo de crecimiento de fisura por creep. Si se usan máquinas servo-hidráulicas bajo condiciones de fuerza constante, la fuerza deber ser monitoreada continuamente y las variaciones en la fuerza indicada no debe exceder  $\pm 1,0\%$  del valor nominal en cualquier momento durante el ensayo. Si se usa tasa de desplazamiento constante o desplazamiento constante, el desplazamiento indicado debe estar entre el 1% del valor nominal en cualquier momento durante el ensayo.

6.1.2 La precisión de la máquina para el ensayo estará entre la variación permitida especificada en la práctica E4.

6.1.3 Si máquinas de creep de peso muerto tipo palanca son usadas es preferible que ellas automáticamente mantengan el brazo de palanca en posición horizontal. Si tal aparato no está disponible, el brazo de palanca deberá ser ajustado manualmente a intervalos tales que la posición del brazo en cualquier momento no se desvíe de la posición horizontal en 1% del valor de la carga

6.1.4 Deberán tomarse precauciones para asegurar que la fuerza sobre la probeta sea aplicada tan axialmente como sea posible.

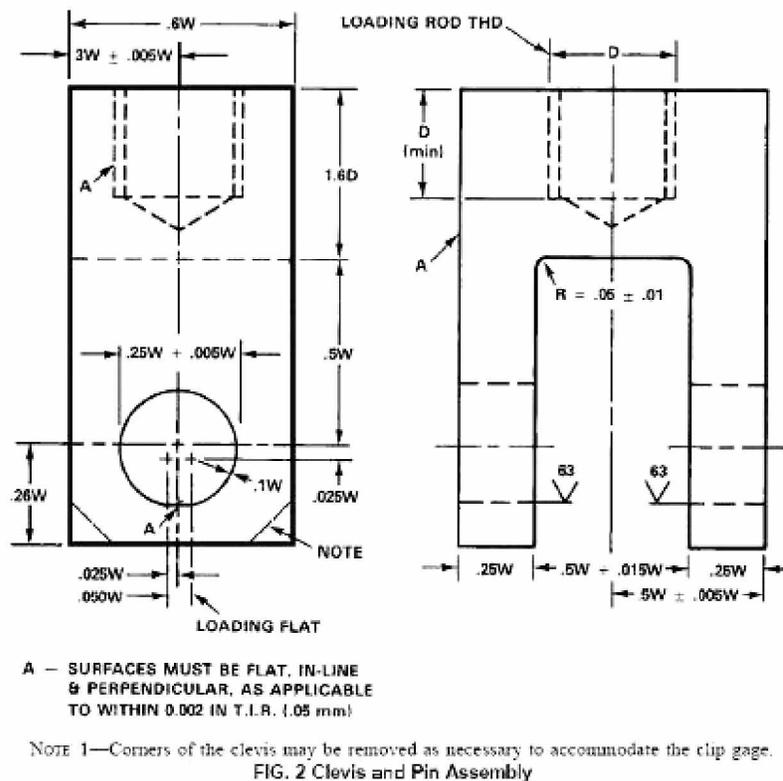
### 6.2 Agarres e instalaciones para probetas C (T)

6.2.1 Clevis assemblies (Ver Fig. 2) serán incorporadas en el tren de carga en la parte superior e inferior de la probeta para permitir rotación en el plano cuando la probeta es cargada.

6.2.2 Las proporciones propuestas y tolerancias críticas de clevis son dados (Ver Fig. 2) en relación con el ancho de probeta, W.

6.2.3 Las distancias entre el agujero y la punta serán diseñados para minimizar la fricción para así eliminar los movimientos inaceptables que invalidarían las calibraciones de la probeta para determinar K, J y  $C^*(t)$

6.2.4 El material para el agarre y los accesorios serán elegidos teniendo en cuenta tanto la temperatura de ensayo como también la fuerza a ser empleada. Algunos materiales de elevadas temperaturas comúnmente usados incluyen American Iron and Steel Institute (AISI) Grade 304 y 316 de acero inoxidable, acero Grade A286, superaleaciones a base de níquel como 718 o aleaciones X750. The loading pins are machined from A286 steel (o acero resistente a temperatura equivalente) y son calentadas para que desarrollen un resistencia a la deformación por creep y la ruptura.



6.3 *Alineación de los agarres.* Es importante prestar atención para conseguir una buena alineación en el tren de carga (ver Fig. 2 para las tolerancias de la máquina). La longitud del tren de carga debería ser elegida poniendo atención a la altura del horno para calentar la probeta.

#### 6.4 *Equipamiento de calor*

6.4.1 Los aparatos, y el método de calentamiento de la probeta, proveerá el control de temperatura necesario para satisfacer los requerimientos de 9.2.2 sin ajustes manuales más frecuentes que uno cada 24 horas después de aplicar la carga.

6.4.2 El calentamiento será por resistencia eléctrica u horno de radiación con la probeta en aire a presión atmosférica a menos que otro medio sea especificado.

Nota 1. Las condiciones en las que se realiza el ensayo pueden tener un efecto importante sobre los resultados del ensayo. Esto es particularmente verdadero cuando las propiedades son influenciadas por oxidación u otros tipos de corrosión.

6.5 *Equipo de medición de temperatura.* El método de medición de temperatura debe ser suficientemente sensible y confiable para asegurar que la temperatura de la probeta está dentro de los límites especificados en 9.2.2.

#### 6.6 *Indicador de desplazamiento*

6.6.1 Una medición continua del desplazamiento es necesaria para evaluar la magnitud de  $C^*(t)$  y  $C_t$  en cualquier momento durante el ensayo. Las mediciones del desplazamiento deben ser hechas sobre la línea de carga.

6.6.2 Como una guía, el indicador de desplazamiento tendrá un rango de trabajo no mayor que dos veces el desplazamiento esperado durante el ensayo. La precisión del indicador debe estar entre  $\pm 1\%$  del rango de trabajo entero del indicador. En la calibración, la máxima desviación de los puntos de datos individuales de la punta de la entalla, no deberá exceder el  $\pm 1\%$  del rango de trabajo.

6.6.3 Filos de cuchillos son recomendados para asientos libres de fricción del indicador. La alineación paralela de los filos del cuchillo deben mantenerse entre  $\pm 1\%$

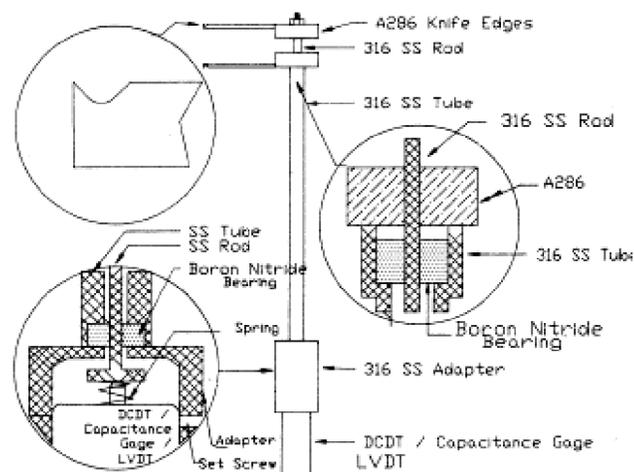
6.6.4 El desplazamiento a lo largo de la línea de carga, puede ser directamente medido sujetando el sistema completo del clip gage a la probeta y ubicando el sistema completo dentro del horno. Alternativamente, los desplazamientos pueden ser transferidos fuera del horno con un sistema de barra y tubo tal como el mostrado en Figs. 3 y 4. En el procedimiento, el transductor es colocado fuera del horno. Es importante hacer la barra y el tubo de materiales que sean térmicamente estables y sean de igual material para evitar errores de lectura causados por la diferencia en los coeficientes de expansión térmica. Otros diseños que puedan medir desplazamientos con iguales niveles de precisión pueden también usarse.

6.7 *Equipos para la medición del tamaño de la fisura.* Una técnica de monitoreo de tamaño de fisura capaz de resolver confiablemente extensiones de fisura de cómo mínimo  $\pm 0,1$  mm (0,004in) a la temperatura de ensayo es recomendable para mediciones de crecimiento de fisura por creep. Dado que la extensión de la fisura a través del espesor de la probeta no es siempre uniforme, mediciones superficiales del tamaño de la fisura mediante elementos ópticos no se considera confiable como un método. Las observaciones ópticas pueden ser usadas como un método de medición auxiliar. La técnica de medición de tamaño de fisura elegida debe ser capaz de medir el tamaño de fisura promedio a través del espesor. La técnica más comúnmente usada es la técnica de potencial eléctrico que es descripta en el Anexo A1.

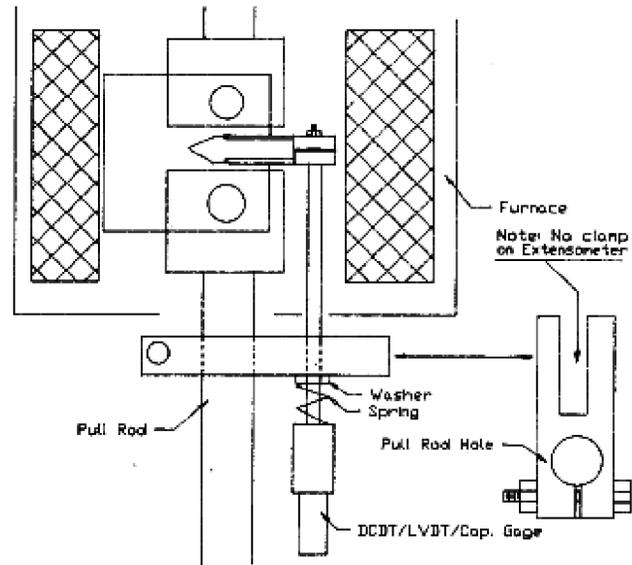
Nota 2. La precisión de la medición del tamaño de fisura es aquí definida como la desviación standard del valor medio de tamaño de fisura determinado por un equipo de medición.

6.8 *Control de la temperatura del salón.* La temperatura ambiente deberá ser suficientemente constante tal que las variaciones de la temperatura de la probeta no exceda los lineamientos dados en 9.2.2.

6.9 *Timing apparatus.* Suitable means for recording and measuring elapsed time to within 1% of the elapsed time should be provided.



NOTE 1—The rod and tube must be made from the same material.  
 FIG. 3 Schematic of a Clip Gage Assembly for Measuring Load-Line Deflection



NOTE 1—The materials used must be adequate for the test temperature.  
**FIG. 4 Schematic of an Overall Test Set-Up Showing the Clip Gage As Attached to the Specimen**

## 7 Configuración de la probeta, dimensiones y preparación

### 7.1 Configuración de probeta

7.1.1 La configuración de la probeta C (T) Standard es mostrada en la Fig. 1.

7.1.2 El ancho de la ranura para al iniciación de la fisura para probetas compactas es mostrado en la Fig. 5.

7.1.3 La proporción ancho-espesor W/B recomendado nominalmente es 2. Proporciones W/B, hasta 8 pueden ser usadas para caracterización del efecto de espesor, sin embargo es importante notar que el estado de tensiones puede variar con el espesor.

7.1.4 El tamaño de fisura,  $a_0$  (incluido una ranura o prefisura iniciadora) será al menos 0,45 veces el ancho, W, pero no más que 0,55 veces el ancho. Este puede variarse entre el intervalo arriba mencionado dependiendo del nivel de carga elegida para el ensayo y la duración de prueba deseada.

7.2 Para lograr los requerimientos del punto 10.2.2. en cuanto a la forma del frente recto de la fisura a veces es necesario realizar entallas laterales a las probetas. La profundidad de las entallas laterales para un material en particular puede encontrarse por prueba y error pero una reducción total del 20% ha sido encontrada por buenos trabajos para muchos materiales. Sin embargo, para materiales con creep extremadamente dúctil, una reducción de las entallas laterales total de hasta un 40% puede ser necesaria para producir frentes de fisura rectos. Cualquier ángulo incluido en las entallas laterales menores que  $90^\circ$  es permitido. El radio de la raíz de la entalla serán  $\leq 0,4 \pm 0,2$  mm ( $0,016 \pm 0,008$  in). Para producir frentes de pre-fisura casi rectas, es deseable, pero no un requisito, para tener la pre fisura hecha antes de la operación del maquinado de la entalla lateral.

7.3 *Tamaño de probeta.* No hay en este método requisitos de tamaño especificados. Sin embargo, el tamaño de la probeta debe ser elegido considerando la capacidad del sistema de carga, siendo capaz de acomodar la probeta en el horno de calor con suficiente lugar para sujetar los extensómetros necesarios, y proveer un tamaño de ligamento suficiente para el crecimiento de la fisura en un modo estable para permitir datos de crecimiento de fisura.

7.4 *Preparación de entalla.* El maquinado de la entalla para las probetas del ensayo pueden ser hechas por maquinado de descarga eléctrica (EDM), fresado, o sierra cortante. Los requisitos asociados con la pre-fisura se muestran en la Fig.5

7.5 *Medidas de la probeta.* Las dimensiones de la probeta estarán dentro de las tolerancias dadas en la Fig. 1

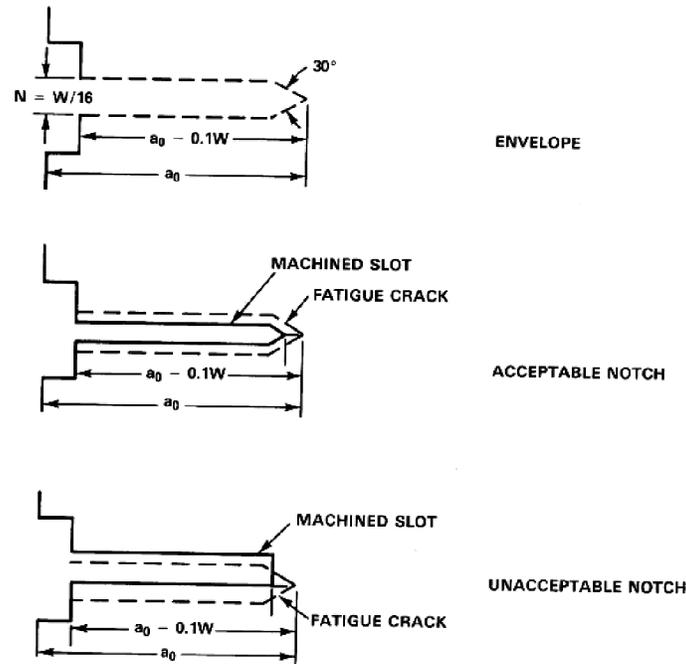


FIG. 5 Starter Crack Envelope

7.6 *Pre-fisura.* La pre-fisura por fatiga es recomendada para la mayoría de las situaciones. Sin embargo un corte angosto inducido por una máquina de descarga eléctrica (EDM) puede también ser usado como una fisura inicial. Por ejemplo la EDM es preferible para algunos materiales con creep frágil tales como intermetálicos (19) debido a las dificultades en el crecimiento de las fisuras con frente recto. Ambos métodos de pre-fisura son descriptos.

7.6.1 *Pre-fisura por EDM.* El ancho de la pre-fisura por EDM no excederá 0,1mm. Deben tomarse precauciones para evitar cualquier calentamiento localizado, el cual, puede alterar la microestructura del material cercano a la punta de la fisura.

7.6.2 *Pre-fisura por fatiga.* Las probetas pueden ser prefisuradas a temperatura ambiente o a temperatura entre la ambiente y la temperatura del ensayo, bajo fuerzas de fatiga que no excedan el valor máximo,  $P_f$  dado por:

$$P_f = \frac{0,4B_N(W - a_o)^2\sigma_{YS}}{2W + a_o} \quad (2)$$

Para el final de la extensión de pre-fisura por fatiga, 0,64mm (0,025in), la fuerza máxima no será más grande que  $P_f$  o a un valor tal que la relación entre el rango de factor de intensidad y

el módulo de Young,  $\frac{\Delta K}{E}$ , sea igual o menor a 0,025 mm<sup>1/2</sup> (0,0005in<sup>1/2</sup>). La precisión del valor de la fuerza de fatiga estará entre  $\pm 5\%$ . El rango de la fuerza será no menor al 90% de la fuerza máxima. El rango de factor de intensidad de tensión,  $\Delta K$ , puede ser calculado usando las ecuaciones dadas en 10.4.3.

7.6.2.1 La fuerza máxima durante los últimos 0,5 mm (0,02in) de la extensión de la fisura, no debe exceder la carga usada durante el ensayo de crecimiento de fisura por creep.

7.6.2.2 Para facilitar la pre-fisura por fatiga a relaciones de tensiones bajas, el radio de las raíces de las entallas mecanizadas puede ser aproximadamente 0,075 mm (0,003in). Puede que también sea conveniente tener una entalla por EDM de 0,25 mm (0,01in) de tamaño para mejorar la iniciación de fisura por fatiga. Una entalla de forma Chevron (entalla en V) maquinada como la descrita en Test Method E399 o entalla pre-compresión como la descrita en Test Method E399 puede que sea práctico cuando el control de la forma de la entalla es un problema.

7.6.3 La pre-fisura es hecha con el material en las mismas condiciones de calor tal como será testeado por comportamiento de crecimiento de fisura por creep.

7.6.4 El tamaño de la pre-fisura desde el maquinado de la entalla será no menor que el 5% del tamaño total de la entalla,  $a_0$ , y no menor que 1,3mm (0,05in).

7.6.5 Debe tenerse cuidado durante el pre-entallado por otro método para evitar el daño excesivo a la raíz de la entalla.

7.7 *Preparación de la probeta para medición del potencial eléctrico.* Para la elección de los accesorios de fijación, del cable y demás accesorios referirse al anexo Test Method E647

#### 7.8 *Accesorios de termocupla*

7.8.1 Una termocupla debe ser agregada a la probeta para medir la temperatura de la probeta. La termocupla estará ubicada en la región del ligamento no figurado de la probeta 2 a 5 mm (0,08 a 0,2in) arriba o abajo del plano de de la entalla Las termocuplas múltiples son recomendadas para probetas con más ancho que 50 mm (2in). Estas termocuplas deben estar igualmente espaciadas sobre región no fisurada arriba o abajo del plano de la fisura como se dijo más arriba.

7.8.2 En la unión de la termocupla a la probeta, el empalme debe mantenerse en íntimo contacto con la probeta y blindado de la radiación si fuera necesario. El blindaje no es necesario si la diferencia en la temperatura indicada desde un bead no blindado y un bead insertado en un agujero de la probeta ha sido menor que la mitad de la variación permitida en 9.2.2. El bead sería tan pequeño como sea posible y ahí no habría shorting of the circuit (tal como podría ocurrir con los cables enroscados detrás del bead). Aisladores cerámicos serían usados en zonas calientes para prevenir fuentes de corto circuito.

7.8.3 Las Specifications E139 identifican el tipo de termocupla que pueden ser usadas en regiones de temperaturas diferentes. Es importante notar que las duraciones de los ensayos de crecimiento de fisura por creep son largas invariablemente. Así, un método de medición de temperatura estable sería usado para reducir el error experimentalmente.

## 8 Calibración y Standardización

8.1 El sistema de potencial eléctrico, el sistema de medición de la fuerza y el indicador de desplazamiento deben ser verificados. La calibración de estos dispositivos sería tan frecuente como sea necesario para asegurar que los errores para cada ensayo son menores que la variación indicada permitida citada en esta práctica. La máquina del ensayo será calibrada por lo menos anualmente, o para ensayos que duran más que 1 año, después de cada ensayo. Los instrumentos en constante uso (o casi constante) serán calibrados más frecuentemente, aquellos usados ocasionalmente deben ser calibrados antes de cada uso.

8.1.1 Calibrar el sistema de medición de carga según Prácticas E4 y E74

8.1.2 Calibrar el indicador de desplazamiento según Method E 83

8.1.3 Verificar el sistema de potencial eléctrico según las pautas del Anexo A1

8.1.4 Calibrar las termocuplas según Method E 220

## 9 Procedimiento

9.1 *Número de ensayos.* La velocidad de crecimiento de fisuras por Creep muestra dispersión de los datos. Los valores de  $\frac{da}{dt}$  a un dado valor de  $C^*(t)$  y  $C_t$  pueden variar por un factor de 2 (**7, 20**) para materiales con creep dúctil si todas las otras variables, tales como, la geometría, tamaño de probeta, método de carga y temperatura son mantenidas constante. Para materiales creep-frágil, la dispersión en la relación de  $\frac{da}{dt}$  versus  $K$  puede estar por encima de un factor 4 (**17**). Esta dispersión puede aumentar además por variables tales como: diferencia microestructural, precisión de la fuerza, control del ambiente y técnicas de procesamiento de datos. Además, es buena práctica llevar a cabo una repetición de ensayos, cuando este es poco práctico, varias probetas deben ser preparadas tal que las regiones de solapado de datos de  $\frac{da}{dt}$  versus  $C^*(t)$ ,  $C_t$  o  $K$  sean obtenidas. La confianza de los datos aumentará con el número de ensayos y el número de ensayos dependerá del uso final de los datos.

### 9.2 Instalación de la probeta

9.2.1 Instalar la probeta en la máquina insertando ambos PINs, luego aplicar un pequeña fuerza (aproximadamente 10% de la intensidad de la fuerza del ensayo) para ajustar el tren de carga. Conectar los circuitos de la entrada de corriente y voltaje a la fuente de corriente y potenciómetro, respectivamente. Sujetar el indicador de desplazamiento y la termocupla al potenciómetro apropiado. Poner el horno en posición y comenzar a calentar la probeta.

