

**MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS, TRANSPORTE,
Y DE VIVIENDA Y DESARROLLO URBANO**

VICEMINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS

**UNIDAD DE INVESTIGACION
Y DESARROLLO VIAL**

**ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL
MODULO DE POISSON**

Elaborado por: Carlos Rubén Catalán Oliva*, Ing. Civil.
Unidad Técnica, Gerencia de Auditoría de Calidad.

Coordinador: Daniel Antonio Hernández Flores, Ing. Civil.
Director, Unidad de Investigación y Desarrollo Vial.

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, ABRIL DE 2006

* Laboró en la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial hasta el mes de Marzo de 2008.

OBSERVACION

El contenido de este documento refleja opiniones de los autores, quienes son responsables de los hechos y de la exactitud de los datos presentados. El contenido no refleja necesariamente las opiniones y políticas oficiales del Ministerio de Obras Públicas de El Salvador. Este documento no constituye una norma, especificación ni regulación.

INDICE

	Página
Resumen.	1
1.0 Introducción.	1
2.0 Conceptos básicos sobre mecánica de materiales.	1
3.0 Módulo de Poisson.	7
4.0 Módulo de Poisson para materiales comúnmente utilizados en la construcción de obras viales.	10
5.0 Valores Típicos de módulo de Poisson para diferentes materiales.	17
6.0 Aplicación del módulo de Poisson en pavimentos.	21
7.0 Conclusiones.	27
8.0 Referencias.	28

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL MODULO DE POISSON

RESUMEN

El presente documento contiene información sobre el módulo de Poisson, parámetro relacionado con las propiedades mecánicas de los diferentes materiales utilizados en Ingeniería. Se contemplan aspectos básicos para la obtención del módulo de Poisson, así como valores típicos para diferentes materiales. Además, se presentan ejemplos de aplicación de dicho parámetro en la evaluación estructural de un pavimento rígido, utilizando el método de retrocálculo (método no destructivo) y lo establecido en la guía suplementaria de diseño AASHTO 1998.

1.0 Introducción.

La Unidad de Investigación y Desarrollo Vial (UIDV) como entidad encargada de la Verificación de la Calidad de obra e Investigaciones Aplicadas en el área de infraestructura vial, por parte del Viceministerio de Obras Públicas (VMOP), y atendiendo su política de la mejora continua de los procesos relacionados con investigaciones aplicadas, ha desarrollado la presente revisión bibliográfica sobre el módulo de Poisson, con la finalidad de conocer sobre el origen, aspectos sobre la obtención, valores típicos utilizados principalmente para materiales empleados en la construcción de obras viales y la incidencia que tiene como parámetro de entrada en la evaluación de una estructura de pavimento de concreto hidráulico utilizando el equipo Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD) y lo establecido en la guía suplementaria de diseño AASHTO 1998.

2.0 Conceptos básicos sobre mecánica de materiales.

Previo a la introducción al tema en estudio, es recomendable dar una revisión a los conceptos básicos sobre la mecánica de materiales. La **mecánica de materiales** es una rama de la mecánica aplicada que trata del comportamiento de los cuerpos sólidos sometidos a varios tipos de carga, su objetivo principal es determinar los esfuerzos, deformaciones unitarias y desplazamientos en estructuras debido a las cargas que actúan sobre ellas. Para determinar los esfuerzos y las deformaciones unitarias, usamos las propiedades físicas de los materiales así como numerosas leyes y conceptos teóricos. Si podemos encontrar esas cantidades para todos los valores de las cargas hasta las que causan la falla, tendremos una representación completa del comportamiento mecánico de esas estructuras. Entender dicho comportamiento es esencial para el diseño seguro de todos los tipos de estructuras, ya sean aeroplanos, antenas, edificios, puentes, pavimentos, máquinas, motores, otros.

El desarrollo histórico de la mecánica de materiales ha sido una mezcla de teoría y experimento; en algunos casos, la teoría, ha señalado el camino para llegar a resultados útiles y la experimentación lo ha hecho en otros. Algunos personajes famosos como Leonardo Da Vinci (1452-1519) y Galileo Galilei (1564-1642) llevaron a cabo experimentos para determinar la resistencia de alambres, barras y vigas, aunque no desarrollaron teorías adecuadas (respecto a los estándares actuales) para explicar los resultados de sus pruebas. En contraste, el famoso matemático Leonhard Euler (1707-1783) desarrolló la teoría matemática de las columnas y

calculó la carga crítica de una columna en 1744, mucho antes de que existiera evidencia experimental que mostrara la importancia de sus resultados. Sin pruebas apropiadas para respaldar sus teorías, los resultados de Euler permanecieron sin usarse durante más de cien años; sin embargo, actualmente son la base del diseño y análisis de la mayoría de las columnas.

2.1 Esfuerzo normal y cortante, deformación unitaria normal y cortante.

Los conceptos fundamentales en mecánica de materiales son el esfuerzo y la deformación unitaria: Esos conceptos pueden ilustrarse en su forma más elemental considerando una barra prismática sometida a fuerzas axiales. Una barra prismática es un miembro estructural recto con sección transversal constante en toda su longitud. Fuerza axial es una carga dirigida a lo largo del eje del miembro que somete a éste a tensión o a compresión (ver figura No. 1),

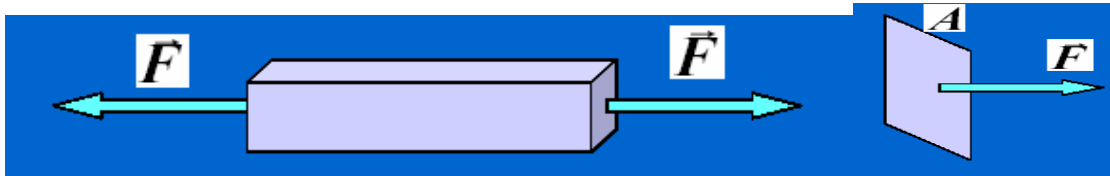


Figura No. 1. Aplicación de fuerzas de tensión.

A la tensión aplicada por unidad de área se denomina: **Esfuerzo normal**

$$\sigma = \frac{T}{A} \quad (N/m^2)$$

Para el caso de fuerzas cortantes, a la fuerza aplicada por unidad de área se denomina: **Esfuerzo Cortante**

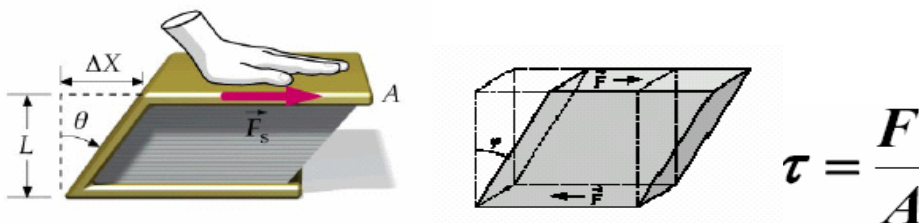


Figura No. 2. Aplicación de fuerza cortante.

Al aplicar un esfuerzo normal a un cuerpo, este sufre una deformación; y a la relación de esa deformación respecto a la longitud original del cuerpo se denomina: **Deformación unitaria normal** denotada con la letra griega ϵ (Épsilon).

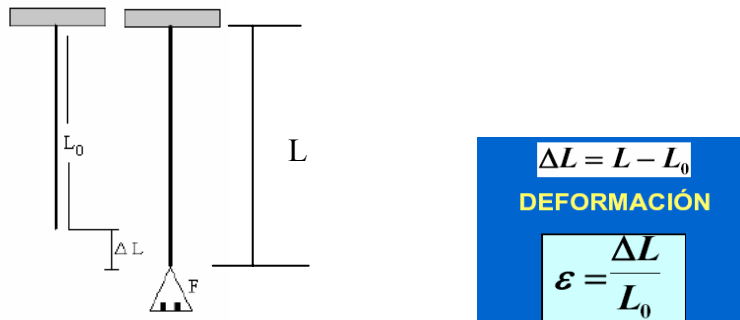


Figura No. 3. Deformación unitaria normal.

Asimismo, al aplicar un esfuerzo cortante a un cuerpo este sufre una distorsión o cambio de forma denominada **deformación unitaria cortante**, denotada con la letra griega γ (Gamma).

2.2 Diagrama Esfuerzo versus Deformación.

Por lo general, una de las principales formas de establecer el comportamiento de los materiales cuando están sometidos a cargas, es llevar a cabo experimentos en el laboratorio. El procedimiento usual es colocar pequeños especímenes del material en máquinas de prueba, aplicar las cargas y medir las deformaciones resultantes (como cambios de longitud y diámetro). La mayoría de los laboratorios de pruebas de materiales están equipados con máquinas capaces de cargar los especímenes de diversas maneras, incluidas las cargas estáticas y dinámicas y la carga en tensión y en compresión. Una de las principales organizaciones normativas de ensayos de laboratorio es la American Society for Testing and Materials ASTM (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales), la cual publica especificaciones y normas para materiales y pruebas. Otras organizaciones normativas en Estados Unidos son la American National Standard Institute ANSI (Instituto Nacional de Normas Americanas) y el National Institute of Standards and Technology NIST (Instituto Nacional de Normas y Tecnología). En otros países existen organizaciones similares.

