

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DEL CONCRETO DE BAJA DENSIDAD SOMETIDO A FATIGA DE BAJO
CICLAJE EN PROBETAS PRISMÁTICAS

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR:

Jesús Antonio Delgado Vera

José Miguel Dos Santos Pereira

PROFESOR GUÍA:

MSc. Ing. Guillermo Bonilla

27 de junio de 2018

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DEL CONCRETO DE BAJA DENSIDAD SOMETIDO A FATIGA DE
BAJO CICLAJE EN PROBETAS PRISMÁTICAS

Este jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su
contenido con el resultado: 18 P.TOS.

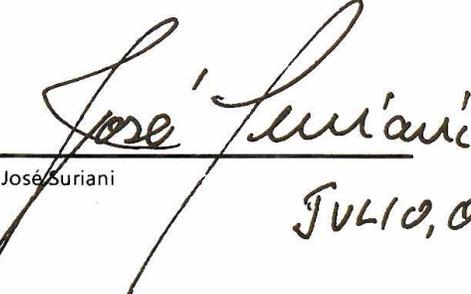
JURADO EXAMINADOR

X


Inq. María Barreiro

Junio 21 2018

X


Inq. José Suriani

TUTOR

JULIO, 09/18



X


Inq. Guillermo Bonilla

Junio 2018

REALIZADO POR:

Jesús Antonio Delgado Vera

José Miguel Dos Santos Pereira

PROFESOR GUÍA:

MSc. Ing. Guillermo Bonilla

27 de junio de 2018

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias y allegados por el apoyo incondicional.

A nuestro Tutor Guillermo Bonilla y a Yelitza Sirit por guiarnos en este trabajo de investigación.

A los trabajadores del Grupo Industrial Disluk C.A, en especial a Orlando Carballo por el apoyo en la realización del sistema de medición.

A los técnicos de los laboratorios de la UCAB por la ayuda suministrada durante la realización de nuestra investigación.

A la Constructora MDT C.A por la donación de la arena utilizada.

A Agregados Livianos C.A por la donación de la arcilla expandida utilizada.

Al Ingeniero José Suriani por su colaboración.

A todas aquellas personas que nos ayudaron directa o indirectamente.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.2 Antecedentes	2
1.2.1 “Funciones Daño para Concreto Sometido a Fatiga de Bajo Ciclaje” Mario Paparoni.	2
1.2.2 “Estudio del Concreto Sometido a Fatiga de Bajo Ciclaje” Iker Marañón y Luciano Rodríguez.....	2
1.2.3 “Estudio de Propiedades Mecánicas del Concreto de Baja Densidad Elaborado con Agregado Grueso Proveniente de Arcillas Expandidas” Daniel Soto.	3
1.3 Alcances y Limitaciones.....	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo General.....	4
1.4.2 Objetivos Específicos	4
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Bases teóricas	5
2.1.1 Concreto de Baja Densidad	5
2.1.2 Arcilla Expandida Como Agregado del Concreto.....	5
2.1.3 Arcilla Expandida	5
2.1.4 Características Tensión-Deformación del Concreto	6
2.1.5 Módulo de Elasticidad.....	9
2.1.6 Fatiga.....	9
2.2.5 Función Daño	12
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO	13
3.1 Naturaleza de la Investigación	13
3.2 Población	13
3.3 Muestra	13
3.4 Variables	13
3.4.1 Variables Dependientes.....	13
3.4.2 Variables Independientes	13

3.4.3 Elementos Constantes.....	13
3.5 Recopilación de información	13
3.6 Diseño experimental	13
3.7 Fases de Ejecución.....	16
3.8 Preparación de las mezclas	16
3.9 Elaboración del equipo de medición	17
3.10 Equipo de aplicación de carga	18
3.11 Ensayo de prismas de concreto.....	19
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	20
4.1 Resultados	20
4.1.1 Tabla de resultados, características y propiedades.....	20
4.1.2 Módulo de elasticidad en prismas.....	20
4.1.3 Comportamiento ante cargas cíclicas	23
4.2 Análisis.....	25
4.2.1 Curvas de Comportamiento	25
4.2.2 Curvas de deformación axial y transversal	27
4.2.3 Envoltentes	31
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	34
CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES	36
BIBLIOGRAFÍA	37
ANEXOS	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Componentes de la Arcilla Expandida Marca Aliven	6
Tabla 3.1 Nomenclatura de Probetas	14
Tabla 3.2 Características de las Mezclas	14
Tabla 4.1 Resultados, Características y Propiedades	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Gráfica Tensión-Deformación.....	6
Figura 2.2 Gráfica Tensión-Deformación	7
Figura 2.3 Gráfica Tensión-Deformación	8
Figura 2.4 Gráfica Tensión-Deformación	9
Figura 2.5 Gráfica Tensión-Deformación, Cargas Cíclicas.....	10
Figura 3.1 Gráfica de Dosificación de Materiales, Mezcla 1.....	15
Figura 3.2 Gráfica de Dosificación de Materiales, Mezcla 2.....	15
Figura 3.3 Gráfica de Dosificación de Materiales, Mezcla 3.....	15
Figura 3.4 Homogeneización del Agregado Fino.....	16
Figura 3.5 Medición de Asentamiento.....	16
Figura 3.6 Boceto Inicial del Equipo de Medición.....	18
Figura 3.7 Equipo de Medición.....	18
Figura 3.8 Elaboración del Equipo de Medición.....	18
Figura 3.9 Elaboración del Equipo de Medición.....	18
Figura 3.10 Ensayo de Carga Axial a Bajo Ciclaje.....	19
Figura 3.11 Preparación para el Ensayo.....	19
Figura 3.12 Preparación para el Ensayo.....	19
Figura 4.1 Gráfica Tensión-Deformación P1-1.....	21
Figura 4.2 Gráfica Tensión-Deformación P2-2.....	21
Figura 4.3 Gráfica Tensión-Deformación P3-1.....	22
Figura 4.4 Agrupación de Curvas Tensión Deformación.....	22
Figura 4.5 Gráfica Tensión-Deformación P1-3.....	23
Figura 4.6 Gráfica Tensión-Deformación P2-3.....	24
Figura 4.7 Gráfica Tensión-Deformación P3-2.....	24
Figura 4.8 Gráfica Curvas de Comportamiento P1-1.....	25
Figura 4.9 Gráfica Curvas de Comportamiento P2-2.....	26
Figura 4.10 Gráfica Curvas de Comportamiento P3-1.....	27
Figura 4.11 Curvas de deformación axial y transversal P1-3.....	28
Figura 4.12 Curvas de deformación axial y transversal P2-3.....	29
Figura 4.13 Acercamiento Gráfica P2-3.....	30

Figura 4.14 Curvas de deformación axial y transversal P3-2.....	31
Figura 4.15 Gráfica Envolvente P1-3.....	32
Figura 4.16 Gráfica Envolvente P2-3.....	32
Figura 4.17 Gráfica Envolvente P3-2.....	33
Figura 4.18 Agrupación de Envolventes.....	33

SINOPSIS

Este trabajo especial de grado forma parte de una línea de investigación que se está llevando a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción y Tecnología del Concreto de la Universidad Católica Andrés Bello referente al concreto de baja densidad, utilizando como agregado grueso arcilla expandida. Al respecto se estudió el comportamiento de este tipo de concreto ante la fatiga causada por la aplicación de cargas axiales de bajo ciclaje sobre prismas de 20 x 20 x 40 y de esta manera continuar generando y ampliando lo estudios acerca de este concreto de baja densidad para que sea posible utilizarlo de forma adecuada en futuras construcciones.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

Ante la innovación tecnológica y la necesidad de utilizar concretos más livianos, en los últimos años se han realizado estudios relacionados con el concreto de baja densidad para uso estructural para obtener sus ventajas, pero garantizando el adecuado funcionamiento estructural y así poder plantear una alternativa conveniente al concreto convencional, por lo que, al igual que el concreto convencional, el concreto aligerado debe ser evaluado a través de distintos estudios para conocer su comportamiento estructural.

Durante el periodo de vida útil de una edificación, la estructura está sometida constantemente a cargas dinámicas, las cuales pueden afectar a la capacidad del concreto sin que necesariamente sean superados los límites previstos de acciones, es decir, que la edificación puede fallar por la acción de cargas dinámicas las cuales son menores a la carga estática teórica a la que puede fallar el concreto, como suele suceder ante la acción de un sismo.

Por consiguiente, este trabajo especial de grado da continuación a una serie de estudios, con el objeto de evaluar el comportamiento del concreto de baja densidad sometido a cargas de bajo ciclaje que generan fatiga, mediante el estudio de sus propiedades mecánicas y características geométricas definidas por cambios en la deformación axial y volumétrica. Dicho concreto aligerado es realizado con arcilla expandida, la cual tiene como función sustituir a la piedra, presente en mezclas de concreto simple convencional, a manera de grueso.

1.2 Antecedentes

1.2.1 “Funciones Daño para Concreto Sometido a Fatiga de Bajo Ciclaje”

Mario Paparoni.

Esta tesis doctoral tuvo como objetivo principal describir el cambio de las propiedades del concreto simple desde su estado inicial hasta el momento de su destrucción por las cargas, a través de variables experimentales. Se estudió a través de la experimentación realizada en 45 prismas de concreto simple, la influencia que cargas repetitivas entre 65% y 95% de la máxima resistencia noval, con repeticiones de hasta 100 veces, las cuales influyen sobre distintas propiedades mecánicas y funciones del concreto simple. El trabajo muestra, desde una perspectiva experimental, las relaciones funcionales entre cargas, repeticiones y deformaciones, postulando el empleo de algunas de ellas no convencionales en la literatura de la fatiga. De este estudio se concluyó que cargas repetitivas altas, de hasta un 80% de la resistencia noval, aumentan la resistencia final del concreto hasta un número limitado de repeticiones. Así mismo, para valores de carga superiores al 80% de la resistencia noval, incrementan las probabilidades de falla del concreto, incluso aunque el número de repeticiones sea menor. El aumento de la resistencia puede llegar en torno al 10% debido a que el concreto es “compactado” por la acción de las cargas, esto último dependiendo del número de repeticiones. Por encima de este límite de repeticiones se obtienen daños progresivos en el concreto y por debajo, se obtiene una ganancia en la resistencia. Además, se muestra que la capacidad de deformación final del concreto disminuye bajo cargas cíclicas elevadas, en el caso de dicha investigación, para un número de 100 repeticiones, cargas mayores al 85% de la máxima producen pérdidas en la capacidad de deformación final del concreto en un 25%.

1.2.2 “Estudio del Concreto Sometido a Fatiga de Bajo Ciclaje” Iker

Marañón y Luciano Rodríguez.

Este trabajo especial de grado tuvo como objetivos establecer condiciones de ensayos realizables en el Laboratorio de Materiales de Construcción y Tecnología del Concreto de la Universidad Católica Andrés Bello, que permitiesen evaluar el comportamiento del concreto sometido a cargas axiales de bajo ciclaje, determinar el comportamiento del concreto sometido a cargas de bajo ciclaje, con base a la evaluación de la variación volumétrica y la determinación de expresiones generales de funciones

daño. Llegando a las conclusiones generales que muestran que la variación volumétrica es la variable que mejor describe el daño del concreto a lo largo de las aplicaciones de carga, la deformación horizontal presenta mayor sensibilidad en la variación volumétrica y luego de tomar en cuenta las curvas envolventes de cada ciclo se muestra que todas tienen pendientes comunes hasta un 50% de su tramo inicial, culminando todas, su recorrido, en valores cercanos entre ellas, lo que quiere decir que sin importar el tipo de ciclaje o carga a la que fue sometido el prisma, la tendencia de falla es la misma.

1.2.3 “Estudio de Propiedades Mecánicas del Concreto de Baja Densidad Elaborado con Agregado Grueso Proveniente de Arcillas Expandidas” Daniel Soto.

Este trabajo de grado tuvo como objetivo principal establecer las propiedades mecánicas del concreto de baja densidad, cuando el componente grueso de la mezcla está conformado por arcilla expansiva, así como determinar los parámetros que definen la dosificación óptima para realizar este tipo de concreto. Pudiendo concluir que el concreto de baja densidad disminuye densidad en un 30% con respecto al concreto normal, y que el comportamiento en cuanto a la resistencia a la compresión y la densidad del concreto fue satisfactoria, pudiéndose alcanzar una resistencia mayor a 300 kgf/cm², aumentando la dosis de arena siempre y cuando esta proporción de finos no supere el 80% por motivos de densidad, cuidando de igual forma que al tener densidades menores a 1700 kg/m³ el concreto no alcanza la resistencia de 210 kgf/cm². Las probetas cilíndricas ensayadas presentaron diversos tipos de falla, siendo la más común la falla por fractura o del grano del agregado y no por dislocación.

1.3 Alcances y Limitaciones

Estudio del concreto de baja densidad sometido a fatiga con cargas axiales de bajo ciclaje, de manera de conocer su comportamiento ante este tipo de fatiga, generando así información importante para la utilización de este tipo de concreto en las futuras construcciones y continuando así con su línea de investigación.

El estudio se verá limitado por lo siguiente:

- Concreto de baja densidad usando arcilla expandida como agregado, marca Aliven.

- Carga aplicada hasta 100 T.
- Especímenes de 20 cm x 20 cm x 40 cm

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Estudiar el comportamiento del concreto de baja densidad sometido a ciclos de cargas axiales de bajo ciclaje con probetas prismáticas de dimensiones de 20 cm x 20 cm x 40 cm, con base al incremento de la proporción de pelltas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar el comportamiento mecánico del concreto de baja densidad sometido a carga axial de compresión con base a la deformación axial en miembros prismáticos cortos.
- Determinar el comportamiento mecánico del concreto de baja densidad sometido a carga axial de compresión con base a la deformación transversal en miembros prismáticos cortos.
- Establecer el comportamiento de miembros prismáticos sometidos a ciclos de carga.
- Estudiar el comportamiento del concreto de baja densidad sometido a ciclos de fatiga de bajo ciclaje.
- Determinar la variación volumétrica de probetas prismáticas de concreto de densidad baja sometidos a cargas axiales de bajo ciclaje.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Bases teóricas

2.1.1 Concreto de Baja Densidad

“El concreto de peso liviano posee una densidad in situ (*peso unitario*) en el orden de 90 1440 a 1840 kg/m³ en comparación con el concreto de peso normal que presenta una densidad en el rango de 2240 a 2400 kg/m³. Para aplicaciones estructurales, la resistencia del concreto deberá ser superior a 17.0 MPa. La mezcla de concreto se elabora con un agregado grueso de peso liviano.

