

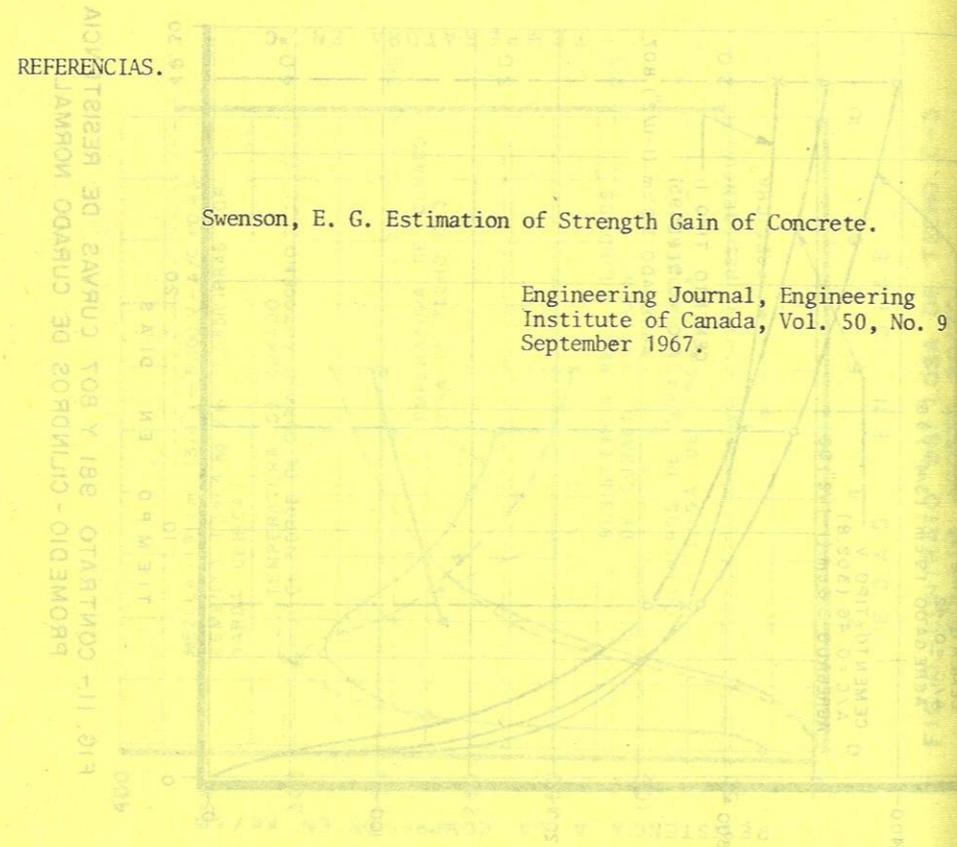
## RECONOCIMIENTO.

El autor agradece a The St. Lawrence Seaway Authority el haber permitido la publicación de este escrito. Igualmente agradece la colaboración otorgada por Mr. R. A. Franks, Ingeniero en Concreto, y al grupo de personas responsable del control del concreto durante la construcción de The Welland Channel By - Pass.

## REFERENCIAS.

Swenson, E. G. Estimation of Strength Gain of Concrete.

Engineering Journal, Engineering Institute of Canada, Vol. 50, No. 9 September 1967.



Traducción: Ramiro Luna Salinas  
Revisión de traducción: Oscar González Garza

## CONSTRUCCION Y CONTROL DE CALIDAD DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA PARA LA TORRE CN.

John A. Bickley\*

## RESUMEN

Cuando la torre CN se termine, ésta se elevará 550.16 m (1,805 pies). Los primeros 457.2 m (1,500 pies) de la torre están hechos de concreto post-tensado colados con cimbras deslizantes. Los cimientos se llevaron cerca de 7,645 m<sup>3</sup> (10,000 yd<sup>3</sup>) de concreto y la superestructura cerca de 30,585 m<sup>3</sup> (40,000 yd<sup>3</sup>).

Los problemas de generación de calor en el concreto fueron minimizados empleando concreto con cemento tipo IV y mezclas del tipo IV con el tipo I, altas resistencias fueron logradas en el lugar, y se alcanzó una velocidad de deslizamiento de cimbras hasta de 7.32 m/día (24 pies/día).

El colado con cimbras deslizantes se llevó a cabo con éxito en condiciones climatológicas extremas desde julio de 1973 hasta febrero de 1974.

