



CAPÍTULO I **FUNDAMENTOS DEL HORMIGÓN SIMPLE**

1.1 INTRODUCCIÓN:

El hormigón es una piedra artificial formada al mezclar apropiadamente cuatro componentes básicos: cemento, arena, grava y agua.



Figura 1.1: Componentes del hormigón.

Las propiedades del hormigón dependen en gran medida de la calidad y proporciones de los componentes en la mezcla, y de las condiciones de humedad y temperatura, durante los procesos de fabricación y de fraguado.

Para conseguir propiedades especiales del hormigón (mejor trabajabilidad, mayor resistencia, baja densidad, etc.), se pueden añadir otros componentes como aditivos químicos, microsílíce, limallas de hierro, etc., o se pueden reemplazar sus componentes básicos por componentes con características especiales como agregados livianos, agregados pesados, cementos de fraguado lento, etc.



Figura 1.2: Aditivos para el hormigón.

El hormigón ha alcanzado importancia como material estructural debido a que puede adaptarse fácilmente a una gran variedad de moldes, adquiriendo formas arbitrarias, de dimensiones variables, gracias a su consistencia plástica en estado fresco.



Figura 1.3: Geometrías proporcionadas al hormigón endurecido.

Al igual que las piedras naturales no deterioradas, **el hormigón es un material sumamente resistente a la compresión, pero extremadamente frágil y débil a solicitaciones de tracción.** Para aprovechar sus fortalezas y superar sus limitaciones, en estructuras se utiliza el **hormigón combinado con barras de acero resistente a la tracción**, lo que se conoce como **hormigón armado**, o combinado con cables tensados de acero de alta resistencia, lo que se identifica como **hormigón preesforzado**.



Figura 1.4: Hormigón armado y hormigón preesforzado.

1.2 LOS MATERIALES CEMENTANTES:

Son materiales aglomerantes que tienen las propiedades de adherencia y cohesión requeridas para unir fragmentos minerales entre sí, formando una masa sólida continua, de resistencia y durabilidad adecuadas.

Dentro de esta categoría, además de los cementos propiamente dichos, se encuentran materiales empleados con menos frecuencia como las cales, los asfaltos y los alquitranes.



Figura 1.5: Materiales cementantes.

Para fabricar hormigón estructural se utilizan únicamente los **cementos hidráulicos** (utilizan agua para reaccionar químicamente y adquirir sus propiedades cementantes durante los procesos de endurecimiento inicial y fraguado). Entre los diferentes cementos hidráulicos destaca, por su uso extendido, el **cemento Portland**, pero además existen los **cementos naturales** y los **cementos con alto contenido de alúmina**.



Figura 1.6: Saco de cemento Pórtland.

El cemento Portland es un polvo muy fino, de color grisáceo, que se compone principalmente de silicatos de calcio y de aluminio, que provienen de la combinación de calizas, arcillas o pizarras, y yeso, mediante procesos especiales. El color parecido a las piedras de la región de Portland, en Inglaterra, dio origen a su nombre.



Figura 1.7: Cemento portland.

El proceso de manufactura del cemento consiste, esencialmente, en la trituración de los materiales crudos (calizas y arcillas); su mezcla en proporciones apropiadas; y su calcinación a una temperatura aproximada de 1400°C, dentro de un cilindro rotativo, lo que provoca una fusión parcial del material, conformándose bolas del producto llamadas **clinker**. El clinker es enfriado y luego es molido junto con el yeso hasta convertirlo en un polvo fino llamado cemento Portland.

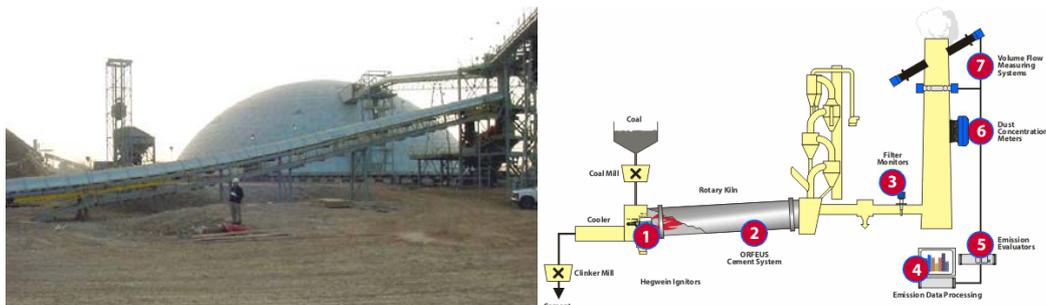


Figura 1.8: Fabricación del cemento portland.

Existen diversos tipos de cemento Portland:

Tipo I: Se lo conoce como **cemento Portland ordinario**, que es el de mayor utilización en el mercado. Se lo utiliza en hormigones normales que no estarán expuestos a sulfatos en el ambiente, en el suelo o en el agua del subsuelo.



Figura 1.9: Cemento portland tipo I.

El cemento Portland tipo IA es similar al tipo I, pero produce la introducción de burbujas de aire, de diámetro controlado, en el hormigón.

El cemento Portland tipo IP contiene un cierto porcentaje de puzolana (entre 15 y 40%), lo que cambia la curva de crecimiento de la resistencia, a temprana edad.

Tipo II: El cemento genera menor calor de fraguado, a una velocidad menor que el tipo I. La característica más importante es que presenta una **resistencia moderada a los sulfatos**, por lo que es usado en obras marinas y en elementos enterrados.



Figura 1.10: Cemento portland tipo II.

El cemento Portland tipo IIA es similar al tipo II, pero produce la introducción de burbujas de aire en el hormigón.

Tipo III: Son los **cementos de fraguado rápido**, que suelen utilizarse en obras de hormigón que están en contacto con flujos de agua durante su construcción, o en obras que pueden inestabilizarse rápidamente durante la construcción. El problema básico que presenta es que el calor de fraguado se emite con mayor rapidez que en otros cementos por lo que requiere especial cuidado con el curado.



Figura 1.11: Cemento portland tipo III.

El cemento Portland tipo IIIA es similar al tipo III, pero produce la introducción de aire en el hormigón.

Tipo IV: Son **cementos de fraguado lento**, que producen poco calor de hidratación, durante mayor tiempo. Se emplea en obras que contienen grandes volúmenes continuos de hormigón como las presas, permitiendo controlar el calor emitido durante el proceso de fraguado. El tiempo que requieren para alcanzar la resistencia especificada es mayor que en el cemento tipo I (56 días, 84 días).

Tipo V: Son **cementos resistentes a los sulfatos** que pueden estar presentes en los agregados del hormigón o en el propio medio ambiente. La presencia de sulfatos junto con otros tipos de cementos provoca la desintegración progresiva del hormigón y la destrucción de la estructura interna del material compuesto.



Figura 1.12: Cemento portland tipo V.

1.3 LOS ÁRIDOS:

En los hormigones estructurales, los áridos o agregados ocupan alrededor de las tres cuartas partes del volumen total del hormigón; el volumen restante está constituido por pasta endurecida de cemento, agua sin combinar y burbujas de aire.

Mientras mayor sea el nivel de compactación del hormigón, mejor será su resistencia y más económica será su fabricación; por esta razón resulta importante cuidar la granulometría (tamaño de los granos y distribución estadística de esos tamaños de grano) de los áridos. También es importante que las características mecánicas de los áridos sean adecuadas y que los áridos estén libres de impurezas.



Figura 1.13: Áridos finos y gruesos.

Los áridos naturales se clasifican en finos y gruesos. Los **áridos finos** o arenas pasan por el tamiz # 4. Los **áridos gruesos** no atraviesan el tamiz # 4 y se conocen como gravas (ripió en nuestro medio).

Los áridos gruesos presentan mejores propiedades de adherencia con la pasta de cemento cuando son triturados, lo que les dota de aristas (los áridos con superficie redondeada tienen menor adherencia). Sin embargo, los cantos rodados de río presentan generalmente una mejor resistencia interna.

1.4 DOSIFICACIÓN Y ESTRUCTURA INTERNA DEL HORMIGÓN:

Las proporciones en que se mezclan los componentes básicos y complementarios del hormigón constituyen su dosificación. Las propiedades del hormigón endurecido

dependen de la dosificación inicial de los componentes básicos y complementarios, del proceso de mezclado, y del proceso de curado.

En términos generales los agregados dotan al hormigón de una estructura interna en la que los agregados más finos se intercalan entre los agregados más gruesos.

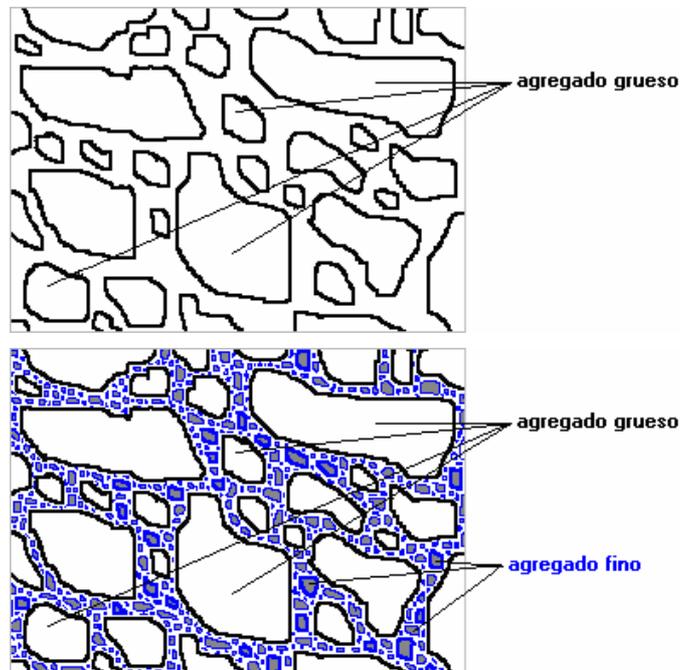


Figura 1.14: Estructura interna del hormigón fresco.

La **pasta de cemento** (cemento más agua), por su parte, llena los espacios libres entre partículas de áridos en el hormigón fresco además de envolver totalmente a los áridos.

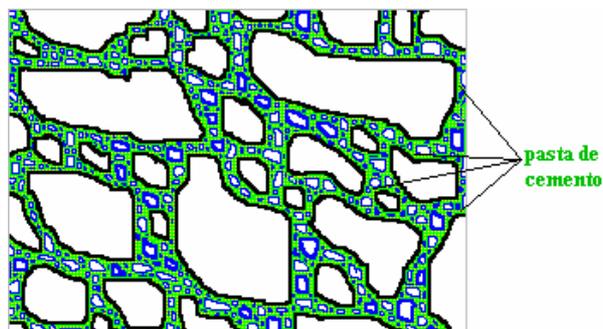


Figura 1.15: Pasta de cemento en la estructura interna del hormigón fresco.

Durante el proceso de fraguado, la pasta de cemento da origen a **cristales hidratados** que unen químicamente las partículas de agregados. La formación de estos cristales es una reacción química exotérmica (genera calor) que siempre requiere de agua para que tenga lugar, siendo mucho más intensa la reacción (la creación de nuevos cristales cohesivos) en las primeras horas y días posteriores a la fabricación del hormigón, y luego va disminuyendo progresivamente en su intensidad con el tiempo. Normalmente, dentro del hormigón, una pequeña parte del cemento no alcanza a combinarse con el agua, por lo que permanece como **cemento no hidratado**, que no contribuye a la resistencia del hormigón, y por el contrario actúa como una porosidad debilitante.

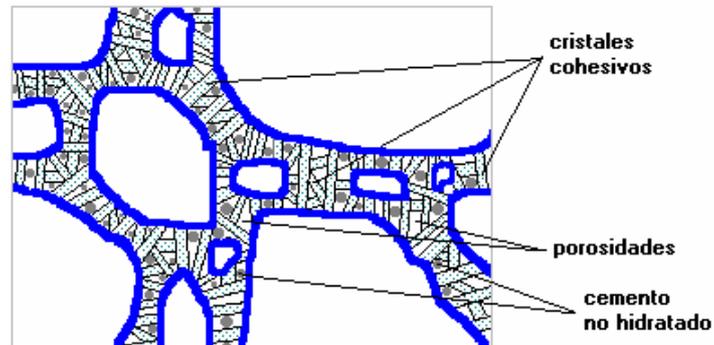


Figura 1.16: Estructura interna del hormigón endurecido.

Para asegurar que las reacciones de fraguado continúen, a partir del endurecimiento inicial del hormigón (que normalmente se produce en las primeras doce horas después del mezclado), se requiere dotar continuamente al hormigón de **agua de curado**, la que sirve para reponer el **agua de amasado** evaporada por el calor emanado como producto de las reacciones químicas. Esta agua de curado usualmente se la proporciona humedeciendo la superficie de los elementos de hormigón.



Figura 1.17: Curado del hormigón.

La propiedad de diseño más importante del hormigón constituye su **resistencia**; la propiedad constructiva más importante es su **trabajabilidad**. Usualmente estas dos propiedades son mutuamente conflictivas durante la construcción.



Figura 1.18: Hormigón poco trabajable.



En general una **relación agua/cemento (a/c)** baja, medida al peso, que a la vez mantenga una adecuada trabajabilidad en el hormigón fresco, conduce a hormigones de mayor resistencia y mejor calidad. Lamentablemente la disminución de la cantidad de agua en el hormigón produce hormigones menos trabajables que pueden presentar defectos tipo hormigueros.



Figura 1.19: Hormigueros.

Se requiere aproximadamente una relación **a/c** mínima de **0.25** para que todo el cemento presente en la mezcla reaccione químicamente con el agua formando pequeños **puentes cristalizados** entre las superficies de las partículas de áridos. Estos cristales son los responsables de la cohesividad entre las partículas y de la resistencia del hormigón en general.

Cualquier exceso de agua durante el amasado, por encima de la relación **a/c** de 0.25, se convertirá, luego del fraguado inicial, en espacios vacíos por la evaporación del agua (o espacios con agua que no alcanza a escapar de los poros luego del fraguado) que disminuyen considerablemente la resistencia del hormigón, y también provocará que los puentes cristalizados tengan mayor longitud y sean menos resistentes.