9.2.2 Antes que la fuerza del ensayo sea aplicada y por la duración del ensayo, no permitir la que la diferencia entre la temperatura indicada y la temperatura de ensayo nominal excedan los siguientes límites:

9.2.2.1 Hasta o igual que  $1000^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  ( $1800^{\circ}\text{F} \pm 3^{\circ}\text{F}$ ), por encima de  $1000^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  ( $1800^{\circ}\text{F} \pm 5^{\circ}\text{F}$ )

9.2.2.2 El termino “temperatura indicada” significa la temperatura indicada por el dispositivo de medición de temperatura usando prácticas de buena calidad.

*Nota 3.* Es reconocido que la verdadera temperatura puede que varié más que la temperatura indicada. El permitir variaciones en la temperatura indicada en 9.2.2, no hay que interpretarlo como una disminución en la importancia de buenas prácticas y control de temperaturas precisos. Todos los laboratorios mantendrán variaciones entre la temperatura verdadera y la indicada tan bajas como prácticamente sea posible. Es reconocido, en vista de la gran dependencia de las propiedades de los materiales con la temperatura, que un control de temperatura cercano es necesario. Los límites antedichos representan rangos que reflejan prácticas comunes.

9.2.3 La variación en la temperatura durante el ensayo no debería exceder los límites de arriba. Puede que sea deseable estabilizar la temperatura del horno de 5 a  $30^{\circ}\text{C}$  (10 a  $50^{\circ}\text{F}$ ) debajo de la temperatura de ensayo nominal antes de hacer los ajustes finales. Reportar cualquier variación de temperatura considerando la magnitud y duración.

9.2.4 El tiempo de permanencia de la temperatura antes del inicio del ensayo estará dado por el tiempo necesario para asegurar que la temperatura puede ser mantenida entre los límites dados en 9.2.2. Este tiempo no será menor que 1 hora para espesores de probeta de 25 mm (1in). Informar el tiempo para alcanzar la temperatura del ensayo y el tiempo y la temperatura luego de aplicada la carga.

9.2.5 Cualquier salida positiva de la temperatura más allá de los límites especificados en 9.2.2. es causado por el rechazo del ensayo. Cuando la temperatura cae por debajo de los límites mínimos especificados no será causa del rechazo. Bajas temperaturas no inducen en el material cambios potencialmente adversos que si son asociados con elevadas temperaturas. Es

recomendable que los datos de crecimiento de fisura obtenidos durante momentos de baja temperatura y durante el período correspondiente a 0,5mm (0,2in) de extensión de fisura, seguida por una estabilización de la temperatura, sean considerados inválidos y excluidos.

9.2.6 La corriente para el sistema de potencial eléctrico deberá encenderse en el mismo tiempo que el horno. Esto es necesario para asegurar que la resistencia que calienta la probeta causado por la corriente aplicada también se establezca a medida que la probeta es llevada a la temperatura del ensayo.

### 9.3 Procedimientos de carga

9.3.1 Para ensayos de fuerza constante, una pequeña parte de la fuerza del ensayo (que no exceda el 10%) puede ser aplicado antes de durante el calentamiento de la probeta. Este procedimiento usualmente mejora la axialidad de la carga reduciendo el desplazamiento causado por fuerzas laterales.

9.3.2 Aplicar el ensayo cuidadosamente tal que el “choque” de la fuerza o sobrecargas inerciales sean evitadas. La fuerza deberá ser aplicada en incrementos y los desplazamientos monitoreados para asegurar que el extensómetro es correctamente asentado. El tiempo para la aplicación de la fuerza será tan corto como sea posible dentro de estas limitaciones.

9.4 *Mediciones durante el ensayo.* El voltaje eléctrico, fuerza, desplazamiento de la línea de carga, y temperatura de ensayo serán archivados continuamente durante el ensayo si autográficos son usados. Si son usados sistemas de adquisición de datos digitales, la frecuencia de muestreo no debe ser menor que una lectura completa cada 15 minutos.

Nota 4. Si se usan máquinas de peso muerto para el ensayo, no es necesario tomar mediciones de la carga

Nota 5. Si se usan técnicas de potencial de corriente, estas medidas serán tomadas al menos cada 24 horas.

### 9.5 Mediciones post-ensayo:

9.5.1 Cuando el ensayo esta terminado, liberar la fuerza y apagar el horno. Luego que la probeta se haya enfriado, sacar la probeta de la máquina.

9.5.2 Si la probeta no fracturó al final del ensayo, deberá ser quebrada teniendo cuidado de minimizar la deformación permanente adicional. El uso de cargas cíclicas para quebrar la probeta es una buena forma de hacerlo. También los aceros ferríticos pueden ser enfriados por debajo de la temperatura de transición dúctil-frágil y fracturarlos.

Nota 6. Es altamente recomendable terminar el ensayo antes de la fractura porque el frente de la entalla final es delineada más claramente y puede ser exactamente medido para verificar la medición de la caída de potencial.

9.5.3 A lo largo del frente de la pre-fisura y el frente de la región sensible al crecimiento de la fisura por creep, medir el tamaño de la fisura en 9 puntos igualmente espaciados centrados en la línea de la mitad del espesor de la probeta y extendiendo cada 0,005 W desde las raíces de las entallas laterales (side-grooves). Calcular el tamaño de la entalla original,  $a_0$ , y el tamaño de la entalla final,  $a_f$ , como sigue: promediar las mediciones de las 2 superficies cercanas, combinar el resultado con las 7 mediciones de longitud de fisura y determinar el promedio. El instrumento de medición tendrá una precisión de 0,025mm (0,001 in)

## 10 Cálculos

10.1 *Determinación del tamaño de fisura.* Seguir el procedimiento descrito en el anexo A1, para determinar el tamaño de fisura durante el ensayo como una función del tiempo.

10.1.1. El ensayo será parado tan pronto como la caída de potencial y la medición del desplazamiento indiquen que la etapa terciaria del crecimiento de la fisura haya comenzado y que el fallo final de la probeta sea inminente. Determinar el tamaño de fisura desde la lectura del

potencial eléctrico usando el método de interpolación lineal descrito en el anexo A 1.1. Luego calcular la extensión de la fisura,  $\Delta a_f$ , restando el tamaño inicial de la entalla,  $a_o$ , del valor del tamaño final de fisura,  $a_f$ . El tamaño final de la fisura será determinado usando mediciones fractográficas de superficie donde sea posible. Si  $\frac{\Delta a_f}{a_o} > 0,2$  usar el procedimiento de la sección

10.1.2 para estimar el comportamiento del tamaño de la fisura en función del tiempo.

10.1.2 Si la rotura de la probeta ocurre antes de parar el ensayo, entonces mediciones fractográficas del tamaño final de la fisura no serán posibles. En este caso o cuando  $\frac{\Delta a_f}{a_o} > 0,2$ ,

determinar el tamaño de la fisura siguiendo el procedimiento descrito en A1.2 usando una fórmula predictiva. El tamaño de la fisura desde la lectura del potencial eléctrico, puede usarse para calcular la extensión de la fisura predictiva,  $\Delta a_{pf}$ , restando el tamaño inicial de la entalla,  $a_o$ , del valor predictivo de tamaño de fisura final,  $a_{pf}$ .

10.2 *Validación del ensayo.* Los datos de tamaño de fisura, usando este método, son válidos para fomentar el proceso si se asegura que las mediciones de tamaño de fisura están entre los límites requeridos como sigue:

10.2.1. Si el método 10.1.2 es usado para determinar el tamaño de la fisura, los datos son válidos para hacer valer el procesamiento si

$$0,85 \leq \frac{\Delta a_{pf}}{a_f - a_o} \leq 1,15 \quad (3)$$

Nota 7. Si  $a_f$  no es conocido, usar esta ecuación no es posible. Es recomendable que las mediciones de los ensayos en cuestión sean comparadas con otros datos válidos obtenidos bajo condiciones similares, previo a incluirlos en el set de datos.

10.2.2 *Tamaño de fisura original.* Si cualquiera de las 9 mediciones físicas del tamaño de pre-fisura original difiere por más que el 5% del tamaño de fisura original, como se definió en el 9.5.3, el ensayo no es válido.

10.2.3. *Tamaño de fisura final.* Si cualquiera de las 9 mediciones físicas del tamaño de la pre-fisura final difiere por más de 5% del tamaño final de la fisura,  $a_f$ , definido en 9.5.3 el ensayo no es válido. Para las siguientes probetas, la configuración de la ranura lateral puede ser modificada para que sea más fácil reunir estos requisitos.

10.2.4. Las variaciones de la temperatura deben estar entre los niveles permitidos en 9.2.2, de otra manera el ensayo no es válido.

10.3 *Determinación de la velocidad de crecimiento y velocidad de desplazamiento de la línea de carga:*

10.3.1 Desde los resultados del tamaño final de la entalla en función del tiempo y la desviación de la línea de carga en función del tiempo elegir los siguientes datos para el procesamiento. El primer dato consiste del tamaño de la pre-fisura con el tiempo correspondiente y la desviación acumulada seteada a cero. Elegir los siguientes puntos de datos de tamaño de fisura, desplazamiento de línea de carga correspondiente y tiempo tal que la extensión mínima de entalla entre datos sucesivos sea de 0,25mm (0,01in) y el mínimo incremento en la desviación sea de 0,1% de todo el rango de extensómetro. El máximo  $\Delta a$  permitido entre lecturas sucesivas es de 0,02W.

10.3.2 La velocidad de crecimiento de fisura por creep y velocidad de desplazamiento de la línea de carga puede ser determinado desde los datos de tamaño de fisura en función del tiempo (a vs. t) y de los datos de desplazamiento de la línea de carga en función del tiempo (V vs. t). Son recomendadas aproximaciones que utilizan la secante o métodos de incremento polinomial.

Nota 8. Ambos métodos recomendados para el procesamiento de datos a vs. t y V vs. t se sabe que dan una respuesta similar que  $\frac{da}{dt}$  y  $\frac{dV}{dt}$ . Sin embargo el método de la secante a menudo resulta en aumentos en  $\frac{da}{dt}$  y  $\frac{dV}{dt}$  con respecto al método de incremento polinomial, dado que luego empareja los datos numéricamente (21). Esta aparente inconsistencia producida por los 2 métodos necesita ser considerada especialmente al utilizar datos de crecimiento de fisura por creep en diseño y análisis de predicción de vida remanente.

#### 10.4 Cálculos del ritmo de desplazamiento por creep

10.4.1 Los datos  $\frac{dV}{dt}$  deben ser procesados después de calcular  $\frac{dV_C}{dt}$  (o  $V_C^*$ ) en varios momentos durante en ensayo 10.4.2.  $V_C^*$  es calculado como sigue (22,23):

$$V_C^* = V - \frac{a B_N}{P} \frac{2K^2}{E'} \quad (4)$$

Donde

$a$ : Velocidad de crecimiento de fisura,  $\frac{da}{dt}$

P: Fuerza aplicada

$E' = \frac{E}{1-\nu^2}$  Para planos de deformación y E para planos de tensión, donde E = módulo elástico y  $\nu$  = relación de Poisson

$B_N$ : Espesor neto de probeta

K: Factor de intensidad de tensiones

Nota 9. Al trabajar con materiales altamente dúctiles tales como aceros inoxidable austeníticos, puede que sea necesario incluir términos adicionales en la ecuación de la sección 10.4.2. para justificar la plasticidad.

10.4.3 La expresión para el cálculo de K es (24):

$$K = \frac{P}{(B \cdot B_N)^{1/2}} \frac{2 + a/W}{(1 - a/W)^{3/2}} f(a/W) \quad (5)$$

Donde

$$f(a/W) = 0,886 + 4,64(a/W) - 13,32(a/W)^2 + 14,72(a/W)^3 - 5,6(a/W)^4 \quad (6)$$

10.5 La velocidad de crecimiento de la fisura que relaciona los parámetros  $C^*(t)$ ,  $C_t$  y K para C (T) son calculados usando las siguientes expresiones.

10.5.1 *Determinación de la integral  $C^*(t)$* . La magnitud de la integral  $C^*(t)$  para probetas C (T) en cada punto, puede determinarse como (3,14):

$$C^*(t) = \frac{P \dot{V}_C}{B_N (W - a) n + 1} (2 + 0,522 \frac{W - a}{W}) \quad (7)$$

Donde

n=exponente de creep en la relación entre la velocidad de creep mínima y la tensión aplicada. El valor de n puede obtenerse de datos de ensayos de creep de acuerdo con la práctica E139. Si ensayos de creep no pueden ser dados, puede usarse el valor de n de la literatura. El valor de n usada y su fuente deben ser informados.

10.5.2 *Determinación de  $C_t$* . La magnitud de  $C_t$  será estimada como sigue (4)

$$C_t = \frac{P \dot{V}_c}{(B.B_N)^{1/2} W} \frac{F'}{F} \quad (8)$$

Donde:

$$\frac{F'}{F} = \left[ \frac{1}{2(1+a/W)} + \frac{3}{2(1-a/W)} \right] + \frac{f' a/W}{f a/W} \quad (9)$$

$f a/W$  fue definido en la sección 10.4.3 y

$$f a/W = 4,64 - 26,64(a/W) + 44,16(a/W)^2 - 22,4(a/W)^3 \quad (10)$$

10.6 *Criterios de validación.* Elegir el parámetro relativo a la velocidad de crecimiento de la fisura apropiado: La elección de este parámetro depende de si el material se comporta como creep-dúctil o creep-frágil. **(5, 10,25)**. En estado estacionario las velocidades de crecimiento en materiales creep-dúctil son correlacionados por  $C_t$  o  $C^*(t)$ .  $C_t$  es usado para datos en creep de pequeña escala y  $C^*(t)$  para datos de creep en gran escala (generalizado). En el estado estacionario, las velocidades de crecimiento de fisura por creep en materiales creep-frágil son correlacionadas por K en este método.

10.6.1 Calcular la relación de  $\frac{\dot{V}_c}{\dot{V}}$  para cada punto. Si  $\frac{\dot{V}_c}{\dot{V}} \geq 0,5$ , los datos son clasificados

como si existiera creep-dúctil y el parámetro es  $C_t$ , o  $C^*(t)$ . Si  $\frac{\dot{V}_c}{\dot{V}} \leq 0,25$  el dato es clasificado

como si existiera creep-frágil, el parámetro es K y el usuario debe ir a la sección 10.6.3 para más evaluación de los datos.

Nota 10. Para  $0,25 \leq \frac{\dot{V}_c}{\dot{V}} \leq 0,5$  el método no da recomendaciones específicas para un parámetro relativo de velocidad de

crecimiento de fisura. Los usuarios son aconsejados a correlacionar  $\frac{da}{dt}$  con  $C_t$  y también con K y reportar sus conclusiones.

Algunas guías para tratar tales datos son dados en la referencia (26).

10.6.2 Los datos para los cuales el tiempo excede el tiempo de transición,  $t_T$ , son correlacionado por  $C^*(t)$  como fue calculado por la ecuación en 10.5.1. Los datos para los cuales el tiempo es  $\leq t_T$ , los datos serán únicamente correlacionados con  $C_t$  calculado por la ecuación en 10.5.2. El tiempo de transición  $t_T$  es estimado como sigue:

$$t_T = \frac{K^2(1-v^2)}{E(n+1)C^*(t_T)} \quad (11)$$

El cálculo de  $t_T$  depende del valor de  $t_T$ . Así, el siguiente procedimiento debe ser usado para su estimación. Para el tiempo,  $t$ , que corresponde a cada punto, calcular  $t_T$  usando la ecuación anterior pero sustituyendo  $C^*(t)$  por  $C^*(t_T)$ .  $t_T$  es luego el valor más grande de  $t_T$  en todo el set de datos.

10.6.3 Para datos de velocidades de crecimiento de fisura en materiales creep-frágil para correlacionar con K, los siguientes requisitos deben ser reunidos: una extensión inicial de fisura

de 0,2 mm debe ser desechada y  $\frac{\dot{V}_c}{\dot{V}} \leq 0,25$ .

Los datos que no reúnan los requisitos anteriores no son únicamente dependientes de K y no son considerados válidos por este método. El alcance de esta norma no abarca comportamiento de creep frágil donde no haya estado estable de crecimiento de fisura. Sin embargo, bajo estas circunstancias el valor inicial del factor de intensidad de tensiones K, entre el momento de una extensión de fisura inicial de 0,2mm y el momento de falla final, deberá ser archivado. Hay un número de métodos ya desarrollados (**13**) para tratar con esta situación.

#### 10.7 Más requisitos de validación

10.7.1 El tiempo requerido para alcanzar la primera extensión de entalla de 0,2mm (0,008in) durante un ensayo de fuerza constante es referido como el periodo inicial,  $t_0$ . Puede que represente toda o una parte de la región de transición, como se discutió en la sección 5.1.5. El comportamiento durante el crecimiento de la fisura es afectado por el desarrollo de daño por creep y en algunos materiales con creep-frágil puede representar una parte importante (tanto como el 80%) del tiempo de ensayo (**17**). Es recomendable que un archivo del tiempo tomado para obtener una extensión de fisura de 0,2mm sea hecho durante el periodo de iniciación,  $t_0$ , e incluido como una parte del informe. Cualquier dato obtenido previo a una extensión de fisura de 0,2mm no debe ser incluido en los datos usados para calcular  $\frac{da}{dt}$ .

10.7.2 Como se indica en 10.7.1,  $t_0$  puede que incluya solo una parte de la región de transición en materiales con creep-frágil.

10.7.3 Si durante el ensayo la fisura se desvía fuera de sector que abarque al material entre los planos que están orientados a  $\pm 5^\circ$  del plano ideal del crecimiento de fisura y que intercepta el eje de la carga, los datos son inválidos por este método de ensayo.

10.7.4 Los datos adquiridos después de la desviación acumulada de la línea de carga, que excedan 0,05W, los cuales podrían deberse tanto a creep o plasticidad, son considerados inválidos por este método de ensayo.

## 11 Reporte

### 11.1 Reportar la siguiente información:

11.1.1 Tipo de probeta y dimensiones incluyendo espesor B, espesor neto  $B_N$  (if side-grooved) y ancho W.

11.1.2 Descripción de la máquina del ensayo y equipo usado para medir el tamaño de fisura y la precisión con la cual las mediciones del tamaño de fisura son realizadas.

11.1.3 Las características del material del ensayo, en términos de tratamientos térmicos, composición química, propiedades de tracción a temperatura ambiente y temperatura de ensayo, el pre-exponente A y el exponente de creep n usados en los cálculos, incluyendo como este fue obtenido.

11.1.4 Orientación del plano de la fisura. Además si la probeta es obtenida desde un producto grande, dar su localización con respecto al origen.

11.1.5 El valor final de K,  $P_{max}$ ,  $P_{min}$ , la temperatura de pre-fisura, y la frecuencia de la carga y el número de ciclos usados para el pre-entallado por fatiga. Si la carga de pre-fisura fue disminuida paso a paso, STEPPED-DOWN aclarar el procedimiento empleado para el método de carga y dar la cantidad de extensión de fisura al final del nivel de la fuerza. Si un entallado por

EDM es usado en lugar de una pre-fisura por fatiga, reportar el radio de la raíz y la longitud de la entalla.

11.1.6 El estado de la fuerza del ensayo y variables experimentales tales como temperatura de ensayo y temperatura ambiente. Para otros ambientes que aire de laboratorio, reportar la composición química de los gases.

11.1.7 Reportar métodos de análisis de datos, incluyendo la técnica usada para convertir el tamaño de la fisura y los datos de deflexión en velocidades y el procedimiento específico usado para corregir las discrepancias entre el tamaño de fisura medido sobre la superficie fracturada (fisurada) con la predecida desde el método de potencial eléctrico.

11.1.8 Gráficos de  $\frac{da}{dt}$  versus  $C^*(t)$ ,  $C_t$  o  $K$ . Se recomienda que  $C^*(t)$  sea la abscisa y  $\frac{da}{dt}$  sea la ordenada. Coordenadas logarítmicas son normalmente usadas. Reportar todos los datos que no cumplan la validez de criterios de 10.6 y 10.7 e identificar.

11.1.9 Reportar el tiempo que tomó para que la fisura se extendiera 0,2 mm

11.1.10 La descripción de cualquier suceso que aparezca debe ser relacionado como dato anómalo (por ejemplo el comportamiento transitorio que sigue la interrupción del ensayo o cambios en los niveles de carga).

11.1.11 Es deseable, pero no requisito, tabular los resultados del ensayo. Al usar este método de ensayo para la presentación de resultados, la siguiente información será tabulada para

cada ensayo:  $a$ ,  $t$ ,  $\frac{da}{dt}$ ,  $V$ ,  $\frac{\dot{V}_c}{\dot{V}}$ ,  $C^*(t)$ ,  $C_t$ ,  $K$ ,  $R$ ,  $t_T$  y  $t_0$ .

