

Método para calibrar levas tipo Andrade-Chalmers que aplican esfuerzo constante durante pruebas de termofluencia

A. MENDOZA, A. SALAZAR

*Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México
Apartado postal 20-364, 01000 México, D.F., México*

A. MORALES

*Instituto de Física, Laboratorio de Cuernavaca
Universidad Nacional Autónoma de México
Apartado postal 139-B, 62191 Cuernavaca, Mor., México*

Y

J. MONTEMAYOR-ALDRETE

*Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México
Apartado postal 20-364, 01000 México, D.F., México*

Recibido el 25 de marzo de 1993; aceptado el 7 de octubre de 1993

ABSTRACT. En este trabajo reportamos el análisis del comportamiento de una leva tipo Andrade-Chalmers, utilizada en una máquina para realizar pruebas mecánicas de esfuerzo constante. Desarrollamos un proceso de medición instrumentado mediante un LVDT y una celda de carga, para que mediante un mecanismo de simulación de la deformación de la probeta, se obtengan datos de la magnitud del esfuerzo en función de la rotación de la leva. Para agilizar el proceso de adquisición de los datos, las señales analógicas entregadas por estos transductores fueron digitalizadas para analizarlos con una microcomputadora. Por medio de un ajuste basado en el criterio de los mínimos cuadrados, se encontraron los parámetros de la leva. También se analizan las desviaciones del comportamiento de la leva con respecto a una leva ideal.

ABSTRACT. In this work we report the analysis of typical errors arising from an Andrade-Chalmers lever cam, used as machine for mechanical constant stress tests. A procedure to obtain the magnitude of the applied stress as a function of the rotation of the lever arm was developed by using a mechanism which allow us to simulate the sample deformation. The used physical mechanism involves LVDT and Load Cell transducers. The characteristic parameters of the lever arm were founded using a least squares criterion procedure on the digitalized values of transducers signals. The departure existing between an actual lever and ideal one was fully analyzed.

PACS: 06.70.Ep; 62.20.Sr; 62.20.Hg

1. INTRODUCCIÓN

En el estudio del comportamiento mecánico de los metales a temperaturas elevadas ($T \approx T_f/2$, en donde T_f = temperatura de fusión), tanto para fines básicos de la ciencia de

materiales como para aplicaciones tecnológicas, es necesario contar con datos experimentales a partir de ensayos de deformación plástica, en los que el esfuerzo y la temperatura de la muestra se mantienen constantes. Este tipo de ensayos mecánicos se conocen como pruebas de termofluencia a esfuerzo constante [1]. Los modelos microscópicos modernos de la termofluencia se basan en la suposición de que el esfuerzo efectivo σ_e es la fuerza impulsora del deslizamiento de dislocaciones y el esfuerzo interno σ_i lo es de su movimiento de ascenso durante la deformación plástica de los materiales cristalinos [17].

El esfuerzo efectivo se define en función del esfuerzo aplicado σ a través de la siguiente expresión:

$$\sigma_e = \sigma - \sigma_i, \quad (1)$$

donde σ_e y σ_i son dos cantidades importantes que intervienen en los modelos antes mencionados y pueden ser determinados a partir de pruebas de termofluencia a esfuerzo constante. Por otro lado, una de las aplicaciones tecnológicas más difundidas de las pruebas de termofluencia, tiene que ver con la determinación de la vida útil que resta a componentes metálicas de ciertos dispositivos de centrales generadoras de electricidad (nucleoeléctricas y termoeléctricas), por ejemplo: turbinas, intercambiadores de calor, enfriadores, etc. que son sometidos a presiones y temperaturas elevadas. Se sabe que la incertidumbre de la vida remanente [2], determinada a partir de las pruebas de termofluencia acelerada, realizadas en muestras extraídas de esos componentes, depende fuertemente del nivel de constancia del esfuerzo aplicado. Esto es particularmente crítico en el caso de pruebas de varios meses de duración, pues durante esos lapsos, el esfuerzo aplicado debe ser estable (véase, por ejemplo, el método de Larson-Miller [3]). Recientemente, nuevas técnicas que usan modelos semifenomenológicos para la determinación de vida residual, hacen uso también de los conceptos de esfuerzo efectivo y esfuerzo interno [4-5]. Estas técnicas han resultado ser de gran utilidad en el estudio de aceros que sufren transformaciones severas de la microestructura durante su vida útil [6]. Asimismo, se ha encontrado de manera cuantitativa la relación que existe entre la máxima incertidumbre $\Delta\sigma$ en el esfuerzo aplicado por la máquina sobre la muestra y la incertidumbre $\Delta\sigma_i$ que se introduce en el esfuerzo interno [7].

El primer diseño de una máquina capaz de mantener esfuerzo constante en una muestra que se deforma plásticamente se debe a Andrade y Chalmers [1]. Desde entonces se han desarrollado muchas variantes [8-11]; de hecho no son pocos los grupos de investigadores que han construido sus propias máquinas, dado que, por un lado, el diseño y construcción es relativamente simple y, por otro, no existen máquinas comerciales de termofluencia a esfuerzo constante que abarquen todo tipo de aplicaciones. Desde hace varios años, el grupo de metalurgia del Instituto de Física de la UNAM, ha diseñado y construido máquinas de este tipo, algunas de ellas se han utilizado en pruebas de termofluencia en compresión para el estudio de materiales frágiles como cerámicas [12], otras en pruebas de tensión que se aplican a metales [13]. El diseño de esta última máquina permite hacer pruebas de compresión o de tensión, para esto se usa el mismo montaje y sólo es necesario cambiar el sistema de aplicación de la carga y la forma de la probeta que se ensaya [13].

En cualquier máquina de termofluencia la calidad de los datos que se obtienen depende de la buena calibración de la misma. En este artículo nuestro principal interés es describir un procedimiento de calibración para máquinas del tipo Andrade-Chalmers, el cual

permite detectar, evaluar y corregir distintos tipos de errores que se generan durante la construcción y operación de estas máquinas.

2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS LEVAS TIPO ANDRADE-CHALMERS

Las levas de tipo Andrade-Chalmers se diseñan para deformar muestras de longitud inicial conocida L_0 , mediante la aplicación de un esfuerzo constante $\sigma = \frac{F}{A}$ producido por la acción de un brazo de palanca de longitud variable, el cual debe compensar automáticamente el efecto del cambio de la sección transversal de la probeta que se produce como consecuencia de su deformación.

El funcionamiento de este tipo de máquinas se basa en dos hechos experimentales ampliamente comprobados: En materiales policristalinos la deformación es homogénea y el volumen de la muestra se mantiene constante y no llega a cambiar en una parte en 10^4 , a excepción de la etapa terciaria que precede a la ruptura de la muestra donde ambos hechos dejan de ser válidos [14].

