

DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS
DE LA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE

PUBLICACION N.º 7
LABORATORIO DE METALES

EL ACERO EN EL HORMIGON PRECOMPRIMIDO

ING. ELIAS AYARZA E.

EDITORIAL UNIVERSIDAD CATOLICA
Carmen 360- Fono 397765 - Santiago
1958

DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS
DE LA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE

PUBLICACION N.º 7

LABORATORIO DE METALES

EL ACERO EN EL HORMIGON PRECOMPRIMIDO

ING. ELIAS AYARZA E.

EDITORIAL UNIVERSIDAD CATOLICA
Carmen 360 - Fono 397765 - Santiago
1958

EL ACERO EN EL HORMIGÓN PRECOMPRESIONADO

Ing. Elías Ayarza E.

Laboratorio de Metales del Depto.
de Investigaciones Científicas y
Tecnológicas de la Universidad
Católica.

1º— *Introducción*

Desde hace algunos años la técnica del hormigón precompresionado se ha ido imponiendo cada vez más en numerosos países, por las ventajas de diverso orden que en muchos casos representa frente al hormigón armado común. En nuestro país, las posibilidades de un mayor uso de la precompresión se han visto disminuídas y prácticamente imposibilitadas por la falta de los aceros duros de alta resistencia que se requieren, debido a que nuestra continua escasez de divisas no ha permitido su importación.

Hasta el presente, solamente dos obras se han podido realizar en Chile, con la nueva técnica del hormigón precompresionado: un puente-sifón sobre el río Loncomilla, construído por el Departamento de Riego del Ministerio de Obras Públicas y un puente sobre el mismo río, en San Javier, de un largo total de 179 metros, con tramos de 27,30 m. Estas obras, pese a la dificultad que significa el ser las primeras ejecutadas en el país con una técnica nueva, han dado un resultado satisfactorio, principalmente la segunda de ellas.

El hormigón precompresionado, debido a la total ausencia de grietas, y al comportamiento elástico de su sección bajo todo los estados de carga, da una estructura de alta calidad que tiende a desplazar al hormigón armado común en numerosas aplicaciones en que anteriormente parecía insustituible. Su economía se basa principalmente en el ahorro de materiales, pues por emplear aceros de alta resistencia y buenos hormigones, requiere una menor cantidad de materiales. Es una técnica que requiere el empleo de materiales óptimos, pero que los utiliza con un alto rendimiento.

Este nuevo sistema se ha empleado con mucho éxito en puentes de luces intermedias, en que reemplaza con economía al puente metálico en los casos en que la luz es demasiado grande para proyectar en hormigón armado, pues el peso propio sería en este caso excesivo. Se ha empleado también ventajosamente en la construcción de acueductos, estanques y tuberías grandes

pues, por su ausencia total de grietas, garantiza la impermeabilidad de la obra. En otros países se ha utilizado bastante en la construcción en serie de losas y viguetas prefabricadas, aplicando la técnica de la pretracción a una armadura formada por una gran cantidad de alambres de pequeño diámetro, que se estiran antes de hormigonar y comprimen posteriormente por adherencia al hormigón ya endurecido. Con este sistema se ha construido también durmientes para vías férreas en numerosos países europeos desde hace varios años. Así, Alemania tiene en uso cerca de cuatro millones de durmientes de hormigón precomprimido e Inglaterra produce 200.000 al año, teniendo estos durmientes en uso en líneas de alta velocidad desde hace más de doce años sin que se adviertan fallas de ninguna especie.

El hormigón precomprimido puede representar una interesante contribución para la construcción en serie de viviendas con elementos prefabricados. En nuestro país, en que últimamente se ha estado estudiando nuevos materiales de construcción para dar solución al grave problema de la falta de viviendas, sería interesante estudiar la construcción de elementos prefabricados en este sistema. Serían principalmente viguetas y losas, delgadas e impermeables que, al ser hechas en gran cantidad, posiblemente resultarían económicas, obteniéndose así un buen ahorro de acero y madera en la construcción de viviendas.