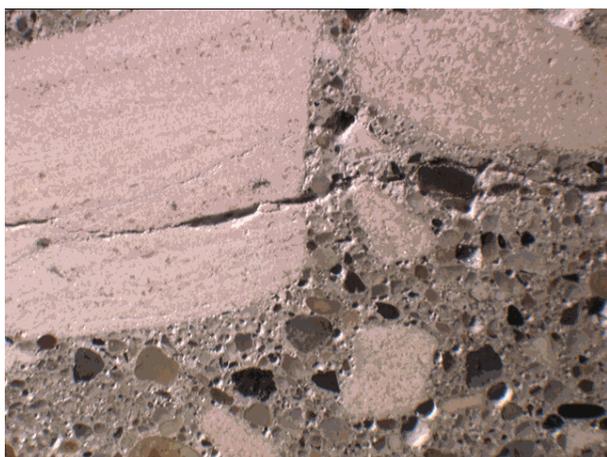


Figura 1.20: Vacíos en el hormigón endurecido.

Lamentablemente una relación **a/c** cercana a 0.25 (que en teoría nos proporcionaría la mayor resistencia), no puede ser conseguida en un hormigón normal, pues la disminución de agua de amasado provoca una pérdida importante de trabajabilidad e inclusive puede llegar a imposibilitar la consecución de una mezcla apropiada. Para



asegurar una mezcla homogénea y una trabajabilidad razonable en un hormigón normal (sin aditivos) serán necesarias relaciones **a/c** mínimas del orden de 0.60.

La falta de agua de curado durante el fraguado del hormigón (particularmente en los primeros días en que las reacciones son más intensas) tiene efectos adversos sobre la resistencia final del hormigón, pues provoca que las partículas de cemento no reaccionen totalmente, dando lugar a pocos cristales de unión entre partículas de áridos, con lo que disminuye la cohesión.

1.5 LOS ADITIVOS:

Existen aditivos químicos que, en proporciones adecuadas, cambian (mejoran) las características del hormigón fresco, del hormigón endurecido y del proceso de fraguado.



Figura 1.21: Aditivos para el hormigón.

Los **aditivos plastificantes** son los más utilizados en nuestro medio, y permiten que la trabajabilidad del hormigón fresco mejore considerablemente, por lo que se los suele utilizar en hormigones que van a ser bombeados y en hormigones que van a ser empleados en zonas de alta concentración de armadura de hierro.



Figura 1.22: Hormigón bombeado.

Estos mismos aditivos pueden conseguir, manteniendo la trabajabilidad de un hormigón normal, que se reduzca la cantidad de agua de amasado mejorando con ello la resistencia del hormigón. El efecto básico que logran los aditivos plastificantes es el de disminuir la tensión superficial del agua de amasado con lo que disminuye la energía requerida para trabajar con el hormigón fresco.

Existen **aditivos superplastificantes** (también se los conoce en el mercado como **reductores de agua de alto rango**) que pueden convertir a un hormigón normal en un **hormigón fluido**, que no requiere de vibración para llenar todos los espacios de las formaletas, inclusive en sitios de difícil acceso para el hormigón. Así mismo, si se mantiene una trabajabilidad normal, estos aditivos permiten la reducción de la relación agua/cemento hasta valores cercanos a 0.30, consiguiéndose **hormigones de mediana resistencia** (entre 350 Kg/cm² y 420 Kg/cm²) y **hormigones de alta resistencia** (mayores a 420 Kg/cm²).

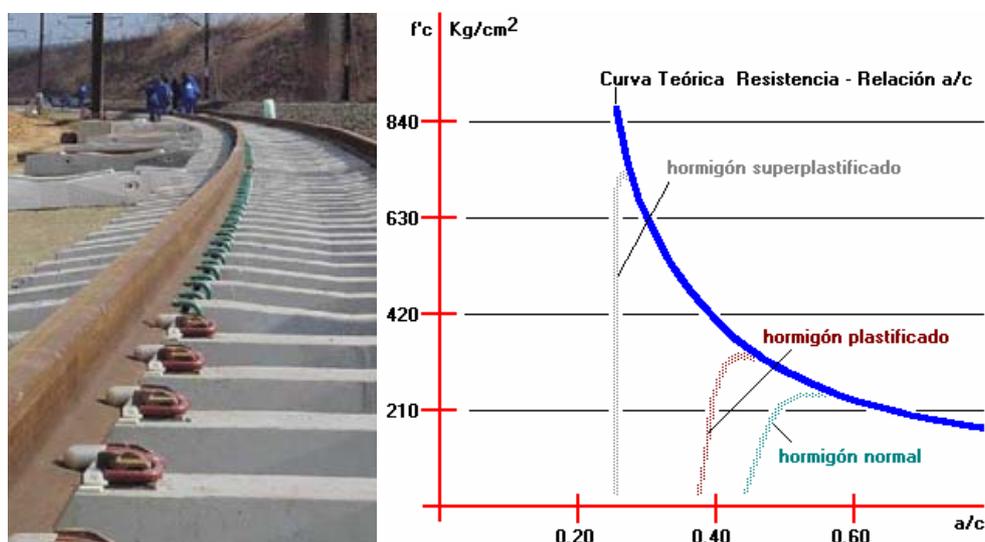


Figura 1.23: Uso de hormigones de alta resistencia.

Los **aditivos acelerantes** permiten que el endurecimiento y fraguado de los hormigones se produzca más rápidamente en la fase inicial. Es usual emplearlos cuando se desea desencofrar en menor tiempo las formaletas. Un efecto similar puede obtenerse utilizando cementos de fraguado rápido o mediante un proceso de curado con vapor de agua circulante (el curado con vapor se suele utilizar con frecuencia en hormigones prefabricados).

Existen **aditivos de fraguado extra rápido** que se emplean en casos en que se requiera un endurecimiento y fraguado del hormigón en pocos minutos, como en la fundición de elementos dentro de cauces de ríos, en el mar o en túneles con filtraciones de agua.



Figura 1.24: Hormigón lanzado o proyectado (shotcrete).

Los **aditivos retardantes** retrasan el endurecimiento inicial del hormigón, manteniendo por más tiempo su consistencia plástica. Se los suele utilizar en climas cálidos para evitar el fraguado anticipado por evaporación del agua de amasado, y en obras masivas de hormigón en que se quiere controlar la cantidad de calor emitida por el proceso de fraguado.

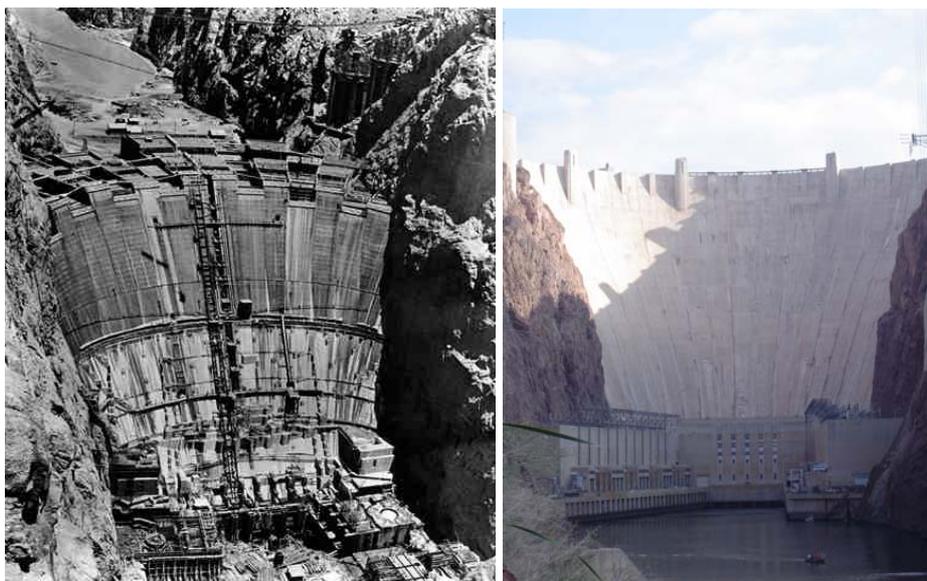


Figura 1.25: Hormigones masivos (presa Hoover).

La aceleración o desaceleración del proceso de fraguado mediante aditivos o mediante cementos apropiados, a más de afectar la velocidad de obtención de resistencia del hormigón a corto plazo, tiene efecto sobre la resistencia del hormigón a largo plazo.

La aceleración inicial del proceso conduce a resistencias menores a largo plazo, pues el agua de curado tiene menor nivel de penetración por el endurecimiento del hormigón.

La desaceleración inicial del proceso determina resistencias mayores a largo plazo, pues el curado se vuelve más eficiente.

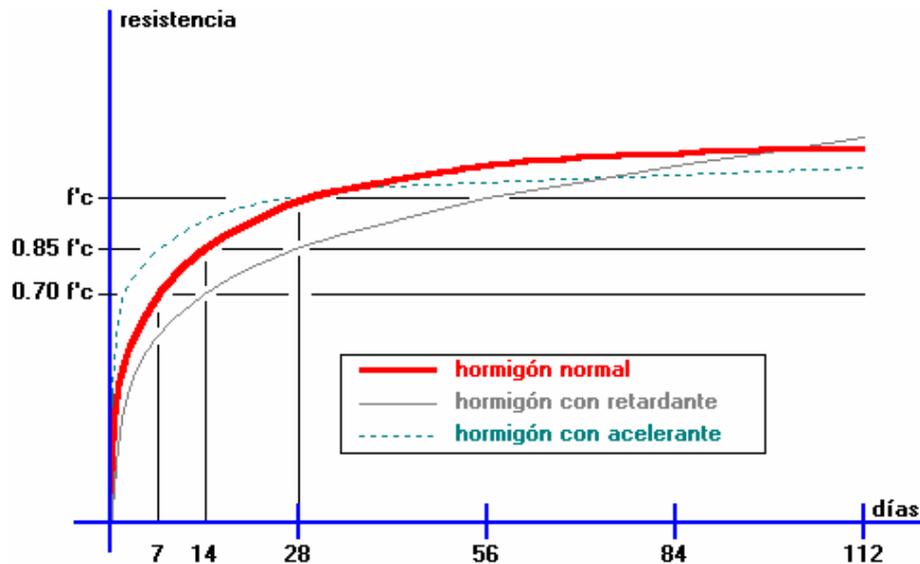


Figura 1.26: Curvas de incremento de resistencia de los hormigones.

Hay **aditivos introductores de aire** que producen burbujas de aire dentro del hormigón, los que se utilizan en estructuras que están sometidas a procesos de congelamiento y descongelamiento periódico, poco frecuentes en nuestro medio (se los suele utilizar en refugios para ascencionismo). Cuando las moléculas de agua que no llegaron a reaccionar con el cemento se congelan, se transforman en hielo de mayor volumen y tratan de rajar internamente al hormigón; esas rajaduras se extienden hasta encontrar una burbuja de aire, donde disipan su presión y se detiene el proceso de fisuración; cuando no existen suficientes burbujas de aire, las fisuras se extienden hasta la superficie exterior del hormigón provocando un deterioro extenso. Los introductores de aire tienen como efecto colateral la disminución de la resistencia del hormigón aproximadamente en un 5% por cada 1% de burbujas de aire introducidas.

Existen sustancias especiales, como la ceniza volcánica pulverizada (**fly ash**) o la cáscara de arroz quemada y pulverizada, que por su composición química apropiada y por su granulometría aún más pequeña que la del cemento, mejoran la resistencia del hormigón a largo plazo.

Existen **aditivos impermeabilizantes** que favorecen el sellado de las porosidades del hormigón, lo que es particularmente útil en estructuras que van a contener líquidos como cisternas, tanques o inclusive presas.

Existen **aditivos espumantes** que disminuyen la densidad de los hormigones, convirtiéndolo en un material sumamente liviano similar a la piedra pómez (pumicita).

Hay **aditivos que permiten mejorar la resistencia ante compuestos inorgánicos y orgánicos** agresivos específicos como cloruros, sulfatos o lactosa, lo que protege tanto al hormigón exterior como a las varillas de hierro en el caso del hormigón armado.

El uso de aditivos requiere de mezclas de prueba en laboratorio o en obra, antes de ser utilizados en las estructuras, porque ocasionalmente pueden provocar reacciones indeseables con ciertos tipos de cemento y con otros aditivos, debido a que los aditivos son compuestos químicos.

1.6 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN:

Para el diseño de estructuras de hormigón simple, de hormigón armado, de hormigón preesforzado, de hormigón con perfiles laminados en caliente de acero, de hormigón con perfiles soldados de acero, etc., se utilizan las propiedades mecánicas del hormigón endurecido. Entre las más importantes se tiene:

- Resistencia a la Compresión
- Módulo de Elasticidad
- Ductilidad
- Resistencia a la Tracción
- Resistencia al Corte
- Flujo Plástico

a. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN:

La resistencia a la compresión del hormigón se determina en muestras cilíndricas estandarizadas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, llevadas hasta la rotura mediante cargas incrementales relativamente rápidas, que duran unos pocos minutos. Esta resistencia se la mide luego de 28 días de fraguado bajo condiciones controladas de humedad.



Figura 1.27: Muestras cilíndricas de hormigón para ensayos de compresión estándar.

La **resistencia característica** a la compresión de un hormigón (f_c), utilizada en diseño estructural, se mide en términos probabilísticos, definiéndose que solamente un pequeño porcentaje de las muestras (normalmente el 5%) puedan tener resistencias inferiores a la especificada, lo que da lugar a que la **resistencia media** de las muestras (f_m) siempre sea mayor que la resistencia característica.

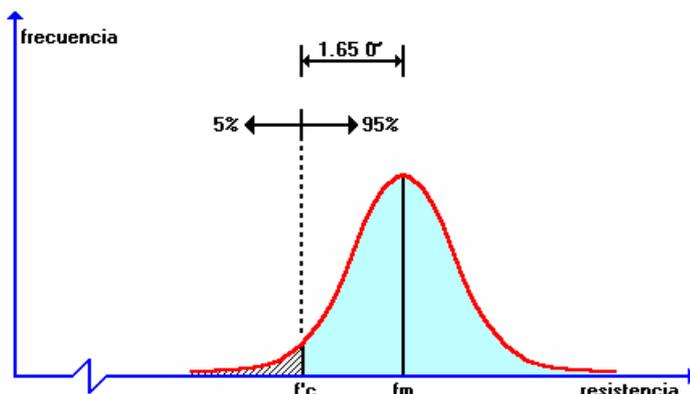


Figura 1.28: Curva de distribución de la resistencia de los hormigones.