Los agregados livianos que se utilizan en el concreto de baja densidad son típicamente materiales expandidos de esquisto, arcilla o pizarra que se han expuesto al fuego en un horno rotativo de calcinado para que desarrollen una estructura porosa. También se utilizan otros productos como escoria preparada en horno de fundición (*alto horno*). Existen otras clases de concretos no estructurales de peso liviano con menor densidad producidos con otros materiales de agregados y con mayores vacíos de aire en la matriz de pasta de cemento, tales como el concreto celular, los cuales se utilizan típicamente por sus propiedades de aislamiento” (NRMCA)

2.1.2 Arcilla Expandida Como Agregado del Concreto

“La arcilla expandida es un material aislante de origen cerámico con una estructura altamente porosa consecuencia de la expansión a altas temperaturas.

Su excelente compromiso entre ligereza y resistencia la hace ideal para su utilización tanto en morteros ligeros aislantes termoacústicos, así como en hormigones ligeros de altas prestaciones” (Weber Saint-Gobain)

2.1.3 Arcilla Expandida

Es un material liviano producido a altas temperaturas, en forma de pequeñas pellas que se utilizan para sustituir a otro agregado, la piedra, de manera de obtener una mezcla de concreto más ligera. ALIVEN es la marca de arcilla expandida que se utilizó en este trabajo especial de grado, y está compuesta de la siguiente forma:

Compuesto	Cantidad en porcentaje
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	71,92
Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	8,42
Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	4,96
Óxido de Sodio (NaO ₂)	1,09
Óxido de Potasio (K ₂ O)	1,63
Óxido de Calcio (CaO)	1,71
Óxido de Magnesio (MgO)	1,66

Tabla 2.1: Componentes de la Arcilla Expandida Marca Aliven

2.1.4 Características Tensión-Deformación del Concreto

Uno de los principales estudios que se le realiza al concreto es la capacidad o resistencia que este soportará ante una carga aplicada axialmente, este comportamiento puede describirse perfectamente con gráficas tensión-deformación, que son generadas a partir de ensayos que se realizan a probetas de concreto, que en algunos casos pueden ser normalizadas.

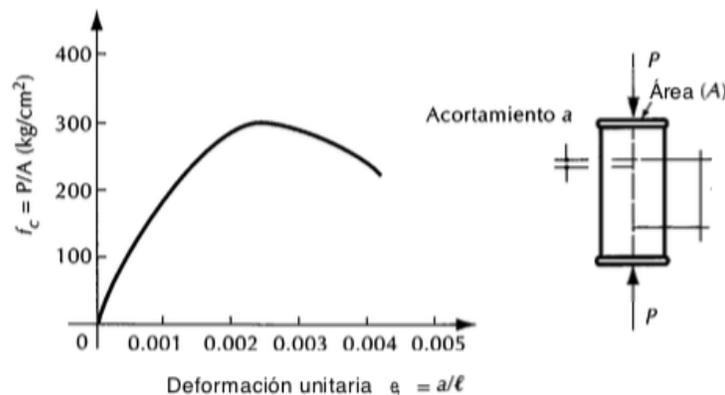


Figura 2.1: Gráfica Tensión-Deformación

Cabe destacar que el concreto no es un material con un comportamiento lineal y por consiguiente la parte inicial de estas curvas no es rigurosamente recta. Sin embargo, puede considerarse una porción recta hasta aproximadamente el 40% de la carga máxima. Se observa, además, que la curva llega a un máximo y después tiene una rama descendente. El colapso se produce comúnmente a una carga menor que la máxima. (González y Fernández-Villegas, 2005).

En el ensaye de prismas o cilindros de concreto simple, la carga máxima se

alcanza una deformación unitaria del orden de 0.002, si la longitud de medición es del mismo orden de magnitud que el lado del espécimen. El colapso, que corresponde al extremo de la rama descendente, se presenta en ensayos de corta duración a deformaciones que varían entre 0.003 y 0.007, según las condiciones del espécimen y de la máquina de ensaye. (González y Fernández-Villegas, 2005).

La figura 2.2 presenta curvas típicas tensión – deformación obtenidas de cilindros de concreto, cargados en compresión uniaxial en una prueba desarrollada durante varios minutos. Las curvas casi son lineales hasta aproximadamente un medio de la resistencia a compresión. El pico de la curva para concreto de alta resistencia es relativamente agudo, pero para concreto de baja resistencia la curva tiene un copete plano. La deformación en la tensión máxima es aproximadamente 0,002. A deformaciones más elevadas, después de alcanzarse la tensión máxima, todavía pueden transmitirse tensiones, aunque se hacen visibles en el concreto grietas paralelas a la dirección de la carga. El concreto probado en máquinas flexibles de prueba a veces falla explosivamente debido a que no puede absorber la liberación de energía de deformación de la máquina de prueba cuando la carga disminuye después de la tensión máximo. Para poder trazar la extensión total de la rama descendente de la curva de tensión – deformación se necesita utilizar una máquina de pruebas de gran capacidad. (Park & Paulay, 1983).

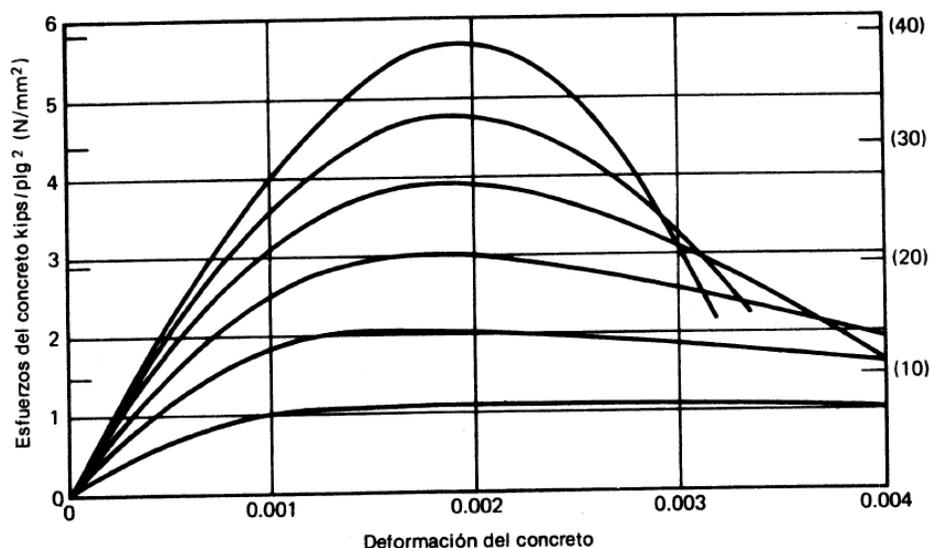


Figura 2.2: Gráfica Tensión-Deformación

Según Park y Paulay (1983). Las pruebas de Rüsç han indicado que el perfil de la curva tensión – deformación antes de la tensión máxima depende de la resistencia del concreto. (Fig. 2.3). Sin embargo, una aproximación muy usada para el perfil de la curva tensión deformación antes de la tensión máxima es una parábola de segundo grado.

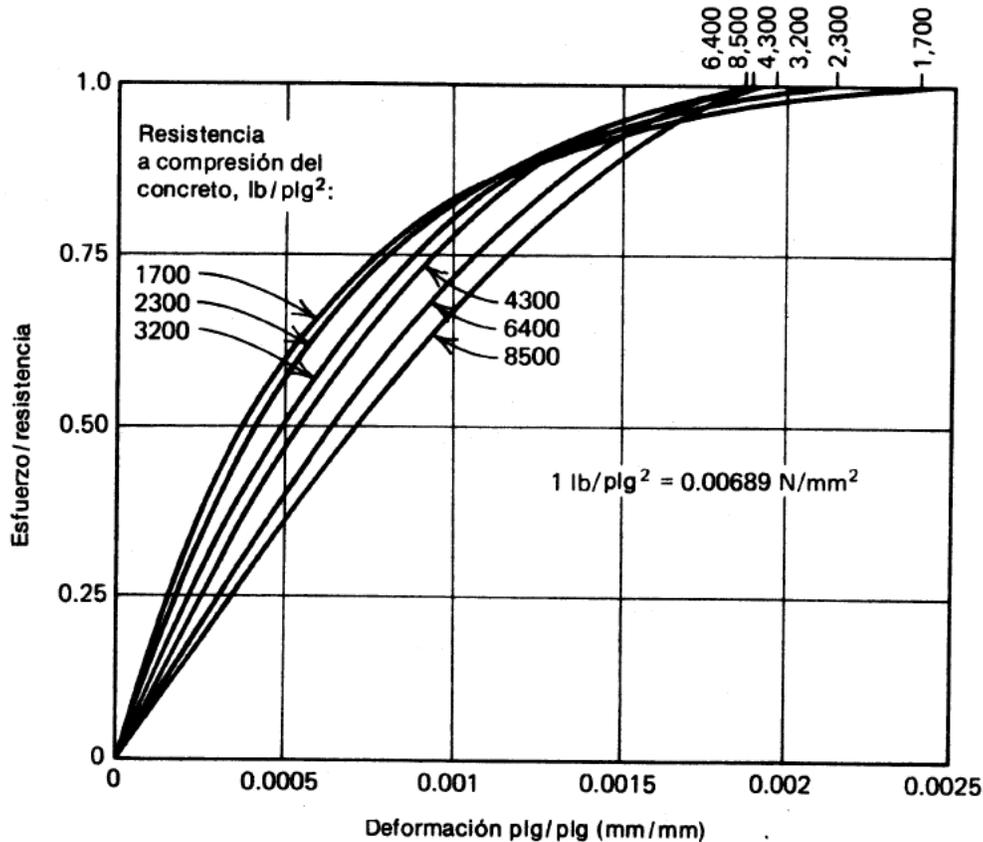


Figura 2.3: Gráfica Tensión-Deformación

En la fig. 2.4 se muestra la curva de tensión deformación citada frecuentemente debida a Hognestad, en que f_c'' es la tensión máxima alcanzada en el concreto. El grado de comportamiento de la rama descendente depende del límite de la deformación útil del concreto supuesta. La tensión máxima a compresión alcanzada en el concreto de un miembro a flexión f_c'' puede diferir de la resistencia f_c' del cilindro debido a la diferencia en el tamaño y forma del concreto comprimido. (Park & Paulay, 1983).

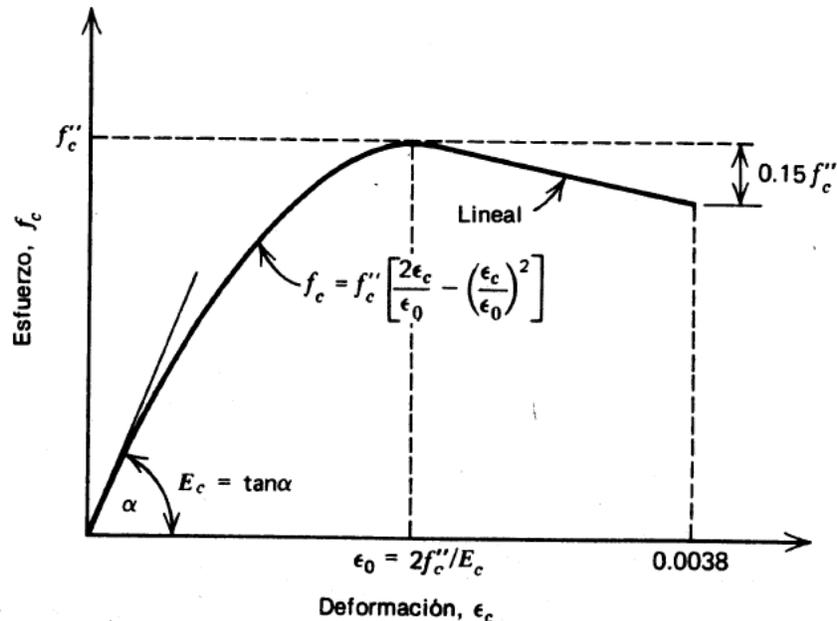


Figura 2.4: Gráfica Tensión-Deformación

2.1.5 Módulo de Elasticidad

Para estimar deformaciones debidas a cargas de corta duración, donde se puede admitir un comportamiento elástico sin errores importantes, es necesario definir un valor del módulo de elasticidad. Del estudio de las curvas tensión-deformación mostradas, resulta obvio que el concepto convencional de módulo de elasticidad no tiene sentido en concreto. Por lo tanto, es necesario recurrir a definiciones arbitrarias basadas en consideraciones empíricas. Así, se puede definir el módulo tangente inicial o tangente a un punto determinado de la curva tensión-deformación y el módulo secante entre dos puntos de la misma. (González y Fernández-Villegas, 2005).

2.1.6 Fatiga

“La fatiga es el fenómeno que lleva a la fractura bajo la repetición o fluctuación de tensiones teniendo un valor máximo menor que la resistencia máxima del material”. (Boyer, H. E., Gall, T. L.)

Se han hecho diversos estudios sobre elementos de concreto, sujetos a repeticiones de carga. Cuando un elemento falla después de un número muy grande de repeticiones de carga, se dice que ha fallado por fatiga. Este tipo de sollicitación tiene importancia práctica, ya que elementos como vigas de puente, durmientes de ferrocarril o cimentaciones de maquinaria están sujetos a muchas repeticiones de

carga. (González y Fernández-Villegas, 2005).

Cuando a un elemento de concreto se le aplican compresiones del orden de la mitad de su resistencia estática, falla después de aproximadamente diez millones de repeticiones de carga. Se ha encontrado también que, si la carga se aplica intercalando periodos de reposo, el número de ciclos necesario para producir la falla aumenta considerablemente. (González y Fernández-Villegas, 2005).

Los estudios experimentales se han hecho aplicando los ciclos de carga y descarga a velocidades bastante más rápidas que las que se presentan en la práctica y, por lo tanto, sus resultados en general son conservadores. Se puede estimar que el concreto simple en compresión, toma diez millones o más de repeticiones de carga a 50 por ciento de su resistencia estática. (González y Fernández-Villegas, 2005).

