

Un Problema de Corrosión sobre Alambres de Post-tensado

Por el Director del Instituto de Estática de la Facultad de Ingeniería y Agrimensura de Montevideo, Profesor Ingeniero JULIO RICARDONI

I. — Introducción

1. En el curso de la construcción del edificio "El Pilar", caracterizado por su fuerte esbeltez y por la utilización de un elemento de hormigón post-tensado destinado a permitir una disposición muy original del sistema estructural, se produjo una detención muy prolongada de los trabajos cuando los alambres de aquél estaban ya colocados en obra.

Dicho elemento está compuesto por 7 haces de 12 alambres cada uno enhebrados en ductos verticales de 32 m. de longitud que son anclados en un macizo de fundación y tensados en el extremo superior de la pieza de hormigón por medio de un dispositivo "Preload". El extremo superior de dichos alambres sobresalía del hormigón en una longitud de 1.50 m. aproximadamente, constituyendo la parte destinada a ser tomada por el sistema de tensado.

A pesar de que la vaina de inyección también se prolongaba de manera de recubrir completamente los alambres que, además, se habían curvado con su extremo hacia abajo, el largo tiempo de exposición a una atmósfera bastante corrosiva provocó el ataque de la superficie de los mismos en una magnitud tal que sus efectos no podían apreciarse sin realizar un estudio más detenido.

El problema planteado por los proyectistas del edificio fue entonces el de analizar si los alambres que serían tensados habían experimentado alteraciones en sus características debido a las condiciones desfavorables mencionadas, que pudieron llevar a un contacto más o menos directo con el agua de lluvia, y, en caso afirmativo, establecer si esas alteraciones podían afectar la capacidad resistente actual o de futuro.

Admitiendo, de acuerdo con todas las circunstancias que rodean el problema, que no hubiera podido entrar agua en los ductos en condiciones de provocar un ataque intenso en la parte inferior de los alambres, se podía limitar el estudio a su extremo superior, considerando que su estado era repre-

sentativo de las condiciones más desfavorables de los alambres.

2. Con el objeto de conocer las características y extensión del ataque sufrido en la forma más completa posible, se comenzó por cortar el trozo de extremidad a 4 alambres de cada uno de los haces con una longitud tal (40 ó 50 cm.) que dejara como mínimo una proyección de 1.00 m. respecto a la cara del hormigón para respetar las necesidades del tensado y anclaje definitivo.

Dichos ejemplares mostraron unánimemente en el examen macroscópico una zona de corrosión muy intensa en un trozo de unos 10 cm. de largo correspondiente al extremo del alambre (Fig. 1) y luego en el resto de los mismos una corrosión bastante uniforme de mucho menor intensidad (fig. 2).

Sobre la base de la hipótesis aceptada en el párrafo anterior puede pensarse que esta zona representa el máximo de las condiciones desfavorables efectivamente existentes en los alambres, mientras que la zona exterior hubiera representado, quizás como mínimo, las condiciones correspondientes al alambre si hubiera estado en contacto intermitente con el agua en el interior de los ductos.

Así pues, desde el punto de vista de este estudio, fue la zona media e interior de los ejemplares, que designaremos con (I), la que tuvo mayor interés, aunque también la zona exterior, designada (E), fue objeto de diversas determinaciones a efectos comparativos y para tener una idea de las peores condiciones que hubiera podido presentar.

3. Antes de pasar adelante en el estudio se debió comenzar por establecer claramente cuáles son los requerimientos normativos sobre el estado de los alambres de pretensado, a cuyos efectos se revisaron las principales normas sobre el argumento (Bibliografía, B.1 a B.6), las cuales, como siempre, fijan solamente con carácter cualitativo y general las condiciones deseables o imponibles a priori, pero no dan conceptos cuantitativos de aceptación que puedan marcar el límite en los casos a considerar a posteriori.

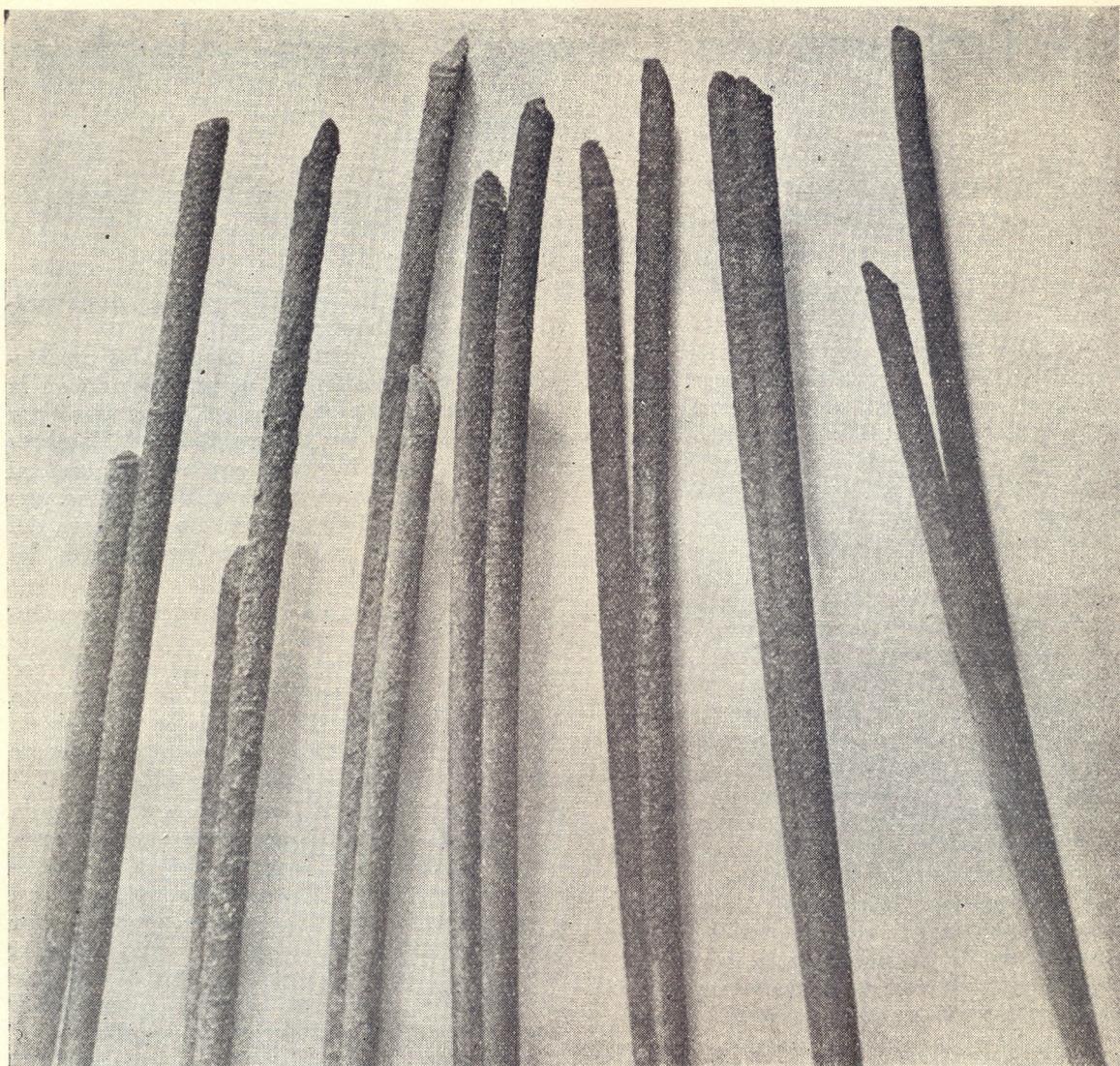


Figura Nº 1

Como característica pero como ejemplo de las más detalladas se reproduce la Norma Italiana (B.3):

“D-5)- Estado de las muestras:

“En el momento de ponerlos en obra los aceros deben presentarse sin oxidación, corrosión, defectos superficiales visibles, dobladuras. Se puede tolerar una oxidación que desaparezca totalmente mediante un “ligero frotamiento con un paño seco”.