Si se asume una distribución normalizada de los ensayos de rotura de cilindros de hormigón, la resistencia característica puede calcularse a partir de la resistencia media y la **desviación estándar** (σ), mediante la siguiente expresión:

$$f'c = fm - 1.65 \sigma \quad \text{Ecuación (1.1a)}$$

El código ACI del año 2008 [ACI 5.3.2.1] establece la siguiente relación, que aumenta al 9% la probabilidad de no alcanzar la resistencia característica.

$$f'c = fm - 1.34 \sigma \quad \text{Ecuación (1.1b)}$$

La resistencia a la compresión de hormigones normales (210 - 280 Kg/cm²) y de mediana resistencia (350-420 Kg/cm²) está dominada por la relación agua/cemento (a menor relación agua/cemento mayor resistencia) y por el nivel de compactación (a mayor compactación mayor resistencia), pero también son factores importantes la cantidad de cemento (a mayor cantidad de cemento mayor resistencia) y la granulometría de los agregados (mejores granulometrías dan lugar a mayores resistencias).

Todos los hormigones, cuando no están cargados, presentan un número limitado de **fisuras de adherencia** entre el agregado grueso y el mortero, como producto de la retracción de fraguado.

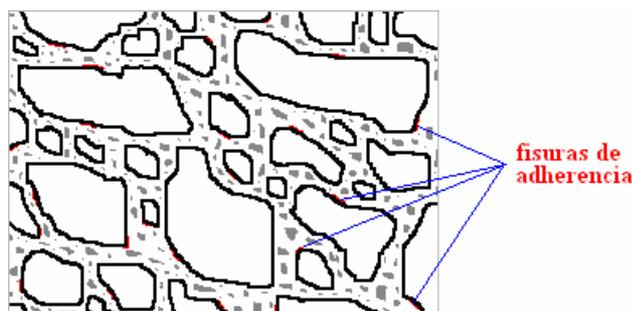


Figura 1.29: Fisuras de adherencia.

Cuando los hormigones de resistencia normal y mediana se someten progresivamente hasta un 70% de su esfuerzo de rotura, se incrementan casi linealmente las **fisuras de adherencia** tanto en número como en longitud, lo que añadido a la deformabilidad de los materiales permite mantener una relativa linealidad entre los esfuerzos y las deformaciones.

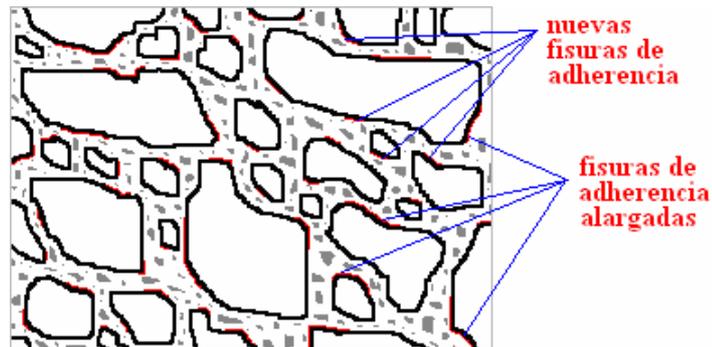


Figura 1.30: Incremento del número de fisuras de adherencia y de la longitud de las fisuras, por incremento del esfuerzo axial.

Cuando los esfuerzos se aproximan al 90% del esfuerzo de rotura, las **fisuras de adherencia** crecen exponencialmente, y aparecen **fisuras de mortero** que unen las **fisuras de adherencia**, lo que conduce a rajaduras continuas que terminan produciendo la rotura total del hormigón. Este proceso de fisuración se traduce en un comportamiento inelástico del hormigón en ese rango de esfuerzos.

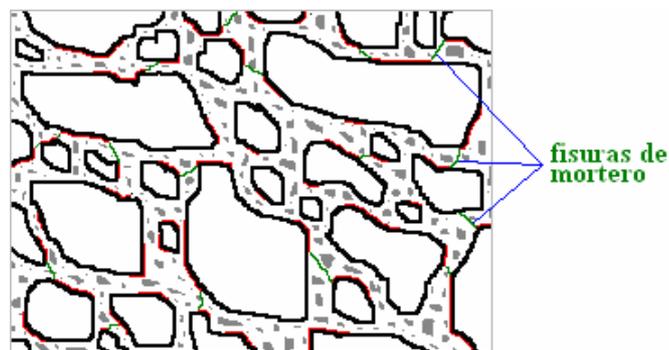


Figura 1.31: Fisuras de mortero.

En hormigones de alta resistencia ($f'c > 420 \text{ Kg/cm}^2$), a más de los factores antes mencionados, tiene especial importancia la resistencia del material constitutivo de los agregados (roca de origen), ya que este parámetro impone un tope máximo a la resistencia del concreto pues el modo de fisurarse, cuando se aproxima a la rotura, involucra a **rajaduras de agregado** que lo atraviesan, por lo que el hormigón jamás podrá alcanzar una resistencia superior a la de la roca de origen del agregado grueso.

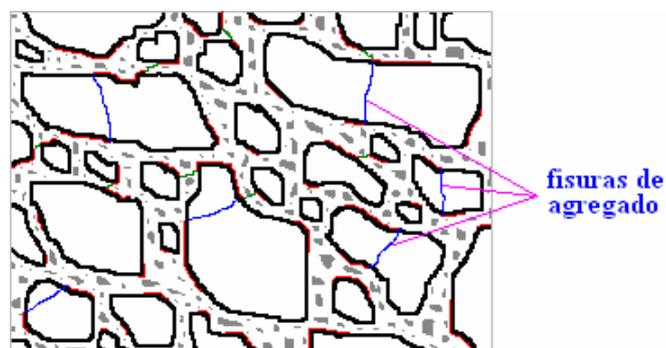


Figura 1.32: Fisuras de agregado.

Las **fisuras de agregado** reemplazan en una proporción alta a las **fisuras de mortero** (no las llegan a reemplazar totalmente), pues requieren recorrer menos longitudes en la masa de hormigón cuando se combinan con las **fisuras de adherencia** para producir la rotura. Estas longitudes menores de fisuras combinadas (**adherencia + mortero + agregado**, en lugar de **adherencia + mortero**) para producir el colapso, provocan una rotura violenta de los hormigones de alta resistencia.

b. **MÓDULO DE ELASTICIDAD:**

Cuando se dibujan las curvas Esfuerzo-Deformación (ϵ - σ) de las muestras cilíndricas de hormigón, sometidas a compresión bajo el estándar ASTM, se obtienen diferentes tipos de gráficos que dependen fundamentalmente de la resistencia a la rotura del material, como se muestra en la siguiente figura.

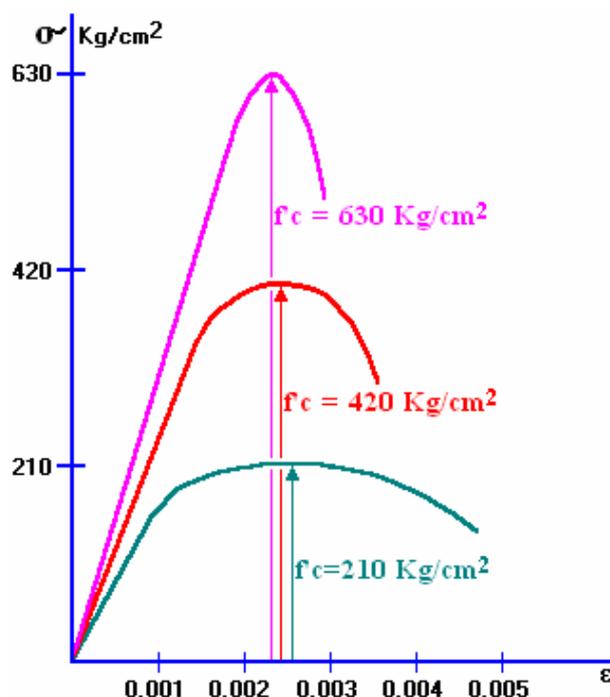


Figura 1.33: Curvas esfuerzo-deformación de hormigones de diferentes resistencias.

Los hormigones de menor resistencia suelen mostrar una mayor capacidad de deformación que los hormigones más resistentes.

Todos los hormigones presentan un primer rango de comportamiento relativamente lineal (similar a una línea recta en la curva esfuerzo - deformación) y elástico (en la descarga recupera la geometría previa a la carga) ante la presencia incremental de solicitaciones de compresión, cuando las cargas son comparativamente bajas (menores al 70% de la carga de rotura), y un segundo rango de comportamiento no lineal e inelástico (con una geometría curva en la curva esfuerzo – deformación) cuando las cargas son altas.

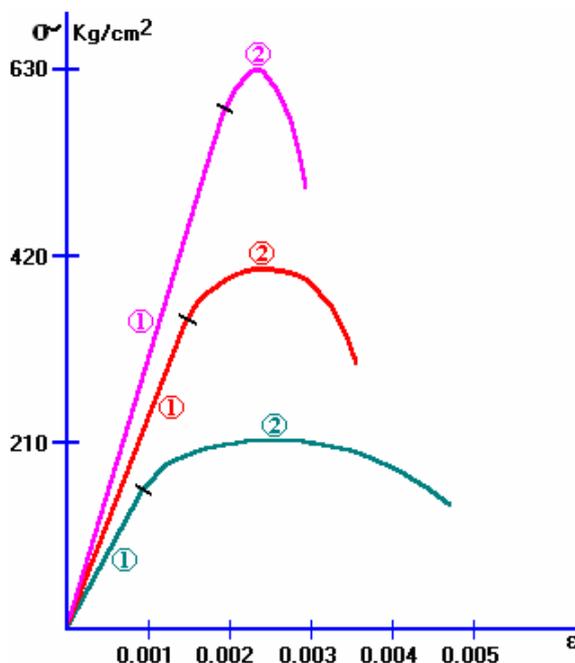


Figura 1.34: Rango elástico (tramo 1) e inelástico (tramo 2) de hormigones de diferentes resistencias.

La pendiente de la curva en el rango de comportamiento lineal recibe la denominación de **Módulo de Elasticidad** del material o **Módulo de Young**, que se simboliza “**E_c**”.

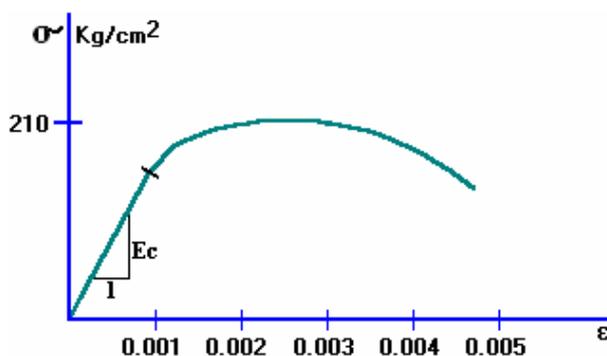


Figura 1.35: Representación gráfica del módulo de elasticidad del hormigón.

El Módulo de Elasticidad puede calcularse mediante la siguiente expresión.

$$E_c = \frac{\sigma_{c,1}}{\epsilon_{c,1}}$$

El Módulo de Elasticidad es diferente para distintas resistencias a la compresión de los hormigones, e incrementa en valor cuando la resistencia del concreto es mayor. El American Concrete Institute [ACI 318S-08 8.5.1] propone la siguiente expresión (que también es recogida por el Código Ecuatoriano de la Construcción), obtenida experimentalmente, como forma aproximada de calcular el módulo de elasticidad del hormigón, en función de la resistencia a la compresión del mismo.



$$E_c = 15000\sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación (1.2)}$$

Donde:

E_c : Módulo de elasticidad del hormigón medido en Kg/cm^2 .

$f'c$: Resistencia a la compresión del hormigón medida en Kg/cm^2 .

La expresión previa es adecuada para hormigones con agregados de peso específico normal (peso específico del hormigón $\approx 2300 \text{ Kg/m}^3$), y resistencias normales y medias.

A continuación se presenta una tabla que relaciona la resistencia de los hormigones utilizados con más frecuencia con su módulo de elasticidad.

Tabla 1.1: Módulos de elasticidad de hormigones de diferentes resistencias.

Resistencia (Kg/cm^2)	Módulo de Elasticidad (Kg/cm^2)
210	217000
280	251000
350	281000
420	307000

Para hormigones con peso específico w_c entre 1440 y 2480 Kg/m^3 , E_c puede calcularse con la siguiente expresión [ACI 8.5.1]:

$$E_c = w_c^{1.5} \cdot 0.137\sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación (1.3)}$$

c. DUCTILIDAD:

Si se define como ductilidad de un material a la capacidad que tiene para continuar deformándose no linealmente a pesar de que los incrementos de carga sean mínimos, nulos e inclusive si existe una disminución de la carga, una medida cuantitativa de esa ductilidad sería el cociente entre la deformación de rotura y la deformación máxima con comportamiento lineal elástico.

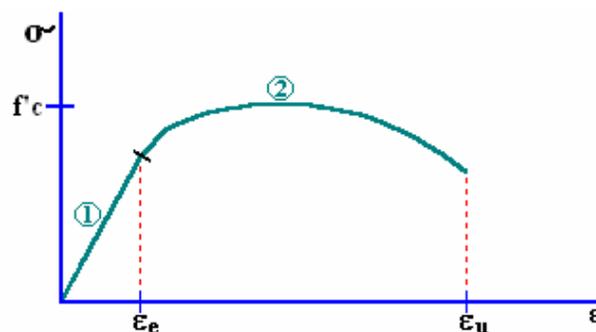


Figura 1.36: Deformaciones unitarias máximas en rango elástico e inelástico.

$$D_d = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_e} \quad \text{Ecuación (1.4)}$$

Donde:

D_d : Índice de ductilidad por deformación



- ϵ_u : Deformación unitaria de rotura
- ϵ_e : Deformación unitaria elástica máxima

Es evidente que los índices de ductilidad por deformación del hormigón simple decrecen considerablemente cuando aumenta su resistencia a la rotura, como se observa en los gráficos previos.

A continuación se presenta una tabla con valores aproximados de ductilidad por deformación de los hormigones, en función de la resistencia a la compresión.

Tabla 1.2: Índice de ductilidad por deformación.

Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²)	Índice de Ductilidad por Deformación
210	4.5 – 6.0
280	3.5 – 4.5
350	3.0 – 3.5
420	2.5 – 3.0
630	2.0 – 2.5
840	1.5 – 2.0

El índice de ductilidad por deformación es un excelente referente de la capacidad del hormigón para deformarse por encima de su límite de fluencia.

Otra manera de medir la ductilidad del hormigón consiste en encontrar el cociente entre la energía que se requiere para romper al material y la energía necesaria para llevarle hasta la carga máxima de comportamiento elástico, para cuyo cálculo, en lugar de dividir directamente las deformaciones, se dividen las áreas bajo la curva Esfuerzo-Deformación.