Según otros estudios realizados, las cargas repetidas a compresión de elevada intensidad producen un efecto pronunciado de histéresis en la curva tensión-deformación. La figura 2.5 de los datos de prueba obtenidos por Sinha, Gerstle y Tulin para tasas lentas de deformación. Estas pruebas, y las de Karsan y Jirsa indicaron que la curva envolvente era casi idéntica a la curva obtenida de una sola aplicación de carga. (Park & Paulay, 1983).

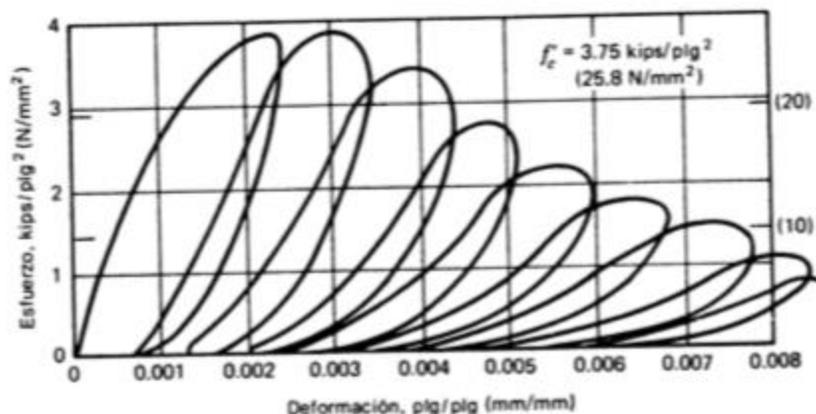


Figura 2.5: Gráfica Tensión-Deformación, Cargas Cíclicas

En la actualidad existen dos criterios de importancia para el análisis de fatiga, uno es llamado de Tensión-Vida y el otro de Deformación- Vida, los cuales se aplican según el número de ciclos y la magnitud de las deformaciones que pueden presentarse.

Una de las causas más comunes de falla estructural es la fatiga, la cual está relacionada a un fenómeno de la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas

repetitivas o cíclicas y que se produce más rápidamente que con cargas estáticas. Las cargas dinámicas se diferencian de las estáticas por modificar las tensiones y en consecuencia las deformaciones, afectando la forma límite de rotura de materiales. Muchos materiales que son dúctiles al someterse a cargas estáticas, se comportan de manera frágil frente a cargas dinámicas.

Generalmente la fatiga se divide en dos categorías:

- Fatiga de altos ciclos (High-cycle fatigue).
- Fatiga de bajos ciclos (Low-cycle fatigue).

Los estudios de fatiga de altos ciclos se han referido a condiciones de falla aproximadamente por encima de los 10^4 ciclos de carga en equipos y de los 10^5 ciclos de carga en pavimentos y puentes, donde las tensiones de trabajo generalmente son bajas con respecto a la tensión de rotura del material. La fatiga es controlada por el nivel de tensión cíclica y utiliza un enfoque de acuerdo a la ecuación de Tensión-Vida.

Muchas fallas por fatiga ocurren cuando el número de ciclos de carga es relativamente bajo y el valor de la tensión de trabajo es importante. La fatiga de bajos ciclos se presenta comúnmente para repeticiones de carga menores a los 1,000 ciclos; este es el caso, por ejemplo, de las cargas sísmicas. El efecto de deformación plástica a menudo acompaña a la fatiga de bajos ciclos, lo cual explica la corta vida de los componentes regidos por esta teoría. La fatiga de bajos ciclos está relacionada en muchos casos con la existencia de tensiones producidas por la disipación de energía en forma de calor. En estos casos, el fenómeno se encuentra controlado por deformación más que por la tensión. La fatiga controlada por el nivel de deformación utiliza un enfoque de acuerdo a la ecuación de Deformación-Vida.

La ecuación de Deformación-Vida (Strain-Life) también conocida como ecuación de Coffin-Manson (Chai y Romstad ,1996), se basa en la amplitud de la deformación plástica.

Para determinar las curvas características de fatiga en el concreto se requiere llevar a cabo pruebas de laboratorio en probetas hasta el punto de fractura; las pruebas que se han realizado usualmente exhiben una dispersión amplia en el número de ciclos de falla en cada nivel de tensión.

Tepfers y Kutti (Tepfers y Kutti ,1979), propusieron para el caso del concreto una

expresión que relaciona la tensión máxima normalizada con respecto a la resistencia a compresión obtenida estáticamente, con el número de ciclos de carga, N , y con la relación entre la tensión máxima y mínimo del concreto, R , como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\frac{\sigma_{max}}{f_{cm}} = 1 - \beta(1 - R)\text{Log}N$$

Donde:

σ_{max} Tensión máxima

f_{cm} Resistencia estática del concreto a la falla por compresión

β Constante del material (0.064 – 0.080)

R Razón de tensiones

N Número de ciclos para la falla

2.2.5 Función Daño

Según el ing. Mario Paparoni, una función daño se entiende como cualquier función experimental capaz de describir el deterioro de un material sometido a cargas cíclicas (IMME, 1969). Dichas funciones se hacen con base a las gráficas tensión-deformación de los miembros ensayados sometidos a cargas cíclicas, mediante las cuales se obtiene una envolvente que toma las cargas máximas en cada ciclo con su deformación. La curva generada es llamada función daño, ya que representa el comportamiento del material con respecto a carga axial.

CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Naturaleza de la Investigación

La investigación que se llevó a cabo fue de carácter experimental, cuantitativa, descriptiva y explicativa, en la cual se sometieron probetas prismáticas de concreto de baja densidad a ciclos de cargas axiales de bajo ciclaje.

3.2 Población

Diez (10) probetas prismáticas de concreto de baja densidad con unas medidas de 20cm x 20cm x 40cm.

3.3 Muestra

Un total de seis (6) probetas prismáticas de concreto de baja densidad con dimensiones de 20cm x 20cm x 40cm.

3.4 Variables

3.4.1 Variables Dependientes

- Deformación axial.
- Deformación transversal

3.4.2 Variables Independientes

- Carga aplicada al miembro, reportada en kgf.
- Resistencia del concreto.

3.4.3 Elementos Constantes

- Velocidad de aplicación de carga.
- Proporción agregado liviano/arena (β)

3.5 Recopilación de información

La información necesaria para poder realizar esta investigación fue recopilada mediante sistema de registro automatizado.

3.6 Diseño experimental

Se estableció un diseño experimental que permitiera evaluar y obtener, mediante gráficas Tensión-Deformación, que representen el comportamiento del concreto de baja densidad sujeto a la aplicación de cargas axiales.

Fueron evaluados seis (6) prismas de los cuales tres (3) fueron ensayados monotónicamente hasta la rotura y tres (3) a bajo ciclaje y posteriormente llevados a la rotura.

La nomenclatura de las probetas ensayadas es la siguiente:

Prismas	P1-1	P1-2	P2-1	P2-2	P3-1	P3-2
Ensayo	E.M	E.C	E.M	E.C	E.M	E.C

Tabla 3.1: Nomenclatura de Probetas

Donde:

Pi-j. Prisma j de la mezcla i

E.M: Ensayo Monotónico.

E.C: Ensayo de Ciclaje

Las dosificaciones y características de las muestras para un metro cúbico son las siguientes:

	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
β	0,64	0,68	0,72
Cemento (kg)	454	446	432
Arena (kg)	729	787	839
Arcilla Expandida (kg)	406	368	323
Agua (lts)	291	286	277
Densidad (kg/m ³)	1716,67	1705,48	1746,83
α	0,68	0,68	0,67
Energía de Compactación (kNm/m ³)	13,79	27,58	27,58

Tabla 3.2: Características de las Mezclas

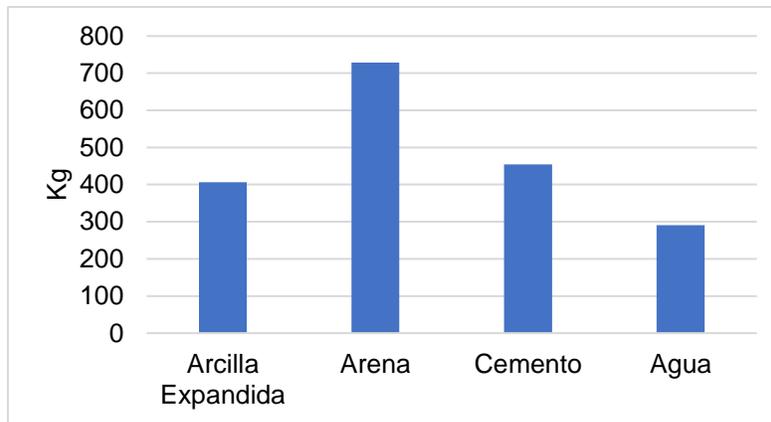


Figura 3.1: Gráfica de Dosificación de Materiales, Mezcla 1

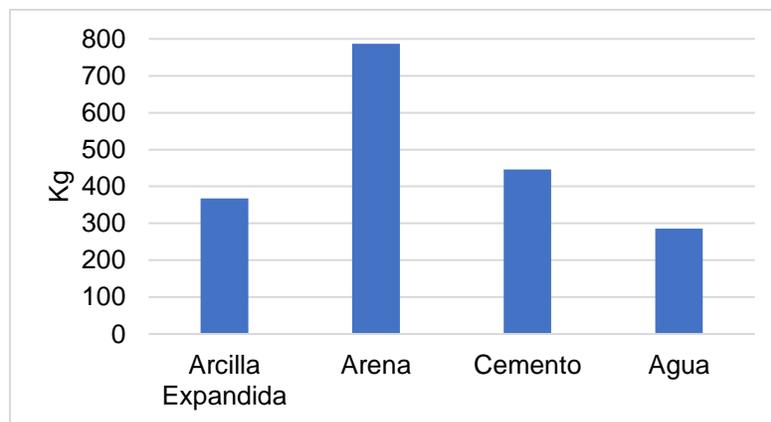


Figura 3.2: Gráfica de Dosificación de Materiales, Mezcla 2

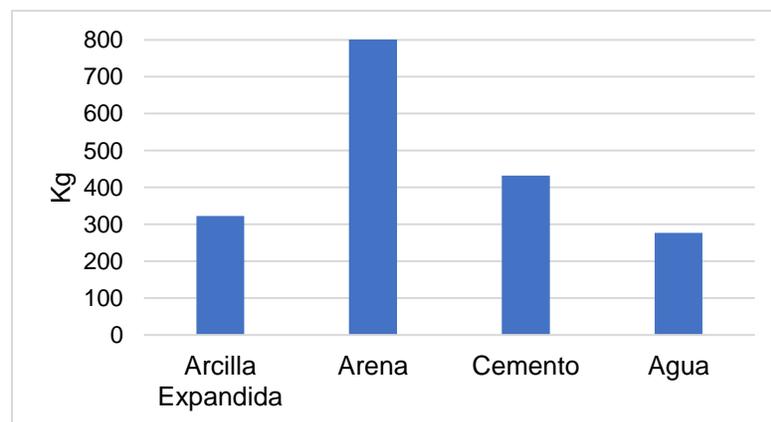
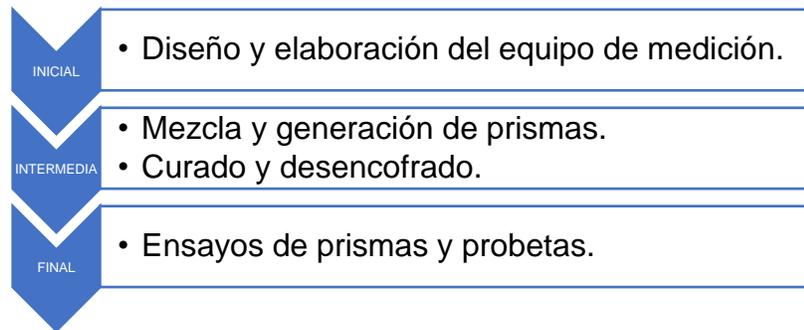


Figura 3.3: Gráfica de Dosificación de Materiales, Mezcla 3

3.7 Fases de Ejecución



3.8 Preparación de las mezclas

Para el proceso de preparación de la mezcla, se procede a pesar los agregados según la dosificación planteada anteriormente, se realizan tres (3) tandas experimentales con arena, agua, cemento y arcilla expandida, la cual debe permanecer previamente sumergida en agua de 24 a 72 horas para que el agregado quede saturado. En cada tanda se procede a mezclar la arena y la arcilla expandida en la mezcladora, posteriormente se coloca el cemento y finalmente se añade agua de manera parcial cada 500 ml para medir asentamientos a medida que se añade más agua, para obtener así una trabajabilidad adecuada de la mezcla. Una vez realizada la mezcla, se procede a vaciarla en encofrados prismáticos metálicos previamente limpiadas y con una película delgada de aceite, haciendo el respectivo proceso de compactación de la mezcla.



Figura 3.4: Homogeneización del Agregado Fino



Figura 3.5: Medición de Asentamiento

3.9 Elaboración del equipo de medición

Para la medición de las deformaciones verticales que experimenta el prisma de concreto en el ensayo, se elaboró un equipo de medición que consiste en un soporte metálico de acero de forma prismática que permita sujetar el prisma de concreto por las cuatro (4) caras del miembro, con una sujeción de dieciséis (16) tornillos (4 tornillos en cada cara del miembro). El soporte tiene como finalidad ser un equipo de medición de fácil montaje, que permita el deslizamiento durante el ensayo, que sea rígido y que pueda sostener el potenciómetro lineal para la medición de dichas deformaciones verticales.

Los materiales necesarios para la elaboración del equipo de medición fueron los siguientes:

- Barra de hierro maciza de sección 1x1 pulgadas y de tres (3) metros de longitud.
- Electrodo E6013.
- Tornillos de punta aguda.
- Tornillos de rosca gruesa tipo americana.
- Tuercas pequeñas.
- Arandelas de presión.
- Vástagos conformados por varillas metálicas macizas (suministradas por el tutor que entran en camisas realizadas haciendo uso del torno)
- Soporte metálico para sostener potenciómetro lineal.

Las herramientas utilizadas en su elaboración fueron las siguientes:

- Lijadora.
- Soldadora.
- Rectificadora.
- Terraaja o tarraja de roscar.
- Machos para roscar.
- Segueta.
- Prensa de mesa.
- Llaves Allen.
- Destornilladores.
- Torno.
- Taladro de pedestal.