Después de efectuar una prueba de tensión o compresión y determinar el esfuerzo y la deformación unitaria para varias magnitudes de la carga, podemos trazar un diagrama de esfuerzo versus deformación unitaria. Dicho diagrama **esfuerzo – deformación unitaria** es una característica del material particular que se está probando y proporciona importante información sobre propiedades mecánicas y tipo de comportamiento.

En la figura No. 4, se muestra un diagrama esfuerzo - deformación unitaria para el acero en tensión, considerando las deformaciones unitarias medidas en el eje horizontal y los esfuerzos sobre el eje vertical. Dicho diagrama permite identificar propiedades importantes del material.

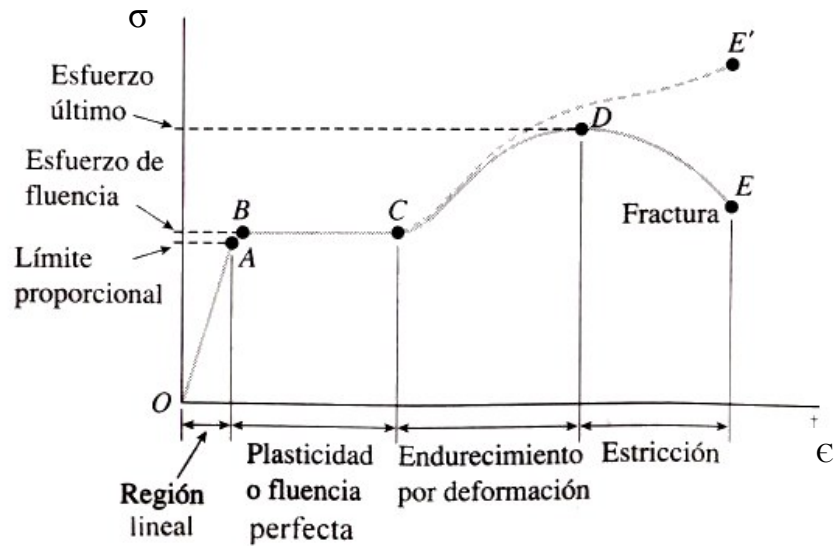


Figura No. 4. Diagrama Esfuerzo - Deformación para el acero en tensión

Fuente: Mecánica de Materiales, Gere y Timoshenko.

La relación lineal del origen O al punto A , indica una proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación, posterior al punto A , la proporcionalidad ya no existe; por lo tanto el esfuerzo en A se denomina límite proporcional. La pendiente de la recta de O a A es la constante de proporcionalidad llamada **módulo de elasticidad**. Con un incremento en el esfuerzo mayor al límite proporcional, la deformación unitaria crece con rapidez para cada incremento de esfuerzo, comportándose con una pendiente menor, hasta que en el punto B se vuelve horizontal. Iniciando en este punto, ocurre un considerable alargamiento del material de prueba sin un incremento perceptible de la fuerza de tensión (de B a C), a dicho fenómeno se le conoce como **fluencia** del material y el esfuerzo en el punto B de la llama **esfuerzo de fluencia** del acero.

Después de experimentar deformaciones unitarias que ocurren durante la fluencia en la región BC , el acero empieza a endurecerse por deformación. Durante dicha etapa el material experimenta cambios en su estructura cristalina, lo que conduce a una resistencia mayor del material a deformaciones adicionales. La carga termina por alcanzar su valor máximo y el esfuerzo correspondiente (punto D) se denomina **esfuerzo último**. Un alargamiento adicional de la barra va acompañado de una reducción del esfuerzo y la fractura ocurre finalmente en el punto E .

La propiedad por medio de la cual un material recupera sus dimensiones originales al ser descargado, se llama **elasticidad**. Es importante destacar que en la curva esfuerzo-deformación unitaria de O a A no tiene que ser necesariamente lineal para que el material sea elástico.

La característica de un material por la cual sufre deformaciones unitarias inelásticas más allá de la deformación unitaria en el límite elástico se conoce como **plasticidad**. En la curva esfuerzo-deformación unitaria tenemos una región elástica seguida por una región plástica. Cuando ocurren grandes deformaciones en un material dúctil cargado en la región plástica, se dice que el material sufre un **flujo plástico**.

2.3 Elasticidad lineal, ley de Hooke.

La mayoría de materiales como los metales, madera, plásticos y cerámicos se comportan elástica y linealmente en las primeras etapas de carga; en consecuencia, sus curvas esfuerzo-deformación unitaria comienzan con una línea recta que pasa por el origen. Cuando un material se comporta elásticamente y exhibe también una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria, se dice que es **elástico lineal**. Este tipo de comportamiento es de gran importancia en la ingeniería por una razón obvia: mediante el diseño de estructuras y máquinas que funcionen en esa región evitamos deformaciones permanentes debido al flujo plástico.

La relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria en una barra sometida a tensión o compresión simple se expresa por la ecuación.

$$\sigma = E \epsilon$$

En donde: σ es el esfuerzo axial, ϵ es la deformación unitaria axial y E es una constante de proporcionalidad llamada **módulo de elasticidad** del material. El módulo de elasticidad está definido por la pendiente del diagrama esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica lineal. Puesto que la deformación unitaria es adimensional, las unidades de E son las mismas que las del esfuerzo. Las unidades características de E son psi (lbf/pulg²) o ksi (Klbf/pulg²) en unidades inglesas y pascuales (o múltiplos de ella) en unidades de Sistema Internacional.

La ecuación $\sigma = E \epsilon$ se conoce como **ley de Hooke**, en honor del famoso científico inglés Robert Hooke (1635-1703). Hooke fue una de las primeras personas en investigar científicamente las propiedades elásticas de diversos materiales como metales, madera, rocas, otros. Él midió el alargamiento de alambres con pesos en sus extremos y observó que los alargamientos “siempre guardan las mismas proporciones entre sí de acuerdo con los pesos que los generan”; de tal manera estableció la relación lineal entre las cargas aplicadas y los alargamientos resultantes.

La ecuación indicada anteriormente es una versión muy limitada de la ley de Hooke porque relaciona sólo los esfuerzos y deformaciones unitarias longitudinales desarrollados en la tensión o compresión simple de una barra (*esfuerzo uniaxial*). Para tratar con estados más complicados de esfuerzo, como los encontrados en la mayoría de las estructuras y máquinas, debemos usar ecuaciones más extensas de la ley de Hooke que involucran esfuerzo plano y triaxiales.

El módulo de elasticidad tiene valores relativamente grandes para materiales muy rígidos, como los metales estructurales. Para la mayoría de los materiales, el valor de E en compresión es casi el mismo que en tensión.

El módulo de elasticidad se llama a menudo **módulo de Young** en honor del científico inglés Thomas Young (1773-1829), quien introdujo la idea de “módulo de elasticidad” en relación con una investigación de la tensión y la compresión en barras prismáticas.

Las propiedades de un material en cortante pueden determinarse a nivel experimental con pruebas de cortante directo o con pruebas de torsión. Con los resultados de esas pruebas podemos graficar **diagramas esfuerzo – deformación unitaria en cortante** (es decir, diagramas de esfuerzo cortante τ versus deformación unitaria cortante γ). Esos diagramas son similares en forma a los diagramas de pruebas de tensión (σ versus ϵ) para los mismos materiales aunque difieren en las magnitudes.

De los diagramas esfuerzo-deformación unitaria en cortante, podemos obtener propiedades de los materiales como el límite proporcional, el módulo de elasticidad, el esfuerzo de fluencia y el

esfuerzo último. Por lo general estas propiedades en cortante son iguales a la mitad de las correspondientes en tensión; por ejemplo, el esfuerzo de fluencia para el acero estructural en cortante es 0.5 a 0.6 veces el esfuerzo de fluencia en tensión.

Para muchos materiales, la parte inicial del diagrama esfuerzo – deformación unitaria en cortante es una línea recta que pasa por el origen, igual que en el caso de tensión. Para esta región elástica lineal, el esfuerzo cortante y la deformación unitaria cortante son proporcionales y por lo tanto tenemos la siguiente ecuación para la ley de Hooke en cortante:

$$\tau = G \gamma$$

En donde:

τ es el esfuerzo cortante

G es el **módulo de elasticidad en cortante** (o *módulo de rigidez*)

γ es la deformación unitaria en cortante

Un aspecto importante a considerar en relación con las cargas aplicadas, es que estas pueden clasificarse en estáticas o dinámicas dependiendo si permanecen constantes o varían con el tiempo. Una **carga estática** se aplica lentamente, de manera que no causa efectos vibratorios o dinámicos en la estructura. La carga se incrementa de manera gradual desde cero hasta su valor máximo y después permanece constante. Una **carga dinámica** puede tomar muchas formas; algunas cargas se aplican y suprimen de modo repentino (*cargas de impacto*), otras persisten largos periodos y varían continuamente de intensidad (*cargas fluctuantes*). La razón de la respuesta dinámica de una estructura a la respuesta estática (para la misma carga) se llama **factor de impacto** (FI) es decir que $FI = \delta \text{ deformación dinámica} / \delta \text{ deformación estática}$.

Este factor representa la cantidad que el alargamiento estático se amplifica como consecuencia de los efectos dinámicos del impacto. Según literatura técnica relacionada a la mecánica de materiales dicho factor es igual a 2.

