

## Gráficos para el cálculo de líneas de transmisión aéreas

Los gráficos que presentaremos en el curso del presente estudio, tienen por objeto proporcionar al calculista de líneas de transmisión, métodos sencillos y rápidos para el cómputo de las flechas y tensiones del conductor.

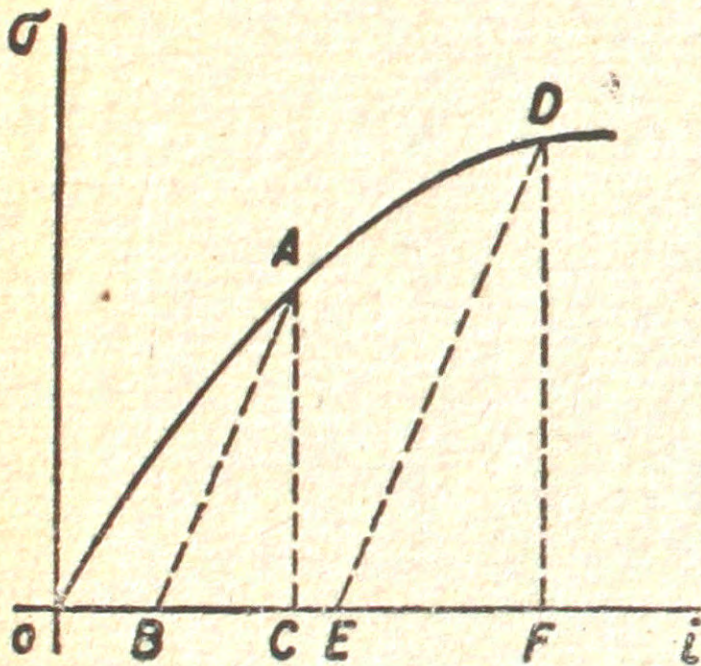


FIG. 1

El método que expondremos es válido para apoyos a nivel y para conductores homogéneos.

Hemos construido dos tipos de gráficos. El que llamaremos N.º 1 se emplea para cálculo de las condiciones  *finales*  (1) y está construido con las constantes correspondientes al cobre duro; puede sin embargo, como demostraremos más adelante, emplearse para cualquier otro material. El gráfico N.º 2 se emplea para el cálculo de las condiciones  *iniciales*  o de  *colocación*  (2) y es válido sólo para el cobre duro.

1.  *Características del material del conductor.* —El peso por unidad de longitud y

las dimensiones geométricas de la sección transversal, se supondrán constantes.

Como dijimos antes, el método es válido para materiales homogéneos, entendiéndose por tales a los materiales cuya curva tensión-deformación es del tipo indicado en Fig. 1.

Materiales tales como el cable de aluminio reforzado con acero (ACSR) se consideran heterogéneos, pues su curva de deformación no es del tipo indicada en Fig. 1. Queda en cambio incluido el conductor de cobre y acero soldados. ("Copperweld").

En la mayoría de los casos, sin embargo, es posible trabajar con conductores heterogéneos, como si se tratara de conductores homogéneos, empleando los módulos de elasticidad, y coeficientes de dilatación combinados que tomen en cuenta las proporciones en que se encuentran en el conductor los diversos materiales.

(1) Condiciones  *finales*  son aquellas en que se encuentra el conductor después que ha soportado previamente una tensión correspondiente a la sollicitación más desfavorable aceptada por un tiempo no inferior a una hora.

(2) Condiciones  *iniciales*  son aquellas que se producen en el conductor por primera vez.



*Tensiones y deformaciones.*—Con referencia a Fig. 1, observamos lo siguiente: si se somete el material a tensiones crecientes, su deformación queda dada para cada valor de la fatiga, por la abcisa del punto correspondiente de la curva  $OA$ , por ej.  $OC$  es la deformación correspondiente a la fatiga  $CA$ . Si a partir de  $A$  disminuimos la fatiga, la deformación sigue la ley  $AB$ , de modo que para fatiga cero el material tendrá una deformación *permanente*  $OB$ . La deformación total  $OC$  se compondrá pues de una deformación permanente  $OB$  y de una deformación *elástica*  $BC$ . La deformación elástica  $BC$ , quedará dada por la fatiga  $CA$  y por la tangente del ángulo  $CBA$ . Se considerará para los efectos de los cálculos posteriores que la tangente del ángulo  $CBA$  es absolutamente constante para valores de la fatiga inferiores o a lo sumo iguales al 60% de la fatiga de ruptura. El valor de esta tangente se definirá como el módulo de elasticidad *final* del material ( $E$ ).

Si el conductor supuesto en el estado de sollicitación  $B$  (tensión cero y deformación  $OB$ ) es sometido nuevamente a tensiones crecientes, seguirá la ley  $BA$  para fatigas inferiores a las correspondientes al punto  $A$ . Si se sigue aumentando la fatiga las deformaciones seguirán la ley  $AD$ . Si a partir de este punto comenzamos a disminuir las fatigas, las deformaciones estarán dadas por la ley  $DE$ . La tangente del ángulo  $DEF$  es igual a  $E$ , que como hemos dicho, es constante, siempre que la fatiga correspondiente al punto  $D$  sea inferior al 60% de la fatiga de ruptura.

*Deformaciones por temperatura.*—Se supondrá que el coeficiente de dilatación lineal por temperatura (por °C) es constante para cualquier intervalo de temperatura.

2. *Notaciones y Definiciones.*—Emplearemos en el curso del presente estudio, las siguientes notaciones:

$E$  = módulo de elasticidad *final* del conductor. Se expresará en  $\text{Kg./mm}^2$ .

$\lambda$  = coeficiente de dilatación lineal por temperatura en  $\frac{\text{m}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

$p$  = peso del conductor en  $\text{Kg./m}$ .

$l$  = luz del tramo en m.

$S$  = sección del conductor en  $\text{mm}^2$ .

$m = \frac{pl}{S}$  = término de carga en  $\text{Kg./mm}^2$ .

$L$  = longitud del conductor en m.

$f$  = flecha del conductor en m.

$\theta$  = temperatura del conductor en °C.

$T$  = tensión en el apoyo en  $\text{Kg}$ .

$\sigma = \frac{T}{s}$  = fatiga en el apoyo en  $\text{Kg./mm}^2$ .

$H$  = tensión en el punto más bajo.

$\varphi = \frac{f}{l}$  = flecha relativa a la luz, en tanto por uno.