## 12 Precisión y tendencias

12.1 *Precisión*. La precisión de  $\frac{da}{dt}$  versus  $C^*(t)$  o  $K$  es una función de variabilidad del material inherente como así también errores en la medición del tamaño de la fisura, temperatura, velocidades de desplazamiento de creep y niveles de fuerza aplicada. La precisión de la carga requerida de 8.1.1 es fácilmente lograda por máquinas de creep modernas y por máquinas de ensayos servo-mecánicas. La variación de  $\pm 1$  % que se permite en la fuerza puede provocar variaciones en el valor de  $C^*(t)$  y de  $C_t$  de  $\pm 4$  % a  $\pm 12$  % y variaciones en  $K$  de  $\pm 1$  %, esto se traduce en variaciones de  $\pm 3$  % a  $\pm 10$  % en  $\frac{da}{dt}$  a un valor dado de  $C^*(t)$ ,  $C_t$  o  $K$ . Sin embargo, en general los errores en la medición del desplazamiento y tamaño de fisura causan una contribución más importante a la variabilidad en  $\frac{da}{dt}$ , aunque esta contribución es difícil de aislar ya que es acoplado al procedimiento analítico para convertir  $a$  versus  $t$  y  $V$  versus  $t$  en  $\frac{da}{dt}$  y  $\frac{dV}{dt}$  y para la variabilidad inherente al material. Sin embargo, es claro que la variación total en  $\frac{da}{dt}$  es dependiente de la relación del tamaño de la fisura y el intervalo de medición del desplazamiento para la medición del error (**20**). Además, un intervalo de medición de tamaño de fisura óptimo existe a causa de que el intervalo sería grande comparado con la medición de error (o precisión), pero pequeño comparado con el gradiente de  $C^*(t)$ ,  $C_t$  o  $K$  de las probetas del ensayo. Estas consideraciones forman las bases para recomendar los intervalos de 10.3.1.

12.1.1. Aunque es a veces es imposible separar las contribuciones desde cada una de las fuentes de variabilidad arriba mencionadas, una medición total de la variabilidad en  $\frac{da}{dt}$ , versus  $C^*(t)$ ,  $C_t$  o  $K$  se encuentra disponible desde los resultados de un programa de ensayos inter-laboratorios (16, 17, 20). Algunos de esos datos, por ejemplo, obtenidos sobre aceros 1 Cr-1 Mo-0,25 V altamente homogéneos a 594°C (1100°F), mostraban reproducibilidad en  $\frac{da}{dt}$  versus  $C^*(t)$  o  $C_t$ , siendo  $\pm 0,25$  % (20). Los valores citados son errores residuales basados sobre  $\pm 0,2$  de la desviación standard residual sobre la respuesta más baja determinada desde un análisis de regresión. Los datos de  $\frac{da}{dt}$  correlacionados con  $K$  muestran mucha más alta variabilidad, hasta un factor de 4 (16,27).

12.1.2 Es importante reconocer que para propósitos de diseño o cuantificación de vida remanente, la variabilidad del material inherente a menudo se vuelve la fuente primaria de la variabilidad en  $\frac{da}{dt}$ . La variabilidad asociada con un dado material es causada por inhomogeneidades en la composición química, microestructura o ambos. Estos son algunos factores que acoplados con condiciones de procesamiento variables dan lugar a más variabilidades. (7,28). Una cuantificación de variabilidad del material inherente, tanto dentro o entre heats or lots puede ser determinada solo conduciendo un programa de ensayo planeado según las estadísticas sobre el material de interés. Así, los resultados citados antes de programas de ensayo inter-laboratorio utilizan materiales elegidos para minimizar la variabilidad del material permitiendo cuantificar la precisión de la medición, pero son generalmente no aplicables con respecto a variabilidades en otros materiales.

12.2 *Tendencias*. No hay valores “standard” aceptados para  $\frac{da}{dt}$  versus  $C^*(t)$ ,  $C_t$  o  $K$  para cualquier material. En la ausencia de tal valor verdadero, el enunciado significativo puede ser dado con respecto a la tendencia de los datos.

### 13. Anexo (Información obligatoria)

#### A1. Guías para el uso de diferencia de potencial eléctrico (PD) para la determinación del tamaño de fisura.

A1.1 *Relaciones de tamaño de fisura versus voltaje para probetas C (T)* —Las diferencias de potencial (PD) inicial y final leídas corresponden al tamaño de fisura inicial y final respectivamente durante el ensayo. Para puntos intermedios, el tamaño de fisura en cualquier instante puede ser definido por una interpolación lineal directa de los datos de la diferencia de potencial correspondiente a la medición inicial de tamaño de fisura,  $a_0$ , y la medición final de tamaño de fisura,  $a_f$ , a condición que ambos,  $a_0$  y  $a_f$  puedan ser medidos precisamente sobre la superficie de fractura (fisura) de la probeta al final del ensayo. Así, el tamaño de fisura,  $a$ , en cualquier instante esta dado por:

$$a = \left[ (a_f - a_0) \frac{(V - V_0)}{(V_f - V_0)} \right] + a_0 \quad (\text{A 1.1})$$

Donde  $V_0$  y  $V_f$  son las lecturas de diferencia de potencial inicial y final respectivamente y  $V$  es la diferencia de potencial instantánea que corresponde al tamaño de fisura,  $a$ . Este método es no recomendado cuando  $\frac{\Delta a_f}{a_0} > 0,2$ .

A1.2 Si  $\frac{\Delta a_f}{a_0} > 0,2$ , una relación predeterminada entre el voltaje medido y el tamaño de fisura para la geometría de probeta y la localización de conductores de entrada y salida puede ser usada para determinar el tamaño de fisura en función del tiempo. Por ejemplo, para una localización de conductores de entrada de corriente y tensión como muestra la figura A1.1, la siguiente ecuación puede ser usada para calcular el tamaño de fisura desde una medición de los valores  $\frac{V}{V_0}$  (29,39):

$$\frac{a}{W} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \frac{\cosh(\pi Y_0 / 2W)}{\cosh \left[ \frac{V}{V_0} \cosh^{-1} \left( \frac{\cosh \pi Y_0 / 2W}{\cos \pi a_0 / 2W} \right) \right]} \right] \quad (\text{A 1.2})$$

Donde

$a_0$ : tamaño de entalla referente al voltaje  $V_0$ . Usualmente,  $a_0$  será el tamaño inicial de fisura y  $V_0$  es el voltaje inicial.

$Y_0$ : distancia media entre la las salidas conductoras de tensión.

$V$ : tensión de salida.

Nota A 1.1--- La ecuación A1.2 también puede ser usada para estimar el tamaño de fisura como una función del tiempo si la medición del valor de  $a_f$  no está disponible. En esta instancia, los ensayos adicionales como se recomienda en la Nota 7 en la sección 10.2.1 deben ser llevados a cabo para validar los datos obtenidos en esta probeta.

Si el criterio de validación de la sección 10.2.1 es reunido y un tamaño de fisura final  $a_f$  está disponible, es recomendable una corrección de todos los datos entre  $a_0$  y  $a_f$  mediante la siguiente interpolación lineal:

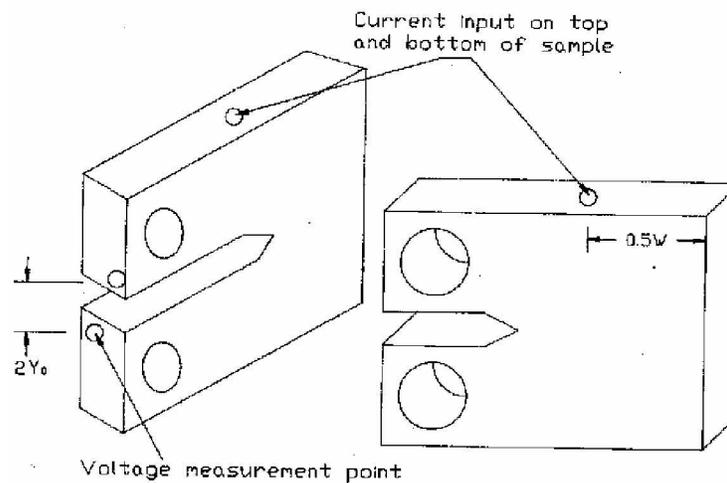
$$a = \left[ (a_p - a_0) \frac{(a_f - a_0)}{(a_{pf} - a_0)} \right] + (a_0) \quad (\text{A 1.3})$$

Donde:

$a_{pf}$ : tamaño de fisura final predecido

$a_f$ : tamaño de fisura actual

$a_0$ : tamaño de fisura inicial



**FIG. A1.1 Input Current and Voltage Lead Locations for Which the Equation in A1.1 Applies**

A 1.3 *Medición de Voltaje Térmico para la Técnica de Corriente Continua* --- Los voltajes  $V$  y  $V_0$  usados para determinar el tamaño de fisura en la ecuación A1.1 puede que sean diferentes de su lectura reflejada al usar técnica de corriente continua. Esta diferencia es causada por el voltaje térmico,  $V_{th}$ , causado por las diferencias en las propiedades de la unión o las resistencias de los dos conductores de salida. Una medición inicial de  $V_{th}$  es necesaria. Esta puede ser llevada a cabo apagando la corriente y leyendo la salida de tensión. Además de la medición inicial, una medición periódica de  $V_{th}$  también debería ser realizada apagando la corriente por cortos periodos de tiempo durante el ensayo. Los valores de  $V_{th}$  deben ser sustraídos desde los valores indicados de  $V$  y  $V_0$  antes de substituirlos en la ecuación dada en A 1.2.

Nota A1.2--- Las guías para el uso de la diferencia de potencial eléctrica para la determinación del tamaño de fisura resumidos en el anexo para TEST METHOD E647 son aplicables para mediciones de crecimiento de fisura por creep. Los lectores consultarían este método de ensayo para recomendaciones sobre como usar esta técnica.

A1.4 *Discusión*. Será notado que en algunos casos la diferencia de potencial inicial leída al inicio del ensayo caerá antes de la estabilización y finalmente aumentará con la extensión de la fisura. Las condiciones de carga inicial, plasticidad, creep excesivo y daño y oxidación de la punta de la fisura afectará el tamaño de la caída en la diferencia de potencial. En tales casos, es recomendado que el mínimo valor de diferencia de potencial alcanzado sea extrapolado a tiempo

cero antes que las determinaciones de tamaño de fisura sean realizadas. Hay probabilidad de un aumento disperso en las medidas de tamaño de fisura durante los periodos iniciales de ensayo.

## Referencias de esta norma

1. Landes, J.D. and Begley, J. A.;"A Fracture Mechanics Approach to Creep Crack Growth", Mechanics of Crack Growth, ASTM STP 590, ASTM, 1976, pp. 128-148.
2. Nikbin, K. M., Welter, G. A., and Turner, C. E., "Relevance of Nonlinear Fracture, ASTM STP 601, ASTM, 1976, pp. 47-62.
3. Saxena, A., "Evaluation of C\* for the Characterization of Creep Crack Growth Behavior in 304 Stainless Steel," Fracture Mechanics: Twelfth Conference, 1980 ASTM STP 700, ASTM, pp. 131-151.
4. Saxena, A., "Creep Crack Growth Under Non Steady-State Conditions," Fracture Mechanics: Seventeenth Volume, ASTM STP 905, ASTM, Philadelphia, 1986, pp. 185-201.
5. Hui, C. Y., "Steady-State Crack Growth in Elastic Power Law creeping Materials," Elastic-Plastic Fracture, Vol. 1, ASTM STP 803, ASTM , Philadelphia, 1983, pp. 573-593.
6. Riedel, H., and Rice, J. R., "Tensile Crack in Creeping Solids, "Fracture Mechanics: Twelfth Conference, ASTM STP 700, ASTM, 1980, pp. 112-130.
7. Gibbons, T. B. Guest editor, "Creep Crack Growth," a special issue of Materials at High Temperatures, Vol. 10, No. 2, May 1992.
8. R. J. Bucci: "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth Rate Measurement," Fracture Mechanics: Thirteenth Conference, ASTM STP 743, American Society for Testing and Materials, 1981, pp.28-47.
9. Bassani, J. L.,Hawk, D. E. and Saxena, A.," Evaluation of the Ct Parameter for Characterizing Creep Crack Growth Rate in the Transient Regime," Nonlinear Fracture Mechanics: Time Dependent Fracture Mechanics, Vol. 1, ASTM STP995, ASTM, Philadelphia, 1989, pp. 7-29.
10. Saxena, A. "Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers," CRC Press, Boca Raton, FL, 1998.
11. Adefris, N. B., McDowell, D. L., and Saxena, A. "An Alternative Analytical Approximation of the Ct Parameter," Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 21, 1988, pp.375-386.
12. Schwalbe, K. H., Ainsworth, R. H., Saxena, A. and Yokobori, T., "Recommendations for Modifications of ASTM E1457 to Include Creep-Brittle Materials," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 62, 1999, pp. 123-142.
13. Saxena, A. and Yokobori, T. editors, "Crack Growth in Creep-Brittle Materials" special issue of Engineering Fracture Mechanics, Vol. 62, No. 1, 1999.
14. Nikbin, K. M.,Smith, D. J., and Webster, G. A., "An engineering Approach to the Prediction of Creep Crack Growth," Journal of Engineering Materials and Technology, Trans. ASME, Vol. 108, 1986, pp. 186-191.  
A. R. Yokobori, Jr., Engineering Fracture Mechanics, 62, (1999), pp. 61-78.
15. Tabuchi, M., Kubo, K., Yokobori, A. T., And Fuji, A., "Results of the Japanese Round-Robin on Creep Crack Growth Evaluation Methods for Ni-Base Superalloys," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 62, 1999, pp. 49-60.
16. Kwon, O., Nikbin, K. M., Webster, G. A., and Jata, K. V., "Crack Growth in the Presence of Limited Creep Deformation," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 62, 1999, pp. 33-46.
17. Liaw, P. K., Saxena, A., and Schaffer, J., "Estimating Remaining Life of Elevated-Temperature Steam Pipes—Part II. Fracture Mechanics Analysis," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 32, No. 5, 1989, pp.769-722.

- A. Fuji, M. Tabuchi, A. T., Yokobori, Jr., and T. Yokobori, Engineering Fracture Mechanics Vol. 62, 1999, pp. 23-32.
18. Saxena, A., "Evaluation of Crack Tip Parameters for Characterizing Crack Growth: Results of the ASTM Round-Robin Program," Materials at High Temperatures, Vol. 10, 1992, pp. 79-91.
  19. Clark, W. G., and Hudak, S. J., Jr., "The Analysis of Fatigue Crack Growth Rate Data," Application of Fracture Mechanics to Design, J. J. Burke and V. Weiss, Eds., Vol. 22, Plenum Press, 1979, pp. 67-81.
  20. Saxena, A. and Landes, J. D., "Characterization of Creep Crack Growth in Metals," in Advances in Fracture Research, Sixth International Conference on Fracture, Pergamon Press, 1984, pp. 3977-3988.
  21. Saxena, A., Hall, D. E. and McDowell, D. L., "Assessment of Deflection Rate Partitioning for Analyzing Creep Crack Growth Rate Data," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 62, 1999, pp. 111-112.
  22. Srawley, J. E., "Wide Range Stress Intensity Factor Expressions for ASTM 399 Standard Fracture Toughness Specimens," Int. Journal of Fracture Mechanics, Vol. 12, 1976, pp. 475-476.
  23. Ainsworth, R. A., Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 10, 1978, pp. 115-127.
  24. Hall, D. E., McDowell, D. L., Saxena, A., "Crack Tip Parameters for Creep Brittle Crack Growth," Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 21, 1998, pp. 387-402.
  25. Hamilton, B. C., and Saxena, A., "Transient Crack Growth Behavior in Aluminum Alloys C415-T8 and 2519-T87," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 62, 1999, pp. 1-22.
  26. Saxena, A., Han, J., and Banerji, K., "Creep Crack Growth Behavior in Power Plant Boiler and Steam Pipe Steel," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 110, May 1988, pp. 137-146.
  27. Johnson, H. H., Materials Research and Standard, Vol. 5, No. 9, 1965, pp. 442-445.
  28. Schwalbe, K. H. and Hellman, D., Journal of Testing and Evaluation, Vol. 9, No. 3, 1981, pp. 218-221.
  29. Kumar, V., German, M. D., and Shih, C. F., "An Engineering Approach to Elastic-Plastic Fracture Analysis," ERPI NP 1931, Electric Power Research Institute, Palo Alto, 1981.

## **ANEXO B**

### **Guía para la determinación del tamaño de la fisura mediante diferencia de potencial eléctrico**

## **B Guía para la determinación del tamaño de la fisura mediante diferencia de potencial eléctrico**

**B.1. Aplicaciones:** los procedimientos de (EPD) diferencia de potencial eléctrico para la determinación del tamaño de la fisura son aplicables prácticamente a cualquier material conductor eléctrico en una amplia gama de ambientes de prueba. Los materiales no conductores puede que también sean ensayados usando el método de potencial eléctrico con un accesorio firme de papel conductor o una película, y tratándola como una muestra de réplica. Este método es aceptable siempre y cuando esa película duplique la fisura en la muestra de ensayo, y la película no altere la propiedad de velocidad de crecimiento de la fisura de fatiga de la muestra de ensayo. Este método de la película de réplica puede que sea usado como bueno en probetas conductoras.

Los procedimientos discutidos aquí son aquellos para los cuales modelos de dos dimensiones pueden ser usados ambos para la configuración de la probeta y para el potencial eléctrico.

**B.2. Principio fundamental:** determinar el tamaño de la fisura con mediciones confiables de potencial eléctrico sobre el principio que el campo eléctrico en la muestra fisurada, con un flujo de corriente a través de esta, es una función de la geometría de la muestra, y en particular del tamaño de la fisura. Para un flujo de corriente constante, el potencial eléctrico o la caída de tensión que atraviesa el plano de la fisura se incrementará con el incremento del tamaño de la fisura debido a una modificación del campo eléctrico y a una perturbación asociada a las líneas de corriente. El cambio de tensión puede ser relacionado con el tamaño de la fisura a través de relaciones de calibración analíticas o experimentales.

**B.3. Métodos básicos:** ambas técnicas de corriente continua (DC) y corriente alterna (AC) fueron usadas para medir el tamaño de la fisura en muestras de ensayo (1-8). Para la técnica más común, de corriente continua, una corriente constante se hace circular a través de la muestra resultando un campo eléctrico de dos dimensiones el cual es constante a través del espesor en todos los puntos. Para la técnica de corriente alterna, una corriente de amplitud constante (normalmente sinusoidal) se hace circular a través de la muestra para generar la caída de potencial que atraviesa el extremo de la fisura. Para frecuencias relativamente bajas (menores a 100 Hz. con materiales comunes), el campo es aproximadamente de dos dimensiones como en el caso de la corriente continua. Para frecuencias altas, sin embargo, ocurre una distribución no uniforme de corriente a través del espesor, el grado del cual es dependiente de la frecuencia de corriente alterna y la permeabilidad magnética de la muestra. Este fenómeno es llamado comúnmente efecto skin porque la corriente tiende a ser transportada solo cerca de la superficie de la muestra. Para algunos materiales, particularmente muestras ferromagnéticas, el efecto skin puede ser significativo a frecuencias por debajo de 100 Hz. (4-5). El método de corriente alterna puede así ser subdividido en dos grupos: método de baja frecuencia, donde el efecto skin es insignificante, y métodos de alta frecuencia, donde el efecto skin debe ser tomado en cuenta.

Para muchos materiales bajo ensayo en ambientes oxidantes una capa de óxido se forma inmediatamente sobre la creación de una “fresca” cara de fractura, de ese modo, aislando las dos mitades de la muestra. Bajo estas condiciones, la caída de potencial que atraviesa la fisura de fatiga debería permanecer constante en todo un ciclo de carga completo (suponiendo la no extensión de la fisura). Una superficie aislada puede que no sea creada en un ambiente no oxidante o donde altas fuerzas tiendan a cerrar la superficie de fractura por acción de las capas de óxido. En estos casos, el cortocircuito de la superficie de fractura, puede que ocurra a un nivel de carga por encima de la mínima carga principal de ensayo para una estimación por debajo de la

fisura de fatiga real **(9.10)**. Este efecto es de particular importancia cuando el ensayo esta cerca de las condiciones umbrales, cuando la carga a la cual ocurre cortocircuito se aproxima al nivel de carga de ensayo pico.

A menos que pueda ser mostrado que el cortocircuito eléctrico no ocurre durante el ciclo de carga entero, las mediciones de tensión deberían ser tomadas en o cerca de la carga de tracción pico. Dependiendo de la frecuencia de reacción del equipo de medición de tensión de corriente continua o corriente alterna, puede que sea necesario reducir la frecuencia de prueba o, en algunos casos extremos, incluso detener el ensayo durante una medición de tensión para asegurar que la medición es tomada solo a carga máxima y sin cualquier atenuación de señal. Debería ser observado que la medición de potencial eléctrico a carga máxima no siempre garantiza la ausencia de errores de cortocircuito eléctrico. Errores de cortocircuito pueden aún estar presentes a carga máxima en casos donde hay contacto eléctrico entre las superficies de fractura pero no es transferida carga mecánica. El efecto de cortocircuito de la superficie de fractura puede ser descrito luego del ensayo usando mediciones del tamaño de la fisura de la superficie de fractura post-test. Un acercamiento es computar la compensación y factores de escala combinados con el tamaño inicial y final de la fisura desde mediciones de potencial eléctrico y mediciones de superficies de fractura. Una técnica de interpolación lineal simple se usa luego para corregir los valores de potencial eléctrico intermedios. Este método puede que no sea adecuado para ensayos en los cuales los parámetros de control de la máquina son derivados del tamaño de la fisura. (Como un ensayo de intensidad de tensión constante). En estos casos, los errores de medición del tamaño de la fisura puede que causen diferencias inaceptables entre las cargas aplicadas y la carga de control deseada.