La ecuación que fundamenta el diseño de las levas de dichas máquinas describe la evolución de la fuerza aplicada en función de la longitud instantánea L de la muestra, y viene dada por

$$F = \frac{F_0}{1 + \frac{L - L_0}{L_0}} = \frac{K_0}{L_0 + \Delta L} = \frac{K_0}{L}, \quad (2)$$

donde L_0 es la longitud inicial de la probeta más corta que puede deformar una máquina de Andrade-Chalmers, y es un parámetro de diseño de la misma, F_0 es la fuerza aplicada al inicio de la prueba y K_0 es el esfuerzo aplicado σ multiplicado por el volumen V de la muestra, $K_0 = \sigma V$. La Ec. (2) es válida tanto para compresión como para tensión con el correspondiente cambio de signo en $\Delta l = L - L_0$. En adelante sólo trataremos el caso de tensión por ser el de mayor interés para analizar metales.

En principio, la Ec. (2) permite el trazado del perfil del brazo de palanca variable que consiga producir un esfuerzo constante a lo largo del recorrido angular de la leva, consecuente con la deformación de la probeta. El funcionamiento de la leva depende de la acción de la gravedad a través del peso W que cuelga de un fleje, que a su vez se adapta perfectamente al perfil de la leva y lo abandona como una tangente vertical (véase la Fig. 1), exactamente en un punto que garantiza que la longitud del brazo de palanca variable de la leva $r(\theta)$ es adecuada. Al otro lado del fulcro de la palanca, que configura a la leva de Andrade, está labrado un cilindro de radio R al cual se adapta otro fleje, que lo abandona tangencialmente y transmite la fuerza amplificada F a la probeta (véase la Fig. 1). La ganancia variable de la leva $G(\theta)$, para un ángulo de giro θ , está dada por el cociente

$$G(\theta) = \frac{F}{W} = \frac{r(\theta)}{R}, \quad (3)$$

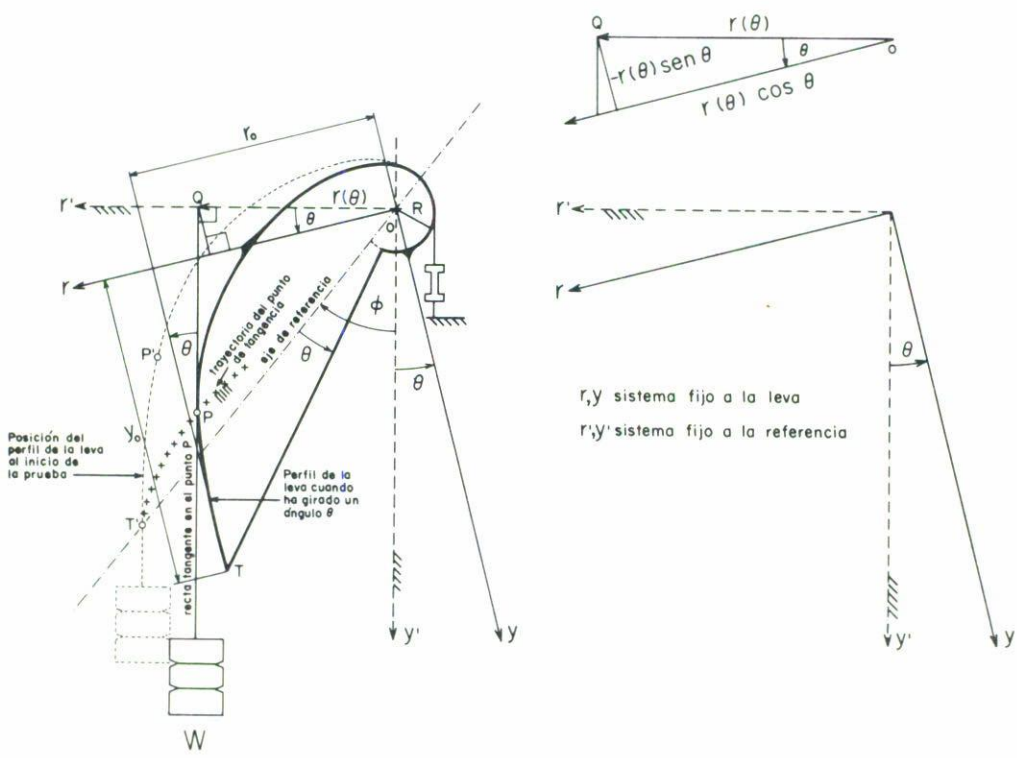


FIGURA 1. Leva del tipo Andrade-Chalmers: θ es el ángulo de rotación de la leva, ϕ es el ángulo que hace el eje de referencia con la vertical, (y, r) sistema de coordenadas fijo a la leva, (y', r') sistema de coordenadas fijo a la referencia. Al girar la leva un ángulo θ el punto P se traslada a P' , donde es punto de tangencia vertical, y el punto T que era punto de tangencia vertical, se traslada a T' .

en donde θ es el ángulo que ha girado la leva desde su posición inicial en la cual el brazo de palanca era $r(\theta) = r(0) \equiv r_0$ hasta su posición final $r(\theta)$ (véase la Fig. 1).

Es inmediato que el valor constante del esfuerzo σ aplicado por dicha máquina puede expresarse como

$$\sigma = \frac{F(\theta)}{A(\theta)} = \frac{WG(\theta)}{A(\theta)} = \text{cte.} \tag{4}$$

donde $F(\theta)$ es la fuerza que actúa sobre la muestra cuando el brazo de palanca variable ha girado un ángulo θ , la longitud de la muestra ha aumentado en $\Delta L(\theta) = R\theta$ y por tanto la muestra ha disminuido su área transversal hasta alcanzar un valor $A(\theta) = \frac{A_0 L_0}{L(\theta)}$, en donde $L(\theta) = L_0 + R\theta$ es la longitud de la probeta después de haber girado la leva un ángulo θ , y A_0 es el área inicial de la sección de la probeta y L_0 su longitud inicial (para $\theta = 0$).

Con el uso de la Ec. (3) y lo antes mencionado, la expresión (2) puede reescribirse como

$$r(\theta) = \frac{r_0 L_0}{L_0 + R\theta} = \frac{r_0}{1 + \frac{R}{L_0}\theta} \tag{5}$$

La Ec. (5) describe a la proyección horizontal $r(\theta)$ del punto de tangencia del fleje, con la parte de la leva que configura al brazo de palanca variable, en términos del ángulo θ (véase la Fig. 1). Como la expresión (5) sólo impone condiciones en la proyección horizontal del perfil del contorno de la leva, existen muchos contornos con diversas formas, con los mismos parámetros de diseño, r_0 , L_0 y R , que satisfacen esos requisitos. Sin embargo, con la condición adicional impuesta al fleje del que pende el peso W , para que abandone el contacto con la leva en forma de una recta tangente vertical, entonces el perfil de la leva queda unívocamente determinado. Así, las coordenadas (r_0, y_0) (véase la Fig. 1) del punto de tangencia del fleje con la leva, en el sitio de inicio de la prueba, para una probeta de la mínima longitud inicial L_0 , son tales que

$$\cot \phi = \frac{y_0}{r_0} = \frac{R}{L_0}. \quad (6)$$

La segunda igualdad de esta expresión se obtiene en el apéndice.