Si calculamos la tensión media  $T_m$  a lo largo del cable entre el punto más bajo del conductor y el apoyo, tenemos:

$$T_m = \frac{1}{L} \int_0^L T \, dL = \frac{1}{2} \left( H \frac{l}{L} + T \right)$$



La diferencia entre el largo  $L$  con tensión y el  $L_0$  sin tensión vale:

$$L - L_0 = \frac{T_m L}{ES} \quad (1)$$

o mejor:

$$\left(\frac{L}{l} - \frac{L_0}{l}\right) = \left(\frac{T_m}{pl}\right) \times \left(\frac{L}{l}\right) \times \left(\frac{pl}{ES}\right) \quad (2)$$

Llamaremos "factor de deformación"  $K$  (x) al término

$$K = \left(\frac{T_m}{pl}\right) \times \left(\frac{L}{l}\right) \quad (3)$$

El tercer factor de (2) es el "factor de alargamiento"  $\left(\frac{pl}{ES}\right)$  Introduciendo en (2) el factor  $K$  y el valor

$$m = \frac{pl}{S}$$

obtenemos:

$$\left(\frac{L}{l} - \frac{L_0}{l}\right) = \frac{1}{E} K m \quad (4)$$

3. *Exposición del método gráfico para condiciones finales (N1).*—Escribamos la ecuación (4) en las dos formas siguientes:

$$\frac{L}{l} - \frac{L_0}{l} = \frac{1}{E} K m \quad (5)$$

$$\frac{L}{l} - \frac{L_0}{l} = \frac{1}{E} \left(K \frac{m}{\sigma}\right) \sigma$$

No debemos olvidar que en nuestras ecuaciones  $\sigma$  representa la fatiga del conductor en el apoyo. La fatiga media, que es inferior a  $\sigma$ , está tomada en cuenta en el coeficiente  $K$ .

Es fácil transformar las ecuaciones clásicas de una catenaria de parámetro  $a$  y darles la forma siguiente:

$$\frac{L}{l} = 2 \left(\frac{a}{l}\right) \sinh \frac{1}{2\left(\frac{a}{l}\right)} \quad (6)$$

$$\frac{\sigma}{m} = \frac{a}{l} \cosh \frac{1}{2\left(\frac{a}{l}\right)} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{f}{l} = \left(\frac{a}{l}\right) \cosh \frac{1}{2\left(\frac{a}{l}\right)} - \frac{a}{l} = \frac{a}{l} \left[ \cosh \frac{1}{2\left(\frac{a}{l}\right)} - 1 \right] \quad (8)$$

(x) "Stretch factor" de las tablas de Martin.



Se ve que los términos,  $\left(\frac{L}{l}\right)$ ,  $\left(\frac{\sigma}{m}\right)$  y  $\left(\frac{L}{l}\right)$  son funciones sólo del parámetro relativo  $\left(\frac{a}{l}\right)$ . Por lo tanto, el factor de deformación es una función definida de la curva "catenaria" e independiente del tipo de conductor empleado.

Si  $L$  es el largo de conductor a la temperatura  $\theta$ , el largo  $L_0$  del conductor sin tensión, a esa misma temperatura será según (5):

$$\frac{L_0}{l} = \frac{L}{l} - \frac{1}{E} \left[ K \frac{m}{\sigma} \right] \sigma \quad (9)$$

El largo sin tensión a  $0^\circ \text{C}$ ,  $\left|\frac{L_0}{l}\right|_0$  quedará dado por:

$$\left|\frac{L_0}{l}\right|_0 = \frac{L_0}{l} (1 - \lambda \theta) \quad (10)$$

Introduciendo (9) en la ecuación (10) y haciendo las simplificaciones usuales en estos cálculos se llega a:

$$\left|\frac{L_0}{l}\right| = \frac{L}{l} - \frac{1}{E} \left[ K \frac{m}{\sigma} \right] \sigma - \lambda \theta \quad (11)$$

Puesto que  $\left|\frac{L_0}{l}\right|_0$  es un invariante puede escribirse, considerando dos estados 1 y 2, la relación siguiente en que los sub-índices indican el estado:

$$\frac{L_2}{l} - \frac{1}{E} \left[ K_2 \frac{m_2}{\sigma_2} \right] \sigma_2 - \lambda \theta_2 = \frac{L_1}{l} - \frac{1}{E} \left[ K_1 \frac{m_1}{\sigma_1} \right] \sigma_1 - \lambda \theta_1 \quad (12)$$

o bien:

$$\left(\frac{L_2}{l} - \frac{L_1}{l}\right) - \frac{1}{E} \left[ \left(K_2 \frac{m_2}{\sigma_2}\right) \sigma_2 - \left(K_1 \frac{m_1}{\sigma_1}\right) \sigma_1 \right] = \lambda \theta_2 - \lambda \theta_1 \quad (13)$$

$$= \lambda (A + \theta_2) - \lambda (A + \theta_1)$$

en que  $A$  es una constante que representa una temperatura origen cualquiera.

$$\text{Llamando:} \quad \left. \begin{aligned} A + \theta_2 &= \theta_2' \\ A + \theta_1 &= \theta_1' \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

tenemos:

$$\left(\frac{L_2}{l} - \frac{L_1}{l}\right) - \frac{1}{E} \left[ \left(K_2 \frac{m_2}{\sigma_2}\right) \sigma_2 - \left(K_1 \frac{m_1}{\sigma_1}\right) \sigma_1 \right] = \lambda (\theta_2' - \theta_1') \quad (15)$$

$$= \lambda (\theta_2 - \theta_1)$$

Simbólicamente podemos escribir (15) en la forma:

$$\left| \frac{L}{l} - \frac{1}{E} \left( K \frac{m}{\sigma} \right) \sigma \right|_1^2 = \lambda \left| \theta' \right|_1^2 = \lambda \left| \theta \right|_1^2 \quad (16)$$



$$\text{o igualmente: } \left| \left( \frac{L}{l} - 1 \right) - \frac{1}{E} \left( K \frac{m}{\sigma} \right) \sigma \right|_1^2 = \lambda \left| \theta' \right|_1^2 \quad (17)$$

La ecuación (17) representa simbólicamente la ecuación de los cambios de estado. Si suprimimos los índices en la ecuación (17) obtenemos:

$$\left( \frac{L}{l} - 1 \right) - \frac{1}{E} \left( K \frac{m}{\sigma} \right) \sigma = \lambda \theta' \quad (18)$$

En esta ecuación está basada la construcción del gráfico  $Nl$  para condiciones finales (que no toma en cuenta deformaciones permanentes).

Este gráfico, Fig. 2, está construido en un sistema de coordenadas octagonales ( $\theta^3, m$ ). En este sistema se han dibujado dos familias de curvas:

a) Curvas de flecha unitaria constante:

$$\varphi = \frac{f}{l} = \text{cte.}$$

b) Curvas de fatiga constante:

$$\sigma = \text{cte.}$$

Las dos familias de curvas obedecen a la misma ecuación (18). Por comodidad para el cálculo y la explicación daremos a la ecuación (18) una forma distinta para el cálculo de las familias de curvas de flecha constante.