Deformaciones elásticas y plásticas pueden en principio afectar la resistividad del material y, para el caso de corriente alterna, la permeabilidad magnética **(11)**. Mientras que es improbable que sean una fuente importante de error para las típicas intensidades de tensión de crecimiento de fisuras de fatiga por debajo de la fluencia en pequeña escala y E647, el uso debería documentar cualquier dependencia de la carga del potencial para tamaño de fisura constante sin superficie de cortocircuito y evaluar la importancia de errores asociados en el calculo del tamaño de la fisura. El método de corrección para errores de cortocircuito deberá tener en cuenta razonablemente los efectos de deformación sobre las propiedades eléctricas y magnéticas del material.

Variaciones en la muestra o en la instrumentación puede que resulten en cambios proporcionales en la tensión medida. Por ejemplo, una variación de 1°C en la temperatura de la probeta puede resultar en unos cuantos  $\mu\text{V}$  de variación en la señal de EPD debido a la variación en la resistividad eléctrica del material. También algunos materiales exhiben variaciones de conductividad dependientes del tiempo a elevadas temperaturas **(9)**. Variaciones en el aumento de ampliaciones y calibraciones de voltímetros puede que también sean el resultado en una escala proporcional de las tensiones medidas. Para compensar estos efectos, las mediciones de tensión pueden ser normalizadas usando mediciones de tensión adicionales tomando una ubicación de referencia. La ubicación de referencia puede que sea cualquiera sobre la muestra de prueba o sobre una muestra de material alternativo en el mismo entorno. Si las mediciones de referencia fueron hechas directamente sobre la muestra de prueba, la ubicación debe ser elegida para que la tensión de referencia no sea afectada por el tamaño de la fisura. Ya que todas las variaciones de material e instrumentos son también incluidas en las mediciones de referencia, el proceso de normalización debería eliminarse luego. El uso de mediciones de tensión de referencia puede incrementar significativamente la resolución del tamaño de la fisura para algunos materiales.

**B.3.1. Método de corriente continua:** el método de corriente continua es una buena técnica establecida la cual puede ser aplicada usando equipos comunes encontrados en la mayoría de los laboratorios de prueba como el mostrado en la figura B.1. las tensiones de salida son

típicamente en un rango de 0,1 a 50 mV para magnitudes de corriente (5 a 50 A), dimensiones de muestra y materiales comunes. Mediciones precisas (típicamente +/- 0,1%) de estas tensiones de salida relativamente pequeñas son hechas para obtener valores del tamaño de la fisura precisos. Para obtener suficiente resolución de tensión usualmente se requiere especial interés en eliminar el ruido eléctrico. Típicamente, compensaciones deben ser hechas entre el tiempo de respuesta del sistema de medición y la resolución de tensión.

El método de corriente continua es susceptible a efectos termoeléctricos (12) los cuales producen potenciales DC además de aquellos debidos al campo eléctrico de la muestra. Estas tensiones termoeléctricas pueden ser una fracción sustancial del total de la tensión de medición. Ya que el efecto termoeléctrico esta presente incluso sin la corriente de entrada, es posible para describir mediciones de tensión restadas, tomadas con la corriente desconectada desde las mediciones hechas con la corriente encendida. Un método alternativo para corregir el efecto termoeléctrico es tomando mediciones de tensión mientras se revierte la dirección del flujo de la corriente. Mediciones correctas de EPD son luego iguales a una mitad de la diferencia leída del potencial medido tomado a cada polaridad de corriente (13).

**B.3.2. Método de la corriente alterna:** tanto los métodos de alta como de baja frecuencia de corriente alterna requieren equipos similares, como se muestra en la Fig. B.2 (4). El equipo de corriente alterna más especializado que aquel para el enfoque de corriente continua (ver subsección B3.1) y no es generalmente disponible en la mayoría de los laboratorios de prueba. Con la misma magnitud de corriente de entrada de muestra, este equipo puede ser usado para obtener alta resolución del tamaño de la fisura comparado con el método de corriente continua. Esto es en parte debido a una amplificación diferente y las técnicas de filtrado usadas en los dos métodos sumado al efecto skin previamente detallado. El método de corriente alterna no es influenciado por efectos termoeléctricos los cuales se producen con una tensión de corriente continua.

**B.3.2.1 Método de corriente alterna de baja frecuencia:** el método de corriente alterna de baja frecuencia es similar al método de corriente continua excepto que como previamente se dijo, son requeridos diferentes equipos para manejar corriente y medir la tensión de salida. Un problema posible con este tipo de sistema es que si la frecuencia de carga de prueba es una integral múltiple de la frecuencia de potencial de corriente alterna, los efectos de cortocircuito en la superficie de fractura puede que produzcan componentes de señal no buscadas a la frecuencia de potencial de corriente alterna.

**B.3.2.2 Método de corriente alterna de alta frecuencia:** una ventaja de esta técnica sobre el método de corriente alterna de baja frecuencia es que mejora la resolución del tamaño de la fisura que puede típicamente ser obtenida usando la misma corriente de entrada. Esto es debido al efecto skin previamente explicado el cual efectivamente reduce el espesor de la muestra para las capas superficiales (6) y el hecho que la tensión de salida es inversamente proporcional al espesor de la muestra.

A altas frecuencias donde el efecto skin se hace pronunciado, solo el tamaño de la fisura cercana a la superficie será obtenida. Esto debe ser tomado en cuenta si la curvatura del frente de la fisura a través del espesor es significativa. Otros efectos los cuales puede que aparezcan a altas frecuencias incluyen contribuciones de inducción y capacidad, desde cables conductores, accesorios de la muestra y la fisura misma. Estos puede que sean significativos y puede que varíen con el tamaño de la fisura, causando dificultades en relación con mediciones en la tensión de salida para el tamaño de la fisura a menos que se tomen precauciones (ver B.11.1).

**B.4. Equipos de generación de corriente:** cualquier suministro de corriente constante adecuado puede que sea usado el cual tiene suficiente estabilidad a corto y largo plazo. La estabilidad requerida es una función de la resolución del equipo de medición de tensión (ver subsección B.5) y de la resolución del tamaño de la fisura deseada. Para condiciones óptimas, la estabilidad relativa del suministro de energía debería ser igual a la resolución efectiva del sistema de medición de tensión; esto es, si el sistema de medición de tensión puede resolver efectivamente una parte en  $10^3$  de la tensión de salida de la muestra (incluyendo ruido eléctrico, inexactitudes inherentes tal como no linealidad, etc.) luego el suministro de energía debería ser estable para una parte en  $10^3$ .

Para sistemas de corriente alterna, la corriente debería ser generada usando un amplificador para producir una corriente de salida proporcional a una señal de entrada de referencia. El uso de un amplificador en lugar de estar solo un generador de corriente permite el uso de lock-in detection en el circuito de medición de tensión (ver subsección B.5.2). El amplificador debería tener adecuada alta impedancia de entrada ( $>10k\Omega$ ) y debería ser capaz de generar una corriente de salida la cual sea estable por la discusión precedente.

**B.5. Equipo de medición de tensión:** las mediciones de tensión puede que sean hechas con cualquier equipo el cual tenga características suficientes de resolución, precisión y estabilidad. Las siguientes subsecciones tratan del equipamiento particular de los diferentes métodos de caída de potencial.

**B.5.1. Equipos de medición de tensión de corriente continua:** el método de corriente continua requiere equipamiento capaz de medir pequeñas variaciones de tensión de corriente continua (por ejemplo 0,05 a 0,5  $\mu V$ ) con señal de corriente continua relativamente baja para proporciones de ruido de valor eficaz de corriente alterna. A pesar de que, hay una variedad de maneras de implementar el sistema de medición de tensión, son usados comúnmente tres sistemas;

- Amplificador / grabador autográfico.
- Amplificador / microcomputadora conversor analógico-digital
- Voltímetro digital / microcomputadora

Los grabadores autográficos están comúnmente disponibles con adecuada sensibilidad y pueden ser usados para grabar directamente la tensión de salida de la muestra.

Un preamplificador puede ser usado para incrementar la tensión de salida directa desde la muestra antes de grabar. Otra técnica común es usar un preamplificador para aumentar la salida directa desde la muestra para un nivel que pueda ser digitalizado usando un conversor analógico-digital convencional y una microcomputadora. Un tercer método hace uso de un voltímetro digital con una capacidad de salida digital. La ventaja de este tipo de sistema es que todos los circuitos análogamente sensibles son contenidos dentro de un único instrumento. El tiempo de respuesta del sistema de medición de tensión debe ser suficiente para resolver variaciones en EPD como una función de la carga aplicada si ocurre cortocircuito en la superficie de fractura.

**B.5.2. Equipamiento de medición de tensión de corriente alterna:** sistemas tanto de alta como de baja frecuencia de corriente alterna hacen uso de equipamiento de medición de tensión como se muestra en la figura B.2. El circuito de medición de tensión y el amplificador (ver subsección B.4) de corriente son interconectados a través de lock in en el amplificador. Este amplificador especializado produce una señal de salida de referencia para el amplificador de

corriente y es capaz de discriminar contra todas las señales de entrada que no son a la frecuencia y fase de la señal de referencia. Así, solo las señales producidas como un resultado de la salida del amplificador de corriente son amplificadas para la medición. Este método es capaz de amplificar solo la señal de tensión de corriente alterna deseada a muy baja señal para relaciones de ruido y también excelente rechazo al ruido (4). Nótese que este tipo de sistema es inmune a las tensiones de corriente continua las cuales podrían ser producidas por efectos termoeléctricos.

Al seleccionar instrumentación para un sistema de corriente alterna, se debería tener cuidado asegurando adecuado juego de impedancia, dado que cada componente es diseñado para operar sobre un dominio de frecuencia específico. La impedancia de entrada y salida deberían ser combinadas. Una verificación para respuesta en frecuencia para asegurar la operación en la región plana de las ganancias de los instrumentos conseguidos debería también ser desempeñada.

**B.6. Relaciones entre la longitud de la fisura y la diferencia de potencial:** soluciones de forma cerrada para la relación entre la diferencia de potencial y el tamaño de la fisura han sido analíticamente derivadas para tales geometrías de muestra como la probeta M (T) (14) y la parte a través de la superficie de la fisura de la probeta (16,22). Relaciones adicionales están también disponibles basadas en soluciones numéricas para un número de otras geometrías de muestra (15, 17,18). Tales relaciones son usualmente expresadas en términos de la tensión normalizada ( $V/V_r$ ) y alguna referencia del tamaño de la fisura ( $a_r$ ) como se muestra en la ecuación B.1:

$$A = f(V/V_r, a_r) \quad (\text{B.1})$$

Donde:  $V$  es la tensión medida

$V_r$  es una tensión de referencia de la fisura

$a$  es el tamaño de la fisura

$a_r$  es una fisura de referencia o tamaño de muestra asociado con  $V_r$ .

Formulaciones alternas son también usadas cuando el tamaño de la fisura es normalizado por una dimensión característica in-plane tal como el ancho de la muestra  $w$ .

Cuando se escriben en esta forma, las soluciones pueden ser hechas independientes del espesor de la muestra, tamaño de la muestra in-plane, corriente aplicada y material.

En lugar de una expresión derivada analíticamente, es posible para relaciones desarrolladas empíricamente de virtualmente cualquier tipo de geometría de muestra en la prueba de velocidad de crecimiento de la fisura de fatiga. Tales relaciones empíricas pueden ser favorables en instancias cuando las geometrías de muestras son complejas, o el lugar del cable debe ser alterado. En cualquier evento, relaciones analíticas o empíricas deberían estar experimentalmente verificadas usando mediciones alternadas o varios tamaños de fisuras en el rango de interés (mediciones superficiales ópticas, mediciones de conformidad, o mediciones de superficie de fractura luego de la prueba). Tales mediciones deberían estar informadas y puede que sean usadas para corregir la deducida longitud de la fisura desde ecuaciones del tipo de B.1.

El emplazamiento del cable de tensión es usualmente un compromiso entre una buena sensibilidad o variaciones del tamaño de la fisura e inmune a errores causados por leves variaciones en la ubicación de los cables de muestra en muestra. Cerca de la ubicación delante del extremo de la fisura (o ubicaciones extremas de las muescas no agrietadas) produce la mayor sensibilidad a cambios en el tamaño de la fisura. La dificultad con este tipo de disposición es que el campo eléctrico es, en general, altamente no uniforme en la región cercana al extremo. De esa manera, leves variaciones en la ubicación delantera desde una muestra hasta la siguiente puede que produzcan diferencias significativas en la tensión medida para el mismo tamaño de la fisura

(17). En la mayoría de los casos aquellas posiciones las cuales dan grandes sensibilidades a las variaciones en la posición del cable delantero.

**B.7. Geometrías de la probeta:** las geometrías de la probeta para ensayos de velocidad de crecimiento de la fisura de fatiga que se ocupa de esta normalización son las tensiones compactas, C (T), y la tensión del centro agrietado, M (T). Las ecuaciones listadas en las siguientes secciones son derivadas bajo las condiciones de corriente continua para fisuras filosas en las geometrías de muestra respectivas. Errores en mediciones de longitud de la fisura puede que surjan si una muesca sin punta es usada como el tamaño de la fisura de referencia (14,19).

**B.7.1. Relación entre C (T) voltaje de geometría vs. el tamaño de la fisura:** un ejemplo de una tensión vs. relación del tamaño de la fisura para la geometría C(T) de la muestra es mostrado en la ecuación B.2. la expresión fue descubierta por Hicks y Pickard por análisis de elementos finitos y fue verificada por ambos con técnicas análogas y experimentales para  $a/w$  variando entre 0,24 a 0,7 (15). Esta ecuación fue empleada en dos multilaboratorios, con esfuerzos cooperativos internacionales (20,21). La figura B.3 ilustra la geometría C (T) y la ubicación específica del cable para esta solución. La relación es válida solo para la ubicación específica del cable mostrada la cual fue determinada por un compromiso entre sensibilidad y reproductividad. Si se altera la ubicación del cable (corriente y tensión), la relación mostrada no es válida y una nueva relación debe ser desarrollada.

$$V/V_r = A_0 + A_1 (a/w) + A_2 (a/w)^2 + A_3 (a/w)^3$$

Para  $0,24 \leq a/w \leq 0,7$

Donde:

V es la tensión EPD medida.

$V_r$  es la tensión de la fisura de referencia correspondiente a  $a/w = 0,241$

a es el tamaño de la fisura (definida como en E647)

w es el ancho de la muestra

$$A_0 = 0,5766$$

$$A_1 = 1,9169$$

$$A_2 = -1,0712 \text{ y}$$

$$A_3 = 1,6898$$

O en notación inversa

$$a/w = B_0 + B_1 (V/V_r) + B_2 (V/V_r)^2 + B_3 (V/V_r)^3$$

para  $0,24 \leq a/w \leq 0,7$

Donde:

$$B_0 = -0,5051$$

$$B_1 = 0,8857$$

$$B_2 = -0,1398$$

$$B_3 = 0,0002398$$

Nótese que la primera forma de la ecuación puede ser usada para computar la constante  $V_r$  desde cualquier referencia  $a/w$  y la correspondiente tensión de medición V. Computando  $V_r$  en

esta manera describe linealmente para pequeñas variaciones en la corriente aplicada, dimensiones de la muestra medida y leves errores en el emplazamiento del cable de muestra a muestra. La tensión de referencia computada puede luego ser usada con la segunda forma de la ecuación para determinar el tamaño de la fisura para todos los valores V de tensión.

**B.7.2. Relación entre la geometría de la tensión vs. el tamaño de la fisura:** una relación cerrada de forma analítica entre la tensión y el tamaño de la fisura para una muestra infinitamente larga M (T) (14) es mostrada en la ecuación siguiente. Esta relación es válida solo en casos donde la densidad de corriente es uniforme a alguna sección transversal de la muestra lejana desde el plano de la fisura, y la tensión es medida sobre la línea media de la muestra atravesando el plano de la fisura. En la figura B.4 se ilustra la geometría M (T) y la ubicación de los cables para esta solución.

$$a = \frac{w}{\pi} \times \cos^{-1} \left[ \frac{\cosh\left(\frac{\pi}{w} \times y_0\right)}{\cosh\left[\frac{V}{V_r} \times \cosh^{-1}\left[\frac{\cosh\left(\frac{\pi}{w} \times y_0\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{w} \times a_r\right)}\right]\right]} \right]$$

para  $0 \leq \frac{2a}{w} \leq 1$

donde:

a es el tamaño de la fisura

ar es el tamaño de la fisura de referencia desde algún otro método

w es el ancho de la muestra

V es la tensión EPD de medición

Vr es la tensión de medición correspondiente a ar

y<sub>0</sub> es la tensión medida dejando espacio desde el plano de la fisura.

El requerimiento de que la densidad de corriente sea uniforme a alguna sección trasversal alejada del plano de la fisura puede ser fácilmente encontrada introduciendo la corriente a través del final de la muestra M (T) estándar, con una distancia entre la ubicación de la corriente de entrada de aproximadamente tres veces el ancho. Shorter current lead spacing puede que también sea usada siempre y cuando el requerimiento de densidad de corriente uniforme sea demostrado.

Las constantes de calibración a<sub>0</sub> y V<sub>0</sub> puede que sean usadas en cualquier tamaño de fisura y la correspondiente tensión de medición donde el tamaño de la fisura sea determinado usando un método alternativo.

Mediciones ópticas de superficie puede que sean usadas para determinar a<sub>0</sub> con tal que la curvatura del frente de la fisura no sea significativa o como para ser considerada. Si el tiempo real de la medición del tamaño de la fisura no es requerido durante el ensayo, luego del ensayo la medición de la superficie de fractura puede que sea usada para determinar a<sub>0</sub>.

NOTA 1: una o más mediciones del tamaño de la fisura deberían ser hechas durante el ensayo usando la una técnica alternativa como mediciones ópticas sobre la superficie de la muestra. Estos valores deberían ser usados por comparación para evaluar el progreso de cada ensayo. Esto es particularmente importante donde un parámetro derivado desde la longitud de la fisura (intensidad de tensión, etc.) esta siendo controlado. Si no pueden ser hechas mediciones ópticas durante el ensayo, el tamaño final de la fisura, junto con el tamaño inicial de la fisura iniciada debería ser comparado con los tamaños de la fisura determinados desde mediciones de potencial eléctrico. Si una diferencia es observada entre los tamaños ópticos y EPD, un factor de corrección lineal, similar para que describa la corrección de la curvatura de la fisura en la sección principal (cálculo e interpretación de resultados), deben ser empleados para corregir luego los valores del tamaño de la fisura EPD (ver subsección B.3).

NOTA 2: independientemente de que expresión EPD vs. tamaño de fisura se use, el uso de una referencia es fomentado (ver subsección B.3). Esta referencia tanteada debería ser ubicada en la probeta de ensayo (o en otra probeta en idénticas condiciones de prueba) en una región no afectada por el crecimiento de la fisura. Cuando empleando tal referencia tanteada, las mediciones EPD hacen para la determinación del tamaño de la fisura ( $V$  en la ecuación B.2 y B.3) son divididas por el cociente  $V_{ref}/V_{ref0}$ ,

Donde:

$V_{ref}$ : es la tensión de referencia tanteada medida al mismo tiempo que la tensión de fisura EPD es medida.

$V_{ref0}$ : es la tensión tanteada de referencia inicial.

**B.8. Consideraciones gripping:** el método de determinación del tamaño de la fisura por diferencia de potencial eléctrico confía sobre una corriente de magnitud constante al pasar a través de la muestra cuando la tensión de potencial es medido. Durante tales mediciones de potencial es esencial que ninguna parte de la corriente aplicada sea desviada en un circuito paralelo a través de la máquina de ensayo. Para máquinas de ensayo más comercialmente disponibles y montajes agarrados la resistencia a través de la estructura de ensayo es considerablemente más grande que aquella de la muestra de ensayo, sin embargo, en algunas situaciones un camino alternativo de la corriente aplicada puede que exista a través de la estructura de ensayo. En tales casos, pasos adicionales para proveer aislamiento entre la muestra y la estructura de carga puede que sea necesario. Los usuarios del método de diferencia de potencial deberían asegurar que la resistencia eléctrica medida entre los agarres (sin ninguna muestra en el lugar) es varios órdenes de magnitud mayor que la resistencia de la muestra entre las ubicaciones de entrada de corriente. La resistencia de la muestra debería ser determinada por el rango de tamaños de fisuras encontrados durante el ensayo. Una relación de resistencia (resistencia de la estructura de ensayo dividido por la resistencia de la probeta) de  $10^4$  o mayores es suficiente para más aplicaciones prácticas. El aislamiento de la muestra desde la estructura de carga es particularmente importante cuando se usan fuentes de energía con salidas no aisladas (referencia a tierra). El uso de este tipo de fuentes de energía puede que requieran aislamiento en ambos extremos de la muestra de ensayo desde la estructura de ensayo hasta evitar problemas del circuito de tierra.

Para muestras en las cuales la corriente es introducida a través de cargas sujetas, debe tenerse cuidado para asegurar que un buen contacto eléctrico es mantenido entre la sujeción y la probeta. Fuentes de energía de corriente constante pueden usualmente corregir las variaciones pequeñas en el agarre/ probeta/resistencia de agarre, sin embargo, cambios abruptos en la resistencia debido a oxidación u otros efectos puede que causen variaciones y/o niveles erráticos

de corriente durante el ciclo de carga. Un contacto de agarre pobre de la carga puede que incremente el porcentaje de un paso de corriente alterna y desvíe errores.