En Chile nos hemos quedado totalmente atrasados en el empleo del hormigón precomprimido, que tan rápidos progresos ha hecho en numerosos países, incluso latinoamericanos. La fabricación de estos alambres en el país es perfectamente posible, pues sólo se trata de aceros al carbono, tratados térmicamente y trefilados. La dificultad principal está en producirlos económicamente, pues las inversiones iniciales serían relativamente altas y la demanda, en un principio, bastante reducida. Estos alambres pueden ser producidos en pequeña cantidad en algunas empresas metalúrgicas ya establecidas, aunque inicialmente a costos altos. También se puede estudiar su producción en conjunto con numerosos tipos de aceros especiales, principalmente laminados, que se necesitan cada vez más y que actualmente deben ser importados casi en su totalidad, como es el caso de los cables de acero, resortes, acero para maquinarias, etc.

2º— Principales sistemas empleados en la precompresión.

Los diferentes sistemas ideados para dar tensión a la armadura y asegurar su anclaje definitivo se pueden clasificar en dos grupos:

a) Precompresión con armadura pre-tensadas, en que se estira la armadura antes de verter el hormigón en los moldes y una vez que éste ha endurecido, se transmite la tensión de los alambres al hormigón por adherencia. Estos sistemas se emplean principalmente para obtener elementos prefabricados, en serie. Se utilizan como armadura alambres trefilados de pequeño diámetro (1,5 a 3mm.)

b) Precompresión con armaduras post-tensadas, en que los dispositivos de anclaje y el instrumental empleado para obtener las tensiones previas de

compresión se apoyan en el hormigón ya endurecido. Esta forma de precompresión es la que se emplea normalmente en la construcción de obras de cierta importancia como puentes y vigas de grandes luces. La armadura está constituida por cables formados al agruparse en forma conveniente y sin trenzar un número variable de alambres delgados de acero de alta resistencia, de diámetros comprendidos entre 5 y 10 mm. Los sistemas de post-tensado más utilizados hasta el presente son los de Freyssinet y Magnel.

3º— Medición de las propiedades mecánicas de los alambres.

Se efectuaron diversos ensayos con alambres trefilados de 5 mm. de los utilizados en el puente del río Loncomilla, con alambres importados de alta resistencia de 3, 3,25 y 1,5 mm. de diámetro y con alambres nacionales de 2, 3 y 4,18 mm. de diámetro.

Los principales ensayos efectuados corresponden a pruebas de doblado o plegado, pruebas de tracción, determinación del límite convencional de fluencia, dureza Rockwell superficial y determinación de las curvas de tensión-alargamiento y del módulo de elasticidad. El alargamiento a la ruptura se ha medido en una extensión de 7,2 diámetros, por ser esta distancia la empleada por numerosos autores, para poder comparar los resultados. El módulo de elasticidad E se ha medido a tensiones bajas, hasta 50 Kgs/mm².

El valor promedio de los resultados obtenidos puede resumirse en el cuadro siguiente:

Ensaye	Importados				Nacional
	φ5 mm.	φ3 mm.	φ3,25 mm.	φ1,5 mm.	φ4,18 mm.
Límite ruptura (Kgs/mm ²):	152,5	209	209,5	214	82
Límite fluencia:	120	184	169	176	76,2
Alargamiento en 7,2 diám.	6,3 %	5,4 %	7 %	9 %	— — —
Dureza Rockwell-C	40,5	43	46	— — —	— — —
Módulo elasticidad (Kgs/mm ² .)	19500	20900	19400	20450	19900
Dobladura plana (180°)	bien	falló (1)	bien	bien	falló (2)

(1) En el alambre de 3 mm. se produjeron profundas grietas y resquebrajaduras en la zona de plegado.

(2) En el alambre de 4,18 mm. se produjeron pequeñas fallas en el borde comprimido.