3.0 Módulo de Poisson.

El módulo de Poisson, también llamado razón de Poisson o relación de Poisson, se denota mediante la letra griega ν (Nu) ó μ (Mu) y su nombre proviene en honor al matemático francés Simeón Denis Poisson (1781- 1840) hijo de un administrador de la ciudad de Pithiviers, su padre esperaba que se hiciera médico. Fue el alumno preferido de Laplace y a su salida de la Escuela, a los diecinueve años, se orientó hacia la enseñanza siendo suplente de Fourier. Denis Poisson realizó muchas contribuciones tanto en matemáticas como en mecánica y su nombre ha perdurado en diversos campos, además del módulo de Poisson, tenemos la ecuación de Poisson en ecuaciones diferenciales parciales y la distribución de Poisson en teoría de probabilidades.

El módulo de Poisson se define como la razón de la **deformación unitaria lateral** ϵ' a la **deformación unitaria axial** ϵ y se expresa según la siguiente ecuación:

$$\nu = \text{Deformación unitaria lateral} / \text{Deformación unitaria axial} = \epsilon' / \epsilon$$

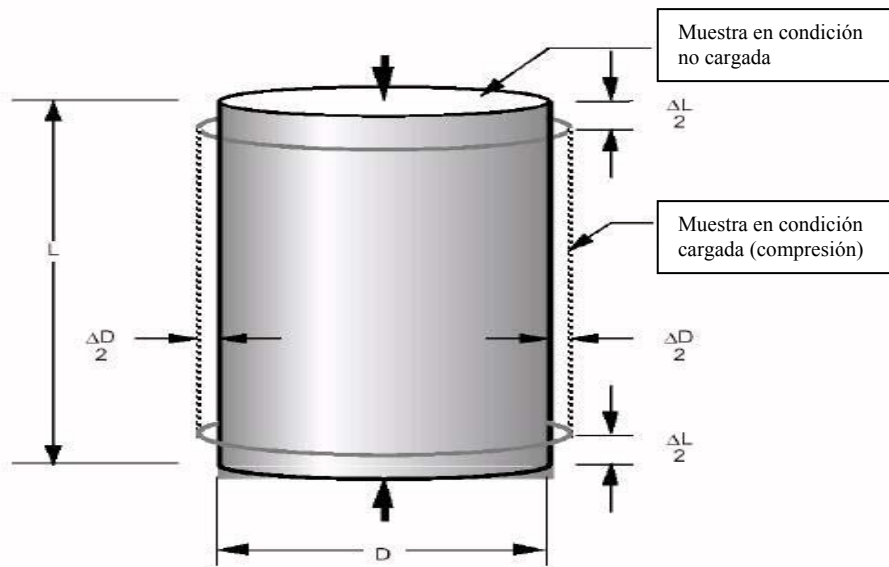


Figura No. 5. Muestra sometida a compresión

Fuente: WSDOT, Pavement Guide

La **deformación unitaria lateral** en cualquier punto de una barra es proporcional a la deformación unitaria axial en el mismo punto si el material es elástico lineal. Ahora bien, para que las deformaciones unitarias laterales sean las mismas en toda la barra, deben cumplirse condiciones adicionales.

Primero, la fuerza axial debe ser constante en toda la longitud de la barra, de manera que la deformación unitaria axial también sea constante.

Segundo, el material debe ser **homogéneo**, es decir, debe tener la misma composición (y, por lo tanto, las mismas propiedades elásticas) en cada punto, por lo tanto el esfuerzo y la deformación unitaria serán uniformes en toda la barra.

Es importante advertir que la homogeneidad de un material no asegura que las propiedades elásticas sean las mismas en toda dirección, (por ejemplo, el módulo de elasticidad podría ser diferente en las dirección axial y lateral); por consiguiente, una tercera condición para la uniformidad de las deformaciones unitarias laterales es que las propiedades elásticas sean las mismas en todas las direcciones *perpendiculares* al eje longitudinal. Los materiales isótropos u ortotrópicos satisfacen esta condición.

Cuando se cumplen las tres condiciones, las deformaciones unitarias laterales en una barra sometida a tensión uniforme, serán las mismas en cada punto de la barra y en todas las direcciones laterales.

Los materiales que tienen las mismas propiedades en **todas** las direcciones (axiales, laterales e intermedias) son llamados **isótropos**. Si las propiedades difieren en varias direcciones, el material es **anisótropo** (o **aeolotrópico**). Un caso especial de anisotropía ocurre cuando las propiedades en una dirección particular son las mismas en todo el material y las propiedades en todas las direcciones perpendiculares a esa dirección son las mismas, pero diferentes de las primeras propiedades; el material se clasifica entonces como **ortotrópico**. Los plásticos reforzados con fibras y el concreto reforzado con barras paralelas de acero son ejemplos de materiales compuestos que exhiben comportamiento ortotrópico.

Para la mayoría de los fines, se supone que el módulo de Poisson tiene el mismo valor en tensión y en compresión. Cuando las deformaciones unitarias en un material alcanzan valores grandes, la razón de Poisson cambia de valor; por ejemplo, en el caso de acero estructural la razón es de casi 0.5 cuando ocurre la fluencia plástica. **La razón de Poisson permanece constante sólo en el intervalo elástico lineal.** Desde un punto de vista más general, la razón de la deformación unitaria lateral a la deformación unitaria axial suele llamarse **razón de contracción**. Por supuesto, en el caso especial del comportamiento elástico lineal la razón de contracción es la misma que la razón de Poisson.

Debido a que las dimensiones de una barra en tensión o en compresión cambian cuando se aplica una carga, el volumen de la barra también se modifica. El cambio de volumen puede calcularse a partir de las deformaciones unitarias axiales y laterales de la manera siguiente: Consideremos un pequeño elemento de material **isotrópico** recortado de una barra en tensión (figura No. 6). La forma original del elemento (líneas punteadas) es un paralelepípedo con lados de longitud **a**, **b** y **c** en las direcciones **x**, **y** y **z**, respectivamente. El eje **x** se toma en la dirección longitudinal de la barra, que es la dirección de los esfuerzos normales σ producidos por las fuerzas axiales. La forma deformada del elemento se muestra con líneas sólidas.

El alargamiento del elemento en la dirección de la carga es $(a \epsilon)$, donde ϵ es la deformación unitaria axial. Las deformaciones laterales son $(-v \epsilon)$, es negativa debido a que el ancho de la barra decrece), las dimensiones laterales disminuyen en $(b v \epsilon)$ y $(c v \epsilon)$ en las direcciones **y** y **z**, respectivamente. Las dimensiones finales del elemento son $a(1 + \epsilon)$, $b(1 - v \epsilon)$ y $c(1 - v \epsilon)$; por lo tanto el volumen final es:

$$V_1 = abc(1 + \epsilon)(1 - v \epsilon)(1 - v \epsilon) = V_0(1 + \epsilon)(1 - v \epsilon)(1 - v \epsilon)$$

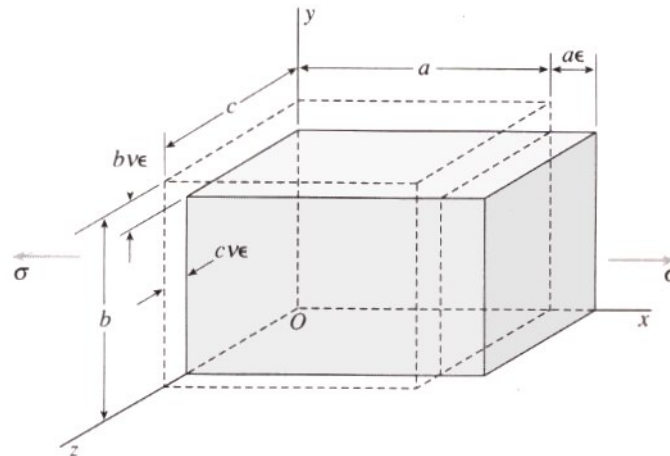


Figura No. 6. Cambio de forma de un elemento recortado de una barra en tensión.

En donde V_0 es el volumen original abc . Al desarrollar el producto en el lado derecho de la ecuación anterior, obtenemos términos que contienen el cuadrado y el cubo de la deformación unitaria axial ϵ . En casos en que ϵ es muy pequeña en comparación con la unidad, su cuadrado y cubo son despreciables en comparación con la ϵ y la expresión puede simplificarse. El volumen final es entonces: $V_1 = V_0(1 + \epsilon - 2\nu\epsilon)$ y el cambio de volumen es: $\Delta V = V_1 - V_0 = V_0\epsilon(1 - 2\nu)$

El cambio de volumen unitario e se define como el cambio en el volumen dividido entre el volumen original, $e = \Delta V / V_0 = \epsilon(1 - 2\nu) = \sigma / E(1 - 2\nu)$. La cantidad e se conoce también como expansión.

De la ecuación para la expansión se puede observar que el **valor máximo posible del módulo de Poisson para materiales ordinarios es de 0.5**, porque cualquier valor mayor significa que la expansión e resulta negativa y que el volumen decrece cuando el material está en tensión lo que físicamente parece improbable.

Denis Poisson con base en su teoría sobre el comportamiento de los materiales, calculó la deformación lateral de una barra en tensión y halló que era la cuarta parte de la deformación longitudinal. Para materiales isótropos, Poisson encontró que el valor de módulo de Poisson es igual a 0.25. Ciertos cálculos más recientes basados en mejores modelos de la estructura atómica muestran valores de dicho modulo igual a 0.33. Ambos valores son cercanos a los valores medidos, que varían entre 0.25 y 0.35 para la mayoría de los metales y muchos otros materiales. Los materiales con un valor extremadamente bajo de la razón de Poisson incluyen al corcho, para el cual dicho valor casi es cero. **Un límite teórico superior para el módulo de Poisson es de 0.5**, y el hule se acerca a este valor límite.