Es decir que, aplicando estrictamente la norma, hubiera sido imposible emplear esos alambres pero naturalmente que en un caso como éste debe tomarse el problema con cri-

terio realista, aceptando o rechazando lo existente pero no exigiendo lo que se considere conveniente o ideal para evitar sin dudas cualquier dificultad de futuro. Por tales razones fue necesario entrar a un estudio detallado del problema.

II. — **Efectos Posibles del Ataque**

4. La acción de la atmósfera y/o agua que haya estado en contacto con los alambres resulta en definitiva de la oxidación consiguiente que, en resumen puede afectarlos por:

- a) Reducción de la sección resistente.

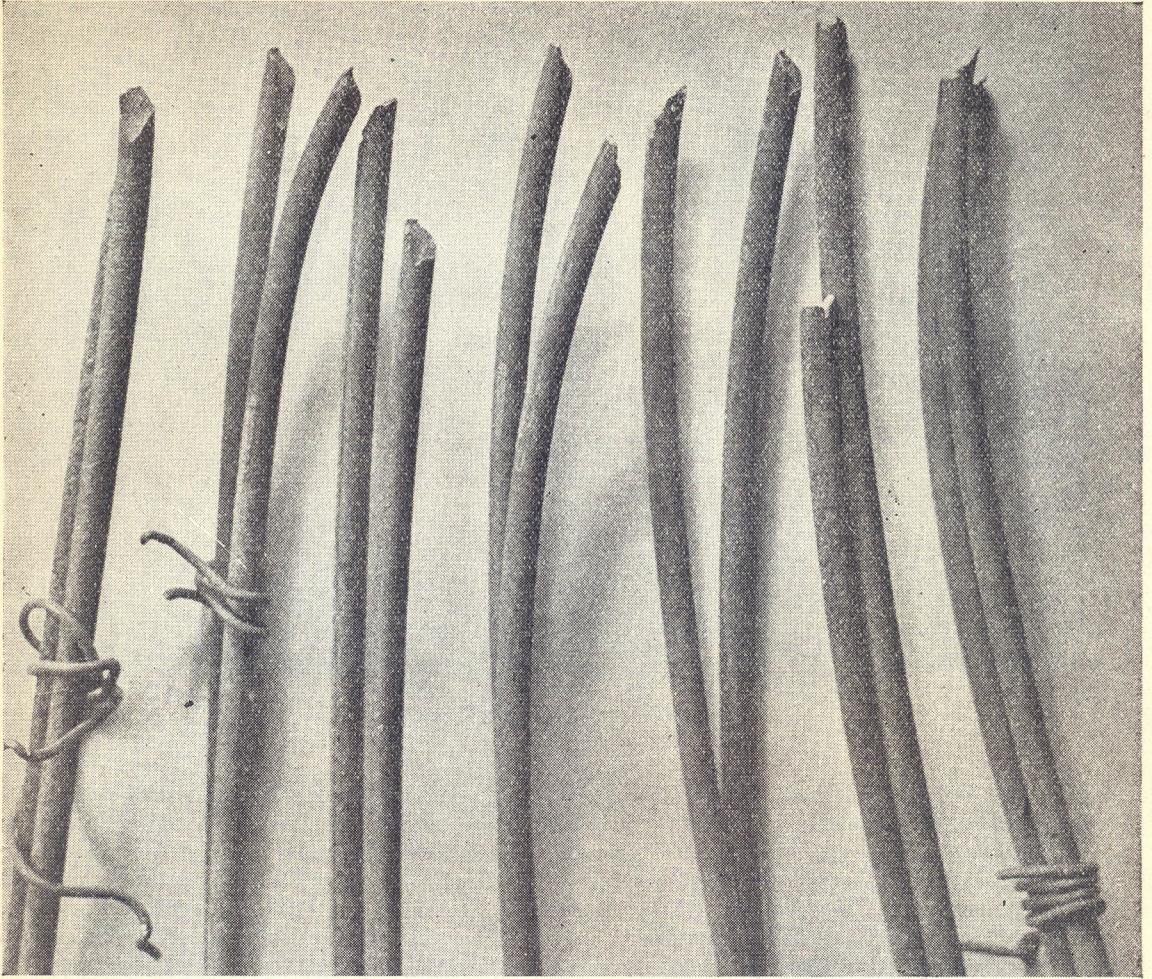


Figura N° 2

- b) Efecto de entalladura.
- c) Alteración de la estructura interna.

El estudio se comenzó entonces analizando la importancia que alcanzaba cada uno de estos efectos considerados separadamente así como la influencia que pudieran tener, en principio, sobre su capacidad resistente, capacidad que después fue comprobada concretamente sobre las muestras representativas (Capítulo III).

5. *Reducción de la sección resistente.* —

Esta causa no tiene importancia salvo oxidaciones de una intensidad o duración excepcionales, pues su efecto no llega generalmente ni siquiera a las tolerancias normales, tal como puede comprobarse en las fotografías mencionadas en el párrafo siguiente.

6 *Efecto de entalladura.* — El ataque de la superficie exterior provoca por su irregu-

laridad la aparición de huecos o discontinuidades en la superficie exterior del alambre, nominalmente lisa en el alambre nuevo, que tienden a afectar la resistencia a la fatiga por la producción de concentración de tensiones.

Con el objeto de poner en evidencia la forma y extensión del ataque sufrido por el alambre se eligieron trozos representativos del alambre nuevo y de los extremos interior y exterior del alambre de obra y se trataron con una solución hirviendo de ácido clorhídrico al 50% (B. 15, p. 68) que eliminó toda la parte de óxido, obteniéndose el aspecto que se reproduce en las fotografías de la figura 3.