Según los resultados obtenidos podemos clasificar los alambres en tres grupos bien determinados:

1º— El alambre trefilado de 5 mm. de diámetro, con una tensión unitaria de ruptura del orden de 150 Kgs/mm². Presenta una buena resistencia, suficiente alargamiento y dobla perfectamente, sin mostrar grietas ni fallas. Es el tipo de alambre que más se ha empleado en las obras de hormigón precomprimido, agrupado formando cables de hilos paralelos, principalmente en los sistemas Freyssinet y Magnel.

2º — En este segundo grupo podemos clasificar a los alambres trefilados de menor diámetro y de alta resistencia. Presentan una tensión unitaria de ruptura del orden de 210 Kgs/mm² y asimismo, un alto límite convencional de fluencia. De estos alambres, el de 3 mm. de diámetro muestra cierta fragilidad, ya que falló en la prueba de dobladura plana, siendo el que presenta un menor alargamiento. Los alambres de 3,25 y 1,5 mm. de diámetro presentan buenas condiciones de resistencia y alargamiento, siendo del tipo de alambres que normalmente se emplean formando armaduras que trabajan por adherencia.

3º — Los alambres trefilados nacionales de 2, 3 y 4,18 mm. de diámetro, tienen resistencia del orden de 80 Kgs/mm², siendo el de 4,18 mm. el que presenta mejores propiedades. Al observarlos a través del microscopio, se ve que su contenido de carbono es muy bajo, no correspondiendo al que debe tener un alambre de acero duro para estructuras pretensadas. Por eso mismo, su resistencia a la ruptura es relativamente baja y han fallado ligeramente por aplastamiento en la prueba de dobladura plana.

De los ensayos efectuados y de los valores indicados por diferentes autores sobre alambres que se usan en la técnica del hormigón precomprimido, he podido determinar algunas propiedades que deben cumplir los alambres de acero duro para su uso en las armaduras pretensadas:

El alambre puede obtenerse del producto laminado en caliente, ya sea por tratamiento térmico o por trefilación en frío. Para cualquiera de estos dos tipos de alambre, la tensión unitaria mínima de ruptura deberá ser de 140 Kgs/mm² para alambres de 5 y 7 mm. Estos alambres se emplean normalmente formando cables de 10 o más hilos paralelos.

El alargamiento del alambre en la ruptura, para una longitud de 7,2 diámetros debe ser al menos de un 6%. (Esto equivale para alambres de 5 mm. de diámetro a un alargamiento de aproximadamente 2,5% en 20 cm.) Es conveniente complementar el ensaye de tracción con la prueba de dobladura plana, que permite apreciar posibles fallas en alambres excesivamente duros.

El límite convencional de fluencia debe ser al menos de un 75% de la resistencia a la ruptura.

En los casos en que la tensión de la armadura no se ha de transmitir al hormigón por aparatos de anclaje sino por simple adherencia, debe utilizarse alambres de un menor diámetro o con una superficie rugosa especial que aumente su adherencia.