- Tronzadora

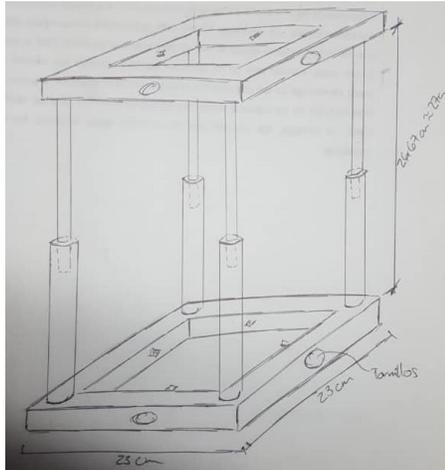


Figura 3.6: Boceto Inicial del Equipo de Medición



Figura 3.7: Equipo de Medición



Figura 3.8: Elaboración del Equipo de Medición



Figura 3.9: Elaboración del Equipo de Medición

3.10 Equipo de aplicación de carga

Máquina de Ensayo Universal, marca Baldwin, de Capacidad cien (100) toneladas, perteneciente al Laboratorio de Materiales de Construcción y Tecnología del Concreto de la Universidad Católica Andrés Bello, calibrado en septiembre del 2017.

3.11 Ensayo de prismas de concreto



Figura 3.10: Ensayo de Carga Axial a Bajo Ciclaje



Figura 3.11: Preparación para el Ensayo



Figura 3.12: Preparación para el Ensayo

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Resultados

Se realizaron ensayos monotónicos y a bajo ciclaje, específicamente seis (6) ciclos, cada ciclo con un límite de carga del 80% de la tensión última conocida por el ensayo monotónico realizado antes del ensayo de bajo ciclaje a un prisma con la misma proporción agregado fino/agregado grueso (β) y a dos cilindros y un límite a la descarga de 1 t, obteniendo los siguientes resultados para cada caso de ensayo.

4.1.1 Tabla de resultados, características y propiedades

Muestra Prismas	Muestra Cilindros	Densidad Prismas (Kg/m ³)	Ec Prismas (Kg/cm ²)	Tensión rotura (Cilindros) (Kgf/cm ²)	Tensión rotura (Prismas) (Kgf/cm ²)
P1-1	C1-1	1646,60	66.772	123,51	112,31
	C1-2			142,74	
P1-2	C1-3	1735,76	-	-	114,78
P2-1	C2-1	1696,92	105.580	107,06	109,63
	C2-2			141,00	
P2-2	C2-3	1688,80	-	-	118,10
P3-1	C3-1	1717,59	100.410	131,01	110,55
	C3-2			121,78	
P3-2	C3-3	1717,89	-	-	108,58

Tabla 1.1: Resultados, Características y Propiedades

Se realizaron tres (3) tipos de mezclas, cada una con un α constante, pero variando la relación β . Se apreció que con esta variación la resistencia a la rotura no varía significativamente, al igual que las densidades que entre todas las probetas se mantienen bastante cercanas entre sí y todas por debajo de 1900 kg/m³, cumpliendo con la afirmación de que las mezclas utilizadas son concreto de baja densidad.

4.1.2 Módulo de elasticidad en prismas

Los módulos de elasticidad calculados de P2-2 y P3-1 son valores próximos entre sí, mientras que el módulo de elasticidad de P1-1 se encuentra por debajo de ambos,

pudiendo ser causado por un cambio en el proceso de compactación de las probetas o por errores durante el ensayo.

El módulo de elasticidad según la norma ASTM C-469, se define como la pendiente de la recta que une la carga a las cincuenta millonésimas (5×10^{-6}) de la deformación con el 40% de la tensión de rotura.

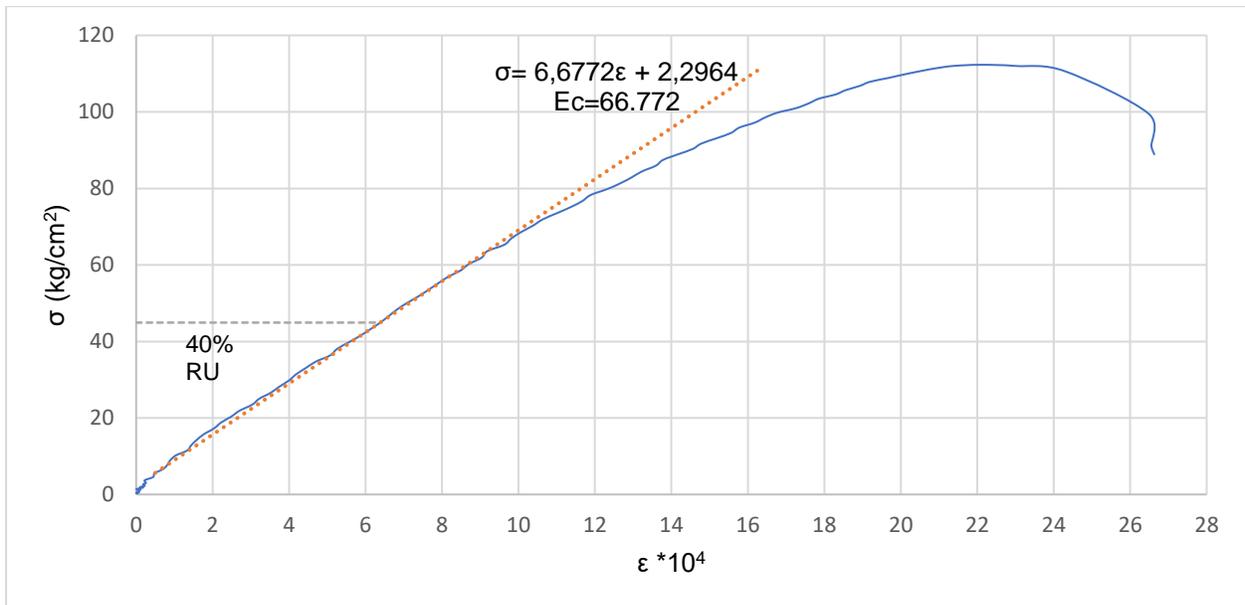


Figura 4.1: Gráfica Tensión-Deformación P1-1

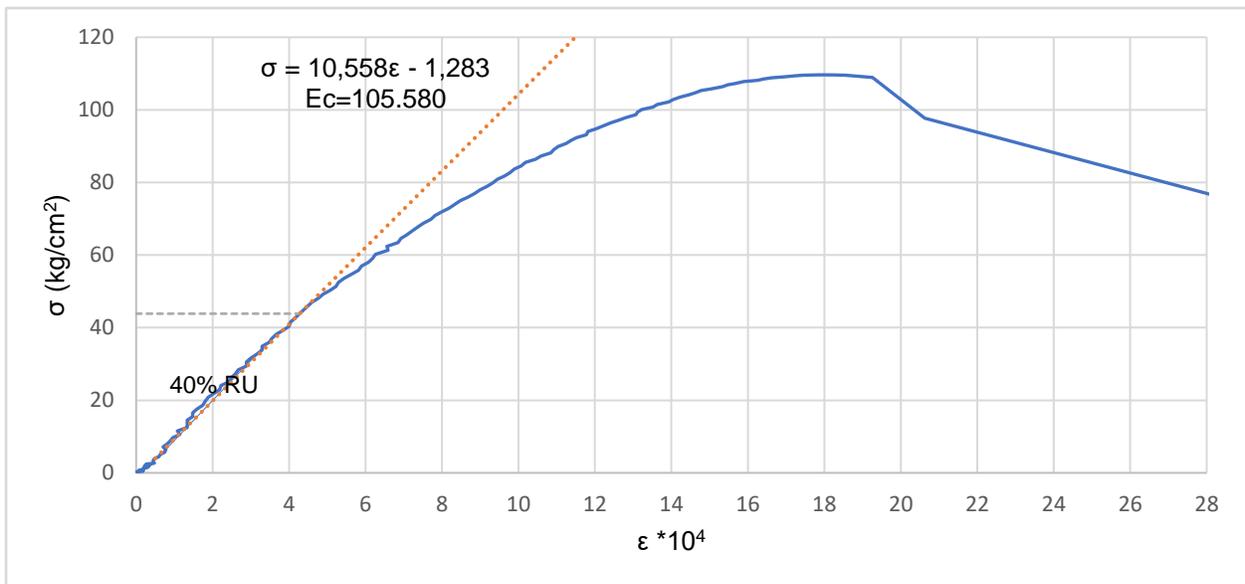


Figura 4.2: Gráfica Tensión-Deformación P2-1

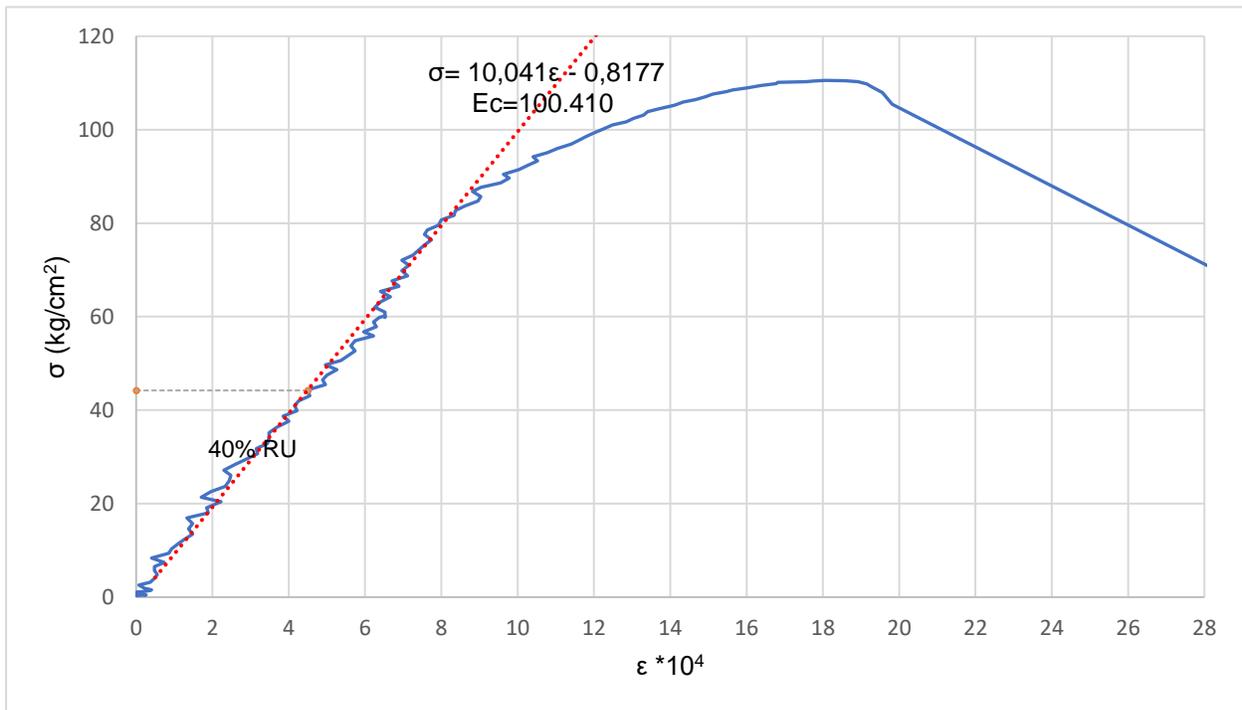


Figura 4.3: Gráfica Tensión-Deformación P3-1

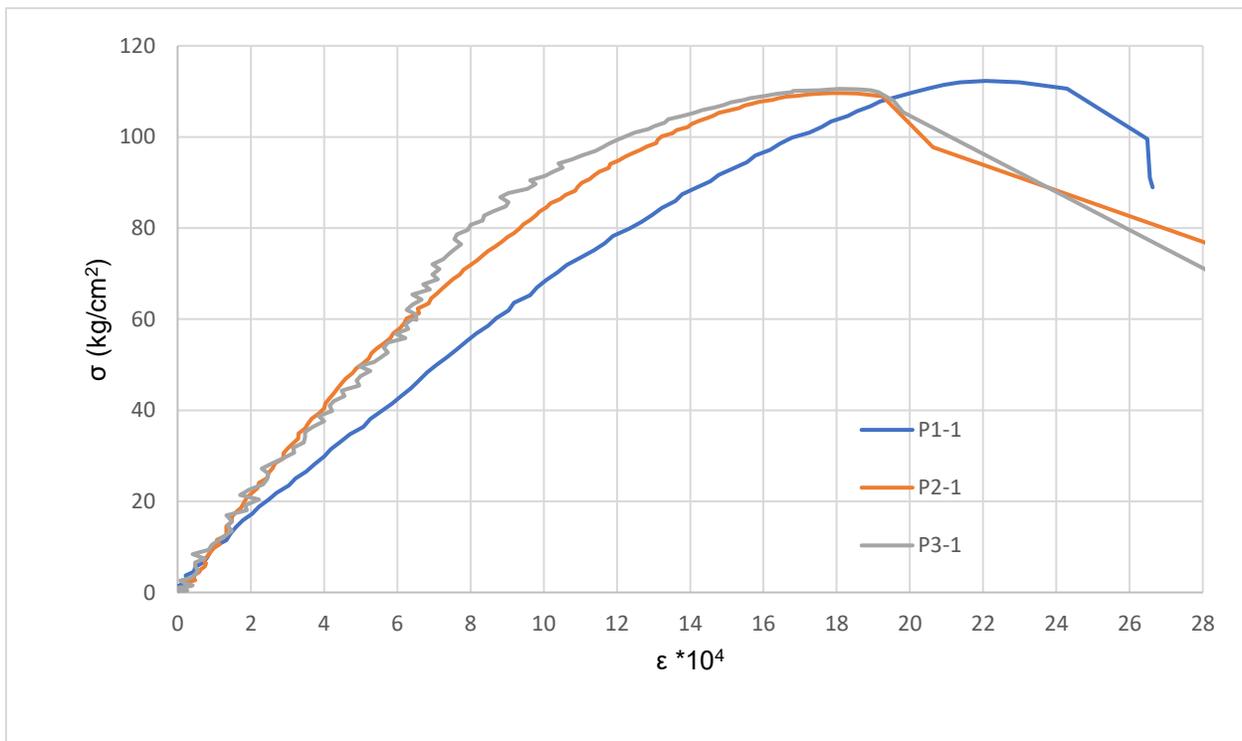


Figura 4.4: Agrupación de Curvas Tensión Deformación

En la gráfica se puede apreciar una superposición de curvas tensión-deformación con sus respectivas rectas, cuyas pendientes representan el módulo de elasticidad asociado a cada miembro. El módulo de elasticidad de los prismas P2-1 y P3-1 son bastante próximos entre sí, mientras que el módulo de elasticidad del prisma P1-1 es menor a los otros miembros, es decir, el miembro presenta una menor rigidez, esto implica que se presentan mayores deformaciones ante las cargas actuantes.

