

Universidad Nacional de Ingeniería

PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA CIVIL



**INTRODUCCION TEORICA AL DISEÑO DE CONCRETO
PARA REACTORES NUCLEARES**

T E S I S

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE

INGENIERO CIVIL

ZOILA MARIA ORJEDA TARAMONA

LIMA ★ PERU ★ 1979

A MIS PADRES Y HERMANOS

MI PROFUNDO AGRADECIMIENTO Y GRATITUD
AL INGENIERO ENRIQUE RIVVA LOPEZ POR
SU INVALORABLE AYUDA EN LA REALIZA -
CION DE ESTE TEMA Y SU INCANSABLE DE-
DICACION DE MAESTRO A TRAVES DE MIS
AÑOS UNIVERSITARIOS

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS
EN RECONOCIMIENTO Y GRATITUD
POR EL CARIÑO Y AMISTAD QUE ME
BRINDARON EN TODOS LOS AÑOS QUE
COMPARTIMOS.

INTRODUCCION TEORICA AL DISEÑO DE CONCRETO PARA REACTORES NUCLEARES

CONTENIDO

1.- INTRODUCCION

2.- PROPIEDADES DEL CONCRETO

- 2.1 Medida de la densidad del concreto para la construcción de pantallas protectoras contra la irradiación.
- 2.2 Resistencia del Concreto.
- 2.3 Comportamiento Tiempo-Dependiente del concreto.
 - 2.3.1 Ecuaciones predictivas para la deformación por escurrimiento plástico.
 - 2.3.2 Deformación por escurrimiento plástico bajo esfuerzos uniaxiales.
 - 2.3.3 Deformación por escurrimiento plástico bajo estados multiaxiales de esfuerzos.
 - 2.3.4 Módulo tiempo-dependiente de Poisson.
 - 2.3.5 Condiciones variables de carga y temperatura.
 - 2.3.6 Influencia de la edad de cargado.
 - 2.3.7 Efectos combinados de temperatura y edad de cargado.
 - 2.3.8 Procedimiento general para hallar las funciones tiempo-dependientes transformadas.
 - 2.3.9 Limitaciones del modelo matemático.

2.4 Expansión térmica del concreto.

2.4.1 Termocalorímetros para concretos y cementos.

2.4.2 Fundamento teórico de los termo-calorímetros.

2.5 Contenido de humedad en concretos pesados.

2.5.1 Transferencia de humedad por efecto de gradiente de temperatura.

2.5.2 Teoría sobre la transferencia térmica de humedad en poros capilares de sólidos coloidales.

2.5.3 Significado de la transferencia térmica de humedad para el concreto.

2.6 Cálculo de la cantidad de agua no evaporable en la pasta.

2.7 Temperatura y secado.

Características fenomenológicas del secado.

2.7.1 Breve resumen de la aplicación de la teoría de difusión al proceso de secado del concreto.

3.- EFECTOS DE LA RADIACION DE NEUTRONES EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO :

3.1 Gas generado por el concreto durante la irradiación de neutrones.

3.2 Modificación en las propiedades físicas del concreto.

- 3.3 Modificación de pesos.
- 3.4 Cambios de dimensión.
- 3.5 Módulo de elasticidad dinámico.
- 3.6 Resistencia a la flexión.
- 3.7 Resistencia a la compresión.
- 3.8 Efectos en el coeficiente de conductividad térmica.

4.- MATERIALES DE FABRICACION DE CONCRETOS DENSOS PROTECTO - RES CONTRA LA IRRADIACION.

- 4.1 Selección del agregado grueso.
- 4.2 Influencia del agregado en la resistencia del con -
creto cuando es sometido a temperatura.
- 4.3 Módulo de elasticidad del agregado.
- 4.4 Concreto pesado hecho con serpentina.
- 4.5 Serpentina.
- 4.6 Propiedades de las pantallas hechas con concreto de
serpentina.
- 4.7 Concretos pesados con agregado hidratado de hierro.
- 4.8 Agregados de acero para concretos densos.

5.- PROCESO DE COLOCACION

- 5.1 Fuerzas internas de tensión en el concreto denso de
bidas al proceso de colocación.
 - 5.1.1 Colocación in-situ del concreto pesado.
 - 5.1.2 Flujo de aire a través de las fracturas del
concreto.

6.- RECOMENDACIONES

7.- BIBLIOGRAFIA.

INTRODUCCION

Cuando en el amanecer del 16 de Julio de 1,945, en el desierto de Nuevo México un expectante grupo de destacados científicos esperaba la explosión de la primera bomba atómica, ni ellos mismos sabían si la bomba estallaría o no, pero como inventores confiaban en que su creación tendría el poder suficiente para concluir la Segunda Gran Guerra.

Aquella bomba estalló, el éxito del experimento superó todo cuanto de él se podía esperar y en ese instante se inició la Era de la Energía Atómica, mas deslumbrante y al mismo tiempo mas peligrosa que ninguna de las anteriores.

Hoy, 34 años después sabemos exactamente lo que podemos esperar del átomo, la fuente inagotable de energía para la paz o el poder destructivo patéticamente grandioso.

Uno de los relatos mas interesantes de la Ciencia es el que nos da a conocer como un grupo bastante grande y disperso de investigadores científicos en laboratorios de muchos países se afanaron trabajando para sentar las bases de la Teoría Atómica; de esta teoría es muy poco lo que compete a nuestro tema y lo estrictamente necesario lo exponemos a continuación.

Experiencias realizadas por Lord Rutherford demostraron que el átomo no es un ente maciso sino sumamente permea

ble ya que puede ser atravesado por partículas y que tiene condensada toda su masa en el núcleo el cual si era impermeable al paso de partículas. Las sustancias radiactivas - que se desintegran espontáneamente como el uranio, radio, son fuentes permanentes de energía, la que se produce por transmutación de la materia, durante la cual un átomo de dichas sustancias elimina de su seno partículas con carga eléctrica, transformándose en átomos de un elemento distinto.

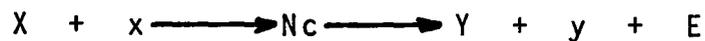
El radio al eliminar partículas alfa, (átomos de helio que han perdido sus dos electrones) se transforma en un elemento gaseoso llamado radón, el que a su vez por sucesivas transmutaciones da lugar al radio A, radio B, radio C, radio D, radio E, radio F y por último al plomo.

Fue Rutherford quien buscó la forma de romper el átomo y lo logró lanzando sobre la materia partículas alfa emitidas por el radio como pequeños proyectiles previendo además la necesidad de encontrar el modo de que una vez producida la desintegración ésta pudiera continuar por sí sola y una vez logrado esto encontrar la manera precisa de controlar todo el proceso.

Muchos científicos fueron descubriendo los secretos de la fisión nuclear demostrando la eficacia de los neutrones para bombardear elementos pesados, de número atómico -

alto, los que por ser inestables tienden a buscar equilibrio.

La fórmula general y más simple de la reacción nuclear es :



X , núcleo padre o bombardeado

x , partícula incidente o bombardeante

Nc, núcleo compuesto.

Y , núcleo hijo o producto

y , partícula emitida

E , energía.

Si el núcleo padre es radiactivo se obtiene la radioactividad artificial y se emiten radiaciones alfa, beta, gamma, positrones, neutrones y protones.

Si la desintegración ocurre de manera instantánea como en la bomba atómica, en millonésimos de segundo, la energía producida sería tremenda y catastrófica pero si la reacción se regula de manera que se produzca poco a poco se tendría una reacción en cadena controlada; ésto, exactamente, es lo que se hace en los reactores o pilas atómicas.

A partir de la invención de los reactores nucleares se inicia la aplicación de la energía atómica con fines pacíficos y ya actualmente existen miles de experimentos ten-

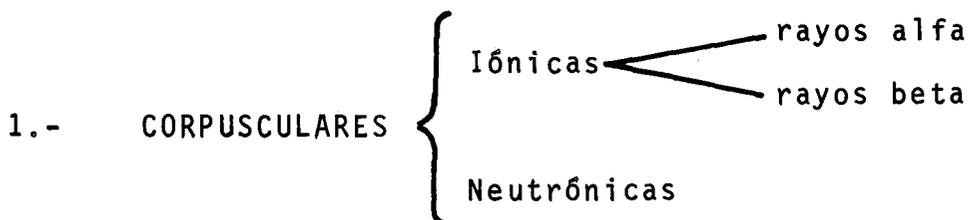
dientes a explorar los inmensos poderes constructivos de la energía atómica. Gran Bretaña, los Estados Unidos de Norteamérica, Francia, la Unión Soviética, Italia, Finlandia, México, Brasil y Argentina entre otros países mantienen programas de investigación nuclear y a diferencia de la estricta reserva que se guarda en lo que concierne a armas atómicas y termonucleares los resultados de estas investigaciones son publicados y difundidos. En 1,955 la ONU patrocinó la primera conferencia internacional sobre el empleo pacífico de la energía atómica y en Ginebra, Suiza, 38 países contribuyeron con mas de 1,000 informes científicos, tres años mas tarde en una segunda conferencia 46 gobiernos presentaron mas de 2,000 trabajos.

Explicar los principios y funcionamiento de un reactor escapa a los objetivos de esta tesis, bástenos saber que con los procesos que ocurren en él se producen las radiaciones alfa, beta, gamma y de neutrones además de la emisión de calor en escala bastante grande; esta cantidad de calor es aprovechada fundamentalmente para producir electricidad sistema que se encuentra en auge en los países desarrollados, especialmente USA, en donde durante los tres primeros meses de este año (1,979) debido al crudo invierno y a que las reservas de carbón eran inaccesibles por la nieve, un 12 % de la energía eléctrica total provino de centrales termonucleares; es muy cierto que en el Perú, probablemente nun

ca los inviernos nos demandarán tal cantidad de energía, pero también es cierto que el desarrollo que todos como peruanos anhelamos estará mas cercano el día que contemos con energía suficiente, autoalimentaria y económica para la industria y demás programas del plan de desarrollo.

CLASES DE RADIACIONES

En una reacción en cadena se presentan las siguientes radiaciones :



2.- ELECTROMAGNETICAS Rayos gamma

3.- TERMICAS

Los rayos beta son partículas con carga eléctrica negativa, los rayos alfa están compuestos por dos partículas con carga eléctrica positiva y los rayos gamma no poseen energía eléctrica. Los neutrones son partículas sin carga eléctrica componentes del núcleo del átomo y elemento de unión de los protones.

a) Partículas alfa.

átomos de helio que han perdido sus dos electrones (He²⁺)

radio 1.3×10^{-13} cm.
velocidad... muy elevada y variable instantáneamente.
velocidad media... 1.7×10^9 cm/seg.
energía 2 a 9 Mev.
penetración.... fracción de mm.

b) Partículas beta.

masa 9.1×10^{-28} gr.
radio 10^{-13} cm.
velocidad... variable hasta un límite superior cercano a
0.99 veces la velocidad de la luz.
energía..... varios Mev.

c) Radiación gamma. Es de naturaleza ondulatoria como la luz pero con una longitud de onda extremadamente pequeña que va de 0.1 a 0.001 Å por lo que tiene una frecuencia muy rápida; se caracteriza por su peligrosidad debido a su gran poder de penetración y por su alcance a grandes distancias.

Dosis máximas permisibles por el cuerpo humano.

Las dosis máximas se consideran para una exposición semanal de 40 horas, lo aceptable para un trabajador corriente.

rayos alfa _____ no son peligrosos si no se
ingieren o inhalan las emi-
soras.

Energía

rayos beta ——— 1 Mev ——— 94 partículas/cm²/seg.

radiación gamma — 1 Mev ——— 4,000 fotones/cm²/seg.

neutrones térmicos — 0.25 Mev — 2,000 neutrones/cm²/seg.

neutrones rápidos — 2 Mev — 40 neutrones/cm²/seg.

1 Mev ——— 1 Megavoltio electrón es equivalente a
1.602 x 10⁻⁶ ergios.

La unidad de la radiación gamma es el roentgen, al que se define como la cantidad de radiación que pierde 83.8 ergios de energía por absorción al pasar a través de 1 gr. de aire. La dosis permisible llega a 0.3 r pero se recomienda no exceder 0.1 r por semana de 40 horas.

Conocido, aunque de manera muy escueta lo que es un reactor nuclear y lo que ocurre en él, en los siguientes capítulos se desarrolla la teoría introductoria básica, necesaria para el diseño de concreto como constitutivo de los recipientes y blindajes de los reactores nucleares. La idoneidad del concreto para estos fines ha sido ya demostrada en las casi tres décadas en las que se lo ha usado e investigado para tales fines; esta idoneidad reside en la naturaleza misma del concreto, el que al poseer agua en su constitución proporciona los átomos ligeros de hidrógeno y oxígeno necesarios para la atenuación y absorción de los neutrones; así mismo los agregados de alto peso específico que se

pueden usar aportan los elementos necesarios para atenuar - las radiaciones gamma.

Este tema se ha basado en múltiples trabajos realizados por científicos de muy diversos países, trabajos que - en cada caso estaban referidos únicamente a un aspecto de la naturaleza o comportamiento del concreto o que en su - gran mayoría se referían solamente a resultados experimentales específicos; en la presente tesis se ha tratado de integrar todos estos resultados, hipótesis y teorías de la manera mas clara posible siguiendo el orden mas conveniente.

2. PROPIEDADES DEL CONCRETO

2.1 MEDIDA DE LA DENSIDAD DEL CONCRETO PARA LA CONSTRUCCION DE PANTALLAS PROTECTORAS CONTRA LA RADIACION.

La densidad es la características más importante del concreto preparado para la construcción de pantallas protectoras contra la radiación o de cápsulas receptoras de reactores; en ambos casos la radiación puede ser gamma y/o de neutrones.

En realidad no puede resumirse en pocas hojas la influencia que la densidad tiene en este tipo de concretos - por lo que aquí se diga puede parecer incompleto, pero - esta propiedad es tratada a lo largo de todo este trabajo y prácticamente en todos los acápite por su importancia en este tipo de concretos.

La densidad del concreto para los requerimientos del diseño está dada en función de los términos siguientes :

| | |
|---------------------------|--------------------------------|
| Densidad de diseño : | ρ (gr/cm ³) |
| Densidad mínima | ρ_m (gr/cm ³) |
| Menor desviación standard | s (gr/cm ³) |

Uno de los parámetros determinantes de la densidad - del concreto es la humedad. Generalmente la humedad mínima del diseño no es la suficiente y una deficiencia de agua resulta en serios deterioros en las propiedades de atenuación

de radiación y en nuestro caso afecta también la densidad.

La variación standard "s" nos predice el rango de variación para la densidad y es calculada con la fórmula :

$$s^2 = \frac{(\rho_1 - \rho_m)^2 + (\rho_2 - \rho_m)^2 + \dots + (\rho_n - \rho_m)^2}{n-1}$$

donde $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ son las densidades obtenidas de ensayos individuales a probetas y "n" indica el número de probetas. En casos ordinarios cuando la variación en la densidad de los agregados del concreto no es significativa la densidad del concreto puede mantenerse considerablemente constante o variar muy levemente según el orden de magnitud y de manera lineal.

Es muy recomendable que la desviación standard estimada sea más o menos como el 2% de la densidad mínima.

La densidad de diseño debe ser calculada como sigue:

$$\rho_{\text{diseño}} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \leq 0.98 \rho_{\text{mínimo}} - \text{pérdida de humedad}$$

Es de especial consideración y atención la evalua-ción de la homogeneidad de los constituyentes del concreto lo que es muy importante cuando hay asentamientos debidos a las formas o en las zonas donde es difícil hacer un control de calidad. Este factor juega un rol muy importante en la confiabilidad de los ensayos preliminares.

Los ensayos para la determinación de la densidad del concreto deben hacerse con probetas típicas, cubos de 20 cm. de lado ó cilindros de 15 cms. de diámetro y 30 cms. de altura. Los moldes deben ser de acero y los ensayos deben planearse de la manera mas cuidadosa.

En el caso del diseño de pantallas protectoras contra la radiación gamma específicamente, la densidad es la primera consideración. Cuando la reducción de densidad por pérdida de humedad es estimada en 0.10 gr/cm^3 la densidad del concreto para pantallas protectoras a la radiación gamma está restringida por :

$$\rho \text{ (gr/cm}^3\text{)} \leq (0.98 \rho_m - 0.10) \text{ (gr/cm}^3\text{)}$$

ρ_m del concreto fresco será :

$$\rho_m^2 \geq 1.02 (\rho + 0.10) \text{ (gr/cm}^3\text{)}$$

En el caso de concretos densos para la construcción de pantallas expuestas a la radiación de neutrones en los que el factor agua es uno de los más importantes, la evaporación de ésta debe ser prevista durante la colocación y después de ésta y debe tenerse muy en cuenta las condiciones ambientales de fraguado las que además de influir en el contenido final de agua del concreto determina la densidad, la que está dada por :

$$\rho \leq 0.98 \rho_m \text{ ————— } \rho_m \text{ obtenida en ensayos}$$

Densidad que debe esperarse en la estructura final.

2.2 RESISTENCIA DEL CONCRETO

Las condiciones bajo las cuales actúa el concreto en el caso de las cápsulas de presión y los blindajes de los reactores nucleares y de las pantallas protectoras son muy severas. Los siguientes factores pueden influenciar la resistencia a la compresión del concreto in-situ.

1.- Los ciclos tempranos de temperatura, producidos rápidamente durante el periodo de hidratación del cemento; este gradiente súbito puede tener efectos en la resistencia a la compresión del cubo de concreto.

Los resultados muestran que el concreto denso hecho con piedra pulida presenta los resultados más adversos al ciclo temprano de temperatura. Estos estudios indican que si la temperatura del concreto se incrementa durante el periodo temprano a 53°C, entonces, la resistencia del concreto, cuando está hecho con agregado pulido, puede reducirse como máximo en 35 % cuando se compara con los resultados del cubo standard. Las conclusiones de los trabajos investigatorios con concretos de agregados silicosos, indican que estos materiales son afectados por los ciclos tempranos de temperatura; sin embargo, la resistencia, aproximadamente a los 100 días después -

del calentamiento temprano puede ser de un 10 a un 15 % menor que el obtenido en los cubos standard de la misma edad.

2.- Las condiciones de temperatura y calor a que va a estar expuesto el concreto durante el servicio.

3.- Los periodos prolongados de exposición a la radiación nuclear. En trabajos relativamente recientes, (1,972) publicados por B.T. Kelley se indica que muchas de las propiedades importantes del concreto en el diseño de reactores y de pantallas protectoras son afectadas por una exposición considerablemente larga a la radiación de neutrones, y que además, el espectro de una irradiación es frecuentemente diferente para lo experimental y para lo real en la práctica. Los resultados indican que las dosis de neutrones de 2×10^{19} neutrones/cm² en concretos hechos con piedra pulida, reducen la resistencia entre un 35 y 65% respectivamente en 30 años.

En realidad, para diseños peruanos probables, los flujos máximos de neutrones serían mantenidos en niveles considerablemente bajos.

4.- Distribución de esfuerzos de compresión multiaxiales. Generalmente, éstos se presentan en las cápsulas de contención de reactores, en las cuales los campos de esfuerzos de compresión multiaxial ocurren en la cara externa de las cápsulas y en la cara interna, cuando la presión de gas es ce-

ro. También ocurren esfuerzos multiaxiales en todo el espesor de la pared inducidos por preesfuerzos, gradiente térmico y presión de gas.

Los trabajos llevados a cabo por Richart, Garas y Price indican que el incremento en la resistencia a la compresión del concreto causada por restricción triaxial puede ser calculada mediante la siguiente fórmula :

$$\sigma_1 = \sigma_2 + a \sigma_3$$

Donde :

σ_1 es el esfuerzo de ruptura a la compresión.

σ_2 esfuerzo de compresión multiaxial.

σ_3 esfuerzo cuando existe restricción triaxial.

a constante.

2.3 COMPORTAMIENTO TIEMPO - DEPENDIENTE DEL CONCRETO

Una de las consideraciones más importantes en el diseño y evaluación de la seguridad del concreto pretensado para cápsulas de reactores nucleares es el comportamiento tiempo-dependiente del concreto, bajo condiciones variables de temperatura, humedad y esfuerzos. Aparte de la deformación elástica, normal e instantánea del concreto, existen 2 tipos de deformación tiempo-dependientes, la deformación por escurrimiento plástico y la deformación por contracción,

las cuales pueden dar lugar a efectos importantes y posteriores en los blindajes de concreto, tales como la pérdida de esfuerzos iniciales, grandes deformaciones ya en el mismo blindaje ó la aparición de esfuerzos residuales que se presentan con el cambio de las condiciones de carga, en este caso, estos esfuerzos residuales pueden acarrear daños en el blindaje por los esfuerzos de tensión que podrían producirse.

Algunos de los factores determinantes de las relaciones tiempo dependientes entre esfuerzos y deformaciones en el concreto es la transferencia de humedad, tratada más ampliamente en este tema y las diversas respuestas del concreto a las condiciones de humedad, sequedad, las reacciones químicas que implica la propia hidratación, lo que va cambiando continuamente las propiedades del concreto aunque el tiempo transcurrido nos parezca lo suficientemente largo como para considerarlo en su condición final. La temperatura y sus variaciones, así como también la edad del concreto en los estados de carga y las interrelaciones entre estos factores son de vital importancia para el caso de reactores nucleares. Sobre este particular, los experimentos con temperatura son de muy difícil control razón por la cual los trabajos que se pueden consultar son muy escasos y sus resultados además conllevan discusiones conflictivas.

En 1,934 los investigadores Davis y Hamilton reportan que el comportamiento tiempo-dependiente de la deformación del concreto a temperaturas de -18 , 21 y 38°C no se altera, y si así ocurría era de un modo muy poco sensible. Algo más tarde, A. Tehuer reporta que la deformación instantánea del concreto dentro de los primeros 10 minutos se incrementa con el incremento de temperatura, apreciando además que las deformaciones se incrementan a mayores temperaturas. El investigador C. Lee concluye en sus trabajos que aunque los cambios en la deformación sean pequeños, éstos se incrementan a mayores temperaturas y llega a determinar que la deformación inmediata del concreto es independiente de la temperatura. A partir de este punto existen múltiples trabajos en los que se investiga el comportamiento tiempo-dependiente del concreto y sus deformaciones, los que ampliamente confirman la dependencia de la edad y la temperatura; trabajos a los cuales desgraciadamente por razones circunstanciales no se puede tener acceso en nuestro medio. A continuación se presenta un resumen del material encontrado sobre el tema, la primera parte, sin consideraciones de temperatura y en la segunda presentando un modelo matemático para el caso en que ésta es variable y los esfuerzos no son constantes.