Sin embargo, aunque la leva de Andrade haya sido bien diseñada para proporcionar esfuerzo constante, existen diversos tipos de error que impiden obtener realmente un esfuerzo constante. Las cuatro principales fuentes de error son:

- a) Error en la determinación de la longitud inicial de la muestra.
- b) Errores en la medición del área de la sección transversal de la probeta A_0 y del peso suspendido W .
- c) Errores en los labrados del perfil geométrico del brazo de palanca de longitud variable y del cilindro que configura al brazo de longitud constante.
- d) Errores inducidos por la deformación elástica de la leva.

3. ANÁLISIS DE ERRORES EN EL ESFUERZO APLICADO PRODUCIDO POR LEVAS DEL TIPO ANDRADE-CHALMERS

Las Ecs. (3) y (4) permiten calcular el esfuerzo como

$$\sigma = \frac{Wr(\theta)}{A(\theta)R}. \quad (7)$$

De esta expresión se puede encontrar el comportamiento del esfuerzo en términos del error en la longitud inicial de la muestra δL_0 :

$$\sigma = \frac{Wr_0}{A_0R} \left[1 + \frac{|\delta L_0|/L_0}{1 + R\theta/L_0} \right]. \quad (8)$$

Al deformarse la muestra, el ángulo θ cambia conforme a la relación $\theta = \Delta L/R$; por esta razón la Ec. (8) muestra que δL_0 no sólo induce un error constante en el esfuerzo sino que también hace a éste una función dependiente del ángulo θ .

Si adicionalmente se consideran los errores en el área δA_0 y en el peso δW , entonces el esfuerzo previamente mencionado (8) será

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 + \frac{|\delta W|}{W} + \frac{|\delta A|}{A_0} \right] \left[1 + \frac{\delta L_0/L_0}{1 + R\theta/L_0} \right], \quad (9)$$

donde $\sigma_0 = W r_0/A_0 R$ es el valor nominal constante del esfuerzo.

Por otro lado, si consideramos que la leva es defectuosa, con un error cuadrático medio (RMS) en el brazo de palanca variable δr , y el correspondiente error en el brazo de palanca de longitud constante δR , se encuentra que el error RMS $\delta\sigma$ es

$$\delta\sigma_{\text{RMS}} = \sigma_0 \sqrt{\left(\frac{\delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\delta R}{R}\right)^2}. \quad (10)$$

Si además la leva está mal construida, por ejemplo el fulcro no queda localizado en el sitio correcto, o la leva se deforma elásticamente con respecto a la leva ideal, se produce una diferencia $\Delta r(\theta)$ entre las longitudes de los brazos de palanca de longitud variable ideal y el real, y una diferencia $\Delta R(\theta)$ entre las longitudes de los brazos de palanca constante ideal y real, etc; entonces la expresión, en criterio pesimista, para el error en el esfuerzo será

$$\Delta\sigma = \sigma_0 \left[\left| \frac{\Delta r(\theta)}{r} \right| + \left| \frac{\Delta R(\theta)}{R} \right| \right]. \quad (11)$$

4. INSTRUMENTACIÓN Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA HACER LA CALIBRACIÓN DE UNA LEVA DEL TIPO ANDRADE-CHALMERS

En el diagrama de la Fig. 2 se muestran esquemáticamente los principales elementos de una máquina del tipo Andrade-Chalmers, construida en el Instituto de Física de la UNAM, para el Instituto de Investigaciones Eléctricas de la CFE bajo contrato no. IIE/12/2078 01-06/P. Este tipo de máquina es similar a una diseñada en la Universidad de Stanford por W.A. Coghlan [4] (la descripción de su funcionamiento aparece en la Ref. [15]). La máquina fue entregada para su calibración y evaluación al grupo de metalurgia del Instituto de Física de la UNAM, por el Instituto de Investigaciones Eléctricas de la Comisión Federal de Electricidad.

Para poder eliminar en la leva las torcas indeseables relativas al fulcro, producidas por la localización excéntrica de su centro de masa, la dotamos con un par de contrapesos (4) desplazables sobre ejes mutuamente perpendiculares. Además, colocamos una plomada (21) sobre la estructura de soporte, con la intención de habilitarla como marco de referencia (véase la Fig. 2).

La calibración de la máquina consiste en estimar cuál será su comportamiento durante la realización de una prueba. Para ello hay que averiguar tanto el máximo porcentaje de