4.1.3 Comportamiento ante cargas cíclicas

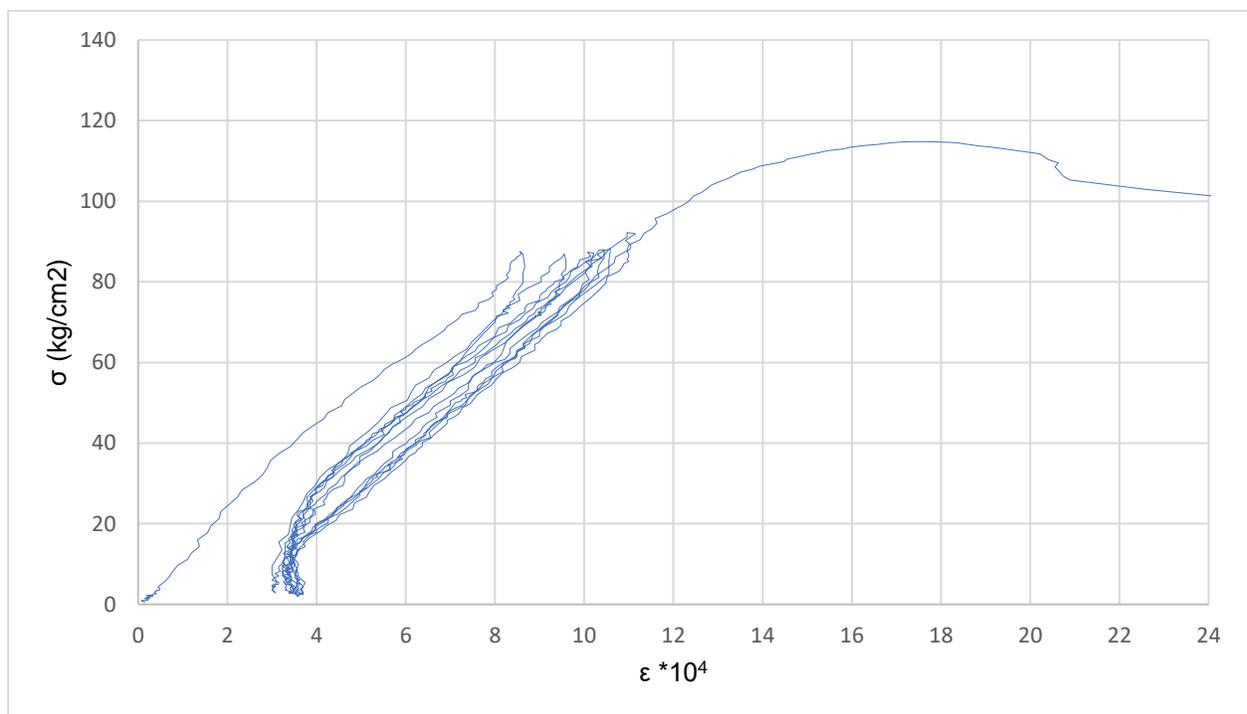


Figura 4.5: Gráfica Tensión-Deformación P1-2

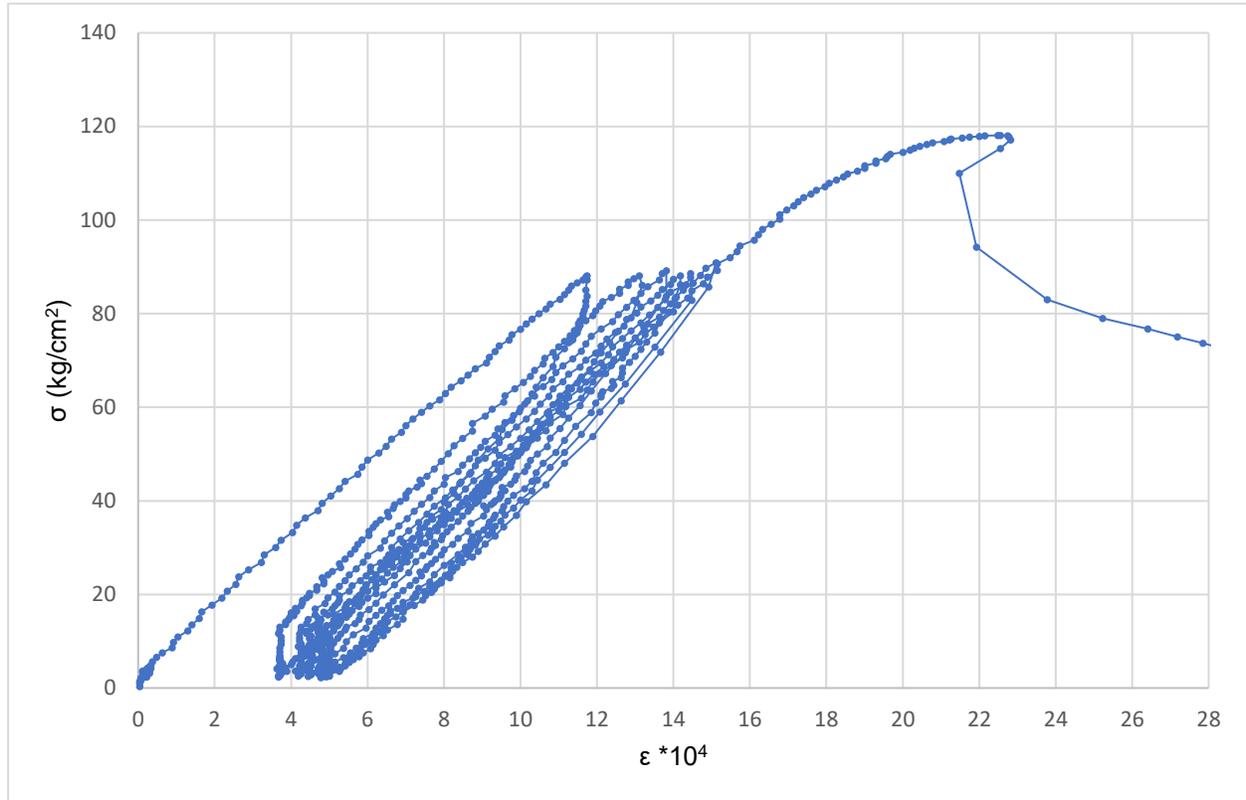


Figura 4.6: Gráfica Tensión-Deformación P2-2

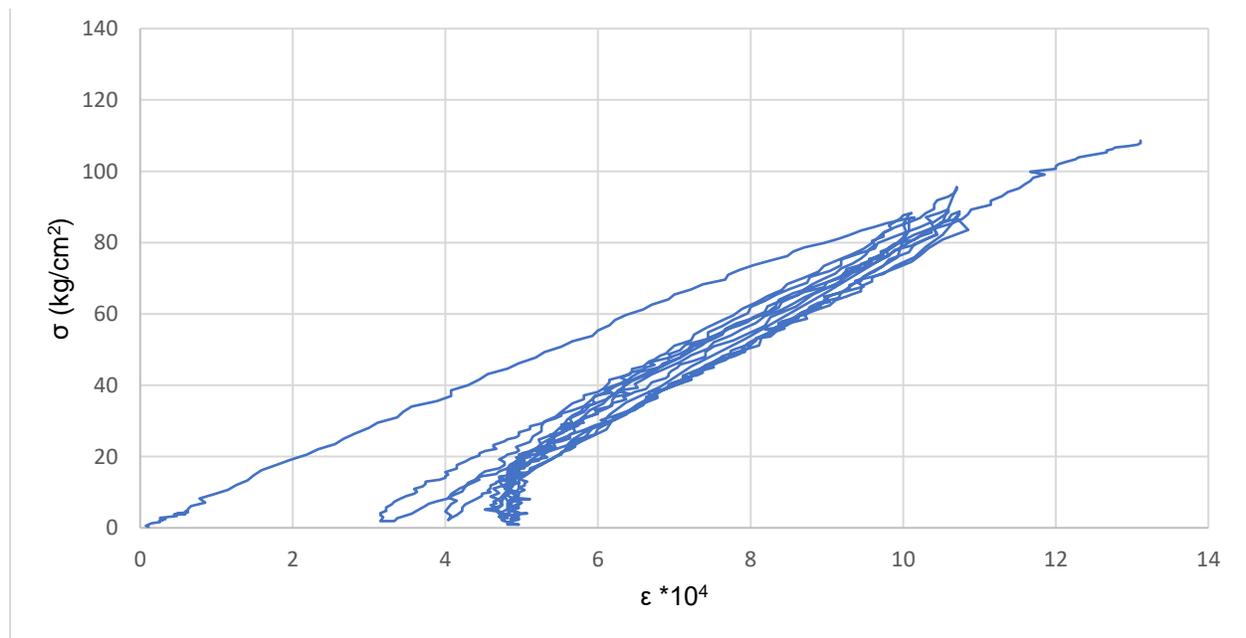


Figura 4.7: Gráfica Tensión-Deformación P3-2

4.2 Análisis

A partir de los resultados obtenidos por los ensayos realizados se pudieron realizar los siguientes análisis:

4.2.1 Curvas de Comportamiento

En la gráfica se puede observar que inicialmente la deformación axial aumenta gradualmente a medida que aumenta la carga, lo que provoca un acortamiento en el prisma, hasta llegar a la falla para una deformación de 0,0022 mm y una proporción de tensión de 1. La deformación transversal aumenta rápidamente con poco incremento de carga y luego, a medida que aumenta la carga la deformación transversal apenas varía, pudiendo apreciarse tramos rectos para deformaciones entre 0,0016 y 0,0013 mm, esto indica que la sección transversal del prisma apenas se expandía, y se mantuvo así hasta llegar a la rotura.

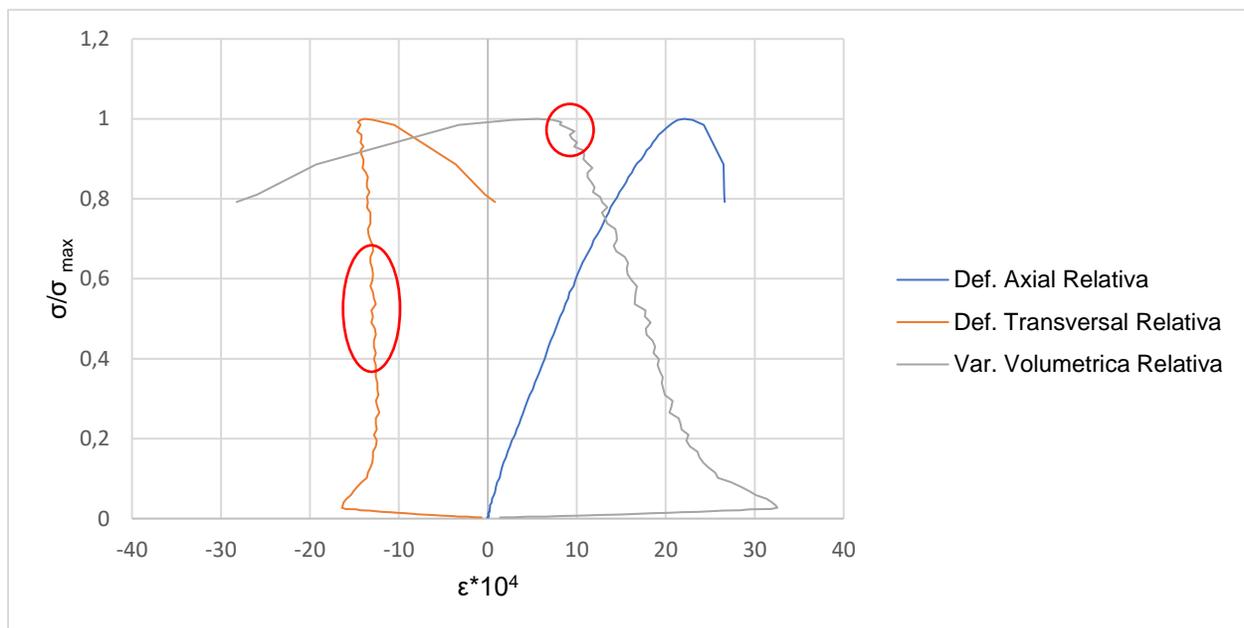


Figura 4.8: Gráfica Curvas de Comportamiento P1-1

En la gráfica se puede observar un comportamiento esperado del material, la deformación axial crece 0,0018 mm hasta la falla, mientras que la deformación transversal se comporta cóncava a la derecha hasta la deformación 0,0004 mm, el volumen del prisma disminuye. Sin embargo, a tensiones próximas a la resistencia a la rotura, el volumen comienza a aumentar, lo que indica el agotamiento de la resistencia y, por lo tanto, se genera un cambio de pendiente en la variación volumétrica. En ese punto de inflexión en la variación volumétrica se evidencian las fisuras en el prisma.