2.3.1 ECUACIONES PREDICTIVAS PARA LA DEFORMACION POR ESCURRIMIENTO PLASTICO : Estas relaciones se derivaron

teniendo muy en cuenta las relaciones tiempo-dependientes entre la deformación y los esfuerzos y asumiendo además que el concreto es un medio homogéneo e isotrópico y que la ley de superposición de esfuerzos es enteramente válida. En un instante dado la deformación total para el concreto sometido a carga sostenida está determinada por la adición de la deformación elástica ϵ_e , la deformación por contracción ϵ_k y la deformación ϵ_c , por escurrimiento plástico. La deformación ϵ_c es la debida a la relación tiempo-dependiente - existente entre deformación, temperatura y carga, la deformación ϵ_k es la debida a causas físicas y químicas independientes de la carga aplicada y la deformación elástica es la que ocurre en el mismo instante de cargado, estrechamente asociada con las características elásticas del concreto, esta deformación elástica decrece con el tiempo aunque es frecuente considerarla constante, el decrecimiento es el resultado del incremento en el módulo de elasticidad en el tiempo; para este estudio la deformación elástica fue considerada constante.

2.3.2 DEFORMACION POR ESCURRIMIENTO PLASTICO BAJO ESFUERZOS UNIAXIALES :

Hubert Rusch en 1,960 presente relaciones tiempo-esfuerzo-deformación para el concreto y basándonos en su obra "Research Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete" indicamos lo siguiente si solamente se consi

dera la deformación ϵ_c se puede desarrollar una relación - esfuerzo-deformación ϵ_c , sustrayendo la deformación elástica y la contracción, de la deformación total.

En las figuras a y b se puede apreciar que si el es fuerzo aplicado es igual a σ donde $\sigma < f'_c$ y si este es fuerzo es mantenido por un periodo de tiempo t_i donde $t_i > 0$ la deformación total es igual a ϵ_i y está compuesta por la de formación instantánea ϵ_e y la deformación ϵ_c .

La figura b nos indica que las relaciones entre es fuerzos y deformación por escurrimiento plástico son línea les siempre y cuando esta ϵ_c sea mantenida sobre un límite denominado límite proporcional, decreciendo la pendiente - de la función con el incremento del tiempo de cargado. La inversa de las pendientes de estas relaciones representa - la deformación ϵ_c por unidad de esfuerzo : ϵ_c/σ ; de este - modo para el concreto cargado bajo condiciones controladas, la deformación ϵ_c por unidad de esfuerzo para un tiempo t transcurrido después de cargado, es función de este tiempo, de la edad a la que se cargó el concreto τ , del valor del esfuerzo σ , lo que puede ser expresado así :

$$\frac{\epsilon_c}{\sigma} = F(t, \tau, \sigma) \quad \dots\dots\dots (1)$$

en donde $F(t, \tau, \sigma)$ está definida como la función deforma- ción por escurrimiento plástico unitario. La relación en -

tre esta función y el esfuerzo se muestra en la figura c la cual indica que la función unitaria es constante a niveles de esfuerzo menores que el límite proporcional y que se incrementa cuando el esfuerzo también se incrementa.

La figura d ilustra la función deformación tiempo-dependiente unitaria y como puede apreciarse esta función cesa cuando se alcanza el esfuerzo a la rotura σ_b , con el que el concreto llega a su resistencia última.

Para niveles de esfuerzos menores que el límite proporcional σ_a , la función unitaria es independiente del esfuerzo tal como demuestra $F(t, \tau)$. Para esfuerzos mas grandes que el límite proporcional, pero menores que σ_b , la función unitaria está entre $F(t, \tau)$ y $F(t, \tau, \sigma_b)$, la cual es una región en la que no se produce fallas.

En las figuras a y b la curva OB representa la deformación ϵ_c última para un tiempo igual a ∞ y σ_a es el límite proporcional.

A niveles de esfuerzos menores que σ_a , las relaciones entre esfuerzos y deformación ϵ_c en el tiempo t_i está definida por $F(t_i, \tau, \sigma)$. Como ejemplo tenemos que para $t=0$ existe la relación OA, la cual indica que para un nivel de esfuerzo la deformación es 0. La deformación que ocurre para un tiempo de cargado tendente ∞ está representada en la curva OB.

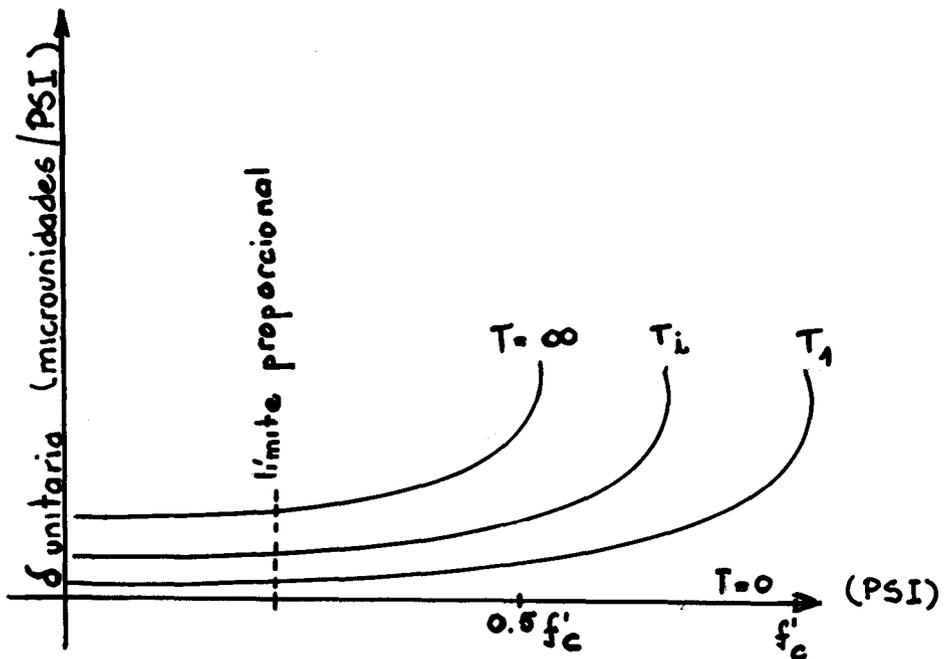


Fig. 2.3.c

Relación entre la deformación t-d unitaria y el esfuerzo del concreto sometido a carga sostenida.

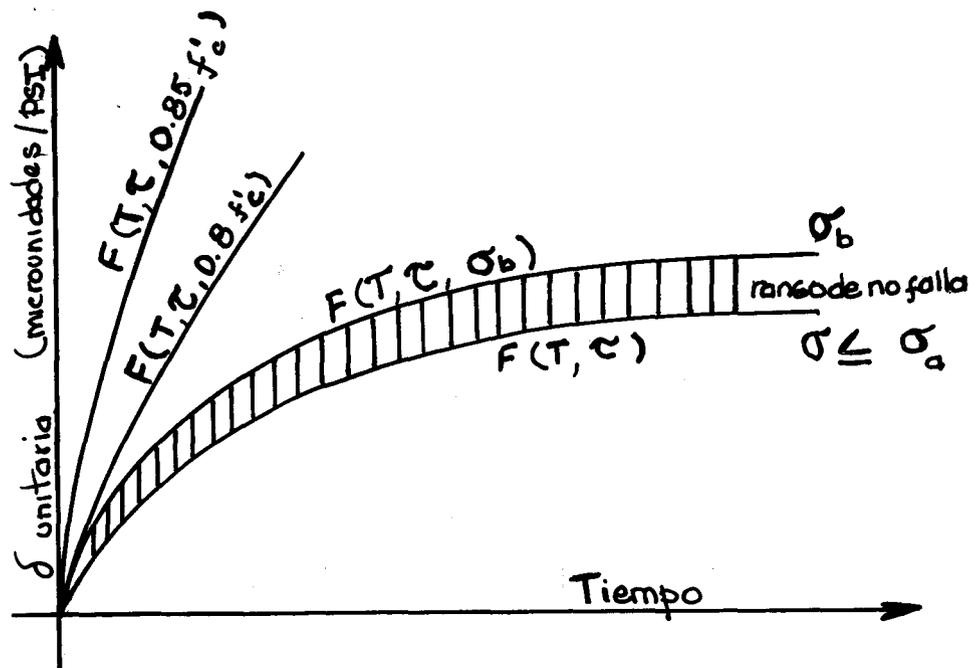


Fig. 2.3.d

Relación entre función t-d unitaria y el tiempo.

Más allá del límite proporcional σ_a la relación deja de ser lineal y la deformación se incrementa más rápidamente que el esfuerzo.

La curva AB representa la relación existente entre esfuerzos y deformaciones de falla, B, es la deformación límite de falla, el punto en el cual la deformación ϵ_c más la deformación elástica sumarán la máxima deformación que puede producirse en el concreto y la falla ocurrirá.

Las características más importantes de esta función, están resumidas a continuación :

1) En el mismo instante de cargado el valor de $F(t, \tau, \sigma)$ es 0.

2) Para cada curva de $F(t, \tau, \sigma)$, hay un límite proporcional debajo del cual la relación esfuerzo-deformación es lineal. Este límite proporcional varía con el tiempo y con la edad a la cual se cargó el concreto, por lo tanto - el número de límites proporcionales existentes es infinito, pero si se considera solamente una edad de cargado, existe un límite proporcional mínimo el cual es definido - como el límite proporcional absoluto del concreto.

3) Existe un esfuerzo tal que la suma de la deformación elástica y la deformación ϵ_c es igual a la deformación máxima tolerable del concreto, es decir la máxima deformación para la cual el concreto no falla. Este esfuerzo

es una función del tiempo y de la edad a la cual se cargó el concreto.

Para un concreto dado con un tiempo transcurrido después de cargado, existe un esfuerzo máximo el cual es definido como un límite a la falla. Si el nivel de esfuerzo es más bajo que el límite a la falla, la deformación final se aproximará a un valor constante, la última deformación, para un tiempo aproximadamente ∞ , contrariamente, si el esfuerzo aplicado es más alto que el límite a la falla, el concreto fallará.

4) Cuando los esfuerzos son menores que la resistencia absoluta al cargado sostenido, la deformación ϵ_c varía más lentamente, y para un tiempo aproximadamente infinito esta deformación se aproxima a un valor último.

A niveles de esfuerzos menores que el límite proporcional las relaciones entre el esfuerzo y la deformación son lineales, con una pendiente constante para un tiempo dado. La pendiente sin embargo es tiempo-dependiente. Puesto que la función esfuerzo-deformación es lineal para un tiempo dado cuando el esfuerzo es menor que el límite proporcional, la función deformación tiempo-dependiente por unidad de esfuerzo puede ser expresada como :

$$F(t, \tau) = \frac{\epsilon_c}{\sigma}$$

donde σ es menor que el límite proporcional.

La función existente entre ϵ_c unitario, el tiempo t y la edad a la que se carga τ , debe satisfacer las siguientes condiciones :

I.- Cuando $t=0$ la función unitaria es 0.

$$\lim_{t \rightarrow 0} F(t, \tau) = 0$$

II.- Para un tiempo infinito, la función se aproxima a un límite :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F(t, \tau) = K$$

III.- Para un tiempo infinito, la velocidad de cambio de la función se aproxima a 0 :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\partial F(t, \tau)}{\partial t} = 0$$

Varias funciones matemáticas pueden derivarse de estas condiciones, sin embargo después de muchos estudios, la siguiente expresión parece ser la mejor :

$$F(t, \tau) = K (1 - e^{-\alpha t^B})$$

en donde :

α y B son constantes.

K , valor de la función F independiente del esfuerzo.

t , tiempo después de cargado.

Partiendo de que F es una función de la edad a la cual se carga el concreto τ , y del tiempo transcurrido después de cargado, t , K debe ser también función de éstos ó ser una constante. La función K se representa $K_{(\tau)}$

En estudios previos se ha demostrado que la deformación ϵ_c última es mucho mayor cuando el cargado del concreto se ha producido a una edad temprana y el autor Arutyunyan sugiere que la deformación ϵ_c unitaria última podría ser expresada como una función de la edad de cargado. Por todo ésto, la función unitaria puede ser expresada así :

$$F(t, \tau) = K_{(\tau)} (1 - e^{-\alpha t^B})$$

donde $t > 0$

La afirmación de que la deformación ϵ_c unitaria, es solamente función de la edad de cargado es bastante discutible pues es bien conocido que esta deformación es función de muchos factores, tales como temperatura, humedad relativa, esfuerzos, etc. No obstante puede considerarse la afirmación convenientemente válida.

Una vez determinado el valor de la función $F(t, \tau)$ la deformación ϵ_c del concreto debido a un esfuerzo uniaxial sostenido puede ser determinada con :

$$\epsilon_c = \sigma F(t, \tau)$$

Si el tiempo después de cargado se aproxima a ∞ la deformación ϵ_c última puede ser calculada y será igual a $\sigma K(\tau)$. En la teoría matemática de la elasticidad, cuando un material elástico está sujeto a esfuerzos en una sola dirección, existe una deformación elástica en la dirección transversal. Si el concepto de Poisson se extiende y se aplica al comportamiento tiempo-dependiente, la deformación ϵ_c en la dirección y ó z será :

$$(\epsilon_c)_y = (\epsilon_c)_z = - \nu_c (\epsilon_c)_x$$

Si ν_c es el módulo de Poisson y $(\epsilon_c)_x$ es la deformación en la dirección cargada, la cual puede ser calculada a partir de la función unitaria como :

$$(\epsilon_c)_x = \sigma_x F(t, \tau_x)$$

entonces la deformación ϵ_c en la dirección transversal será :

$$(\epsilon_c)_y = (\epsilon_c)_z = - \nu_c \sigma_x F(t, \tau_x)$$

2.3.3 DEFORMACION POR ESCURRIMIENTO PLASTICO BAJO ESTADOS MULTIAXIALES DE ESFUERZOS :

Sobre este particular, estudios previos concluyeron sobre la validez de la aplicación del principio de superposición en el estudio del comportamiento tiempo-dependiente y una evaluación preliminar de la información sobre los pro

gramas experimentales asociada con estos estudios, indicó que la superposición era razonablemente válida y suficientemente precisa para el material y las condiciones de ensayo en el caso del concreto.

Por lo tanto para un estado multiaxial de esfuerzos, si las cargas son aplicadas a edades del concreto τ_x, τ_y, τ_z en las direcciones x, y, z respectivamente, entonces la deformación ϵ_c en estas direcciones puede ser expresada :

$$\begin{aligned}(\epsilon_c)_x &= \sigma_x F(t, \tau_x) - \nu_c \sigma_y F(t, \tau_y) - \nu_c \sigma_z F(t, \tau_z) \\(\epsilon_c)_y &= \sigma_y F(t, \tau_y) - \nu_c \sigma_z F(t, \tau_z) - \nu_c \sigma_x F(t, \tau_x) \\(\epsilon_c)_z &= \sigma_z F(t, \tau_z) - \nu_c \sigma_x F(t, \tau_x) - \nu_c \sigma_y F(t, \tau_y)\end{aligned}$$

Si las cargas son aplicadas simultáneamente a la edad τ del concreto a especímenes cilíndricos en la dirección axial involucrando solamente esfuerzos axiales y radiales, entonces la deformación ϵ_c puede ser expresada :

$$(\epsilon_c)_a = F(t, \tau) (\sigma_a - 2 \nu_c \sigma_r) \quad (2)$$

$$(\epsilon)_r = F(t, \tau) (\sigma_r - \nu_c (\sigma_a + \sigma_r)) \quad (3)$$

Para utilizar estas dos últimas ecuaciones deben estimarse valores para la deformación ϵ_c y determinar la función F unitaria y el radio de Poisson. Por consiguiente, para poder desarrollar las ecuaciones predictivas de deformación ϵ_c es necesario primero desarrollar la expresión de la ecuación 1 y obtener valores estimados del módulo de Poi

sson y luego si se trata de un estudio, comparar los valores evaluados de la deformación ϵ_c mediante las ecuaciones predictivas con los valores medidos experimentalmente.

2.3.4 MODULO TIEMPO-DEPENDIENTE DE POISSON (MODULO t-d)

Aunque varios estudios preliminares a 1,972 indicaban resultados poco claros sobre los efectos del módulo de Poisson en el comportamiento tiempo-dependiente del concreto, estudios posteriores indicaban definitivamente la necesidad de investigar los efectos del módulo de Poisson, para la predicción del comportamiento tiempo-dependiente de la deformación cuando el concreto está expuesto a una serie de esfuerzos multiaxiales.

La siguiente expresión fue derivada de la teoría de la elasticidad y se usó para calcular el módulo de Poisson t-d para especímenes sujetos a estados de esfuerzos uniaxiales y biaxiales a niveles menores que el límite proporcional.

$$v_c = \frac{\sigma_a(\epsilon_c)_r - \sigma_r(\epsilon_c)_a}{2 \sigma_r(\epsilon_c)_r - (\epsilon_c)_a(\sigma_r + \sigma_a)}$$

donde :

v : es el módulo t-d de Poisson.

σ_a : es el esfuerzo axial.

- r : es el esfuerzo radial
 $(\epsilon_c)_a$: es la deformación axial t-d del concreto.
 $(\epsilon_c)_r$: es la deformación radial del concreto.

En los trabajos experimentales consultados se encontró que el promedio para este módulo en el caso de cargas uniaxiales y una temperatura de "24°C" era 0.150; para 66°C el promedio fue 0.149.

Las ecuaciones predictivas de la ϵ_c unitaria fueron obtenidas sustituyendo los valores de la misma función F unitaria en las ecuaciones 2 y 3; de este modo, es necesario evaluar la exactitud de estos resultados comparando las deformaciones predichas con las medidas experimentalmente.

2.3.5 CONDICIONES VARIABLES DE CARGA Y TEMPERATURA

MODELO MATEMATICO

La deformación $\vartheta(\tau)$ a la edad τ después de m esfuerzos que se incrementan en $\Delta\sigma_i$ es :

$$\vartheta(\tau) = \sum_{i=1}^m \Delta\sigma_i \frac{1}{E(\tau_0)} + C(\tau)$$

donde $E(\tau_0)$ es el módulo elástico a la edad de cargado τ_0 y la función $C(\tau)$ es la función "escurrimiento plástico" definida como :

$$C(\tau) = \sum_{i=1}^n C_i e^{-\lambda_i t}$$

función que tiene como puntos iniciales τ_0 , edad del concreto a la cual se carga, T_0 la temperatura constante, C_i y λ_i constantes del material y $t = (\tau - \tau_0)$ el tiempo transcurrido después de cargado.

Para el caso de materiales viscoelásticos lineales es conveniente transformar estas funciones introduciendo logaritmos para comodidad de gráficos y escalas. El principio matemático de cambios de funciones es simple, si T_0 es la temperatura de referencia y T la temperatura constante tal que $T > T_0$ y si las curvas de deformación unitaria a las temperaturas T y T_0 son idénticas en forma, entonces :

$$C_{(T)} \ln(t) = C_{(T_0)} \ln(t) + \psi(T) = C_{(T_0)} \ln(t) \phi(T)$$

donde : $C_{(T)}$ y $C_{(T_0)}$ son las funciones C específicas a las temperaturas T y T_0 respectivamente.

Además :

$$\phi(T) = e^{\psi(\tau)}$$

La función dependiente de la temperatura, " $\phi(T)$ " es simplemente un factor de escala para el instante llamado "actual" t , tal que :

$$t^* = t \phi(T)$$

pueda ser considerado un tiempo equivalente tal que la curva $C_{(T)}$ pueda ser obtenida de la curva $C_{(T_0)}$ solamente reemplazando el argumento t de la curva de T_0 por :

$$t^* = t \phi_{(T)}$$

Este principio puede generalizarse y encontrarse una función :

$$\phi(\tau, t, \dots\dots\dots)$$

con la cual podemos obtener curvas para diferentes edades de cargado τ y temperaturas T a partir de una curva de referencia basada en τ_0 y T_0

2.3.6 INFLUENCIA DE LA EDAD DE CARGADO :

(Entiéndase edad de cargado como la edad absoluta que tiene el concreto en el instante en que se le carga). En los experimentos realizados en Estados Unidos después de examinar la forma de las curvas $C_{(\tau)}$ que obtenían, a diferentes edades de cargado, se encontró razonable representar esta influencia mediante una función transformada similar a la que representa los efectos de temperatura. Si τ_0 es la edad de cargado de referencia y τ es otra edad de cargado tal que $\tau > \tau_0$ las curvas $C_{(\tau)}$ específico - pueden ser también transformadas sustituyendo tiempos. Así tenemos :

$$C_{\tau} |\ln(t)| = C_{\tau_0} |\ln(t) + \bar{\Psi}(\tau)| = C_{\tau_0} |\ln(t^*)|$$

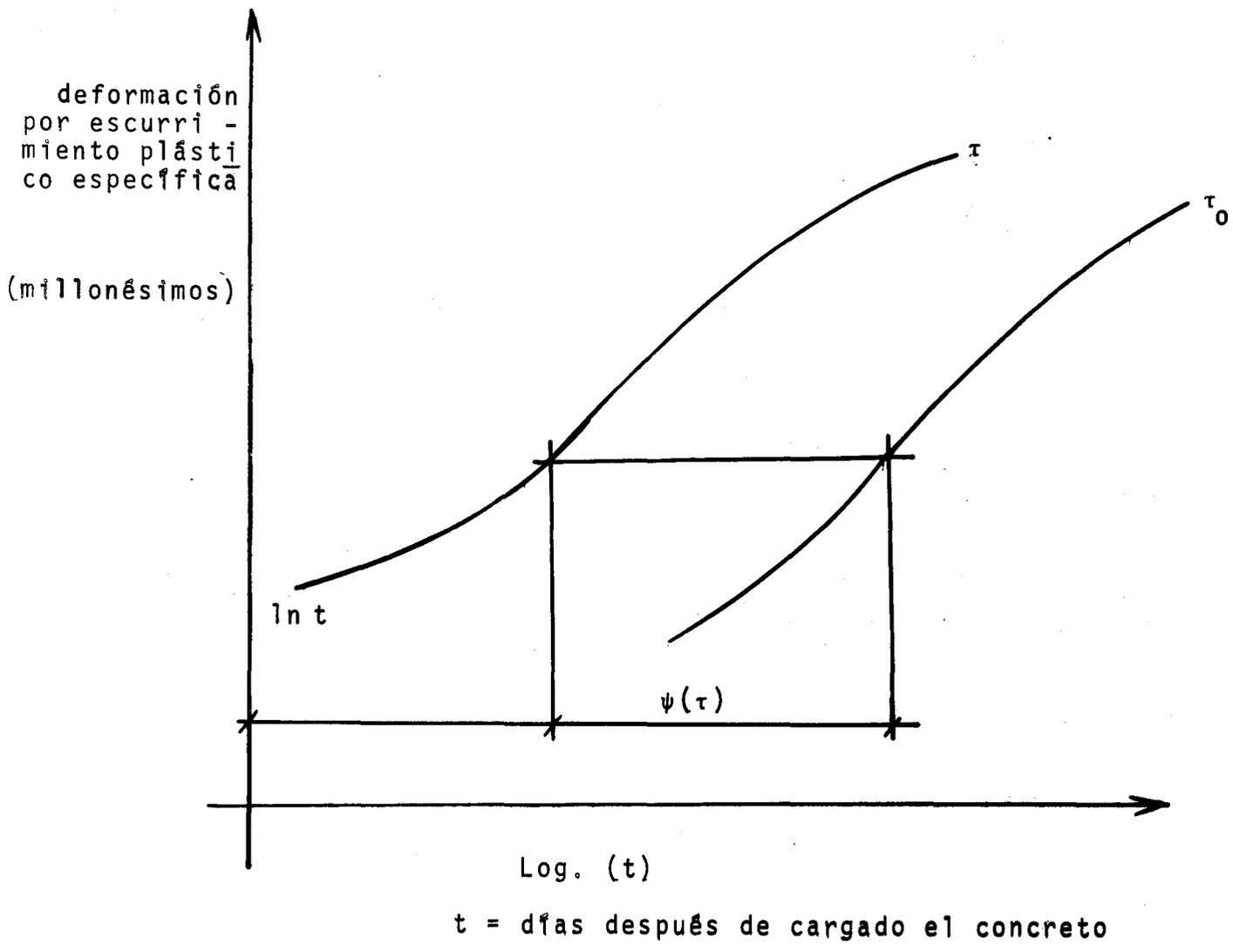


Fig. 2.3.e

Donde :

C_τ y C_{τ_0} , curvas específicas para edades τ y τ_0
y :

$$t^* = t e^{\bar{\psi}(\tau)} = t \vartheta(\tau)$$

Por lo tanto la curva C_τ puede ser obtenida de la curva C_{τ_0} sustituyendo t por t^*

Los autores consultados presentan múltiples curvas obtenidas con estos modelos matemáticos y en suma concluyen en que el método es simple y su aproximación aceptable.