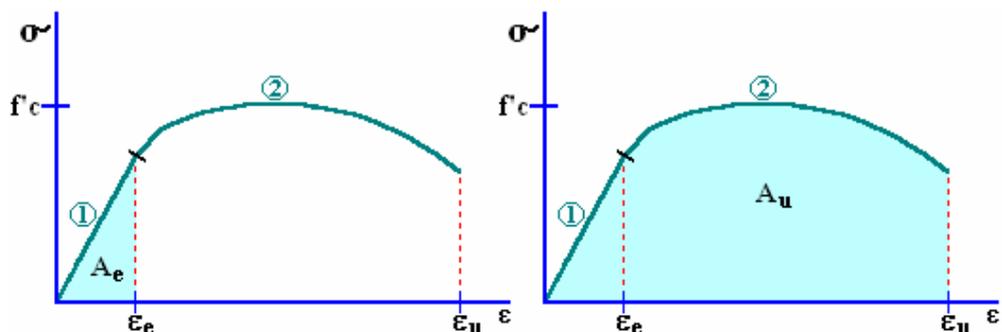


Figura 1.37: Representación gráfica de la ductilidad por energía de deformación.

$$D_{ed} = \frac{A_u}{A_e} \qquad \text{Ecuación (1.5)}$$

Donde:

- D_{ed} : Índice de ductilidad por energía de deformación
- A_u : Energía de deformación unitaria de rotura
- A_e : Energía de deformación unitaria elástica máxima

Los índices de ductilidad por energía de deformación son mayores a los índices de ductilidad por deformación, y en muchos casos pueden superar valores de ocho.

Tabla 1.3: Índice de ductilidad por energía de deformación.

Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²)	Índice de Ductilidad por Energía de Deformación
210	8.0 – 10.0
280	6.0 – 8.0
350	5.0 – 6.0
420	4.0 – 5.0
630	3.0 – 4.0
840	2.0 – 3.0

El índice de ductilidad por energía de deformación se emplea como referente de la capacidad del hormigón para disipar energía cuando incursiona dentro del rango de comportamiento inelástico, particularmente bajo solicitaciones estructurales por encima del rango normal y eventual de trabajo, como en el caso de sismos de baja probabilidad de ocurrencia que superan ampliamente al sismo de diseño.

Uno de los requisitos más importantes que debe reunir un hormigón en zonas sísmicas es su ductilidad, lo que en nuestro medio limita la utilización de hormigones de resistencia media **f_m** superior a 500 Kg/cm², por ser sumamente frágiles (tienen una rotura muy rápida y explosiva).

d. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN:

El hormigón es un material ineficiente resistiendo cargas de tracción; comparativamente esta resistencia representa hasta un 10% de su capacidad a la compresión. Es por ello que en el hormigón armado los esfuerzos de tracción son absorbidos por el acero de refuerzo.

El ensayo tradicional (Prueba Directa de Tracción) consiste en una pequeña muestra con sección transversal rectangular, que presenta un ensanchamiento en los extremos longitudinales, lo que permite que las abrazaderas del equipo utilizado en la prueba ejerzan fuerzas de tracción que romperán a la muestra en el sector central más débil (por tener menor sección transversal).

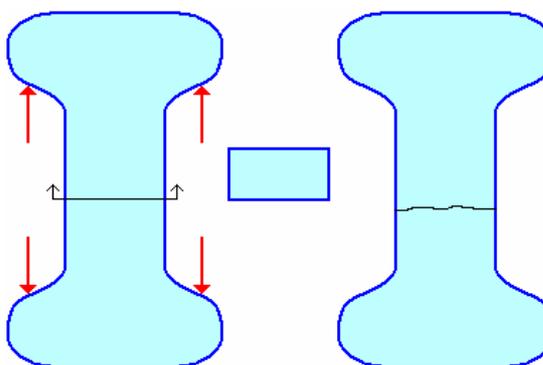


Figura 1.38: Prueba directa de tracción.



Las investigaciones sugieren utilizar expresiones como la siguiente para determinar un valor aproximado del esfuerzo máximo de tracción “ f_t ” que puede soportar el hormigón.

$$f_t = 1.5\sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación (1.6)}$$

Donde:

- f_t : Resistencia a la tracción del hormigón medida en Kg/cm².
- $f'c$: Resistencia a la compresión del hormigón medida en Kg/cm².

A continuación se presenta una tabla con valores aproximados de resistencia a la tracción de los hormigones.

Tabla 1.4: Resistencia a la tracción del hormigón.

Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²)	Resistencia a la Tracción (Kg/cm ²)
210	22
280	25
350	28
420	31
630	38
840	43

El ensayo descrito previamente presenta mucha variabilidad en los resultados por la pequeña dimensión transversal de la muestra, comparada con la dimensión máxima del agregado grueso y con las dimensiones de los elementos estructurales reales, por lo que con mucha frecuencia se utiliza, en su reemplazo, la **Prueba de Separación** (split test), que utiliza cilindros tradicionales de hormigón colocados horizontalmente. Tanto en la parte superior como en la inferior (a lo largo del cilindro) se colocan cartones para la aplicación de carga de compresión uniformemente lineal y transversal.

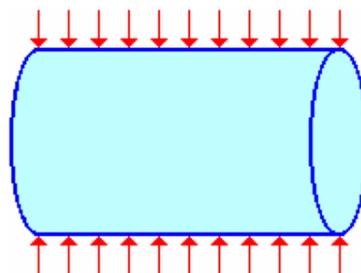


Figura 1.39: Solicitaciones externas en la prueba de separación (split test).

La falla del cilindro se produce por separación, sobre un eje vertical, de las dos mitades de la muestra.

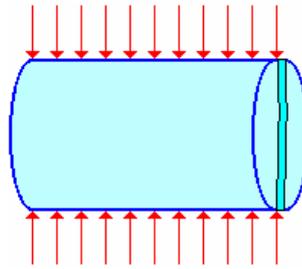


Figura 1.40: Rotura tipo en la prueba de separación.

e. RESISTENCIA AL CORTE:

Debido a que las fuerzas cortantes se transforman en tracciones diagonales, la resistencia al corte del hormigón “ v_c ” tiene órdenes de magnitud y comportamiento similares a la resistencia a la tracción.

El ensayo utilizado se conoce como la Prueba de Corte Directo, en el que se evita al máximo la introducción de esfuerzos de flexión.

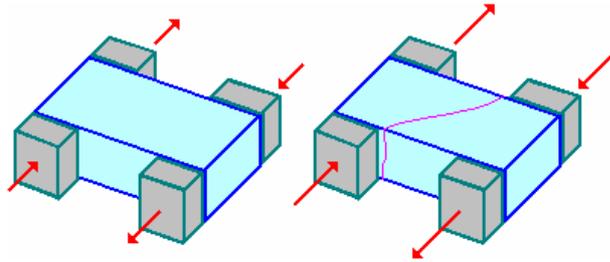


Figura 1.41: Prueba de corte directo del hormigón.

Los resultados de laboratorio sugieren expresiones como la siguiente, para describir la resistencia al corte:

$$v_c = \sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación (1.7)}$$

Donde:

- v_c : Resistencia al corte del hormigón medida en Kg/cm².
- $f'c$: Resistencia a la compresión del hormigón medida en Kg/cm².

A continuación se presenta una tabla con valores aproximados de resistencia al corte de los hormigones, aunque el ACI [ACI 11.2.1.1] recomienda utilizar aproximadamente la mitad (el 53%), por provocar una falla frágil.

Tabla 1.5: Resistencia al corte del hormigón.

Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²)	Resistencia al Corte (Kg/cm ²)
210	14
280	17
350	19
420	20
630	25
840	29

f. FLUJO PLÁSTICO:

Quando se somete al hormigón a cargas de larga duración, el material tiene una deformación instantánea en el momento inicial de la carga y una deformación adicional a largo plazo como producto del flujo plástico del hormigón.

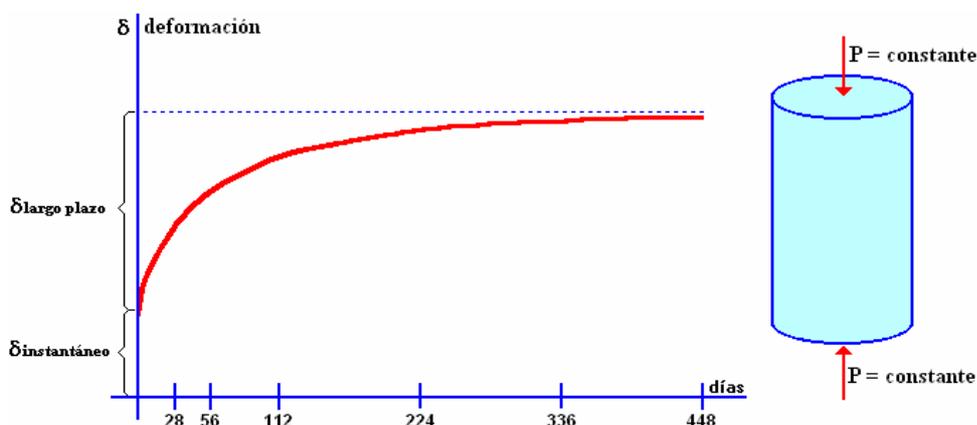


Figura 1.42: Deformaciones en el hormigón bajo cargas axiales a largo plazo.

La deformación a largo plazo depende de la resistencia del hormigón, y es comparativamente mayor cuando se utilizan hormigones de menor resistencia.

En el caso de los hormigones entre 210 y 280 Kg/cm² la deformación diferida es aproximadamente 2.2 veces mayor que la deformación instantánea.

El fenómeno del flujo plástico se produce por la migración de las partículas de agua que no alcanzan a combinarse con el cemento, y que debido a las altas presiones se mueven por las microporosidades del hormigón.

De manera análoga, si a un elemento de hormigón se le somete a una deformación constante sostenida en el tiempo, la fuerza que se requiere para sostener tal deformación decrece progresivamente por relajación del material.

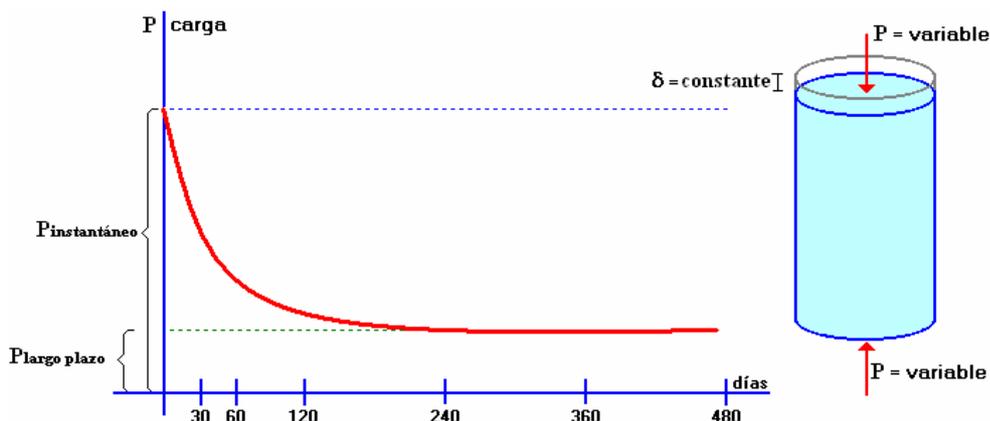


Figura 1.43: Cargas axiales en el hormigón bajo deformaciones axiales a largo plazo.

El incremento de la deformación con el tiempo, bajo cargas sostenidas, y la disminución de las solicitaciones con el tiempo, bajo deformaciones sostenidas, forman parte del comportamiento reológico del hormigón.

1.7 OTRAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN:

Existen otras características que se pueden especificar para el hormigón fresco y endurecido, como:

- Trabajabilidad
- Densidad
- Impermeabilidad
- Resistencia a la abrasión, etc.

a. TRABAJABILIDAD:

Un hormigón fresco se considera trabajable cuando puede adaptarse fácilmente a cualquier forma de encofrado, con un mínimo de trabajo mecánico (vibración) aplicado. Cuantitativamente la trabajabilidad se mide mediante el Asentamiento del Cono de Abrams o el diámetro de Dispersión en la Mesa de Flujo; mientras mayor es el asentamiento o mayor es el diámetro de dispersión, el hormigón es más trabajable.

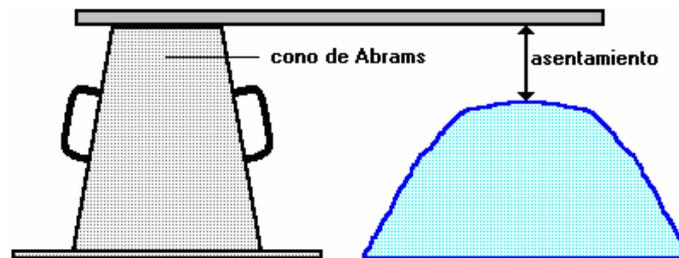


Figura 1.44: Cono de Abrams.

Los procesos de ensayo están definidos por ASTM a nivel internacional y por INEN en el Ecuador.

Asentamientos menores a 2" (5 cm.) corresponden a hormigones poco trabajables; asentamientos entre 3" (7.5 cm.) y 5" (12.5 cm.) corresponden a hormigones medianamente trabajables; asentamientos superiores a 6" (15 cm.) son característicos de hormigones muy trabajables.

b. DENSIDAD:

La densidad del hormigón simple endurecido estándar se ubica entre 2200 Kg/m³ y 2300 Kg/m³. El hormigón simple fresco de las mismas características presenta densidades entre 2250 Kg/m³ y 2350 Kg/m³ (esta información es útil para el diseño de encofrados).

En ambientes que contienen componentes radioactivos, pueden requerirse hormigones de mayor densidad que son mejores escudos ante el escape de radiaciones por lo que necesitan espesores menores, pero requieren agregados de mayor densidad, y a veces con una composición química específica. Estos hormigones más densos pueden llegar a densidades de 2800 Kg/m³.

En edificios altos puede resultar conveniente que el hormigón de las losas sea menos denso, para lo que se suele emplear piedra pómez en lugar de la grava

tradicional, o cubos de arcilla cocida en lugar de parte de la grava. El resultado será la obtención de densidades del orden de 1900 Kg/m^3 .

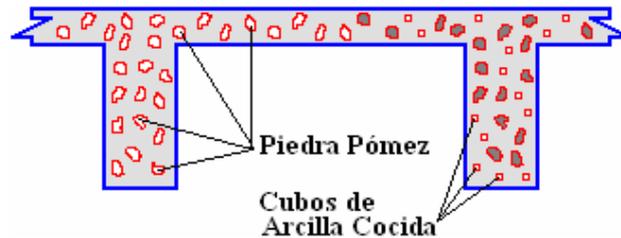


Figura 1.45: Hormigón ligero.

c. IMPERMEABILIDAD:

En el caso de presas y de tanques o piscinas de almacenamiento, se suelen requerir condiciones de impermeabilidad en el hormigón, que pueden ser logradas con la inclusión de aditivos químicos apropiados.