Todo se realizó con un alto grado de control. Esto produjo un concreto de gran uniformidad con resistencias mayores a las especificadas, pero con cierta economía.

Los ensayos acelerados llevados a cabo aseguraron la calidad de concreto después de 48 hr de ser mezclado. Probaron ser valiosos al confirmar la resistencia y uniformidad del concreto y en el valor psicológico que tenía para todos los que participaron.

**PALABRAS CLAVE:**- Ensaye acelerado; aditivos; agregados; inclusión de aire; cementos; concretos; lechadeado; efectos del calor en el concreto; concretos de alta resistencia; ensaye de materiales; control de calidad; cimbra deslizante y análisis estadístico.

\* Vice-Presidente y Gerente General de la Cía. "Servicios de Ensaye para la Construcción", Toronto, Ontario, Canadá.

ALGUNOS ASPECTOS DE LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO  
EN LA CONSTRUCCION DE LA TORRE C.N.

La Torre CN tendrá una altura de 550.3 mts (1,805 pies) una vez terminada. Los primeros 457 mts (1,500 pies) son de concreto post-tensado y colada con cimbra deslizante.

La cimentación consta de un volumen de 7,600 m<sup>3</sup> (10,000 yd<sup>3</sup>) de concreto, y la super estructura, colada con cimbra deslizante, un volumen de 30,500 (40,000 yd<sup>3</sup>) de concreto.

En el verano de 1969, fuimos solicitados para preparar un reporte sobre los problemas de Tecnología del concreto que pudieran presentarse en la construcción de esta torre. Los objetivos a cubrir serían: materiales, diseño de las mezclas, producción del concreto y transportación vertical del concreto.

Se propuso "deslizar" los tubos y puentes de esta estructura durante un período aproximado de siete meses, de marzo a septiembre de 1970.

Era necesario durante 24 horas al día, cinco días a la semana "estregar" a la cimbra un concreto con características uniformes tanto de plasticidad como de fraguado, y bajo cualquier condición ambiental.

Aún más, dicho concreto habría de ser de una alta resistencia, con tener aire incluido, proporcionar un acabado arquitectónico aceptable y de ser posible de color brillante.

Aun cuando la técnica de la cimbra deslizante está bien establecida en este caso, dado la altura y duración del "deslizamiento" poco usuales, se requería de un mayor grado de confianza en la obra, para todos los aspectos del proyecto.

Por una variedad de razones hubo un retraso de 3 1/2 años para iniciar la construcción, y durante este tiempo el diseño de la torre sufrió un cambio fundamental; de tres columnas circulares unidas por puentes horizontales se cambió a una sola columna con tres aletas en forma de huso como se muestra en la fotografía. Este cambio en el diseño introdujo nuevos problemas con respecto al concreto. La restricción existente en la base y su probabilidad de falla constituían una gran preocupación, así como el voluminoso muro extremo para las tres aletas, el cual constituía un foco de atención como un área de posibles problemas debido a los efectos del calor de hidratación sobre la resistencia del concreto en el lugar.

ENSAYES INICIALES DE LABORATORIO.

En vista de lo anterior se decidió considerar el uso de cemento de bajo calor y se procedió a llevar a cabo un programa de ensaye de laboratorio con las dos marcas de cemento tipo IV de que se dispone en Toronto. Además, se decidió especificar el f'c a 90 días en lugar de 28 para tratar de reducir el contenido de cemento.

La tabla I nos proporciona los datos de ensaye.

TABLA I

RESULTADOS DE ENSAYE CON CEMENTO TIPO IV

Fábrica de Cemento	1	2	1	2
Contenido de Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	330	330	420	420
Revenimiento (cm)	10	12	10	11
Peso Unitario (kg/m <sup>3</sup> )	2348	2351	2329	2346
Contenido de Aire (%)	6.5	6.2	5.7	6.3
Resistencia a la Compresión Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )				
a 7 días	275	270	369	335
a 28 días	356	380	447	430
a 91 días	471	423	512	488

Las relaciones resistencia-tiempo-contenido de cemento fueron excelentes para ambos cementos.

Estas mezclas mostraron además buenas características de calor durante la hidratación, tal y como se esperaba.

DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO.