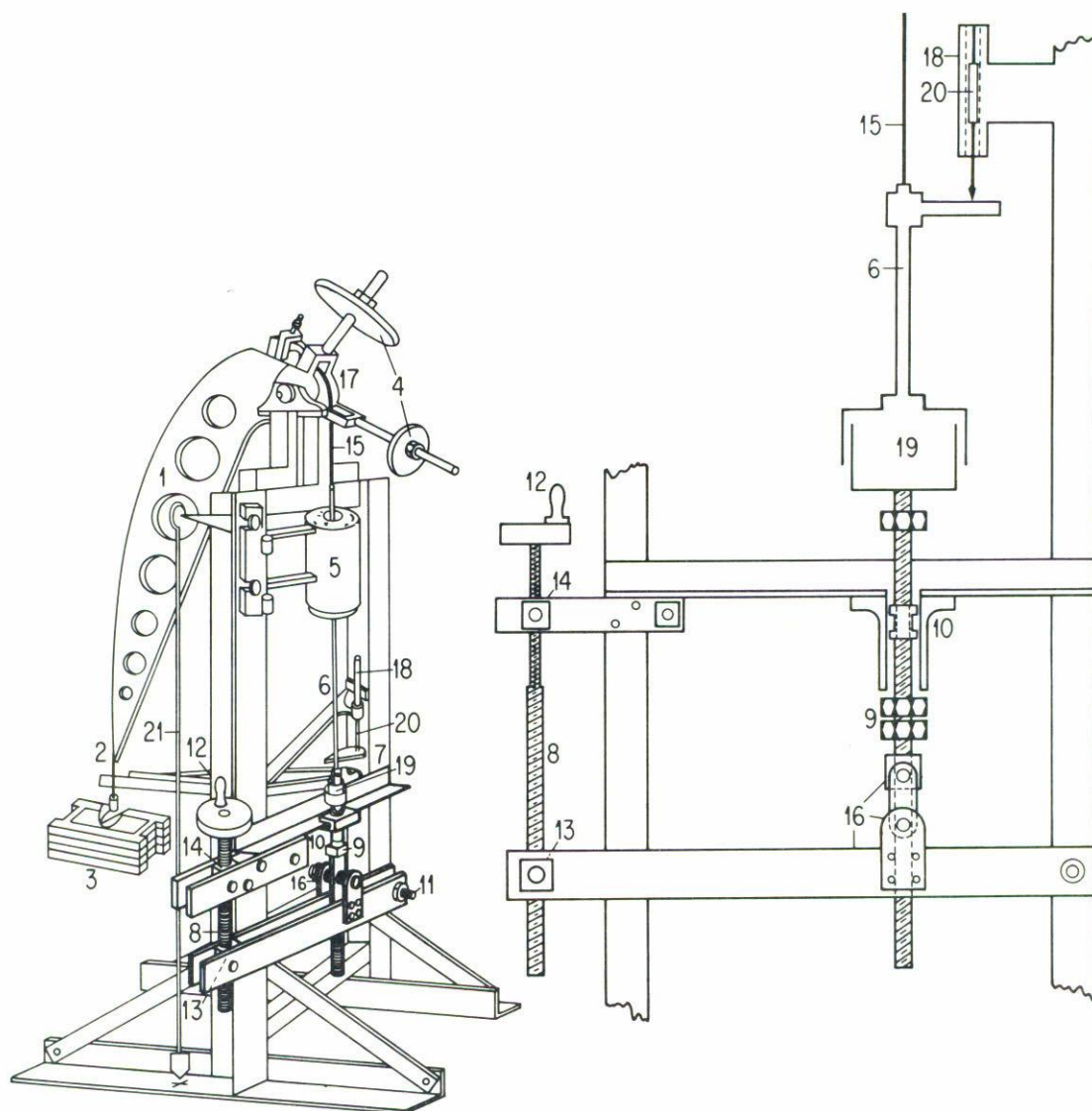


FIGURA 2. Máquina de esfuerzo constante tipo Andrade-Chalmers y mecanismo que permite simular de manera controlada la deformación de las muestras. (1) Perfil que configura al brazo de longitud variable de la leva del tipo Andrade-Chalmers; (2) fleje del que cuelga el peso (3); (4) contrapesos; (5) horno (opcional); (6) varilla; (7) estructura de la máquina; (8) tornillo diferencial; (9) barra; (10) cilindro que guía a la barra; (11) pivote de la palanca; (12) manivela; (13) y (14) tuercas; (15) fleje que transmite la fuerza a la probeta; (16) palanca y sistema de acoplamiento; (17) cilindro que configura al brazo de palanca de longitud constante; (18) transformador del LVDT; (19) celda de carga; (20) núcleo del LVDT; (21) plomada; (22) escala graduada.

deformación que puede conseguir a esfuerzo constante, como el error porcentual en el esfuerzo. Para lograr la calibración es imprescindible encontrar los valores de los principales

parámetros de la leva, los cuales son: la longitud inicial L_0 de la probeta más pequeña que puede deformar, y el valor de K_0 .

Para llevar a cabo el proceso de calibración se procedió a:

- 1) Dotar a la máquina de Andrade-Chalmers de un mecanismo con el cual, mediante el movimiento de un tornillo, se puede simular el proceso de estiramiento de la probeta sin producirle distorsiones en su desplazamiento (véase la Fig. 2). Este aditamento también es necesario para el uso normal de la máquina, pues proporciona un medio de anclaje ajustable a voluntad del usuario para la colocación inicial de la probeta, el cual resuelve el problema de no poder disponer de muestras de longitud idéntica.
- 2) Instrumentar a la máquina de Andrade-Chalmers con un medidor de fuerza, con capacidad de 250 Kgf. y calibrado hasta gramos (Schaevitz Engineering, modelo FTD500); un medidor de desplazamientos de la misma marca, modelo HDR1000 (LVDT) (el cual se calibró por métodos interferométricos) [16]; ambos colocados estratégicamente como se muestra en la Fig. 2. Esta instrumentación se complementó con la correspondiente interface convertidora de voltaje analógico a digital (adquisidor de datos Hewlett-Packard 3497A).
- 3) Finalmente, hacer la programación para el ajuste directo a la hipérbola propuesta (sin hacer cambios de variable que permitan el ajuste a una recta) y así estimar correctamente los parámetros L_0 y K_0 que mejor ajustan los datos a esa hipérbola.

Sabemos que la relación entre el estiramiento de la probeta y la fuerza que la deforma es de tipo hiperbólico [Ec. (2)]. Por lo tanto, después de haber construido la leva, ésta debe comportarse en forma parecida a lo propuesto en la Ec. (2). En consecuencia, para la calibración de la máquina, proponemos encontrar la hipérbola que mejor se ajuste, con el criterio de los mínimos cuadrados, a los datos experimentales de fuerza y deformación obtenidos de la exploración de la leva, mediante el mecanismo antes descrito.

La exploración de la leva, consiste en obtener un juego de datos de fuerza y desplazamiento que permitan hacer la calibración. Esto se consigue mediante el movimiento de la manivela (12) (véase la Fig. 2) del tornillo diferencial (8), el cual se enrosca simultáneamente en las dos tuercas (13) y (14). Dado que éstas tienen distinto paso se produce una separación creciente entre ambas. Dicha separación, mediante la palanca y su acoplamiento (16) da lugar al desplazamiento de la barra (9), que simula la deformación de la muestra y jala a la varilla (6), que a su vez mueve al fleje (15) enrollado en el cilindro de radio constante R (17), lo cual obliga el giro de la leva y por lo tanto disminuye la longitud del brazo de palanca del que se desprende el otro fleje (2), del cual cuelga verticalmente el peso W (3). Ya que el núcleo del LVDT (20) está suspendido de la varilla (6) y el transformador (18) del mismo está sujeto a la estructura de la máquina (7), entonces el LVDT (20) mide el desplazamiento de la varilla correspondiente a la simulación de la deformación de una probeta ficticia. La celda de carga (19) está intercalada (en serie) entre la barra (9), y la varilla (6) sustituye a la probeta y por lo tanto mide la fuerza que sentiría esa probeta ficticia. Por la colocación estratégica del LVDT (20), éste mide el desplazamiento total de la varilla respecto a la estructura de la máquina, el cual incluye también la deformación de la celda de carga.