De ellas se deduce que en el caso más desfavorable de un ejemplar *E* (fig. 3-5) el ataque es mucho más intenso que en los otros aunque sin llegar a presentar fisuras ni

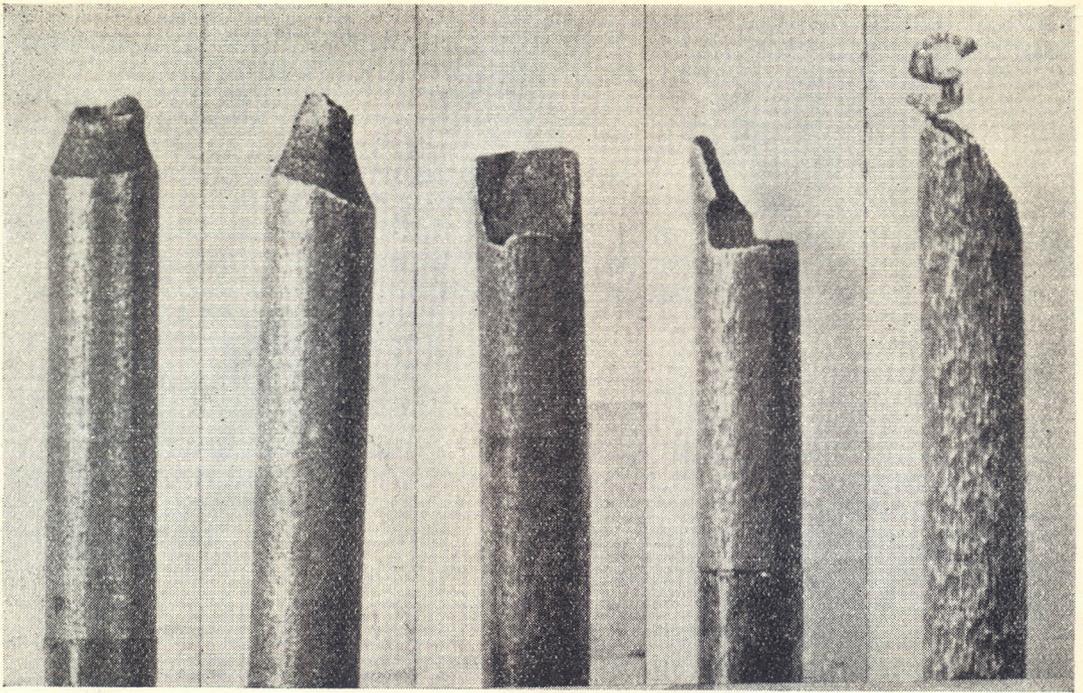


Figura N° 3

puntos de ataque profundo y que las diferencias entre el ejemplar de mayor interés (I) (figs. 3-3 y 3-4) y el de alambre nuevo (figs. 3-1 y 3-2) es muy pequeña comprobándose solamente, en el ejemplar I, la existencia de irregularidades de superficie de muy reducida profundidad y de contornos suaves, en nada parecidos a los encontrados en alambres que sufrieron corrosión bajo tensión (ver por ejemplo las figuras 5 y 13 de B. 15).

Por lo tanto, aunque existe en principio la causa mencionada, se ve claramente que no podrá dársele un peso apreciable en la estimación del efecto sobre el problema en estudio, debido a que, además, en la superficie de las varillas en estado nuevo existen ya pequeñas cavidades e inclusiones tan influyentes o más aún que las de corrosión como se pudo observar en algunos ensayos de fatiga de carácter preliminar.

Por otra parte, se hará notar nuevamente que en este caso particular el problema de fatiga, por sí mismo, no tiene interés debido al tipo de carga, al tipo de estructura y a las condiciones de trabajo, de manera que no debe preocupar su condición desfavorable, aunque se puede utilizar la resistencia a la fatiga para acusar o acotar algunos otros aspectos de interés práctico.

7. *Alteración de la estructura interna.* — El efecto más nocivo de la oxidación de los alambres de tensado es el de la producción de una fisuración gradual, fundamentalmente intercrystalina, que se genera por la acción simultánea o sucesiva de esfuerzos de extensión importantes y del contacto con un agente corrosivo, proceso designado con el nombre de "corrosión bajo tensión" o "stress-corrosion".

Este problema ha provocado un extensísimo y siempre creciente número de investigaciones referentes especialmente al campo de las aleaciones en ambientes altamente corrosivos y bajo condiciones muy exigentes que, en su forma general (B. 28), se la define así:

"El término corrosión bajo tensión, o más correctamente, fisuración por corrosión bajo tensión, debería ser limitado a casos en los cuales no existe alteración por corrosión en ausencia de tensiones. En la ausencia de un ambiente corrosivo, el material muestra un comportamiento mecánico normal bajo la influencia de tensiones: antes del desarrollo de la fisura debida a la corrosión bajo tensión, hay poca disminución de resistencia y ductilidad. Así, en el proceso de fisuración por corrosión bajo tensión hay una mayor alteración en las propiedades mecánicas debido a la acción si-

“multánea de esfuerzos estáticos y exposición a un ambiente corrosivo que la que existiría como resultado de la separada pero aditiva acción de esos agentes”.

“La fisuración por corrosión bajo tensión es un verdadero caso de interacción entre reacciones químicas y fuerzas internas que resulta en una falla estructural que no ocurriría en otra forma. La falla es un tipo de fractura frágil de metales normalmente “dúctiles, etc.”.

Aunque las condiciones en que se presenta el problema del hormigón pretensado difieren bastante de las que han dado origen a esos estudios, —problemas de equipos industriales, fundamentalmente,— es sin embargo reconocido casi unánimemente que esa alteración del alambre es la causa de las temibles *roturas espontáneas o diferidas* que han aparecido esporádicamente en las estructuras de hormigón precomprimido, como lo muestra la extensa búsqueda bibliográfica realizada que se menciona al final.

Las frases siguientes de Franco Levi (B. 8, p. 143) resumen bastante bien el problema:

“La rotura espontánea de las obras precomprimidas atrae desde hace algunos años la atención de los especialistas.

“El fenómeno no preocupa tanto por su extensión sino por las dificultades a las cuales uno se enfrenta cuando se quiere estudiar las causas. En el momento actual, en efecto, no se ha podido obtener unanimidad sobre la importancia relativa de los diferentes factores que son susceptibles de provocar las fracturas frágiles de los aceros fuertemente extendidos.

“Los trabajos que han sido dedicados a este problema insisten muy justamente sobre la importancia que toman en este dominio los fenómenos de corrosión.

“Nadie duda en efecto que una fractura considerable de las roturas que han sido observadas no sea imputable a un ataque químico o electroquímico favorecido por el estado de tensión al cual se encontraba sometido el acero” (y probablemente iniciado por la presencia de un defecto superficial”).

Por otra parte confirma la importancia práctica del problema el hecho de que sea mencionado en la norma ACI-ASCE (B. 6) en la siguiente forma:

“304.6 — *Corrosión:*

“Dado que los aceros de pretensado son susceptibles de corrosión, ellos deben ser

“protegidos durante el almacenado, transporte y construcción.

“El término corrosión bajo tensión se aplica a la aquebradización del acero que aparece bajo los efectos combinados de tensiones elevadas y algunos ambientes corrosivos. Puede tener lugar sin afectar aparentemente la superficie.

“Normalmente, el acero embebido en hormigón o adecuadamente inyectado no estará sujeto a tal corrosión.

“Cuando el acero post-tensionado no es inyectado, deben tomarse precauciones especiales para proteger el acero”.

10. Naturalmente que el estudio de fondo de un problema tan complejo no corresponde a la especialización del ingeniero estructural, pero, en realidad, no es necesario entrar al mismo para discutir su mecanismo detallado y las razones de su existencia (ver por ejemplo B. 9), ya que el objeto del estudio era estimar la posibilidad del empleo del acero en su estado actual, comenzando por comprobar si existía un comienzo de fisuración y luego dando las medidas convenientes para evitar que se iniciara o continuara bajo carga.