Los parámetros tales como tipo y tamaño de agregado, docilidad y contenido de aire fueron especificados. El diseño de la mezcla para la superestructura tenía que hacerse con un criterio de sobre-diseño que asegurara que no más de 1 en 100 resultados cayeran por debajo de 0.85 f'c.

Durante el período de la construcción de la cimentación se efectuaron ensayos a escala natural en el campo de las mezclas propuestas para la superestructura.

PLANTA DE CONCRETO.

Fue establecida una planta de concreto en el lugar con el único propósito de abastecer el concreto para la superestructura. Sus características fueron:

ron especificadas en detalle y sujetas a la aprobación de los ingenieros antes otorgar el contrato.

PROGRAMA DE CONTROL DE CALIDAD.

Se estableció un Laboratorio de Campo anexo a la Planta de Concreto manejado por seis técnicos trabajando durante las 24 horas en turnos ligeramente empalmados.

El laboratorio se equipó en lo que concierne a curado, recapeado ensaye a compresión de los especímenes, determinaciones de contenido de humedad ensayos acelerados, granulometrías e impurezas de los agregados.

Los técnicos verificaban:

- Contenido de humedad de los agregados.
- Granulometría de los agregados.
- Limpieza de los agregados.
- Almacenamiento de agregados en depósitos y tolvas.
- Dosificación.
- Revenimiento.
- Contenido de aire.
- Resistencia a la compresión.

- a).- a 48 horas, empleando el ensaye acelerado autógeno desarrollado por Smith y Tiede.
- b).- a 7, 28 y 90 días después de curado estándar con niebla.

Se llevaba récord de dosificación de aditivos, temperatura y condiciones atmosféricas.

Los resultados de los ensayos con curado acelerado y estándar se analizaban y reportaban continuamente con nuestra evaluación y recomendación.

Se tomaba una serie de especímenes de ensaye por cada 56.5 m<sup>3</sup> (pies<sup>3</sup>) de concreto.

PROGRAMA ACELERADO PARA EL CONCRETO DE LA CIMENTACION.

Con objeto de encontrar un tiempo de duración menor para la construcción de las cimentaciones, el contratista propuso colar las cimentaciones en partes de 1.80 m (6 pies) de espesor, cuando menos semanalmente.

Para determinar los efectos de este programa de colado con respaldos

a la generación de calor, llevamos adelante un análisis matemático basado en los siguientes conceptos:

- Temperatura de la roca. 10°C (50°F)
- Temperatura del concreto en la entrega. 16°C (60°F)
- Temperatura ambiental promedio de Abril. 12°C (53°F)
- Cemento. Tipo IV con un calor de hidratación de 60 calorías por gramo a 7 días.
- Contenido de cemento. 190 kg/m<sup>3</sup> (350 lb/yd<sup>3</sup>).

Los cálculos fueron efectuados empleando dos métodos diferentes; el de Schmidt y el de Carlson. Abajo en la Fig. 1 aparece una gráfica del segundo método. Ambos métodos fueron substancialmente concordantes.