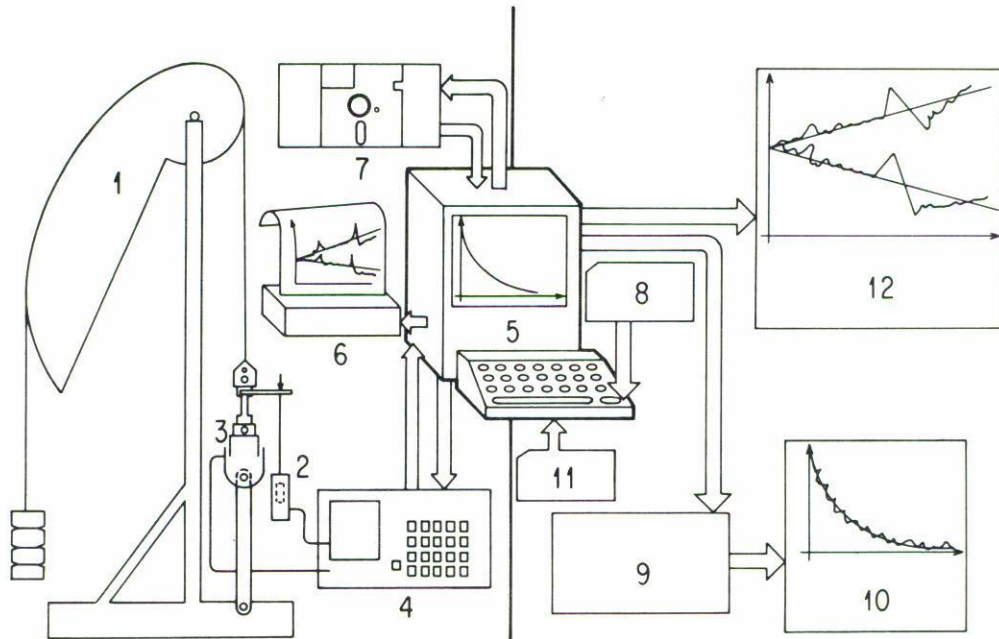


FIGURA 3. Esquema que representa a la instrumentación (lado izquierdo) y a la programación (lado derecho), del proceso de automatización de la calibración de la leva: (1) Leva tipo Andrade-Chalmers; (2) LVDT; (3) celda de carga; (4) digitalizador HP 3497a; (5) computadora; (6) impresora; (7) disco para el software y almacenamiento de datos; (8) introducción de los parámetros de calibración del LVDT y la celda de carga; (9) software para el ajuste a mínimos cuadrados; (10) resultados del ajuste; (11) instrucciones del operador para registrar los datos de fuerza y desplazamiento; (12) resultados del cálculo del esfuerzo.

El LVDT entrega un voltaje que es proporcional al desplazamiento de la varilla producido por el giro de la manivela; simultáneamente, la celda de carga entrega un voltaje proporcional a la fuerza. Mediante una orden del operador, la computadora registra estos datos que el convertidor analógico digital previamente ha transformado a valores numéricos. Este procedimiento se repite tantas veces como el operador desee y se obtiene un conjunto de parejas de valores que representan los puntos experimentales que serán usados en el proceso de ajuste a una hipérbola con el criterio de los mínimos cuadrados.

En la Fig. 3, presentamos un diagrama que muestra la instrumentación y la programación que se llevó a cabo para poder calibrar la leva de Andrade-Chalmers.

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1. Análisis

Del proceso de ajuste a la Ec. (2) de los datos experimentales antes mencionados, obtuvimos un valor para $L_0 = 30.29$ mm y un valor para $K_0 = 5.432 \times 10^3$ Kgf mm. De mediciones directas obtuvimos un valor para $r_0 = 482$ mm, un valor para $R = 60$ mm y

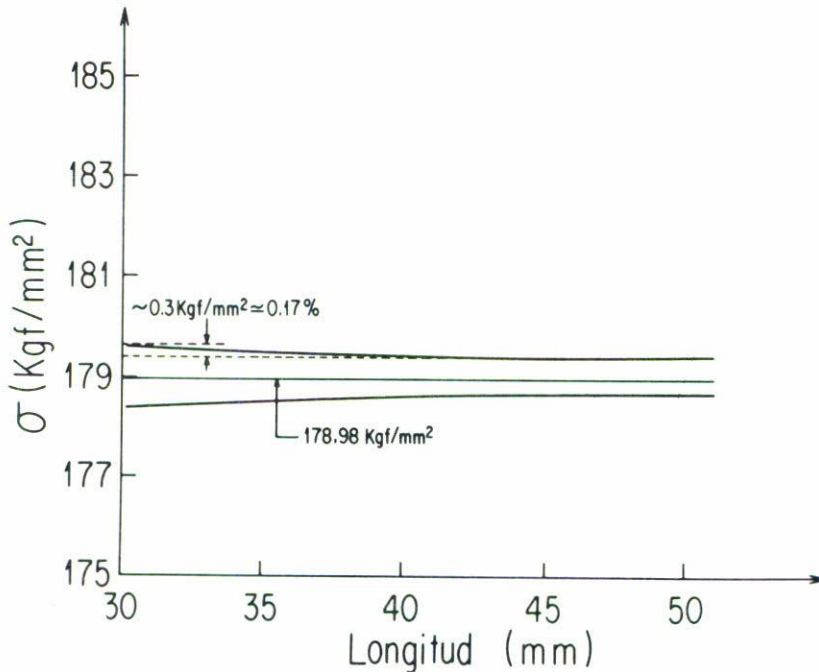


FIGURA 4. Efecto en el esfuerzo aplicado debido a un error típico en la determinación de la longitud de la muestra. Una curva corresponde a un error en L_0 de $+0.1 \text{ mm}$ y la otra a -0.1 mm .

un valor para $\phi = 24.25^\circ$. En la Fig. 4 mostramos el valor calculado del esfuerzo σ vs. la longitud L de la probeta.

El valor de $\sigma = F/A$ fue calculado con el valor de F dado por la fórmula (2) ya sustituidos los parámetros L_0 y K_0 que fueron previamente medidos, y con un valor arbitrario para el área inicial de la sección transversal de la probeta de 1 mm^2 . Los subsecuentes valores del área A para cada valor de L se obtuvieron de la hipótesis de que el volumen de la probeta permanece constante durante la deformación. Las dos curvas de esa figura fueron calculadas de la manera antes descrita y representan el comportamiento de la máquina cuando deforma probetas hipotéticas de longitud inicial errónea, distinta de L_0 . Ambas probetas tienen 1 mm^2 de área inicial de su sección transversal, pero una difiere de L_0 en 0.1 mm y la otra en -0.1 mm .

Con la introducción intencional de esos errores en L_0 , se puede mostrar el efecto producido en el valor de σ para las diferentes etapas de la deformación de las probetas. La recta entre las dos curvas de la Fig. 4 es el valor del esfuerzo nominal constante para una probeta con L_0 sin error, mientras que las curvas que han sido calculadas de la manera antes descrita, muestran que el esfuerzo varía monótonamente como función de la deformación y presentan una variación porcentual del esfuerzo aproximadamente de un 0.17% . Estos resultados y la forma de la curva, concuerdan con lo propuesto por la Ec. (8).

Por otra parte, para una probeta hipotética ideal y para esta leva donde $R = 60 \text{ mm}$ y $r_0 = 482 \text{ mm}$, la Ec. (10) predice que para obtener un error porcentual en el esfuerzo de tan sólo el 0.1% [18], la tolerancia máxima aceptable en el labrado de ambos brazos de palanca de la leva $\delta r = \delta R$, no debe exceder a 0.06 mm .