**B.9. Selección de cables y accesorios:** una prudente selección y accesorios de entrada de corriente y cables de medición de tensión pueden evitar muchos problemas asociados con el método de caída de potencial eléctrico. Esto es particularmente importante en ambientes de ensayo agresivos tales como ambientes de elevada temperatura donde la resistencia, punto de fusión y resistencia a la oxidación de los cables debe ser tomados en cuenta. Ambientes de ensayo corrosivos, puede que requieran cables conductores especiales y/o capas (o recubrimientos) para evitar la pérdida de conductividad eléctrica causada por el ataque corrosivo.

**B.9.1. Cables de entrada de corriente:** la selección del cable de entrada de corriente debería ser basada en la habilidad de transportar corriente, y con facilidad de accesorio (habilidad de soldar, compatibilidad de corrección). Los cables deben ser de la medida suficiente para transportar la corriente requerida bajo las condiciones de ensayo y puede que sean mecánicamente sujetos o soldados en la muestra o agarrados a aparatos.

**B.9.2. Cables de medición de tensión:** los cables de tensión deberían ser lo más finos posible para permitir la ubicación precisa sobre la muestra y minimizar tensión sobre el cable durante la carga de fatiga la cual podría causar distancia. Idealmente, los cables que censa tensión deberían ser resistentes a la soldadura para la muestra para asegurar un confiable, consistente empalme. Los cables de plomo puede que sean sujetos usando sujeciones mecánicas para materiales los cuales exhiben características de soldadura pobres (por ejemplo ciertas aleaciones de aluminio), siempre que el tamaño del ajuste es determinado para cuando una ubicación determinada cable (o plomo) sensing de tensión.

El cable que censa tensión debería estar ubicado diagonalmente atravesando el principio de la muesca o el extremo de la fisura como se muestra en las figuras B.3 y B.4 para mediciones promedio de fisuras no uniformes.

**B.10. Resolución de sistemas de potencial eléctrico:** la resolución efectiva de mediciones EPD depende de un número de factores incluyendo la resolución del voltímetro (y/o aumento amplificador), magnitud de la corriente, geometría de la muestra, medición de tensión y ubicación del cable de entrada de corriente, y conductividad eléctrica del material de la muestra. Acá, la resolución efectiva es definida como la más pequeña variación en el tamaño de la fisura la cual puede ser distinguida en operación de ensayo real, no simplemente la mejor resolución del equipo registrada.

Para tamaños de muestras comunes de laboratorio, una corriente directa en el rango de 5 a 50 A. y resolución de tensión de 0,1  $\mu\text{V}$  o  $\pm 0,1\%$  de  $V_r$  de rendimiento una resolución en el tamaño de la fisura mejor que 0,1% del ancho de muestra. Para materiales de alta conductividad (por ejemplo aluminio, cobre) y/o niveles de corriente baja, la resolución decrecerá mientras para materiales de más baja conductividad (por ejemplo titanio, níquel) resoluciones mejores que 0,01% del ancho de la muestra serán logradas. Para una dada geometría de la muestra, material e instrumentación, la resolución del tamaño de la fisura será analizada e informada.

NOTA 3: para ilustrar la magnitud de tensiones medidas sobre un tipo de probeta estándar, C(T) muestras de 50mm de ancho, 7,67 mm de espesor, 0,22 (a/w) relación de tamaño de fisura normalizada, y usando una corriente directa de 10 A produce los siguientes resultados:

Material	EPD aprox. medido a 10 A	Variación aprox. en long de fisura para
		1 uV de variación EPD
Aluminio	0,1 mV	300 um
Acero	0,6 mV	50 um
Titanio	3,5 mV	9 um

**B.11. Técnicas para reducir:** la dispersión en la medición de tensión: debido que a niveles de señales bajas las cuales deben ser medidas tanto con métodos de corriente continua como corriente alterna, un número de procedimientos serán seguidos para mejorar la precisión de la medición de tensión.

**B.11.1 Campo electromagnético inducido:** los cables de plomo para medición de tensión deberían ser lo más corto posible y deberían ser retorcido (doblado) para reducir las tensiones inducidas por cambios de campos magnéticos. Sosteniéndolos rígidamente también ayuda a reducir las tensiones desviadas las cuales pueden ser generadas por el movimiento de los cables a través de cualquier campo magnético estático que puede que exista cerca de la estructura de ensayo. Además, routing la medición de tensión leads away de motores, transformadores, u otros dispositivos los cuales producen fuertes campos magnéticos es recomendado.

Para sistemas de corriente alterna, cuidados deberían ser tomados para mantener los cables de corriente cerca de cables de potencial. Si cable de plomo de tensión protegido es usado, la protección debería ser bien conocida a un extremo.

**B.11.2 Conocimientos eléctricos:** Adecuados conocimientos de todos los aparatos (fuente de corriente, voltímetro, etc.) deberían ser hechos evitando circuitos a tierra. Esto es particularmente importante cuando procedimientos de corriente continua son usados en conjunción con equipos de polarización electroquímica relevante para fatiga por corrosión.

**B.11.3. Efectos térmicos:** para sistemas de corriente continua mediciones de campo electromagnético térmico y su corrección es críticamente importante. Un número mínimo de correcciones deberían ser usados y mantenidos a temperatura constante para minimizar los efectos termoeléctricos (ver subsección B.3.1).

Todos los aparatos de medición (amplificadores, preamplificadores, voltímetros, conversores analógico-digitales) y la muestra en sí, deberían ser mantenidos a temperatura constante. Recintos para asegurar temperatura constante en todo el ensayo puede que resulten beneficiosos.

Algunos voltímetros de sistemas de corriente continua tienen incorporada corrección automática para efectos termoeléctricos internos. Estas unidades puede que sean de beneficio en casos donde no es posible el control de las condiciones ambientales del laboratorio.

**B.11.4. Selección de la magnitud de corriente de entrada:** la elección de la magnitud de la corriente de entrada es un parámetro importante: un valor demasiado bajo puede que no produzca tensiones de salida medibles; un valor demasiado alto puede que cause excesivo calentamiento de la probeta o formación de arcos (6).

Para minimizar estos problemas, las densidades de corriente deberían ser mantenidas a un valor mínimo el cual pueda ser usado para producir el tamaño de fisura requerido. La máxima corriente que pueda ser usada con una muestra particular puede ser determinada monitoreando la temperatura de la muestra, mientras se incrementa la corriente en pasos, permitiendo suficiente tiempo para que la muestra se estabilice térmicamente. Debería tenerse cuidado particular cuando se ensaya en vacío, como corrientes de convección no son disponibles para ayudar a mantener la muestra a temperatura ambiente.

**B.11.5. Periodo de estabilización de corriente continua:** permitir un periodo de estabilización suficiente luego turning el potencial eléctrico de corriente continua tanto prendido como apagado antes de hacer una medición de tensión. La mayoría de las fuentes de energía de estado sólido pueden estabilizar la corriente de salida dentro de un periodo de 1 a 2 seg. Para un cambio de paso escalón de salida, sin embargo esto debería ser verificado por cada muestra en particular y configuración experimental.

**B.12. Precauciones:** Deben ser tenidos cuidados para demostrar que la corriente aplicada no afecta el extremo de la fisura, procesos afectados (dañados) y velocidad de crecimiento de la fisura. Por ejemplo, en fatiga de corrosión, la fuga de corriente en la solución de la fisura podría cambiar las velocidades de reacción electroquímica y afectar la fisura. Resultados a la fecha indican que esto no es un problema práctico, supuestamente porque de la alta conductividad del metal comparado hasta el más conductivo de los electrolitos (por ejemplo NaCl). El flujo de corriente en la solución no es afectado por la corriente en la probeta (23). La plasticidad del extremo de la fisura, a gran escala puede aumentar la medida de potencial eléctrico debido al aumento de resistividad sin la extensión de la fisura (5). La experiencia indica que esta fuente de potencial de error no es significativa incluso cuando la deformación plástica es más grande que el criterio de fluencia de pequeña escala de E647 (2).

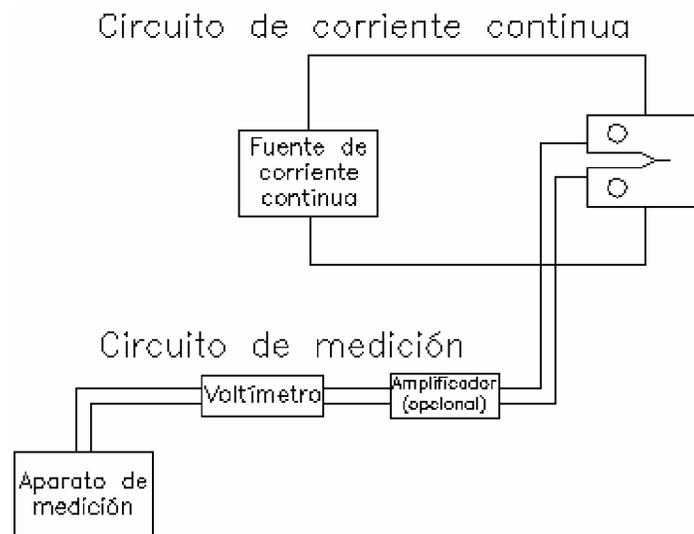


Figura B1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA DE POTENCIAL DE CC

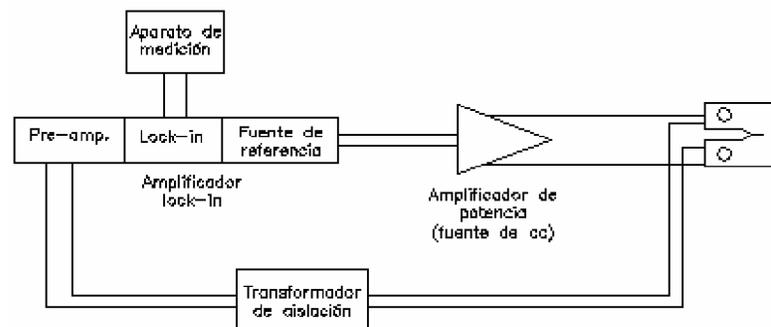


Figura B2 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA DE POTENCIAL DE CA

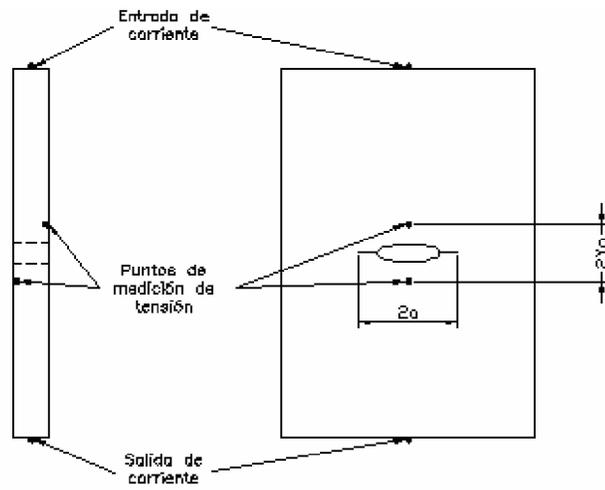


Figura B4 GEOMETRÍA M(T) Y UBICACIÓN DE LOS CABLES DE POTENCIAL ELÉCTRICO PARA EQ. B3

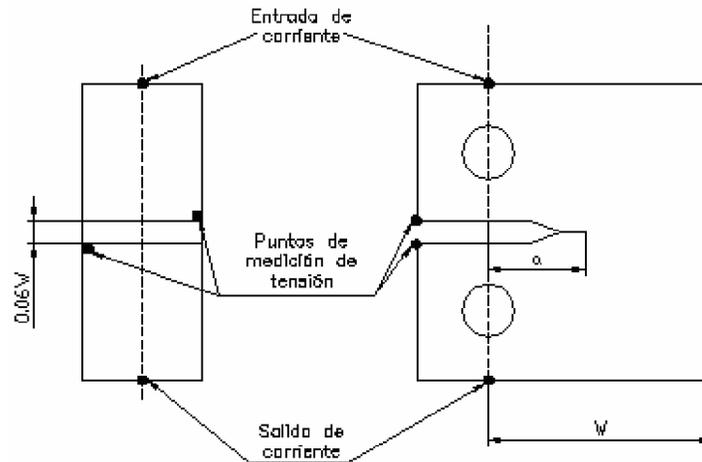


Figura B3 GEOMETRÍA C(T) Y UBICACIÓN DE LOS CABLES DE POTENCIAL ELÉCTRICO PARA EQ. B2

## Referencias de esta norma

- 1 Watt, K. R., “A Consideration of an a. c. Potential Drop Method for Crack Length Measurement,” from *The Measurement of Crack Length and Shape During Fracture and Fatigue*, C. J. Beevers Ed., EMAS, Cradley Heath, UK, 1980, pp. 202-201.
- 2 Bakker, A., “A DC Drop Procedure for Crack Initiation and R-Curve Measurement During Fracture Tests,” *Elastic-Plastic Tests Methods: The User Experience*, ASTM STP 856, Wessel and F. J., Loss, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1985, pp. 394-410.
- 3 Richards, C. E., “Some Guidelines to the Selection of Techniques,” *The Measurement of Crack Length and Shape During Fracture and Fatigue*, C. J., Beevers, Ed., EMAS, Cradley Heath, UK, 1980, pp. 461-468.
- 4 Wei, R. P., and Brazill, R. L., “An a. c. Potential System for Crack Length Measurement” from *The Measurement of Crack Length and Shape During Fracture and Fatigue*, C. J., Beevers Ed., EMAS, Cradley Heath, UK, 1980, pp. 190-201.
- 5 Wilkowski, G. M., and Maxey, W. A., “Review and Applications of the Electric Potential Method for Measuring Crack Growth in Specimens, Flawed Pipes, and Pressure Vessels,” *Fracture Mechanics; Fourteenth Symposium Volume II; Testing and Applications*, ASTM STP 791, J. C. Lewis and G. Sines, Eds., American Society of Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1983, pp. II-266-II-294.
- 6 Dover, W. D., et al, “a.c. Field Measurement – Theory and Practice”, from *The Measurement of Crack Length and Shape During Fracture and Fatigue*, C. J. Beevers, Ed., EMAS, Cradley Heath, UK, 1980, pp. 222-260.
- 7 *Metals Handbook*, Vol. 8, Published under the direction of the American Society for Metals, 9<sup>th</sup> Edition, Metals Park, OH, 1987, pp. 286-391.
- 8 Gangloff, R. P., “Electrical Potential Monitoring of the Formation and Growth of Small Fatigue Cracks in Embrittling Environments”, from *Advances in Crack Length Measurement*, C. J. Beevers, Ed., EMAS, Cradley Heath, UK, 1982, pp. 175-229.
- 9 Hartman, G. A., and Johnson, D. A., “D-C Electric Potential Method Applied to Thermal/Mechanical Fatigue Crack Growth,” *Experimental Mechanics*, March 1987, pp. 106-112.
- 10 Bachman, V., and Munz, D., “Fatigue Crack Closure Evaluation with the Potential Method”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 11, No. 1, 1979, pp. 61-71.
- 11 Okumra, N., Venkatasubramanian, T. V., Unvala, B. A., and Baker, T. J., “Application of the AC Potential Drop Technique to the Determination of R-Curves of Tough Ferritic Steels,” *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 14, pp. 617-625, 1981.
- 12 Pollock, D. D., “Thermoelectricity, Theory, Thermometry, Tool,” ASTM STP 852, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1985.
- 13 Catlin, W. R., Lord, D. C., Prater, T. A., and Coffin, L. F., “The Reversing D-C Electrical Potential Method”, *Automated Tests Method for Fracture and Fatigue Crack Growth*, ASTM STP 877, W. H. Cullen, R. W. Landgraf, L. R. Kaisand, and J. H. Underwood, EDS., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1985, pp. 67-85.
- 14 Johnson, H. H., “Calibrating the Electric Potential Method for Studying Slow Crack Growth,” *Materials Research and Standards*, Vol. 5, No. 9, Sept. 1965, pp. 442-445.
- 15 Hicks, M. A., and Pickard, A. C., “A Comparison of Theoretical and Experimental Methods of Calibrating the Electrical Potential Drop Technique for Crack Length Determination,” *Int. Journal of Fracture*, No. 20, 1982, pp. 91-101.

- 16** Van Stone, R. H. and Richardson, T. L., “Potential Drop Monitoring of Cracks in Surface Flawed Specimens”, Automated Tests Methods for Fracture and Fatigue Crack Growth, ASTM STP 877, W. H. Cullen, R. W. Landgraf, L. R. Kaisand, and J. H. Underwood, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1985, pp. 148-166.
- 17** Aronson, G. H., and Ritchie, R. O., Optimization of the Electrical Potential Technique for Crack Monitoring in Compact Test Pieces Using Finite Element Analysis,” Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 7, No. 4, July 1979, pp. 208-215.
- 18** Ritchie, R. O. and Bathe, K. J., “On the Calibration of the Electrical Potential Technique for Monitoring Crack Growth Using Finite Element Methods,” International Journal of Fracture, Vol. 15, No. 1, February 1979, pp. 47-55.
- 19** Li, Che-Yu and Wei, R. P., “Calibrating the Electrical Potential Method for Studying Slow Crack Growth, materials Research & Standards, Vol. 6, No. 8, August 1966, pp. 392-394.
- 20** Mom, A. and Raizenne, M. D., “AGARD Engine Disk Cooperative Test Programme,” AGARD report number 766, Aug., 1988.
- 21** Raizenne, M. D., “AGARD TX114 Test Procedures for Supplemental Engine Disc Test Programme,” National Research Council Canada, LTR-ST-1671, June 1988.
- 22** Gangloff, R. P., “Electrical Potential Monitoring of Crack Formation and Subcritical Growth from Small Defects,” Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol. 4, 1981, pp. 15-33.
- 23** Piascik, R. S., “Mechanics of Intrinsic Damage Localization During Corrosion Fatigue: Al-Li-Cu System,” Ph. D. Dissertation, University of Virginia, 1989.

**ANEXO C**

**Módulo Lógico**

## C-Módulo lógico

Se detallan aquí las especificaciones técnicas del módulo lógico programable utilizado.

Producto.....	SR1-B121BD
Reloj semanal.....	SI
Alimentación.....	24V (mín. 19,2/máx. 30V)
Corriente nominal de entrada....	67 mA
Entradas TON.....	6
Corriente nominal de entrada....	3mA
Tensión nominal.....	24V CC
Salidas relés.....	4
Tensión.....	5,,, 150V CC /24,,,250V AC
Entradas analógicas 0-10 V.....	2, pudiendo ser utilizadas como TON 24 V CC

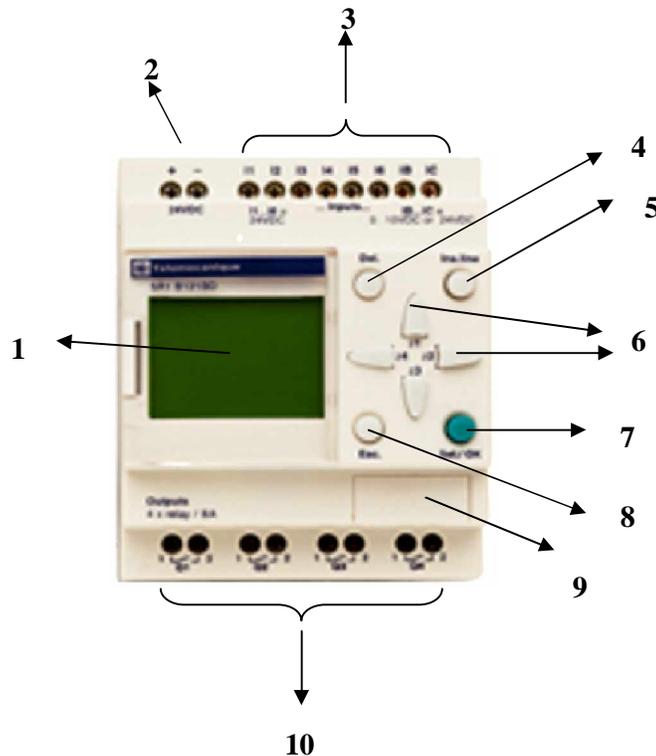


Figura C.1. Referencias del Módulo Lógico

- 1- Visor LCS.
- 2- Terminales de alimentación.
- 3- Terminales de entradas.
- 4- Tecla de supresión.
- 5- Tecla de inserción de línea.
- 6- Teclas de navegación o luego de configuración de botones pulsadores Z.
- 7- Tecla de selección.
- 8- Tecla de escape.
- 9- Emplazamiento del cartucho EEPROM.
- 10- Terminales de salida de relés.

### **C.1. Resolución de la entrada analógica**

Un punto importante que debió verificarse al momento de seleccionar el modulo era con que exactitud estamos trabajando al utilizarlo debido a que su entrada analógica es proporcional a la carga que se aplica.

La especificación técnica del instrumento aclara que “la tensión de entrada analógica se convierte en un valor numérico entero mediante un convertidor analógico/digital de 8 bits. El valor entero de salida esta comprendido entre 0 y 255.” Esto significa que el relé tiene una resolución de  $10V/255 \approx 40mV$ , pero el modulo relé solo permite la programación en saltos de 100mV (0,1V) con lo cual con nuestra carga máxima aplicada que es 1000Kg tenemos una resolución de  $\frac{0,04V * 1000kg}{10V} = 4kg$  un valor que es aceptable según la norma del ensayo.