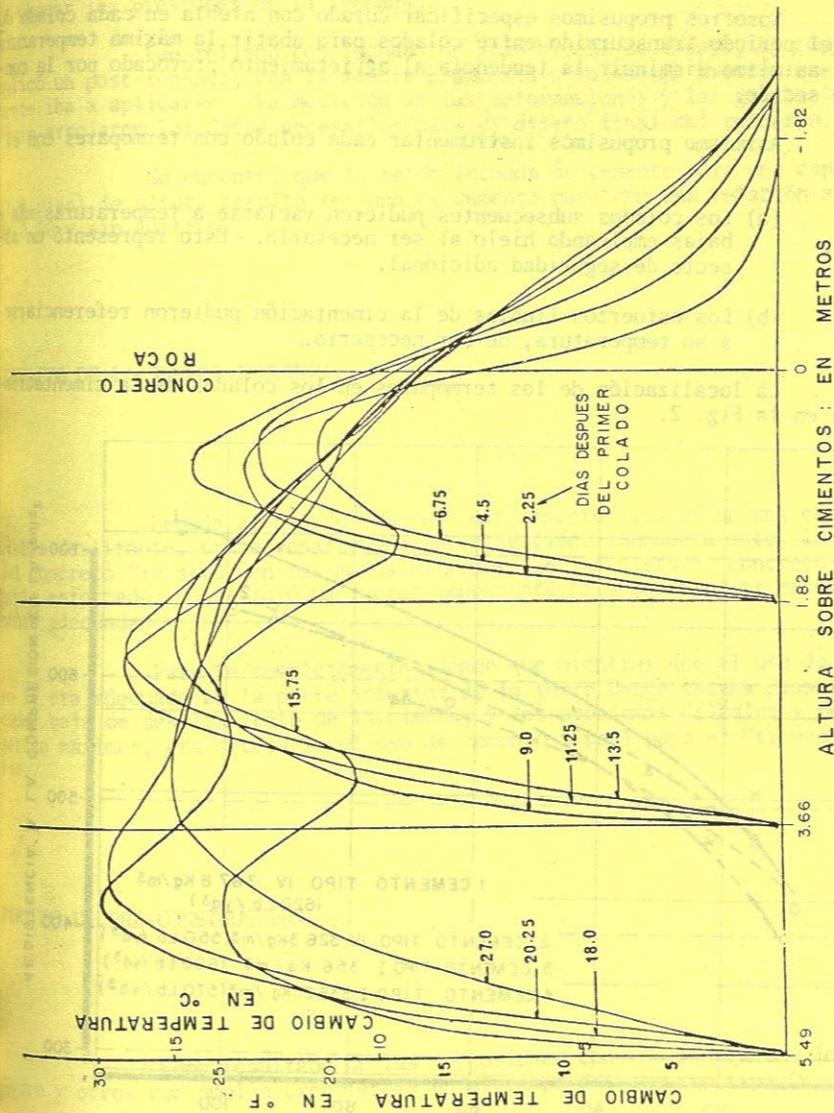


FIG. 1

Nuestros resultados fueron los siguientes:

Máxima fluctuación de temperatura 16.6°C (30°F) ocurriendo a 0.6 (2 pies) a partir del fondo de la 3a. capa de 1.80 m (6 pies), después de los 4 días de colada esta tercer capa.

Gradiente máximo 27°C/m (15°F/pies) cerca de la cara superior de la capa durante los primeros dos días posteriores al colado.

La máxima temperatura alcanzada se comparó favorablemente con la práctica de concreto de grandes masas empleada en presas no-reforzadas y el gradiente de temperatura no fue del todo severo. Se concluyó que cualquier grieta que pudiera presentarse, sería superficial y poco profunda y aparecería en la superficie de cada capa.

En nuestros cálculos no se consideraron los espacios vacíos de la cimentación, de ahí que fueran más conservadores.

Nosotros propusimos especificar curado con niebla en cada colado durante todo el período transcurrido entre colados para abatir la máxima temperatura alcanzada y asimismo disminuir la tendencia al agrietamiento provocado por la tracción de secado.

Asimismo propusimos instrumentar cada colado con termopares con el fin de que:

- (a) Los colados subsiguientes pudieran vaciarse a temperaturas más bajas empleando hielo al ser necesario. Esto representó un aspecto de seguridad adicional.
- (b) Los esfuerzos finales de la cimentación pudieran referenciarse a su temperatura, de ser necesario.

La localización de los termopares en los colados de la cimentación se muestran en la Fig. 2.