2.3.7 EFECTOS COMBINADOS DE TEMPERATURA Y EDAD DE CARGADO EN EL COMPORTAMIENTO TIEMPO-DEPENDIENTE DEL CONCRETO

Los cambios físicos y químicos que tienen lugar en el concreto por un largo tiempo después de fraguado es la causa de los cambios en el comportamiento T-D del concreto.

Considerando la temperatura y edad de cargado del concreto como factores independientes, el principio de "función transformada" puede ser aplicado fácilmente para la obtención de curvas guía teóricas, comprobables mas tarde con resultados experimentales.

Considerando la siguiente ecuación para deformación por escurrimiento plástico específico, es decir por kg/cm^2 de esfuerzo del concreto a temperatura de referencia T_0 y edad de cargado τ_0 .

$$C_{(T_0, \tau_0)}(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{-\lambda_i t}$$

y entonces :

$$C_{T, \tau}(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{-\lambda_i t} \vartheta(T) \bar{\vartheta}(\tau)$$

nos dá la función específica para el mismo concreto, cuando es cargado a una edad τ y a una temperatura T .

Sin embargo, teniendo en cuenta que la edad del concreto y la temperatura están interrelacionadas, los científicos propusieron el modelo :

$$\vartheta(\tau, T) = \vartheta(T) \cdot \psi(\tau, T)$$

en donde $\vartheta(\tau, T)$ es la función deformación por escurrimiento plástico específica transformada para una edad de cargado a una temperatura T y $\vartheta(T)$ es la función de temperatura definida en una ecuación anterior.

Por definición :

$$\psi(\tau, T) = \vartheta(\tau, T) / \vartheta(T)$$

pudiéndose encontrar puntos para su comprobación experimental. Los efectos combinados de edad y temperatura involu -

eran la idealización de una edad equivalente o "madurez" del concreto, que en Inglés ha sido denominada "COAGE", representada por la variable g.

$$\psi(\tau, T) = \psi(g)$$

Luego de esta consideración se propone :

$$g = \tau_0 + \sum_{i=1}^n \Delta\tau_i e^{-A(T_i - T_0)}$$

donde A, es una constante obtenida de los datos experimentales, partiendo del hecho de que la curva obtenida con g es una curva monótona que hace conveniente la interpolación.

De esta forma, la idea de una función transformada aplicando las condiciones no isotérmicas y los efectos de temperatura es traducida matemáticamente.

2.3.8 PROCEDIMIENTO GENERAL PARA HALLAR LAS FUNCIONES TIEMPO-DEPENDIENTES TRANSFORMADAS :

- 1.- Calcular la deformación C , por escurrimiento plástico específica para cada caso, la cual es la deformación por unidad de esfuerzo, excluyendo la deformación instantánea. Aquí, es necesario recalcar que la contracción es considerada 0 pues los especímenes considerados deben ser sellados en su totalidad.
- 2.- Graficar la curva con los puntos encontrados en un papel semilogarítmico.
- 3.- Seleccionar la curva C específica para una edad de referencia τ_0 y una temperatura T_0 .
- 4.- Analizando las diferentes curvas obtenidas para una edad τ_0 y temperaturas T_1, T_2 , etc. determinar el factor de transformación $\phi(T)$.
- 5.- Analizando igualmente las diversas curvas "C" para a su vez diferentes edades, cada una de ellas con diferentes temperaturas, determinar $f(\tau, T)$
- 6.- Determinar $\Psi(\tau, T) = f(\tau, T)/\phi(T)$ para cada curva.
- 7.- Tentar valores de A , tales que $\Psi(g)$ sea una función continua, esto se logra asumiendo valores de A y determinando g para cada caso con :

$$g = \tau_0 + (\tau - \tau_0) e^{-A (T - T_0)}$$

- 8.- Los valores de $\Psi(g)$ determinados en 6, se grafican como una función de los valores de g encontrados en 7,

si el resultado son curvas continuas, el valor de A - es el aceptable. El valor más conveniente de A es aquel que permite una simple representación matemática de : $\Psi(g)$. Generalmente la función $\Psi(g)$ puede ser encontrada con :

$$\Psi(g) = \alpha_0 + \alpha_1 e^{-\alpha_2 g}$$

Donde :

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ son coeficientes numéricos obtenidos de datos experimentales.

2.3.9 LIMITACIONES DEL MODELO MATEMATICO :

El modelo matemático descrito anteriormente genera curvas para la deformación específica por escurrimiento - plástico, para temperaturas comprendidas entre 20 y 93°C , y edades de cargado que varían entre los 28 y 40 días. Las principales limitaciones de este método son enumeradas a continuación y es necesario tenerlas muy en cuenta, sobre todo cuando se aplica métodos computacionales.

- 1.- El modelo matemático es solamente válido para especímenes sellados.
- 2.- El modelo es válido para un módulo esfuerzo/resistencia comprendido entre 35 y 45 % para un rango de temperatura de 20 a 99°C.
- 3.- El coeficiente de expansión térmica α es considerado -

constante e independiente de temperatura y condiciones de esfuerzo.

4.- El módulo de Poisson es considerado constante.

Cuando los especímenes no son sellados, el proceso de secado del concreto puede producir deformaciones y cambios en las características físicas, cambios que este modelo matemático no representa. Cabe tener en consideración que para la aplicación de este método en los informes consultados se asumía que la deformación tiempo-dependiente del concreto es la misma para estados de tensión y de compresión.

Por último, debemos tener en cuenta que la aproximación de los resultados es limitada y debe usarse solamente como un método aproximativo en los cálculos de análisis estructurales.

2.4 EXPANSION TERMICA DEL CONCRETO :

Las variaciones en las dimensiones del concreto cuando éste no se encuentra confinado pertenecen únicamente a dos campos :

- 1) Dilatación, la cual es un fenómeno únicamente térmico.
- 2) Expansión y contracción, las cuales son higrométricas.

La contracción es característica del proceso de hidratación del cemento y de la cantidad de agua retenida -

en la capilaridad de la estructura, dependiendo de la desorción del agua contenida en el material; por el contrario, la expansión es debida al comportamiento combinado del agregado y el cemento hidratado.

Cuando el concreto es expuesto a un incremento de temperatura y si es libre el proceso de desorción del agua con condiciones ambientales debidamente controladas, las variaciones en el tamaño son el resultado de dos fenómenos opuestos, expansión y contracción. Si la temperatura es mantenida a un nivel bajo, pero tal que sea posible la correcta difusión del agua liberada por el cambio de condiciones, entonces es posible medir la variación de dimensiones frente al cambio de temperatura.

Cuando por variaciones en la temperatura se obtiene un balance en la desorción, para esta situación de balance el material está en un estado de transformación.

Cuando la temperatura se mantiene a un nivel bajo, se produce un fenómeno térmico el cual depende de la velocidad de expansión del material para el estado considerado.

Mediante ensayos se ha comprobado una variación uniforme del coeficiente de expansión, pero siempre dentro de un rango de temperatura dado.

2.4.1 TERMOCALORIMETROS PARA CONCRETOS Y CEMENTOS :

Cuando se quiere evaluar el rol del tipo de cemento y la composición del concreto como una totalidad frente a temperaturas elevadas y el riesgo de ocurrencia de fracturas en la masa de concreto de la estructura es necesario considerar el calor de hidratación del cemento durante un corto período inicial (7 días) y la resistencia requerida. Durante la etapa de fraguado inicial, en la que no hay exigencias externas de temperatura, la elevación de ésta en el concreto depende de la cantidad de calor generado por sí mismo por unidad volumétrica, lo cual a su vez es dependiente del calor de hidratación del cemento y del contenido de éste. (kg/m^3).

La composición del concreto, incluyendo el contenido de cemento está inicialmente determinada por los requerimientos de resistencia ó en casos especiales de alguna otra propiedad. Es conveniente recordar que el uso de algunos aditivos puede tener considerables efectos en las características del concreto; por todas estas estimaciones, desde un punto de vista práctico, la evolución del calor no debe ser considerada como una propiedad independiente del cemento sino que debe ser vista como una propiedad de la mezcla de concreto y en relación con la resistencia.

En el caso de experimentos y ensayos con diferen -

tes tipos de cemento, cabe anotar que los cementos de bajo calor de hidratación producen concretos de baja resistencia inicial, por lo que resulta vano trabajar con resistencias a los 28 días, siendo conveniente tomar las resistencias a los 90 días.

El calor de hidratación en la misma mezcla puede ser medido haciendo uso de un termo-calorímetro en un proceso adiabático.

2.4.2 FUNDAMENTO TEORICO DE LOS TERMO-CALORIMETROS :

La función principal de los termo-calorímetros es la determinación cuantitativa del cambio del contenido de calor de la muestra.

Durante un cierto intervalo de tiempo, la cantidad de calor generado por la muestra ensayada es igual a la pérdida de calor \pm el cambio en el contenido de calor, dependiendo el signo de la dirección del cambio de temperatura de la muestra.

De manera de poder aplicarse el principio anterior, es necesario conocer el coeficiente de pérdida de calor del calorímetro, α cal/°C y del agua m_0 cal/°C. Durante el proceso, la temperatura de la muestra T en grados centígrados y la diferencia de temperatura θ °C son posibles de medir continuamente. En los ensayos se hace uso con junto de muestras de aluminio (m_a), las que no producen -

calor, por lo tanto la pérdida de calor en cierto intervalo de tiempo es igual al decremento del contenido de calor de la muestra de concreto en el mismo intervalo de tiempo:

$$\alpha \theta_m \Delta t = \left(\frac{M}{\alpha} \right) \Delta T, \text{ y } \sum \theta_m \Delta t = \left(\frac{M}{\alpha} \right) \sum \Delta T$$

donde :

$$M = m_0 + m_a$$

De las medidas observadas durante los ensayos es posible calcular los valores de M/α , en función de m_a , lográndose pares de ecuaciones en función de α y m_0 .

Cuando la muestra de concreto es colocada en el calorímetro inmediatamente después de hacerse la mezcla, el calor de hidratación liberado durante el intervalo de tiempo Δt es igual a :

$$\Delta Q = \alpha \theta_m \Delta t + M \Delta T$$

y la cantidad de calor liberada a cierta edad es :

$$Q_n = \alpha \sum \theta_m \Delta t + M \Delta T$$

En la aplicación de estas ecuaciones debe observarse el signo de $\sum \Delta T$; para cada intervalo de tiempo Δt corresponde un valor promedio de $\theta (= \theta_m)$ y el cambio promedio de temperatura de la muestra, T . Cuando la cantidad de calor libe

rada por la muestra es dividida entre el peso de cemento, se obtiene el calor de hidratación, el cual puede calcularse para varias edades, (H_n , cal/gr), la división entre el volumen de la muestra da el calor de evolución de 1m^3 de concreto, Q_n , Kcal/ m^3 .

El calor específico del concreto puede ser calculado haciendo uso de los mismo aparatos y principios, pero ensayando una muestra de concreto endurecido (calor de evolución prácticamente nulo).

En ensayos experimentales hechos en otros países se usan mezclas con contenidos de agregado, graduación, contenido de cemento, cercanamente muy parecidos, diferenciándose únicamente en el tipo de cemento, por lo que las diferencias en las características finales son debidas únicamente a los diferentes tipos de cementos y al uso ó no uso de aditivos. Es conveniente tomar los valores de hidratación a los 3 y 7 días, ambos en términos de calorías/gramo de cemento, y en kilocalorías/ m^3 de concreto, (Q_3 y Q_7).

Los valores de Q_7/S_{28} y Q_7/S_{90} son muy importantes y representan el calor producido por el concreto por cada Kg/cm^2 de resistencia a la compresión a los 28 y 90 días.

Todos estos factores pueden ser usados para juzgar los méritos relativos de varias mezclas, tales como las relaciones de evolución de calor y resistencia, por lo que a

veces es necesario hacer ajustes recalculando el contenido de cemento para obtener la resistencia de diseño esperada. Estos ajustes se hacen revisando la composición y las condiciones adiabáticas de temperatura y asumiendo - que el calor específico del concreto es $c_p = 0,24 \text{ cal/}^\circ\text{Cgr.}$

La corrección de la composición del concreto correspondiente a ciertas resistencias deseadas puede hacerse usando ciertas relaciones lineales aproximadas entre el factor agua/cemento y la resistencia a la compresión, asumiendo que el contenido de agua no va a ser afectado por el cambio en el contenido de cemento.

$$S = K (C/W - 0.45)$$

$$S_o = (C_o - 0.45 W) \cdot \frac{K}{W}$$

$$S_r = (C_r - 0.45 W) \cdot \frac{K}{W}$$

$$\frac{S_o}{S_r} = \frac{(C_o - 0.45 W)}{(C_r - 0.45 W)}$$

$$C_r = \frac{S_r}{S_o} (C_o - 0.45 W) + 0.45 W$$

$$Q_r = H_7 S_r = (S_r/S_o) (Q_o - 0.45 WH_7) + 0.45 WH_7$$

En las ecuaciones anteriores el subíndice "o" indica la mezcla obtenida, la que se quiere corregir y el "r" indica la mezcla corregida para obtener la resistencia S_r a los 28 días.

2.5 CONTENIDO DE HUMEDAD EN CONCRETOS PESADOS

En el caso de concretos densos diseñados para la protección en casos de irradiación es muy importante que el contenido de humedad de éstos sea lo más alto posible y que se encuentre convenientemente extendido en la sec ción transversal de la estructura protectora, siendo ade más deseable que no ocurran cambios significativos en es te contenido de humedad a través del tiempo, ésto sin em bargo, debido a diferentes razones no es posible hasta - el momento. El contenido de humedad, calculable en un - primer instante a partir del agua de la mezcla, sufre - una serie de cambios diferentes según sean las condicio- nes ambientales e internas del concreto. Sería necesa - rio hacer pruebas luego de un período infinitamente lar- go de tiempo para poder determinar de manera exacta el - contenido de humedad final del concreto endurecido.

Partiendo de la premisa de que existe un conteni- do de humedad final e inalterable y de que la distribu - ción de esta humedad permanece constante, es razonable introducir el concepto de un estado práctico de equili - brio; el cual sí puede ser determinado mediante ensayos después de un tiempo finito.

El conocimiento de este estado de equilibrio es necesario para el dimensionamiento óptimo de la estructu - ra, ya sea una pantalla o la cápsula de un reactor.

Antes de ésto, los cambios intrínsecos de la microestructura de la pasta de cemento así como los procesos del estado de equilibrio tienen que ser conocidos - más a fondo, de manera que pueda conocerse el contenido final de humedad a partir de las proporciones iniciales de la mezcla.

La pasta de cemento junto con el agregado cumplen la función de asimilar las cargas; desde este punto de vista, la influencia del contenido de humedad en la micro-estructura es muy importante; la contracción, la deformación tiempo-dependiente en ciertos casos también - los efectos de exposición térmica, pueden apreciarse fenomenológicamente cuantificando las propiedades de resistencia del cuerpo de concreto, lo que puede hacerse combinando los casos de carga con diferentes contenidos de humedad.

Tales consideraciones son principalmente válidas para las cápsulas de reactores pues en ellas los espores de pared son bastantes considerables y las condiciones de operación muy severas en cuanto a esfuerzos ex-ternos, especialmente gradientes de temperatura. Los - valores de las deformaciones resultantes de estos efectos no pueden ser determinadas asumiendo una distribu-ción uniforme de la humedad por lo que en los países interesados se siguen financiando programas de investiga-ción sobre este asunto.

La transferencia de humedad en el concreto endurecido está sujeta a la gradiente de temperatura, la que excede las condiciones normalmente encontradas en las construcciones de concreto.

Con respecto al mas comunmente usado tipo de concreto, las propiedades de la pasta de cemento tienen un significado predominante en el comportamiento del concreto seco, el autor T.C. Powers y otros, concluyen para el gel de cemento endurecido una porosidad característica del 28%.

Los trabajos de investigación recientes, se basan en las investigaciones de Powers y ya ahora se sabe que la formación de los complicados poros capilares naturales resultan del desarrollo de muy pequeñas partículas, las que forman una estructura en el espacio originalmente lleno con pasta de cemento no hidratada y agua, las cuales fluyen, quedando un sistema de poros que no deja ver distinción entre los pequeños poros gel y los espacios capilares grandes. Cerca de la mitad de poros gel tienen un tamaño de 16 a 20 Å, lo cual corresponde a 6 veces el diámetro de una molécula de agua. Existe sin embargo un gran número de interrogantes con respecto al movimiento de humedad en el espacio de los poros. Pihlajavaara explica que en particular la investigación de los fenómenos superficiales pueden tener futuras clarificaciones. Bázant toma en consideración las leyes -

de termodinámica, el equilibrio estático y la pasta de cemento y el concreto como un material multi-fásico.

Para la descripción matemática de la transferencia de humedad muchos autores aplican la teoría de difusión, para simplificar asumen que el coeficiente de difusión a temperatura constante es también constante o linealmente dependiente del contenido de humedad en contraste con la situación física que representan los diferentes procesos de difusión con variaciones de peso húmedo-dependientes.

Se espera que trabajos futuros, aclaren los interrogantes existentes respecto a la influencia de la hidratación y carbonatación en la micro-estructura del concreto.

La bondad del agregado usado en el concreto tiene mayor significado para estas propiedades, siendo también necesario en este campo mayores investigaciones.

En conclusión, es necesario mucho trabajo científico, con lo cual sin embargo no se cubriría la totalidad de combinaciones paramétricas.

2.5.1 TRANSFERENCIA DE HUMEDAD POR EFECTO DE GRADIENTE DE TEMPERATURA

La transferencia térmica de humedad ó más explícitamente la transferencia de humedad activada por una

gradiente de temperatura ha sido muy poco estudiada, aun que fenómenos de este tipo son muy frecuentes en la naturaleza; la razón de esta escasez de investigación en la historia de la ciencia, quizás sea debida a que en casi la totalidad de estos fenómenos las condiciones de diferencia de temperatura y transferencia de humedad son tales, que los materiales pueden ser considerados en condiciones isotérmicas, pero tal, no es el caso del concreto cuando va ha ser sometido a períodos de irradiación o a condiciones de operación bastante exigentes como las que se dan en las cápsulas de concreto denso pretensado que albergan reactores nucleares.

La transferencia de masas debida a gradientes de temperatura fue observada primero en líquidos, en el siglo XVIII. Soret en 1,880 investigó el fenómeno, dándole el nombre de difusión térmica por lo que también es conocido con el nombre de "fenómeno de Soret". En cuanto a este fenómeno en los gases, la primera respuesta fue teórica, por aplicación de la cinética de gases, siendo el mérito de Enskog y Chapman en la década de 1910 a 1920; éste último además hizo las primeras observaciones experimentales.

Cuando la transferencia de masas debida a diferencias de temperatura fue ampliamente comprobada en líquidos y gases un razonamiento análogo anticipó que este fenómeno también debía producirse en sólidos, logrando Ba

Hay las primeras observaciones en 1928 y ampliándolas -
Reinhold y Schultz en 1933.

La transferencia de humedad en los sólidos fue abundantemente estudiada en la URSS a partir de la década de 1960, principalmente por el distinguido académico A. V. Luikov, quien es uno de los editores del informativo "Heat and Mass Transfer", que es publicado en occidente por Pergamon Press, en inglés y alemán. La información presentada en este acápite está basada en las notas del profesor Luikov y en resultados experimentales logrados en el laboratorio de tecnología del concreto de Otoniemi, Finlandia.

NOTACION

- A , parámetro
- B , parámetro
- C , contenido de humedad, cantidad de agua que escapa
ría bajo tratamiento a $t = 150^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{aire}} = 20^{\circ}\text{C}$,
 $\phi = 40\%$.
(Kg/m^3)
- h , tiempo
- J , flujo de humedad. ($\text{Kg}/\text{m}^2\text{seg}$)
- J_m , flujo de humedad debido a gradiente de humedad ú-
nicamente.
($\text{Kg}/\text{m}^2\text{seg}$)
- J_t , flujo de humedad debido a gradiente de temperatu-
ra únicamente. ($\text{Kg}/\text{m}^2\text{seg.}$)
- K , coeficiente de conductividad de humedad. (m^2/seg)
- K_t , igual a ($s_t \cdot K$), coeficiente de transferencia térmi-
ca de humedad. $\frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{seg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$
- s_t , igual a ($\rho_o \cdot s'_t$), conductividad térmica de hume-
dad.
($\text{Kg}/\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
- s'_t , conductividad térmica de humedad. ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) ó ($\%/^{\circ}\text{C}$)
- t , temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
- w/c , factor agua/cemento. (Kg/Kg)
- x , coordenada
- ϕ , humedad relativa del aire
- ρ_o , densidad del material seco, secado a 105°C , aire -
ambiental a $t = 20^{\circ}\text{C}$, $\phi = 40\%$.