La ecuación de las curvas de  $\varphi = C^{te}$ . es:

$$\left( \frac{L}{l} - 1 \right) - \frac{1}{E} K m = \lambda \theta' \quad (19)$$

Como lo hemos demostrado anteriormente, los elementos  $\frac{L}{l}$ ,  $K$  y  $\frac{f}{l}$  son funciones tales que basta el valor de uno de ellos para definir la curva de equilibrio; los puntos correspondientes a  $\varphi = C^{te}$  quedarán dados por las coordenadas  $m = \frac{pl}{S}$  y  $\theta'$  relacionadas linealmente por la ecuación (19).

Puesto que para  $\varphi = C^{te}$ , los valores

$$\left| \frac{L}{l} - 1 \right|_{\varphi = \text{cte.}} \quad \text{y} \quad \left| \frac{1}{E} K \frac{m}{\sigma} \right|_{\varphi = \text{cte.}}$$

son constantes, la ecuación (18) permite escribir:

$$- \left| \frac{1}{E} K \frac{m}{\sigma} \right|_{\varphi = \text{cte.}} \times d\sigma = \lambda d\theta' \quad (20)$$

que demuestra que los valores de  $\sigma$  son interpolables linealmente a lo largo de una recta  $\varphi = C^{te}$ . Esta valiosa propiedad permite la fácil construcción de la familia de las curvas  $\sigma = C^{te}$ .



Si en la ecuación (19) hacemos:

$$m = \frac{pl}{S} = 0$$

obtenemos:

$$\frac{L}{l} - 1 = \lambda \theta' \quad (21)$$

Esto nos dice que si el punto 1 de la Fig. 2 representa un cierto estado de sollicitación determinado por sus parámetros

$m = \frac{pl}{S}$  y  $\sigma$ , la

distancia OB representará el exceso del largo del cable con tensión a la temperatura considerada, sobre la luz, es decir,

$\frac{L}{l} - 1$ . Luego, el eje de las abcisas podrá acotarse también con valores del largo del cable asignando al origen O el valor 1 (Fig. 2).

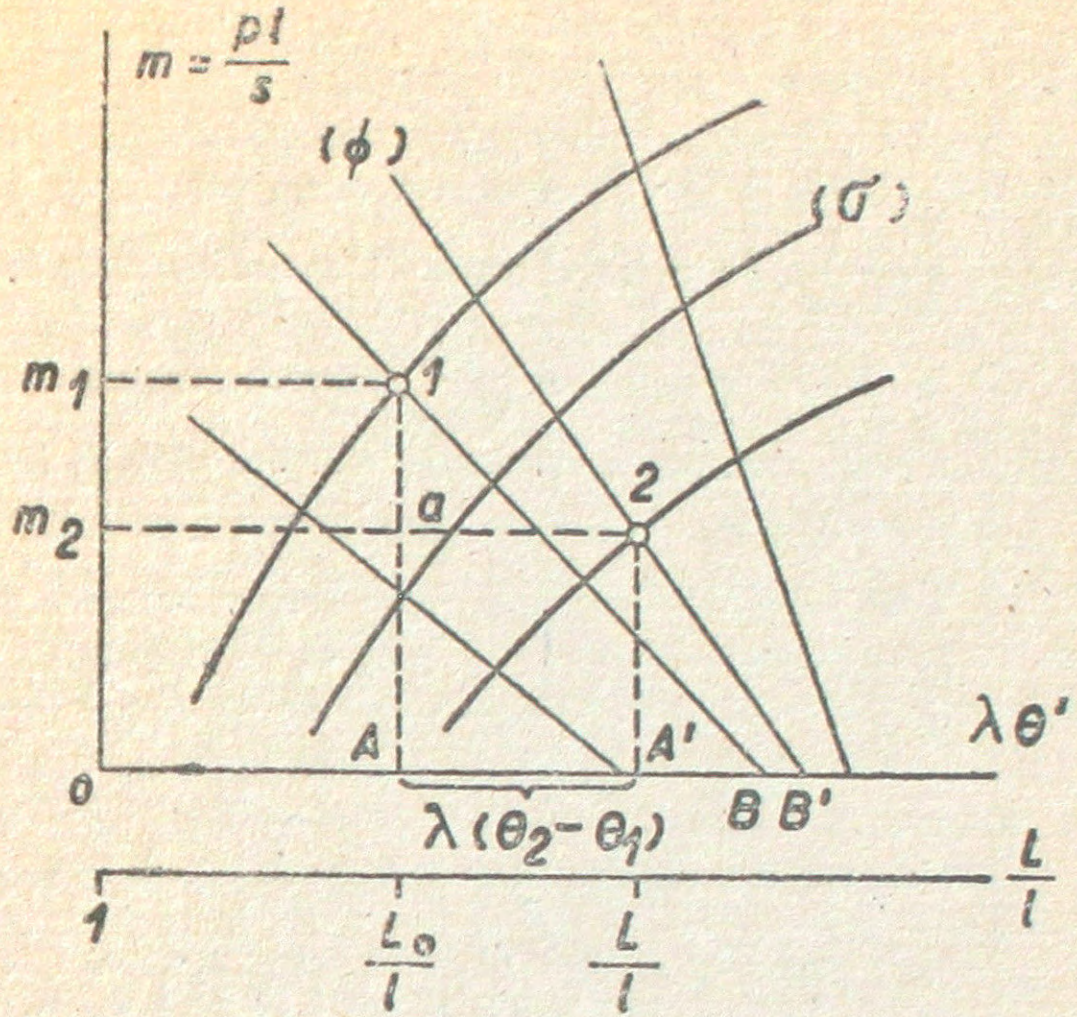


FIG. 2

Si observamos la ecuación (9) y la comparamos con la (18) podemos ver que:

$$\frac{L_0}{l} - 1 = \lambda \theta' \quad (22)$$

Es decir, que la distancia OA que vale  $\lambda \theta'$  representará en la escala de los largos, el exceso del largo del cable sin tensión a la temperatura considerada, sobre la luz.

Si el punto 2 de la Fig. representa otro estado de sollicitación, tendremos como antes que el punto A' transportado a la escala de los largos, representará el largo del cable sin tensión y a la nueva temperatura  $\theta_2'$ . Por lo tanto, la distancia AA' no es otra cosa que  $\lambda (\theta_2' - \theta_1')$  o el valor  $\lambda (\theta_2 - \theta_1)$  de la ecuación (15) En resumen, hemos demostrado que:

$$\left. \begin{aligned} OA' &= \left( \frac{L_2}{l} - 1 \right) - \frac{1}{E} \left( K_2 \frac{m^2}{\sigma_2} \right) \sigma_2 \\ OA &= \left( \frac{L_1}{l} - 1 \right) - \frac{1}{E} \left( K_1 \frac{m_1}{\sigma_1} \right) \sigma_1 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

y puesto que  $OA' - OA = AA' = \lambda (\theta_2 - \theta_1)$ , basta restar las ecuaciones (23) para obtener la operación expresada simbólicamente por la ecuación. (16).