A pesar que la realidad de los diferentes materiales muestra un comportamiento complejo en su relación esfuerzo deformación, principalmente en los suelos y rocas, la ley de Hook es una muy buena simplificación para el caso de deformaciones muy pequeñas.

La siguiente ecuación relaciona los módulos de elasticidad en tensión **E**, cortante **G** y el módulo de Poisson **v**, la cual es muy utilizada en el campo de la mecánica de materiales.

$$G = E / 2(1+v)$$

Esta relación, muestra que E, G y v no son propiedades elásticas independientes del material.

Dado que el valor del módulo de Poisson para materiales ordinarios varía entre cero y un medio, vemos que G debe variar entre un tercio y un medio de E.

4.0 Módulo de Poisson de materiales comúnmente utilizados en la construcción de obras viales.

A continuación se exponen aspectos importantes relacionados con la obtención y el comportamiento del módulo de Poisson para los principales materiales utilizados en la construcción de obras viales tales como: Concreto Hidráulico, Concreto Asfáltico o Mezcla Asfáltica y Suelos.

4.1 Concreto Hidráulico.

El Concreto Hidráulico es uno de los principales materiales utilizados en elementos estructurales y cuyas propiedades mecánicas han sido estudiadas ampliamente.

El Concreto Hidráulico no se comporta totalmente como un material elástico lineal, la línea que representa la relación entre esfuerzos y deformaciones en el diagrama esfuerzo – deformación, sólo exhibe un reducido tramo inicial de proporcionalidad, al comenzar la aplicación de la carga, y después se manifiesta como una curva debido a que las deformaciones aumentan progresivamente en mayor proporción que los esfuerzos. Para explicar el comportamiento del concreto endurecido en este aspecto, es frecuente considerarlo como un material consistente de dos fases, es decir, un conjunto de partículas duras y resistentes (los agregados) dispersos en una matriz relativamente más débil (la pasta de cemento hidratada), y que la respuesta del conjunto (el concreto) a la aplicación de esfuerzos deriva de lo que ocurre en la región del contacto entre ambas fases. En apoyo de esta consideración, en la figura No. 7, se indican las formas que comúnmente presentan las gráficas esfuerzo deformación unitaria, determinadas individualmente para agregados de buena calidad, la pasta de cemento hidratado y el concreto que los contiene.

Con base en dicha gráfica, los agregados presentan prácticamente una línea recta hasta el punto de ruptura y la que corresponde a la pasta también lo es, hasta un nivel aproximado de 90 a 95 por ciento de su esfuerzo de ruptura, y ambos componentes exhiben una falla de tipo frágil; no obstante a ello, la unión de estos materiales para construir el concreto, conduce a un material compuesto cuya gráfica es una línea curva casi desde el principio, y que en la falla se manifiesta menos frágil.

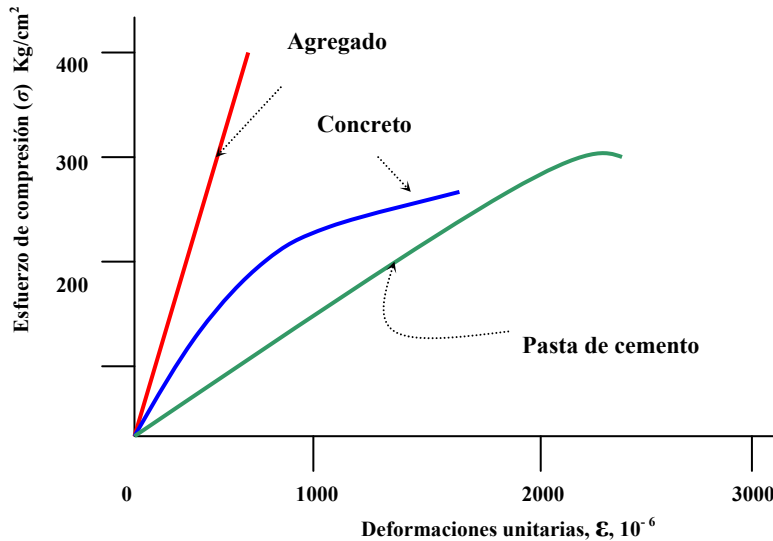


Figura No. 7. Gráficas esfuerzos - deformación de los agregados, la pasta de cemento y el concreto, determinadas individualmente

Fuente: Manual de Tecnología del concreto Sección 3, Comisión Federal de Electricidad

Como ya hemos mencionado en los materiales elásticos cuya gráfica esfuerzo – deformación unitaria es una línea recta, el Módulo de Elasticidad define la relación de proporcionalidad que existe entre ambas variables, es decir, se identifica con la pendiente de esa recta que pasa por el origen. Debido a la forma como se manifiesta la relación entre los esfuerzos y las deformaciones en el concreto, no es posible asignarle estrictamente hablando, una pendiente (Módulo de Elasticidad); sin embargo para materiales así, cuya gráfica es una curva, suelen considerarse otras variantes del módulo de elasticidad, que pueden referirse a la pendiente de la recta tangente a la curva en el origen o en otro sitio, de la secante entre el origen y otro punto, o de la cuerda entre dos puntos sobre la curva.

En el método de prueba ASTM C 469 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, se define el procedimiento para determinar el Módulo de Elasticidad estático y el Módulo de Poisson a compresión del concreto, ensayando especímenes cilíndricos elaborados normalmente conforme a los métodos ASTM C 192 y C 31 y también núcleos extraídos de la estructura conforme al método ASTM C 42.

El criterio que se aplica, según lo indicado en la figura No. 8, consiste básicamente en definir dos puntos (A y B) sobre la curva esfuerzo-deformación unitaria del concreto ensayado, a fin de calcular la pendiente de la cuerda AB definida. Las coordenadas del punto A, son: una abscisa fija (ϵ_A) igual a una deformación unitaria de 50 millonésimas, y una ordenada (σ_A) determinada a partir de esa deformación; las coordenadas del punto B son: una ordenada fija (σ_B) igual a un esfuerzo equivalente al 40 por ciento del esfuerzo de ruptura del concreto que se ensaya; y una abscisa (ϵ_B) determinada a partir de ese esfuerzo. Una vez conocidas estas coordenadas, el módulo de Elasticidad se determina calculando la tangente del ángulo que la cuerda AB forma con el eje horizontal.

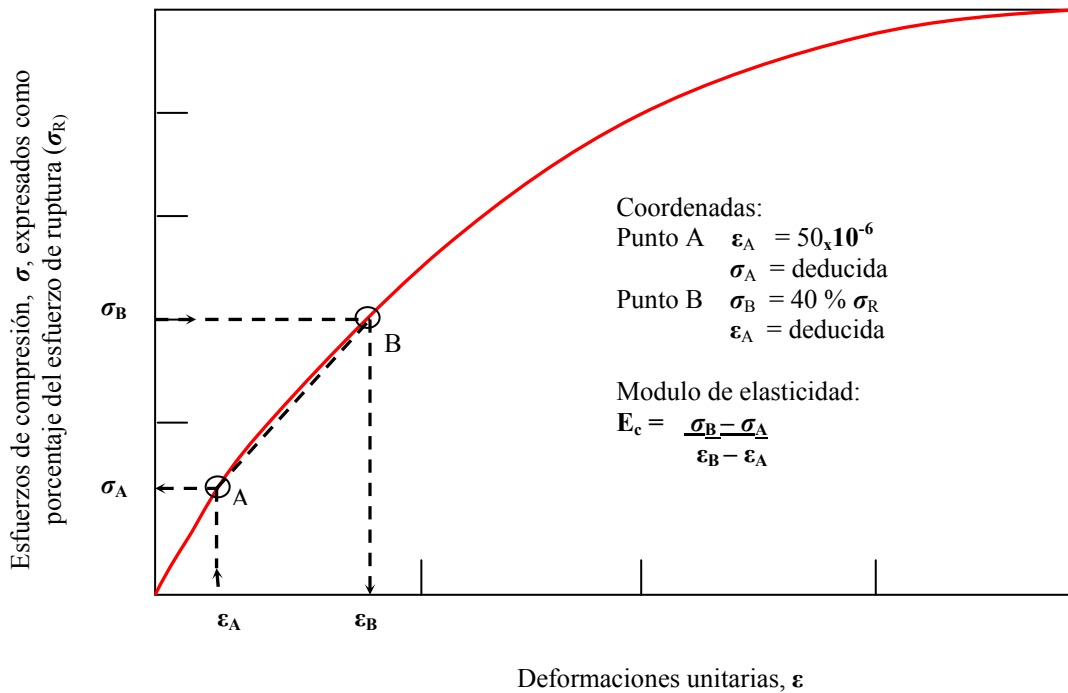


Figura No. 8. Criterio para definir el Módulo de Elasticidad Estático a compresión del concreto hidráulico (ASTM C 469).