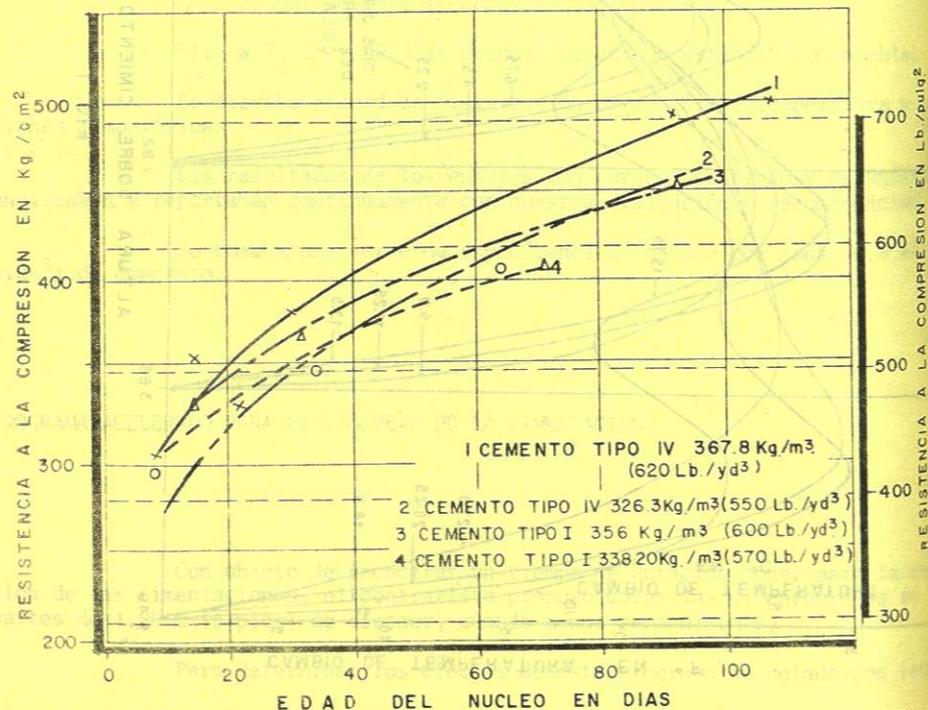


FIG. 2

CONSTRUCCION DE LA TORRE CN

Las características de temperatura de la masa de concreto colada fueron muy aceptables y cerca de las predichas.

INVESTIGACIONES SOBRE LA LECHADA DE CEMENTO.

Fue construida una torre de 60 m (200 pies) de alto y los ductos del tipo empleado en la torre se fijaron a ésta. Se bombearon varias lechadas de cemento en capas de 30 m (100 pies) para determinar una mezcla satisfactoria y para checar las presiones de la lechada.

Fue relleno con lechada un gran bloque de ensaye, al cual se le aplicó un post-tensado, con la mezcla propuesta a la máxima presión que probablemente iba a aplicarse. La medición de las deformaciones y las grietas en la superficie arrojaron los datos necesarios para el diseño final del refuerzo.

Se encontró que la mejor lechada de cemento para una capa de 60 m (100 pies) de altura resultó ser uno de cemento puro con una relación agua-cemento de 0.50 y sin aditivo.

CONCRETO DE LA SUPERESTRUCTURA.

Debido al uso de concreto con cemento tipo IV en una estructura con cimbra deslizante, era necesaria una investigación. Aunado a esto, la resistencia del concreto "in situ" en los muros extremos (de las aletas), concreto masivo altamente esforzado, constituyó un factor importante para desarrollar mezclas técnicamente adecuadas.

Parecía completamente idóneo que mientras que el uso de cemento tipo IV era adecuado en la parte inferior de la torre donde estaba planeada una velocidad baja de deslizamiento de la cimbra, y los problemas de calor y restricción serían máximos, era necesario el uso de cemento tipo I para el "tronco" de la torre.

PERIODO DE PRE-CONSTRUCCION.

Como resultado de las discusiones con representantes del Ontario Hydro y otros con amplia experiencia en el campo del cemento tipo IV, se identi-

caron un número de áreas que requerían investigación exhaustiva.

Estas incluían:

- (a) Efecto del uso de aditivo retardante.
- (b) Problemas de calor como una relación de la restricción de la expansión y problemas de grietas.
- (c) Tiempos de fraguado a temperaturas ambiente y del concreto a 18°C (65°F) y menores.
- (d) Efecto de las bajas resistencias tempranas sobre el soporte de la cimbra deslizante.
- (e) Características de flujo a edades tempranas del concreto con cemento tipo IV, las cuales influirían en el post-tensado.
- (f) Efecto en el color debido a un cambio subsecuente a cemento tipo I.

ENSAYES DETALLADOS DE LABORATORIO.

Se hizo necesario considerar todos esos aspectos por lo que se procedió a efectuar un número de investigaciones.

Tiempos de fraguado y desarrollo de la resistencia a edades tempranas.

Para asegurarnos de que las características de fraguado y el desarrollo de resistencias a edades tempranas del concreto con cemento tipo IV, fueran adecuadas para la cimbra deslizante, fueron efectuadas cuatro mezclas de concreto, dos con cada uno de los cementos de bajo calor disponibles.