*Modus operandi.*—De lo anterior fluye inmediatamente el modo de proceder para pasar de una condición a otra.

Sean 1 y 2 estas condiciones y supongamos que la condición 1 es la conocida. De la condición 2 sólo se conoce la carga por metro y por consiguiente el valor  $m_2 = \left(\frac{pl}{S}\right)_2$ . Se ubica el punto 1 como intersección de  $m_1 = \left(\frac{pl}{S}\right)_1$  y  $\sigma_1$  (o  $\varphi_1$ ). Sobre la recta  $m_2 = \left(\frac{pl}{S}\right)_2$  encontraremos un punto (2) tal que la distancia a 2 representa a la escala de temperaturas el intervalo  $(\theta_2 - \theta_1)$ .

Las curvas  $\sigma$  y  $\varphi$  que pasan por el punto (2) son los valores  $\sigma_2$  y  $\varphi_2$  buscados.

4. *Generalización del gráfico N1.*—Demostraremos que si el gráfico está construido para un cierto valor de  $E$  y  $\lambda$ , es decir, para un cierto material, es posible emplearlo para cualquier otro con valores de  $E$  y  $\lambda$  diferentes de los del gráfico.

Afectaremos el sub-índice  $G$  a las constantes con las cuales está construido el gráfico.

Las curvas trazadas en el gráfico, verifican la ecuación:

$$\left(\frac{L}{l} - 1\right) - \frac{1}{E_G} \left(K \frac{m}{\sigma}\right) \sigma = \lambda_G \theta \quad (24)$$

Sean ahora  $E_R$  y  $\lambda_R$  las constantes de otro material. Los valores de los parámetros para este material, los distinguiremos igualmente por el sub-índice  $R$ :  $\sigma_R$ ,  $m_R$ ,  $\theta_R$ ,  $\frac{L_R}{l}$  etc. Para este material podemos escribir:

$$\left(\frac{L_R}{l} - 1\right) - \frac{1}{E_R} \left(K_R \frac{m_R}{\sigma_R}\right) \sigma_R = \lambda_R \theta_R \quad (25)$$

La ecuación (25) se puede escribir en la siguiente forma:

$$\left(\frac{L_R}{l} - 1\right) - \frac{1}{E_G} \left[ K_R \frac{\left(\frac{E_G}{E_R} m_R\right)}{\left(\frac{E_G}{E_R} \sigma_R\right)} \right] \left(\frac{E_G}{E_R} \sigma_R\right) = \lambda_G \left(\frac{\lambda_R}{\lambda_G} \theta_R\right) \quad (26)$$

Introduzcamos los parámetros *ficticios*, siguientes:

$$m_F = \frac{E_G}{E_R} m_R \quad \sigma_F = \frac{E_G}{E_R} \sigma_R \quad \theta_F = \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \theta_R \quad (27)$$

Notemos además que  $K$ ,  $\frac{L}{l}$  y  $\varphi = \frac{f}{l}$  son funciones sólo de:

$$\frac{m}{\sigma} = \frac{pl}{T}, \text{ luego resulta:}$$

$$\frac{L_F}{l} = \frac{L_R}{l} = \frac{L}{l} \quad (28)$$



$$K_F = K_R = K$$

$$\varphi_F = \varphi_R = \Phi \tag{29}$$

La ecuación (26) la podemos por tanto escribir:

$$\left(\frac{L_F}{l} - 1\right) - \frac{1}{E_G} \left(K_F \frac{m_F}{\sigma_F}\right) \sigma_F = \lambda_G \Theta_F \tag{30}$$

Comparando (30) con (24) podemos afirmar que el gráfico N.º 1 permite calcular conductores con características ( $E_R, \lambda_R$ ) diferentes de las empleadas en el gráfico ( $E_G, \lambda_G$ ) siempre que los parámetros de entrada al gráfico sean los valores ficticios dados por las relaciones (27). Obsérvese además que el valor encontrado para la flecha ficticia es igual que el real.

Con el objeto de facilitar el cálculo de los parámetros ficticios y de los reales, daremos más adelante los coeficientes de reducción de acuerdo con el cuadro (31) para los conductores más comunes.

$$\left. \begin{aligned} m_F &= \frac{E_G}{E_R} m_R & m_R &= \frac{E_R}{E_G} m_F \\ \sigma_F &= \frac{E_G}{E_R} \sigma_R & \sigma_R &= \frac{E_R}{E_G} \sigma_F \\ \Theta_F &= \frac{R}{G} \Theta_R & \Theta_R &= \frac{G}{R} \Theta_F \\ \varphi_F &= \varphi_R & \varphi_R &= \varphi_F \end{aligned} \right\} \tag{31}$$

Las constantes con que está construido el gráfico son las que corresponden al cobre duro, por lo tanto:

$$E_G = 11,950 \text{ Kg/mm}^2 \qquad \lambda_G = 0.000017 \text{ m/m}^\circ\text{C}$$

Los valores de los coeficientes de reducción para varios materiales van en el cuadro siguiente:

| Material  | $E_R$               | $\lambda_R$ | $\frac{E_G}{E_R}$ | $\frac{\lambda_R}{\lambda_G}$ |
|---|---------------------|-------------|-------------------|-------------------------------|
|   | Kg./mm <sup>2</sup> | m/m C°      |                   |                               |
| Cables de cobre duro.....   | 11.950              | 0.000017    | 1.000             | 1.000                         |
| Cables de cobre medio duro.....                                       | 8.450               | 0.000017    | 1.415             | 1.000                         |
| Cables de cobre-acero soldados de 30% conductor (Copperweld 30%)..... | 16.200              | 0.000013    | 0.738             | 0.764                         |
| Cables de aluminio reforzados con acero (ACSR) Constr. 6/1.....       | 7.400               | 0.000019    | 1.615             | 1.117                         |
| Id. (ACSR) Constr. 12/7.....  | 10.550              | 0.0000153   | 1.132             | 0.900                         |



5. Gráfico N.º 2 para condiciones iniciales.—La ecuación (8):

$$\frac{L_o}{l} = \frac{L}{l} - \frac{1}{E} \left( K \frac{m}{\sigma} \right) \sigma \quad (8)$$

nos da el largo sin tensión de un conductor que tiene ya un módulo de elasticidad bien definido. Si en ambos miembros de (8) restamos el alargamiento permanente  $i$  correspondiente a la fatiga  $\sigma$ , obtenemos el largo sin tensión  $\frac{L_o'}{l}$  del conductor virgen:

$$\left( \frac{L_o}{l} \right)' = \frac{L}{l} - \frac{1}{E} \left( K \frac{m}{\sigma} \right) \sigma - i \quad (32)$$