A este respecto se debe mencionar que aunque en general se considera que la corrosión bajo tensión es el producto directo de la coexistencia de los dos factores y esa es, en efecto, la condición más desfavorable y peligrosa, es estimado por algunos investigadores (B. 10, pág. 516) que:

“La corrosión es evidentemente más peligrosa cuando se produce en armaduras bajo tensión; pero no se debe descuidar tampoco la corrosión atmosférica sobre los hilos depositados antes del empleo. Se ven demasiados ejemplos, que conducen a menudo a roturas durante el tensado. Las armaduras para hormigón precomprimido no deben ser tratadas como simples barras para hormigón”.

Este precisamente podía ser el caso de los alambres de “El Pilar”, los cuales estuvieron sometidos a oxidación en un período fundamentalmente sin tensiones pero que, no hay que dejarlo de lado, pudieron haberla tenido mientras se encontraban bajo tensión de enrollado o pudieran seguirla teniendo una vez tensados.

De manera que este problema puede presentar dos aspectos diferentes según sea su ubicación en el tiempo, aspectos que se estudiarán en forma separada dado que pueden ser analizados sobre bases que tienen una claridad de definición muy diferentes.

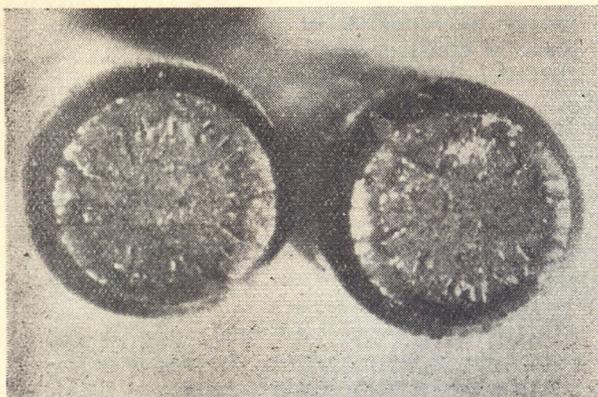


Figura N° 4

III. — Capacidad Resistente Actual del Alambre

11. Si se trata de una alteración que ha alcanzado ya su valor definitivo es relativamente fácil eliminar casi totalmente sus riesgos así como juzgar previamente de su existencia e importancia.

En efecto, desde este último punto de vista debe recordarse que el mismo proceso de post-tensado significa en cierto modo un ensayo de cada uno de los alambres en el cual se le aplica una tensión que, por lo menos, excederá de la tensión final de trabajo en el valor correspondiente a la pérdida por fluencia de acero y hormigón, que en este caso ha sido estimado por los calculistas en un 15%, de manera que cualquier defecto de cierta importancia *existente en ese momento* queda en descubierto automáticamente. Por otra parte a veces se recomienda y podría ser este el caso, el aplicar una sobretensión cuyo valor, que puede fijarse teniendo en cuenta el coeficiente de seguridad mínimo que se

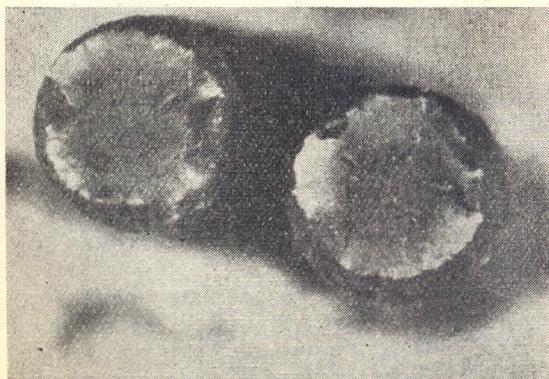


Figura N° 5

desea, se estima a veces entre el 5 y el 10% del valor teórico.

A pesar de ello se creyó necesario en un caso de presunción de defectos como el presente, comprobar previamente ese aspecto realizando el ensayo a la extensión de cierta cantidad de ejemplares extraídos de la obra, así como alguno de material nuevo a efectos comparativos, como se indica más adelante.

12. Como características a determinar se tomaron las que se consideran fundamentales para la aceptación de las varillas nuevas, o sea:

- 1) Resistencia a la extensión (σ_r)
- 2) Límite aparente de elasticidad 0,2% ($\sigma_{0,2}$)
- 3) Ductilidad en 100 mm. (Δ_{100}).

A estos efectos se utilizó la norma Italiana (B. 3) debido a que pareció ser la que tenía más en cuenta el problema de la corrosión en sus diversos aspectos, aunque se creyó aceptable eliminar el límite aparente 0.10%, el cual posiblemente no hubiera agregado mayor interés. La ductilidad debe medirse, según el art. D—1—a, sobre una base $l_0 = 50 + 10 \varnothing$ en milímetros o sea, para estos alambres, sobre 100 mm.

En el Cuadro I se reproducen los resultados obtenidos por el Instituto de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería y Agrimensura, sobre los ejemplares en la obra tal como se indicó en el artículo 2, designando con los números 1 a 7 a la característica de la vaina donde estaba enhebrado, y con *a* a *d* a cada uno de los alambres de un ducto determinado. Se han agregado además algunos resultados obtenidos sobre muestras de alambre nuevo, requeridos a *Preload* como iguales al usado en el edificio en estudio, que se designan con N1, N2, ..., a los efectos de compararlos con los ejemplares atacados.

13. Como resumen de dichas características se pueden dar los valores del Cuadro II, los cuales permiten un análisis más claro del problema y deducir que:

Las características resistentes $\sigma_{0,2}$, σ_r y Δ tienen valores prácticamente idénticos en ambos tipos de alambres, —valor medio, mínimos y dispersión,— quizás un poco superiores en los alambres usados lo cual, admitiendo el mismo origen a todos ellos, significa que la corrosión sufrida no ha afectado a los alambres desde este punto de vista, pero debe observarse la dispersión más bien alta de los resultados, que para la ductilidad excede claramente de la supuesta por

la Norma Italiana en su artículo *D.4.b*), dispersión que volveremos a encontrar al comentar otra medida de la capacidad de deformación plástica del metal.

Aún así, sin embargo, el alambre cumple con la exigencia del artículo *D2-b*) que fija una ductilidad mínima igual a $2,25 + \varnothing/5 = 3,25\%$ y lo cumple con gran margen, con excepción de un caso (Ejemplar 1 b).

Con referencia a la exigencia $\sigma_r/\sigma_{0,2} \geq 1.10$ que se fija en el art. *D 2 a*), se ve que los valores promedios la cumplen, pero en cambio hay muchos valores individuales que están muy por debajo de esos límites, si bien por arriba de 1.05, pero de cualquier forma que se tomaran en cuenta se podría considerar un acero caracterizado aproximadamente como mínimo por

$$\begin{aligned}\sigma_{0,2} &= 140.0 \text{ kg/mm}^2. \\ \sigma_r &= 160.0 \text{ " } \\ \Delta_{100} &= 3.25 \text{ \%}.\end{aligned}$$

La norma del "Prestressed Concrete Institute" (B. 27 pág. 29) da como exigencia

$$\begin{aligned}\sigma_r &\geq 140.0 \text{ kg/mm}^2. \\ \sigma_{0,2} &\geq 0.80 \sigma_r = 112. \text{ kg/mm}^2. \\ \Delta_{250} &\geq 4 \text{ \%} \\ E &\cong 20300 \text{ kg/mm}^2.\end{aligned}$$

es decir que, el alambre, tanto nuevo como de obra, cumpliría ampliamente las resistencias pero en cambio serían algo pobres en lo que se refiere a la ductilidad (Para $l_0 = 100$ ó 250 mm. o sea para $l_0/\varnothing = 20$ ó 50 la ductilidad varía muy poco aún en aceros duros como los de este alambre. (Ver por ejemplo pág. 106 de B. 32).