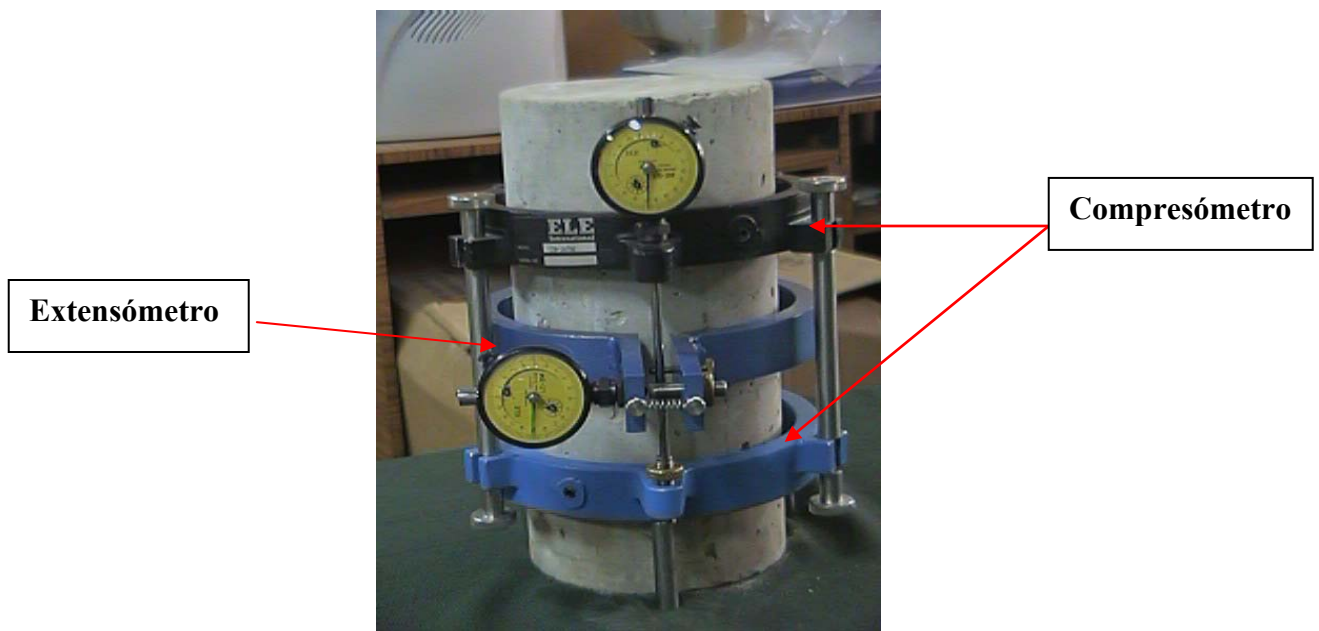
Cuando un espécimen cilíndrico de concreto se somete a una carga axial que produce una distribución uniforme de esfuerzos de compresión en la sección transversal, se deforma de la manera que se representó esquemáticamente en la figura No. 5, según se manifiestan simultáneamente deformaciones longitudinales y transversales. En términos generales ambas deformaciones siguen tendencias similares cuando se les relaciona con los esfuerzos correspondientes, es decir, presentan un intervalo inicial relativamente elástico en un nivel de esfuerzos inferior al 30 ó 40 por ciento del esfuerzo de ruptura, y después se incrementa a mayor velocidad que los esfuerzos hasta alcanzar la falla del espécimen.

La proporción en la que el espécimen se deforma transversalmente con respecto a lo que se deforma longitudinalmente se definió como Módulo o Relación de Poisson y, aunque esta relación no se conserva constante dentro del intervalo seudoelástico puede dársele el mismo tratamiento que al Módulo de Elasticidad, es decir, se le puede considerar un valor medio representativo dentro de dicho intervalo. De esta manera, en los ensayos conducidos conforme al método de prueba ASTM C-469, la Relación de Poisson se calcula a partir de las deformaciones transversales medidas a la mitad de la altura del espécimen, según la expresión que se muestra a continuación.

$$\mu = \frac{\epsilon_{tB} - \epsilon_{tA}}{\epsilon_B - \epsilon_A}$$

En la cual ϵ_{tB} es la deformación transversal producida por un esfuerzo equivalente al 40% del esfuerzo de ruptura, y ϵ_{tA} es la deformación transversal que se manifiesta con el esfuerzo que produce una deformación longitudinal de 50 millonésimas (ver figura No. 8).

Dentro de los aparatos mencionados en la citada norma para llevar a cabo la medición de las deformaciones longitudinales y transversales tenemos: Compresómetro, el cual debe tener suficiente precisión para medir la primera lectura de 5 millonésimas en deformación unitaria como parte del promedio de la deformación de dos marcas diametralmente opuestas. Extensómetro, el cual debe ser capaz de medir con una aproximación de 25×10^{-6} pulg (0.635×10^{-6} mm), el cambio de diámetro de la probeta a media altura del espécimen.



**Figura No. 9. Compresómetro y Extensómetro
para la determinación del Módulo de Poisson**

De manera global suele considerarse que el módulo de Poisson del concreto hidráulico (μ) puede oscilar entre 0.11 y 0.27, aproximadamente, y que para los concretos de peso normal su intervalo más frecuente es entre 0.15 y 0.20. Sin embargo, estos son valores de carácter general que pueden requerir ser confirmados en casos específicos donde esta propiedad del concreto requiera ser considerada con más precisión, o bien cuando exista duda acerca del comportamiento de los agregados en este aspecto.

La influencia de los agregados en el módulo de Poisson del concreto es muy significativa, tanto por lo que se refiere a las características intrínsecas de las rocas que los constituyen, como por la proporción que representan en la mezcla. En cuanto a la influencia de la proporción de agregados en la mezcla, en la figura No. 9, se indica la manera como tiende a reducirse el módulo de Poisson a medida que aumenta el contenido unitario de agregados en el concreto, cuando éstos son de buena calidad. Es decir, conforme aumenta la proporción de agregados (y se reduce la pasta) el concreto resulta menos deformable, y este es un medio que puede utilizarse cuando se requiere incrementar el módulo de Elasticidad y reducir el módulo de Poisson del concreto.

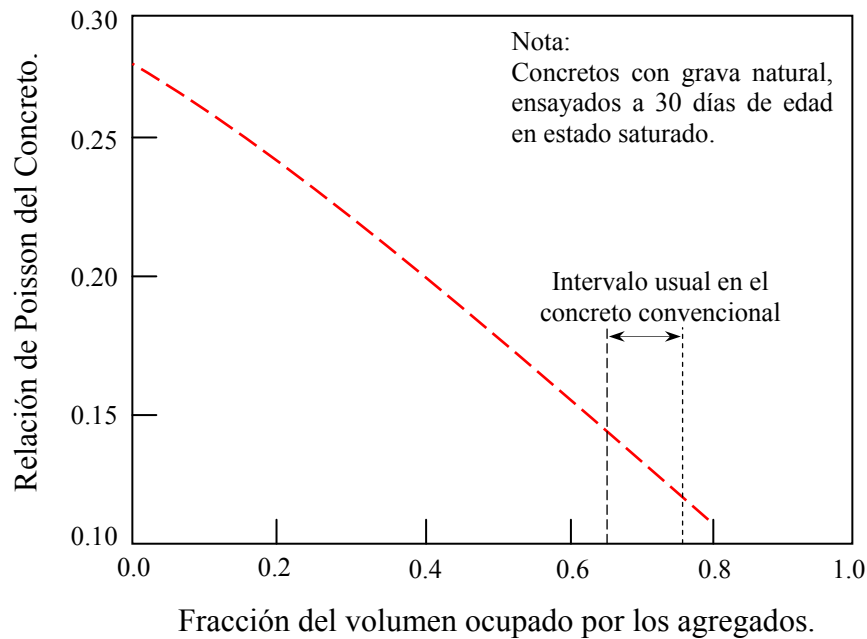


Figura No. 9. Influencia del contenido unitario de agregados en la Relación de Poisson del concreto.

Fuente: Manual de Tecnología del concreto Sección 3, Comisión Federal de Electricidad

En lo que respecta a la influencia del grado de resistencia del concreto sobre el módulo de Poisson, no parece haber una tendencia definida; y así, por ejemplo, en el informe ACI 363 se indica que en el intervalo elástico, el módulo de Poisson de los concretos de alta resistencia es comparable a los concretos de baja resistencia, es decir, no hay una variación importante en el módulo de Poisson del concreto por el sólo efecto de su cambio de resistencia.

Con base en lo establecido en la publicación del ACI Materials Journal titulado Elastic Modulus Poisson's Ratio and Compressive Strength Relationship at Early Ages, sobre investigaciones experimentales que relacionan el Módulo de Elasticidad, el Módulo de Poisson y el esfuerzo compresivo a edades tempranas, se comenta lo siguiente:

Uno de los objetivos planteados de dicha investigación era determinar la relación entre el módulo de Poisson y esfuerzos compresivos a edades tempranas, para lo cual se realizaron cuatro diferentes mezclas de concreto, cuya relación agua cemento a/c fueron 0.388, 0.763, 0.534 y 0.329. La resistencia a compresión a 28 días de las mezclas de concreto usadas vario en el rango de 4000 psi a 9000 psi. Se fabricaron especímenes de dimensiones estándar 6 x 12 pulgadas y se sometieron a los procesos de curado respectivos de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C 192. Los especímenes fueron probados a edades de 6 horas, 12 horas y 1, 2, 3, 7, y 28 días, realizándose las mediciones del módulo de elasticidad y módulo de Poisson.