2.5.2 TEORIA SOBRE LA TRANSFERENCIA TERMICA DE HUMEDAD - EN POROS CAPILARES DE SOLIDOS COLOIDALES

En los sólidos coloidales, la capilaridad la constituyen poros de diferentes rangos de dimensión, desde milímetros a algunos Angstroms ($1\text{Å} = 10^{-8}$ cm), y en ellos - el movimiento de humedad es generalmente muy complicado - dependiendo de la estructura del material, niveles de contenido de humedad, de aire atrapado, así como también de la temperatura.

Asumiendo que el flujo de humedad J_t ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{seg}$) es proporcional al gradiente de temperatura podemos escribir :

$$(A) J_t = - K_t \frac{t}{x} \quad (\text{caso unidimensional})$$

o mas generalmente :

$$(B) J_t = - K_t \text{ grad } t$$

en donde :

K_t , es el coeficiente de transferencia térmica de humedad.

t , es la temperatura en grados centígrados.

El flujo de humedad frente a gradientes de temperatura, de alta a baja temperatura, son análogos a los flujos que van de zonas de alto contenido de humedad a zonas de bajo contenido de humedad, en un medio uniforme.

Luikov define :

$$(C) \quad K_t = K \cdot s_t$$

en donde :

K , coeficiente de conductividad de humedad (m^2/h)

s_t , coeficiente de conductividad térmica de humedad
($kg/m^3 \cdot ^\circ C$)

Esto hace posible definir el flujo total de humedad como :

$$(D) \quad J = J_m + J_t = - K (\text{grad } C + s_t \text{ grad } t)$$

en esta ecuación, el primer término es el flujo de humedad sin que haya gradiente de temperatura, siendo "C" el contenido de humedad. Cuando la dirección de los gradientes de temperatura y humedad es opuesta, como ocurre en el proceso de secado, los flujos de humedad debido a estos gradientes son también opuestos.

Considerando el flujo y el balance de humedad en un elemento tenemos :

$$(E) \quad \frac{\delta C}{\delta h} = K (\text{grad } C + s_t \text{ grad } t)$$

En la ecuación anterior h es tiempo; si se asume que K y s_t son constantes, lo cual generalmente no ocurre porque depende de que el contenido de humedad y la temperatura sean mínimos tenemos :

$$(F) \quad C = K (\nabla^2 C + s_t \nabla^2 t)$$

Tomando la ecuación D, para el caso unidimensional y para condiciones de gradiente de temperatura constante y superficies selladas; ésto significa que $J = 0$ y consiguientemente en la ecuación tenemos :

$$K \frac{C}{x} = -K s_t \frac{t}{x} \quad \delta$$

$$s_t = - \frac{dC}{dt}$$

δ de manera más simple :

$$s_t = - \frac{\Delta C}{\Delta t} \quad (\text{Kg/m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

Esta última ecuación bajo las condiciones específicas mencionadas pueden ser usadas en la determinación experimental de la conductividad térmica de humedad s_t .

El coeficiente de gradiente térmico de humedad, s_t , depende en gran medida del contenido de humedad. La transferencia de humedad debido a gradiente de temperatura en materiales porosos tiene lugar en la fase de vapor principalmente, aunque hay evidencia de que en suelos - los flujos de humedad de áreas calientes a frías se producen en fase de vapor y en fase líquida.

La conductividad s_t puede variar para un mismo material con el transcurso del tiempo (décadas), dependiendo del contenido de humedad.

Luikov reporta que para muchos materiales aislantes del calor la interrelación entre s_t y el contenido de humedad está muy bien descrito por la fórmula de Dubnitsky :

$$s_t = AC^2 \exp(-BC)$$

donde A y B son parámetros.

La conductividad s_t depende también de la temperatura siendo aproximadamente proporcional a $(T \cdot K)^{-1}$. Esto significa que s_t depende sensiblemente del valor de la Temperatura (en grados Kelvin). Cambios de temperatura, por ejemplo de 283 K a 293 K (de 10 a 20 °C) produce en s_t un cambio de 5%.

La conductividad s_t puede ser expresada como :

$$s_t = \rho_0 \cdot s'_t \quad \delta$$

$$s'_t = \frac{s_t}{\rho_0} \quad \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{\cdot\text{C}} = \frac{1}{\cdot\text{C}}$$

En estas dos últimas ecuaciones ρ_0 es la densidad seca del material. s'_t puede ser expresada en % por grado centígrado :

$$s'_t = \frac{\%}{\cdot\text{C}}$$

El rango de s_t es del orden de 10^0 a 10^2 kg/m³·C,

para sólidos porosos con contenidos de humedad medios.

2.5.3 SIGNIFICADO DE LA TRANSFERENCIA TERMICA DE HUMEDAD PARA EL CONCRETO.

Examinando la ecuación D, la cual se escribe para el caso uniaxial simple:

$$J = -K \frac{\Delta C}{\Delta x} + s_t \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (G)$$

Y si para pruebas con concreto, tenemos los siguientes valores, frecuentemente dables :

$$C = 50 \text{ kg/m}^3 \quad \text{entonces :}$$

$$x = 0,1 \text{ m} \quad \frac{C}{x} = 500 \text{ kg/m}^4$$

$$s_t = 1 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{C}$$

$$\Delta t = 10^\circ \text{C}$$

$$\Delta x = 0,1 \text{ m}$$

$$s_t \frac{\Delta t}{\Delta x} = 100 \text{ kg/m}^4$$

Este simple ejemplo muestra que en casos no isotérmicos el movimiento de humedad en el concreto activado por temperaturas diferentes tiene cierta importancia $J_t/J_m = \frac{1}{5}$ aunque la conductividad térmica del concreto no varíe tan rápidamente como la gradiente de temperatura.

De manera de dar una idea de la situación en la cual el gradiente de temperatura puede contrarrestar el gradiente de humedad, reemplazamos $J = 0$ en la ecuación

(G) y obtenemos :

$$- s_t \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{\Delta C}{\Delta x}$$

δ

$$t = \frac{C}{s_t} \quad (H)$$

Si reemplazamos los valores numéricos en H, tenemos :

$$\Delta t = 50^\circ \text{C}$$

Consecuentemente, como demuestra el ejemplo, diferencia de temperatura de 50°C puede contrarrestar diferencias de contenido de humedad δ en otras palabras impedir el secado, proceso durante el cual la temperatura ambiente y la temperatura superficial son altas en relación con la temperatura interna del concreto.

En los casos en los que una cara del concreto se encuentra a temperaturas mas altas que las de las demás, la gradiente térmica produce un flujo de humedad a través del concreto. Si en suma, la dirección de la gradiente de humedad, es la misma que la de la gradiente térmica, el flujo de humedad hacia afuera, o secado, es definido como un co-estado de gradiente térmica y flujo de humedad.

Todos los estudios sobre este particular son de vital importancia para el conocimiento de las propiedades del concreto en la atenuación de neutrones, propiedades que ade-

más cambian muy rápidamente cuando las condiciones no son isotérmicas.

CONCLUSIONES

- 1) La literatura sobre la transferencia térmica de humedad en el concreto es prácticamente inexistente, siendo no solo problema del Perú y otros países subdesarrollados, sino también de países mucho más adelantados en la investigación científica del concreto. (Por lo menos hasta 1976).
- 2) La literatura sobre transferencia térmica en materiales porosos indica que el fenómeno tiene marcada importancia en la transferencia de humedad en condiciones no isotérmicas para especímenes de concreto.
- 3) En experimentos preliminares, se encontró que el orden de magnitud de la conductividad térmica de humedad para el concreto, s_t , es el del orden de $1 \text{ Kg/m}^3\text{°C}$ ó $0,1 \text{ \%/°C}$ ó $0.001/\text{°C}$. Igualmente se espera comprobar que para altos contenidos de humedad (material saturado), s_t sea prácticamente 0.
- 4) Investigación a gran escala sobre la transferencia térmica del concreto es necesaria para aclarar el fenómeno y su importancia en la ciencia y tecnología del concreto.

2.6 CALCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA NO EVAPORABLE EN LA PASTA DE CEMENTO

Este cálculo es muy importante en el caso de concretos que van a estar expuestos a irradiación de neutrones. Sobre este particular se han hecho estudios y experimentos en Japón, más específicamente en Tokio, por The Construction Co., Ltd.

A continuación, se resumen la parte más importante de los resultados presentados.

El factor "agua no evaporable/cemento", en peso, puede ser calculado a partir de las proporciones de diseño de la mezcla, midiendo además la densidad húmeda y la densidad seca del concreto, las gravedades específicas del cemento y de los agregados y la absorción de agua por los agregados.

Es necesario además partir de las siguientes premisas :

- 1.- Las proporciones de los ingredientes del concreto de los especímenes de ensayo deberán ser exactamente las mismas que en la mezcla del concreto que se va a usar definitivamente en la instalación requerida.
- 2.- El peso del agua absorbida por el concreto endurecido durante el curado con agua es :

AGUA ABSORVIDA = $0.25 \times$ (peso de agua no evaporable de la pasta).

3.- El volúmen de un espécimen, después de remover el agua exudada luego de un procedimiento de curado no cambia.

Tomando en cuenta estas consideraciones y sabiendo que :

- D_w , es la densidad húmeda del concreto.
 D_d , es la densidad seca del concreto.
 W_c , contenido de cemento por m^3 de concreto.
 W_w , contenido de agua por m^3 de concreto.
 W_b , cantidad de agua exudada por m^3 de concreto.
 W_s , contenido de agregado fino por m^3 de concreto, - en condición saturado superficialmente seco.
 W_g , contenido de agregado grueso por m^3 de concreto, en condición saturado superficialmente seco.
 P_s , índice de absorción de agua para el agregado fino.
 P_g , índice de absorción de agua para el agregado grueso.
 n , factor de peso del agua no evaporable de la pasta en relación con el peso de cemento.
 V_b , volúmen de agua exudada por el concreto, por m^3 .

Tenemos las siguientes ecuaciones :

$$D_w = (W_c + W_w - W_b + 0.25nW_c + W_s + W_g) \cdot 1/(1,000 - V_b) \text{ gr/cm}^3$$

$$D_d = (W_C (1+n) + W_S (1-P_S) + W_G (1-P_G)) \cdot 1/(1,000-V_b) \text{ gr/cm}^3$$

La densidad de los especímenes que contienen cantidades mayores de agregado grueso tiene una menor pérdida en cada uno, debido a que la cantidad de agua evaporable decrece con la disminución de la cantidad de mortero.

Diversos ensayos demuestran que cuando la densidad del concreto es alta, la pérdida que se produce en ésta por secado es menor, aunque en los experimentos aún se encuentren puntos dispersos. Estos experimentos demuestran así, que la pérdida de densidad está determinada principalmente por la cantidad de agregado grueso.

Partiendo de esto, y de que no existe una separación significativa en los componentes del mortero, la densidad del concreto puede ser expresada como una función de la relación existente entre el volumen absoluto de agregado grueso y el volumen de concreto.

$$D_w = \frac{W_C + W_W - W_b + 0.25 nW_C + W_S}{V_C + V_W - V_b + V_S} \cdot (1 - a - \alpha) + \frac{W\alpha}{V_g}$$

$$D_d = \frac{W_C + nW_W + (1-P_S) W_S}{V_C + V_W - V_b + V_S} \cdot (1-a-\alpha) + (1-P_G) \frac{W\alpha}{V_g}$$

Donde :

- V_c , volumen absoluto de cemento.
- V_w , volumen absoluto del agua de la mezcla.
- V_s , volumen absoluto de agregado fino.
- V_g , volumen absoluto de agregado grueso.
- α , factor de relación de volúmen absoluto de agregado grueso en relación al volúmen de concreto.
- a , factor determinado por el volumen de aire atrapado en relación al volúmen de concreto, el que se asume 0.005.

Si las propiedades de los ingredientes, proporciones de la mezcla, cantidad de agua exudada, volumen de aire atrapado, factor de peso de agua no evaporable de la mezcla en relación al peso de cemento y densidad húmeda - son conocidos, la densidad seca del espécimen puede ser pronosticada, haciendo uso de la combinación de las ecuaciones anteriores.

Como la densidad del agregado es mayor que la del mortero, la densidad del concreto cambia con el factor de relación de volumen absoluto de agregado grueso en relación al volumen de concreto,

Suponiendo que dos especímenes, numerados 1 y 2 - con factores α_1 y α_2 respectivamente, en los que se cumple que $\alpha_1 > \alpha_2$, las densidades húmeda y seca de estos dos especímenes pueden ser expresadas :

$$D_{w1} = \alpha_1 D_{gw} + (1 - \alpha_1) D_{mw}$$

$$D_{w2} = \alpha_2 D_{gw} + (1 - \alpha_2) D_{mw}$$

$$D_{d1} = \alpha_1 D_{gd} + (1 - \alpha_1) D_{md}$$

$$D_{d2} = \alpha_2 D_{gd} + (1 - \alpha_2) D_{md}$$

en donde :

D_{w1} , es la densidad húmeda del espécimen 1.

D_{w2} , es la densidad húmeda del espécimen 2.

D_{d1} y D_{d2} , densidades secas respectivas.

D_{gw} , densidad del agregado grueso en condición saturado superficialmente seco.

D_{mw} , densidad del mortero en condición saturado.

D_{gd} , densidad seca del agregado grueso.

D_{md} , densidad seca del mortero.

Entonces, la diferencia entre D_{w1} y D_{w2} es :

$$D_{w1} - D_{w2} = (\alpha_1 - \alpha_2) (D_{gw} - D_{mw}) > 0$$

y la diferencia entre D_{d1} y D_{d2} es :

$$D_{d1} - D_{d2} = (\alpha_1 - \alpha_2) (D_{gd} - D_{md}) > 0$$

Por consiguiente la diferencia entre $(D_{w1} - D_{w2})$ y $(D_{d1} - D_{d2})$ es :

$$(D_{w1} - D_{w2}) - (D_{d1} - D_{d2}) = (\alpha_1 - \alpha_2) \left\{ (D_{gw} - D_{gd}) - (D_{mw} - D_{md}) \right\}$$

El miembro de la derecha de esta ecuación es menor que 0, dado que $\alpha_1 > \alpha_2$ y $(D_{gw} - D_{gd}) < (D_{mw} - D_{md})$, porque la cantidad de agua absorbida por el agregado grueso es menor que la cantidad de agua evaporable en el mortero.

Consecuentemente:

$$D_{w1} - D_{w2} < D_{d1} - D_{d2}$$

lo cual significa que la diferencia de densidades es mayor para muestras secas.

2.7 TEMPERATURA Y SECADO

CARACTERISTICAS FENOMENOLOGICAS DEL SECADO.

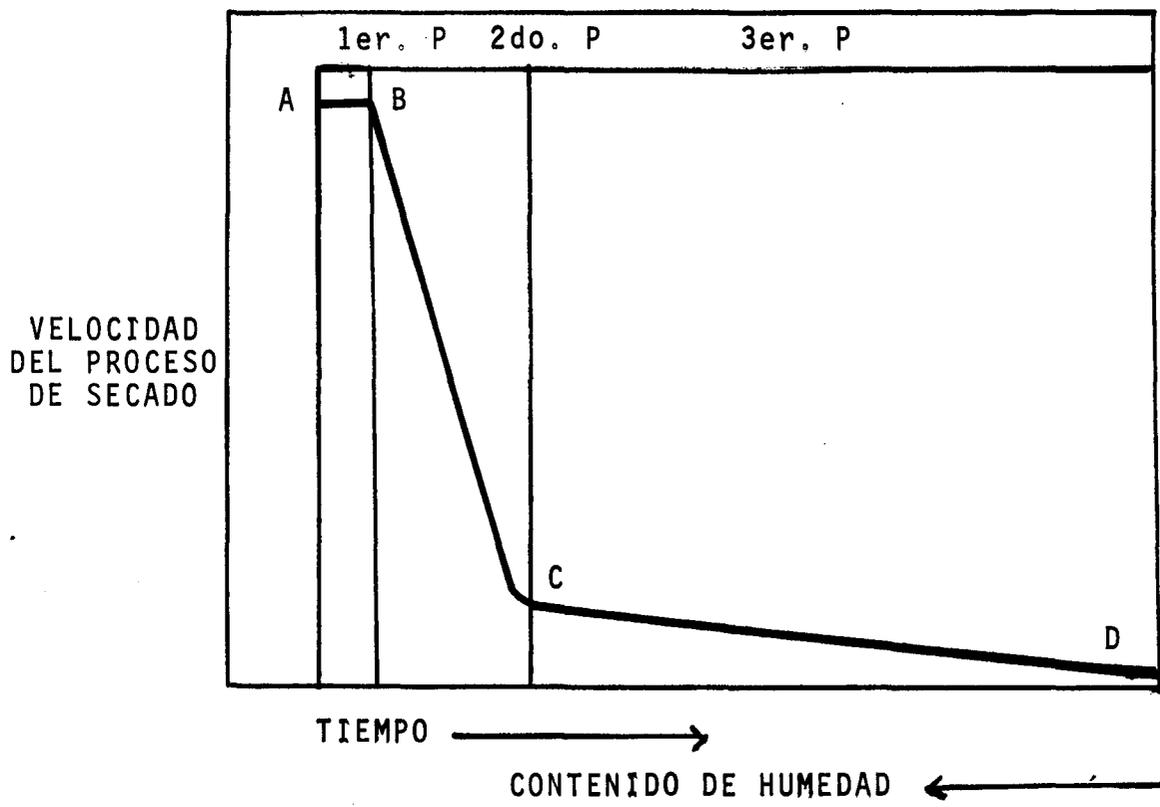
El concreto es un material poroso coloidal con un amplio rango de tamaños de poros; siendo así, todos los tipos de flujos individuales tales como difusión de vapor, evaporación-condensación así como transferencia capilar son posibles.

Las características de la pasta de cemento son el factor dominante en la transferencia efectiva de humedad en concretos ordinarios de cemento Portland; las razones de esta importancia son el hecho de que la pasta forma una matriz continua a través del concreto, la alta porosidad de ésta y su bajo coeficiente de permeabilidad. La

influencia de las propiedades del agregado en el movimiento de humedad del concreto es en la mayoría de los casos de bajo significado y no será tratada en este tema.

El agua presente en la pasta de cemento se encuentra en diferentes estados y grados de fijación, sin embargo debido a las dificultades para definir los diferentes tipos de agua es muy conveniente distinguir solamente entre el agua evaporable y la no evaporable, siendo la última el agua que no puede perderse a una temperatura de 105 °C. En un proceso de secado el contenido de humedad del concreto decrece de un valor W_0 a uno final W_e , contenido de humedad de equilibrio el cual depende principalmente de las propiedades de la pasta de cemento así como también de las condiciones ambientales de exposición.

El secado por evaporación del concreto generalmente está dividido en tres períodos, como muestra la figura 2.7.a el primero en el cual la velocidad de cambio del contenido de humedad permanece constante y que es relativamente el más corto, dependiendo de la velocidad del aire, durante este intervalo la superficie del concreto permanece más o menos húmeda y el proceso de secado no es isotérmico y su influencia en las características del concreto final es muy pequeña. Durante los dos siguientes períodos, el contenido de humedad y la velocidad de secado dependen de las propiedades del concreto y de las con-



PROCESO DE SECADO

Fig. 2.7.a

diciones ambientales; en este caso puede asumirse que el proceso es isotérmico y que tiene significativos efectos sobre las propiedades del concreto y su comportamiento. En la mayoría de trabajos investigatorios sobre el proceso de secado se da especial énfasis a los dos últimos periodos.

El contenido de humedad del estado de equilibrio es la propiedad básica que es necesaria conocer para poder predecir el porcentaje de agua por peso de concreto en cualquier fase.

Para la pasta de cemento este estado de equilibrio depende de las características del sistema de poros, del factor agua cemento y del grado de hidratación, así como también de la humedad relativa y la temperatura. Las relaciones entre temperatura, humedad relativa y contenido de humedad del estado de equilibrio pueden ser expresadas en términos de absorción isotérmica.

En muchos estudios sobre el secado del concreto se asume un fenómeno de difusión para la transferencia de humedad haciendo uso de la teoría respectiva, sin embargo, esta transferencia puede tener lugar en la fase gaseosa, siguiendo la teoría de evapo-condensación.

2.7.1 BREVE RESUMEN DE LA APLICACION DE LA TEORIA DE DIFUSION AL PROCESO DE SECADO DEL CONCRETO

El autor T.K. Sherwood en su obra "THE DRYING OF SOLIDS" sugiere que el secado de los materiales porosos sigue la ley de difusión de Fick. Aplicando la teoría de difusión al proceso de secado del concreto se asumen que el fenómeno de secado es efectivamente un proceso de difusión.

Para concretos con un alto grado de maduración y sin efectos de carbonatación la ecuación general del proceso de secado isotérmico está dada por :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \text{div} (K \text{ grad } U)$$

donde :

U = concentración de humedad en un instante dado.

t = tiempo en días u horas medido a partir del instante en que se inició el proceso.

K = coeficiente de difusión.

La concentración de humedad está definida por :

$$U = \frac{W_{ti} - W_e}{W_o - W_e}$$

W_{ti} = contenido de humedad en el instante t en el punto i

W_o = contenido inicial de humedad.

W_e = contenido de humedad del estado de equilibrio.

La concentración de humedad varía de $U = 1$ al inicio del proceso hasta $U = 0$ en el instante en que se alcanza el equilibrio. El coeficiente de difusión K es un valor numérico que es función de las propiedades de la pasta de cemento, de la historia de hidratación, contenido de humedad, temperatura y de la humedad relativa.

La teoría de un coeficiente de difusión constante resulta totalmente inadecuada cuando ocurren procesos de carbonatación durante los cuales se alteran las propiedades del concreto.

Para un coeficiente de difusión constante la primera ecuación puede simplificarse a :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = K \operatorname{div} (\operatorname{grad} U) = K \nabla^2 U$$

De acuerdo a otros autores, la solución de esta ecuación diferencial puede ser expresada de una manera relativamente simple como $U = f(F_0)$ donde F_0 es el número de Fourier $F_0 = K \frac{t}{r^2}$. (r es el radio del cilindro de prueba).