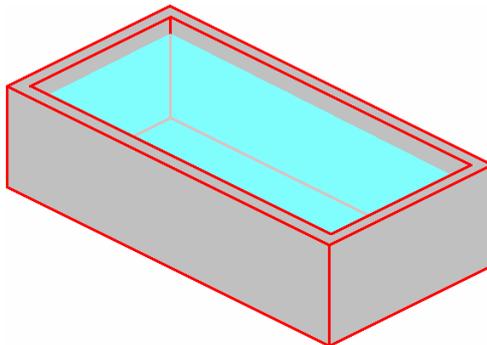


Figura 1.46: Hormigón impermeable.

d. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN:

Cuando se diseñan y construyen estructuras que están sometidas a un intenso tráfico vehicular, como pavimentos rígidos en carreteras, o estacionamientos en edificios y centros comerciales, puede ser necesaria la utilización de hormigones resistentes a la abrasión, lo que requerirá de aditivos químicos que proporcionen tal característica.



Figura 1.47: Pavimento rígido de hormigón resistente a la abrasión.



1.8 TAREAS COMPLEMENTARIAS:

- a. Recopilar información sobre aditivos para el hormigón disponibles en el mercado local. Organizar dicha información en una tabla que contenga la siguiente información:

Categoría	Efecto del Aditivo	Casos de Uso del Aditivo
Plastificante / Reductor de agua	Mejora la trabajabilidad para una relación agua/cemento fija	Zonas de gran concentración de armadura
		Elementos estructurales muy delgados
	Mejora la resistencia para una trabajabilidad fija	Construcción de elementos prefabricados
		Elementos de hormigón preesforzado
Acelerante de fraguado	Acelera la obtención de la resistencia de diseño	Columnas de edificios altos
		Edificios en que se requiere un rápido desencofrado
		Elementos estructurales que están en contacto con agua corriente
:	:	:
:	:	:

- b. Realizar el análisis granulométrico de 2 muestras de agregado fino (arena de mina y polvo de piedra), y 2 muestras de grava visiblemente diferenciadas (diferente color que denote diferente roca de origen), disponibles en el medio. Presentar hipótesis sobre su comportamiento comparado en la fabricación de hormigones.
- c. Someter a la prueba de la Máquina de Los Ángeles a dos muestras de grava de origen y color diferentes, y analizar su efecto en el comportamiento de los hormigones fabricados con esas gravas.

REFERENCIAS:

- 1.1 Neville A., *Properties of Concrete*, Pitman Publishing Limited.
- 1.2 Romo M., *Microcracking, Macro Air Void System and Strength of Superplasticized Concrete*, Cornell University.
- 1.3 ACI 318S-08, (2008), *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario*, American Concrete Institute.
- 1.4 CEC-2001, (2001), *Código Ecuatoriano de la Construcción*, Instituto Ecuatoriano de Normalización.



CAPÍTULO II **DISEÑO Y FABRICACIÓN DE HORMIGONES**

2.1 INTRODUCCIÓN:

El objetivo de un diseño de hormigones es obtener una mezcla que posea un mínimo de determinadas propiedades tanto en estado fresco como endurecido, al menor costo de producción posible.



Figura 2.1: Hormigón fresco y hormigón endurecido.

Las propiedades del concreto endurecido son especificadas por el proyectista de la estructura, y las propiedades del concreto fresco están definidas básicamente por el tipo de construcción y por las técnicas de colocación y transporte.

El costo de elaboración del concreto depende del costo de los materiales, del equipo y de la mano de obra. Dentro de los materiales, es la cantidad de cemento la que normalmente define el costo final, aunque el uso de aditivos especiales puede tener una incidencia importante.



Figura 2.2: Mezcladoras de hormigón.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES:

a. CEMENTO:

El cemento es el material ligante de los diferentes componentes del hormigón. El cemento para hormigones estructurales debe ser Portland.



Figura 2.3: Cemento portland.

Existen varios tipos de cemento Portland; entre los más importantes se pueden mencionar:

- **Tipo I:** De fraguado normal
- **Tipo II:** De propiedades modificadas
- **Tipo III:** De fraguado rápido
- **Tipo IV:** De fraguado lento
- **Tipo V:** Resistente a los sulfatos

En nuestro medio se dispone permanentemente de cemento Portland tipo I y ocasionalmente (cuando se ejecutan proyectos de uso masivo de hormigón como presas) de tipo IV. Otros tipos de cemento siempre requieren de importación.

El cemento utilizado en la fabricación de hormigón debe estar totalmente seco y suelto, y no debe presentar grumos de fraguado anticipado.

Para asegurar buenas condiciones en el cemento, debe ser almacenado en un sitio cubierto, seco, con ventilación apropiada que se puede conseguir mediante vigas de madera colocadas sobre el piso y un entablado superior que evite el contacto con el piso de los sacos de cemento colocados encima.

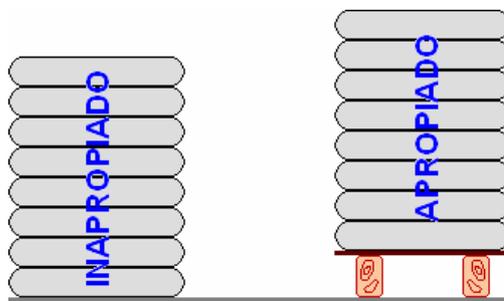


Figura 2.4: Sacos de cemento apilados sin ventilación inferior apropiada (izquierda) y con ventilación inferior apropiada (derecha).

Los sacos de cemento no deben conformar pilas de más de 10 unidades de altura para evitar el fraguado por presión.

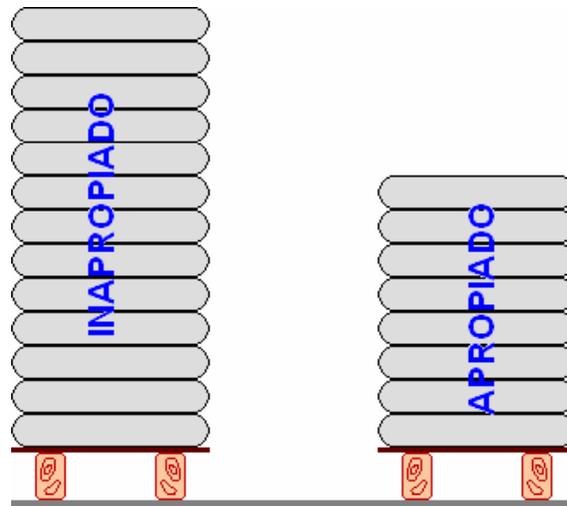


Figura 2.5: Sacos de cemento apilados en exceso (izquierda) o en número apropiado (derecha).

Deben proveerse mecanismos de almacenamiento que permitan la rotación adecuada del cemento, para conseguir que el producto más antiguo siempre esté accesible para su utilización inmediata, lo que se suele lograr mediante un apropiado diseño de la circulación dentro de la bodega.

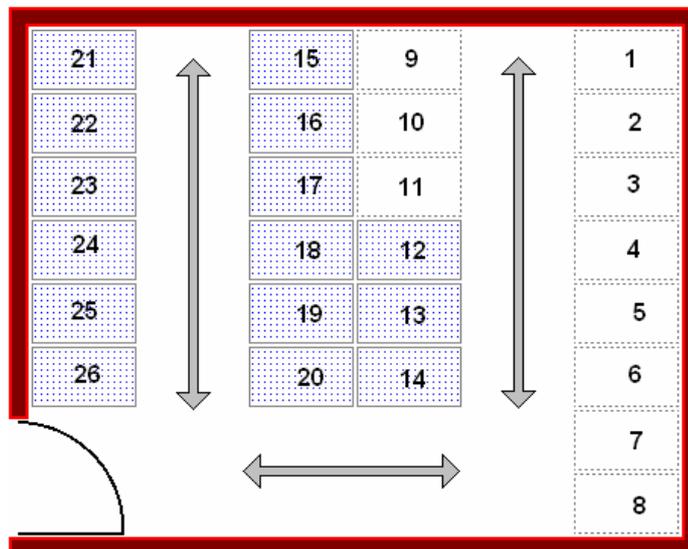


Figura 2.6: Almacenamiento óptimo de sacos de cemento para circulación del material.

Como alternativa puede utilizarse **cemento a granel** en lugar de cemento en sacos, el que debe ser almacenado en silos protegidos contra la humedad (silos herméticos). El cemento a granel puede llegar a ser entre un 20% y un 25% más económico que el cemento en saco, pero requiere de procesos de control de la cantidad de cemento empleada en obra.

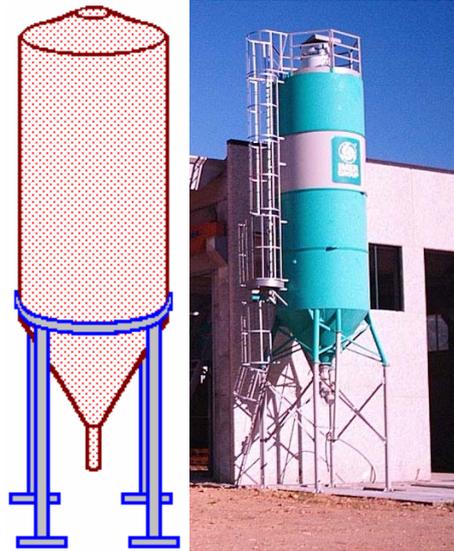


Figura 2.7: Silos de almacenamiento de cemento al granel.

b. AGREGADOS:

Más del 75% del volumen del concreto está ocupado por los agregados, por lo que las propiedades de los mismos tienen influencia definitiva sobre el comportamiento del hormigón.

De acuerdo al tamaño de las partículas, los agregados se clasifican en **agregados gruesos** (tamaño mayor a 5 mm) y **agregados finos** (tamaño entre 0.07 mm y 5 mm).

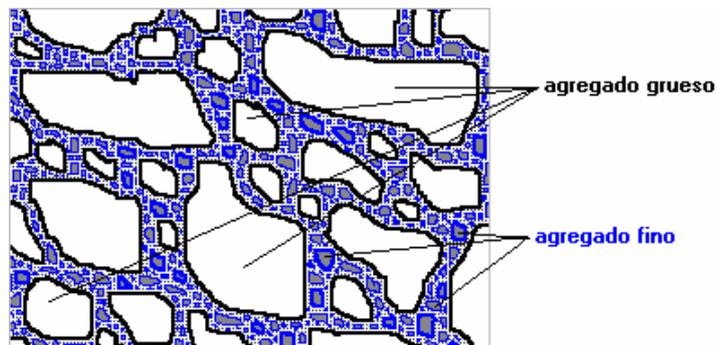


Figura 2.8: Agregado grueso y agregado fino.

Una buena graduación de los agregados da lugar a hormigones de mejores características y más económicos (el agregado grueso deberá tener partículas grandes, medianas y pequeñas como se observa en el gráfico previo; y el agregado fino también deberá presentar partículas grandes, medianas y pequeñas, a otra escala). Para conseguir una granulometría apropiada se mezclan en proporciones adecuadas al menos dos tipos de agregados.

Los agregados pueden ser utilizados en su estado natural o pueden provenir de un proceso de trituración. El agregado grueso triturado presenta mejores características de adherencia que el agregado natural, por lo que sus hormigones pueden alcanzar mayor resistencia.



Figura 2.9: Agregado grueso natural y agregado grueso triturado.

En el caso del agregado fino triturado (también conocido como polvo de piedra), su empleo exclusivo, sin combinarse con arena, no es el más apropiado desde el punto de vista económico pues a pesar de que presenta una resistencia de los granos apropiada, su granulometría tiende a ser demasiado homogénea lo que implica que se requiera una mayor cantidad de cemento para alcanzar la resistencia especificada del hormigón, y por consiguiente genera un mayor costo.

Los agregados deben estar libres de partículas orgánicas, sales, limos y arcillas que puedan afectar las reacciones químicas de fraguado o produzcan porosidades indeseables.

Dependiendo del tipo de hormigón que se desee fabricar, se pueden emplear **agregados ligeros**, **agregados normales** o **agregados pesados**. También pueden utilizarse **agregados artificiales**.

c. AGUA:

El agua utilizada en el hormigón debe ser potable en lo posible o al menos debe estar libre de impurezas. Nunca debe usarse agua de mar, pues su salinidad afecta al acero en el hormigón armado y en el hormigón preesforzado.

d. ADITIVOS:

Son compuestos químicos que, añadidos en pequeñas cantidades, modifican las propiedades del hormigón. Entre los de uso más frecuente están los acelerantes, retardantes y plastificantes. Los aditivos siempre deben ser probados previamente a su utilización en obra, por la gran variabilidad de la calidad del cemento que disponemos en el país, y muy especialmente cuando se combinan aditivos.



2.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL HORMIGÓN EN OBRA:

Las especificaciones técnicas son el punto de partida para el diseño de los hormigones. Entre las propiedades más importantes que deben considerarse se tiene:

- Resistencia a la compresión
- Trabajabilidad del hormigón fresco
- Velocidad de Fraguado
- Peso Específico

En zonas donde se produce congelamiento y descongelamiento sería necesario especificar también la cantidad de aire introducido.

a. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN:

La resistencia a la compresión del hormigón normalmente se la cuantifica a los 28 días de fundido el concreto, aunque en estructuras especiales como túneles y presas, o cuando se emplean cementos especiales, pueden definirse tiempos menores o mayores a esos 28 días.



Figura 2.10: Prueba de resistencia a la compresión del hormigón.

En túneles es bastante frecuente utilizar la resistencia a los 7 días o menos, mientras en presas se suele utilizar como referencia la resistencia a los 56 días o más.

b. TRABAJABILIDAD DEL HORMIGÓN FRESCO:

Trabajabilidad es la facilidad que presenta el hormigón fresco para ser colocado y vibrado en cualquier molde. Los hormigones con baja trabajabilidad presentan problemas de mezclado y problemas de compactación dentro de los moldes, lo que puede redundar en una disminución de la resistencia.

Si bien la trabajabilidad del hormigón se puede categorizar en función del asentamiento del **Cono de Abrams** o de la medición del diámetro de **Dispersión en la Mesa de Flujo**, en nuestro medio se suele utilizar más frecuentemente al Cono de Abrams.