El largo sin tensión del conductor virgen a 0 °C quedará dado por:

$$\left( \frac{L_o}{l} \right)'_o = \frac{L}{l} - \frac{1}{E} \left( K \frac{m}{\sigma} \right) \sigma - i - \lambda \theta \quad (33)$$

Considerando dos estados 1 y 2 podemos escribir la siguiente expresión simbólica que dice que el largo sin tensión y a 0°C del conductor virgen es el mismo, si se calcula a partir de cualquiera de las dos condiciones:

$$\left[ \left( \frac{L}{l} - 1 \right) - \frac{1}{E} \left( K \frac{m}{\sigma} \right) \sigma - i \right]_1^2 = \lambda \theta / l^2 \quad (34)$$

La ecuación en que está basado el gráfico N.º 2 para condiciones iniciales es la (34) suprimiendo los índices, es decir:

$$\left( \frac{L}{l} - 1 \right) - \frac{1}{E} \left( K \frac{m}{\sigma} \right) \sigma - i = \lambda \theta \quad (35)$$

Debido al término  $i$  que depende de la tensión, las curvas  $\emptyset = C^{te}$  ya no son rectas. Además, las fatigas no pueden interpolarse linealmente a lo largo de las curvas  $\emptyset = C^{te}$ . Para la construcción de este gráfico, la función que liga al alargamiento permanente  $i$  con la fatiga  $\sigma$  ha sido tomada de una curva típica de ensaye publicada por la "Copperweld Steel Co."

Como dijimos antes, este gráfico para condiciones iniciales no es válido sino para el material para el cual fué construído (cobre duro en nuestro caso).

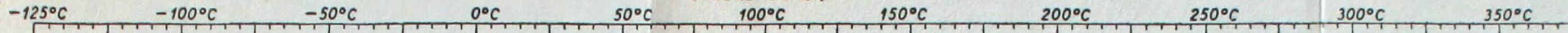
El modo de trabajar en el gráfico es absolutamente análogo al explicado para el N.º 1.

O. S. R. y C. H. V.



# CALCULO MECANICO DE CONDUCTORES. - CONDICIONES FINALES

(COBRE DURO)



NOTA: Para cálculo de conductores con constantes E y λ diferentes a las del cobre duro con que se ha construido este gráfico, debe entrarse al mismo con los parámetros ficticios (sub-índice F) calculados en función de los parámetros reales (sub-índice R) conforme con las relaciones siguientes:

$$\left(\frac{pl}{s}\right)_F = \left(\frac{E_0}{E_R}\right) \left(\frac{pl}{s}\right)_R \quad \left(\frac{pl}{s}\right)_F = \left(\frac{E_R}{E_0}\right) \left(\frac{pl}{s}\right)_R$$

$$\sigma_F = \left(\frac{E_0}{E_R}\right) \sigma_R \quad \sigma_R = \left(\frac{E_R}{E_0}\right) \sigma_F$$

$$\theta_F = \left(\frac{\lambda_R}{\lambda_0}\right) \theta_R \quad \theta_R = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_R}\right) \theta_F$$

$$\phi_F = \phi_R \quad \phi_R = \phi_F$$

En estas relaciones significa:  
 $E_R$  y  $\lambda_R$  módulo y coeficiente de dilatación reales del conductor  
 $E_0 = 11950 \text{ kg./mm}^2$  y  $\lambda_0 = 0.00017$ , módulo y coeficiente de dilatación con los cuales se ha construido el gráfico

Los coeficientes de reducción  $E_0/E_R$  y  $\lambda_0/\lambda_R$  se dan a continuación para algunos materiales

| MATERIAL  | $\frac{E_0}{E_R}$<br>kg./mm <sup>2</sup> | $\frac{\lambda_0}{\lambda_R}$<br>m./m°C | $\frac{E_0}{E_R}$ | $\frac{\lambda_0}{\lambda_R}$ |
|---|--|---|-------------------|-------------------------------|
| Cables de cobre duro 7 o 19 hebras                      | 11950                                    | 0.000017                                | 1.000             | 1.000                         |
| " " " 1/2 " 7 " 19 "                                    | 8450                                     | 0.000017                                | 1.415             | 1.000                         |
| " " cobre-acero soldado de 30% cond. ("copperweld" 30%) | 16200                                    | 0.000013                                | 0.738             | 0.764                         |
| " " aluminio reforzados (ACSR) constr. 6/1              | 7400                                     | 0.000019                                | 1.615             | 1.117                         |
| " " aluminio reforzados (ACSR) constr. 12/7             | 10550                                    | 0.0000153                               | 1.132             | 0.900                         |
| " " acero galvanizado                                   | 19000                                    | 0.000012                                | 0.630             | 0.706                         |

**EJEMPLOS:**

1) Conductor # 2AWG, cobre duro, tendido en un tramo de 150 m. de modo que a 15°C la fatiga es de 10 kg./mm<sup>2</sup>. Se pregunta el valor de la flecha y tensión para -10°C, viento de 40 kg./m<sup>2</sup> y 1/2" de hielo

Para 15°C sin viento  $\frac{pl}{s} = \frac{0.305 \times 150}{33.63} = 1.36$

$\sigma = 10 \text{ kg./mm}^2$  (Punto A)