En la evaluación de datos experimentales, se introducen los conceptos de promedio de concentración de humedad \bar{U} y promedio de contenido de humedad en el tiempo \bar{W}_t :

$$\bar{U} = \frac{\bar{W}_T - W_e}{W_0 - W_e}$$

3. EFECTOS DE LA RADIACION DE NEUTRONES EN LAS PROPIEDADES DE CONCRETOS ESPECIALES Y SUS COMPONENTES.

La evolución de los programas nucleares y los progresos hechos en el desarrollo de las pantallas de concreto protectoras contra la radiación de neutrones y/o para aislamiento del calor significó que para cada concreto experimentado se incrementara la dosis de irradiación de neutrones y las temperaturas.

En el caso de reactores, en los cuales se producen efectos combinados de radiación y temperatura, estructuras protectoras de concreto deben circundarlos, sustentarlos y aislarlos; en consecuencia es muy conveniente el estudio de este material bajo la combinación de estos efectos.

Al respecto, las primeras investigaciones conocidas fueron las realizadas por Gran Bretaña y la Unión Soviética, dándose a conocer mas tarde resultados de Francia, Estados Unidos e Italia. Todos estos trabajos revelan cambios en las propiedades físicas y mecánicas del concreto cuando está expuesto a radiación de neutrones. La dirección de estos cambios y su importancia varía de acuerdo a los materiales. Las condiciones bajo las cuales se realizan los experimentos, diferentes temperaturas, diferentes dosis, y materiales en algunos casos muy diferentes hacen muy difícil una interpretación correcta de los resultados;

esta interpretación es solamente posible en base a un solo parámetro, el cual generalmente es la resistencia estructural o de manera preferente la seguridad de operación.

En cada caso, para que las interpretaciones de los efectos de irradiación y temperatura sobre cada una de las propiedades del concreto sean válidas, debe existir un control esmeradísimo sobre las condiciones de ensayo, optimización de resultados, criterios de diseño, etc.

Todas estas exigencias se justifican por el hecho - de que aún pudiéndose englobar los propósitos de la investigación bajo el concepto de "concretos sometidos a radiación", esto implica los concretos para aislamiento del calor, como constitutivo de pantallas protectoras, de estructuras para sostén de reactores nucleares y para edificios dedicados a albergar éstos.

Con la finalidad de separar los efectos de la temperatura de los debidos a la irradiación de neutrones, los investigadores en su totalidad, trabajan con dos series de muestras, una de las cuales es sometida a un tratamiento térmico similar en sus características de intensidad, tiempo, condiciones ambientales y otros, a las de la segunda serie de muestras las cuales son sometidas a irradiación.

La alta energía de los neutrones debe ser atenuada por el concreto, por lo que éste debe poseer una composi -

ción balanceada, incluyendo cuerpos livianos y elementos pesados y el elemento de baja densidad necesario puede ser el hidrógeno presente en el agua químicamente libre de la mezcla, el cual es muy eficiente en la atenuación de neutrones. Sin embargo, cuando agregados pesados son usados en las mezclas y/o cuando las temperaturas son altas, la pasta de cemento endurecida puede no contener suficiente hidrógeno; en este caso el hidrógeno contenido puede ser incrementado por adición de agregados hidratados. Para que las investigaciones tengan un resultado efectivo es necesario que se mida lo siguiente :

- 1.- Cambios en el peso y dimensiones
- 2.- Expansión térmica
- 3.- Conductividad térmica
- 4.- Módulo de elasticidad.
- 5.- Resistencia a la compresión y flexión.

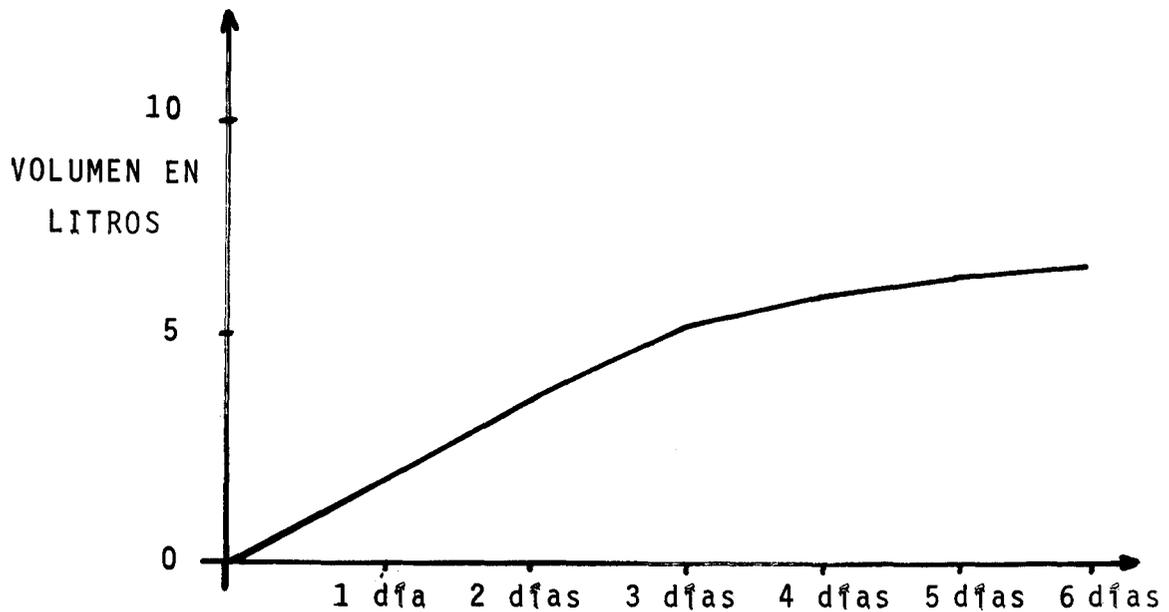
3.1 GAS GENERADO POR EL CONCRETO DURANTE LA IRRADIACION DE NEUTRONES :

En diferentes experimentos se ha comprobado que durante la irradiación de neutrones las muestras de concreto generan un gran volumen de gas, el cual tiene que ser liberado para que pueda mantenerse la presión óptima en las celdas de ensayo. Mediante estimaciones de la presión antes y después de hacer cada liberación es posible calcular

el volúmen de gas generado durante la irradiación, teniendo en cuenta que ese volúmen solamente se dá para las condiciones de temperatura y presión del ensayo. Conociendo - el volúmen de cada celda de ensayo y el de las muestras se completan los datos para el cálculo. Es de suponer que este volúmen de gas generado es debido a la radiohidrólisis del agua liberada por el concreto durante la irradiación, la que se dá a una temperatura del orden de los 200°C.

Al considerar el peso total del concreto al inicio de la irradiación y al final de la misma se nota una pérdida del orden del 2% o mejor expresado, 20 gramos/kilo de concreto.

Si se asume que esta cantidad de agua ha pasado totalmente a gas cerca de 24,480 cm³ de H₂ y 12,440 cm³ de O₂ son obtenidos, generándose un total de 37,320 cm³ de gas/kg de concreto. Sin embargo, las mediciones de gas en los experimentos, dan 6,370 cm³/kg. de concreto. Esta, tan sensible diferencia es debida, de manera indubitable a un proceso de condensación en las celdas de irradiación, por lo que solamente una pequeña parte de los elementos es liberada - como gas.



EVOLUCION DE LA CURVA PARA LA CANTIDAD DE GAS
GENERADO POR 1 KG. DE CONCRETO CUANDO ES SO -
METIDO A IRRADIACION.

3.2 MODIFICACION EN LAS PROPIEDADES FISICAS DEL CONCRETO POR IRRADIACION DE NEUTRONES :

En este resumen, se presentan conclusiones derivadas de experimentos franceses e italianos, y se refieren a ensayos hechos con muestras de concreto de serpentina, cemento aluminoso y otros componentes que serán detallados en cada caso. Las mediciones se hacen para cada caso de irradiación, para un juego de muestras de la misma calidad de concreto pero que no ha sido sometido a irradiación y

que ha estado expuesto a 20°C y a una humedad relativa de 60%, para una serie de muestras del mismo concreto que no ha sido expuesta a irradiación de neutrones pero que ha sido expuesta a un tratamiento de ciclos térmicos similares a los de las muestras irradiadas; de todas estas mediciones podemos deducir las modificaciones y efectos que a continuación se dan, pero debemos tener muy en cuenta la validez de éstas según cada caso particular.

Las dosis de irradiación en los experimentos estudiados variaban para los neutrones rápidos de 3.3 a 4.7x 10¹² n/cm²/seg. ; las temperaturas de irradiación estaban entre los 140 y 280°C.

3.3 MODIFICACION DE PESOS

En todos los casos, las pérdidas de peso en las muestras irradiadas por neutrones y en las muestras expuestas solamente a tratamiento térmico, son del mismo orden. Esto es válido para el caso de muestras de concreto, de solamente agregado, y de solamente pasta pura de cemento.

El cambio de peso del concreto está en consecuencia únicamente condicionado por la deshidratación de la pasta pura de cemento, la cual se da con el tratamiento térmico, haya o no flujo de neutrones.

Cabe anotar, que en experimentos realizados en Italia, en donde se ensayó con muestras de mortero standard (cemento Portland y agregado de limonita) y mortero denominado BHT (cemento Portland 730 y agregado de baritina) se obtuvo para un tratamiento térmico similar al que produce el flujo de neutrones una disminución de peso del orden de 0.5% para el standard, para un incremento de temperatura de 10°C y de 1.8% para el mortero BHT cuando el incremento de temperatura era de 30°C. (En este ensayo se aplicó el tratamiento térmico similar a una dosis de : 10^{20} n/cm² térmicos y de 1/10 de este valor para los neutrones rápidos, la dosis gamma fue de 10^{11} roentgen).

3.4 CAMBIOS DE DIMENSION

La irradiación de neutrones causa en el concreto una expansión dimensional que es función directa de la dosis de irradiación. Más explícitamente según se comprobó en experimentos de USA, la expansión era del orden de 2,500 micrones/metro para una dosis de 2×10^{19} neutrones/cm² hasta 7,000 micrones/metro para una dosis de 9×10^{19} neutrones/cm².

Siguiendo el patrón de investigar aisladamente el agregado, la pasta pura de cemento y el concreto, se pudo comprobar en el experimento mencionado que cuando el agregado era serpentina, la expansión de éste, era del mismo

orden que la del concreto; de este resultado se puede deducir aunque por el momento se trate de una deducción prematura, que la expansión del concreto cuando se encuentra sometido a irradiación de neutrones es debida a la expansión que sufre el agregado, ya que experimentalmente también se ha comprobado que las muestras de pasta pura de cemento se contraen cuando son irradiadas, aunque los valores de dichas contracciones como función de la dosis sean claramente dispersos. Estos encogimientos en las muestras de pasta pura de cemento son del mismo orden que los de las muestras que solamente han sido sometidas a tratamiento térmico exactamente similar que el que sufren las muestras irradiadas a la dosis de estudio. Puede concluirse que el papel del agregado es mucho más importante que el del cemento respecto a los cambios dimensionales.

3.5 MODULO DINAMICO DE ELASTICIDAD (YOUNG)

Este módulo en el caso de los experimentos de irradiación de muestras con neutrones, se mide aplicando un método ultrasónico. El módulo de Young, es función de la variación en el tiempo de la propagación de una onda ultrasónica transmitida longitudinalmente a través de cada muestra. En los experimentos realizados en USA y Francia, se comprobó que la velocidad de propagación de la onda ultrasónica en las muestras de concreto irradiado (4,800 m/s) eran menores que las del no irradiado (7,200 m/s). Me -

diante el control gradual se encontró que el mayor deterioro se producía repentinamente al inicio de la irradiación. La propagación de la onda es a una velocidad sensiblemente menor en las muestras de agregado irradiado cuando se la compara con la de las muestras de concreto ordinario tratado en condiciones standard (4,800 m/s).

En la experimentación de las muestras de pasta pura de cemento irradiadas, se obtienen resultados del mismo orden que de las muestras sometidas únicamente a tratamiento térmico, (dosis de 3×10^{19} n/cm²).

Cuando las muestras de concreto han sido irradiadas a altas dosis, las velocidades de propagación son ligeramente mayores que las de las muestras sometidas al tratamiento térmico.

De todas estas experiencias puede concluirse que el módulo elástico del concreto irradiado es menor que el del no irradiado, alcanzando valores siempre menores que los de sus componentes cuando son irradiados aisladamente a excepción del agregado que es el que presenta valores menores y que por lo tanto es determinante.

3.6 RESISTENCIA A LA FLEXION

Los valores de la resistencia a la flexión de las muestras irradiadas son menores que los obtenidos en las

muestras expuestas únicamente a tratamiento térmico, por lo que puede decirse que esta disminución es sólo efecto del choque de neutrones. Sin embargo, esta diferencia disminuye en el curso del tiempo. Después de irradiación a una dosis de 10^{20} n/cm² en los cuales los ciclos de temperatura eran de 160 ó 200°C los valores de la resistencia a la flexión cerraban todos cerca de los 30 bars. (1 bar = 10^6 dinas/cm²). Los valores de las muestras de serpentina irradiada para la resistencia a la flexión son claramente menores que los que se obtienen con muestras no irradiadas a condiciones standard y la disminución es del orden del 50%. También en este caso la resistencia a la flexión decrece como una función de las dosis de irradiación.

En el caso de los ensayos hechos a muestras de pasta pura de cemento el efecto de la irradiación de neutrones sobre la resistencia a la flexión es insignificante cuando se lo compara con el efecto que produce un tratamiento térmico similar aislado, es decir, el deterioro de esta resistencia es debido a los ciclos térmicos y no al choque de neutrones.

Para todos los casos el elemento condicionante de la disminución en la resistencia a la flexión es el material granular.

3.7 RESISTENCIA A LA COMPRESION

Los valores de la resistencia a la compresión para muestras irradiadas con flujo de neutrones son sensiblemente menores que los que se obtienen para muestras de control que han sido sometidas a tratamiento térmico, deduciéndose de esto que los neutrones en este caso sí producen efectos por sí mismos. En todos los experimentos conocidos hasta el momento la resistencia a la compresión de las muestras de concreto irradiadas tienden a decrecer sensiblemente en función de las dosis de neutrones.

En el caso de las pruebas hechas al agregado, cuando se trató de serpentina, se encontró que para tratamientos térmicos del orden de los 200°C, la resistencia a la compresión se incrementaba. Sin embargo, para altas dosis de irradiación y después de seis meses de calentamiento, las muestras irradiadas son menos resistentes que las muestras de control expuestas únicamente a las mismas temperaturas.

La resistencia a la compresión de las muestras de pasta pura de cemento irradiadas no son muy diferentes de los valores de las muestras de control; aunque los valores obtenidos en los experimentos consultados, son muy dispersos puede inicialmente asumirse que el efecto es insignificante.

3.8 EFECTOS EN EL COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TERMICA

En los experimentos dados a conocer, se ha comprobado que este coeficiente "no varía" por efecto de la irradiación de neutrones, ya que los valores de las muestras irradiadas son similares a los de las muestras sometidas a tratamiento térmico. En todos estos experimentos, se utilizó el método de "TOUCHAU" para medir la conductividad, el cual se escogió por su conveniente manipulación.

El Touchau consiste en un dispositivo en el cual hay un cuerpo de características conocidas, buen conductor y considerado isotérmico, el que se coloca en contacto con la superficie del material a estudiar. Por interpretación del balance térmico de los dos cuerpos, puede obtenerse el coeficiente de conductividad térmica del material. Cuando dos sólidos son considerados como semi-infinitos, uno a temperatura T_1 y otro a temperatura T_2 y puestos en contacto, la superficie de contacto adquiere una temperatura T_i la cual es función de la conductividad térmica (ϵ_1 y ϵ_2) de cada cuerpo, de sus capacidades de aislamiento (C_1 y C_2) y sus pesos específicos (ρ_1 y ρ_2). Estas variables se conjugan en :

$$\frac{T_1 - T_i}{T_i - T_2} = \frac{\epsilon_2 (T_2) C_2 (T_2) \rho_2}{\epsilon_1 (T_1) C_1 (T_1) \rho_1}$$

La conductividad térmica de la muestra es determinada por medio de la ecuación anterior incluyendo un coeficiente - de corrección K, partiendo de que el material del Touchau y la muestra son de las mismas dimensiones finitas. Este coeficiente de corrección K, es función de la temperatura.

$$\epsilon_2 (T_2) = \frac{K(T) \cdot \frac{T_1 - T_i}{T_1 - T_2} \cdot \epsilon_1(T_1) C_1 (T_1) \rho_1}{C_2 (T_2) \rho_2}$$

CONCLUSIONES

- 1.- La irradiación con flujos desde 2×10^{19} a 10^{20} n/cm² y energía superior a 1 Mev y a temperaturas del orden de 200°C produce deterioros en concretos hechos con material granular (serpentina) y cemento Portland. El efecto de la irradiación resulta en la expansión del material con valores de 7000 micrones/metro a la dosis de 10^{20} neutrones/cm². Esto es mayormente debido a la expansión de los granos de serpentina bajo la irradiación, pero también presumiblemente a una microfRACTURACIÓN causada por deformaciones de los componentes. Estos encogimientos son incidentalmente del mismo orden de magnitud que los que se miden en muestras sometidas a tratamiento térmico solamente.
- 2.- La resistencia a la flexión disminuye como una función de la dosis de irradiación y el módulo dinámico de elasticidad del mismo modo. El mas grande deterioro aparece al inicio de la irradiación para dosis de 3×10^{19} n/cm².
- 3.- La resistencia a la compresión disminuye sensiblemente y adquiere un valor del mismo orden que el que se obtiene de tratar térmicamente las mismas muestras irradiadas, es decir, la disminución se debe únicamente a la irradiación.
- 4.- La irradiación de neutrones no altera el contenido de

agua constitutiva de la serpentina y es de suponerse que de cualquier otro agregado, porque se comprobó - que a la temperatura de irradiación de 200°C la pérdida de peso de las muestras son solamente debidas a la deshidratación de la pasta pura de cemento.

En los experimentos realizados hacen notar que el peso de las muestras resulta sensiblemente mayor com-parándolo con el de las muestras sometidas a tratamiento térmico y en algunos casos mayor que el de las muestras antes de ser irradiadas (pero después de ser calentadas a 100°C para eliminar el agua libre). Esto puede ser atribuído a una parcial reabsorción de agua durante el relativamente largo período de operaciones post-irradiación.

- 5.- Los valores del coeficiente de expansión térmica y del de conductividad térmica fueron en todos los experimentos conocidos, salvo errores experimentales, idénticos a los obtenidos para muestras sometidas únicamente a tratamiento térmico.
- 6.- Los resultados de la irradiación siempre muestran cambios dimensionales en las muestras de los materiales estudiados, generalmente una expansión. Está ya comprobado que es el material granular el que siempre - determina esta expansión.

Los cambios en general en las propiedades mecánicas del -

concreto como resultado de la irradiación de neutrones están fuertemente afectados por la evolución de las propiedades mecánicas de los granulares bajo irradiación.

4. MATERIALES DE FABRICACION DE CONCRETOS DENSOS PROTECTORES CONTRA LA IRRADIACION.

Ya conocidos los efectos del flujo de neutrones en el concreto, así como los lineamientos básicos sobre las propiedades del concreto y cuando es posible, la manera científica de cuantificar estas propiedades, es necesario conocer los materiales con los cuales ha de fabricarse este concreto, a través de sus propiedades y características a fin de adquirir al criterio necesario para la elección de los mismos y lograr tecnológicamente un concreto bueno, competitivo y predecible.

En cuanto al agua y al cemento con que ha de prepararse este concreto no existe ninguna restricción aparte de las conocidas para concretos normales, aunque hay que tener en cuenta la inconveniencia del uso de cemento aluminoso para estos fines, el que dicho sea de paso no se fabrica en el Perú. La inconveniencia de este cemento es debida a que con él la hidratación ocurra sin que se libere calcio hidratado lo que trae como consecuencia que una mayor cantidad de agua escape y al cambiar la estructura cristalina se reduzca la resistencia mecánica.

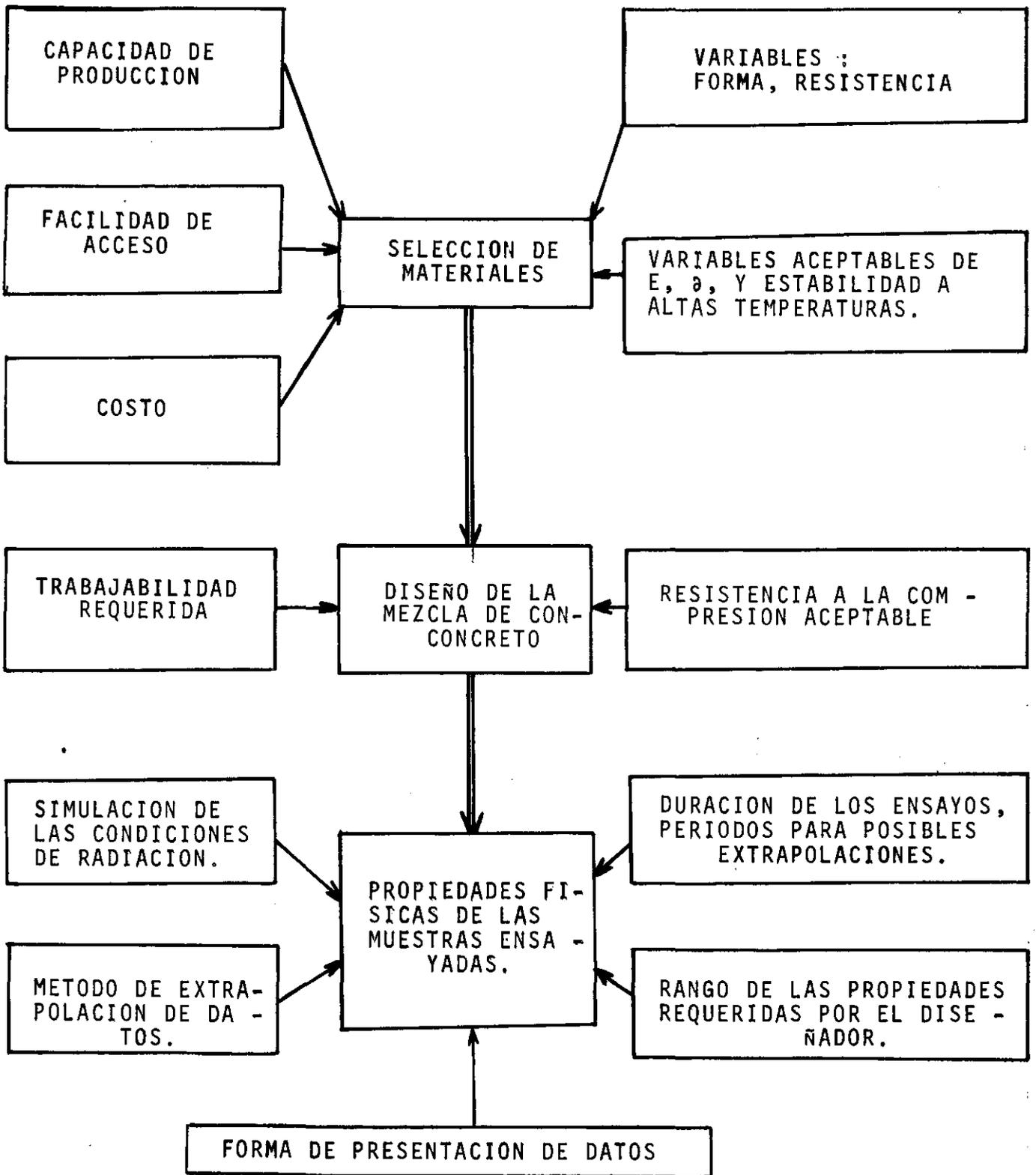
Sin otra restricción, el aspecto importante, es la adecuada elección del agregado el cual sí debe cumplir con algunas condiciones.