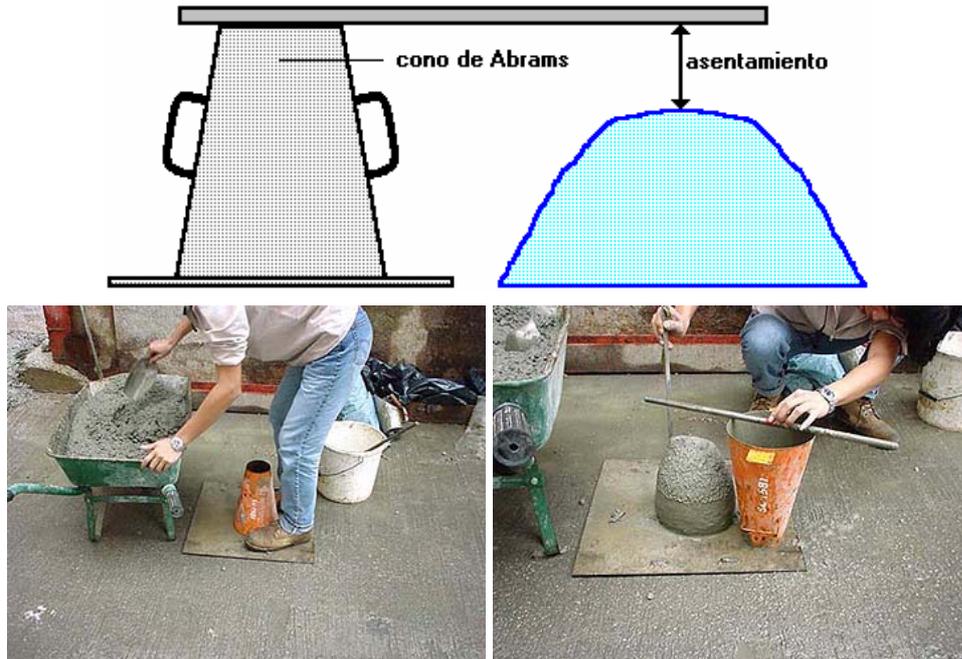


Figura 2.11: Medición de la trabajabilidad en el hormigón.

Para mejorar la trabajabilidad de un hormigón, se puede añadir agua con la consiguiente disminución de resistencia, o se pueden incluir aditivos plastificantes que no disminuirán su resistencia final.

c. VELOCIDAD DE FRAGUADO:

Las características propias de la estructura que se desea fundir pueden dar lugar a la necesidad de acelerar o retardar el fraguado del hormigón, para lo cual pueden utilizarse cementos especiales (muy poco utilizados en nuestro país) o aditivos acelerantes y retardantes. El hormigón lanzado para la construcción de túneles que tienen filtraciones requerirá de hormigones de fraguado muy rápido, mientras que el hormigón colocado en grandes volúmenes, como presas, necesitará hormigones de fraguado lento.



Figura 2.12: Hormigón lanzado de fraguado rápido.



d. PESO ESPECÍFICO:

La necesidad de disponer de un hormigón ligero o pesado requerirá la utilización de agregados ligeros o pesados respectivamente. Los hormigones ligeros podrían ser utilizados en losas de edificios altos o en muros aislantes de temperatura, mientras que los hormigones pesados podrían emplearse en anclajes de puentes colgantes, como bunkers de cobertura de materiales radioactivos, o para almacenar materiales explosivos.

2.4 PROCESO DE DISEÑO DE MEZCLAS

Existen una gran cantidad de métodos empíricos de diseño de mezclas para obtener hormigones con características específicas, sin embargo todos estos métodos deben ser tomados solamente como referenciales pues siempre requieren de pruebas de laboratorio para su afinamiento.

A continuación se presenta el método propuesto por el ACI en la norma 211.1-70 (con ajustes de ACI-2008), el mismo que se ilustra con un ejemplo.

EJEMPLO 2.1:

Se desea dosificar un metro cúbico de hormigón de resistencia característica $f'_c = 300 \text{ Kg/cm}^2$ para una obra donde existe un buen control de calidad de producción, con asentamiento de 50 mm en el cono de Abrams (hormigón magro). Se empleará cemento Portland ordinario (tipo I). El tamaño máximo del agregado grueso es 40 mm y su peso volumétrico aparente (incluidos los espacios vacíos) es 1600 kg/m^3 ; su densidad es 2.64 gr/cm^3 . El agregado fino tiene un módulo de finura de 2.60 (suma de porcentajes totales retenidos en cada tamiz desde 0.141 mm hasta el diámetro máximo del agregado fino, dividido para cien) y una densidad de 2.58 gr/cm^3 .

a. Resistencia Media y Resistencia Característica del Hormigón:

Se determina la variabilidad de la resistencia del hormigón, en base al nivel de control de calidad del proceso de mezclado en obra, para lo que se puede utilizar la siguiente tabla:

Tabla 2.1: Variabilidad de la resistencia del hormigón en función del control de calidad de fabricación.

TIPO DE CONTROL	DESVIACION ESTANDAR (σ)
Muy bueno	0.07 fm
Bueno	0.14 fm
Regular	0.21 fm
Deficiente	0.28 fm

- Un **control de calidad muy bueno** se obtiene solamente en laboratorios especializados que dosifican sus mezclas al peso, tienen control de la humedad antes del mezclado, utilizan agregados seleccionados y controlan la trabajabilidad del hormigón fresco.



- Un **control de calidad bueno** se consigue en obras que emplean hormigón premezclado en fábricas especializadas y controlan el asentamiento del cono de Abrams; o en obras que mecanizan la producción de mezclas al peso, realizan corrección de dosificaciones por la humedad, emplean agregados de calidad y verifican la trabajabilidad de la mezcla.
- Un **control de calidad regular** se obtiene con dosificaciones volumétricas y control frecuente de la cantidad de agua mediante el asentamiento del cono de Abrams.
- Un nivel de control inferior al regular se cataloga como **control de calidad deficiente**.

Si representáramos gráficamente la dispersión de la distribución de resultados de resistencia, para los cuatro niveles de control anotados, se obtendría cualitativamente el siguiente tipo de curvas.

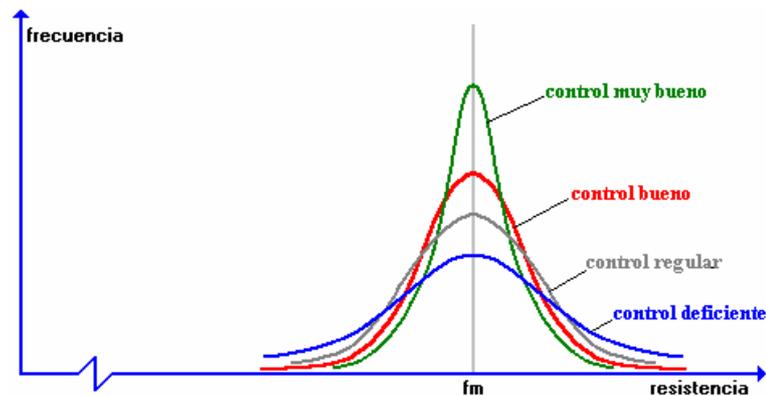


Figura 2.13: Dispersión de resistencias del hormigón conforme al control de calidad de fabricación.

En el presente caso tendríamos la siguiente información:

$f^c = 300 \text{ Kg/cm}^2$ dato del ejemplo
 $\sigma = 0.14 f_m$ se toma de la tabla para un control de calidad de fabricación bueno
 $f^c = f_m - 1.34 \sigma$ para un 9 % de muestras que no alcancen la resistencia especificada [ACI 5.3.2.1] (la norma 211.1-70 recomendaba la expresión $f^c = f_m - 1.65 \sigma$, para un 5% de muestras que no alcancen la resistencia especificada)

Reemplazando el valor de σ en la última expresión:

$$f^c = f_m - 1.34 \times (0.14 f_m)$$
$$f^c = f_m - 0.1876 f_m$$
$$f^c = 0.8124 f_m$$

Se calcula la resistencia media del hormigón f_m , que siempre será superior a su resistencia característica.



$$f_m = \frac{f_c}{0.8124} = \frac{300 \text{ Kg/cm}^2}{0.8124}$$

$$f_m = 369 \text{ Kg/cm}^2$$

b. Cantidad de Agua Requerida:

Se determina la cantidad de agua que se requiere por m³ de hormigón, y el porcentaje de volumen de aire atrapado, en función del tamaño máximo del agregado (40 mm) y del asentamiento en el cono de Abrams (50 mm), mediante la siguiente tabla:

Tabla 2.2: Cantidad aproximada de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de los agregados.

Asentamiento (mm)	Cantidad de agua (Kg/m ³ de concreto para agregados de tamaño máximo)							
	10mm	12.5mm	20mm	25mm	40mm	50mm	70mm	150mm
30 a 50	205	200	185	180	160	155	145	125
80 a 100	225	215	200	195	175	170	160	140
150 a 180	240	230	210	205	185	180	170	—
Contenido de aire atrapado (porcentaje)	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2

Cantidad de agua por metro cúbico de hormigón = 160 Kg (se toma de la tabla anterior)

Porcentaje de volumen de aire atrapado = 1% (se toma de la tabla anterior)

c. Relación Agua/Cemento:

La relación agua / cemento de la mezcla (medida al peso) se puede estimar de la siguiente figura tomada del libro **Propiedades del Concreto** de A. M. Neville:

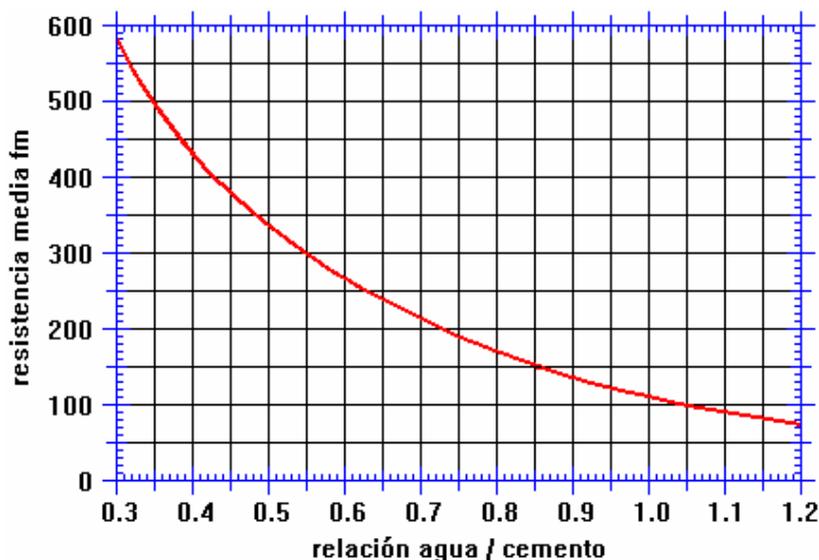


Figura 2.14: Curva de la resistencia media del hormigón como función de la relación agua/cemento.



Para una resistencia media del hormigón de 369 Kg/cm^2 , de la curva anterior se desprende que:

$$\text{peso de agua / peso de cemento} = 0.465$$

d. Contenido de Cemento:

El contenido de cemento será:

$$\text{peso de cemento} = \text{peso de agua} / 0.465 = 160 \text{ Kg} / 0.465$$

$$\text{peso de cemento} = 344 \text{ Kg}$$

e. Volumen Aparente de Agregado Grueso:

Se calcula el volumen aparente de agregado grueso mediante la siguiente tabla, en función del módulo de finura del agregado fino (2.60) y el tamaño máximo del agregado grueso (40 mm).

Tabla 2.3: Volumen aparente de agregado grueso por metro cúbico de hormigón.

Tamaño máximo del agregado (mm)	Volumen de agregado grueso compactado con varilla, por volumen de concreto para módulo de finura de la arena de:			
	2.40	2.60	2.80	3.00
10	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
70	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

De acuerdo a la tabla anterior, el volumen aparente de agregado grueso por metro cúbico de hormigón es:

$$\text{volumen aparente del agregado grueso} = 0.73 \text{ m}^3$$

f. Peso del Agregado Grueso:

El peso del agregado grueso se obtiene multiplicando su volumen aparente por su peso específico aparente.

$$\text{Peso agregado grueso} = 0.73 \text{ m}^3 \times 1600 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Peso agregado grueso} = 1168 \text{ Kg.}$$

g. Volúmenes de Cemento, Agua, Agregado Grueso y Aire Atrapado:

Se calculan los volúmenes efectivos de cemento, agua, agregado grueso y aire atrapado:

$$\text{Volumen cemento} = \frac{344 \text{ Kg}}{3150 \text{ Kg/m}^3}$$



$$\text{Volumen cemento} = 0.109 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen agua} = \frac{160 \text{ Kg}}{1000 \text{ Kg/m}^3}$$

$$\text{Volumen agua} = 0.160 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen agregado grueso} = \frac{1168 \text{ Kg}}{2640 \text{ Kg/m}^3}$$

$$\text{Volumen agregado grueso} = 0.442 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de aire atrapado} = 0.01 \times 1 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de aire atrapado} = 0.01 \text{ m}^3$$

h. Volumen de Agregado Fino:

Se calcula el volumen de agregado fino.

$$\text{Volumen agregado fino} = 1.000 \text{ m}^3 - 0.109 \text{ m}^3 - 0.160 \text{ m}^3 - 0.442 \text{ m}^3 - 0.010 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen agregado fino} = 0.279 \text{ m}^3$$

j. Peso del Agregado Fino:

Se calcula el peso de agregado fino.

$$\text{Peso agregado fino} = (0.279 \text{ m}^3) \cdot (2.58 \times 1000 \text{ Kg/m}^3)$$

$$\text{Peso agregado fino} = 720 \text{ Kg}$$

k. Resumen de Materiales por Metro Cúbico de Hormigón:

Material	Volumen Neto	Peso
Cemento	0.109 m ³	344 Kg
Agregado fino	0.279 m ³	720 Kg
Agregado grueso	0.442 m ³	1168 Kg
Agua	0.160 m ³	160 Kg
Aire atrapado	0.010 m ³	0 Kg

Hormigón Fresco	1.000 m³	2392 Kg
------------------------	----------------------------	----------------

Este diseño sirve de base para iniciar pruebas de comprobación en laboratorio que permitirán su ajuste. Algunos criterios básicos para corrección del diseño, en laboratorio, pueden ser los siguientes:

- Si la mezcla resulta demasiado seca, debería incorporarse un aditivo plastificante.
- Si la mezcla presenta oquedades internas (hormigueros), debería incrementarse proporcionalmente la cantidad de arena, cemento y agua, disminuyendo simultáneamente la cantidad de agregado grueso.
- Si la mezcla presenta segregación, debería disminuirse proporcionalmente la cantidad de arena, cemento y agua, aumentándose simultáneamente la cantidad de agregado grueso.