Además, si se desea trabajar con una máquina capaz de producir deformaciones con

errores porcentuales en el esfuerzo aplicado menores al 0.1% [18], entonces la Ec. (9) sugiere que las indeterminaciones en el peso aplicado δW y en el área de la sección transversal de la probeta δA , deben ser tales que arrojen un error porcentual total menor al 0.1%. Por lo tanto, si para $(\delta A/A_0 \times 100)\% < 0.1\%$, y una probeta de 1 mm^2 de área de su sección transversal, sólo se admite una tolerancia en el área $\delta A < 10^{-3} \text{ mm}^2$, entonces para una probeta de sección transversal cuadrada, se debe poder medir el lado con un $\delta l < 0.032 \text{ mm}$, para que no se pierda la exactitud proporcionada por tal máquina.

5.2. Resultados experimentales

En la Fig. 5 presentamos una gráfica con los resultados experimentales de esfuerzo *vs.* longitud de la probeta. Para obtener dicha gráfica, donde el eje vertical representa valores de esfuerzo, propusimos una probeta ficticia de 1 mm^2 de área de su sección transversal y de longitud inicial L_0 idéntica a la que se obtuvo del proceso de ajuste antes mencionado. La gráfica procede de los mismos puntos experimentales que se obtuvieron con el uso del mecanismo para la simulación del estiramiento de la probeta. Arbitrariamente unimos con una línea continua los sucesivos puntos de la gráfica. Notamos en la Fig. 5, que el máximo estiramiento porcentual que puede producir esta máquina en una probeta de 30.29 mm de longitud inicial, es aproximadamente del 66% y que si se hacen pruebas con probetas de mayor longitud inicial, entonces ese porcentaje de deformación se reduce. También se observa que la mayoría de los puntos de la gráfica caen sobre una curva serpenteante que puede envolverse en una banda de aproximadamente 0.39 Kgf/mm^2 de ancho, la cual se extiende con una tendencia creciente por casi todo el recorrido de la prueba y se interrumpe en un punto que corresponde a una longitud de la probeta deformada de 46.7 mm, en donde el valor del esfuerzo cae aproximadamente un 1.48% con respecto al esfuerzo promedio de 178.98 Kgf/mm^2 , para luego retomar la misma tendencia creciente.

Para poder comparar los errores que esta máquina produce en el esfuerzo, con los que resulten de usar probetas cuya área de su sección transversal se suponga de 1 mm^2 y esté mal determinada, con errores de $\pm 10^{-2} \text{ mm}^2$, en la Fig. 6 presentamos dos curvas de esfuerzo *vs.* longitud de la probeta. Observamos que el esfuerzo nominal es de 178.98 Kgf/mm^2 y que el esfuerzo promedio de cada una de esas curvas, representados por sendas rectas horizontales, se separa del esfuerzo nominal un 1.1% como consecuencia de los errores en las áreas de las probetas antes mencionados, mientras que durante el tramo de deformación con esfuerzo de tendencia creciente, que produce esta máquina, el incremento del esfuerzo es de $\Delta\sigma = 2.04 \text{ Kgf/mm}^2$, correspondiente a un 1.14% del esfuerzo nominal, y el tamaño de la discontinuidad en el esfuerzo que también produce esta máquina, es de aproximadamente 2.65 Kgf/mm^2 , que corresponde a un 1.48% respecto al esfuerzo nominal.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Si ignoramos el defecto accidental en el labrado de la leva, el cual produce una caída del esfuerzo de aproximadamente el 1.48%, resulta que el ancho de 0.195 Kgf/mm^2 de la semi-banda dentro de la cual caen la mayoría de los puntos experimentales (que corresponden

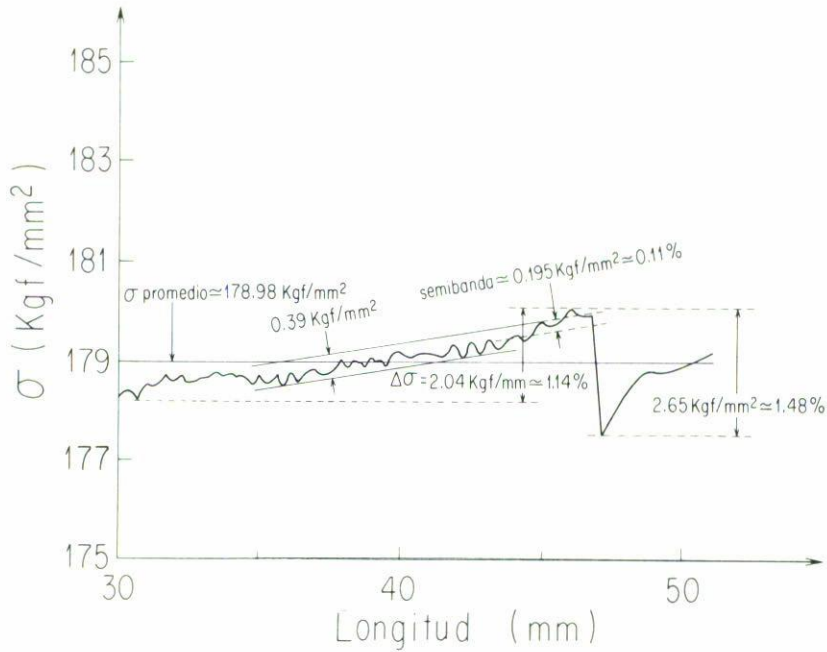


FIGURA 5. Esfuerzo aplicado en una muestra ideal, producido por la leva de tipo Andrade-Chalmers analizada en este trabajo. La banda trazada, engloba en forma aproximada las oscilaciones aleatorias del esfuerzo.

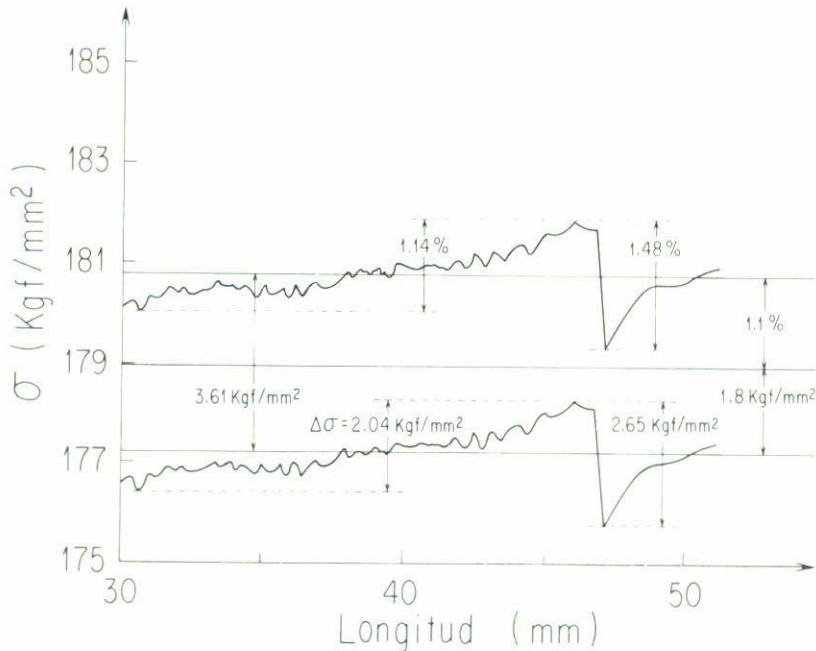


FIGURA 6. Comparación entre los diferentes efectos en el esfuerzo, que producen los errores en la probeta y en la leva tipo Andrade-Chalmers.