4.1 SELECCION DEL AGREGADO GRUESO

Los autores consultados presentan el proceso de selección de material, diseño y ensayo del concreto prácticamente como único. Este proceso implica la práctica normal de un reconocimiento de todas las posibles canteras de materiales probables de usar en la fabricación de concretos pesados, mediante visitas a todos los lugares o minas potenciales en el área de factibilidad de construcción del proyecto, junto con un análisis de las propiedades físicas y otro petrológico de los materiales que allí se encuentran. Se debe tener especial cuidado con la selección del agregado grueso, pues al ocupar entre el 60 y el 70 % del volúmen del concreto es muy claro de apreciar que una pequeña variación en las propiedades de este componente tiene un efecto dominante en las propiedades del concreto final y en su comportamiento.

Tres factores determinan la elección del agregado grueso, éstos son : la conveniencia de la fuente, la influencia que el agregado tenga en la resistencia cuando el concreto sea sometido a temperatura y la rigidez del concreto; los dos últimos factores tienen como parámetro el módulo de elasticidad del agregado.

Obyviamente, la fuente más conveniente será la que sea capaz de brindar una gran cantidad de material idóneo



durante todo el tiempo necesario. Lo más conveniente es que el agregado pertenezca a un depósito geológico y no presente variaciones.

4.2 INFLUENCIA DEL AGREGADO EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO CUANDO ES SOMETIDO A TEMPERATURA.

Las informaciones disponibles indican que cuando se usa como agregado el producto del triturado de rocas y el cemento potland como ligante, el concreto resultante, cuando es sometido a temperaturas cercanas a los 90°C puede presentar una reducción en su resistencia a la compresión del orden del 40%. Esta magnitud de reducción de resistencia - en realidad es excesiva pues en las cápsulas de presión de reactores ordinarios la temperatura máxima se encuentra entre los 70 y 80°C.

La reducción de resistencia es causada por los esfuerzos generados por el calentamiento y la incompatibilidad térmica existente entre el agregado grueso y la pasta de cemento.

Esta pérdida de resistencia puede ser relacionada con el módulo de elasticidad y el coeficiente de expansión térmica del agregado grueso. Las pérdidas cuando se usa gravas y agregado no pulido de rocas trituradas es aproximadamente la mitad de cuando se usa agregado de superficie pulida.

En consecuencia, la elección del agregado requiere el conocimiento de los datos de su concentración, del medio en que encuentra, ya sean silicatos, basaltos, dolomitas, etc.

4.3 MODULO DE ELASTICIDAD DEL AGREGADO

Se requiere un agregado que posea un alto módulo de elasticidad para mantener el escurrimiento plástico y las propiedades de cambios volumétricos del concreto en un nivel aceptablemente bajo.

Investigadores extranjeros, basándose en datos anteriores, encontraron en 1,972, mediante trabajos de laboratorio, que con un agregado que poseyera un módulo de elasticidad del orden de $(0.7031 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2)$, se podían producir concretos de baja elasticidad y bajo escurrimiento plástico.

Trabajos llevados a cabo por Griffiths en 1936, ya indicaban que el coeficiente de expansión térmica del agregado estaba íntimamente ligado con el contenido de silicatos.

En consecuencia, la selección de un agregado que se encuentre en un medio de silicatos, puede producir concretos con similares propiedades térmicas.

Es frecuente que se presente más de una fuente lo-

cal de material que parezca conveniente, la selección del material estará determinada por las bases que sienten el comportamiento final del concreto.

El proceso cuidadoso de elegir el agregado grueso con la ambición de producir concretos que tengan las propiedades óptimas de plasticidad, expansión térmica, resistencia y trabajabilidad puede eliminar la necesidad de cambiar el diseño para nuevas estaciones.

4.4 CONCRETO PESADO HECHO CON SERPENTINA

El concreto pesado hecho con serpentina ferrosa es un tipo especial de concreto, hecho con agregado de hierro, rocas de serpentina triturada y cemento portland.

El hierro provee la densidad alta y el agua, las características químicas necesarias para la atenuación de neutrones; pudiéndose lograr además mediante un incremento de la densidad del concreto y del contenido de agua atrapada reducir el espesor de las pantallas.

Inicialmente, como experimentación, fue usado mineral de hierro hidratado, (precisamente la limonita) en los ensayos del complejo Hanford, USA, en donde se construyeron pantallas protectoras hechas con concreto de limonita, pero la experiencia demostró que no debía usarse en las capas, paredes, partes interiores o exteriores del reactor -

productor de neutrones porque las temperaturas de operación de éste estaban alrededor de los 300°C, lo que implicaba un cuidado extremo con el agua. Fue por esta razón - que se inició el uso de los agregados de serpentina, los que reemplazaban a la limonita.

Mediante experimentación se llegó a la certeza de que la serpentina, cuya composición se detalla más adelante y otro mineral, el silicato de magnesio hidratado tienen mejor comportamiento con respecto a la conservación - de la humedad a temperaturas altas hasta los 150°C.

El concreto hecho con agregado de serpentina pesa de 1,600 a 2,400 kg/m³ dependiendo esto del tipo de serpentina usada y del agua atrapada que es necesaria para a tenuación de neutrones. Parte de la serpentina puede ser reemplazada con un agregado de alta densidad tal como la magnetita o escoria de acero, en orden de incremento de densidad y reduciendo el espesor de las pantallas.

A pesar de las grandes ventajas, los ensayos demostraron que también podían presentarse algunos problemas - tales como :

- 1.- Algunos tipos de roca de serpentina son blandos, frágiles y de no muy buen comportamiento estructural.
- 2.- Algunas rocas están por debajo del contenido esperado de agua.

3.- Las rocas de serpentina pueden contener grandes cantidades de otros minerales, incluyendo crysotilo.

El crysotilo es un material fibroso comunmente conocido como asbesto, la serpentina es la forma masiva de ese mineral. Afortunadamente la serpentina y el crysotilo son compatibles con el cemento portland; precedentemente estos materiales han sido usados para pisos de terrazo y más tarde en varios tipos de construcciones y materiales de aislamiento.

En la fabricación de este concreto debe tenerse cuidado en que el agregado grueso y la arena de enlucido se encuentren libres de material fibroso, de lo contrario la calidad del concreto baja.

El concreto hecho con agregado de serpentina fabricado en Quebec, Canadá, daba una baja resistencia a la comresión y un alto índice de contracción o encogimiento para un peso de $1,700 \text{ kg/m}^3$. Se dedujo que estas propiedades se debían a la alta cantidad de fibra de crysotilo que contenía el agregado grueso el cual presentaba una gravedad específica de 2.6.

Algunos tipos de serpentina pueden ser usados a gran escala para producir satisfactoriamente agregado grueso, pero no arena para enlucido. Si el crysotilo está presente en la roca, en el proceso de trituración escapa la fibra

fina, lo que no es conveniente.

Otro tipo de concreto pesado ensayado, con agregado de serpentina y escoria de acero daba un peso de 3,600 kg/m³ y el mortero de enlucido preparado con serpentina triturada finamente pesaba 2,040 kg/m³.

La cantidad de agua ligada químicamente, necesaria en el agregado para atenuar los neutrones, está definida por el contenido de agua de la preparación. Un simple calentamiento o ensayo de ignición es usado para determinar el peso total perdido el cual incluye agua y algunos materiales volátiles dentro de cierto grado de temperatura, la cantidad de cada uno es determinada mediante ensayos, en los cuales la humedad y las materias volátiles son pasadas a través de un anhidro absorbente estimándose luego la ganancia en peso del absorbente.

En ensayos sobre el particular hechos en Canadá se determinó que la pérdida por ignición para las muestras varían de 1.4 a 23.6 % no presentándose en todas ellas material volátil. Los valores teóricos para el agua químicamente ligada varía alrededor de 12.9%, para el mineral de serpentina; una pérdida de peso por ignición cercana al 13%, ya indica la presencia de material volátil. Algún tipo de serpentina, puede presentar pérdidas de peso por volátiles más grandes que el 2%, debidas primeramente a los

cape de CO_2 durante el proceso de calentamiento. Ensayos han determinado que la pérdida de peso del mineral es menor hasta una temperatura de 100°C , y luego, con un incremento de temperatura de $50^\circ\text{C}/\text{hora}$, hay una pérdida progresivamente menor hasta una temperatura de 500°C , marcando el primer estado de deshidratación. Futuros calentamientos dan como resultado una rápida pérdida de peso continuando hasta que la mayor parte del agua ha sido removida siendo la pérdida final de rango bajo, considerando la escala de temperatura. En consecuencia, es claro que un cambio significativo ocurre entre los 400 y 500°C , probablemente termina a los 500°C bajo los cuales se produce la pérdida del crisotilo y su humedad, pérdida de agua y ésta es definitivamente una función de tiempo y temperatura. Otro cambio significativo ocurre aproximadamente a 675°C más allá de lo cual la pérdida de peso final es otra vez esencialmente independiente del tiempo.

El autor H.M. Woodrooffe en el boletín "Pyrolysis of Chrysotile Asbestos Fibre". reporta que fue observado un cambio en la estructura del material en el primer estado de calentamiento hasta cerca de 500°C y que la retención de agua durante este estado es un fenómeno superficial dependiente de la presión de vapor y de la temperatura. Durante el segundo estado, la disolución completa de los paquetes de crisotilo se produce, dentro de un rango

estrecho de temperatura; en el mismo experimento, muestras de olivina exhibieron equilibrio estructural ante una exposición suficientemente larga.

Datos confiables, obtenidos durante las investigaciones para el reactor de producción de neutrones en Quebec, Canadá, indican que la retención de agua de la serpentina a altas temperaturas es similar a la del crisotilo. Los datos presentados por Johns-Manville, también en Canadá, demuestran que la serpentina ensayada retiene más agua de la necesaria a temperaturas tan altas como 510°C, función ligeramente dependiente del tiempo y representada por la fórmula :

$$R = A (H - 9)^{-a}$$

R -----) retención de agua,

A -----) valor inicial del agua preparada (la contenida en el agregado).

H -----) número de horas de calentamiento más allá de las 10.

a -----) pendiente de la curva correspondiente al calentamiento.

Empíricamente los valores de "R" y "a" están presentados en la tabla 1. Basados en esta información, se deduce que cerca del 93% del agua de preparación (la contenida en el agregado), puede ser retenida por el agregado de ser

pentina después de 20 años de calentamiento a 300°C. Los ensayos de calentamiento durante el programa de investigación para el reactor productor de neutrones de Canadá, demostraron que la cantidad de agua retenida por los agregados de serpentina está influenciada levemente por el tiempo de exposición, más allá de un día o dos y también por la presión de vapor.

Los ensayos de calentamiento en Hanford, USA, concluyeron cuando se tuvo la evidencia de que pequeñas ganancias y pérdidas en el peso de las muestras ocurrían - probablemente debido a variaciones en las condiciones ambientales del laboratorio. Es de tomarse en cuenta que - en la mayoría de las muestras de serpentina se presenta la magnetita en pequeñas cantidades, y aunque no se investigó la oxidación de ésta debida a la temperatura debe tomarse en cuenta un pequeño incremento en el peso de la muestra.

Es de notar que los autores de las referencias indican que una pérdida significativa de agua ocurre cuando el crisotilo es calentado de 400 a 500°C, terminando probablemente a los 500°C. Hasta el momento, la gran mayoría de las muestras de serpentina ensayada por los países desarrollados interesados confirman esta observación. Sin embargo algunas de las muestras requerían una temperatura de alrededor de 600°C. antes de presentarse una

pérdida significativa de peso.

| Tabla 1 | Valores empíricos de "A" y "B" | | |
|---------|--------------------------------|------|--------|
| °F | °C | A | a |
| 600 | 316 | 91.8 | 0.0078 |
| 800 | 427 | 82.3 | 0.0083 |
| 900 | 482 | 79.3 | 0.0109 |
| 950 | 510 | 75.6 | 0.0188 |

4.5 SERPENTINA :

COMPOSICION : Silicato de magnesio



Silice 44.1%

Magnesio 43.0%

Agua 12.9%

Hierro y Níquel pueden presentarse en pequeñas cantidades.

ESTRUCTURA : Usualmente masiva pero presentando formas fibrosas microscópicas. La forma totalmente fibrosa es el crysotilo, comercialmente conocido con el nombre de asbesto.

PROPIEDADES FISICAS : Dureza 3.5 a 5

Gravedad específica : 2.5 a 2.65

Brillo grasiento.

Color oliva o verde negruzco o verde amari -

llento o blanco frecuentemente matizado con motas de verde claro y oscuro.

NOTA : Es un mineral común y bien distribuido siempre como un producto de alteración de algún mineral original ferromagnésico tal como el piroxeno, el anfíbol y especialmente la olivina.

Esto ocurre en rocas ígneas alteradas y algunas veces en rocas metamórficas en las cuales la serpentina es el íntegro de la masa rocosa.

4.6 PROPIEDADES DE LAS PANTALLAS HECHAS CON CONCRETO DE SERPENTINA :

Las propiedades de pantallas hechas con dos tipos de concreto de serpentina fueron determinadas por las losas verticales localizadas en el tope del reactor de Hanford, el 105-DR. Un detector del flujo de neutrones fué colocado entre cada losa para determinar la distribución lateral y transversal de neutrones que atravesaban la losa. La medida de neutrones fue hecha usando oro, oro revestido de cadmio y discos de sulfuro, para mostrar el flujo en sus características térmicas, de resonancia y energía. Antes de proceder a los ensayos, fue medida la dosis de radiación gamma y se ensayó el concreto después de 28 días de curado y secado al aire. Las mencionadas losas fueron pesadas antes y después de su inserción en los lugares de ensayo; las medidas de neutrones y rayos gamma fueron obtenidas cuando -

las losas estaban secas, el procedimiento fue repetido después de calentadas las mismas a 320°C, con las medidas de peso tomadas antes y después de insertadas las losas, indicaron que no ocurría un cambio de humedad. En suma, los ensayos proveyeron datos de los efectos de los diferentes contenidos de agua en la atenuación de neutrones. La composición física de los dos tipos de concreto se presenta en la tabla 2, para las condiciones iniciales antes del calentamiento. Se presenta también los resultados numéricos de la atenuación de neutrones para diferentes espesores.

Es de esperar, que éstos datos no puedan adaptarse exactamente a los diseños futuros que se hagan en el Perú, por diferencias obvias que de hecho existen entre las calidades naturales de los productos peruanos, mineral, y la diferente realidad tecnológica, pero en gran forma, todos estos datos sirven de base y de guía para diseños peruanos.

También en Checoslovaquia fueron investigadas las propiedades físicas y mecánicas del concreto hecho con agregado de serpentina, siguiendo mayormente las pautas marcadas por otros países. Los resultados obtenidos fueron cercanamente iguales a los obtenidos para casos similares en esos países.

Los ingenieros checoslavacos, concluyeron que aparte del factor transportabilidad, factor determinante, no

TABLA 2

MEZCLA DE CONCRETO PARA LA FABRICACION DE LOSAS
DE ATENUACION USANDO SERPENTINA.

| | TIPO I | TIPO II |
|--|-------------------------|-------------------------|
| Cemento Portland | | |
| tipo II | 12.727 Kg. | 22.500 Kg. |
| Arena | 15.91 " | 22.727 " |
| Steel shot SAE 330 (escoria de acero) | 28.182 " | |
| Steel shot SAE 1320 (escoria de acero) | 56.818 " | |
| Agua | 6.818 " | 10.909 " |
| Fluidificante | 0.127 " | 0.227 " |
| Factor agua-cemento | 0.54 | 0.48 |
| Factor cemento | 8.02 | 15.18 |
| Graduación de la arena % que pasa | | |
| No. 4 | 98.7 | |
| 8 | 52.5 | 100 |
| 16 | 43.3 | 96.0 |
| 30 | 13.1 | 76.9 |
| 50 | 5.4 | 43.5 |
| 100 | 1.4 | 3.5 |
| 200 | | |
| Módulo de Fineza | 3.86 | 1.69 |
| Gravedad Especifica (Arena) | 2.59 gr/cm ³ | 2.62 gr/cm ³ |

TABLA 3
CONCRETO DE SERPENTINA

| ESPESOR EN PULGADAS | FLUJO TERMICO DE NEUTRONES $n/cm^2/seg/Mw$ | | |
|---------------------|--|--------|--------|
| | 30°C | 100°C | 320°C |
| 0 | 50,000 | 50,000 | 50,000 |
| 4 | 50,000 | 50,000 | 50,000 |
| 7 | 15,000 | 25,000 | 25,000 |
| 12 | 1,500 | 8,000 | 8,000 |
| 15 | 200 | 1,500 | 1,500 |
| 20 | 30 | 250 | 400 |
| 24 | 8 | 60 | 100 |
| 32 | 0.3 | 2 | 7 |
| 36 | 0.06 | 0.7 | 1 |
| 40 | 0.02 | 0.25 | 0.6 |

TABLA 4
PROPIEDADES DEL CONCRETO DE SERPENTINA (QUEBEC)

| | TIPO I | TIPO II | ESPECIMEN pulg. |
|--|--------------|--------------|--------------------|
| PESO UNITARIO Kg/m ³ | 4,440 | 2,180 | 2x2x11 |
| CAMBIO DE PESO EN % | | | |
| 28 días a 20°C | 0.25 | 0.87 | |
| calentado a 85°C | - 4.03 | - 12.80 | |
| 200°C | - 4.12 | - 15.17 | |
| 350°C | - 4.31 | - 16.50 | |
| CAMBIO DE LONGITUD EN % | | | |
| 28 días a 20°C | 0.007 | 0.010 | |
| calentado a 85°C | - 0.0036 | - 0.106 | |
| 200°C | - 0.037 | - 0.222 | |
| 350°C | - 0.154 | - 0.246 | |
| MODULO DIN DE ELASTICIDAD (Kg/cm ²)x10 ⁻⁶ | | | |
| 28 días a 20°C | (100%) 0.408 | (100%) 0.200 | |
| calentado a 85°C | (41%) 0.168 | (82%) 0.164 | |
| 200°C | (38%) 0.155 | (64%) 0.129 | |
| 350°C | (33%) 0.134 | (46%) 0.093 | |
| COEF. DE EXPANSION TERM. pulg/pulg/°C | | | |
| 28 días a 20°C | 13.19 | 9.38 | |
| calentado a 85°C | 14.63 | 11.21 | |
| 200°C | 14.32 | 10.78 | |
| 350°C | 13.18 | 10.96 | |
| CONDUCTIVIDAD TERMICA BTU/pie-hr-°F | | | |
| húmedo 20°C | 1.063 | 0.772 | cilindros |
| seco 85°C | 0.168 | 0.158 | 6x12 |
| 200°C | 0.196 | 0.193 | |
| 350°C | 0.284 | 0.283 | |
| RESISTENCIA A LA FLEXION Kg/cm ² | 59.06 | 36.98 | |
| 28 días a 20°C y calentado después a 350°C | | | |
| RESISTENCIA A LA COMPRESION Kg/cm ² | | | |
| 28 días a 20 C | (100%) 638 | (100%) 423 | cubos de 2 |
| calentado a 85 C | (113%) 860 | (124%) 525 | pulg. |
| 200 C | (126%) 808 | (107%) 451 | |
| 350 C | (82%) 523 | (86%) 363 | |
| % DE PERDIDA DE PESO DE UNA MUESTRA DE 200 grs. DE MORTERO TRITURADO | | | |
| 20-900 °C | - 28.8 | 16.4 | |
| 85-900 °C | (&) - 28.3 | 14.9 | |
| 200-900 °C | - 27.0 | 13.1 | |
| 350-900 °C | - 29.2 | 12.0 | |

(&) El signo menos indica un incremento en el peso debido a la oxidación del hierro a temperaturas de ignición.

hay razón para creer que la serpentina resulta más cara - que cualquier otro agregado.

Los resultados de los ensayos, son los siguientes, 500 kg/cm² para concreto fraguado, no calentado, a temperatura ambiente y 270 kg/cm² como valor mínimo para concretos largamente expuestos a temperaturas de 350°C. El concreto de serpentina, hecho con cemento Portland contenía en condiciones normales un 10.5% de cristales atrapados de agua y a un calentamiento de 350°C retenía el total de sus cristales demostrando además una alta estabilidad en sus dimensiones cuando era calentado hasta los 350°C.

Los ensayos demostraron que el concreto mantenía - altos valores relativos de sus propiedades físicas y mecánicas hasta temperaturas cercanas a 200°C que decrecían - después de 28 días de permanencia a una temperatura de 180°C y de 28 días de permanencia a 270°C, este decrecimiento es en porcentaje promedio aproximado un 45%.

El decrecimiento de los parámetros de las propiedades físicas y mecánicas de este tipo de concreto después del ciclo de calentamiento a 350°C hallado después de los ensayos era del 70%. El decrecimiento más significativo - tenía lugar entre los 200 y 250°C; las superficies de fractura aparecían en las muestras cíclicamente calentadas,

cuando se sobrepasaban los 180°C, las fracturas fueron aparentemente menores en cubos de 20 x 20 x 20 cms. y en prismas de 15 x 15 x 75 cms. que en cubos de 10 x 10 x 10 cm. La opinión profesional verificó que el deterioro por calentamiento de muestras pequeñas es mayor que el que se produce en estructuras íntegras. El deterioro de muestras fue siempre mayor que el que se producía en bloques de las dimensiones comunes para pantallas protectoras o de las cápsulas de los reactores.

Basados en la importancia del conocimiento del contenido de agua en cuerpos de concreto de grandes dimensiones, preparados para tener propiedades protectoras a la radiación de neutrones en un reactor nuclear, se ideó un método de determinación del contenido de agua en los bloques de concreto, método basado en condiciones reales. El contenido de humedad era calculado como una función de las dimensiones del bloque, de su edad, del factor agua/cemento, de la composición de la mezcla y de las condiciones ambientales a las que era expuesto.