Para poder definir una dosificación al volumen, que a pesar de no ser técnicamente apropiada es la más empleada en nuestro medio, sería necesario determinar adicionalmente, en laboratorio, la densidad aparente del agregado grueso y del cemento.

2.5 CONTROL EN OBRA:

El control en obra del proceso de fabricación de los hormigones constituye un aspecto fundamental. Debe prestarse especial atención a los siguientes puntos:

- Respetar las proporciones obtenidas en laboratorio de los componentes del hormigón, a menos que se produzcan cambios en sus características, en cuyo caso deberán efectuarse ajustes al diseño.
- Controlar la humedad de los agregados, particularmente apilándolos en lugares protegidos contra la lluvia. En caso de no ser posible controlar los cambios de humedad se debe verificar periódicamente su contenido.
- No utilizar agregados que contengan sales o materiales orgánicos.
- No utilizar cemento que denote inicios de un proceso de fraguado.
- Controlar constantemente que el asentamiento del cono de Abrams se encuentre dentro de límites aceptables. El propio cono de Abrams puede ser utilizado para ajustar un diseño si los agregados se han humedecido por permanecer a la intemperie, en cuyo caso se deberá modificar fundamentalmente la cantidad de agua añadida.
- Si se usan aditivos, deben hacerse previamente mezclas de prueba para asegurarse de su buen comportamiento.
- Se deberá tener especial cuidado con el transporte del hormigón para no producir segregación.
- Se deberá tomar un número suficiente de muestras cilíndricas para poder realizar ensayos representativos a los 7, 14 y 28 días. Se deberán reservar muestras para poder ensayarlas ocasionalmente a los 56 días, cuando el comportamiento a los 28 días haga presumir la utilización de cemento de fraguado lento o de aditivo retardante de fraguado.

2.6 TAREAS COMPLEMENTARIAS:

- a. Realizar los ensayos de laboratorio a agregados y cemento de la zona, para efectuar el diseño de un hormigón.
- b. Con materiales de la zona, realizar el diseño, al peso, de un hormigón con resistencia característica $f^c = 210 \text{ Kg/cm}^2$, para una obra en la que existirá un muy buen control de producción del hormigón. Probar los resultados en laboratorio.



TEMAS DE HORMIGÓN ARMADO
Marcelo Romo Proaño, M.Sc.
Escuela Politécnica del Ejército – Ecuador
mromo@espe.edu.ec

REFERENCIAS:

- 2.1 Neville A., *Properties of Concrete*, Pitman Publishing Limited.
- 2.2 Andrade D., Dávila I., Villacís W., Romo M.y Aguiar R., *Memorias del II Curso de Actualización de Conocimientos Básicos de Estructuras*, Editorial de la Escuela Politécnica del Ejército.
- 2.3 ACI 318S-08, (2008), *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario*, American Concrete Institute.

CAPÍTULO III

EL ACERO ESTRUCTURAL EN EL HORMIGÓN ARMADO

3.1 INTRODUCCION:

El acero es una aleación basada en hierro, que contiene carbono y pequeñas cantidades de otros elementos químicos metálicos. Generalmente el carbono representa entre el 0.5% y el 1.5% de la aleación.

El acero utilizado en estructuras (barras y cables) es un material apto para resistir sollicitaciones traccionantes, lo que lo convierte en el componente ideal para combinarse técnicamente con el hormigón simple, con el que conforma el hormigón armado y el hormigón preesforzado.



Figura 3.1: *Varillas de acero.*

Además, el acero en barras está en capacidad de resistir eficientemente sollicitaciones de cortante y de torsión, aunque por su costo mucho más elevado que el del hormigón simple, el porcentaje volumétrico del acero dentro del hormigón armado y del hormigón preesforzado es relativamente pequeño (generalmente entre 0.5% y 3%, dependiendo del elemento estructural).

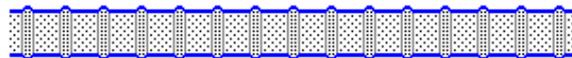


Figura 3.2: *Corrugado en las varillas de acero.*

Cuando está adecuadamente confinado o arriostrado, el acero en barras también es capaz de resistir adecuadamente las sollicitaciones de compresión, aunque económicamente no sea la solución más apropiada.

El acero empleado en el hormigón armado normalmente debe presentar reslates (varillas corrugadas) [ACI 3.5.1], con excepción del acero empleado en zunchos espirales, en cuyo caso puede ser liso. Comercialmente es distribuido en varillas con distintos diámetros nominales.



Tabla 3.1: Sección transversal y peso unitario de varillas de acero.

Diámetro Nominal (mm)	Sección Transversal (cm ²)	Peso por Metro Lineal (Kg/m)
8	0,50	0,39
10	0,79	0,61
12	1,13	0,88
14	1,54	1,20
16	2,01	1,57
18	2,54	1,98
20	3,14	2,45
22	3,80	2,97
25	4,91	3,83
28	6,16	4,80
30	7,07	5,51
35	9,62	7,50

Varillas desde 10 hasta 25 mm. de diámetro se las consigue directamente en el mercado, en longitudes de 6, 9 y 12 m., y a partir de ese diámetro se las fabrica bajo pedido. Varillas de menos de 10 mm. se las suele expender en rollos.



Figura 3.3: Varillas y rollos de acero.

En el diseño se suelen escoger varias varillas de un mismo diámetro o combinaciones de diámetros de varillas para obtener las secciones transversales requeridas.

Tabla 3.2: Sección transversal de múltiples varillas de acero.

Diám. mm	Sección Transversal de Varillas de Acero (cm ²)														
	Número de Varillas														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8	0,50	1,01	1,51	2,01	2,51	3,02	3,52	4,02	4,52	5,03	5,53	6,03	6,53	7,04	7,54
10	0,79	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,50	6,28	7,07	7,85	8,64	9,42	10,21	11,00	11,78
12	1,13	2,26	3,39	4,52	5,65	6,79	7,92	9,05	10,18	11,31	12,44	13,57	14,70	15,83	16,96
14	1,54	3,08	4,62	6,16	7,70	9,24	10,78	12,32	13,85	15,39	16,93	18,47	20,01	21,55	23,09
16	2,01	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07	16,08	18,10	20,11	22,12	24,13	26,14	28,15	30,16
18	2,54	5,09	7,63	10,18	12,72	15,27	17,81	20,36	22,90	25,45	27,99	30,54	33,08	35,63	38,17
20	3,14	6,28	9,42	12,57	15,71	18,85	21,99	25,13	28,27	31,42	34,56	37,70	40,84	43,98	47,12
22	3,80	7,60	11,40	15,21	19,01	22,81	26,61	30,41	34,21	38,01	41,81	45,62	49,42	53,22	57,02
25	4,91	9,82	14,73	19,63	24,54	29,45	34,36	39,27	44,18	49,09	54,00	58,90	63,81	68,72	73,63
28	6,16	12,32	18,47	24,63	30,79	36,95	43,10	49,26	55,42	61,58	67,73	73,89	80,05	86,21	92,36
30	7,07	14,14	21,21	28,27	35,34	42,41	49,48	56,55	63,62	70,69	77,75	84,82	91,89	98,96	106,03
35	9,62	19,24	28,86	38,48	48,11	57,73	67,35	76,97	86,59	96,21	105,83	115,45	125,07	134,70	144,32

En hormigón preesforzado se utilizan cables de acero, de diámetro relativamente pequeño (3, 4, 5 y 6 mm.).



Figura 3.4: Tendido de ductos para cables de acero de preesfuerzo y sistemas de anclaje de cables.

3.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO:

La descripción más completa de las propiedades mecánicas de los aceros (propiedades utilizadas en el diseño estructural) se la realiza mediante sus curvas esfuerzo – deformación bajo cargas de tracción, las mismas que varían dependiendo de la composición química del material y de sus procesos de fabricación.

En el siguiente diagrama se presentan algunas curvas esfuerzo – deformación características de los aceros.

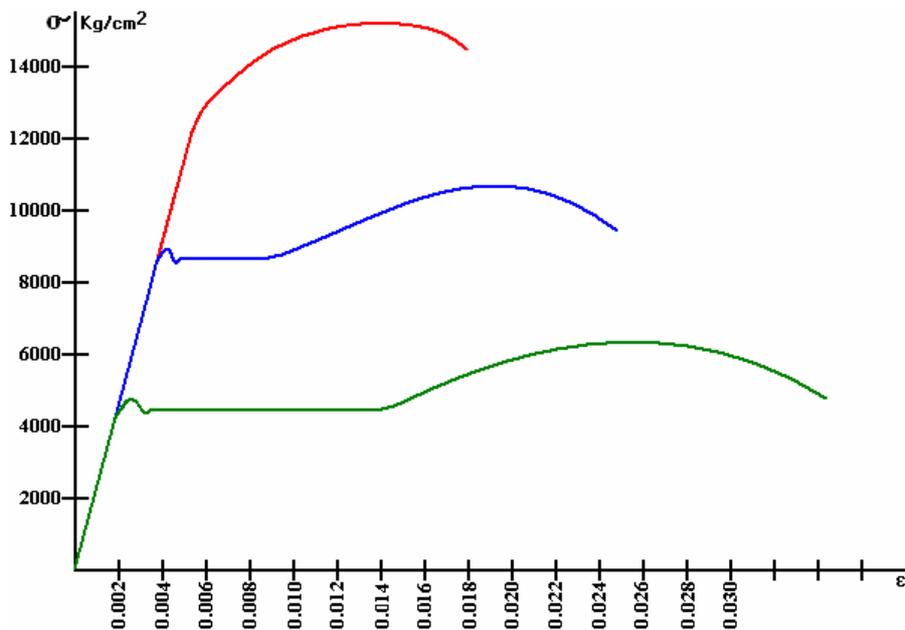


Figura 3.5: Curvas esfuerzo-deformación de los aceros estructurales.

Algunos de los elementos que aparecen en las curvas esfuerzo – deformación serán discutidos a continuación.

a. RANGO DE COMPORTAMIENTO ELÁSTICO:

Es el rango de esfuerzos, a partir de la carga nula, en que el acero se deforma por cargas de tracción, pero cuando se retira tal carga recupera su geometría inicial. En la curva esfuerzo – deformación ese rango coincide con la recta que parte desde el punto de esfuerzo y deformación nulos.

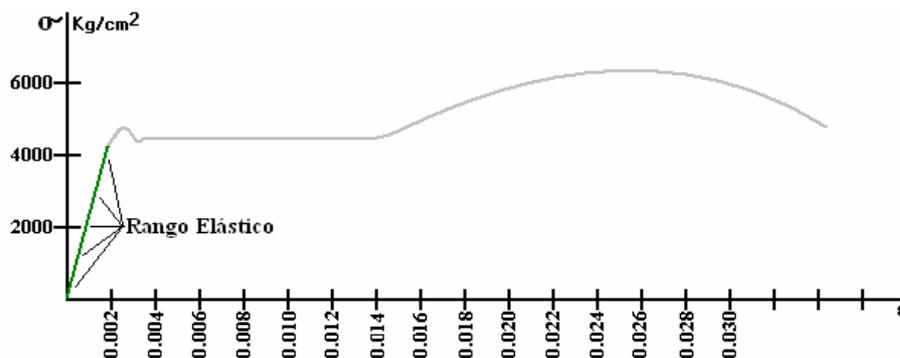


Figura 3.6: Rango elástico del acero estructural.

b. ESFUERZO DE FLUENCIA:

Se define como el esfuerzo bajo el cual el acero continúa deformándose sin necesidad de incrementar las cargas de tracción. En el diagrama esfuerzo – deformación de los aceros tradicionales, la fluencia coincide con una recta horizontal —o casi horizontal—, a continuación del rango elástico y de un pequeño tramo de transición. El esfuerzo asociado se identifica como “Fy”.

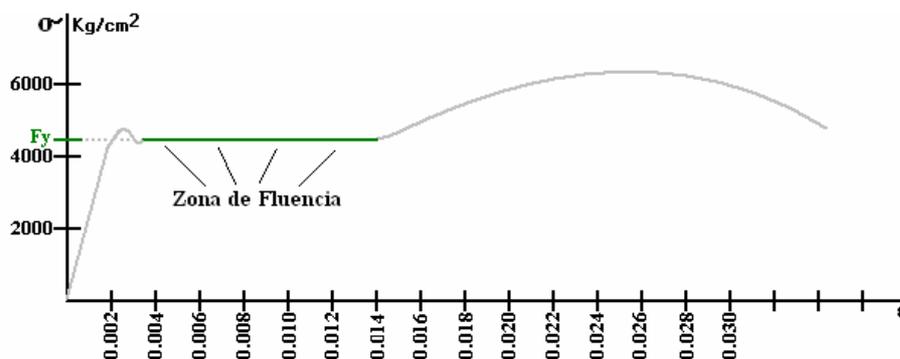


Figura 3.7: Zona de fluencia del acero estructural.

Existen aceros estructurales, trabajados en frío para lograr una mayor resistencia, que no revelan la presencia de una zona de fluencia, en cuyo caso ASTM recomienda trazar una recta paralela a la de comportamiento elástico, que arranque en el eje de las deformaciones unitarias con una deformación de 0.002. El punto de cruce de esa recta con la curva esfuerzo – deformación definirá el esfuerzo teórico de fluencia del material.

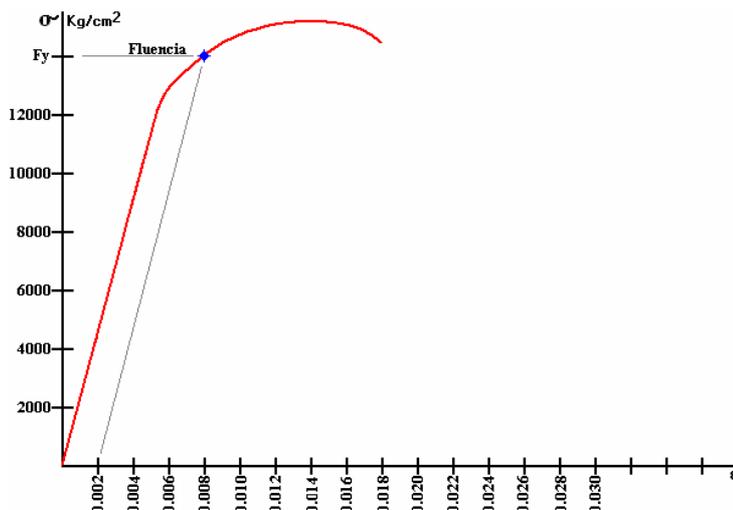


Figura 3.8: Esfuerzo de fluencia en aceros sin meseta de fluencia, según ASTM.