a una indeterminación porcentual en el esfuerzo del orden del 0.11% respecto al esfuerzo promedio), puede atribuirse a imprecisiones del labrado de los brazos de palanca de la leva

con errores cuadráticos medios $\delta r = \delta R = 0.065$ mm, según se calcula aproximadamente con la Ec. (10), con $r = r_0 = 482$ mm y $R = 60$ mm. Este resultado coincide con la precisión reportada en la literatura [18].

Ya que la máquina de Andrade-Chalmers sólo puede aplicar esfuerzo constante si la probeta es de la longitud inicial adecuada, es claro que al desconocer el verdadero valor de la longitud inicial de la probeta (la forma de la probeta dificulta la medición de sus dimensiones y por eso la “zona de deformación” no resulta bien definida), ésta puede resultar mal colocada para su deformación en la máquina, con la leva girada a un ángulo que no corresponda al de la verdadera longitud inicial de la probeta, lo cual obliga a que la máquina trabaje para deformar a una probeta de longitud inicial L_0 , cuando su verdadera longitud es $L_0 + \delta L_0$ (o $L_0 - \delta L_0$ según sea el caso). Esta forma de trabajar de la máquina de Andrade-Chalmers, resulta ser muy poco adaptable y realmente la limita a no poder garantizar que la deformación de la probeta se realice a esfuerzo constante. Como expresa la Ec. (8) y se observa en la Fig. 4, el esfuerzo en términos de la deformación resulta monótonamente variable.

Como la exploración de la máquina se realizó sin el uso de una probeta real y en su lugar se procedió a simular mecánicamente el efecto de deformación de una probeta ideal perfecta, la tendencia creciente del esfuerzo que proporciona la máquina (véase la Fig. 5), no puede explicarse atribuyéndole un error a la longitud inicial de la probeta [Ec. (8)]. Por lo tanto, esta tendencia monótona creciente del esfuerzo, es consecuencia de un defecto de la leva. La Ec. (11), permite la explicación de esta tendencia mediante dos mecanismos. Un mecanismo consiste en la deformación elástica de la leva en su porción correspondiente al brazo de palanca de longitud variable, pues resulta que esa deformación es máxima al inicio de la prueba y acorta su longitud inicial efectiva; pero, conforme la prueba evoluciona, la deformación disminuye y se produce el efecto de tendencia creciente en el esfuerzo. Para la variación de 1.14% en el esfuerzo, la Ec. (11) requiere que la deformación elástica del brazo de palanca sea aproximadamente $\Delta r \simeq 5.5$ mm, la cual es muy grande para que pueda ocurrir en esta leva de aluminio, considerándola como una viga en voladizo, de 482 mm de largo, con un ancho en el empotramiento de 120 mm ($2R$) y un espesor de 25.4 mm, a la que se aplica un peso de 22.27 Kgf en su extremo libre. El segundo mecanismo consiste en que el eje de giro de la leva no coincida con el centro del círculo que configura al brazo de palanca de longitud constante R ; si el corrimiento del eje es en tal dirección que al inicio de la prueba alargue la longitud efectiva de ese brazo de palanca, entonces la propia evolución del experimento producirá un giro de la leva alrededor del eje excéntrico, lo cual causará el paulatino acortamiento de la longitud efectiva de ese brazo de palanca de “longitud fija” (R), acompañado de un alargamiento, del mismo tamaño, en la longitud efectiva del brazo de palanca de longitud variable (r) de la leva, que explica la tendencia creciente del esfuerzo. Para una excentricidad de por lo menos $|\Delta r| = |\Delta R| \simeq 0.62$ mm, la Ec. (11) explica la variación de 1.14% de la tendencia creciente del esfuerzo.

Un tercer mecanismo que explica la tendencia creciente del esfuerzo que produce esta leva, consiste en la deformación elástica del tramo del fleje que transmite la fuerza a la probeta; sin embargo, para conseguir un 1.14% de variación del esfuerzo, este fleje de acero de 25 mm de ancho, 100 mm de largo y 0.5 mm de espesor, requiere una deformación

elástica de aproximadamente 1.1 mm, que no se puede conseguir con la aplicación de la fuerza de 178.98 Kgf.

Una combinación de estos tres mecanismos que producen variación en el esfuerzo, siempre estará presente durante el trabajo de la leva; el primero y el tercero deben minimizarse cuando se hace el diseño de la leva y para el segundo se debe proveer a la leva con algún instrumento que permita la reubicación del eje de giro que corrija el defecto de excentricidad.

En contraste con la leva de Andrade-Chalmers [1], diseñada para ser construida por secciones, la leva que analizamos fue construida "monolíticamente", lo cual impidió un proceso de ajuste durante el armado y calibración que hubiese permitido la corrección de muchos de sus defectos.

Dado que esta leva, produce errores porcentuales en el esfuerzo mayores del 1%, y en la literatura se reportan máquinas que producen errores porcentuales en el esfuerzo del orden del 0.1% [18], concluimos que esta leva no es apta para los actuales procesos de investigación.

Por otro lado, como se expresa en la Ec. (8), el hecho de que la máquina de Andrade-Chalmers no aplique un esfuerzo constante para deformar a las probetas, es consecuencia del procedimiento de control de la fuerza que se basa en la detección de la longitud de la probeta y de la transmisión de esta información por la mediación de un fleje, las mordazas y varias piezas de acoplamiento. Para producir el giro de la leva, se debe conocer la verdadera longitud actual de la probeta y, sin embargo, esta información es transmitida por el mismo conducto (fleje, mordazas y piezas de acoplamiento), que transmite la fuerza a la probeta. La doble función que tienen que realizar estas componentes de la máquina, las obliga a tener desempeños contradictorios; por un lado, el fleje debe ser capaz de deformarse para ajustarse al contorno circular de la leva y, por otro lado, debe ser indeformable elásticamente, pues su deformación también es información que compete con la información de la deformación de la probeta, necesaria para producir el giro de la leva; asimismo, las mordazas y las piezas de acoplamiento se deben poder acomodar y ajustar sin producir ningún cambio en sus dimensiones, pues esto también es información que compete con la información de la longitud de la probeta. Estas piezas difícilmente pueden transmitir sin error la información de la longitud de la probeta y simultáneamente transmitir toda la fuerza que se usa para deformarla.