14. Otra observación de interés es la de la fractura en los ensayos de extensión y de plegado.

En el ensayo de extensión los alambres nuevos no merecen ninguna objeción pues dan una fractura muy uniforme y totalmente característica de los aceros duros, del tipo de reborde cónico y centro en estrella (B. 31, fig. 418) como se ve en la fig. 4.

Los alambres usados presentan también en general una fractura de ese tipo aunque muchas veces con borde algo denticulado pero puede decirse que de 15 fracturas observadas hay 12 totalmente correctas y aceptables, una muestra típica de las cuales se ve en la figura 5.

En los otros tres, —cuya muestra típica (ej. 7a) se reproduce en la figura 6,— existe una fractura sin cono aparente y muy fibrosa e irregular con tendencia a formar

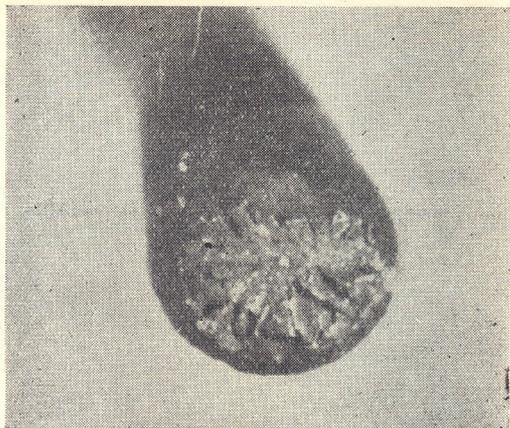


Figura N° 6

estrella y pertenecen siempre a la zona más oxidada.

En resumen, pues, no hay objeción que hacer, desde este punto de vista, al alambre en su estado poco oxidado (ejemplares I), que es en realidad el que interesa, mientras que para la otra parte habría necesidad de mayor número de ensayos.

En lo que se refiere al ensayo de plegado no hay diferencia apreciable de fractura entre los ejemplares nuevos (figura 7) y de obra (figura 8) presentando todas ellas un aspecto sedoso y sin indicios de fragilidad, especialmente en los ejemplares poco oxidados (I) (fig. 9) que presentan una adecuada deformación plástica.

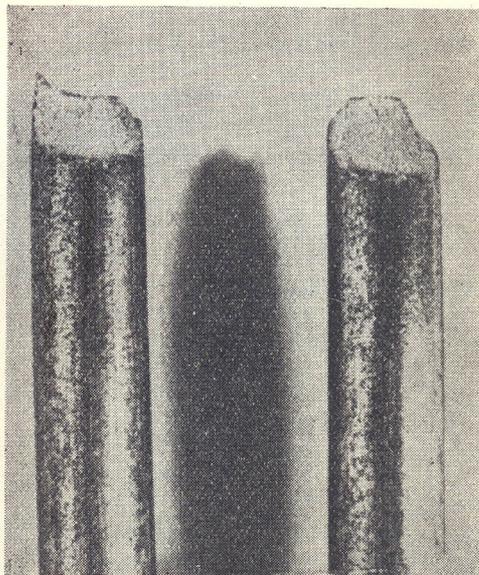


Figura N° 7

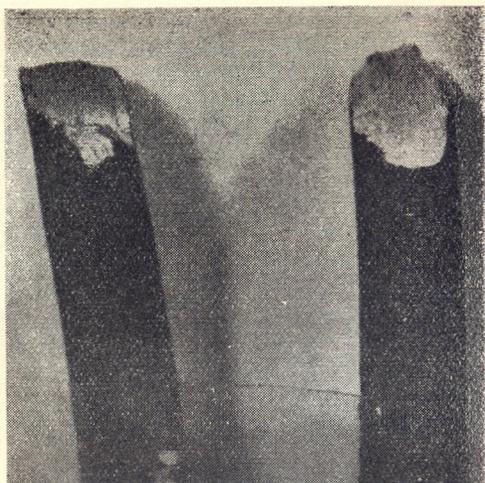


Figura Nº 8

IV. — Proceso Futuro de la Corrosión bajo Tensión

15. En este aspecto ya se debe entrar a considerar no solamente el estado actual sino también las posibilidades de una futura "corrosión bajo tensión" sobre la base de la susceptibilidad del alambre a dicho fenómeno y de las condiciones corrosivas del medio en que quedarán sumergidos. Estudiaremos sucesivamente estos aspectos.

16. *Tipo de acero.* — La susceptibilidad a la corrosión y especialmente a la corrosión bajo tensión, depende mucho del proceso de obtención del alambre, — laminado y templado o bien trefilado en frío, — existiendo opinión general (B. 11, 12, 13, 14, 15, 23, 33, etc.) de que el trefilado en frío es superior al otro

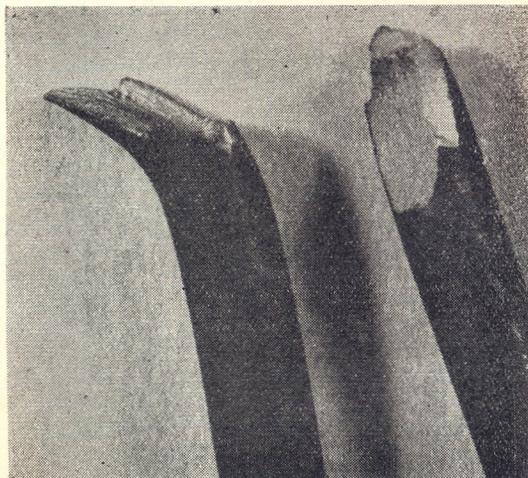


Figura Nº 9

tipo, de manera que hay interés en determinarlo para el alambre en estudio.

Por otra parte tiene influencia, como en todo problema de corrosión, la composición química del acero especialmente en lo que se refiere al contenido de Carbono (B. 19, 9, 14), aparte, naturalmente, de los inconvenientes clásicos del azufre y el fósforo en estos aceros al carbono, llegándose (B. 9) a plantear un máximo de 0.65 % de carbono.

Por ambas razones se creyó indispensable solicitar las informaciones pertinentes al Instituto de Tecnología y Química de esta Facultad, consistentes concretamente en un estudio metalográfico y en un análisis químico de cuyos informes se extractan los conceptos siguientes:

En el primer estudio, el Ing. Gaggero indica que la estructura de los alambres es "del tipo sorbítico con marcada deformación por alargamiento de los "granos" (fig. 10) y llega a la conclusión de que "ellos no deben haberse obtenido por un proceso del tipo en el cual se realiza un tratamiento final de temple y revenido, sino por un proceso de patentado y estirado", conceptos que encuadran perfectamente en las clasificaciones de modos de fabricación de alambre para pretensado, (ver por ej. B. 13, p. 217). Desde este punto de vista sé está entonces en las condiciones más favorables.