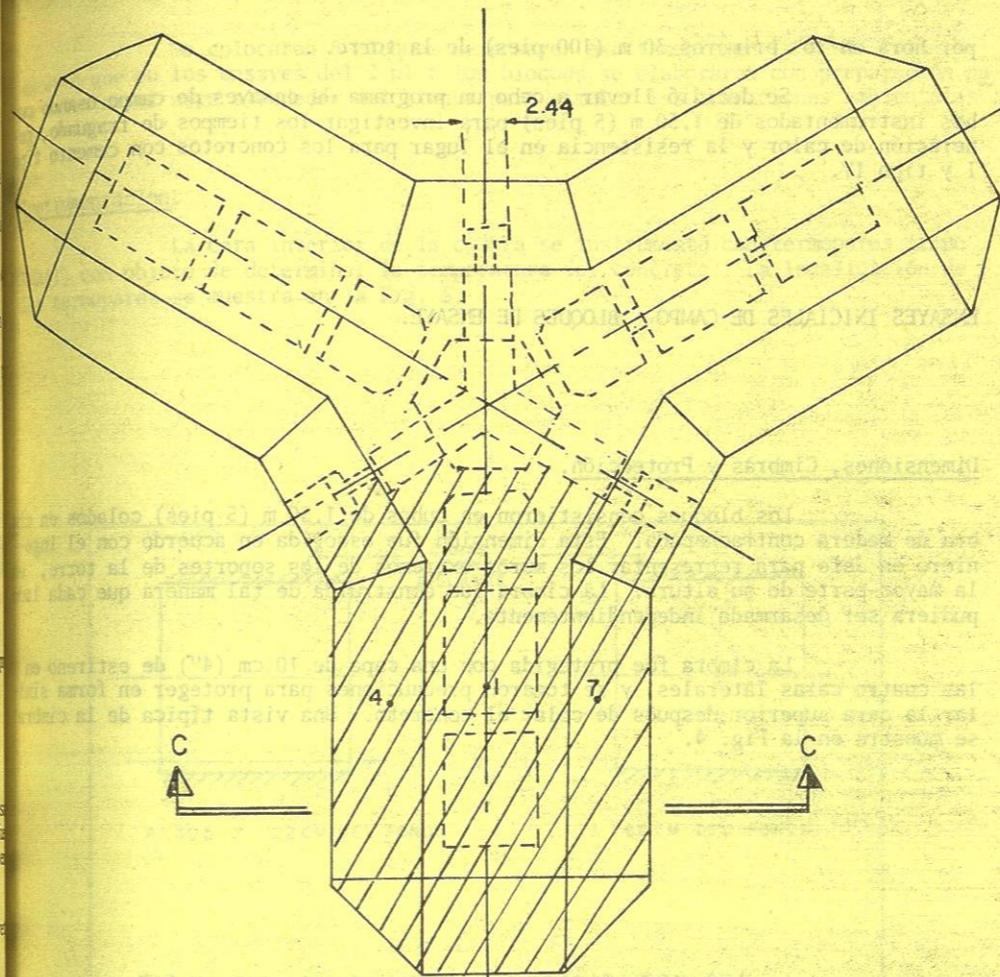
Fueron usadas dosis estándar de aditivo reductor de agua, uno retardante y otro no-retardante.

Proporciones de la mezcla	kg/m <sup>3</sup>	lb/yd <sup>3</sup>
Cemento	330	550
Agua	127 - 143	212 - 238
Caliza 1.9 cm (3/4")	1080	1800
Arena	845	1410

Se checó la temperatura de un cilindro de cada mezcla; desde el momento de colarlo hasta el fraguado final. Las curvas de tiempo de fraguado resultaron como aparece en la Fig. 3.

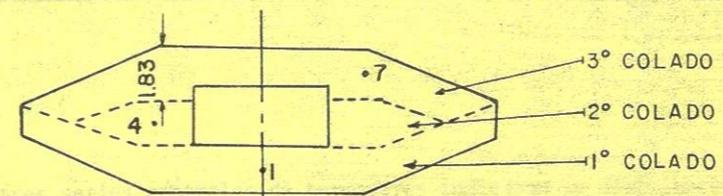
Se encontró que la resistencia temprana del concreto con cemento tipo IV era adecuada para soportar la cimbra deslizante.

Los tiempos de fraguado a temperaturas abajo de 21°C (70°F) no se consideraron excesivos para la velocidad de deslizamiento de 10 a 15 cm (4" a 6")



PLANTA

● TERMOPARES



SECCION C-C

FIG.3-SECUENCIA DE COLADO