Para -10°C, viento de 40 kg./m<sup>2</sup> y 1/2" de hielo

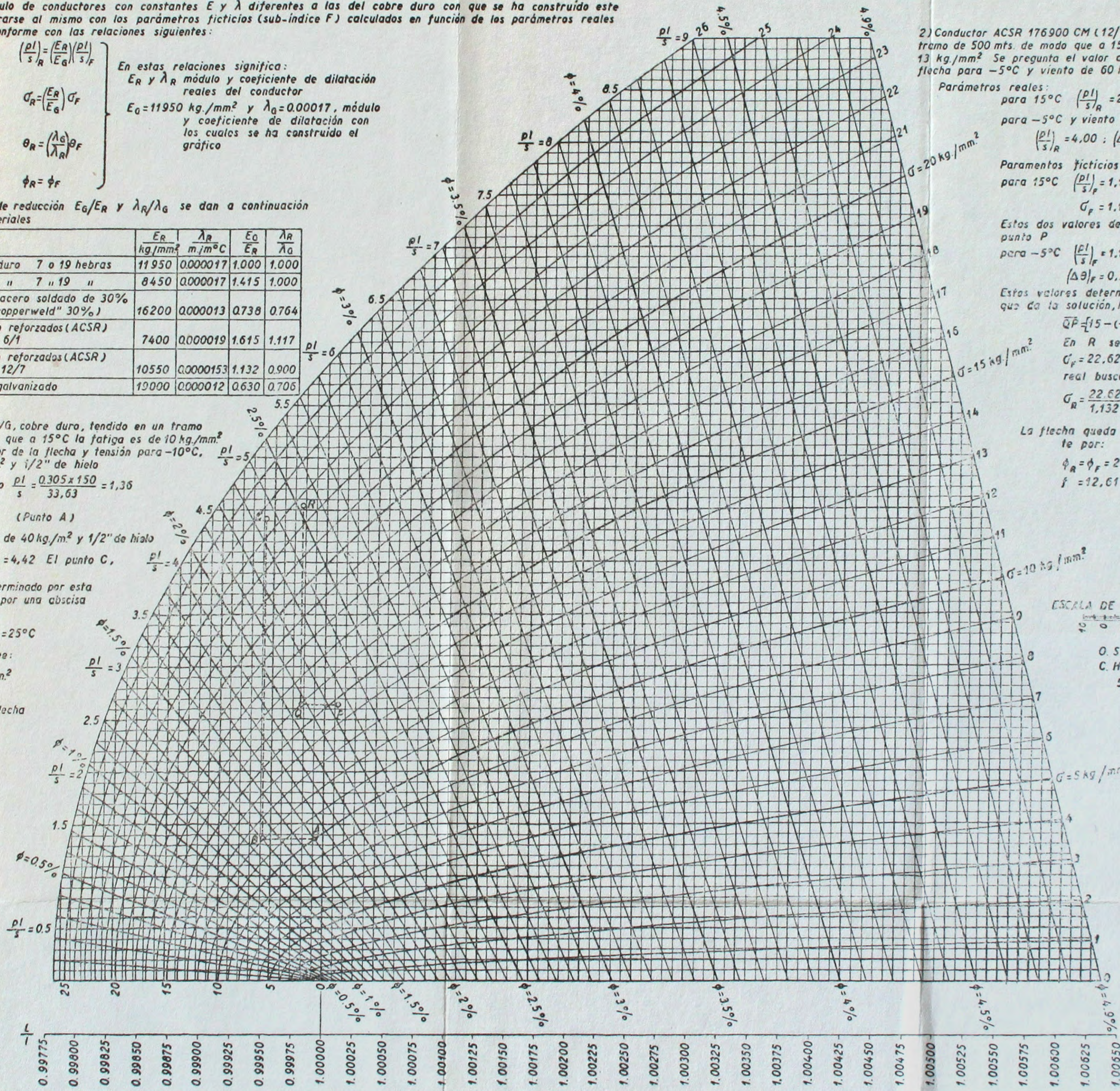
$\frac{pl}{s} = \frac{0.992 \times 150}{33.63} = 4.42$  El punto C,

solución, queda determinado por esta ordenada (4.42) y por una abscisa tal que:

$\overline{BA} = 15 - (-10) = 25^\circ\text{C}$

En el punto C se lee:

- $\sigma = 23.6 \text{ kg./mm}^2$
- $T = 793.67 \text{ kg.}$
- $\phi = 2.36\%$  de flecha
- $f = 3.54 \text{ mts.}$



2) Conductor ACSR 176900 CM (12/7), tendido en un tramo de 500 mts. de modo que a 15°C la fatiga es 13 kg./mm<sup>2</sup>. Se pregunta el valor de la tensión y la flecha para -5°C y viento de 60 kg./m<sup>2</sup>

Parámetros reales:  
 para 15°C  $\left(\frac{pl}{s}\right)_R = 2.32$   $\sigma_R = 13$   
 para -5°C y viento de 60 kg./m<sup>2</sup>  
 $\left(\frac{pl}{s}\right)_F = 4.00$ ;  $(\Delta\theta)_R = 20^\circ\text{C}$

Parámetros ficticios:  
 para 15°C  $\left(\frac{pl}{s}\right)_F = 1.132 \times 2.32 = 2.63$   
 $\sigma_F = 1.132 \times 13 = 14.72$

Estos dos valores determinan el punto P

para -5°C  $\left(\frac{pl}{s}\right)_F = 1.132 \times 4.00 = 4.54$   
 $(\Delta\theta)_F = 0.9 \times 20 = 18^\circ\text{C}$

Estos valores determinan el punto R que da la solución, haciendo

$\overline{QR} = [15 - (-5)] \cdot 0.9 = 18^\circ\text{C}$

En R se lee:

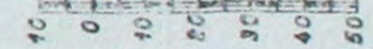
$\sigma_F = 22.62$ ; luego la tensión real buscada será:

$\sigma_R = \frac{22.62}{1.132} = 20 \text{ kg./mm}^2$

La flecha queda dada directamente por:

$\phi_R = \phi_F = 2.522\%$  luego:  
 $f = 12.61 \text{ mts.}$

ESCALA DE TEMPERATURAS °C



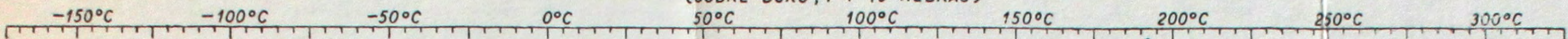
O. SCHNEIDER R.  
 C. HUREL V.  
 5-IX-1946



# CALCULO MECANICO DE CONDUCTORES.—CONDICIONES INICIALES

(COBRE DURO, 7 Y 19 HEBRAS)

N-2



| Temperaturas                       | 15°C  | 25°C  | 35°C  |
|------------------------------------|-------|-------|-------|
| Fatiga inicial kg./mm <sup>2</sup> | 11,85 | 11,02 | 10,25 |
| Tensión inicial kg.                | 3985  | 3706  | 3447  |
| Flecha inicial ‰                   | 1,44  | 1,545 | 1,66  |
| Flecha inicial mts                 | 2,16  | 2,315 | 2,49  |

EJEMPLO.—Para el mismo caso del Ejemplo dado en Gráfico N-1, calcular las flechas y tensiones de colocación (iniciales) para las siguientes temperaturas: 15°C, 25°C y 35°C

a) Calcúlese primero mediante el Gráfico N-1 la fatiga final en la condición mas desfavorable aceptada. El punto C del Gráfico N-1 nos dá:

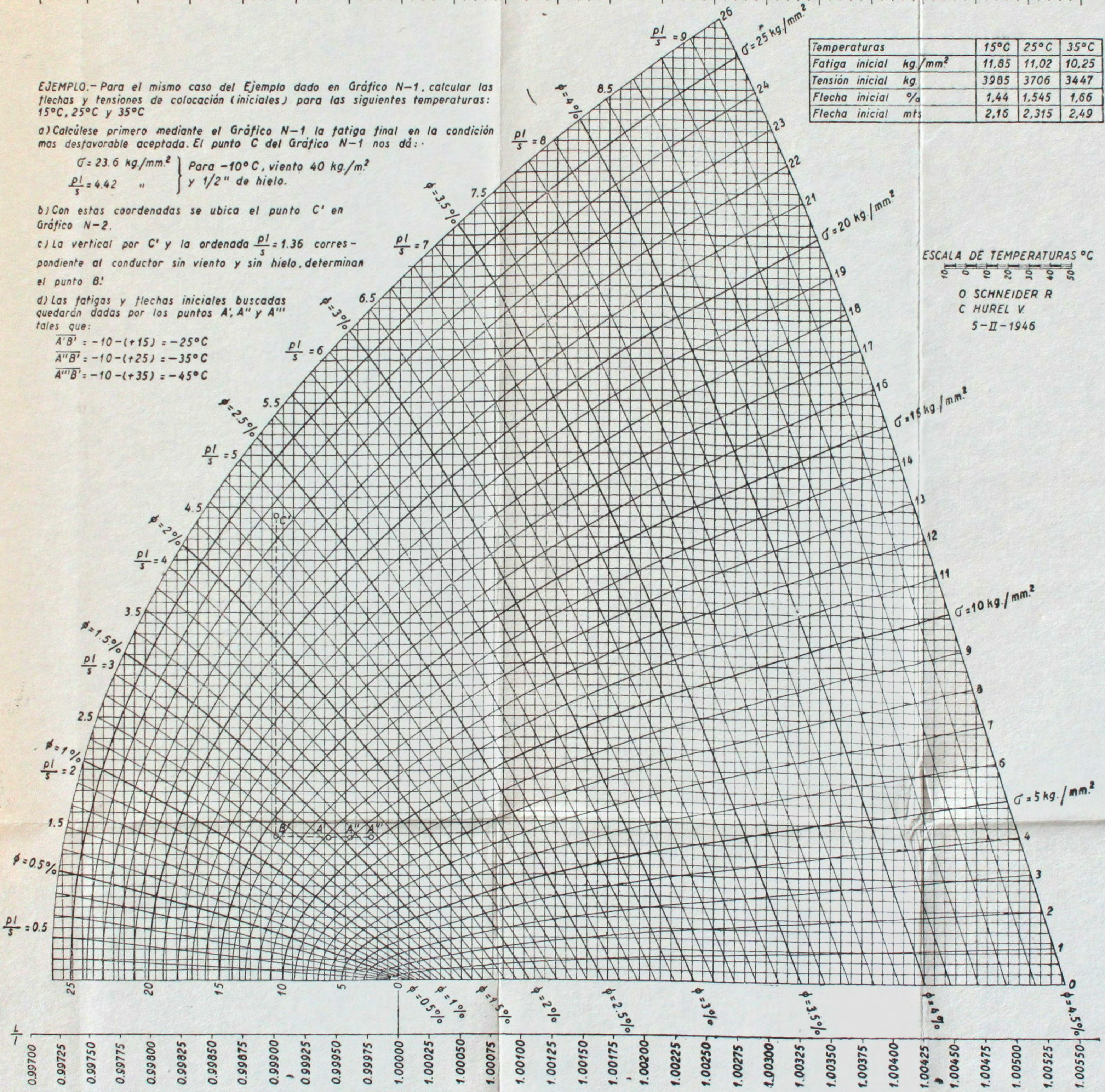
$$\left. \begin{aligned} \sigma &= 23.6 \text{ kg./mm.}^2 \\ \frac{pl}{s} &= 4.42 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{Para } -10^\circ\text{C, viento } 40 \text{ kg./m.}^2 \\ &\text{y } 1/2'' \text{ de hielo.} \end{aligned}$$

b) Con estas coordenadas se ubica el punto C' en Gráfico N-2.

c) La vertical por C' y la ordenada  $\frac{pl}{s} = 1.36$  correspondiente al conductor sin viento y sin hielo, determinan el punto B'.

d) Las fatigas y flechas iniciales buscadas quedarán dadas por los puntos A', A'' y A''' tales que:

$$\begin{aligned} A'B' &= -10 - (+15) = -25^\circ\text{C} \\ A''B' &= -10 - (+25) = -35^\circ\text{C} \\ A'''B' &= -10 - (+35) = -45^\circ\text{C} \end{aligned}$$



ESCALA DE TEMPERATURAS °C

O SCHNEIDER R  
C HUREL V.  
5-II-1946



# CALCULO MECANICO DE COND

(COBRE



NOTA: Para cálculo de conductores con constantes  $E$  y  $\lambda$  diferentes a las del cobre duro con que se ha construido el gráfico, debe entrarse al mismo con los parámetros ficticios (sub-índice F) calculados en función de los parámetros reales (sub-índice R) conforme con las relaciones siguientes:

$$\left(\frac{pl}{s}\right)_F = \left(\frac{E_G}{E_R}\right) \left(\frac{pl}{s}\right)_R \quad \left(\frac{pl}{s}\right)_R = \left(\frac{E_R}{E_G}\right) \left(\frac{pl}{s}\right)_F$$

$$\sigma_F = \left(\frac{E_G}{E_R}\right) \sigma_R \quad \sigma_R = \left(\frac{E_R}{E_G}\right) \sigma_F$$

$$\theta_F = \left(\frac{\lambda_R}{\lambda_G}\right) \theta_R \quad \theta_R = \left(\frac{\lambda_G}{\lambda_R}\right) \theta_F$$

$$\phi_F = \phi_R \quad \phi_R = \phi_F$$

En estas relaciones significa:

$E_R$  y  $\lambda_R$  módulo y coeficiente de dilatación reales del conductor

$E_G = 11950 \text{ kg./mm}^2$  y  $\lambda_G = 0.00017$ , módulo y coeficiente de dilatación con los cuales se ha construido el gráfico

Los coeficientes de reducción  $E_G/E_R$  y  $\lambda_R/\lambda_G$  se dan a continuación para algunos materiales

| MATERIAL  | $\frac{E_R}{\text{kg./mm}^2}$ | $\frac{\lambda_R}{\text{m./m}^\circ\text{C}}$ | $\frac{E_G}{E_R}$ | $\frac{\lambda_R}{\lambda_G}$ |
|---|-------------------------------|---|-------------------|-------------------------------|
| Cables de cobre duro 7 o 19 hebras                      | 11950                         | 0.000017                                      | 1.000             | 1.000                         |
| " " " 1/2 " 7 " 19 "                                    | 8450                          | 0.000017                                      | 1.415             | 1.000                         |
| " " cobre-acero soldado de 30% cond. ("copperweld" 30%) | 16200                         | 0.000013                                      | 0.738             | 0.764                         |
| " " aluminio reforzados (ACSR) constr. 6/1              | 7400                          | 0.000019                                      | 1.615             | 1.117                         |
| " " aluminio reforzados (ACSR) constr. 12/7             | 10550                         | 0.0000153                                     | 1.132             | 0.900                         |
| " " acero galvanizado                                   | 19000                         | 0.000012                                      | 0.630             | 0.706                         |