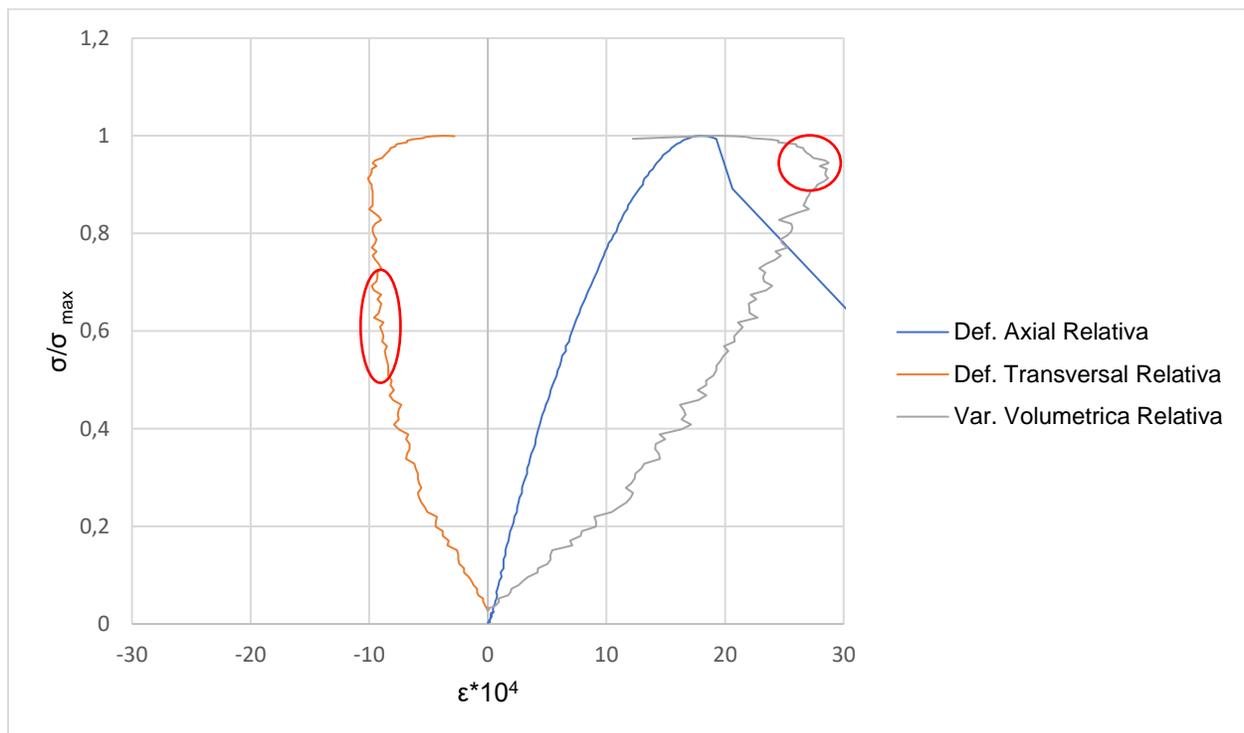


Figura 4.9: Gráfica Curvas de Comportamiento P2-1

En la gráfica se puede observar nuevamente el comportamiento esperado del material. Aumenta la carga axial hasta llegar a la tensión de rotura a una deformación de 0,0018 mm, la deformación transversal crece 0,0011 mm, de manera que el volumen del prisma disminuye durante casi todo el ensayo hasta llegar a la rotura, momento en el cual la gráfica de la variación volumétrica sufre un cambio de pendiente. Dicho punto de inflexión evidencia la aparición de fisuras.

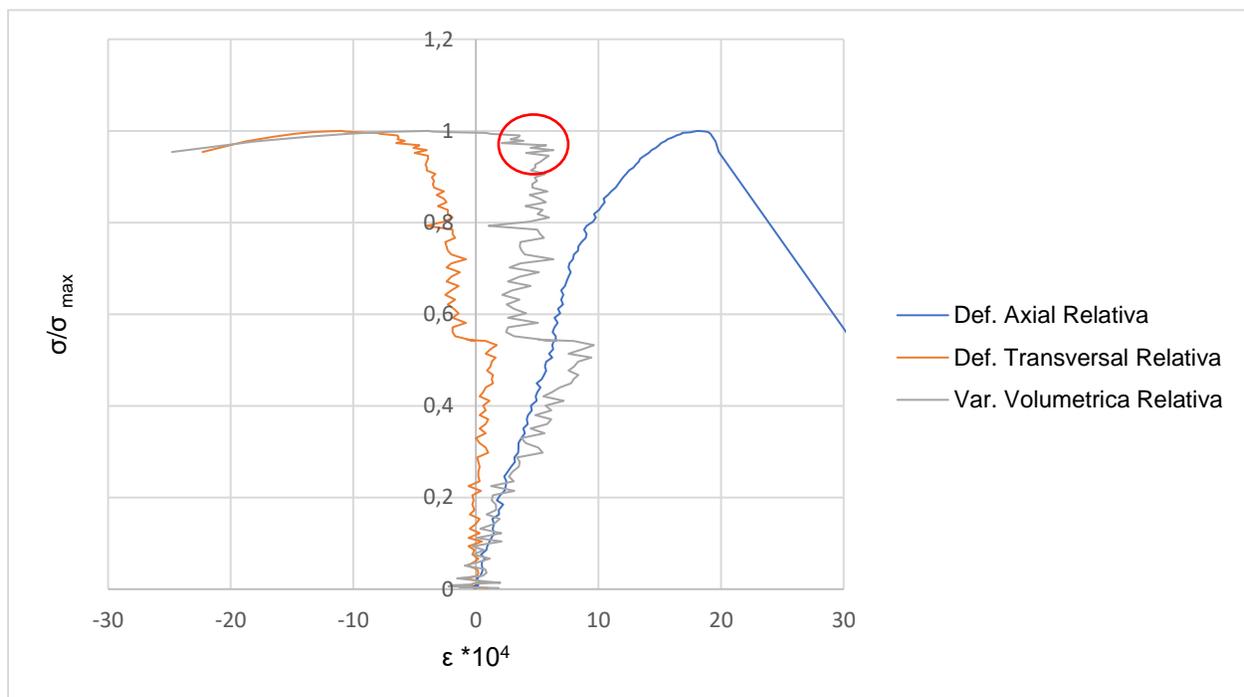


Figura 4.10: Gráfica Curvas de Comportamiento P3-1

4.2.2 Curvas de deformación axial y transversal

En la gráfica se puede observar curvas tensión - deformación del concreto sometido a bajo ciclaje, tanto transversal como axial. Se puede apreciar los seis (6) ciclos de carga aplicados durante los ensayos, así como una amplia deformación remanente entre el punto de carga y el punto de descarga del primer ciclo, teniendo en el punto de carga del primer ciclo una proporción de tensiones de 0,76, alcanzando una deformación de 0,00086 mm y, teniendo en el punto de descarga del primer ciclo una proporción de tensiones de 0,025, alcanzando una deformación de 0,00031 mm. Dicha deformación remanente sobrepasa el límite elástico por lo que, aun cuando se retire la carga, la

deformación es permanente. Una vez alcanzado el sexto ciclo, se incrementó la carga hasta llevar el elemento a la falla, cuando la proporción de tensiones es 1 y la deformación alcanza es 0,0018 mm.

Para las deformaciones transversales se tiene que, para la misma proporción de tensiones en los puntos de carga y descarga del primer ciclo, se tiene que la deformación transversal para el punto de carga del primer ciclo de 0,00018 mm y para el punto de descarga del primer ciclo de 0,00010 mm. La deformación transversal para la proporción de tensión 1 es 0,00046 mm, menor a la deformación axial obtenida a la rotura.

Una vez cumplido con la cantidad de ciclos establecidos, se incrementó la carga aplicada hasta llegar a la tensión de rotura y se compararon con la resistencia última obtenidas de los prismas ensayados monotónicamente, presentando estos últimos una mayor resistencia.

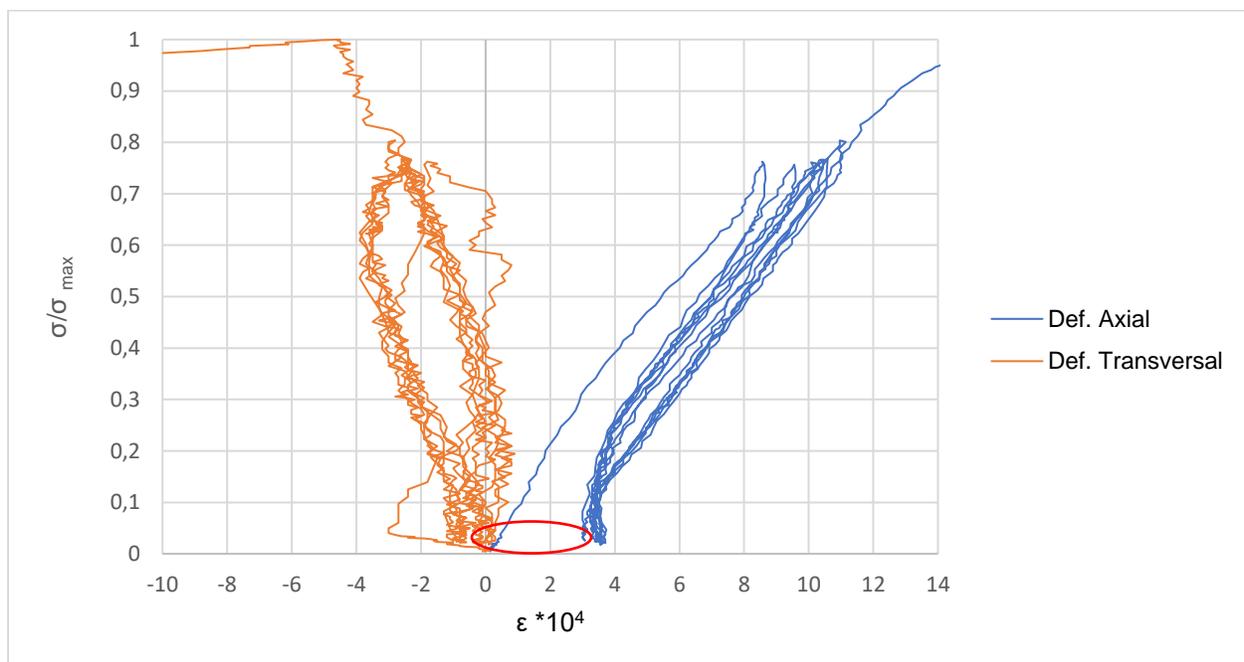


Figura 4.11: Curvas de deformación axial y transversal P1-2

En la gráfica se puede observar curvas tensión - deformación del concreto sometido a bajo ciclaje, tanto transversal como axial. Se puede apreciar los seis (6) ciclos de carga aplicados durante los ensayos, así como una amplia deformación remanente entre el punto de carga y el punto de descarga del primer ciclo, teniendo en el punto de carga del primer ciclo una proporción de tensiones de 0,75, alcanzando una deformación

de 0,0012 mm y, teniendo en el punto de descarga del primer ciclo una proporción de tensiones de 0,020, alcanzando una deformación de 0,00037 mm. Dicha deformación remanente sobrepasa el límite elástico por lo que, aun cuando se retire la carga, la deformación es permanente. Una vez alcanzado el sexto ciclo, se incrementó la carga hasta llevar el elemento a la falla, cuando la proporción de tensiones es 1 y la deformación alcanza es 0,0022 mm.

Para las deformaciones transversales se tiene que, para la misma proporción de tensiones en los puntos de carga y descarga del primer ciclo, se tiene que la deformación transversal para el punto de carga del primer ciclo de 0,0018 mm y para el punto de descarga del primer ciclo de 0,0010 mm. La deformación transversal para la proporción de tensión 1 es 0,0014 mm, menor a la deformación axial obtenida a la rotura.

Una vez cumplido con la cantidad de ciclos establecidos, se incrementó la carga aplicada hasta llegar a la tensión de rotura y se compararon con las resistencias últimas obtenidas de los prismas ensayados monotónicamente, presentando estos últimos una mayor resistencia.