Los resultados obtenidos demostraron que el concreto de serpentina poseía buenas propiedades físicas y mecánicas y que podía emplearse como material de construcción para los casos requeridos.

CONCLUSIONES SOBRE EL CONCRETO DE SERPENTINA

De las experiencias canadiense y checoslovaca se derivan las siguientes conclusiones, las que si bien es cierto no están basadas en materiales ni tecnología peruana, no dejan de ser importantísimas para trabajos peruanos futuros.

Cabe recalcar que en la bibliografía consultada, en cuanto a la experiencia checoslovaca fueron muy pocas las cifras dadas a excepción de algunas cifras porcentuales que se presentan en las páginas anteriores; sin embargo existe una amplia relación de títulos de autores checoslovacos sobre el particular.

Las conclusiones son :

- 1.- Ciertos tipos de serpentina pueden ser usados como agregados en pantallas de concreto protectores contra la radiación pues proveen el hidrógeno requerido para la atenuación de neutrones.
- 2.- El tipo de roca de serpentina requerido, existe en la naturaleza de manera abundante pero debe tenerse en cuenta para la elección de la fuente, la fuerza estructural, el contenido de humedad y el que se encuentre libre de material fibroso.
- 3.- Los tipos especiales de concreto desarrollados y ensayados en las experiencias anteriormente resumidas, pre

sentaban excelentes propiedades físicas y una alta resistencia para la temperatura media y adecuadas propiedades para temperaturas elevadas.

- 4.- Cuando se usaba agregado de alta densidad tal como escoria de hierro, con agregado de serpentina, y cemento portland hidratado, se proveía suficiente hidrógeno y otros elementos ligeros necesarios para la eficiente atenuación de neutrones cuando la temperatura en las pantallas es alta.

Los datos presentados en el caso de la experiencia canadiense fueron usados de manera efectiva en el diseño y construcción de las pantallas exteriores e interiores del NPR, reactor productor de neutrones. Estas pantallas están sujetas a ser operadas a temperaturas máximas de 320°C, y han estado funcionando durante los últimos 10 años (1,978).

- 5.- De la experiencia checoslovaca se tiene, que los resultados experimental y teórico demostraron que el concreto de serpentina es mejor desde el punto de vista de la atenuación de neutrones. (Un espesor de 150 cms. para un escudo de concreto de serpentina es 2 veces mejor - que un escudo de las mismas dimensiones de concreto ordinario).

4.7 CONCRETOS PESADOS CON AGREGADO HIDRATADO DE HIERRO

Es posible lograr concretos densos de alrededor de 3600 kg/cm^3 usando limonita, magnetita y otros agregados. La limonita en algunos casos es mezclada con magnetita ó "punchings" de acero de manera de incrementar la cantidad de agua necesaria para la atenuación de neutrones. El mineral de hierro es de especial interés desde el punto de vista que combina la alta densidad, un moderado contenido de agua y una resistencia excelente; su uso elimina la necesidad de mezclar limonita y magnetita durante la construcción y esto deriva en una reducción de costos, dependiendo de la ubicación de la planta a construirse. De datos obtenidos en el informe presentado por el cuerpo de ingenieros de la United States Army, sobre ensayos realizados en el North Pacific Division Laboratory, se resumen las excelentes propiedades estructurales de este tipo de concreto, fáciles de entender si se tiene en cuenta la cantidad de cemento que se usa y las propiedades resistentes del agregado. Calentamientos a 85 y 200°C durante dos semanas producen un pequeño deterioro en las propiedades estructurales, sin embargo, cabe recalcar que para calentamientos hasta 350°C , el deterioro fue mayor que el que presentan otros concretos densos; en este caso, la resistencia decrecía hasta el 70% y el módulo de elasticidad a un 50%.

Es de notar en este tipo de concreto que la efectividad de atenuación de la radiación gamma decrece casi directamente con el peso unitario del concreto calentado y la efectividad de atenuación del flujo de neutrones varía en mayor proporción con la pérdida de agua.

4.8 AGREGADOS DE ACERO PARA CONCRETOS DENSOS

Con las frecuentes plantas nucleares y de ciclotrones que surgían en USA en la década de 1,960, se investigó y dió auge a concretos pesados hechos con diferentes agregados. Uno de estos agregados que fue escogido por su conveniencia fue el material de acero conocido en nuestro medio como escoria, conformado por los "shot" y los "punchings", los cuales son considerados materiales inertes porque no contribuyen a la reacción química que produce el endurecimiento final del concreto.

El "punching de acero" es un agregado grueso consistente en una mezcla al azar de material deshechado de las fábricas de acero. En su mayoría son piezas lisas y circulares con un diámetro máximo de 3/8 de pulgada. Pueden encontrarse mezcladas piezas oblongas o de otras formas. Normalmente estas piezas se encuentran húmedas y oxidadas y mediante ensayos de laboratorio se ha demostrado que la herrumbre no tiene efecto sobre el proceso de hidratación del cemento.

Como en todos los concretos es necesario establecer los criterios que deben primar para el logro de la mezcla óptima y de sus proporciones. En el caso de concretos con agregados de acero es necesario contar con el término "factor shot", el cual se introduce, como una medida de la proporción relativa de material inerte (cantidad de fino/cantidad total de agregado). Generalmente priman los criterios de óptima trabajabilidad y óptima densidad para la elección de las proporciones óptimas de la mezcla, en el caso de agregados de acero, el criterio que prima es el de la alta densidad puesto que existen métodos que pueden -contrarestar la poca trabajabilidad del concreto. Se han realizado múltiples ensayos con este tipo de concretos, y en cierta forma se puede generalizar sus propiedades, debiendo tener siempre en cuenta alguna particularidad que imponga nuestra condición. En la mayoría de los ensayos -se tuvo presente el factor shot, para la máxima densidad teórica del concreto, este factor, fue previamente determinado en un 50%. También bajo el criterio de máxima densidad se determinó el factor agua/cemento límite mínimo -en 16 lts/bolsa, y el factor cemento en 9.2 bolsas/m³ como límite mínimo. Una insuficiencia de cemento puede producir vacíos en el concreto y una insuficiente cantidad -de agua además de afectar la eficiencia en la atenuación de neutrones resulta en una mezcla poco plástica.

De los ensayos realizados se concluye en algunos resull

tados que pueden ser resumidos en :

- 1.- La resistencia del concreto se incrementa bajo la influencia de algunos factores, los cuales son :
 - a.- La duración del período de curado
 - b.- El decrecimiento del factor agua/cemento
 - c.- La densidad del concreto

Es bien conocida la importancia que tiene un curado adecuado para la resistencia del concreto, y en este caso la provisión de agua y el control de las condiciones ambientales adquiere una importancia especial por las características especiales necesarias para la atenuación de neutrones.

En concretos ordinarios, la resistencia aumenta cuando se incrementa el factor cemento, lo que se explica por ser la resistencia del concreto directamente proporcional a su densidad y la gravedad específica del cemento mayor que la gravedad específica del agregado, lo que no ocurre en el caso de concretos densos, en los cuales la gravedad específica del cemento es menor que la de agregado. Esta conclusión ha sido experimentalmente verificada mediante ensayos de resistencia a la compresión y con los múltiples resultados ha sido posible hacer un gráfico mediante el cual puede previamente determinarse la resistencia del concreto para la densidad que va a ser diseñada.

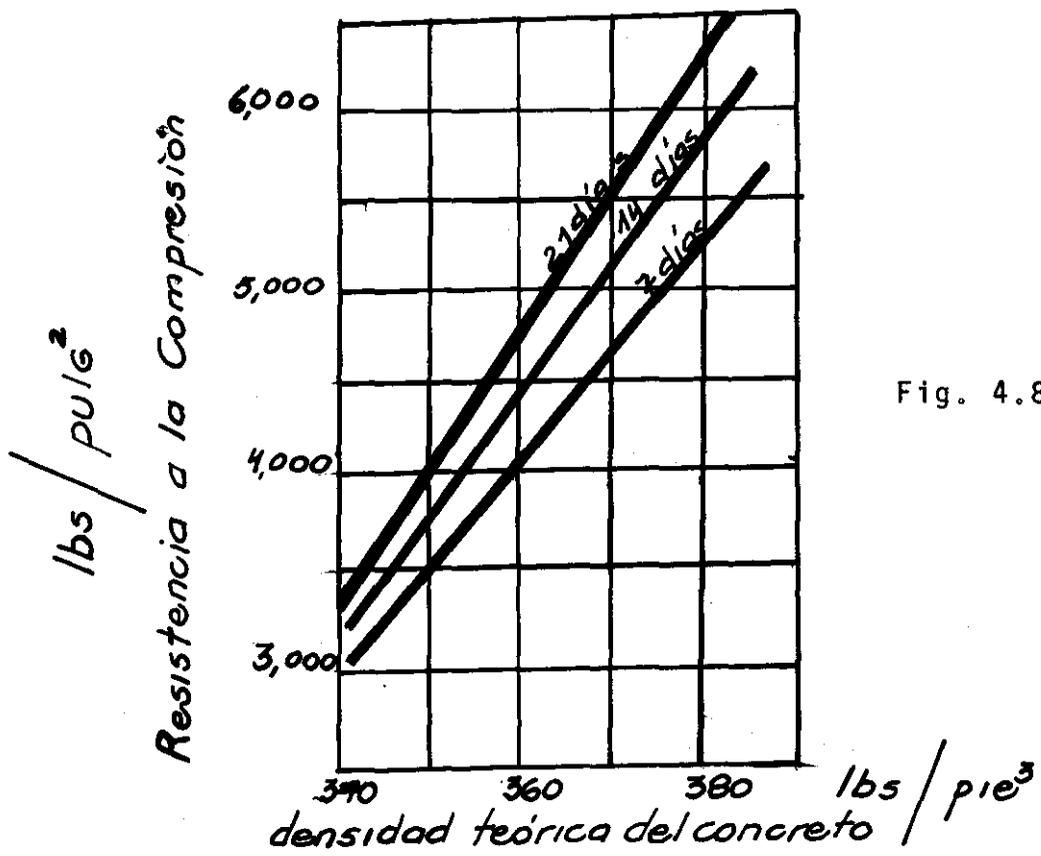


Fig. 4.8.a

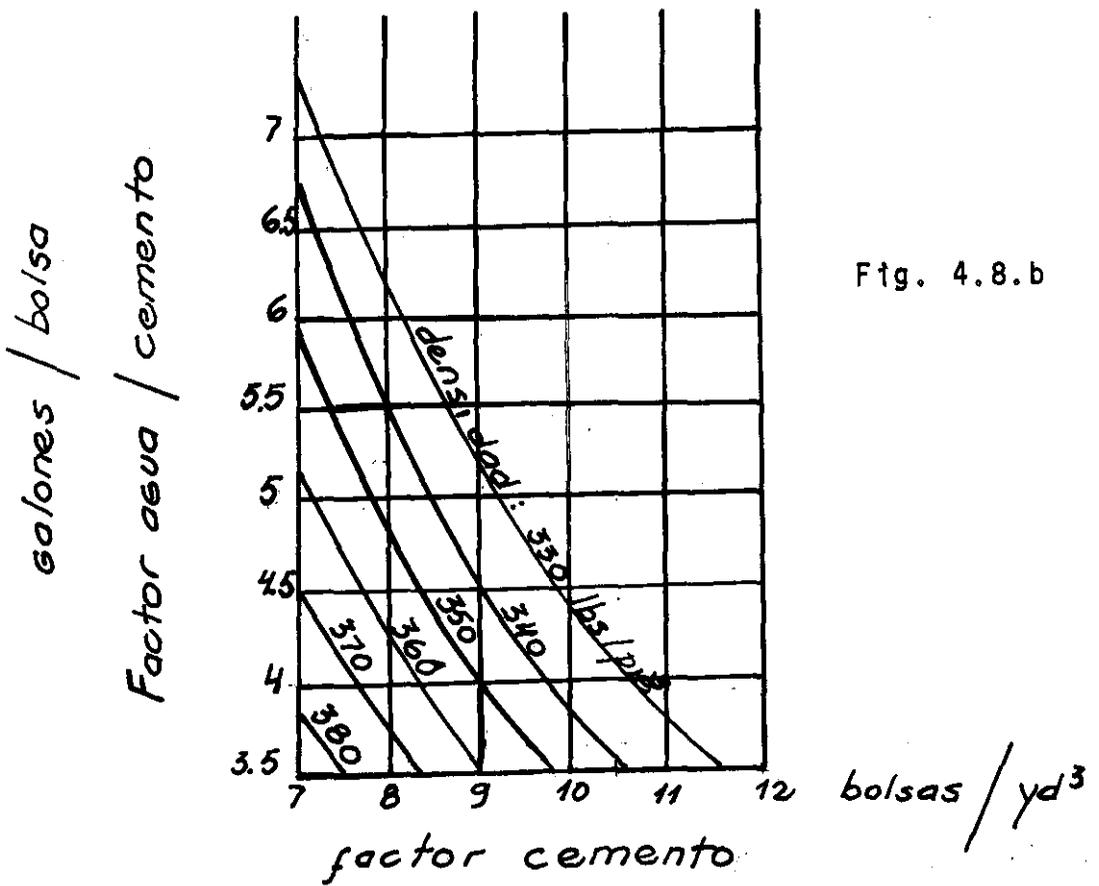


Fig. 4.8.b

do. (Fig. 4.8a), en la mayoría de los casos la variación - entre la resistencia leída y la verdadera ha estado dentro de porcentajes muy pequeños.

5. PROCESO DE COLOCACION

5.1 FUERZAS INTERNAS DE TENSION EN EL CONCRETO DENSO DEBIDAS AL PROCESO DE COLOCACION

El cálculo de esfuerzos como una función del tiempo juega un papel importante en el diseño, construcción y comportamiento del concreto a través del tiempo.

Se debe tener en cuenta dos consideraciones principales, las condiciones de forma, la cual debe evitar en lo posible los esfuerzos internos y la simplicidad del sistema estático de manera de poder determinar con facilidad las fuerzas internas debidas a cargas externas.

Dependiendo de la edad de la estructura las causas de esfuerzos de tensión son las siguientes :

- 1) Colocación del concreto
- 2) Procedimientos constructivos
- 3) Contracción del concreto
- 4) Escurrimiento plástico
- 5) Pre-esfuerzos
- 6) Presiones internas

Los sistemas de construcción de estructuras de concreto pesado pueden resumirse únicamente en dos tipos, los sistemas en que se hace el llenado por secciones y los sistemas en los que se vacía el íntegro de concreto sin inte

rrupción.

El primer tipo de construcción implica el riesgo de que se produzcan diferencias de temperatura entre la última sección vaciada y la parte hecha previamente causando esfuerzos de tensión en el concreto joven, esfuerzos que están más allá del esfuerzo último de tensión.

Todas estas consideraciones han sido confirmadas - por cálculos y experimentación, y en este caso nos referimos a la experiencia alemana.

Como consecuencia de éstos estudios se adoptaron - los procedimientos constructivos del segundo tipo, es decir los métodos en los cuales se hace el llenado del íntegro de concreto de una sola vez; en este sistema de construcción, los esfuerzos de tensión en el concreto ocurrirán debido a su endurecimiento y contracción y **decrecerán** en el tiempo.

Aunque causados por diferentes razones los esfuerzos tienen una distribución similar; los que se producen debido a la colocación y contracción dan como resultado para la sección transversal, una curva parabólica de esfuerzos, los cuales son producidos por diferencias de temperatura y diferencias en la velocidad de secado entre la zona central y la zona periférica de la sección transversal.

Durante el proceso de hidratación, el cemento libera una cierta cantidad de calor, el cual puede ser liberado únicamente por la superficie del concreto, lo que da como resultado diferencias de temperatura. Estos esfuerzos ocurren a una muy temprana edad química del concreto y las deformaciones producidas son de naturaleza plástica en cierto porcentaje. Como las diferencias de temperatura debidas a este fenómeno desaparecerán al curso del tiempo - consecuentemente la distribución de esfuerzos también desaparecerá.

La velocidad de secado del concreto se incrementa de la superficie hacia el centro de la sección transversal y de la misma manera se va encogiendo debido a la contracción que se va incrementando si las fibras del concreto no son restringidas, surgen así deformaciones que denotaremos como ϵ_{st} .

Las fibras, imaginariamente no restringidas tienen diferentes encogimientos debidos a sus diferentes velocidades de secado. Sería inútil además de difícil diferenciar cada valor, por lo que se asume que el encogimiento es uniforme en base a que la sección transversal es plana.

Tenemos :

$$N = \int \sigma df = 0 ; \quad \text{lo que significa que la suma de esfuerzos producidos en el concreto por sí mismo}$$

es cero.

El cálculo cuantitativo de estos esfuerzos es necesario para hacer una estimación del comportamiento de ϵ_{st} en el tiempo y estimar la distribución de deformaciones a través de la sección transversal debidas a la contracción.

Si asumimos que los encogimientos de las fibras no restringidas del concreto son proporcionales a la velocidad de secado, el diagrama de deformaciones a la edad de 30 días puede ser calculado con la ayuda de :

$$\epsilon_{st_{30}} = 0.18 \epsilon_{s_{\infty}} = \epsilon_{st}$$

La deformación en la fibra más alejada, causada por esfuerzos de tensión en el concreto es :

$$\epsilon_{srt} = 0.32 \epsilon_{st}$$

Similarmente, tomamos las deformaciones debidas a cambios de temperatura producidos en la colocación del concreto - como :

$$\epsilon_{trt} = \frac{2 \Delta T \alpha t}{3}$$

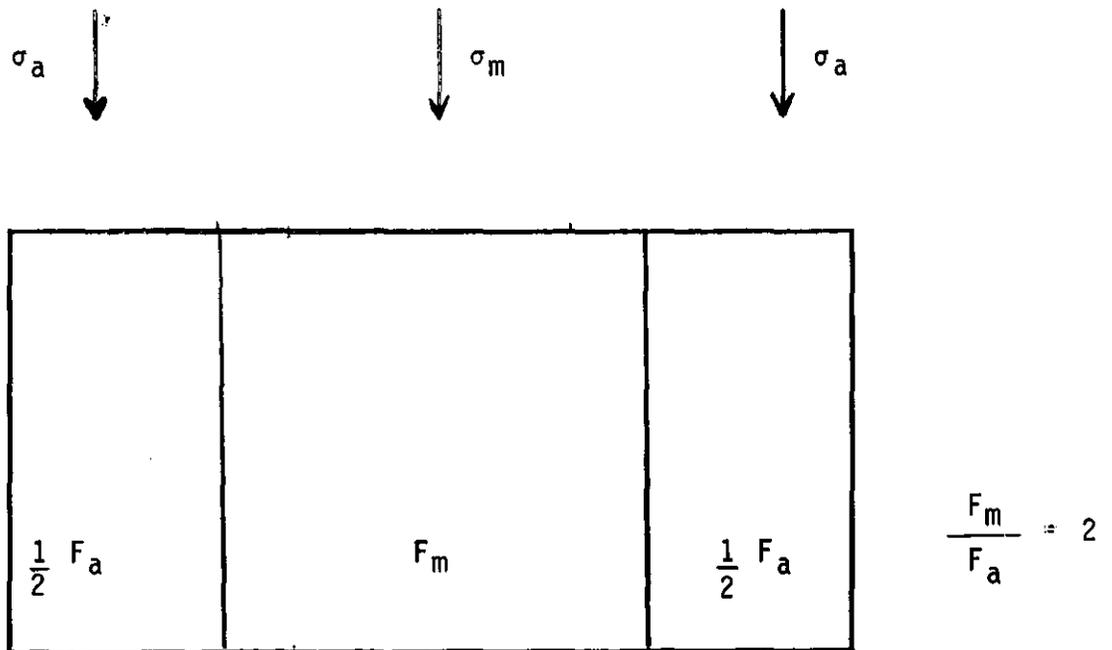
Donde :

ϵ_{trt} : es la deformación en la fibra más alejada causada por la colocación del concreto y a través del tiempo.

ΔT : diferencia de temperatura

ϵ_t : coeficiente de expansión térmica del concreto.

Para considerar los diagramas de esfuerzos, en los estudios consultados, se esquematiza la sección del siguiente modo :



$\Delta \sigma_a^{(n)}$: cambio de esfuerzo en la región externa de la sección transversal en el intervalo de tiempo n.

$\sigma_a^{(i)}$: cambio de esfuerzo en la sección, región externa, en el i-ésimo intervalo de tiempo.

$\sigma_m^{(i)}$: cambio de esfuerzo en la región interna de la sección transversal en el intervalo de tiempo i-ésimo.

$E_c^{(n)}$: promedio del módulo de elasticidad del concreto en n-ésimo intervalo de tiempo.

$\Delta \rho_i^{(n)}$: cambio de la función "escurrimiento plástico" - durante el n-ésimo intervalo de tiempo, causado por la carga ocurrida en el intervalo "i".

$\Delta \epsilon_{sa}^{(n)}$: cambio en la deformación de una fibra de la región externa de la sección transversal debido a la contracción, en el intervalo "n".

$\Delta \epsilon_{sm}^{(n)}$: cambio en la deformación de una fibra de la región interna de la sección transversal debido a la contracción en el intervalo "n".

$\Delta \epsilon_{ta}^{(n)}$: cambio en la deformación de una fibra de la región externa de la sección transversal del concreto debido a la diferencia de temperatura, en el intervalo "n".

$\Delta \epsilon_{tm}^{(n)}$: cambio en la deformación de una fibra de la región interna de la sección transversal del concreto debido a la diferencia de temperatura en el intervalo "n".