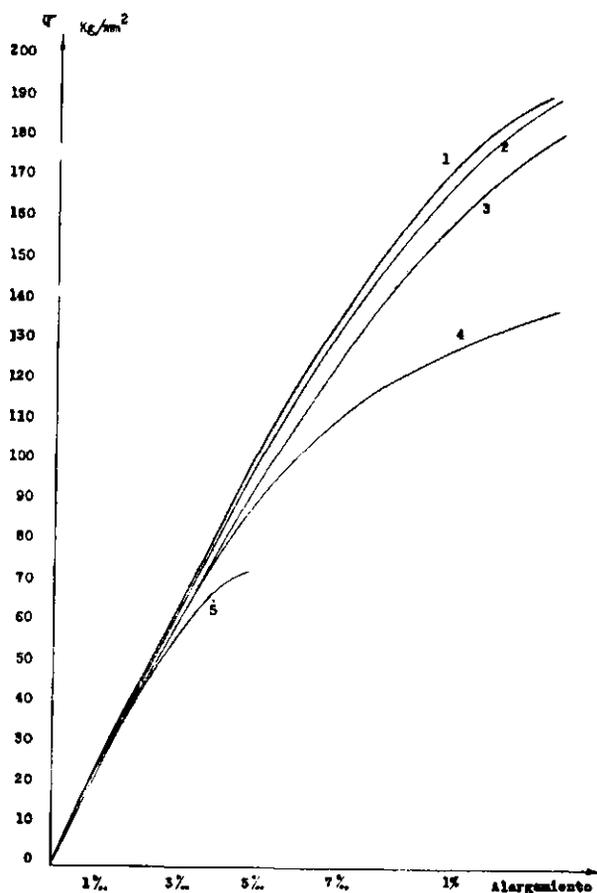
Los alambres delgados trefilados que se emplean como armadura que trabaja por adherencia, son normalmente de 2 a 3 mm. de diámetro y deben alcanzar una resistencia mínima a la ruptura de 180 Kgs/mm² y el límite convencional de fluencia debe ser a lo menos de un 80% de la resistencia a la ruptura.

El alargamiento que se obtenga en las pruebas de tracción puede ser algo menor que en los alambres de mayor diámetro. Los alambres de pequeño diámetro que trabajan por adherencia, normalmente forman armaduras rectilíneas.

El alargamiento de estos alambres para una distancia de 7,2 diámetros en la zona de ruptura no será inferior a un 5% y para una longitud de 20 cm. deberá ser como mínimo de un 2%.

Las principales curvas de tensión-alargamiento obtenidas en los ensayos efectuados se reproducen a continuación en la Fig. 1.

CURVAS TENSION-ALARGAMIENTO



- 1) Alambre ϕ 1,5 mm.
- 2) Alambre ϕ 3 mm.
- 3) Alambre ϕ 3,25 mm.
- 4) Alambre ϕ 5 mm.
- 5) Alambre ϕ 4,18 mm.

4.— *Propiedades químicas y metalográficas y tratamientos térmicos hechos en las muestras estudiadas.*

El análisis químico de los diferentes aceros que se emplean en las armaduras de hormigón precomprimido es muy semejante y se trata en general, de aceros al carbono con un contenido aproximado de 0,75% de C y bajo contenido de P y S. Se obtienen en hornos Siemens-Martin o mejor aún en hornos eléctricos.

En el siguiente cuadro se indican las propiedades químicas de los aceros para armaduras pretensadas producidos en las principales fábricas europeas:

FABRICA	C.—	Mn.—	Si.—	P.—	S.—	Ni.—	Cr.—
Rheinhausen	0,66%	1,42	0,31	0,043	0,018	0,07	0,075
Longwy	0,80	0,77	0,23	0,034	0,024	— —	— —
Fruchard	0,73	0,76	0,18	0,032	0,020	— —	— —
Châtillon	0,72	0,71	0,19	0,025	0,017	— —	— —
Felten	0,76	0,66	0,16	0,056	0,042	— —	— —
Acero sueco	0,85	0,45	0,20	0,20	0,12	— —	— —

El alambre que se ha utilizado en las obras hechas en Chile es trefilado de 5 mm. de diámetro y del siguiente análisis químico: C: 0,76%; Mn.: 0,72%; Si: 0,20%; P: 0,040%; S: 0,030%.

Por su bajo contenido en P y S y por no presentar inclusiones, se nota que este acero ha sido producido en horno eléctrico. Antes de ser trefilado, se le ha sometido a un temple y revenido a 450° — 500°C. Al microscopio se observa una estructura de troostita deformada por efecto del trefilado.

Con el fin de someter a este acero a diversos tratamientos térmicos y estudiar sus nuevas propiedades, se le hizo un recocido total, manteniéndolo a 800°C durante ½ hora y dejándolo enfriar lentamente dentro del horno. El alambre sometido a este recocido pierde totalmente el efecto de sus tratamientos anteriores, presentando una estructura de perlita laminar uniforme, como corresponde a un tipo de acero casi eutectoide como es el tratado. La resistencia a la ruptura bajó de 152,5 Kgs/mm² a 74,5 Kgs/mm², con una dureza Rockwell-B-90, desde la dureza anterior Rockwell-C-40,5.