De la investigación anterior se encontró que el módulo de Poisson, es muy insensible a la edad (mantiene su valor) y a la riqueza de las mezclas de concreto y no cambia apreciablemente con el desarrollo de los esfuerzos compresivos.

Es importante destacar que se cuenta con otros ensayos para la obtención del módulo de Poisson para el concreto hidráulico, entre los cuales se puede mencionar el siguiente:

ASTM C 597 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, método de prueba estándar por velocidad de pulso a través del concreto.

Para la obtención del modulo de Poisson a través de este ensayo de utiliza la siguiente expresión:

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

Donde:

V = Velocidad de pulso a través del concreto

E = Módulo de Elasticidad dinámico

μ = Módulo de Poisson dinámico

ρ = Densidad del concreto

4.2 Concreto Asfáltico o Mezcla Asfáltica.

El Concreto Asfáltico es uno de los materiales de mayor uso en las obras de infraestructura vial, constituyendo la capa de rodadura de la mayoría de carreteras. A pesar de su amplio uso, las propiedades en cuanto a su deformación ante cargas aplicadas aún se consideran complejas, ya que para dicho material se involucran muchas variables tanto internas (propiedades del asfalto y de los agregados) como externas (cargas originadas por el tráfico y condiciones ambientales) las cuales afectan su comportamiento.

La rigidez de las mezclas asfálticas es un dato muy importante en los modelos mecánicos para predecir su desempeño como elemento en un pavimento. La guía de diseño de pavimentos AASHTO 2002, considera el valor del módulo de Poisson como un parámetro importante para predecir los esfuerzos y deformaciones en el pavimento. Comúnmente el módulo de Poisson para mezclas asfálticas ha sido estimado, basado en las características de los materiales que la componen, así como en las de la propia mezcla y por la temperatura de la misma. Un valor comúnmente utilizado de módulo de Poisson para la mezcla asfáltica es de 0.35. En la tabla 5.7 del numeral 5 de este documento se muestran valores típicos para mezcla asfáltica.

Para mezclas asfálticas de graduación densa la guía AASHTO 2002 establece una ecuación para el módulo de Poisson en función del modulo dinámico de la mezcla asfáltica.

$$\mu = 0.15 + \frac{0.35}{1 + e^{(a+b \log E^*)}}$$

Donde.

μ = Modulo de Poisson

a y b = Constante definidas -1.63 y 3.84×10^{-6} respectivamente

E^* = Modulo dinámico, psi

La obtención del modulo dinámico E^* puede realizarse a través del método de prueba ASTM D 3497 Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures.

Otro método de prueba que puede utilizarse para obtener el valor del módulo de Poisson para mezclas asfálticas es la prueba de tensión indirecta para obtener el módulo de resiliencia de la mezcla asfáltica regido según la norma ASTM D 4123 Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures. Donde se establece la siguiente ecuación.

$$VRI = 3.59 \Delta H_i / \Delta V_i - 0.27$$

Donde:

VRI = Módulo de Poisson

Δh_i = Deformación horizontal recuperable

ΔV_i = Deformación vertical recuperable

4.3 Suelos.

El comportamiento de los suelos en cuanto a esfuerzos y deformaciones es muy variable, debido a sus características de heterogeneidad, el grado de unión de sus partículas, condiciones de humedad entre otros. Sin embargo a fin de simplificar su comportamiento se ha recurrido a teorías comúnmente utilizadas para materiales homogéneos e isotrópicos. Aun no esta definido un procedimiento estándar para la determinación del módulo de Poisson de los suelos de manera directa, recurriéndose a la obtención de dicho parámetro por métodos indirectos. Un método indirecto muy utilizado para suelos y rocas es el ensayo de refracción sísmica donde se relacionan las velocidades de la onda de compresión V_p y de corte V_s .

$$\text{Módulo de Poisson } \nu = \frac{1}{2} (V_p/V_s)^2 - 1 / ((V_p/V_s)^2 - 1)$$

Donde:

V_p = Velocidad de la onda de compresión P

V_s = Velocidad de la onda de corte S

Valores típicos de modulo de Poisson para suelos se presentan en la tabla 5.2.

5.0 Valores Típicos de módulo de Poisson para diferentes materiales.

A continuación se presentan valores típicos del módulo de Poisson, y en algunos casos el módulo de elasticidad para diferentes materiales.

Tabla 5.1. Valores típicos para metales y otros.

Material	Módulo de elasticidad (E)	Módulo cortante o rigidez (G)	Módulo de Poisson
	Ksi	Ksi	ν
Aluminio	10000-11400	3800-4300	0.33
Latón	14000-16000	5200-6000	0.34
Bronce	14000-17000	5200-6300	0.34
Hierro fundido	12000-25000	4600-10000	0.2-0.3
Cobre	16000-18000	5800-6800	0.33-0.36
Aleaciones de Magnesio	6000-6500	2200-2400	0.35
Monel	25000	9500	0.32
Niquel	30000	11400	0.31
Acero	28000-30000	10800-11800	0.27-0.3
Aleaciones de Titanio	15000-17000	5600-6400	0.33
Tungsteno	50000-55000	21000-23000	0.2
Hule	0.1-0.6	0.03-0.2	0.45-0.5
Vidrio	7000-12000	2700-5100	0.17-0.27
Naylon	300-500		0.4
Polietileno	100-200		0.4

Fuente: Adaptado de Mecánica de Materiales Gere y Timoshenko

Tabla 5.2. Valores típicos para Suelos.

Material	Módulo de elasticidad E (MPa)	Módulo de Poisson ν
Arena suelta	10.5 - 24.0	0.20 - 0.40
Arena media	17.0 - 27.0	0.25 - 0.40
Arena densa	34.5 - 55.0	0.30 - 0.45
Arena muy densa	> 60.0	0.30 - 0.45
Limo arenoso	10.5 - 17.5	0.20 - 0.40
Arena y Grava	69.0 - 175.0	0.15 - 0.35
Arcilla blanda	2.0 - 5.0	-
Arcilla media	5.0 - 10.0	0.20 - 0.50
Arcilla rígida	10.0 - 24.0	-

Fuente: Universidad Alfonso x El Sabio (España) www.uax.es

Material	Rango Módulo de Poisson	Módulo de Poisson ν
Arcilla (saturada)	0.4 – 0.5	0.45
Arcilla (no saturada)	0.1 – 0.3	0.2
Arcilla arenosa	0.2 – 0.3	0.25
Limo	0.3 – 0.35	0.325
Arena densa	0.2 – 0.4	0.3
Arena de gradación gruesa	0.15	0.15
Arena de gradación fina	0.25	0.25
Cama de roca	0.1 – 0.4	0.25

Fuente: Guía AASHTO 2002

Tabla 5.3. Valores típicos para Rocas.

Roca Intacta	Módulo de elasticidad Estático, E Kg/cm ² (x 10 ⁵) (1)	Módulo de elasticidad Dinámico, Ed Kg/cm ² (x 10 ⁵)	Módulo de Poisson, ν (1)
Andesita	3.0-4.0		0.23-0.32
Anfibolita	1.3-9.2	4.6-10.5	
Anhidrita	0.15-7.6		
Arenisca	0.3-6.1	0.5-5.6	0.1-0.4 (0.24-0.31)
Basalto	3.2-10	4.1-8.7	0.19-0.38 (0.25)
Caliza	1.5-9.0 (2.9-6.0)		0.2-0.33 (0.25-0.30)
Cuarcita	2.2-10 (4.2-8.5)		0.08-0.24 (0.11-0.15)
Diabasa	6.9-9.6	6.0-9.8	0.28
Diorita	0.2-1.7	2.5-4.4	
Dolomía	0.4-5.1	2.2-8.6	0.29-0.34
Gabro	1-6.5		0.12-0.20
Gneiss	1.7-8.1 (5.3-5.5)		0.08-0.40 (0.20-0.30)
Esquisto	0.6-3.9 (2.0)		0.01-0.31 (0.12)
Granito	1.7-7.7	1.0-8.4	0.1-0.4 (0.18-0.24)
Grauvaca	4.7-6.3	2.3-10.7	
Limolita	5.3-7.5	0.7-6.5	0.25
Lutita	0.3-2.2	1.0-7.0	0.25-0.29
Marga	0.4-3.4	1.0-4.9	
Mármol	2.8-7.2		0.1-0.4 (0.23)
Micaesquisto	0.1-2.0		
Pizarra	0.5-3.0		
Sal	0.5-2.0		0.22
Toba	0.3-7.6		0.24-0.29
Yeso	1.5-3.6		

(1)Valores mínimos y máximos. Rango mayormente utilizado o valores medios entre paréntesis.

Datos seleccionados a partir de Rahn (1986), Jonson y De Graff (1988), Goodman (1989), Walthan (1999), Duncan (1999)

Fuente: Luis I.Gonzáles de Vallejo

Las siguientes tablas muestran valores típicos para materiales utilizados en estructuras de pavimentos.

Tabla 5.4 Módulos de Poisson recomendados para materiales tratados químicamente.

Material	Módulo de Poisson
Agregados estabilizados con cemento	0.10 – 0.20
Suelo Cemento	0.15 – 0.35
Materiales cal y cenizas volantes (fly ash)	0.10 – 0.15
Suelos estabilizados con cal	0.15 – 0.20

Fuente: Guía AASHTO 2002

Tabla 5.5 Valores típicos para materiales de subbase y base.