## **ANEXO D**

### **Celda de carga**

## D-Celda de carga

### D.1.Bases teóricas relacionadas con celda de carga

#### D.1.1. Descripción sobre el análisis experimental de tensiones

La Teoría de la Elasticidad y Resistencia de Materiales, tiene como finalidad la determinación de los campos de desplazamientos, tensión y deformación para un dado sólido, sometido este a determinadas condiciones de carga y/o desplazamientos. Muchas veces, no es posible la resolución de las ecuaciones que definen el problema, aunque si lo es cuando se dan ciertas condiciones de geometría y carga. Existen sin embargo, métodos o técnicas experimentales que permiten definir el estado tensional de cierto elemento, permitiendo así poder determinar alguna variable asociada al sólido deformable en estudio, pudiendo ser esta: desplazamiento, deformación o tensión. Esta variable es asociada directamente por otra variable que puede no estar relacionada con el proceso físico pero que sea proporcional a la de interés.

Las técnicas más empleadas son:

- Extensometría Eléctrica: Es la más utilizada por su precisión, versatilidad y optima relación costo/beneficio. Es un método cuantitativo, superficial, puntual, que es utilizado en aplicaciones dinámicas o estáticas.
- Fotoelasticidad: Es una técnica que da información de los puntos más solicitados.
- Moiré: Se utiliza principalmente para determinar desplazamientos relativos entre puntos superficiales de un componente.
- Otros: Existen otros métodos de poca aplicación tales como: Interferometría Moiré, Holografía e Interferometría Láser, extensometría mecánica, etc.

Debido a que la técnica de extensometría eléctrica es la utilizada en la celda de carga diseñada para la máquina de ensayos de crecimiento de fisura por creep, de detalla a continuación los fundamentos de este método.

#### D.1.2 Extensometría Eléctrica

El análisis en este caso, es realizado midiendo superficialmente deformaciones locales utilizando extensómetros de resistencia eléctrica. Estos extensómetros están basados en los siguientes principios:

- Conductores sujetos a deformaciones cambian su resistencia eléctrica
- Conductores de distintos materiales exhiben distintas sensibilidades a las deformaciones.
- Los cambios de resistencia experimentados por los conductores debido a las deformaciones son muy pequeños pero pueden ser convenientemente medidos utilizando un puente Wheatstone.

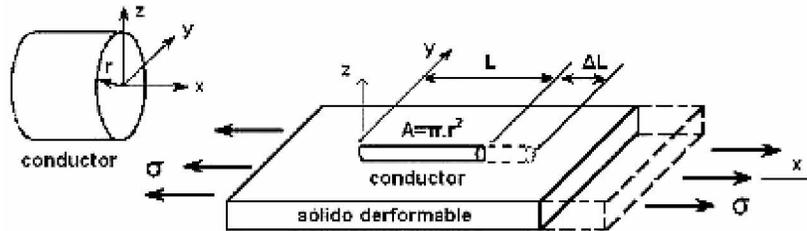
De modo que el extensómetro es adherido al elemento al cual nos interesa conocer su estado tensional y debido a la variación en su resistencia, podemos obtener una medición (de un parámetro eléctrico) que será proporcional a la variable que deseamos conocer.

Supongamos un hilo de sección circular  $A$ , como el de la figura D.1, adherido a una superficie de un sólido elástico lineal al que posteriormente se le aplicará un estado de cargas tal que se generará un campo de tensiones uniforme de magnitud  $\sigma$ .

La expresión de la resistencia del conductor antes de aplicar la carga es:

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{\pi r^2} \quad (\text{D.1})$$

Donde  $\rho$  es la resistividad, una propiedad del material conductor.



**Figura D.1. Conductor adherido a un sólido deformable**

Si el conductor y el sólido son solidarios, el primero, debido al estado tensional, sufrirá un cambio en su longitud, ocurriendo que así varíe también la sección transversal y la resistividad por lo que el valor de la nueva resistencia es ahora:

$$R + \Delta R = (\rho + \Delta\rho) \frac{L + \Delta L}{A + \Delta A} \quad (\text{D.2})$$

Luego

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} \quad (\text{D.3})$$

Si tenemos en cuenta que  $\Delta A = 2\pi r \Delta r$  la (D.3) queda:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - 2 \frac{\Delta r}{r} \quad (\text{D.4})$$

Si admitimos un alargamiento unitario y la contracción transversal unitaria, quedan relacionadas a través del coeficiente de Poisson (tomando un estado unidireccional de tensiones) podemos escribir la siguiente relación como válida:

$$\epsilon_{rr} = \frac{\Delta r}{r} = -\nu \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{D.5})$$

Donde  $\nu$  es el coeficiente de Poisson del material del conductor.

Por otro lado, Bridgman puso de manifiesto que el cambio unitario de resistividad era proporcional al cambio unitario de volumen del conductor, siendo la constante de proporcionalidad,  $c$ , una característica del material:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = c \frac{\Delta V}{V} \quad (\text{D.6})$$

La variación unitaria de volumen esta dada por el primer invariante del tensor de deformaciones, por lo que la expresión anterior puede escribirse como:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = c \varepsilon_{kk} = c(\varepsilon_{xx} + 2\varepsilon_{rr}) = c \left( \frac{\Delta L}{L} + 2 \frac{\Delta r}{r} \right) = c(1 - 2\nu) \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{D.7})$$

Llevando la (D.5) y (D.7) a (D.4), la variación unitaria de resistencia será:

$$\frac{\Delta R}{R} = c(1 - 2\nu) \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta L}{L} + 2\nu \frac{\Delta L}{L} = [c(1 - 2\nu) + (1 + 2\nu)] \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{D.8})$$

El término encerrado en corchetes es constante para un material determinado, por lo que la (D.8) nos dice que la variación unitaria de resistencia del conductor es proporcional al alargamiento unitario (deformación) experimentado por el mismo,  $\varepsilon_{xx} = \frac{\Delta L}{L}$ . La (9) puede expresarse entonces como sigue:

$$\boxed{\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon_{xx}} \quad (\text{D.9})$$

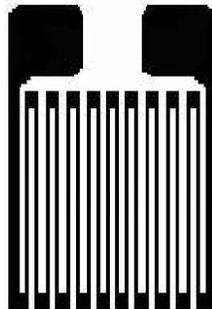
Donde K recibe el nombre de factor de sensibilidad del conductor (extensómetro) y tiene valor de aproximadamente 2 en un amplio rango de deformación.

### D 1.3. Los extensómetros eléctricos

La resistencia que se emplea en los extensómetros eléctricos, debe ser lo suficientemente grande como para que las variaciones de resistencia generadas por las deformaciones experimentadas por el conductor sean significativas frente a la resistencia del resto del circuito (cables y conexiones), debiendo ser además medibles con una cierta precisión con equipos adecuados. Las resistencias usualmente usadas son de un valor superior a los 120 Ohms. Por ejemplo, si se utilizara un cable de 0.025mm de diámetro con una resistencia por metro de 1000 Ohms/metro, seria necesario utilizar un cable conductor de 10cm.

El problema de la longitud del conductor fue resuelto haciendo una malla con él, como se muestra en la figura D.2. Los extensómetros son fabricados por un procedimiento de ataque químico, depositándose el metal sobre una superficie de material no conductor, que hace de soporte del conductor y a su vez lo aísla del sólido. La sección del conductor utilizado es muy pequeña, de manera de minimizar la sensibilidad a las deformaciones transversales.

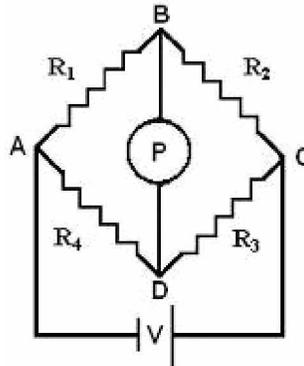
El fabricante del extensómetro provee el factor de sensibilidad, K, el cual es determinado generalmente a través de ensayos de tracción con carga conocida y usando la expresión (10)



**Figura D.2. Esquema de extensómetro.**

#### D.1.4 El puente Wheatstone

El circuito más usado para la medición de deformaciones utilizando extensometría eléctrica es el puente Wheatstone, por medio del cual la variación de resistencia que se produce en el extensómetro se convierte en una señal de voltaje que puede ser amplificada y medida. El puente Wheatstone consta de 4 resistencias (extensómetros en este caso) y una fuente de tensión, con la disposición que se observa en la figura 3.



**Figura D.3. Esquema del puente de Wheatstone**

En este circuito, la diferencia de potencial entre los puntos B y D está dada por:

$$\Delta V = V_{\text{aplicado}} \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (11)$$

Donde  $V_{\text{aplicado}}$  es un valor de tensión aplicado entre los puntos A y C de la figura D.3

El puente está equilibrado ( $P=0$ ) cuando se cumple que:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (12)$$

Una vez equilibradas las resistencias del puente, si estas experimentan una variación, pasando a valer  $R_1 + \Delta R_1, R_2 + \Delta R_2, R_3 + \Delta R_3, R_4 + \Delta R_4$ , si trabajamos algebraicamente llegamos a que la diferencia de potencial entre los puntos B y D esta representada ahora por:

$$\Delta V = \frac{V_{\text{aplicado}}}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (13)$$

De esta manera, la variación en las resistencias afecta a la diferencia de potencial, cuya variación puede ser medida fácilmente.

## **ANEXO E**

### **Especificaciones del Aluminio Camplo**

## **E-Especificaciones del aluminio Camplo**

Las características y propiedades mecánicas principales son:

- Resistencia a la tracción:  $40\text{kg/mm}^2$
- Resistencia a la fluencia:  $25\text{kg/mm}^2$
- Alargamiento típico: 5%
- Dureza Brinell típica: 120 HB
- Módulo de elasticidad (E):  $7500\text{ Kg./mm}^2$
- Modulo de Poisson ( $\nu$ ): 0,33

Por las anteriores, algunas ventajas sobre otros materiales, como ser acero o el latón son:

- Permite una alta velocidad de maquinado
- Produce poco desgaste de herramienta
- Genera virutas de tamaño muy reducido
- El empaste de las herramientas es mínimo
- Es posible realizar muy buen maquinado con excelente control dimensional
- Brinda una excelente terminación superficial
- Es naturalmente resistente a la corrosión
- Las piezas pasan a la tercera parte mejorando la relación resistencia-peso
- Muy buena respuesta al moleteado de filetes para roscas

## **ANEXO F**

### **Explicación teórica del funcionamiento de un LVDT**

## F-Explicación teórica del funcionamiento de un LVDT

El Transformador Diferencial Variable Lineal es un dispositivo de sensado de posición que provee un voltaje de salida de CA proporcional al desplazamiento de su núcleo que pasa a través de sus arrollamientos. Los LVDT proveen una salida lineal para pequeños desplazamientos mientras el núcleo permanezca dentro del bobinado primario. La distancia exacta es función de la geometría del LVDT.

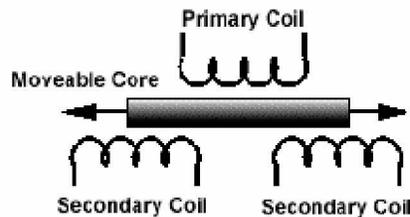


Figura F.1. Esquema básico de LVDT

### F.1. Teoría de operación

Un LVDT es muy parecido a cualquier otro transformador, el cual consta de un bobinado primario, bobinado secundario, y un núcleo magnético. Una corriente alterna, conocida como la señal portadora, se aplica en el bobinado primario. Dicha corriente alterna en el bobinado primario produce un campo magnético variable alrededor del núcleo. Este campo magnético induce un voltaje alterno (CA) en el bobinado secundario que está en la proximidad del núcleo. Como en cualquier transformador, el voltaje de la señal inducida en el bobinado secundario es una relación lineal del número de espiras. La relación básica de transformación es:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_{out}}{N_{in}}$$

Donde:

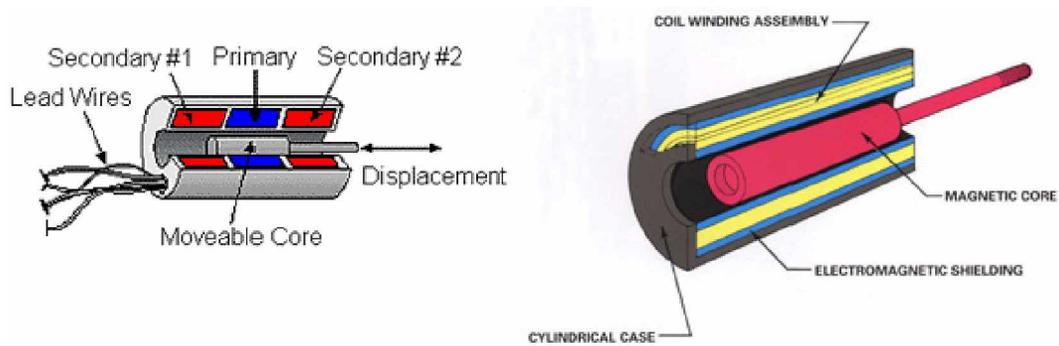
$V_{out}$ : tensión de salida.

$V_{in}$ : tensión de entrada.

$N_{out}$ : número de espiras del bobinado secundario.

$N_{in}$ : número de espiras del bobinado primario.

Como el núcleo se desplaza, el número de espiras expuestas en el bobinado secundario cambia en forma lineal por lo tanto la amplitud de la señal inducida cambiará también linealmente con el desplazamiento.



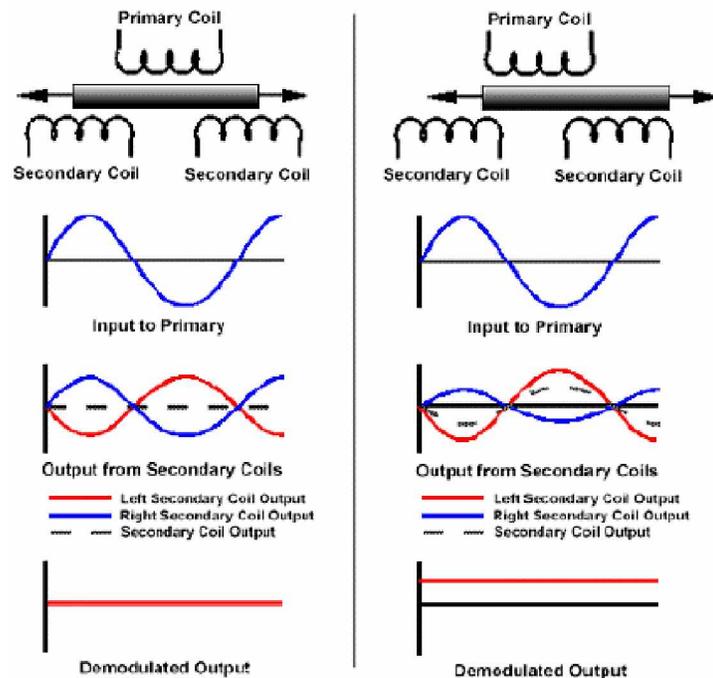
**Figuras F.2 y F.3. Corte esquema de LVDT**

El LVDT indica la dirección de desplazamiento debido a las salidas de los dos bobinados secundarios se encuentran balanceadas mutuamente. Los bobinados secundarios en un LVDT se conectan en sentido opuesto. Así cuando el mismo campo magnético variable se aplica a ambos lados secundarios, sus voltajes de salida tienen igual amplitud pero diferente signo. Las salidas de los dos bobinados secundarios se suman, simplemente conectando sus bobinados secundarios a un punto común de centro.

A una posición de equilibrio (generalmente cero desplazamiento) se produce una señal de salida igual a cero.

La señal inducida de CA es entonces remodulada para producir un voltaje de CC que sea sensible a la amplitud y a la fase de la señal de CA producida.

A continuación se muestra un diagrama de la relación entre la señal de entrada del bobinado primario, el núcleo magnético y la señal de salida:



**Figura F.4. Relación entre la entrada y la salida al LVDT**

## F.2. Efecto no lineal de un LVDT

El LVDT provee una relación lineal entre el desplazamiento y el voltaje, mientras el núcleo se expone a todas las espiras del bobinado primario.

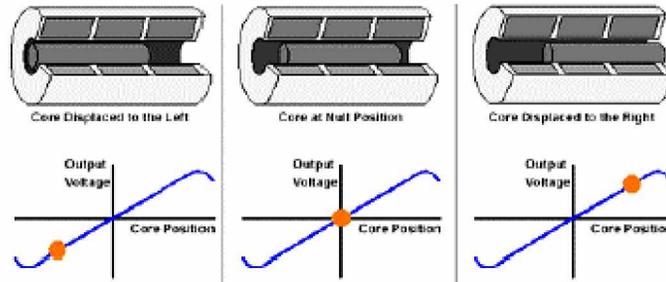


Figura F.5. Efecto no lineal del LVDT

## F.3. Demodulador de portadora

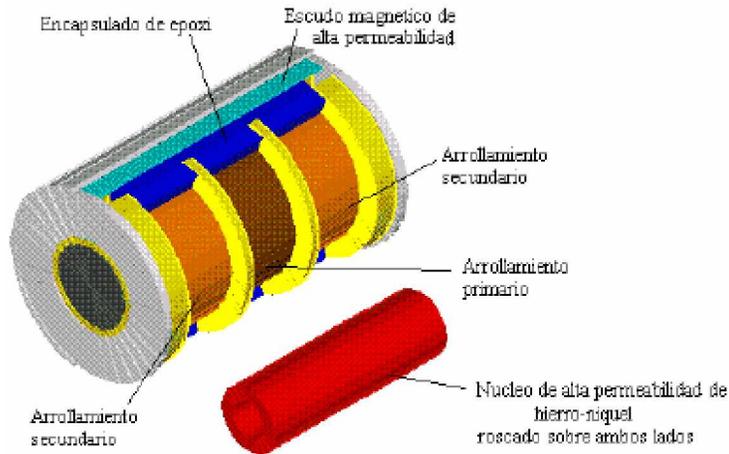
En la práctica los LVDT son usados con etapas demoduladoras de portadora que proveen la señal portadora (la señal alterna hacia el bobinado primario) y convierten (o demodulan) la señal de AC inducida en una señal DC.

El demodulador sensible a la fase es un conversor AC/DC que produce una tensión DC (típicamente entre 0 y 10 Volts) proporcional a la magnitud de salida del LVDT y sensible a la fase de la señal de salida relativa a la señal de entrada (portadora).

Cuando el núcleo es desplazado hacia un lado del primario, la salida del LVDT esta en fase con la entrada y el demodulador produce una señal positiva. Cuando el núcleo es desplazado hacia el otro lado, la salida del LVDT estará desfasada 180 grados respecto de la señal del primario. La salida del demodulador es entonces una tensión negativa proporcional al desplazamiento.

## F.4. Características de diseño

Las letras LVDT son un acrónimo de Linear Variable Diferencial Transformer, un tipo común de transductor electromecánico que puede convertir un movimiento rectilíneo de un objeto al cual esta acoplado mecánicamente, en una señal eléctrica correspondiente.

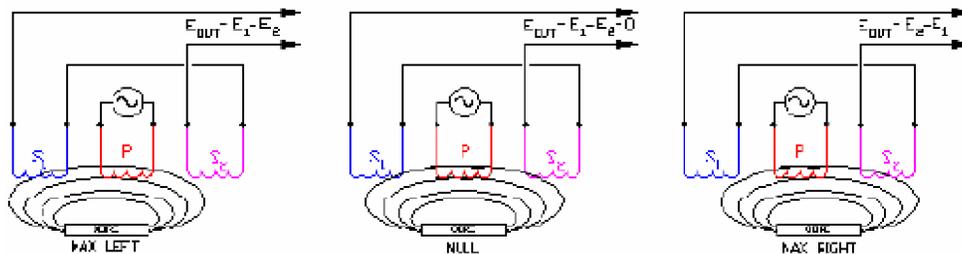


**Figura F.6. Características de diseño**

Los sensores de posición lineal LVDT están fácilmente disponibles para medir movimientos de unas pocas millonésimas partes de pulgada hasta varias pulgadas, pero así son también capaces de medir posiciones de hasta +/- 20 pulgadas.

Esta figura muestra los componentes de un LVDT típico. La estructura interna del transformador consiste en un arrollamiento primario centrado entre un par de canaletas destinadas para la ubicación de los bobinados secundarios, simétricamente espaciados respecto del primario. Los bobinados están devanados sobre una pieza de forma hueca, térmicamente estable por su construcción de polímero reforzado de cristales, y encapsulado contra la humedad; son envueltos en un escudo magnético de elevada permeabilidad, y luego alojados por seguridad en un cilindro de acero inoxidable. Este ensamble del bobinado es comúnmente el elemento fijo del sensor de posición.

El elemento móvil del LVDT es una armadura tubular de un material magnéticamente permeable llamado núcleo, el cual está libre para moverse axialmente dentro del hueco de los bobinados, y está mecánicamente acoplado al objeto cuya posición se está midiendo. Este diámetro interior es lo suficientemente grande como para proveer un espaciado radial entre ambos, sin la necesidad de contacto físico.



**Figura F.7. Características según posición axial**

Estas figuras ilustran que sucede cuando el núcleo de los LVDT está en una posición axial diferente.