En lo que se refiere a la composición química se obtuvo:

Carbono	:	0.76	%
Manganeso	:	0.38	%
Silicio	:	0.09	%
Azufre	:	0.025	%
Fósforo	:	0.016	%

Esta composición encuadra dentro de la aceptada corrientemente para el alambre obtenido por estirado (B. 19, 14, 30, 26).

17. *Estado de corrosión actual.* — Aunque en el capítulo III se consideró este aspecto en cuanto se refería al efecto que tuviera la posible corrosión sobre la *capacidad resistente actual* y se descartó todo problema, queda sin embargo por estudiar con mayor fineza la posibilidad de existencia de alguna fisura que si bien no alterara apreciablemente aquellas características, pudiera ser demostración de que hubo un comienzo de "fisuración bajo tensión" y que, por lo tanto, pudiera facilitar su continuación una vez tensado.

Para ello se recurrió, por una parte, al estudio metalográfico mencionado antes, en el cual se estudiaron las 8 muestras que se

indican en el informe respectivo utilizando la misma notación indicada en los artículos anteriores de este trabajo, muestras seleccionadas entre las más oxidadas de cada tipo.

El estudio llega a la conclusión de que "En ninguna de las muestras observadas se ha encontrado corrosión intercrystalina ni fisuración.

"La corrosión que se observa es más acentuada en las muestras (*E*) y es en todos los casos de carácter superficial, afectando una zona de espesor irregular pero comprendido en el orden de 0,1 a 0,2 mm. en los ejemplares más afectados". (fig. 11).

Son por lo tanto conclusiones totalmente tranquilizadoras.

18. *Capacidad de plastificación.* — Se consideró sin embargo al comenzar el estudio que era muy importante también realizar el ensayo de "plegado alternado" sobre los extremos (*E*) e (*I*) de un número grande de ejemplares ya que este ensayo muy simple es uno de los indicados para controlar la *capacidad de la plastificación* del metal en el estado de utilización (B. 17, pág. 555) y, especialmente, es muy informativo sobre la sensibilidad al daño ("damage") por corrosión (B. 16, p. 677).

Para realizarlo se utilizó la norma italiana (B. 3) porque es posiblemente la única que la exige con carácter general además de dar datos concretos sobre su técnica e indicar un límite de aceptación, pues el artículo D-1-b) fija que el diámetro del perno será 4 veces el del alambre y el D-2-c) exige 4 plegados como condición de aceptación. No debe perderse de vista sin embargo que no se trata de aplicarla en forma absoluta sino más bien a los efectos comparativos, pues el alambre no ha sido fabricado bajo su vigencia.

Estas determinaciones fueron realizadas en el Instituto de Ensayo de Materiales y los resultados se indican también en el Cuadro I, debiéndose anotar que para cada muestra de alambre de las mencionadas en el art. 2 se sacaron 2 ejemplares, uno en cada extremo del mismo (*E* o *I*) y que cuando la numeración (2-b, 3-a, etc.) coincide con la de algún ejemplar del ensayo de extensión (Cuadro I) quiere decir que todos los ejemplares se obtuvieron de la misma muestra.

Dichos resultados y el resumen del Cuadro III muestran lo siguiente:

a) La condición del extremo más oxidado (*E*) es muchas veces inferior a la del menos oxidado (*I*): sobre 23 ejemplares ensayados hay 13 con iguales números, 7 son



Figura Nº 10

superiores en (*E*), uno es inferior en (*I*) y faltan valores comparativos en 2 casos, diferencia que se refleja también en los promedios (3.32 y 3.82 respectivamente) indicando una discreta influencia, por lo menos,



Figura Nº 11

C U A D R O I

Ejem- plar	$\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	σ_r kg/mm ²	Δ_{100} %	Plegados	
				(I)	(E)
N 1	157.9	168.6	—	4	5
N 2	163.3	170.4	4.9	4	4
N 4	141.1	159.9	4.2	4	5
N 5	—	179.8	3.9	2	4
N 6	—	179.7	3.4	4	4
				4	4
1a	157.6	165.3	3.8	2	2
1b	156.4	165.0	3.2	3	1
1c	153.8	164.9	3.8	2	2
2a	152.3	167.0	4.5	4	2
2b	154.3	170.0	5.8	4	4
2c	149.2	168.3	4.6	5	3
3a	160.0	175.5	6.5	5	5
3b	155.4	174.0	4.0	5	4
3c	156.9	172.2	4.0	4	5
3d	156.4	175.6	5.8	5	5
4a	151.8	171.1	6.0	4	4
4b	152.8	173.5	7.0	4	4
4c	155.8	173.4	6.5	5	5
5a	153.1	169.9	—	5	4
5b	147.7	174.2	6.5	3	3
5c	158.1	173.9	6.9	4	3
6a	154.3	168.8	4.5	—	2
6b	159.9	172.8	4.4	2	2
6c	157.9	170.1	4.0	2	2
6d	—	—	—	3	3
7a	159.4	167.3	—	4	—
7b	157.9	174.2	6.1	4	4
7c	154.8	173.2	6.8	5	4

del grado de oxidación sobre la capacidad de plegado.

b) La comparación entre el extremo menos oxidado (I), como muestra probablemente más representativa del estado general de los alambres, y los alambres nuevos, muestran una equivalencia casi total, con idéntico mínimo y un valor medio muy poco inferior.

c) Con referencia a la norma ($p \geq 4$) se tiene:

De obra, interior (I):

$\left. \begin{array}{l} 7 \text{ con } p < 4 \\ 8 \text{ con } p = 4 \\ 7 \text{ con } p > 4 \end{array} \right\} : 15 \text{ cumplen}$

Nuevo:

$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ con } p < 4 \\ 5 \text{ con } p = 4 \\ 2 \text{ con } p > 4 \end{array} \right\} : 7 \text{ cumplen}$

En resumen puede verse que en las muestras (I) hay una dispersión bastante grande y que los resultados no siempre son favorables aunque el promedio es poco inferior al que exige la norma italiana, pero que dichos aspectos se reflejan más o menos directamente en los resultados del alambre nuevo.

C U A D R O I I

Caract.	Valor	Nuevos	De Obra
$\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	Media	154.1	155.3
	Mínimo	141.1	147.7
	Variación	22.2	12.3
σ_r kg/mm ²	Media	171.7	170.9
	Mínimo	159.9	164.9
	Variación	19.9	10.7
Δ_{100} %	Media	4.1	5.23
	Mínima	3.4	3.2 (3.8)
	Variación	1.5	3.8 (3.2)

19. Homogeneidad del alambre. — Ello hace pensar que los defectos de los ejemplares (I) responden a irregularidades inherentes al alambre en su estado inicial o sea a una falta de homogeneidad de fabricación, para comprobar lo cual pareció interesante comparar los índices de plegados con las ductilidades de las mismas muestras teniendo en cuenta además sus resistencias.