Las muestras así recocidas se templaron en agua a 20°C, desde 800°C, sometiéndolas después a revenidos a 300°, 400°, 500° y 600°C. La estructura obtenida en el temple es de martensita, transformándose según los distintos revenidos en troostita y sorbita.

Este temple es excesivamente energético y produjo profundas grietas longitudinales. Se efectuó igualmente un temple en agua desde 900°C seguido de los mismos revenidos. Los resultados obtenidos son muy semejantes a los del temple desde 800°C.

Se efectuaron también temples al aire desde 900°, 950° y 1.000°C, calentando las muestras a esas temperaturas y dejándolas enfriar al aire en mo-

vimiento (15°C). El efecto de temple así obtenido fue muy pequeño, alcanzándose a resistencias a la ruptura del orden de 110 Kgs/mm². No se produjeron grietas de ninguna especie. En alambres de menor diámetro o de un mayor contenido en carbono se puede obtener con este tratamiento un verdadero efecto de temple.

También se efectuaron temples en aceite desde 800°C y 900°C, haciéndose el revenido de diversas probetas a 400°, 450°, 500° y 600°C. La estructura obtenida en el temple es de martensita, con algunas zonas de fina troostita. Con los revenidos hechos a continuación se obtuvo troostita y sorbita. Con estos temples no se produjeron grietas de ninguna especie. El efecto de temple fue más completo desde los 800°C.

A continuación, se dan los principales resultados de los tratamientos térmicos efectuados.

Resistencias a la ruptura (Kgs/mm².) de muestras templadas en aceite desde 800° y 900°C y revenidas a diversas temperaturas.

Revenidos a	400°	450°	500°	600°
Temple 800°	157	150	132	97
Temple 900°	150	143	129	98,5

Dureza Rockwell-C de muestras templadas en aceite desde 800° y 900°C, sin revenir y sometidas a diversos revenidos.

	sin rev.	rev. a 400°	450°	500°	600°
Temple 800°	61	47	40,5	36	25
Temple 900°	60	43	39	35	26

Dureza Rockwell-C de las muestras templadas en agua desde 800° y 900°C, sin revenir y revenidas a diversas temperaturas.

	sin rev.	rev. a 300°	400°	500°	600°
Temple 800°	62,5	—	44,5	38,5	32
Temple 900°	61	50	44,5	37	30

El tratamiento térmico que se ensayó con mejor éxito consistió en un temple en aceite desde 800°C, seguido de un revenido que consistió en calen-

tar la muestra a 450°, dejándola enfriar lentamente dentro del horno. Se obtuvo así una resistencia a la ruptura de 150 Kgs/mm² y un límite convencional de fluencia de 125 Kgs/mm², con un buen alargamiento y una buena resistencia a la prueba de dobladura plana. La curva de tensión-alargamiento del alambre así tratado está indicado en la Fig. 2.

MUESTRA TEMPLADA EN ACEITE DESDE 800° Y REVENIDA A 450°

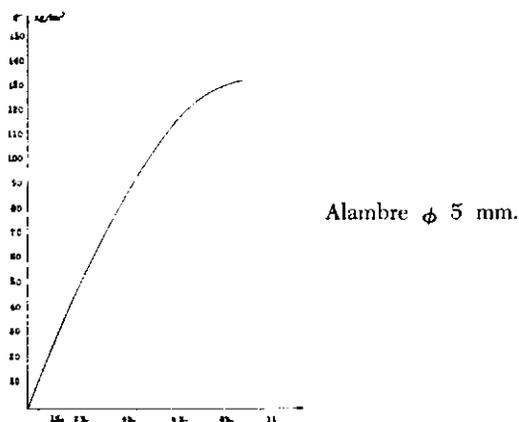


Fig. 2.—

5.— Posibilidades de fabricar estos aceros en el país.