ACI, por su parte, especifica que si el esfuerzo de fluencia observado gráficamente supera los 4200 Kg/cm², el esfuerzo de fluencia deberá obtenerse de la curva esfuerzo-deformación para una deformación unitaria de 0.0035 [ACI 3.5.3.2]. No se podrá utilizar en diseño un esfuerzo de fluencia superior a 5500 Kg/cm² [ACI 9.4], con excepción del refuerzo en espiral, en cuyo caso podrá llegar hasta 7000 Kg/cm² [ACI 10.9.3], y el acero de preesfuerzo.

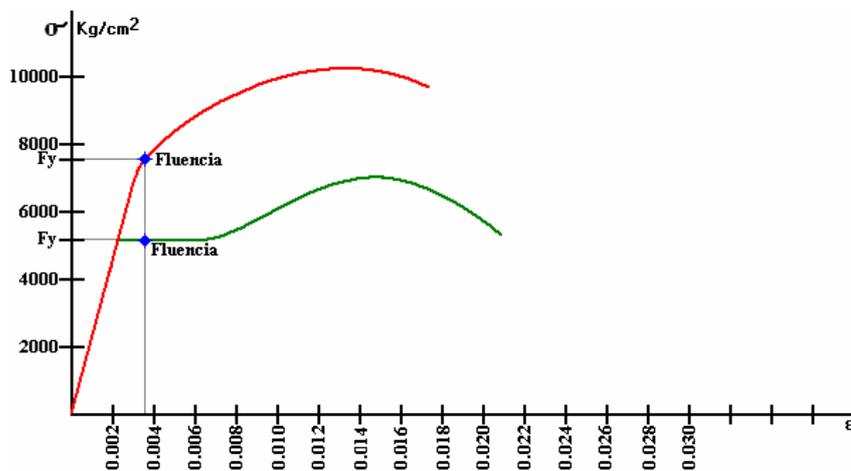


Figura 3.9: Esfuerzo de fluencia en aceros según ACI.

c. RESISTENCIA A LA ROTURA:

Es el mayor esfuerzo que puede soportar el acero, previo al proceso de colapso del material. Dentro del diagrama esfuerzo – deformación del material el inicio del colapso queda identificado mediante el punto de mayor ordenada, que se representa “Fr”.

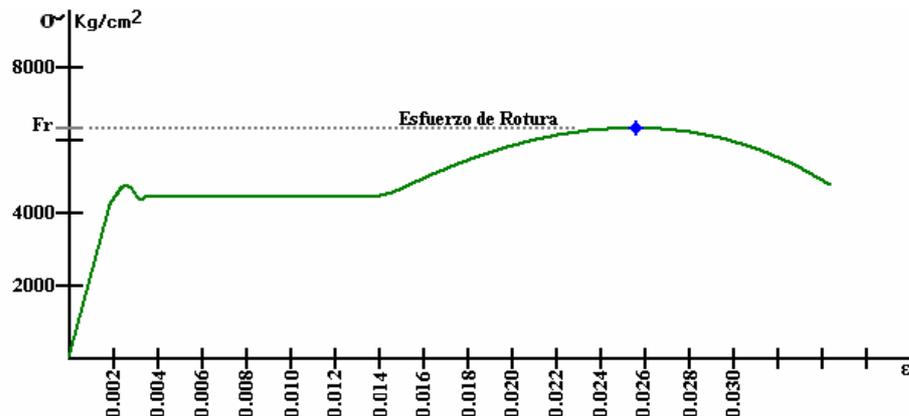


Figura 3.10: Resistencia a la rotura del acero de refuerzo.

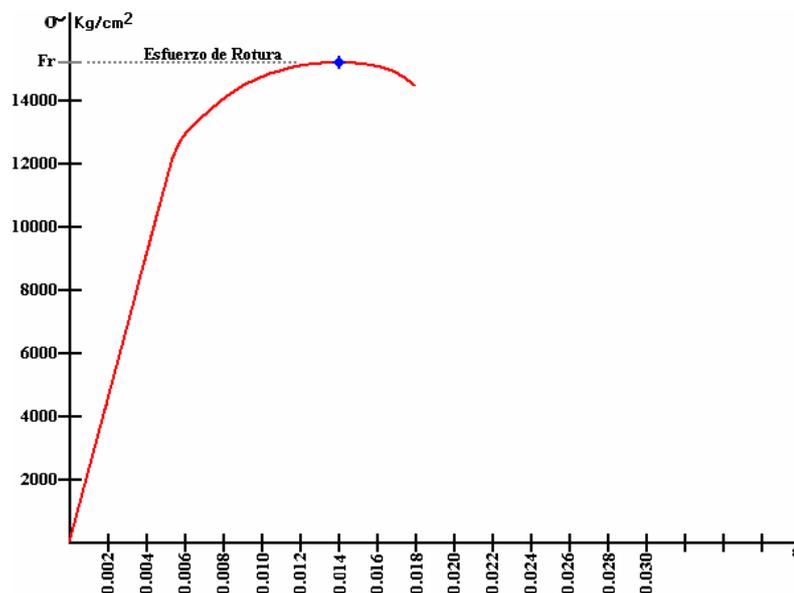


Figura 3.11: Resistencia a la rotura de cables de acero de preesfuerzo.

El esfuerzo de rotura es siempre superior al esfuerzo de fluencia, para todo tipo de acero estructural.

En hormigón armado, la reserva de capacidad entre el esfuerzo de fluencia y el de rotura no es utilizada directamente en el diseño, debido a las grandes deformaciones que se requerirían para alcanzar ese esfuerzo mayor, por lo que se utiliza como elemento de diseño exclusivamente al esfuerzo de fluencia.

En hormigón preesforzado, donde se utilizan aceros de alta resistencia, en el diseño se emplea el esfuerzo de fluencia, y en la verificación a carga última se emplea el esfuerzo de rotura, pues las deformaciones involucradas en las cercanías del colapso del material compuesto son comparativamente menores a las del hormigón armado.

d. MÓDULO DE ELASTICIDAD:

Es la pendiente de la recta que identifica al rango elástico de comportamiento de los materiales, y en el caso del acero se representa “Es”.

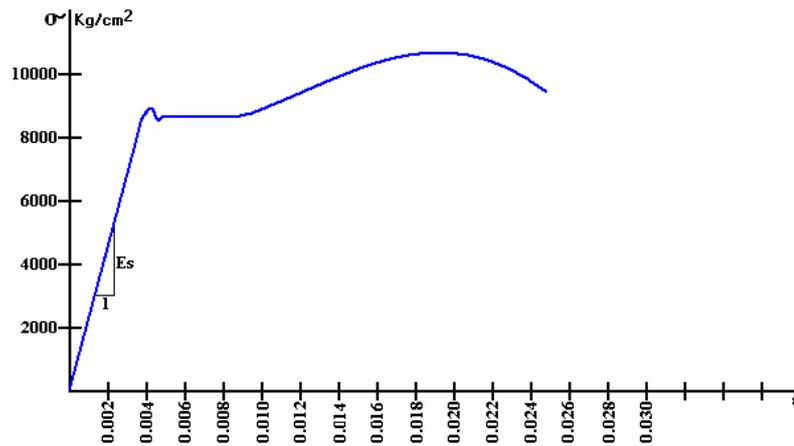


Figura 3.12: Módulo de elasticidad del acero de refuerzo.

Numéricamente el módulo de elasticidad es el cociente entre el esfuerzo y la deformación unitaria dentro del rango elástico.

$$E_s = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

En los aceros estructurales sólidos en barra o en perfil, utilizados en el hormigón armado, prácticamente en todos los casos se tiene un único módulo de elasticidad, lo que en las curvas esfuerzo – deformación se refleja en la pendiente única de los aceros con características diferentes [ACI 8.5.2].

$$E_s = 2'100000 \text{Kg/cm}^2 \qquad \text{Ecuación (3.1)}$$

e. DUCTILIDAD:

Igual que en el caso del hormigón, existen dos maneras básicas de medir la ductilidad: por deformación y por energía de deformación.

La ductilidad por deformación de los aceros estructurales utilizados en hormigón armado fácilmente supera a diez. Los aceros de alta resistencia empleados en hormigón preesforzado tienen una ductilidad limitada, del orden de tres a cinco.

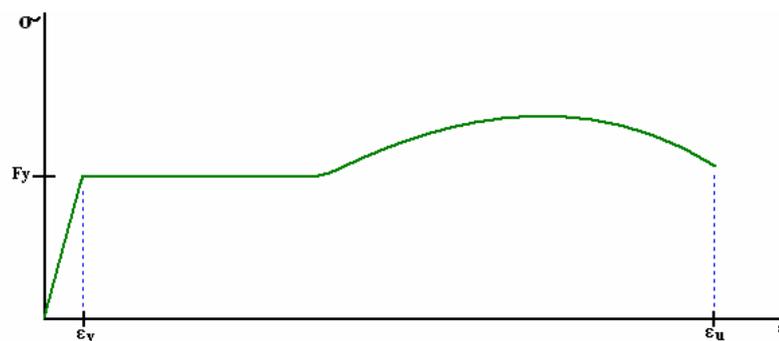


Figura 3.13: Deformaciones unitarias de fluencia y última.

$$D_d = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y} \qquad \text{Ecuación (3.2)}$$



Donde:

- D_d : Índice de ductilidad por deformación
- ϵ_u : Deformación unitaria de rotura
- ϵ_y : Deformación unitaria de inicio de fluencia

Para la especificación del inicio de fluencia se simplifica el diagrama esfuerzo – deformación, eliminándose la zona de transición entre el rango de comportamiento elástico y la zona de fluencia.

La ductilidad por energía de deformación de los aceros empleados en hormigón armado generalmente supera a veinte.

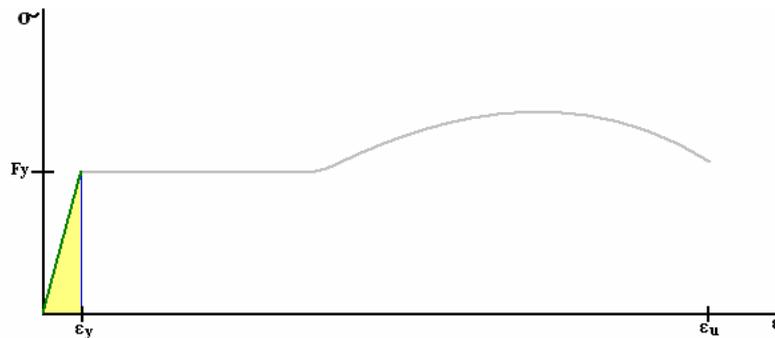


Figura 3.14: Energía de deformación elástica.

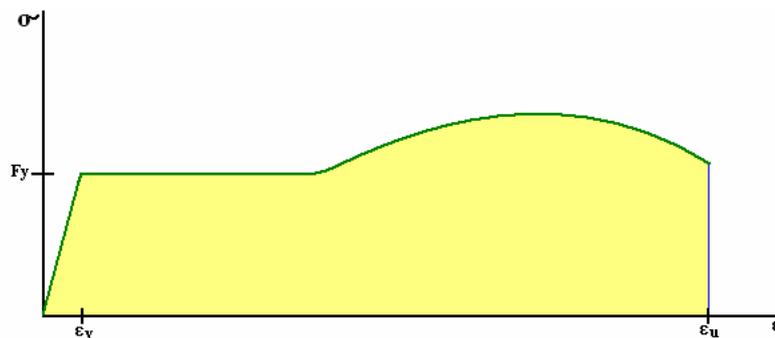


Figura 3.15: Energía de deformación última.

$$D_{ed} = \frac{A_u}{A_y} \qquad \text{Ecuación (3.3)}$$

Donde:

- D_{ed} : Índice de ductilidad por energía de deformación
- A_u : Energía de deformación unitaria de rotura
- A_y : Energía de deformación unitaria de inicio de fluencia

3.3 OTRAS PROPIEDADES DEL ACERO:

a. DENSIDAD:

La densidad del acero sólido es de 7850 Kg/m³. Los cables de acero utilizados en hormigón preesforzado tienen una densidad menor, por la presencia de



espacios vacíos; dicha variación de densidad depende del diámetro exterior de los cables, del diámetro y número de hilos que forman parte del cable y del proceso de fabricación.

$$\rho_s = 7850 \text{ Kg/m}^3$$

Ecuación (3.4)

b. RESISTENCIA A LA CORROSIÓN:

Muchos aceros utilizados en estructuras requieren de una resistencia específica a la corrosión, cuando van a estar expuestos a ambientes agresivos, para lo que es necesario que en el proceso de fundición se incluyan componentes adicionales, especialmente níquel, con una proporción entre 2 y 4% de la aleación. Este tipo de aceros no se lo consigue en barras, en nuestro medio, pero se lo puede adquirir en perfiles importados, laminados en caliente.



Figura 3.16: Acero de refuerzo con corrosión (izquierda) y sin corrosión (derecha).

Existen aceros resistentes al desgaste, que suelen utilizarse en estructuras con elementos móviles como puentes grúas metálicos, que utilizan Manganeso entre un 10 y un 18% de la aleación.

La presencia de Níquel y Cromo en la aleación permite la obtención de aceros con propiedades combinadas como inoxidable y resistentes a ataques químicos, o de gran resistencia, dureza y elasticidad.

3.4 TAREAS COMPLEMENTARIAS:

- a. Realizar el ensayo de tracción en laboratorio de una varilla de acero estructural, e identificar los elementos de la curva esfuerzo – deformación (módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, esfuerzo de rotura y deformación unitaria de rotura).
- b. Realizar el ensayo de tracción de un cable de acero de alta resistencia, e identificar los elementos de la curva esfuerzo – deformación (módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, esfuerzo de rotura y deformación unitaria de rotura).



TEMAS DE HORMIGÓN ARMADO
Marcelo Romo Proaño, M.Sc.
Escuela Politécnica del Ejército – Ecuador
mromo@espe.edu.ec

REFERENCIAS:

- 3.1 Winter G. y Nilson A., *Proyecto de Estructuras de Hormigón*, Editorial Reverté, S.A.
- 3.2 Nilson A., (1999), *Diseño de Estructuras de Concreto*, Mc Graw Hill.
- 3.3 ACI 318S-08, (2008), *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario*, American Concrete Institute.
- 3.4 CEC-2001, (2001), *Código Ecuatoriano de la Construcción*, Instituto Ecuatoriano de Normalización.