Esta comparación se ha hecho en la figura 12 siguiendo la notación corriente, en la

C U A D R O I I I

	P l e g a d o s		
	Interior	Exterior	Nuevos
Media	3.82	3.32	4.10
Mínimo	2	1	2
Variación	3	4	3

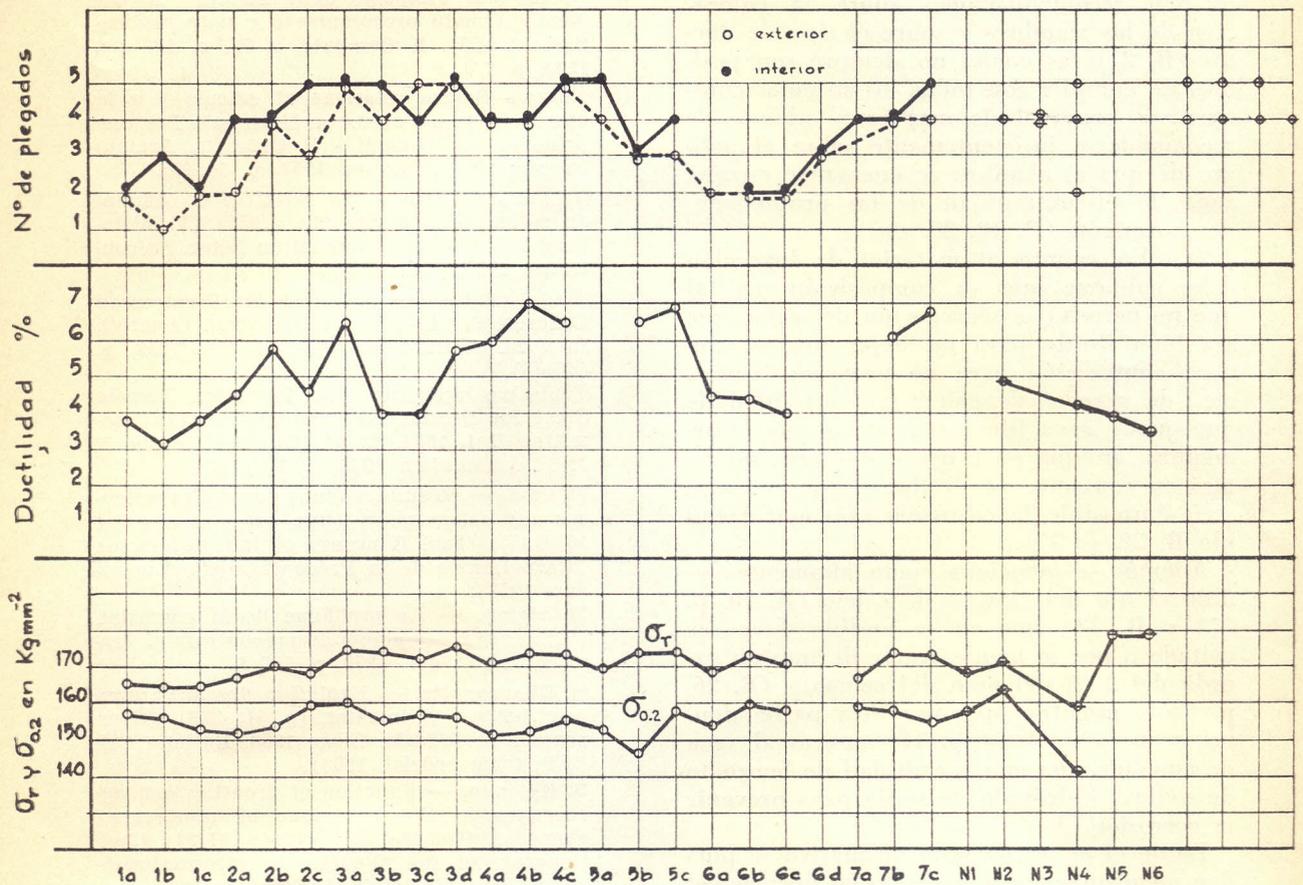


Figura Nº 12

cual se puede comprobar un paralelismo bastante grande entre los índices p y las ductilidades Δ sin mayor incidencia en la resistencia, lo cual daría razón a la hipótesis mencionada antes.

Puede ser interesante anotar que hay una cierta tendencia a agruparse los resultados de acuerdo con las vainas en que están enhebrados los alambres respectivos, lo cual podría indicar variación entre diversas partidas de alambre, ya que parece posible descartar, por todo lo dicho anteriormente, que la causa sea el diferente grado de corrosión.

En definitiva entonces, de todo lo expuesto en este artículo 17, se puede deducir que los datos obtenidos sobre las muestras representativas de los alambres en estado actual (con las reservas indicadas en el art. 1), no muestran ningún indicio claro de existencia de corrosión intercrystalina ni de fi-

suración capaz de disminuir su capacidad original.

V. — Conclusiones

20. El hecho de que no se haya podido comprobar esa alteración de su estructura interna no quiere decir que no convenga tomar todas las precauciones posibles para evitarlas, dado que es un material que ha sido sospechado y que ha estado en condiciones que podían haberla producido.

En ese sentido debe tratarse de que el medio en que quede encerrado el alambre sea lo menos favorable posible a la corrosión del mismo, pues en la mayor parte de las roturas espontáneas producidas se ha podido encontrar algún defecto de este tipo (B. 18, 20, 11. etc.).

Aparte de darle un recubrimiento mínimo adecuado lo cual en este caso no ofrece dudas se dan recomendaciones sobre la colocación de los alambres y sobre el tipo de ductos (B. 21) las cuales no siempre son posibles de cumplir con todos los sistemas constructivos como el de este caso, además de recomendarse insistentemente sobre el peligro de que el alambre se encuentre en una zona de discontinuidad de las propiedades del hormigón (B. 18, 20. etc.).

21. En cuanto al material de inyección debe cuidarse que su composición sea tal que no permita la segregación del agua, que sea bien fluido para no dejar huecos, con poca contracción para no provocar fisuras, etc., de manera de evitar la posibilidad de que quede agua libre en contacto con la armadura, aunque en general, esa agua no estará en contacto con el aire y, por lo tanto, sería imposible la corrosión (ver por ejemplo B. 22, p. 37).

Además se menciona como altamente dañino el uso del cloruro de calcio (B. 20, p. 173 y B. 33) que en lo posible debe ser evitado o por lo menos tratar de que no exceda del 2 % del peso del cemento (B. 26, p. 646), mientras que por otra parte algunos aconsejan (B. 22, p. 34) agregar al agua de amasado una cierta cantidad de benzoato de sodio e hidróxido de sodio para prevenir la corrosión.

Desde el punto de vista normativo se pueden mencionar a este respecto las normas del "Prestressed Concrete Institute" de 1958 (B. 27, p. 304), las "Criteria for Prestressed Concrete Bridges" del "Bureau of Public Roads" (B. 27, p. 315) y las normas Belgas (B. 4, p. 39), las cuales dan indicaciones del método general y de la composición de las mezclas a utilizar.

22. En definitiva se deduce que, admitida la representatividad total de las muestras estudiadas, se podrá afirmar que para que la estructura en estudio mantuviera su capacidad resistente original era suficiente terminar la construcción con las precauciones de inyección mencionadas anteriormente y, eventualmente, ejerciendo un sobretensado momentáneo.