Material	Min.y Max. Módulo E, Ksi		Valor típico Módulo E, Ksi	Módulo Poisson
	Mínimo	Máximo		v
Sub base Granular	5	30	20	0.20 - 0.40
Base Granular	5	50	30	0.20 - 0.40

Fuente: Department of Civil Engineering National Center for Asphalt Technology Auburn University for The Asphalt Pavement Alliance

Tabla 5.6 Valores típicos para concreto hidráulico.

Material	Min.y Max. Módulo E, Ksi		Valor típico Módulo E, Ksi	Módulo Poisson
	Mínimo	Máximo		v
Concreto Hidráulico ¹	-	-	-	0.15 - 0.20*
Concreto agrietado ²	200	800	500	0.20
Concreto fracturado ²	250	2000	1200	0.20

Fuente 1: Washington State Department of Transportation

*Determinación dinámica podría aproximarse a 0.25 para Concreto Hidráulico (Neville, 1975)

Fuente 2: Department of Civil Engineering National Center for Asphalt Technology Auburn University for The Asphalt Pavement Alliance

Tabla 5.7 Valores típicos para Mezcla Asfáltica.

Temperatura de la Mezcla Asfáltica	Módulo de Poisson
< 0 ° F (-18 ° C)	0.15
0 ° F (- 18 ° C) – 40 ° F (4 ° C)	0.15 – 0.20
40 ° F (4 ° C) – 70 ° F (21 ° C)	0.20 – 0.30
70 ° F (21 ° C) – 100 ° F (38 ° C)	0.30 – 0.40
100 ° F (38 ° C) – 130 ° F (54 ° C)	0.40 – 0.48
> 130 ° F (54 ° C)	0.45 – 0.48

Fuente: Guía AASHTO 2002

6.0 Aplicaciones del módulo de Poisson en pavimentos.

Como ejemplos para ilustrar la aplicación del módulo de Poisson en pavimentos, se hará la evaluación de un pavimento rígido recién construido a través del método de retrocálculo, según lo establecido en la guía AASHTO 1993 y se analizará el diseño de un pavimento rígido según lo establecido en la guía AASHTO 1998. Para llevar a cabo los análisis correspondientes, uno de los parámetros considerados por la guía AASHTO 1993 y 1998, así como la guía AASHTO 2002 (aun se encuentra en la etapa de revisión), es el valor de módulo de Poisson del concreto hidráulico, ya que es utilizado como dato de entrada para la evaluación estructural. Generalmente este parámetro es definido por el calculista en función de su experiencia, utilizándose valores entre 0.1 y 0.2. Estos ejemplos se realizan con el objeto de verificar la incidencia del módulo de Poisson en el cálculo del espesor de la losa de concreto.

6.1 Evaluación estructural a través del método de retrocálculo (Ensayos no destructivos).

Se llevó a cabo la evaluación de la capacidad estructural de un pavimento de concreto hidráulico existente, utilizando el equipo Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD). Dicha evaluación se realizó con base en lo establecido en la especificación ASTM D 4694 “Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device”, la Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento AASHTO 1993 y el Manual for FWD Testing in the Long-Term Pavement Performance Program (SHRP-P-661).

La capacidad estructural fue determinada a partir de lo establecido en la Guía para Diseño AASHTO 1993, Parte III, sección 5.6., así como de los resultados obtenidos con el FWD y tomando en cuenta las consideraciones de diseño del pavimento evaluado (ver tabla 6.1).

Las propiedades de la estructura del pavimento determinadas a partir de las respuestas obtenidas del FWD, se encuentran:

- Módulo de reacción efectivo bajo la losa K_{eff} (pci) (191.6 pci)
- Módulo de elasticidad del concreto E_{PCC} (psi) (Varía en función del módulo de Poisson).
- Módulo de ruptura del concreto $S'c$ (psi) (Varía en función del módulo de Poisson).

Tabla 6.1. Parámetros considerados en el diseño del pavimento


Descripción	Valor
Ejes equivalentes (ESAL's)	14,382,090
Índice de Serviciabilidad inicial	4.5
Índice de Serviciabilidad final	2.5
Coefficiente de Drenaje, Cd	1.10
Coefficiente de transferencia de carga, J	2.7
Confiability	90%
Desviación Estándar	0.35
Espeor de pavimento total (pavimento antiguo + sobre capa de concreto de 5 pulg.)	12.49 pulg. (31.7 cm)

Es importante indicar que en el proceso de cálculo, el módulo de elasticidad y de ruptura del concreto hidráulico, dependen del valor de módulo de Poisson asignado. Tomando en consideración los resultados obtenidos del módulo de elasticidad y de ruptura del concreto hidráulico, y los parámetros de diseño considerados, se llevó a cabo el cálculo correspondiente del espeor de losa de concreto requerido, utilizando el programa PAVEMENT ANALYSIS SOFTWARE (PAS 5), el cual esta basado en la metodología AASHTO-1993.

El resultado del espeor de losa requerido, en función del módulo de Poisson, que conlleva la variación del módulo de elasticidad y módulo de ruptura del concreto, se presenta en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Espeor de la losa calculado a través del software PAS 5.

Módulo de Poisson	Módulo de elasticidad retrocalculado del concreto psi (Mpa)	Módulo de ruptura retrocalculado del concreto psi (kg/cm ²)	Espeor de losa pulg (cm)
0.05	4.07 x10 ⁶ (28061.06)	665.71 (46.80)	8.97 (22.78)
0.10	4.04 x10 ⁶ (27854.82)	664.38 (46.71)	8.98 (22.80)
0.15	3.99 x10 ⁶ (27510.08)	662.16 (46.55)	8.99 (22.83)
0.20	3.92 x10 ⁶ (27027.45)	659.05 (46.34)	9.00 (22.86)
0.25	3.83 x10 ⁶ (26406.92)	655.05 (46.05)	9.02 (22.91)
0.30	3.72 x10 ⁶ (25648.50)	650.77 (45.75)	9.03 (22.94)

 Rango de valores de módulo de Poisson usuales para el concreto.

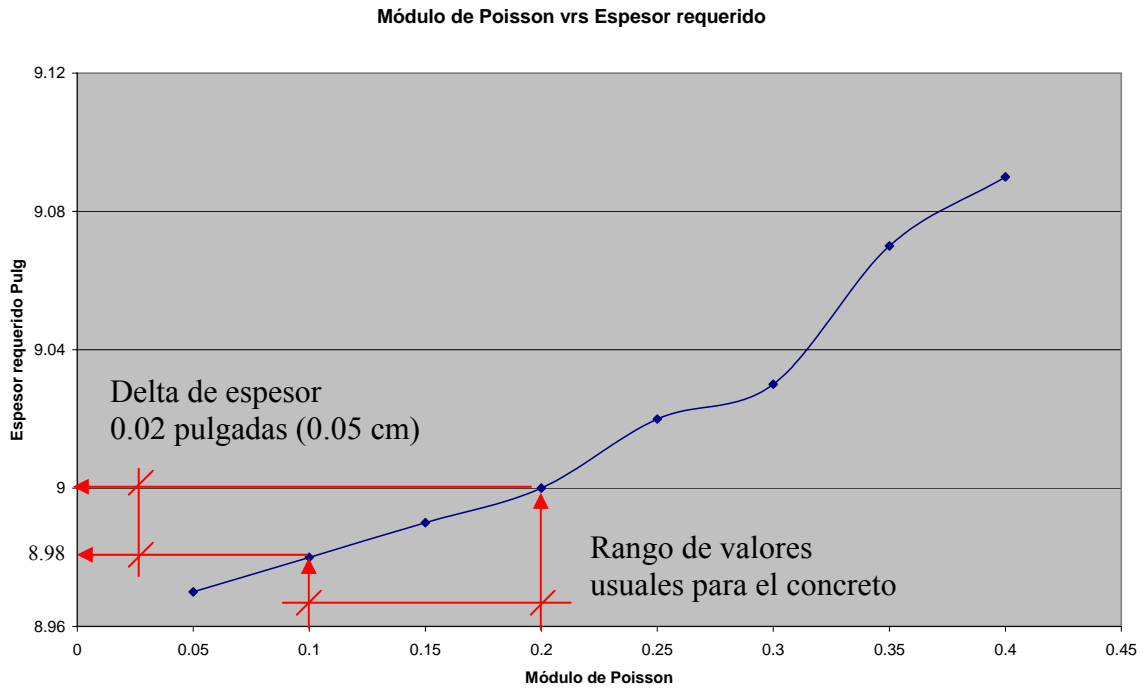


Figura No. 12. Relación módulo de Poisson y el espesor de losa de concreto requerido, AASHTO 1993

Con base en los resultados mostrados en la Tabla 6.2 se puede observar que el módulo de elasticidad del concreto es inversamente proporcional al módulo de Poisson. Es decir que con un aumento en el valor del módulo de Poisson, se experimenta una reducción en el módulo de elasticidad del concreto. Igual comportamiento se observa con el módulo de ruptura del concreto. Además, el espesor de losa de concreto requerido es ligeramente afectado por cambios en el módulo de Poisson. Considerando el rango de valores frecuentemente utilizado de módulo de Poisson (0.1 – 0.2) en pavimentos de concreto y tomando en cuenta el espesor de losa respectivo para los valores extremos (8.98 – 9.00, de tabla 6.2), se obtiene un diferencia en el espesor de losa de concreto del orden de 0.02 pulgadas (0.05 cm), lo cual se considera que no incide significativamente en la capacidad estructural del pavimento.