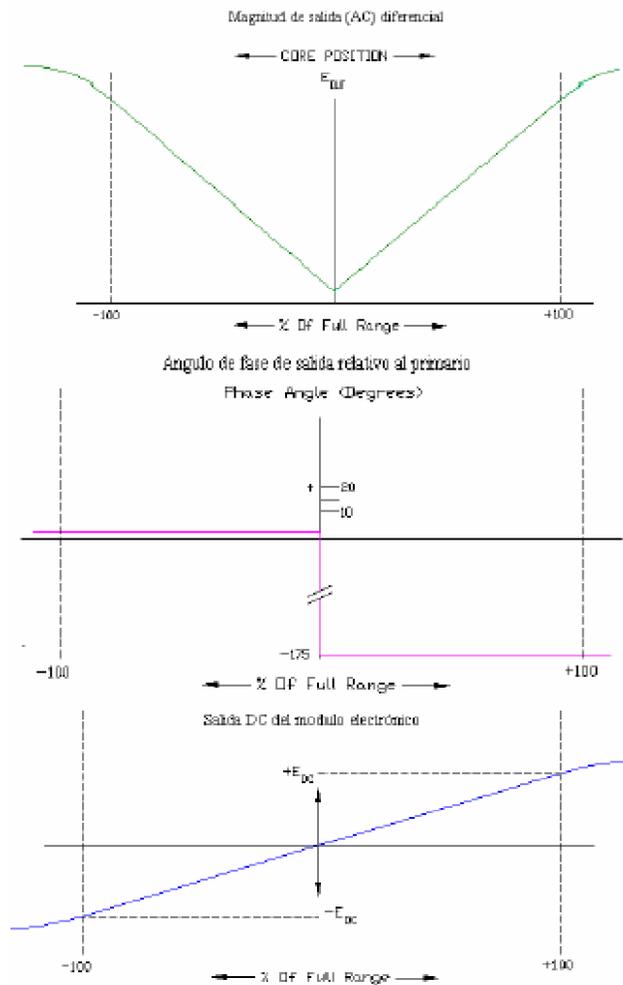
El arrollamiento primario P, es energizado por una fuente de corriente alterna de amplitud constante. El flujo magnético desarrollado es acoplado por el núcleo hacia el arrollamiento secundario adyacente, S1 y S2. Si el núcleo está localizado equidistante de S1 y S2, igual flujo es

acoplado hacia cada secundario así los voltajes  $E_1$  y  $E_2$ , inducido en cada arrollamiento son iguales.

En esta posición equidistante del núcleo, referida como punto nulo, la salida de tensión diferencial ( $E_1 - E_2$ ) es efectivamente 0.

Si el núcleo es desplazado más cerca de  $S_1$  que de  $S_2$ , más flujo es acoplado hacia  $S_1$ , así el voltaje inducido  $E_1$  es incrementado mientras  $E_2$  decrece, resultando en la tensión diferencial  $E_1 - E_2$ .

Recíprocamente, si el núcleo es desplazado más cerca de  $S_2$ , más flujo es acoplado hacia  $S_2$  y por lo tanto se incrementa  $E_2$ , resultando en la tensión diferencial  $E_2 - E_1$ .



**Figura F.8. Variación de la tensión de salida según posición de núcleo**

Estas figuras muestran como la magnitud de la tensión de salida diferencial  $E_0$ , varía con la posición del núcleo.

El valor de  $E_0$  a un máximo desplazamiento del núcleo desde la posición nula depende de la amplitud de la tensión de excitación del primario y del factor de sensibilidad del LVDT, pero es típicamente de varios volts efectivos.

El ángulo de fase de esta tensión de salida alterna  $E_0$ , referida a la tensión de excitación del primario, permanece constante hasta que el centro del núcleo pase por el punto nulo, donde el ángulo de fase cambia abruptamente 180 grados.

Estos 180 grados de desplazamiento de fase pueden ser usados para determinar la dirección del núcleo desde el punto nulo por medio de una circuitería apropiada. Esta es mostrada en el diagrama donde la polaridad de la señal de salida representa la relación posicional del núcleo respecto del punto nulo.

El diagrama también muestra que la salida de un LVDT es muy lineal sobre este rango específico de movimiento del núcleo, pero de todas formas el sensor puede ser usado sobre un rango extendido con alguna reducción en la linealidad de salida.

## **F.5. Soporte electrónico**

Aunque un LVDT es un transformador eléctrico, requiere potencia de corriente alterna de amplitud y frecuencia completamente diferente de las líneas ordinarias para operar apropiadamente, típicamente 3V (RMS) a 2,5 KHz.

Suministrar la excitación para un LVDT es una de las funciones del soporte electrónico el cual es a veces conocido como equipo de acondicionamiento de señal para LVDT.

Otra función incluye convertir la salida de tensión alterna de bajo nivel en una señal DC de alto nivel, que es la más conveniente para usar, decodificando la información direccional de 180 grados de defasaje de salida con movimiento del núcleo a través del punto nulo, y proporcionando un nivel de salida con cero ajustable eléctricamente.

Una amplia variedad de acondicionadores electrónicos están disponibles, incluyendo productos a nivel chips y nivel placa para aplicaciones OEM así como módulos e instrumentos de laboratorio completo y listo para usar.

El soporte electrónico también puede estar autocontenido como en un LVDT de continua. Estos transductores de posición, fáciles de usar ofrecen prácticamente todos los beneficios de los LVDT con la simplicidad de operación DC input – DC output. Naturalmente, los LVDT con electrónica integral pueden no ser adecuados para algunas aplicaciones, o pueden no estar apropiadamente empaquetados para algunas instalaciones.

## **F.6. Características y ventajas de un LVDT**

Los LVDT tienen ciertas características y beneficios significativos, algunos de los cuales derivan de los principios fundamentales de la física, de la operación o de los materiales y técnicas utilizados para su construcción.

Algunas de ellas se detallan a continuación:

- Operación libre de fricción: en uso normal, no hay contacto mecánico entre el núcleo de un LVDT y el bobinado, no hay roce, arrastre u otra fuente de fricción. Esta característica es particularmente usada en pruebas de materiales, medición de desplazamiento por vibración y sistema graduador dimensional de alta resolución.
- Resolución infinita: puesto que los LVDT operan sobre principios de acoplamiento electromagnético es una estructura libre de fricción, miden cambios infinitamente pequeños en la posición del núcleo. Esta capacidad de resolución infinita es limitada solamente por el acondicionador de señal LVDT y por el display de salida.

- Vida mecánica ilimitada: este factor es especialmente importante en aplicaciones de alta confiabilidad, tales como aeroplanos, satélites, vehículos espaciales e instalaciones nucleares. Así también es altamente deseable varios controles de proceso industrial y sistemas de automatización de fábrica.
- Sensibilidad de eje simple: el LVDT responde al movimiento del núcleo a lo largo del eje del bobinado, pero es generalmente insensible al movimiento en el eje transversal del núcleo o a su posición radial. Por ello, un LVDT puede funcionar sin efectos adversos en aplicaciones que implican movimientos no alineados o flotantes, y en casos donde el núcleo no se mueve en línea recta.
- Con respecto al medio ambiente no apto: las técnicas de construcción y materiales usados en el armado de un LVDT, hacen de él un sensor durable y resistente en una gran variedad de condiciones ambientales. La unión de los arrollamientos es seguida por un encapsulado epoxy en el casco, resultando más resistente a la humedad, así como también la capacidad para absorber choques, cargas considerables y altos niveles de vibración en todos los ejes.
- La alta permeabilidad interna del escudo magnético minimiza los efectos de campos magnéticos de CA.
- El casco y el núcleo están hechos de metales resistentes a la corrosión, el casco también actúa como un escudo magnético suplementario. Y para las aplicaciones donde el sensor debe resistir a la exposición de vapores y líquidos combustibles o corrosivos, u operando en fluidos comprimidos, el casco y el bloque ensamblado de las bobinas pueden sellarse herméticamente usando una gran variedad de procesos de soldadura existentes para tal fin.
- Los LVDT ordinarios pueden operar sobre una gama de temperatura muy amplia, pero, si se requiere, podrán ser producidos para operar bajo temperaturas criogénicas, o, usando materiales especiales, operando a niveles elevados de radiación y temperaturas encontradas en muchos reactores nucleares.
- Estabilidad del punto nulo: la ubicación del punto nulo en los LVDT es sumamente estable y constante, parejo sobre una amplia gama de temperaturas de funcionamiento. Esto hace que un LVDT se desempeñe bien como un sensor de posición nula en sistemas de control de lazo cerrado y en instrumentos servobalanceados de alto rendimiento.
- Rápida respuesta dinámica: la ausencia de fricción durante la operación normal permite que un LVDT responda muy rápido a los cambios de posición del núcleo. La respuesta dinámica de un sensor LVDT está autolimitada solamente por los efectos inerciales de la masa delgada del núcleo. Más frecuentemente, la respuesta de un sistema de sensado LVDT es determinada por las características del acondicionador de señal.
- Salida absoluta: un LVDT es un dispositivo de salida absoluta, a diferencia de un dispositivo de salida incremental. Esto significa que en caso de pérdida de alimentación, los datos de posición que son enviados desde el LVDT no se perderán. Cuando el sistema de medición es reiniciado, el valor de salida del LVDT será el mismo que tuvo antes del fallo de la alimentación.

**ANEXO G**

**Catálogo LVDT**

## G-Catálogo LVDT

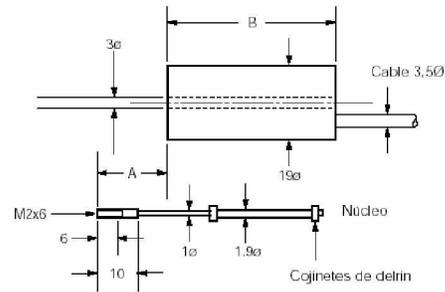
# Serie DF

## Captadores corriente continua

Salida alto nivel  
Dos modelos  
Campo de medida hasta 10mm  
Resolución infinita  
Excelente repetibilidad

El modelo DF posee una parte móvil (varilla + núcleo) totalmente libre (sin guía ni muelle) y permite detectar desplazamientos minúsculos.

El modelo DFg posee una parte móvil libre guiada por cojinetes de Delrin



73

Modelo DFg únicamente

Dimensiones mm

	DF1 DFg1	DF2.5 DFg2.5	DF5 DFg5
A*	21,5	21,5	20,5
B	37	37	43

\*en el cero eléctrico

### Especificaciones

Núcleo libre	DF1	DF2.5	DF5
Núcleo guiado	DFg1	DFg2.5	DFg5
<b>Mecánicas</b>			
Campo de medida ±mm	1	2,5	5
<i>Peso, g</i>			
Cuerpo, conductores incluidos	26	26	30
Varilla con núcleo	1,0	1,0	1,0
Núcleo (guiado)	1,0	1,0	1,2
<b>Eléctricas</b>			
Sensibilidad a 10Vcc (mV/mm)	750	750	540
Corriente de excitación (a 10V)	10mA	10mA	13mA
Tensión de alimentación	10 a 24Vcc		
Ondulación de salida	< 1% del F.E.		
Tiempo de respuesta (ms)	5	5	3
Respuesta en Frecuencia (-3dB)	50Hz	50Hz	75Hz
Temperatura de trabajo	-20 a +80°C		
<b>Coefficiente de temperatura</b>			
Cero	Tipico 0,02%F.E./°C	Tipico 0,01%F.E./°C	Tipico 0,01%F.E./°C
Sensibilidad	Tipico 0,25%F.E./°C	Tipico 0,025%F.E./°C	Tipico 0,025%F.E./°C
Linealidad (% del F.E.)	0,3	0,3	0,3
Tipo de conexión	3m de cable de 6 conductores 19/00, 7mm aislado con PVC		
Calibración	Características obtenidas con una impedancia de salida de 2,4kΩ y una carga de 20kΩ a 20°C. Variaciones de estos parámetros implicarán cambios en estas especificaciones.		
<b>Conexión eléctrica</b>			
Alimentación (+)	Rojo		
Alimentación (-)	Azul		
Salida señal (+ hacia dentro)	Blanco		
Masa	Verde		
No conectado	Amarillo		

Todos estos captadores incorporan un transformador diferencial de variación lineal (LVDT) como fuente de medida, asociado a un oscilador, un demodulador y un filtro formando un conjunto cuya alimentación y medida (relativa a la posición del núcleo) se efectúan en corriente continua. La gran linealidad y el bajo peso de la parte móvil hacen estos captadores ideales para numerosas aplicaciones en ingeniería, mecánica y química. Asociados a una membrana sensible o un cuerpo deformable suministrarán una medida de presión o de fuerza.



## **ANEXO H**

### **Dispositivo de medición de apertura de boca de fisura**

## **H-Dispositivo de medición de apertura de boca de fisura**

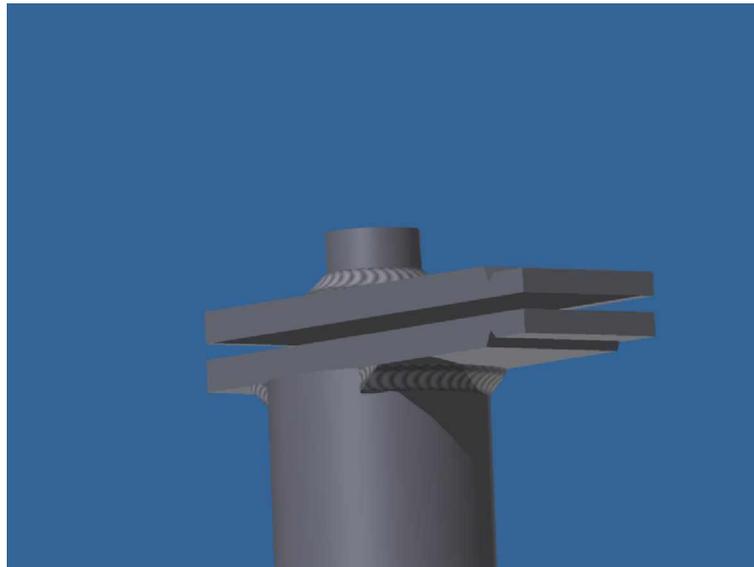
Se muestran a continuación los planos de fabricación de las piezas del dispositivo como así también figuras en 3D de la forma del mismo simulada bajo INVENTOR, un programa muy potente utilizado actualmente en la industria para el diseño de todo tipo de elementos, desde piezas simples hasta aviones de pasajeros completos.

### **H.1 Planos de fabricación**

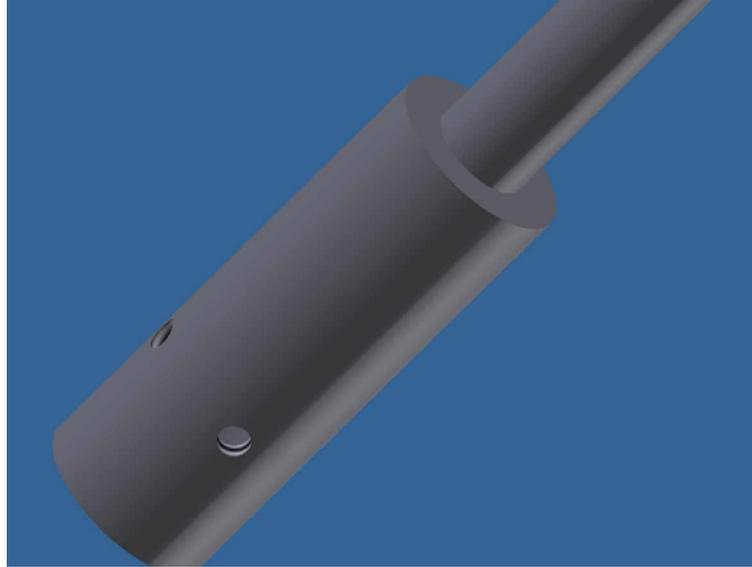
## H.2 Fotos simuladas en 3D



**Figura H.2.1.1** Muestra de la parte superior del dispositivo- Lateral derecho



**Figura H.2.1.2** Muestra de la parte superior del dispositivo- Lateral Izquierdo



**Figura H.2.2.1** Muestra de la parte inferior del dispositivo.



**Figura H.2.2.2** Muestra de la parte inferior del dispositivo



**Figura H.2.2.3** Muestra de la parte inferior del dispositivo sin porta LVDT



**Figura H.2.3.1** Vista lateral del dispositivo armado



**Figura H.2.3.2 Vista desde el lado inferior del dispositivo armado**

## **ANEXO I**

### **Placa adquisidora y placa HPIB**

## I-Placa adquisidora y placa HPIB

### I.1. Introducción a las plaquetas de adquisición basadas en pc

La adquisición de datos basada en PC se compone de circuitería analógica, conversión A/D, lógica digital de direccionamiento y la arquitectura y software de la computadora. Esta sección es una introducción a las características propias de un sistema de adquisición con una breve explicación de las especificaciones más importantes para una determinada aplicación.

#### I.1.1. Entradas Analógicas

La **resolución** de entrada de un sistema de adquisición se especifica comúnmente en "N° de bits". La mayoría de los productos disponibles ofrecen 12 bits de resolución y en menores cantidades existen otros de 8, 10, 14 y 16 bits. La conversión desde bits de resolución a la verdadera resolución se describe como:

$$\text{Resolución} = 1 / 2^n - 1$$

Donde n: N° de bits

Para determinar la resolución en volts, debemos tomar el rango total de tensión de entrada (fondo de escala FE) y dividirlo por la resolución especificada. Por ejemplo para una resolución de 12 bits y un fondo de escala de 5V la resolución será:

$$\text{Resolución} = 1 / 4095 = 0,0244 \%$$

$$\text{Resolución (en volts)} = 5 / 4095 = 1,22 \text{ mV}$$

La clave para encontrar la resolución más apropiada para una aplicación es adaptar la resolución de la plaqueta a la requerida para la medición.

En general los conversores A/D de alta resolución son más costosos que los de baja resolución y por lo tanto deberá utilizarse un conversor A/D que por lo menos tenga 1 bit más de resolución que la requerida por la aplicación.

A la **exactitud** de entrada se la relaciona comúnmente con la resolución de entrada pero son dos características distintas. Para poder determinar la exactitud que la aplicación requiere es necesario tener en cuenta las especificaciones de resolución y exactitud del sistema de adquisición.

Es común tener conversores A/D de 16 bits (1/65536 de resolución) cuya exactitud abarque solamente 12 bits (1/4096 de exactitud). A primera vista, esta alta resolución sin una correspondiente exactitud hace que la calidad en la medición no sea superior a la ofrecida por un conversor de 12 bits, sin embargo hay aplicaciones en las cuales estos conversores son de utilidad.

La **máxima velocidad de muestreo** también es una especificación muy importante. Comúnmente está dada en muestras/segundo (sample/sec; Ksample/sec ó Msample/sec) en vez de utilizar el Hz. Por otro lado la mayoría de las plaquetas de adquisición multicanal consisten de un solo conversor A/D y un multiplexor de entrada que actúa como llave para seleccionar a alguno de los canales de entrada del cual se toman muestras. Pero cuando la adquisición se hace sobre varios canales de entrada, la máxima velocidad de muestreo por canal se obtiene dividiendo la máxima velocidad de conversión del A/D dividida por el número de canales muestreados. Por ejemplo, en una plaqueta de 8 canales de entrada tiene una especificación de 100 Ksamples/sec, si seleccionamos un solo canal de entrada este será muestreado a 100 Ksample/sec si en cambio muestreamos 4 canales la velocidad bajará a 25 Ksamples/sec por canal.

En muchos casos, la máxima velocidad de muestreo es especificada con todos los canales con la misma ganancia. Cambiando la ganancia por software de canal a canal puede bajar aún más la velocidad a menos que la plaqueta posea un amplificador independiente por canal.

Velocidades de hasta 100 Ksamples/sec pueden lograrse por DMA aprovechando la capacidad de memoria de la PC, para velocidades mayores las plaquetas vienen provistas de memoria RAM evitando así limitar la velocidad de muestreo de la placa por la propia de la máquina.

La teoría de muestreo establece que **el mínimo de velocidad de muestreo que deberá utilizarse en una aplicación deberá ser de por lo menos dos veces la componente de máxima frecuencia de la señal analógica de entrada**, por lo general para este factor se adopta un valor de tres para asegurar una calidad aceptable en la señal adquirida.

De no cumplirse con el teorema de muestreo se produce un error denominado **aliasing** que consiste en tener una señal digitalizada de menor frecuencia que la real. Para evitar este error se recomienda el uso de un filtro pasabajos (antialiasing) de frecuencia de corte en un valor mitad de la velocidad de muestreo de la plaqueta. Típicamente este filtro corta a una frecuencia de 0,33 la velocidad de muestreo.

Esta posibilidad de tomar muchas muestras de la entrada analógica permite, además de la aplicación en señales alternas permite medir tensiones continuas con alta resolución, promediando las muestras para lograr un filtrado por software.

### I.1.2. Conversores A/D

El tipo de convertor A/D puede ser una consideración importante cuando se selecciona un sistema de adquisición. Existen cuatro tipos usados en sistemas de adquisición: con integración, aproximaciones sucesivas y flash. La tabla 1 muestra un cuadro comparativo de las características de estos convertidores:

**Tabla1:**

Tipo de Convertor	Velocidad	Resolución	Inmunidad al ruido	Costo
Integración	5 s/seg	12-18 bits	alta	bajo
Aprox. sucesivas	200 Ks/seg	10-16 bits	baja	bajo
Flash Subranging	1 Ms/seg	10-16 bits	----	alto
Flash	1 Gs/seg	4-8 bits	----	alto

### I.1.3. Disparo de la adquisición

El disparo del convertor A/D es una consideración importante dado que en aplicaciones tales como medición de relación de fase y análisis espectral por FFT, un cambio en el sincronismo ó espaciado temporal entre muestras puede causar grandes errores en el posterior análisis de estos datos. La conversión debe comenzar a partir del clock propio de la plaqueta a fin de independizar de la máquina la toma de muestras.