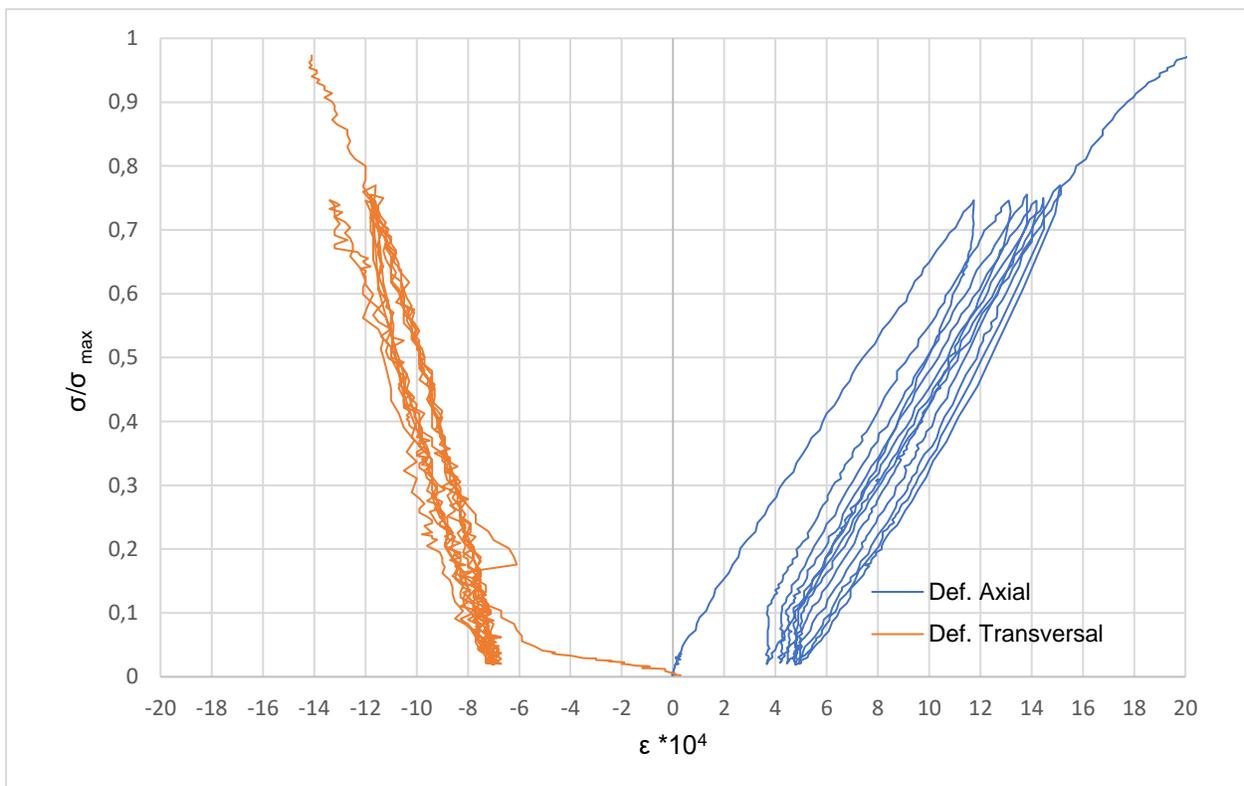


Figura 4.12: Curvas de deformación axial y transversal P2-2

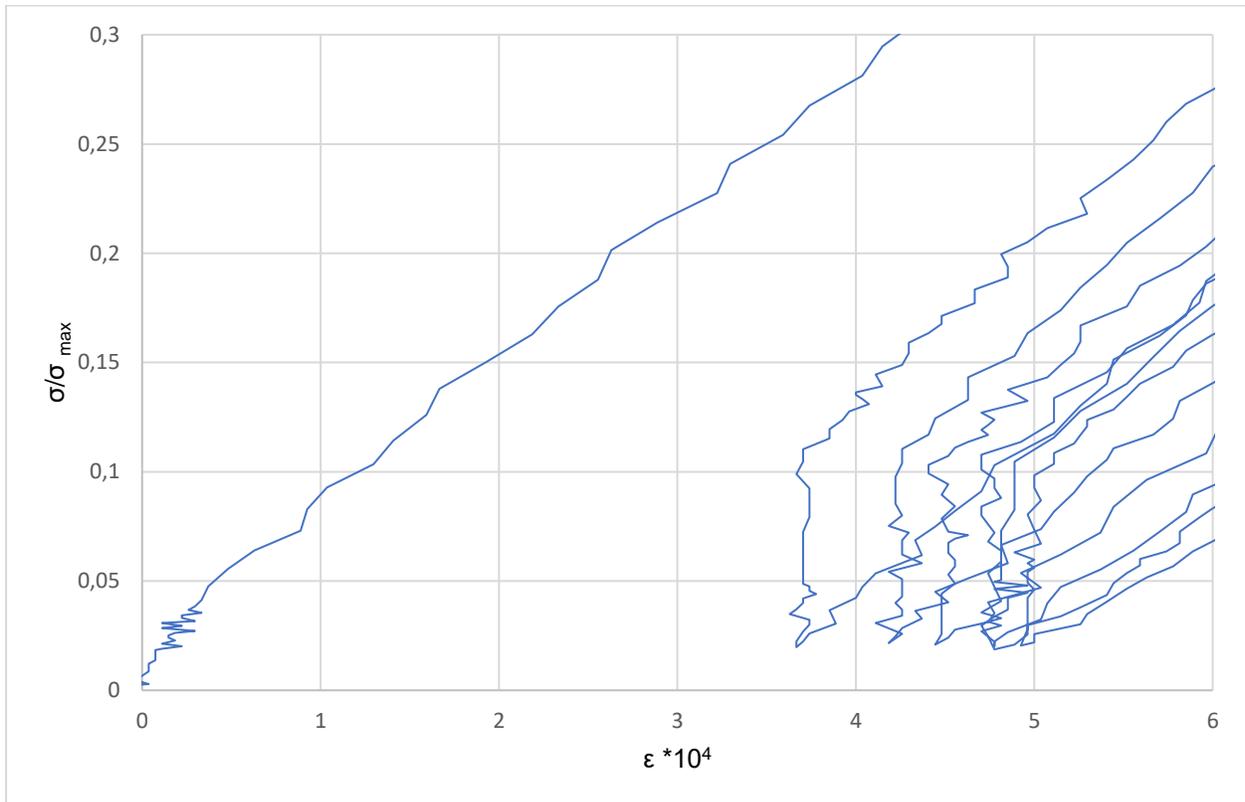


Figura 4.13: Acercamiento Gráfica P2-2

En la gráfica se pueden observar curvas tensión - deformación del concreto sometido a bajo ciclaje, tanto transversal como axial. Se puede apreciar los seis (6) ciclos de carga aplicados durante los ensayos, así como una amplia deformación remanente entre el punto de carga y el punto de descarga del primer ciclo, teniendo en el punto de carga del primer ciclo una proporción de tensiones de 0,80, alcanzando una deformación de 0,0010 mm y, teniendo en el punto de descarga del primer ciclo una proporción de tensiones de 0,017, alcanzando una deformación de 0,00033 mm. Dicha deformación remanente sobrepasa el límite elástico por lo que, aun cuando se retire la carga, la deformación es permanente. Una vez alcanzado el sexto ciclo, se incrementó la carga hasta llevar el elemento a la falla, cuando la proporción de tensiones es 1 y la deformación alcanza es 0,0013 mm.

Para las deformaciones transversales se tiene que, para la misma proporción de tensiones en los puntos de carga y descarga del primer ciclo, se tiene que la deformación transversal para el punto de carga del primer ciclo de 0,00081 mm y para el punto de descarga del primer ciclo de 0,00080 mm. La deformación transversal para la proporción de tensión 1 es 0,00094 mm, menor a la deformación axial obtenida a la rotura.

Una vez cumplido con la cantidad de ciclos establecidos, se incrementó la carga aplicada hasta llegar a la tensión de rotura y se compararon con las resistencias últimas obtenidas de los prismas ensayados monotónicamente, presentando estos últimos una menor resistencia.

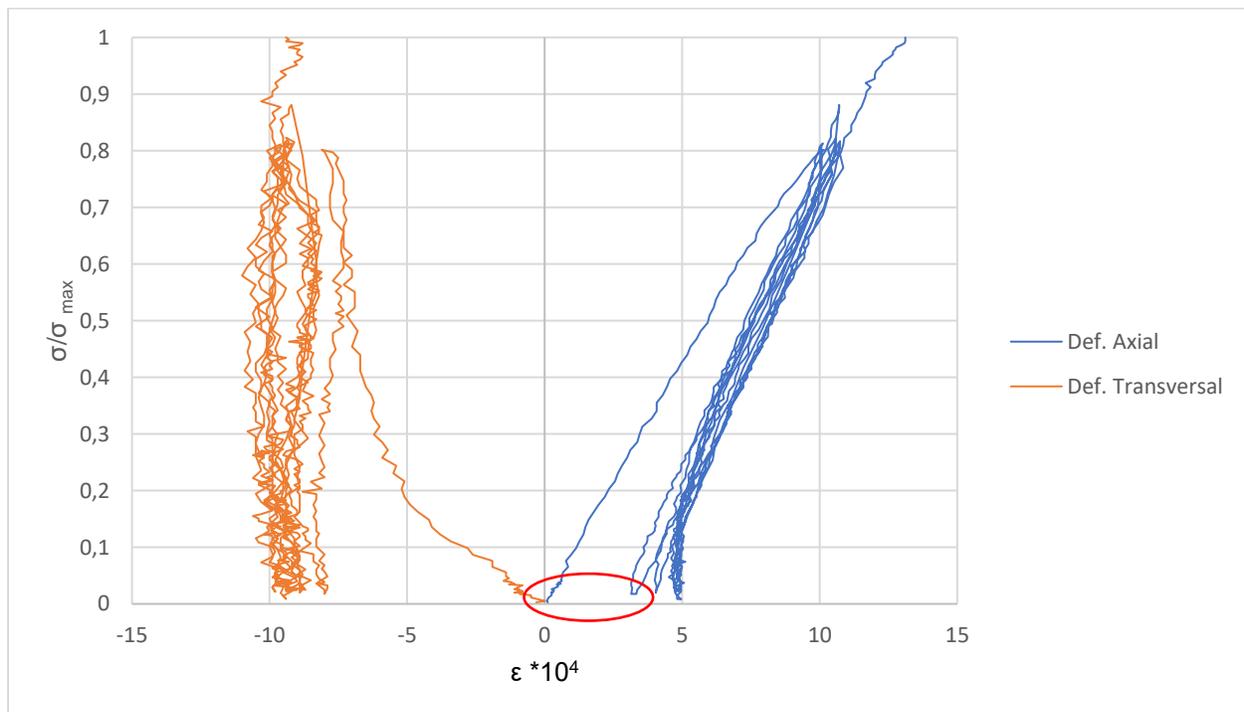


Figura 4.14: Curvas de deformación axial y transversal P3-2

4.2.3 Envoltentes

En cada gráfica se obtuvo una curva envolvente, la cual toma las cargas máximas de cada ciclo y la carga máxima a la rotura y representa el comportamiento del elemento con respecto a carga axial. Cada una de las curvas envolventes sigue una tendencia, que tienden a ser muy similares entre sí, las cuales llegan a su punto de rotura entre 100 y 120 kgf/cm², notándose la diferencia entre las deformaciones asociadas a las tensiones de rotura.