6.2 Diseño de una estructura de pavimento rígido según lo establecido en la guía suplementaria de diseño AASHTO 1998.

Se desarrolló un ejercicio relacionado con el diseño de estructuras de pavimento de concreto hidráulico con juntas simples con dispositivos de transferencia de carga (dovelas), tomando como base lo establecido en la guía suplementaria de diseño AASHTO 1998, en la cual se involucra el módulo de Poisson como uno de los datos de entrada para el diseño. Para dicho análisis se utilizó el programa RIGID PAVEMENT DESIGN (RPD) el cual esta basado en la metodología AASHTO-1998.

Los parámetros de diseño considerados se muestran en la tabla 6.3, cuyos datos corresponden a parámetros razonablemente representativos de las condiciones aplicables en El Salvador.


El análisis fue desarrollado variando únicamente el valor de módulo de Poisson, verificándose la incidencia del mismo en el cálculo del espesor de losa de concreto requerido, cuyos resultados se muestran en la tabla 6.4.

Tabla 6.3 Parámetros de diseño considerados según AASHTO 1998

Descripción	Valor
ESAL, W18	14,000,000
Nivel de confiabilidad, R (%)	90
Desviación estándar, S_o	0.35
Serviciabilidad inicial, P1	4.5
Serviciabilidad final, P2	2.5
K- Value efectivo (psi/pulgada)	300
Módulo de ruptura del concreto, S^c (psi)	640
Módulo de elasticidad del concreto, E_c (psi)	4.0×10^6
Relación de Poisson's del concreto, μ	Variable
Espaciamiento de juntas, L, (pies)	16
Módulo de elasticidad de la base, E_b (psi)	1.0×10^6
Coefficiente de fricción losa/base, f	34
Espesor de la base, H_b , (pulgadas)	6
Temperatura promedio anual, TEMP, (°F)	75.2
Velocidad del viento media anual, WIND, (mph)	5
Precipitación de lluvia media anual, PRECIP, (pulgadas)	68
Factor de soporte lateral	0.94

Tabla 6.4 Variación del espesor de la losa de concreto calculado a través del software RPD.

Módulo de Poisson	Espesor requerido pulg (cm)
0.05	11.29 (28.68)
0.10	11.32 (28.75)
0.15	11.38 (28.90)
0.20	11.45 (29.08)
0.25	11.54 (29.31)
0.30	11.64 (29.56)
0.35	11.76 (29.87)

 Rango de valores de módulo de Poisson usuales para el concreto.

Módulo de Poisson vrs Espesor requerido

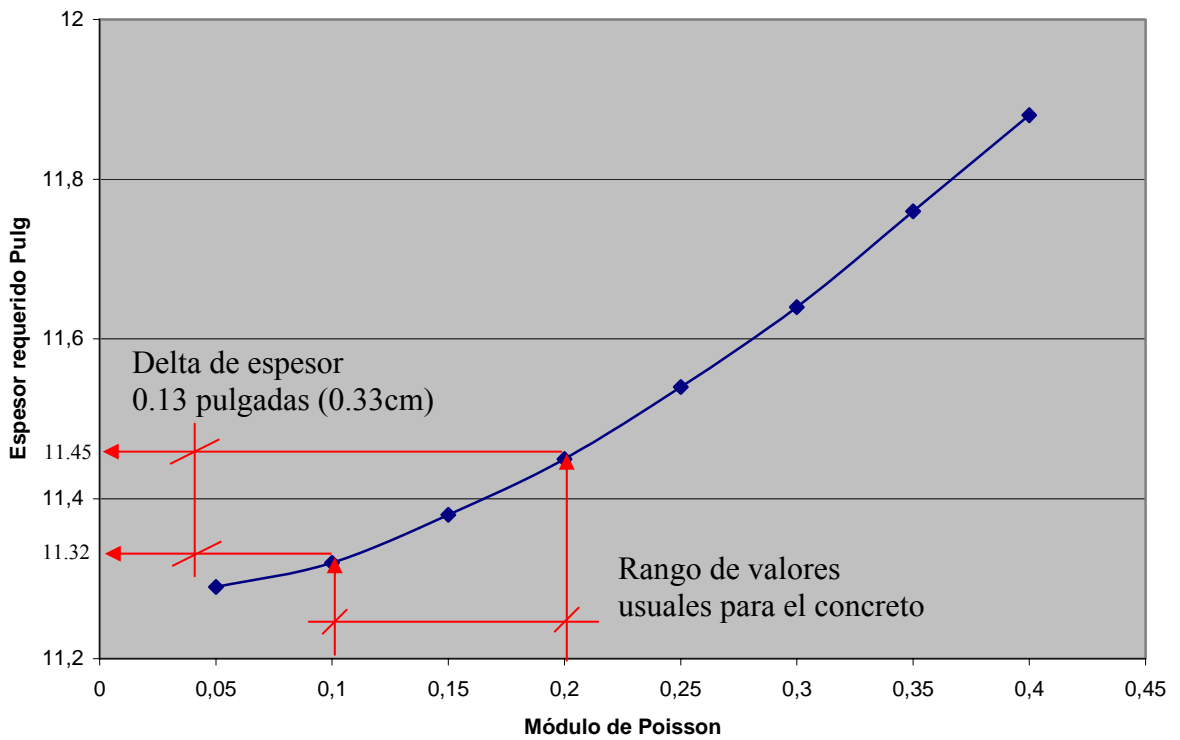


Figura No. 13. Relación módulo de Poisson y el espesor de losa de concreto requerido, AASHTO 1998

Con base en los resultados mostrados en la Tabla 6.4 se puede observar que el espesor de losa de concreto es directamente proporcional al módulo de Poisson. Es decir que con un aumento en el valor del módulo de Poisson, se experimenta un aumento en el espesor de losa de concreto.

Considerando el rango de valores frecuentemente utilizados de módulo de Poisson (0.1 – 0.2) en pavimentos de concreto y tomando en cuenta el espesor de losa respectivo para los valores extremos (11.32 – 11.45, de tabla 6.4), se obtiene una diferencia en el espesor de losa de concreto del orden de 0.13 pulgadas (0.33 cm) lo cual es equivalente aproximadamente al 10 % de los ejes equivalentes (ESAL) previstos, lo cual corresponde a un tiempo de aproximadamente 3 años.

7.0 Conclusiones.

- En general el módulo de Poisson es un parámetro indicativo de la capacidad de deformación o de la rigidez de un material, por lo que es de mucha utilidad para el cálculo de deformaciones de diferentes cuerpos. Tomando en cuenta que dicho módulo es muy bien definido para pequeñas deformaciones lineales en el comportamiento elástico.
- El módulo de elasticidad y por consiguiente la rigidez es inversamente proporcional al módulo de Poisson, lo que indica que un valor alto de módulo de Poisson (0.4 – 0.5) indica que estamos en presencia de un material flexible y un valor bajo de dicho módulo (0.1-0.2) indica un material rígido, como es el caso del concreto.
- Para el caso de evaluación de pavimentos rígidos por medio de retrocálculo, y para el diseño de pavimentos rígidos utilizando la guía suplementaria de diseño AASHTO 1998 se observa que la variación del módulo de Poisson del concreto incide muy ligeramente en el módulo de Elasticidad y por ende en el espesor de losa de concreto; sin embargo para el diseño de pavimentos rígidos según la guía AASHTO 1998, se observa una incidencia relativamente mayor.
- Para los valores extremos del rango de valores de módulo de Poisson generalmente utilizado para el concreto (0.10 – 0.20), el espesor de losa de concreto requerido evaluado mediante el método de retrocálculo y por medio de la guía suplementaria de diseño AASHTO 1998, se ve afectado en un espesor de 0.02 pulgadas (0.05 cm) y 0.13 pulgadas (0.33 cm) respectivamente, lo cual para el primer caso no incide significativamente en la capacidad estructural del pavimento y en el segundo caso equivale aproximadamente al 10 % de los ejes equivalentes (ESAL) previstos, lo cual corresponde a un tiempo de aproximadamente 3 años.

8.0 Referencias.

- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993.
- AASHTO Supplement to the Guide for Design of Pavement Structures 1998.
- AASHTO Guide for the Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures 2002.
- Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression ASTM C469 - 02
- Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete ASTM C 597 – 02
- Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures ASTM D 3497 (Reapproved 1995).
- Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures ASTM D 4123 – 82 (Reapproved 1995).
- Technical Paper ACI Journal February 1991, Elastic Modulus, Poisson's Ratio, and Compressive Strength Relationships. Francis Oluokun, Edwin Burdette, and Harold Deatherage.
- Guide To Per Road 2.4 Pavement Software, Department of Civil Engineering National Center for Asphalt Technology Auburn University for The Asphalt Pavement Alliance, August 2004
- Manual de Tecnología del Concreto Sección 3, Comisión Federal de Electricidad; Limusa Noriega E, Primera Edición.1994
- Mecánica de Materiales, Gere y Timoshenko, International Thomsom Editores, Cuarta Edición. 1998

[Pagina Principal](#)

E-mail: uidv.contacto@mop.gob.sv