Cualquier intento de compensar estos efectos, mediante el rediseño del perfil de la leva que considere estas deformaciones, limita el uso de la máquina no sólo a tener que deformar probetas de una longitud inicial mínima dada L_0 (puede deformar probetas más largas, pero se reduce la longitud de la deformación posible), sino también a aplicar un único peso W , precisamente el peso W que haya sido considerado en el rediseño de la leva que compense las deformaciones de las piezas que transmiten la fuerza a la probeta.

La discusión anterior sugiere que para conseguir deformar probetas aplicándoles un esfuerzo casi constante, con errores porcentuales en el esfuerzo menores al 0.1% [18] y que para ello se usen máquinas cuyo funcionamiento se base en el hecho experimental de la constancia del volumen de la probeta durante la deformación, no debe transmitirse la información requerida para controlar la fuerza aplicada a la probeta por el mismo medio que transmite la fuerza. En este sentido, conviene intentar el diseño de máquinas que utilicen los modernos instrumentos de medición de desplazamiento y de fuerza, como lo son

los LVDT y las celdas de carga, las cuales, con el uso de servomecanismos electromecánicos, producirán la carga acorde con el estiramiento medido mediante el uso de extensómetros colocados adecuadamente en la “zona de deformación” de la probeta.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Eligio Orozco del Instituto de Física, UNAM y al Fís. Fernando Reyes del Instituto de Investigaciones Eléctricas de la CFE, por las facilidades brindadas para la realización del presente trabajo, asimismo el apoyo técnico del Ing. L. Bucio, y de los técnicos A. Osornio y M. Bustos.

APÉNDICE

Para obtener la ecuación del perfil de la leva, activada por un peso que pende de un fleje que abandona a la leva en forma de una recta tangente vertical, es necesario encontrar las ecuaciones de las rectas tangentes al contorno de la leva. Claramente, como se ve en la Fig. 1, la pendiente de la recta tangente a la leva en el punto P es

$$m = \tan \theta = \frac{dr}{dy}, \quad (\text{A1})$$

y como las coordenadas del punto $Q(y, r)$ son $Q(-r(\theta) \text{ sen } \theta, r(\theta) \text{ cos } \theta)$, la ecuación de la recta tangente es

$$r - r(\theta) \text{ cos } \theta = m [y - (-r(\theta) \text{ sen } \theta)]. \quad (\text{A2})$$

Con $r(\theta)$ se denota la longitud del brazo de palanca variable utilizada en la fórmula (3), mientras que r es una de las coordenadas del sistema fijo a la leva.

Si sustituimos el valor de $m = \tan \theta = \frac{\text{sen } \theta}{\text{cos } \theta}$ y reordenamos, tenemos

$$r(\theta) = r \text{ cos } \theta - y \text{ sen } \theta; \quad (\text{A3})$$

mediante la derivación con respecto a θ obtenemos la segunda condición

$$\frac{dr(\theta)}{d\theta} = -r \text{ sen } \theta - y \text{ cos } \theta. \quad (\text{A4})$$

De las expresiones (A3) y (A4), y el uso de la regla de Kramer, obtenemos las ecuaciones paramétricas del contorno de una leva que en general funcionará por el mecanismo de desenrollar un fleje que abandona el contacto con la leva en forma de una tangente vertical:

$$r = r(\theta) \text{ cos } \theta - \frac{dr(\theta)}{d\theta} \text{ sen } \theta, \quad (\text{A5})$$

$$y = -\frac{dr(\theta)}{d\theta} \text{ cos } \theta - r(\theta) \text{ sen } \theta. \quad (\text{A6})$$

Por lo tanto, para $\theta = 0$,

$$r = r(\theta)\Big|_{\theta=0} \equiv r_0, \quad (\text{A7})$$

$$y = - \frac{dr(\theta)}{d\theta}\Big|_{\theta=0} \equiv y_0. \quad (\text{A8})$$

Como $\cot \phi = \frac{y_0}{r_0}$ y para el caso particular de la leva de Andrade-Chalmers para la cual $r(\theta) = r_0 / (1 + \frac{R_0}{L_0} \theta)$ [véase la Ec. (5)] entonces

$$\frac{dr(\theta)}{d\theta}\Big|_{\theta=0} = - \left(\frac{R_0}{L_0} \right) \frac{r_0}{\left(1 + \frac{R_0}{L_0} \theta \right)^2} \Big|_{\theta=0} = - \frac{R_0 r_0}{L_0}. \quad (\text{A9})$$

De esta última ecuación y de (A8) se obtiene

$$\cot \phi = \frac{y_0}{r_0} = - \frac{\frac{R_0 r_0}{L_0}}{r_0} = - \frac{R_0}{L_0}. \quad (\text{A10})$$

REFERENCIAS

1. E.N. de C. Andrade and B. Chalmers, *Proc. Roy. Soc.* **A138** (1932) 348.
2. F. Garofalo, *Fundamentals of Creep and Creep Rupture in Metals*, McMillan, New York (1965).
3. F.R. Larson and J. Miller, "A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", *Trans. A.S.M.E.* **174** (1952).
4. W.J. Evans and G.F. Harrison, *Met. Sci.* **10** (1976) 307.
5. D.A. Miller, *Mater. Sci. Eng.* **54** (1982) 169.
6. R. Singhand and S. Banerjee, *Mater. Sci. Eng.* **A132** (1991) 203.
7. J.A. Montemayor-Aldrete, A. Mendoza and E. Orozco, *Mater. Sci. Eng.* **A160** (1993) 71.
8. L.M.T. Hopkin, *Proc. Phys. Soc.* **B63** (1950) 346.
9. A.A. Solomon, *Rev. Sci. Instr.* **40** (1969) 1025.
10. W.A. Coghlan, Tesis Doctoral, Stanford University (1969).
11. R.A. Amaral Menezes, Tesis Doctoral, Stanford University (1972).
12. R. Gómez-Ramírez and J.A. Montemayor-Aldrete, *Rev. Mex. Fís.* **24** (1975) 83. (*Suplemento de Física Aplicada*).
13. E. Orozco, R. Huacuja, R. Gómez-Ramírez y S. Rodríguez, *Bol. No. 4, Soc. Mex. Fís.*, XX Congreso Nacional de Investigación en Física. Acapulco, Gro. (Nov. 1977) p. 258.
14. J. Friedel, *Dislocations*, Pergamon Press, Oxford (1964).
15. J. Fuentes Maya, J. Ramírez Berman y L. Martínez-Gómez, *Instrumentación y Desarrollo I*, Núm. 3, (1983).
16. A. Mendoza, E. Orozco, A. Morales y L. Gutiérrez, *Meas. Sci. Technol.* **4** (1993) 378.
17. W.D. Nix and C.R. Barret, *Trans. A.S.M.* **61** (1968) 695.
18. T. Hostinsky and J. Čadek, *Journal of Testing and Evaluation, JTEVA*, **4** (1976) 26.