Respecto a las posibilidades de producir estos alambres en Chile, hemos visto que son simplemente aceros al carbono que técnicamente podrían producirse sin grandes dificultades, siendo éstas principalmente de orden económico, por ser muy pequeña la demanda inicial que se tendría de estos aceros.

Se pueden producir en pequeña cantidad en algunas empresas metalúrgicas ya establecidas, que cuentan con buenos hornos eléctricos y casi todo el equipo necesario o bien se puede estudiar su fabricación en conjunto con otros aceros especiales, principalmente laminados, que se importan actualmente casi en su totalidad alcanzando su consumo a 2.000 toneladas anuales. Este consumo está formado principalmente por aceros al carbono y aleados para herramientas y para maquinarias, acero para resortes, para ejes y hueco para minas.

La elaboración del acero necesario no reviste dificultades especiales, siendo preferible su obtención en horno eléctrico, aunque su costo sea más alto que en hornos Siemens-Martin, porque se tiene una mejor calidad del producto obtenido.

El laminado en caliente es la operación que requiere inversiones más elevadas. Estos aceros duros presentan una mayor resistencia, produciendo un desgaste más rápido en los rodillos laminadores que el acero dulce corriente. El alambre usado en armaduras pretensadas es principalmente de 7 y 5 mm. de diámetro. Como en Chile no hay actualmente equipos laminadores que per-

mitan obtener barras menores de 10 mm., estos alambres tendrían que obtenerse por trefilación, o si se quieren obtener por tratamiento térmico, habría que adquirir el equipo laminador necesario para alcanzar los diámetros indicados.

El tratamiento térmico de estos alambres consiste en calentar el producto ya laminado hasta el diámetro deseado, a 850°–900°C y templearlo en un baño de plomo que esté a 380°–400°C. La estructura metalográfica obtenida es de bainita, lo que da a estos alambres una resistencia semejante a la que se obtendría si fueran trefilados. Debe efectuarse previamente una pasada de calibración. Si este tratamiento se efectúa en forma discontinua, las instalaciones requeridas no son extremadamente costosas.

El trefilado en frío se efectúa en alambres que han sido previamente sometidos a un temple seguido de un revenido a 450°–500°C. La estructura obtenida es una troostita uniforme que resiste bien a los esfuerzos producidos por el trefilado. Los alambres de 7 y 5 mm. así obtenidos alcanzan resistencias de 140 a 160 Kgs/mm² y un límite convencional de fluencia de 110 a 120 Kgs/mm². Las instalaciones necesarias para efectuar el trefilado son bastante simples y no representan fuertes inversiones.

En resumen, vemos que no hay grandes dificultades técnicas para producir estos alambres en el país, siendo las dificultades principalmente de orden económico, por la pequeña demanda inicial que se tendría de estos aceros.

Todos los ensayos y experiencias efectuados en este estudio se han desarrollado en los laboratorios del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad Católica de Chile.

“PUBLICACIONES DEL DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS DE LA U. CATOLICA”

Nº 1.—“Una posible explicación física de la acomodación del ojo”.

Dr. Erich P. Heilmaier.

* Nº 2.—“Casa Experimental de Suelo-Cemento”.

Ingeniero Hernán Ayarza y Arquitecto Rolando Maturana.

Nº 3.—“Cerámica Estructural”.

Ingenieros Sergio May y Jorge Trejo.

Nº 4.—“Muros monolíticos de suelo-cemento”.

Ingeniero Hernán Ayarza E.

Nº 5.—“Casa Experimental Nº 2 de Tierra Apisonada”.

Ingeniero Hernán Ayarza E.

Nº 6.—“Control de Calidad de los Hormigones de Cemento”.

Ingeniero Sergio Rojas.

Nº 7.—“El Acero en el Hormigón Precomprimido”.

Ingeniero Elías Ayarza E.

* Agotado.