Bibliografía

1. Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes. — Normes concernant les constructions en béton, en béton armé et en béton précontraint (SIA 162 - 1956).
2. Hormigón precomprimido. Normas para el dimensionado y ejecución. DIN 4227-1953.

(Manual Teórico-Práctico del Hormigón, BK. Buenos Aires 1957, p. 636/663).

3. Norme per l'impiego delle strutture in Cemento Armato precompresso e note esplicative. (2-8-55). Il Cemento, a 52, n. 12, dic. 1955, p. 2/9.
4. Normas Belgas relativas al cálculo y a la ejecución de las obras en Hormigón Precomprimido. (G. Rinaldi - Il Cemento Armato Precompresso. Génova 1954, p. 36/40).
5. Instructions provisoires relatives a l'emploi du béton précontraint, etc. (1953) (V. Weinberg et R. Vallette. Manuel du Béton Précontraint, 1955, p. 267/300).
6. Tentative Recommendations for Prestressed Concrete (ACI - ASCE) (American Concrete Institute Journal, v. 29, n. 7, jan. 1958, p. 545/78).
7. Tentative Specifications for High-Tensile Steel for Prestressed concrete. Dutch Committee B 4, 1954. (2 nd. Congress of the F. J. P. Amsterdam 1955, p. 188/192).
8. F. Levi. — Résultats d'une série d'expériences sur aciers pour béton pré-contraint (p. 137/145). (2nd. Congress of the Fédération Internationale de la Précontrainte", Amsterdam 1955).
9. M. Heuze. — Le problème de la corrosion sous tension des aciers de précontrainte. Tra-vaux, n. 302, déc. 1959, p. 707/8.
10. H. Chancenotte. — Evolution des armatures pour béton précontraint. (p. 513/523). (Symposium du RILEM, Liège 1958, Bulletin CERES, tome spécial, 1958).
11. B. Kelopun. — Function of grouting and anchorages in the behaviour of prestressed elements. (General Report) (p. 81/91) (2nd. Congress of the "Fédération Internationale de la Précontrainte", Amsterdam 1955).
12. T. Y. Lin. — Design of Prestressed Concrete Structures (Wiley 1955).
13. A. Bruggeling. — Experience and problems concerning the manufacture and the use of steel for prestressing. (General Report) (p. 212/230) (2nd. Congress of the "Fédération Internationale de la Précontrainte", Amsterdam 1955).
14. H. Killick A. J. Bannister. — Characteristics of prestressing tendons (p. 487/511) (Symposium du RILEM, Liège 1958, Bulletin CERES, tome spécial, 1958).
15. L. Belche. — Recherche des causes de la rupture spontanée des fils d'acier a haute résistance utilisés comme tirants dans des portiques, etc. Précontrainte-Prestressing, n. 2, juillet-déc. 1954, p. 65/75.
16. M. Ros. — Steel wire for prestressed concrete considered from the point of view of the designer (p. 669/698) (Symposium du RILEM, Liège 1958, Bulletin CERES, tome spécial, 1958).
17. E. Dehan. — Spécifications et méthodes d'essais des armatures spéciales des ouvrages en béton précontraint (p. 547/569) (Symposium du RILEM, Liège 1958, Bulletin CERES, tome spécial, 1958).

18. Prestressed-Concrete Pipe failure is attributed to wire corrosion. *Engineering News R.*, v. 150, n. 19, 7/V/53, pág. 24.
19. **J. Tobio.** — Control continuo de uniformidad en los alambres de acero para hormigón pretensado. *Informes de la Construcción*, a 12, n. 114, oct. 1959, 462-1.
20. **J. Bouvy.** — Some problems concerning high tensile steel for prestressed concrete from the users' point of view (p. 164/177). (2nd. Congress of the "Fédération Internationale de la Précontrainte", Amsterdam 1955).
21. **G. Magnel.** — Rôle de l'injection (p. 3/5) (2nd. Congress of the "Fédération Internationale de la Précontrainte", Amsterdam 1955).
22. **J. Bouvy.** — The grouting of cable ducts (p. 30/39) (2nd. Congress of the "Fédération Internationale de la Précontrainte", Amsterdam 1955).
23. **C. Bereton.** — User and producer difficulties with steel for prestressing (p. 156/163) (2nd. Congress of the "Fédération Internationale de la Précontrainte", Amsterdam 1955).
24. **A. Paduart.** — Comparative analysis of specifications and practice on prestressed concrete, used in various countries (p. 757/775) 2nd. Congress of the "Fédération Internationale de la Précontrainte", Amsterdam 1955).
25. **E. Dehan et F. Fontaine.** — Quelques informations concernant les armatures pour béton précontraint et intéressant l'utilisateur. *Annales Travaux Publics de Belgique*, 1957, n. 5 de octubre 1957, p. 19/31.
26. **S. Bate.** — The properties, testing and specification of steel for prestressed concrete. (p. 625/656) (Symposium du RILEM, Liège 1958, Bulletin CERES, tome spécial, 1958).
27. **H. Kent Preston.** — Practical Prestressed Concrete.
28. **W. Robertson.** — Stress corrosion cracking and Embrittlement. (Wiley 1956).
29. **A. S. Bruggeling.** — Prestressing Reinforcements. From the point of view of the Builder (p. 657/667) (Symposium du RILEM, Liège 1958, Bulletin CERES, tome spécial, 1958).
30. **W. Poniz et L. Zaleski-Zamenhof.** — Aciers pour constructions précontraintes au point de vue des expériences polonaises (p. 719/741) (Symposium du RILEM, Liège 1958, Bulletin CERES, tome spécial, 1958).
31. **H. Davis, G. Troxell and C. Wiskocil.** — The testing and Inspection of Engineering Materials (Mc Graw 1955).
32. *Johnson's Materials of Construction.* (Wiley 1939).
33. **Howard J. Godfrey.** — Corrosion Tests on Prestressed Concrete Wire and Strand. *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, v. 5, n. 1, march 1960, p. 45/51.

Noticias

RENOVACION DE LOS PERMISOS PARA INSTALACIONES ELECTRICAS

La Administración General de las Usinas Eléctricas y los Teléfonos del Estado ha comunicado a la A.I.U. el nuevo "Reglamento de Permisos" a regir desde el día 2 de enero de 1961, —haciendo notar que, de acuerdo con el artículo 81º del mismo, todos los permisos de firmas instaladoras vigentes, caducarán a los noventa días de su entrada en vigencia. Por consiguiente, las firmas interesadas deberán proceder, dentro de dicho plazo, a la renovación de sus respectivos permisos.

Los Asociados pueden consultar el referido Reglamento en nuestra Secretaría.

©

LA FEDERACION DE INDUSTRIAS BRITANICAS OFRECE BECAS PARA INGENIEROS

La Federación de Industrias Británica ofrece tres becas para ingenieros uruguayos graduados, para realizar un entrenamiento práctico en Gran Bretaña durante períodos que oscilan entre cuatro meses y dos años.

Se ruega a los interesados comunicarse con el Departamento Comercial de la Embajada Británica, Rincón 434, P. 5, Teléfono N° 9-25-01.