Ecuaciones :

$$\Delta \epsilon_a^{(n)} = \frac{1}{E_c^{(n)}} \sum_{i=1}^n \sigma_a^{(i)} \Delta \rho_i^{(n)} + \Delta \epsilon_{sa}^{(n)} + \Delta \epsilon_{sm}^{(n)} + \frac{\Delta \sigma_a^{(n)}}{E_c^{(n)}} + \frac{1}{2} \frac{\Delta \sigma_a^{(n)}}{E_c^{(n)}} \rho_n^{(n)}$$

$$\Delta \epsilon_a^{(n)} = \frac{1}{E_c^{(n)}} \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_a^{(i)} \Delta \rho_i^{(n)} + \Delta \epsilon_{sa}^{(n)} + \Delta \epsilon_{ta}^{(n)} + \frac{\Delta \sigma_a^{(n)}}{E_c^{(n)}} + \frac{1}{2} \frac{\Delta \sigma_a^{(n)}}{E_c^{(n)}} \rho_n^{(n)}$$

$$\Delta \epsilon_m^{(n)} = \frac{1}{E_c^{(n)}} \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_m^{(i)} \Delta \rho_i^{(n)} + \Delta \epsilon_{sm}^{(n)} + \Delta \epsilon_{tm}^{(n)} + \frac{\Delta \sigma_m^{(n)}}{E_c^{(n)}} + \frac{1}{2} \frac{\Delta \sigma_m^{(n)}}{E_c^{(n)}} \rho_n^{(n)}$$

Considerando :

$$\Delta \sigma_a^{(n)} \cdot F_a + \Delta \sigma_m^{(n)} \cdot F_m = 0$$

Tenemos :

$$\Delta \sigma_a^{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sigma_a^{(i)} \Delta \rho_i^{(n)} - \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_m^{(i)} \Delta \rho_i^{(n)} + E_c^{(n)} (\Delta \epsilon_{sa}^{(n)} - \Delta \epsilon_{sm}^{(n)} + \Delta \epsilon_{ta}^{(n)} - \Delta \epsilon_{tm}^{(n)})}{\left(1 + \frac{\Delta \rho_n^{(n)}}{2}\right) \left(1 + \frac{1}{2}\right)}$$

5.1.1 COLOCACION IN-SITU DEL CONCRETO PESADO :

METODO DE PRE-COLOCACION DEL AGREGADO.

Este método tiene cerca de dos décadas de uso a pesar de que como se demuestra en un acápite anterior presenta inconvenientes por la aparición de esfuerzos internos de tensión. En este caso, cuando se aplica este método, la colocación del concreto se realiza por secciones, colocando primeramente una capa de agregado e inyectando después mortero en cantidad suficiente. Al parecer se trata de un método bastante simple pero que involucra para cada caso en especial cuidados adecuados. Es recomendable para el agregado pesado, co

mo por ejemplo serpentina o escoria de acero, colocar previamente el agregado dentro de un mezclador, cubrirlo con agua y removerlo uniformemente; luego debe ser colocado en una placa vibradora para remover el exceso de agua y algunas piezas de agregado mas pequeñas que las necesarias, a parecidas durante el mezclado por efectos de fracturación. Las partículas de agregado deben transportarse luego con sumo cuidado al lugar de colocación y dejarlas caer poco a poco en las formas definitivas, para lo que se recomienda un dispositivo de caucho, a fin de amínorar los **golpes** y fracturas inconvenientes. En este punto es necesario tener un especial cuidado para prevenir la segregación y asegurar que el agregado llene completamente las formas, característica de suma importancia sobre todo para el caso de concreto que va a atenuar la irradiación de neutrones; los agregados escurridos deben ser cuidadosamente compactados con una barrena de mano para **minimizar las fracturas**.

El mortero diseñado debe ser de alta densidad y llenarse al tope, de manera de proveer el aglutinante necesario; debe poseer una consistencia espesa, de modo que se pueda prevenir el escurrimiento de agua de la mezcla hacia la zona inferior y además debe ser colocado con bastante cuidado alrededor del refuerzo de acero. La intrusión del aglutinante desplaza el agua sobrante del agregado y llena los intersticios y vacíos entre la masa de éste. La siguien

te capa de agregado es colocada sobre la anterior y el proceso se repite.

La efectividad de este método está también determinada por el proceso de vibración después de colocado el concreto, proceso que puede incrementar la densidad in-situ - en un promedio de 5 a 8 libras por pie³.

El tiempo óptimo de vibración ocurre cuando el vibrador ya no puede hundirse en el concreto debido a su peso propio. Es necesario que la vibración sea la suficiente sin que sea demasiada, sobre todo para que remueva al aire atrapado y el agua exudada.

Cabe tener cuidado con la elección del método conveniente de colocación del concreto denso, sopesando las características del concreto, su destino funcional y las condiciones de operación futuras.

5.1.2 FLUJO DE AIRE A TRAVES DE LAS FRACTURAS DEL CONCRETO :

La posibilidad de que pueda existir escape de aire o en casos extremos de gases contaminados a través del concreto diseñado para una función protectora a la radiación y/o para estructuras capsulares receptoras de reactores es debida a las fracturas que pueden existir o producirse en el concreto y a la porosidad del mismo. Las fracturas en el

concreto se producen si los esfuerzos de tensión exceden la resistencia última a la tensión, lo cual se puede producir en casos excepcionales pero no imposibles. De esta posibilidad surgió la necesidad de tener una cuantificación del flujo a través de las fracturas.

A este respecto se avoca un estudio alemán, del cual resumimos la parte de interés para nuestro tema, siendo muy factible la adaptación experimental en nuestro medio.

Los experimentadores alemanes idearon un instrumento simple para los efectos de medición de volúmenes el cual se esquematiza en la figura 5.1.a, éste instrumento consta de un manómetro en U, un tanque de presión de aire comprimido controlado por válvulas, y un vaso medidor cilíndrico semi-sumergido en agua. Las diferencias de presión Δp producida por el aire comprimido es leída en el manómetro en U. El volumen de corriente a través de la fractura del concreto, la que ha sido sellada externamente con "gussolith", es recogido en el vaso cilíndrico graduado. La medida de volúmenes escapados fue hecha en función del tiempo y también puede hacerse una lectura de presiones en función de la longitud de fractura.

El volumen se determina en función del Δp y también en función del parámetro "longitud de fractura/ancho de fractura" (L/W). En el experimento realizado en Alemania -

ESQUEMA DEL INSTRUMENTO MEDIDOR DEL VOLUMEN DE AIRE QUE FUGA
A TRAVES DE UNA FRACTURA EN EL CONCRETO

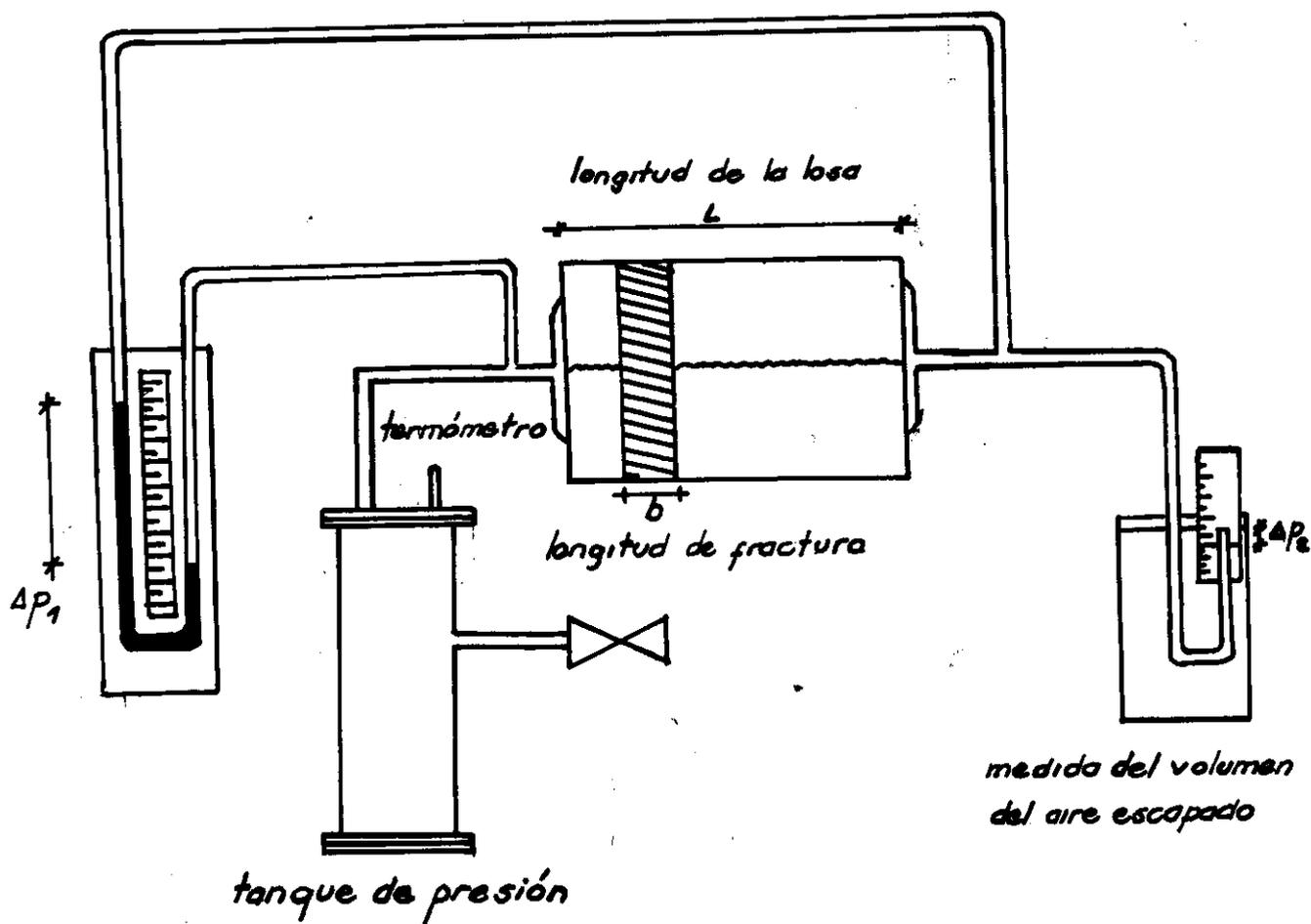


Fig. 5.1.a

se observó un decrecimiento en el valor del volúmen de escape en la región en que $L/W = 3 \times 10^3$, aparentemente este fenómeno es el resultado de la turbulencia en el flujo de la fractura.

Asumiendo un flujo laminar en un medio incomprensible y fracturas uniformes el gráfico de la media esperada de pérdida de presión es una curva parabólica, sin embargo para los rangos experimentados ningún concreto con ningún tipo de fractura resultó en esta curva ideal.

Es necesario hallar una ecuación general para medir el volúmen de escape V_e como una función de Δ_p , del ancho de la fractura, de la longitud y temperatura. La ecuación común de decrecimiento de presión de expansión isotérmica es :

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = \frac{\epsilon l V_1 \gamma_1}{2gd}$$

Donde :

- p_1 : presión en el punto de inicio de la fractura
- p_2 : presión en el punto de terminación de la fractura
- Δ_p : es $p_1 - p_2$
- l : longitud de fractura.
- V_1 : velocidad del flujo al inicio de la fractura.
- d : diámetro hidráulico.

g : aceleración debida a la gravedad.

γ : gravedad específica del fluido al inicio de la fractura

W : ancho de la fractura, $(d/2)$

ϵ : coeficiente de decrecimiento de presión.

ϵ , como ya ha sido indicado es el coeficiente de decrecimiento de presión y es función del coeficiente de Reynold, ampliamente conocido en Hidráulica elemental. (R_e).

En el caso de fracturas producidas por rotura el valor es mas bajo que para fracturas producidas por calentamiento de la losa por un solo lado.

La medida de volúmenes de escape de aire tiene la restricción de la medida del ancho de la fractura, la cual no puede ser mayor que 0.11 mm.

La función $\epsilon = F(R_e)$ dada, indica que existe un cambio evidente en la corriente, de flujo laminar a turbulento. Este cambio temprano es el resultado de considerables rajaduras en la superficie del concreto fracturado.

$$\epsilon = \frac{\Delta p (2p_2 + \Delta p) W 2g}{p_1 \cdot 1 \cdot v_1^2 \cdot \gamma_1}$$

para $10^{-2} < R_e < 10^2$

en donde :

$$R_e = \frac{V \cdot d}{\mu}$$

μ = viscosidad cinemática.

Se cumple que :

$$\epsilon = \frac{1,200}{R_e}$$

$$\epsilon = \frac{1,200\mu}{V_1 d}$$

Además :

$$V_1 = V_{e1}/A_1$$

$$V_1 = V_{e1}/b_1 W_1$$

Donde :

V_{e1} : volúmen de escape a la entrada de la fractura (en i seg.)

V_{e2} : volúmen de escape al final de la fractura (en i seg.)

b : tercera dimensión de la fractura.

V : velocidad del flujo :

$$V_{e2} = \frac{p_1 V_1 b_1 W_1}{p_2}$$

$$V_{e2} = \frac{\Delta p (2 + \Delta p/p_2) W_1^3 b_1 g}{300 i (1 + \Delta p/p_2) \gamma_2 \mu_2}$$

Los resultados de esta investigación nos dan la manera de obtener los volúmenes de escape de fluido a través de las fracturas del concreto teniendo en cuenta las restriccio-

nes de ancho y de distribución de fracturas. Como es ya conocido, las fracturas ocurren cuando es excedida la resistencia última a la tensión.

Si :

F_t : es la fuerza de tensión que produce la fractura

A : es el área de la sección transversal.

B_t : es la resistencia última a la tensión.

n : es "area de acero/area de la sección transversal". A_a/A .

a : espaciamiento entre fracturas.

ϵ_a : elongación unitaria del acero en la región de a .

ϵ_c : elongación unitaria del concreto en la región de a .

Tenemos que :

$$B_t = \frac{F_t}{A}$$

Los esfuerzos en el acero son :

$$\frac{F_t}{A_a} = \frac{B_t A}{A_a} = \frac{B_t}{n}$$

El ancho de fracturas será :

$$W = a (\epsilon_a - \epsilon_c)$$

Asumiendo que $W=0.1$ mm. con valores de " n " cercanos al 1%, $B_t = 30$ kg/cm² y $E_a = 2.1 \times 10^6$ kg/cm², tenemos :

$$\begin{aligned} a_{\text{medio}} &= W/\epsilon_a \\ &= \frac{0.01 \times 2.1 \times 10^6}{30} \end{aligned}$$

$$a_{\text{medio}} = 7 \text{ cms.}$$

RECOMENDACIONES

A lo largo de este trabajo se han desarrollado capítulos referentes a las propiedades del concreto, a los efectos que la irradiación produce en ellas y a los materiales con los cuales puede fabricarse el concreto más apropiado.

En lo que concierne a propiedades del concreto, es mucho lo que puede agregarse, sobre todo en lo concerniente a comportamiento tiempo-dependiente y temperatura, aspectos en los cuales se han presentado los lineamientos teóricos básicos necesarios para hacer un diseño experimental del que se obtendrían resultados directos de aplicación práctica.

En un primer momento el plan de tesis incluía una parte experimental, la que no pudo realizarse por razones de capacidad de flujo del reactor con que contamos, pruebas que hubieran tenido que realizarse con muestras cilíndricas de concreto de 3 cms. de radio y 10 cms. de altura y bajo un flujo de neutrones de 10^7 n/cm²/seg. lo que resultaba totalmente ineficiente para los fines que se perseguían. Esto nos lleva a concluir que para un primer proyecto peruano tendremos que guiarnos de la experiencia ganada en otros países durante las casi tres décadas de aplicación de la energía nuclear con fines pacíficos, ex-

perencia sumamente valiosa si se tiene en consideración que el comportamiento del concreto es variable con el tiempo, aunque el que halla transcurrido nos parezca lo suficientemente largo para considerar al material en su condición final; por las razones expuestas tratar de avanzar solos sin contar con esta valiosa ayuda sería un error demasiado caro para un país como el nuestro, permitiéndome aconsejar la adquisición inmediata de bibliografía competente a la que se tiene acceso libre en otros países en los que existen aproximadamente 1,000 títulos expresamente dedicados a la investigación de concretos especiales - para el fin que nos interesa. En cuanto a los experimentos, en todos los trabajos consultados los autores se basan en postulados fundamentales, los que sin tomar en cuenta los métodos de operación e investigación no son en esencia muy diferentes de los requerimientos existentes para los otros tipos de concreto. Afortunadamente los autores consideran el concreto desde el punto de vista de la calidad expresada numéricamente y como investigadores asimilan las necesidades del diseñador, del constructor y del usuario.

Cuando deba hacerse un estudio experimental, será necesario diseñar y fabricar muchas dosis para especímenes de ensayo teniendo en cuenta cada parámetro de manera de medir los efectos reales y evitar los errores. Las di-

mensiones de los especímenes de ensayo deben estar en correlación con las dimensiones de los elementos a trabajar realmente y los resultados obtenidos en estos ensayos con microconcreto deberán ser utilizados en ensayos con macroconcreto, usando un menor número de muestras. En este aspecto es necesario mucho tino profesional para determinar la correlación exacta entre el micro y el macroconcreto.

Es posible repetir los ensayos realizados por otros países dentro de un rango de error del 3%, para el laboratorio y un 15% para los elementos reales.

La tecnología del concreto no es un arte, pero es una ciencia y los resultados obtenidos por un investigador pueden ser obtenidos por otros bajo las mismas condiciones. Los problemas podrían surgir debido a la fuente de medidas standard y a la falta de equilibrio en el planteamiento de los fenómenos causa-efecto; por ésto, el balance preciso entre las relaciones, los datos de composición y las propiedades del concreto fresco y endurecido tienen que ser precisamente definidos por escrito.

En particular para reproducir las muestras éstas deben estar detalladas así :

- a.- Composición petrográfica, mineralógica y química.
- b.- Fuerzas de tensión activas presentes en las superficies de los minerales.

- c.- Graduación de los agregados en por lo menos 5 clases.
- d.- Contenido de partículas finas.
- e.- Reacción alcalina del agregado.
- f.- Composición química del cemento usado.
- g.- Propiedades del concreto fresco.

Con estos datos, puede adaptarse cualquier estudio y en cuanto al material indicado, por lo expuesto en las páginas anteriores se deduce que el mas conveniente para iniciar una investigación es la serpentina, de la que además existen fuentes naturales en los departamentos de Junín, Huánuco, Lima, Ica, Arequipa y Huancavelica, determinar cual es el tipo más conveniente, es trabajo que nos espera, trabajo que deberá planearse de manera cuidadosa, para que los resultados nos lleven a la obtención tecnológica de un concreto bueno, competitivo y predecible.

BIBLIOGRAFIA

- 1) "CONCRETE FOR NUCLEAR REACTORS". Special Publication SP-34. ACI.

Artículos Tomados :

- a.- Davis, Herold S. "CONCRETE FOR RADIATION SHIELDING"
- b.- Davidson I. & Jaeger T.A. "POWER REACTOR DEVELOPMENT AND PRESTRESSED CONCRETE REACTOR PRESSURE"
- c.- Pihlajavaara S.E. "PRELIMINARY RECOMENDATION FOR DESIGN, MAKING AND CONTROL OF RADIATION SHIELDING STRUCTURES".
- d.- Browne, R.D. & Blundell R. "RELEVANCE OF CONCRETE PROPERTY RESEARCH TO PRESSURE VESSEL DESIGN"
- e.- Plaehn J.L. "A PRACTICAL APPROACH TO THE DESIGN PHILOSOPHY OF PRESTRESSED CONCRETE REACTOR VESSELS : THE IMPORTANCE OF CONCRETE PROPERTIES TO PCRV DESIGN".
- f.- Hormann H.H. "PCRV, PROBLEMS OF CALCULATION, MATERIAL PROPERTIES AND EVALUATION OF RESULTS"
- g.- Khan M.H. & Saugy B. "EVALUATION OF THE INFLUENCE OF SOME CONCRETE CHARACTERISTICS ON NON-LINEAR BEHAVIOR OF A PCRV".
- h.- David, M. "ANALYSIS OF PRESTRESSED CONCRETE PRESSURE VESSELS FOR NUCLEAR REACTORS IN CZECHOSLOVAKIA".
- i.- Schimmlwitz P. & Hundt J. "A NOTE ON THE MOISTURE CONDITION OF CONCRETE".

- j.- Poitevin P. "WATER MIGRATION IN CONCRETE UNDER A SUSTAINED TEMPERATURE GRADIENT".
- k.- Karasuda S. & HOSHINO I. "DRY DENSITY OF CONCRETE AT ELEVATED TEMPERATURE".
- l.- McDonald J.E. "AN EXPERIMENTAL STUDY OF MOISTURE MIGRATION".
- m.- YUAN, R.L., Hildsdorff H.K. & Kesler C.E. "THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE DRYING OF CONCRETE".
- n.- Pihlajavaara S.E. & Tiussnen K. "A PRELIMINARY STUDY OF THERMAL MOISTURE TRANSFER IN CONCRETE".
- ñ.- Marechal J.C. "THERMAL CONDUCTIVITY AND THERMAL EXPANSION COEFFICIENTS OF CONCRETE AS A FUNCTION OF TEMPERATURE AND HUMIDITY".
- o.- Desov A.E. & Jankelev L.F. "SOME PECULARITIES AND RESULTS OF INVESTIGATIONS ON THERMAL CONDUCTIVITY AND DIFFUSIVITY OF HEAVY CONCRETE".
- p.- ELLEUCH M.F., Dubois F & Rappeneau J. "EFFECTS OF NEUTRON RADIATION ON SPECIAL CONCRETES AND THEIR COMPONENTS".
- q.- Davis, S.H. "N-REACTOR SHIELDING".
- r.- Granata S. & Montagnini A. "STUDIES ON BEHAVIOR OF CONCRETE UNDER IRRADIATION".
- s.- Smith E.C. "APPLICATIONS OF HEAVY CONCRETE IN CANADA"
- t.- Davis H.S. "IRON-SERPENTINE CONCRETE"
- u.- Hunig A, Vesely F, Samalíková M, Stoces B. & Havránek M.

"SERPENTINE CONCRETE FOR CZECHOSLOVAKIA A-2 REACTOR SHIELDING".

v.- Ohgishi S., Miyasaka S., & Chida J. "ON PROPERTIES OF MAGNETITE AND SERPENTINE CONCRETE AT ELEVATED TEMPERATURES FOR NUCLEAR REACTORS SHIELDING".

w.- Buss W. "PROOF OF LEAKAGE RATE OF A CONCRETE REACTOR BUILDING".

x.- Chuang. J.W., Kennedy. T.W., Perry. E.S. & Thomson J.N. "PREDICTION OF MULTIAXIAL CREEP FROM UNIAXIAL CREEP TESTS".

y.- Mukadamm M.A. & Bresler B. "BEHAVIOR OF CONCRETE UNDER VARIABLE TEMPERATURA AND LOADING".

z.- Vourinen J. "THERMOS-CALORIMETER FOR CONCRETE IN EVALUATION OF CEMENTS AS TO HEAT EVOLUTION".

2) "CONCRETE FOR RADIATION SHIELDING". ACI.

3) United States Atomic Energy Commission. "NUCLEAR SCIENCE ABSTRACTS".

4) Gorostiza, Luis, "RELACIONES ESPUERZO DEFORMACION VISCO ELASTICAS PARA EL CONCRETO Y SU APLICACION EN BLINDAJES DE REACTORES NUCLEARES".