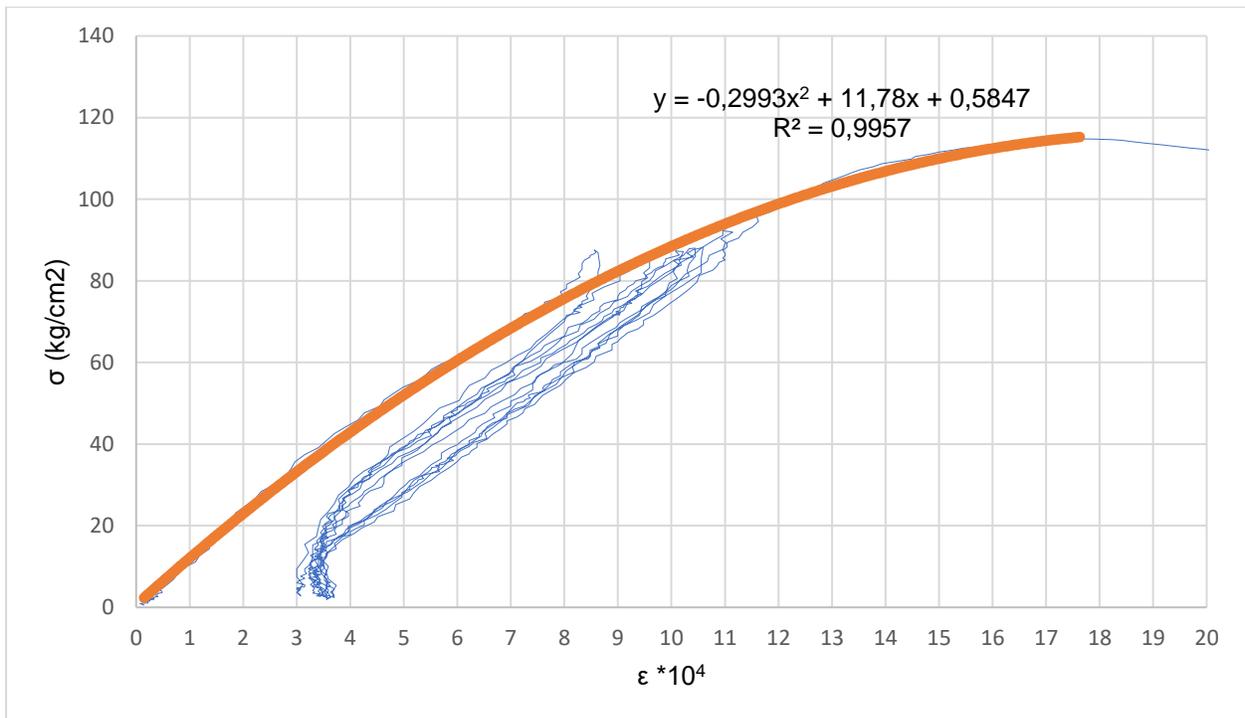


Figura 4.15: Gráfica Envolvente P1-3

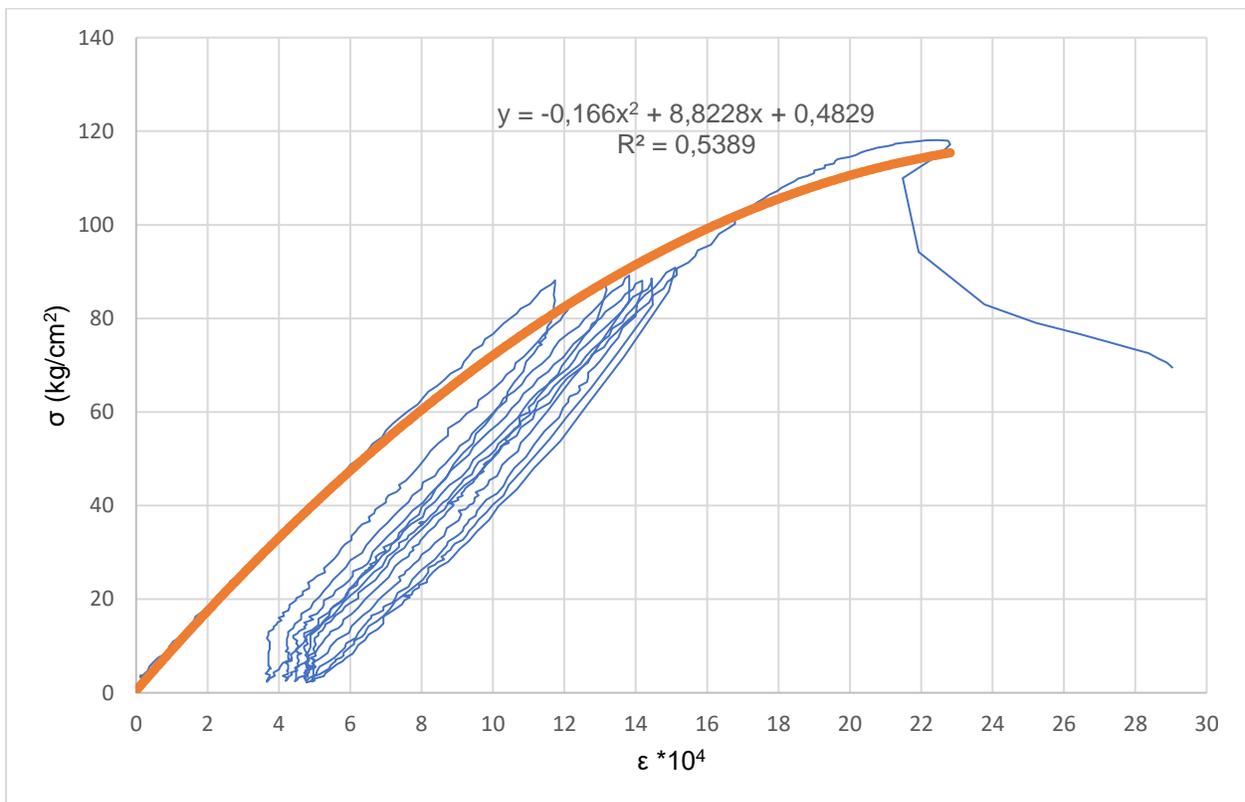


Figura 4.16: Gráfica Envolvente P2-3

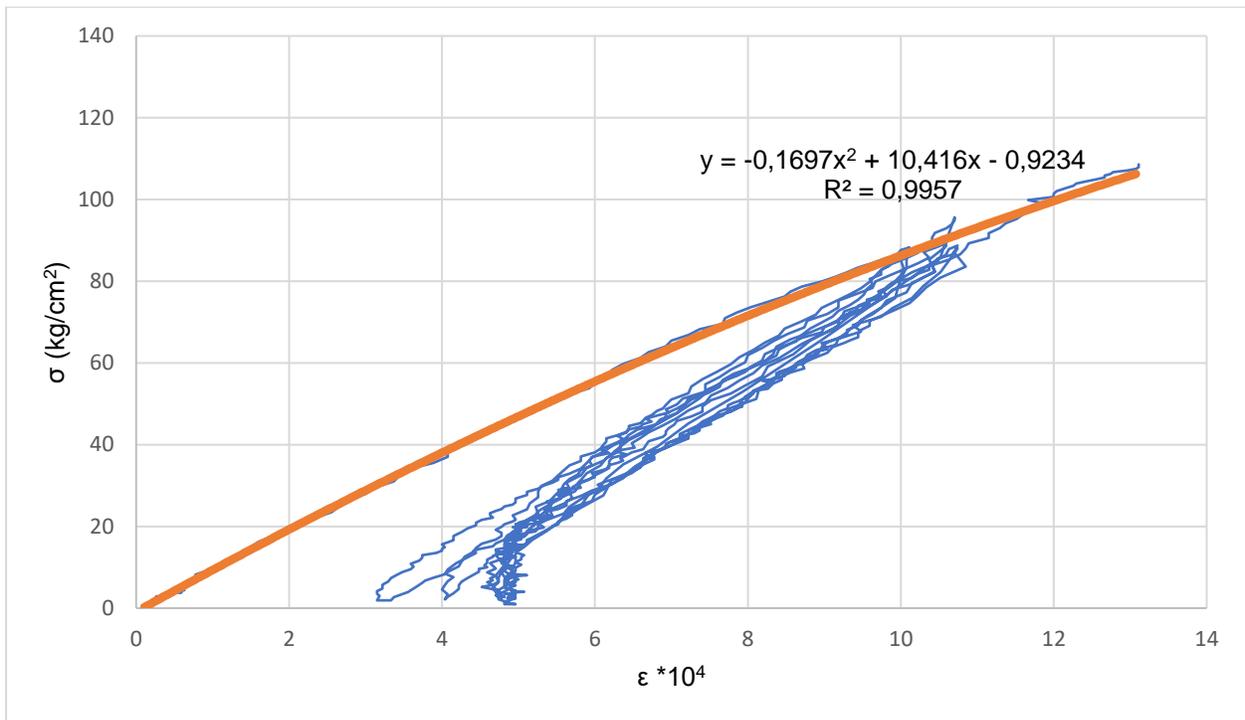


Figura 4.17: Gráfica Envolvente P3-2

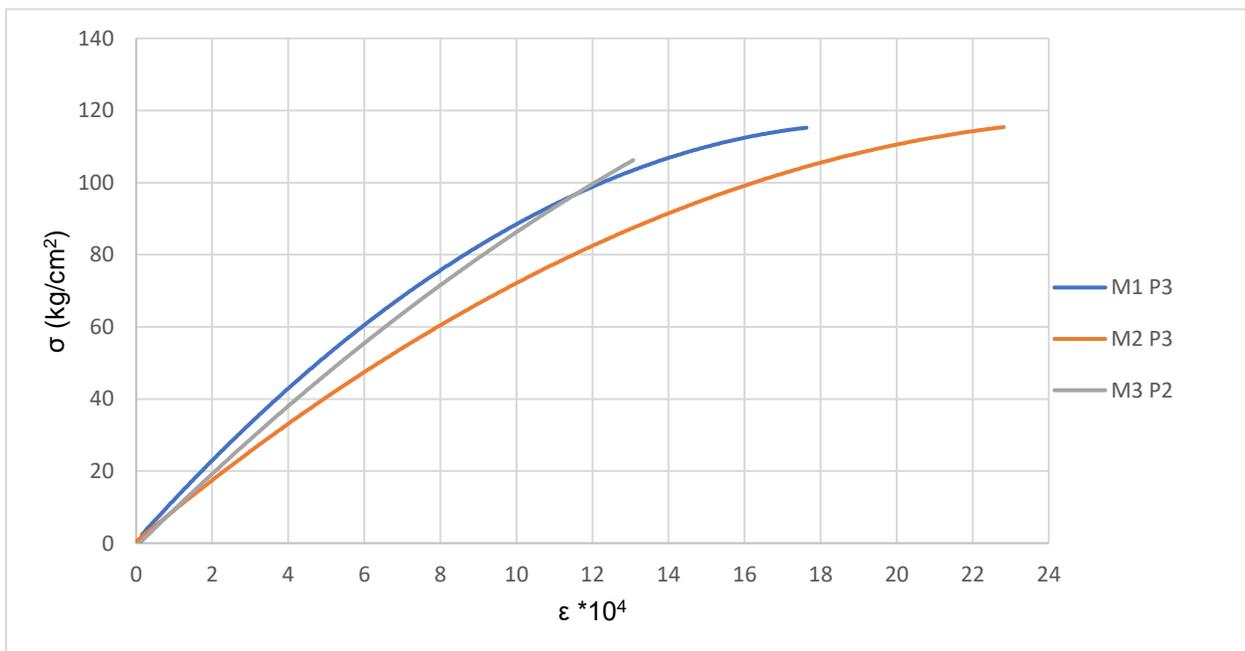


Figura 4.18: Agrupación de Envolventes

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Se realizaron ensayos de carga axial monotónicos y de bajo ciclaje de prismas de concreto de baja densidad, donde en los primeros se llegó directamente a su tensión de rotura mientras que en los ensayos de bajo ciclaje se hicieron seis (6) ciclos completos de carga y descarga para posteriormente ser llevados a su tensión de rotura, a partir de esto se llega a las siguientes conclusiones:

La variación del β entre una mezcla y otra no afecta significativamente a la densidad, a medida que la relación β aumenta, la densidad debería aumentar, lo que es acertado y era el comportamiento que se esperaba debido a que al aumentar el β se disminuye la cantidad de agregado grueso y aumenta la cantidad de agregado fino generando así que el concreto sea menos ligero y por lo tanto tiene mayor densidad. Sin embargo, este comportamiento no sucedió, teniendo variaciones no lineales del β .

La variación del β con respecto a la resistencia no genera una tendencia, teniendo que para la variación del β utilizada se tiene un rango de resistencias entre 100 y 120 kgf/cm². La variación del β tampoco presenta cambios significativos en la variación volumétrica, el cual va disminuyendo el volumen y para tensiones cercanas a la tensión de rotura, se genera un cambio brusco en la pendiente y el volumen comienza a aumentar, haciendo aparición de grietas. Dicho punto de inflexión en la variación del volumen ocurre en el rango de deformación entre 0,0006 y 0,0029 mm.

El comportamiento de las deformaciones en las curvas de bajo ciclaje en la primera etapa muestran una deformación remanente luego de que se aplica la primera carga hasta el 80% de su tensión última, esto ocurre en todos los casos analizados, para un $\beta=0,64$ se tiene una deformación remanente de 0,00031 mm, para un $\beta=0,68$ se tiene una deformación de 0,00037mm y para un $\beta=0,72$ se tiene una deformación de 0,00033 mm, mostrando así diferencias cercanas entre deformaciones aproximadamente del 10%, debido a que la diferencia entre los β de las mezclas es tan poca el cambio de la deformación no es significativa. En la segunda etapa siguen las deformaciones plásticas pero cada vez aumentando con una variación mas pequeña incluso pudiendo llegar al mismo punto cuando la tensión se encuentra en su valor más bajo del ciclo, esto se le puede atribuir al paralelismo en la carga y descarga a partir del segundo ciclo y a la velocidad de carga y descarga la cual se mantiene constante.

En el ensayo monotónico de los prismas, se obtienen valores de módulos de elasticidad cercanos entre sí a excepción del miembro P1-1, teniendo en este una menor rigidez, lo que implica que el miembro presenta mayores deformaciones ante la acción de la carga. La variación volumétrica para los miembros ensayados monotónicamente a la rotura presentan un cambio de pendiente para valores de carga cercanos a la falla, evidenciando la aparición de grietas, tal y como es de esperarse que ocurre según investigaciones anteriores.

En general, las variaciones volumétricas describen eficientemente el daño del concreto a lo largo de la aplicación de las cargas, siendo esta la variable que mejor lo describe. Las deformaciones transversales presentan mayor sensibilidad en la variación volumétrica, coincidiendo con estudios anteriores.

Tomando en cuenta las curvas envolventes de cada ciclo de carga, se puede observar que todas las curvas poseen un comportamiento similar, presentando una tendencia entre las pendientes de cada curva, culminando todas en su recorrido a valores próximos entre ellas. A medida que la pendiente de la curva disminuye, implica que el material pierde rigidez hasta llegar a la rotura.

La cantidad de ciclos utilizada no puede ser considerado fatiga, pero asemejan tensiones similares a las generadas por un sismo. Las deformaciones transversales presentan comportamientos diferentes, en el miembro P2-2 los ciclos de carga y descarga son paralelos entre sí, presentando deformaciones gradualmente a medida que se aplican los ciclos de carga, mientras que en el caso del miembro P3-2 a medida que se aplican los ciclos de carga, las deformaciones varían con pendientes casi nulas.

CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES

Según los resultados obtenidos y los análisis realizados, para estudios a futuro, se recomienda:

El estudio de más miembros, de manera de obtener más resultados y, por consiguiente, mayor información sobre el comportamiento de la mezcla, tanto en ensayos monotónicos, como en ensayos de bajo ciclaje.

El uso de vibradores de concreto, de manera de garantizar una energía de compactación constante obteniendo así un mejor acomodo de los agregados para que no exista mucha variación entre las densidades de los elementos.

Este trabajo se realizó para concreto no estructural, por lo que se recomienda para estudios futuros realizar los ensayos con concretos estructurales.

Para este trabajo se diseñó y elaboró un instrumento de medición para medir deformaciones verticales, y se utilizó una base imantada para medir deformaciones transversales, por lo que se recomienda diseñar un instrumento de medición para que sea capaz de medir deformaciones transversales.

Realizar ensayos de núcleos a los elementos, con la finalidad de determinar el estado del concreto después del ciclaje.

Si se realiza el punto anterior, se recomienda hacer estudios de ultrasonido para verificar y comparar los resultados, de tal manera que se pueda profundizar en las características del comportamiento de la mezcla.

BIBLIOGRAFÍA

González Cuevas, O. M., Robles Fernández-Villegas, F. (4ta). (2005). Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado. México D.F. México: Editorial Limusa, S.A.

Park, R., Paulay, T. (2da). (1983). Estructuras de Concreto Reforzado. México D.F. México: Editorial Limusa, S.A.

Boyer, H. E., Gall, T. L. Metals Handbook. Ohio. United States of America: American Society for Metals.

Marañón Iribarren, I. J., Rodríguez Orofino, I. B. (2015). Estudio del Concreto Sometido a Fatiga de Bajo Ciclaje. (Pregrado). UCAB, Caracas, Venezuela.

Soto, D. (2017). Estudio de Propiedades Mecánicas del Concreto de Baja Densidad para Uso Estructural Elaborado con Agregado Grueso Proveniente de Arcillas Expandidas. (Pregrado). UCAB, Caracas, Venezuela.

Paparoni, M. (1968). Funciones de Daño para Concreto Sometido a Fatiga de Bajo Ciclaje. (Doctoral). UCV, Caracas, Venezuela.

ANEXOS

Elaboración del equipo de medición

Para la elaboración del equipo de medición se utilizó una barra de acero de sección cuadrada de 1 x 1 pulgadas con una longitud de tres (3) metros. De la barra completa se obtuvieron ocho (8) barras más cortas con una longitud de 25,5 cm cada una, cortando la barra con el uso de la tronzadora para garantizar una distancia interna de los marcos entre cara y cara de 23 cm. Una vez obtenidas las ocho barras se procedió a realizar dos marcos (inferior y superior) cada uno con cuatro (4) barras, formando un cuadrado, para poder soldar las barras se biseló los extremos de cada barra con un esmeril y posteriormente se soldaron con electrodos E6013. Se rebajó el exceso de soldadura con un esmeril y luego se utilizó una rectificadora para garantizar que las caras de los marcos estuviesen totalmente planas. A cada marco se le perforaron ocho (8) agujeros con el taladro de pedestal y se les hicieron rosca para utilizar ocho (8) tornillos en cada marco, dos por cada cara, como método de sujeción del sistema de medición al prisma de concreto, en total se utilizaron dieciséis (16) tornillos a los cuales se les limó la punta hasta que quedaran con punta aguda y se les soldaron mariposas en su extremo para poder ajustarlos manualmente, sin necesidad de ninguna herramienta adicional.

Una vez elaborados los marcos se realizó el sistema de vástagos, el cual consta de cuatro (4) varillas metálicas macizas las cuales entran en cuatro (4) camisas cilíndricas de acero las cuales se fabricaron haciendo uso de un torno. Para sujetar las camisas del marco se realizó un avellanado en el marco inferior y se le realizó rosca a cada camisa por su parte inferior, utilizando tornillos de alta resistencia se enroscaron las camisas al marco colocando el tornillo por su interior de forma longitudinal a su eje. Al marco superior se le perforaron cuatro (4) agujeros de manera que las varillas metálicas traspasaran el marco, a cada varilla se le realizó una rosca y en el armado se colocó una tuerca y una contratuerca con arandelas de presión para sujetar las varillas del marco.

El sistema de soporte del potenciómetro fue realizado con una lámina de acero maciza atornillada al marco superior en la cual se remacharon dos flejes los cuales sujetan al potenciómetro y el punto de apoyo del potenciómetro fue realizado con una

varilla metálica a la cual se le realizó rosca de forma que pudiera ajustar a la altura que se desee.

Las características principales que se debían cumplir al realizar el sistema de medición eran que fuese rígido y que permitiera desplazamiento vertical, la primera para garantizar que no se deformara y la segunda para que la medición de la deformación no tuviese vibraciones. Sin embargo, para garantizar su sujeción debía ser lo más liviano posible, por lo que se perforaron huecos de mayor tamaño en dos (2) caras de cada marco para volver el sistema más ligero.