Además el modo de disparo es importante dado que la relación entre el punto de disparo y el comienzo de la adquisición puede tener distintas configuraciones dando la posibilidad de utilizar los modos Pretrigger y Posttrigger.

### I.1.4. Entradas diferencial y desbalanceada

En muchas plaquetas de adquisición se ofrece la posibilidad de configurar la entrada en forma **diferencial** para proveer mejor inmunidad al ruido y ayudar a prevenir lazos de masa. Esto es importante especialmente en sistemas que toman datos desde un número diferente de dispositivos o están localizados a mucha distancia. Las entradas **desbalanceadas** (single-ended) en cambio están referidas a un punto de masa común.

El **número de canales** está determinado por el multiplexor de entrada y es especificado para las dos configuraciones mencionadas, de esta forma es común una especificación de 16 canales en modo desbalanceado y 8 para el diferencial.

Algunas plaquetas tienen entradas pseudodiferenciales que están referenciadas al mismo punto común (flotante) que está aislado de masa. Usando esta disposición se tiene el beneficio de una medición flotante de bajo ruido y mayor número de canales de entrada que en el modo diferencial.

### **I.1.5. Modo de transferencia de datos**

La transferencia de datos desde la plaqueta a la PC se puede realizar mediante los siguientes métodos:

Control del software

DMA

Interrupción

El modo por control del software también denominado de **Encuesta** consiste en dos pasos: una salida para comenzar la conversión y una lectura para ingresar el valor digital a la memoria de la PC. Esta posibilidad es de baja velocidad y requiere la atención de la CPU

Las plaquetas para transferencia de datos a alta velocidad utilizan **DMA** (Acceso Directo a Memoria) o **Interrupción**.

El **DMA** consiste en la transferencia de datos desde la plaqueta de adquisición a la memoria de la PC directamente, resultando en un proceso completamente controlado por hardware, suspendiendo la ejecución del programa hasta completar la transferencia. Esta característica hace que el DMA sea usado para adquisiciones donde se requiere velocidad.

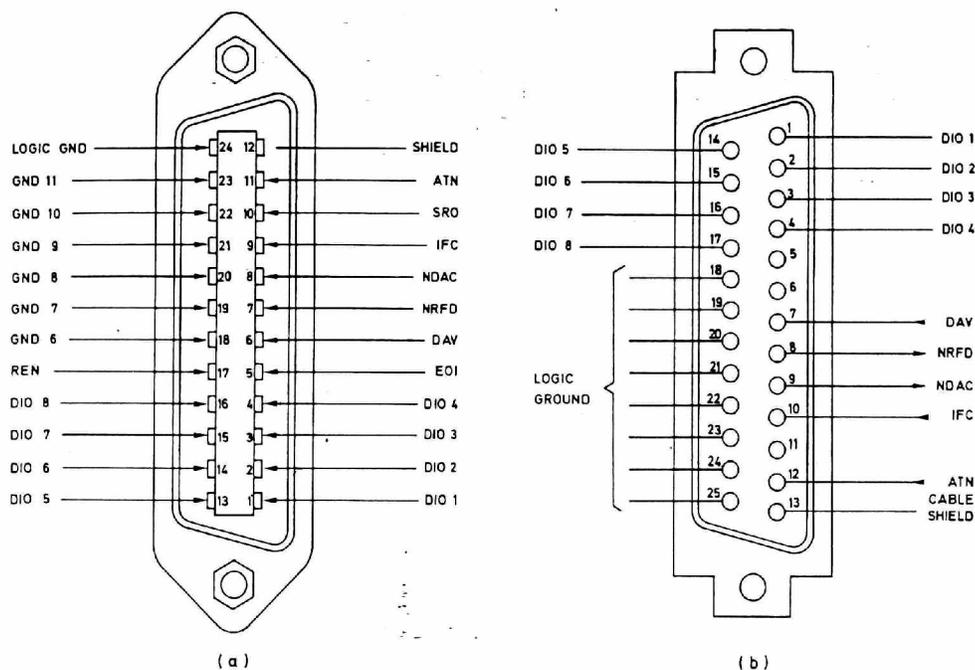
El modo por **Interrupción** causa que la computadora detenga la ejecución del programa en curso para saltar a la rutina de interrupción. Esta rutina consiste principalmente en leer el dato de la plaqueta y almacenarlo en la memoria de la PC y realizar otras operaciones previstas, para luego habilitar nuevamente el programa interrumpido. Estos pasos requieren de más tiempo que el DMA, razón por la cual este modo se utiliza en aplicaciones de menor velocidad que el anterior.

Los conversores Flash son utilizados donde es necesario mayores velocidades. Se utiliza memoria en la plaqueta para independizar la adquisición de la velocidad del bus de la PC. Una vez memorizados los datos en la RAM de la plaqueta, el ingreso de los datos a la PC se puede realizar por cualquiera de los modos descriptos.

## I.2. Interconexión de instrumentos programables-Norma IEEE-488-

### I.2.1. Introducción

Cuando se quiere interconectar instrumentos de medida y controladores para formar un sistema de medición, éstos deben cumplir con alguna norma que permita su utilización independientemente de que provengan de distintos fabricantes. Las primeras propuestas de normalización surgieron de la Comisión Electrónica Internacional (IEC) en el otoño de 1972. Al mismo tiempo que el IEC, otras organizaciones internacionales, especialmente en Alemania, comenzaron un movimiento de normalización. En abril de 1975 el Instituto de Ingenieros en Electrónica y Electricidad (IEEE) de Estados Unidos, publicó la norma IEEE 488/1975, para la interconexión digital de instrumentos programables. En enero de 1976 el American National Standard Institute la adoptó como ANSI M.C.1.1. En el mismo año, las naciones miembros de la IEC sometieron a escrutinio esta norma como modelo para posteriores desarrollos. El IEEE publicó una versión revisada de la norma en 1978, con aclaraciones del texto que permitían una más fácil lectura y comprensión. Finalmente la IEC adoptó la norma IEEE en su totalidad con el número 625-1, a excepción del conector original americano que fue sustituido por un conector de tipo europeo. Actualmente coexisten ambas normas, que salvo el conector presentan características comunes que se conocen por la denominación generalmente adoptada de GPIB (General Purpose Interface Bus). La Fig. I.1 muestra la forma y disposición de los contactos de ambos conectores.



**Fig. I.1: conector GPIB (a) norma europea (IEC) y (b) norma americana (IEEE).**

### I.2.2. Descripción general

El aspecto funcional de la norma incluye el uso de líneas específicas para enviar y recibir mensajes, el protocolo para la recepción y emisión de estos mensajes, la lógica que utilizan y la temporización entre las líneas. Se dispone además de una serie de 10 funciones de interconexión de propósitos específicos. Estas características son tratadas con detalle a continuación.

El bus transfiere datos y órdenes entre los elementos que componen un sistema a través de 16 líneas que se dividen en 3 grupos:

*Bus de datos* compuesto por 8 líneas (DIO1-DIO8), sobre las cuales los mensajes son transmitidos en la forma de bytes consecutivos (bit-paralelo, byte-serie).

*Control de transferencia de los bytes*: utiliza 3 líneas (DAV, NRFD, NDAC) destinadas al manejo del protocolo de comunicación (handshake).

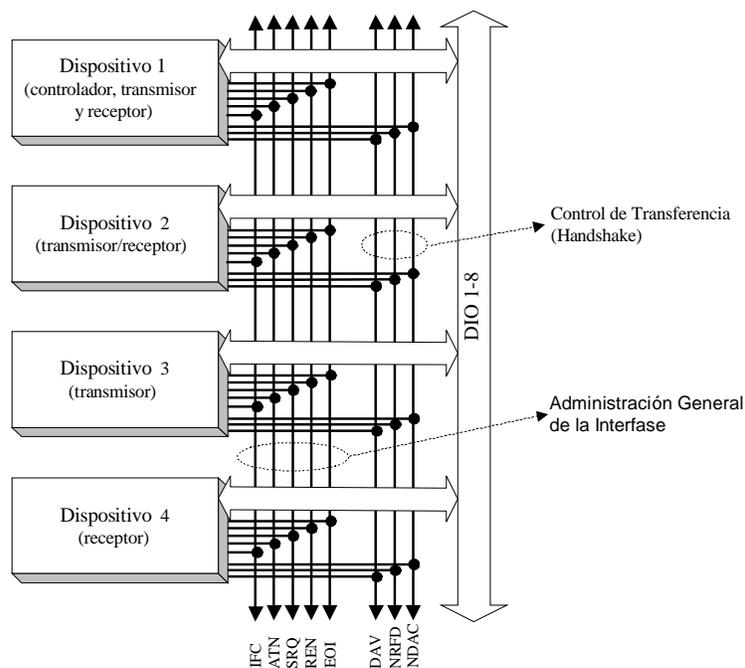
*Administración general de interfase*, utilizando las 5 líneas restantes (ATN, IFC, REN, SRQ y EOI).

Los elementos están conectados en paralelo a las líneas de señal como se muestra en la Fig. I.2, por lo tanto es de importancia primordial impedir que se transmitan 2 o más informaciones simultáneas y a su vez lograr que la información destinada a uno o varios dispositivos sea aceptada *sólo* por el o los dispositivos especificados. Para cumplir con estas condiciones se utilizan las líneas de handshake (protocolo) y se definen 3 tipos distintos de dispositivos:

*Transmisor o parlante (TALKER)*: todo instrumento o dispositivo capaz de transmitir datos a través del bus (frecuencímetro, voltímetro, entre otros)

*Receptor o escucha (LISTENER)*: todo instrumento o dispositivo capaz de recibir datos digitales a través del bus (registrador XY, fuente programable, etc.)

*Controlador (CONTROLLER)*: todo instrumento o dispositivo capaz de administrar las comunicaciones a través del bus, designar los dispositivos que han de transmitir o recibir datos durante cada secuencia de medición, e interrumpir y ordenar acciones internas específicas en los dispositivos.



**Fig. I.2: Diagrama de interconexión a través del GPIB.**

Un dispositivo puede ser receptor; receptor/transmisor o receptor/transmisor/controlador dependiendo de la función específica que esté realizando en cada momento. Para evitar ambigüedades el controlador habilitar sólo un transmisor (talker) por vez, pudiendo, no obstante haber dos o más escuchas habilitados simultáneamente. Para poder realizar estas habilitaciones cada instrumento tiene un “nombre” o “dirección” (generalmente programable) formada por un número con los 5 bits menos significativos (DIO1-DIO5) del byte. Con estos 5 bits se pueden

formar 31 combinaciones distintas (de 0 a 30), ya que la dirección 31 se reserva para indicar que todos los instrumentos pasan a estado desdireccionado. El sexto y séptimo bit (DIO6-DIO7) se utilizan para distinguir si el instrumento direccionado actuará como talker (01, equivalente a sumar 64 en decimal) o como listener (10, equivalente a sumar 32 en decimal). El octavo bit no se utiliza. Así, si por ejemplo se configura la dirección de un instrumento con el valor 10, entonces actuará como talker cuando el controlador lo direcciona con el número 74, y actuará como listener cuando sea direccionado con el número 42.

### **I.2.3. Handshake (protocolo de comunicación)**

Generalmente los instrumentos que se conectan para formar un sistema de medición tienen distinta velocidad de respuesta a los comandos que se envían por el bus. Por lo que la transmisión debe ser totalmente asincrónica de forma que el instrumento más lento no pierda información. Este problema se soluciona empleando un protocolo basado en 3 líneas, cuyo significado es el siguiente:

DAV (Data Valid): manejada por el talker para indicar que el dato que se encuentra en el bus de datos es válido para ser interpretado por los equipos conectados.

NRFD (Not Ready For Data): manejada por el listener para indicar que no se encuentra en condiciones de recibir datos. El talker debe comprobar que se encuentra en un valor alto (F) para declarar DAV verdadera. Esta línea es manejada por dispositivos Open Colector para poder hacer una lógica cableada y que solamente adopte el valor verdadero cuando todos los instrumentos se encuentren listos.

NDAC (Not Data Accepted): manejada por el listener. Cuando adopta el valor falso indica que todos los dispositivos están listos para recibir nuevos datos. A partir de este momento el talker invalida los datos (DAV = falso) y puede cambiar los datos sobre el bus.

Las líneas de handshake que maneja cada instrumento dependerán de si está actuando como talker o listener.

### **I 2.4.Líneas de control**

Existen 5 líneas dedicadas al control general de la interfase, que son conocidas también como *comandos unilínea*, para diferenciarlos de los comandos universales (*multilínea*) que son palabras reservadas con un significado específico. Estas líneas son:

ATN (ATtention): es manejada por el controlador para determinar si el byte (DIO1-DIO8) es un dato (ATN = falso) o un comando (ATN = verdadero). Esta línea condiciona también el significado de la línea EOI.

EOI (End Or Identify): cuando ATN = V esta línea es usada por el controlador para ejecutar una encuesta paralelo. Si ATN = F esta línea es utilizada por el talker activo para indicar que el dato transmitido es el último byte de un mensaje.

IFC (InterFace Clear): es utilizada por el controlador del sistema (que puede no ser el controlador activo) para detener todas las comunicaciones sobre el bus (desdirecciona a los talkers y listeners y finaliza una encuesta serie), llevando a todos los instrumentos conectados a un estado determinado.

REN (Remote ENable): es usada por el controlador del sistema. Cuando su valor es verdadero todos los instrumentos con capacidad para funcionar en modo Remoto deben activar esta opción cuando se direccionan como listeners. Cuando su valor se hace falso todos los dispositivos retornan al modo Local.

SRQ (Service ReQuest): es utilizada por uno o más dispositivos para indicar la necesidad de atención y puede actuar como una interrupción a la secuencia de eventos. El controlador debe hacer una encuesta (serie o paralelo) para saber quién solicita su atención y porqué.

Encuesta Serie (Serial Poll): el controlador debe interrogar a cada uno de los dispositivos conectados. Para ello comienza enviando un comando específico (SPE) que habilita la encuesta, y luego direcciona secuencialmente a cada uno como talker. Cuando el dispositivo reconoce su dirección debe volcar al bus de datos su STATUS BYTE, donde el bit DIO7 indica si fue el que solicitó el servicio y en los otros bits (dependiendo del instrumento) indica si la solicitud se debe a que se produjo un error o si se tiene un dato disponible para enviar. Una vez que ha comunicado su estado debe liberar la línea SRQ. La encuesta se finaliza enviando otro comando específico (SPD). Una vez que se identificó al solicitante del servicio el controlador debe pedirle que le envíe su código de error (o sus datos) como un comando más. Este procedimiento puede demandar mucho tiempo dependiendo de la cantidad de instrumentos interconectados. Al finalizar de atender a un instrumento el controlador debe verificar que la línea SRQ quede desactivada, ya que puede haber otro dispositivo que también haya solicitado servicio. La línea se pone en estado falso sólo cuando todos los instrumentos cesan en su pedido de atención.

Encuesta Paralelo (Parallel Poll): este modo es soportado sólo por algunos instrumentos. A diferencia del modo anterior, el controlador puede verificar 8 dispositivos simultáneamente para determinar su estado. El usuario asigna a cada uno de ellos una de las líneas de datos (DIO1-DIO8) que el dispositivo debe poner en verdadero cuando se realice la encuesta. La configuración puede ser realizada en forma local (manualmente) o remota (mediante comandos desde el controlador).

### **I.2.5 Mensajes y comandos**

La información a través del sistema se transmite por medio de mensajes que aparecen sobre las líneas bidireccionales de datos. Si la línea ATN está en estado alto (falso) el significado de los mensajes depende de las características operativas de cada elemento en sí, y como tal, no está normalizado. Estos mensajes pueden ser de tres tipos: datos de programación enviados a un elemento, datos normales resultantes de las medidas u otra actividad realizada por un elemento y bytes de estado.

Los mensajes transmitidos con la línea ATN en estado bajo (verdadero) son específicos del bus y se los denominan *comandos multilínea*. Estos son caracteres ASCII (American Standard Code for Interchange Information), formados por los 7 bits de menor peso (aunque el MSB no se utiliza, generalmente adopta el valor 0). Pueden existir 34 órdenes principales (ASCII mayúscula) y 32 complementarias o secundarias (ASCII minúscula), de las cuales sólo se encuentran definidas 12 principales y 2 secundarias. A su vez pueden clasificarse en *comandos universales* (destinados a todos los dispositivos conectados al bus se encuentren direccionados o no), y *comandos direccionados* (destinados sólo a los dispositivos que se encuentren direccionados).

### **I2.6. Características eléctricas**

Las especificaciones eléctricas dadas por la norma están basadas en el uso de la tecnología TTL para los circuitos transceptores, aunque los circuitos de interfase conectados a los mismos pueden ser implementados con otras tecnologías. Se convino el uso de una lógica negativa, resultando:

Estado lógico	Nivel de señal
0 = Falso	+2.0 V (denominado estado alto)
1 = Verdadero	+0.8 V (denominado estado bajo)

Los integrados que manejan las líneas SRQ, NRFD y NDAC deben ser de colector abierto (open colector) para permitir realizar una compuerta AND cableada (wire and) uniendo las líneas

de igual nombre de todos los dispositivos. Con esto se asegura que la línea adquirirá el valor verdadero sólo cuando todos los dispositivos la declaren como verdadera.

### **I 2.7.Limitaciones**

Las características mecánicas, eléctricas y funcionales definidas en la norma, imponen una serie de limitaciones en el funcionamiento del sistema de interconexión. Las más importantes son:

- Como máximo pueden estar conectados simultáneamente 15 elementos al bus.
- La velocidad máxima de transferencia es de 1 Mbyte/s.
- La distancia de cableado está limitada a 2 m entre elementos no debiendo superar lo 20 m en total.
- La mitad más uno del total de elementos conectados al sistema deben permanecer encendidos aunque no sean utilizados.

Aunque sólo 15 elementos primarios pueden conectarse directamente al bus, cada uno de ellos puede contener varios elementos secundarios. Este es el caso de los instrumentos formados por una unidad principal que aloja varias unidades enchufables. Los elementos primarios tienen asignada una dirección principal, para enviar o recibir mensajes. Los elementos secundarios conectados se direccionan combinando la dirección del elemento principal al que pertenecen con otro grupo de 31 direcciones para formar un total de 961 direcciones secundarias.

En cuanto a la velocidad de transferencia, el límite especificado es casi imposible de alcanzar si no es con un diseño muy cuidadoso que tenga en cuenta los retardos digitales y tiempos de establecimiento con un cable de longitud mínima, las cargas adecuadas y transeptores especiales. En un sistema típico que emplee transeptores de lógica TTL, con salida por colector y en una longitud normal de cable, la velocidad de transferencia no pasará normalmente de 200 Kbytes/s, y aún así, la velocidad efectiva del sistema estará limitada por otras consideraciones como el tiempo empleado por los distintos elementos en responder a las órdenes de control o en realizar sus funciones internas.

La distancia máxima entre elementos obedece a la configuración de carga distribuida del bus y la necesidad de tener un elemento de carga por cada dos metros para mantener sus características eléctricas. Sin embargo, los elementos pueden separarse más de dos metros, concentrando el número adecuado de cargas en cualquier punto. De hecho con algunas mejoras en la circuitería, el GPIB podría emplearse en distancias de hasta 100 metros pero, para distancias mayores, se hace necesario el empleo de serializadores y la transmisión por dos hilos con la consiguiente pérdida de velocidad.

### **I 2.8. Software de control**

Como se mencionó, a partir de la adopción de la norma GPIB (tanto en América como en Europa), se continuaron los trabajos de modificación para ampliarla y mejorarla. El resultado fue la definición más precisa de la comunicación mediante el establecimiento de los protocolos de intercambio de mensajes descrito, el formato de los datos, los informes de estado y las órdenes generales comunes a distintos tipos de instrumentos. La norma así obtenida recibió la denominación de IEEE 488.2 en 1987 y constituyó un avance para conseguir sistemas más fiables y fáciles de programar.

Finalmente se formó un consorcio de empresas fabricantes de instrumentos electrónicos para mejorar la norma IEEE 488.2 dando como resultado en 1990 la norma SCPI (**S**tandar **C**ommands for **P**rogrammable **I**nstruments) que define un conjunto de órdenes de programación idéntico para todos los instrumentos desarrollados de acuerdo a la misma. La Fig. 3 resume la relación entre las normas.

A pesar de las actualizaciones mencionadas, no todos los instrumentos cumplen con la norma SCPI, por lo que en el momento de efectuar su programación hay que recurrir al manual del fabricante para conocer la sintaxis de los comandos a utilizar.

## **ANEXO J**

### **Horno y controlador de horno**

## J Horno y controlador de horno

El horno esta compuesto por una aislación de fibra cerámica compactada de baja inercia térmica y recubierto internamente por ladrillo refractario. El gabinete esta construido de acero inoxidable.

La temperatura máxima del mismo son 1000 °C y su alimentación monofásica de 220 V. Las dimensiones externas del horno son: un ancho de 33 cm, una altura de 37 cm y una profundidad de 29 cm. Las dimensiones de calentamiento son las siguientes: un ancho de 23 cm, una altura de 29 cm y una profundidad de 18 cm. En la siguiente figura puede verse la parte interior del horno con la probeta instalada en la línea de carga:



**Figura J.1. Horno eléctrico**

A su vez el horno se encuentra comandado por un controlador marca Schaevitz MP-1000. La fuente de alimentación es de corriente alterna estándar (100 a 240VAC). Los datos de la salida pueden ser vistos en la exhibición del LCD.

En la siguiente foto puede verse el controlador del horno:



**Figura J.2. Controlador de horno**