## EJEMPLOS:

1) Conductor # 2AWG, cobre duro, tendido en un tramo de 150 m. de modo que a 15°C la fatiga es de 10 kg./mm<sup>2</sup>. Se pregunta el valor de la flecha y tensión para -10°C, viento de 40 kg./m<sup>2</sup> y 1/2" de hielo

Para 15°C sin viento  $\frac{pl}{s} = \frac{0.305 \times 150}{33.63} = 1.36$

$\sigma = 10 \text{ kg./mm}^2$  (Punto A)

Para -10°C, viento de 40 kg./m<sup>2</sup> y 1/2" de hielo

$\frac{pl}{s} = \frac{0.992 \times 150}{33.63} = 4.42$  El punto C,

solución, queda determinado por esta ordenada (4,42) y por una abscisa tal que:

$\overline{BA} = 15 - (-10) = 25^\circ\text{C}$

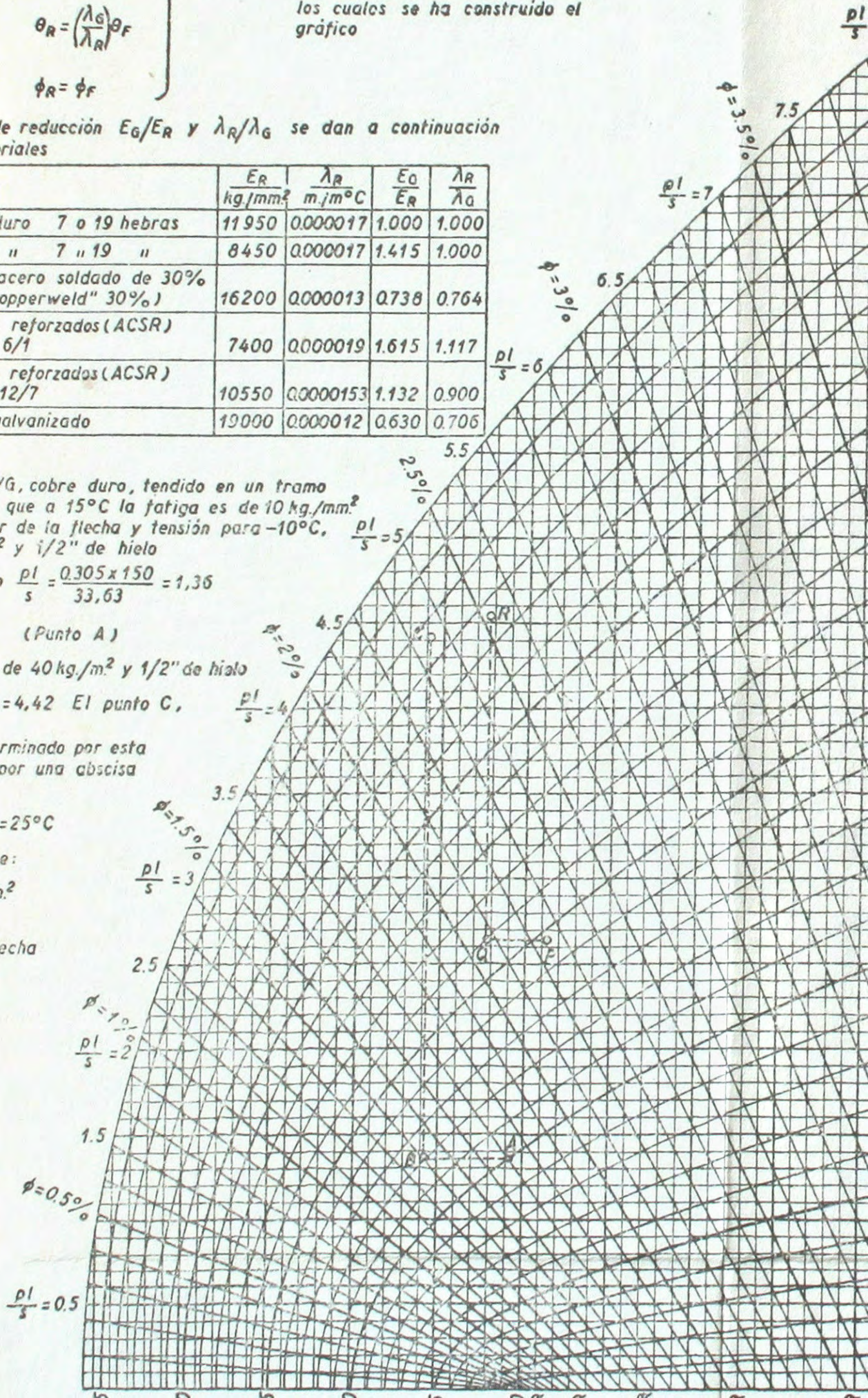
En el punto C se lee:

$\sigma = 23,6 \text{ kg./mm}^2$

$T = 793,67 \text{ kg.}$

$\phi = 2,36\%$  de flecha

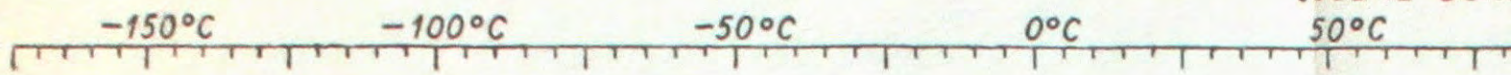
$f = 3,54 \text{ mts.}$





# CALCULO MECANICO DE CONDUCCION

(COBRE DUR)



EJEMPLO.- Para el mismo caso del Ejemplo dado en Gráfico N-1, calcular las flechas y tensiones de colocación (iniciales) para las siguientes temperaturas: 15°C, 25°C y 35°C

a) Calcúlese primero mediante el Gráfico N-1 la fatiga final en la condición mas desfavorable aceptada. El punto C del Gráfico N-1 nos dá:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma = 23.6 \text{ kg./mm.}^2 \\ \frac{pl}{s} = 4.42 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Para } -10^\circ\text{C, viento } 40 \text{ kg./m.}^2 \\ \text{y } 1/2'' \text{ de hielo.} \end{array}$$

b) Con estas coordenadas se ubica el punto C' en Gráfico N-2.

c) La vertical por C' y la ordenada  $\frac{pl}{s} = 1.36$  correspondiente al conductor sin viento y sin hielo, determinan el punto B'.

d) Las fatigas y flechas iniciales buscadas quedarán dadas por los puntos A', A'' y A''' tales que:

$$\overline{A'B'} = -10 - (+15) = -25^\circ\text{C}$$

$$\overline{A''B'} = -10 - (+25) = -35^\circ\text{C}$$

$$\overline{A'''B'} = -10 - (+35) = -45^\circ\text{C}$$

