



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



TRABAJO DE FINAL DE GRADO

Utilización de hormigones reciclados de bajo contenido en
clinker en pretilas prefabricados



Trabajo realizado por:

Jaime de la Fuente Bolado

Dirigido por:

Carlos Thomas García

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil, Mención en Transportes y Servicios Urbanos

Santander, septiembre de 2018

Índice de contenidos

AGRADECIMIENTOS.....	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	7
1.1. Los residuos de construcción y demolición	7
1.1.1. Marco legal comunitario	8
1.1.2. Marco legal nacional.....	10
1.1.3. Normativa de las entidades locales	10
1.2. Los áridos reciclados	12
1.2.1. Introducción	12
1.2.2. Normativas internacionales.....	12
1.2.2.1. Normativa japonesa	12
1.2.2.2. Normativa británica	13
1.2.2.3. Normativa alemana.....	13
1.2.2.4. Normativa china	14
1.2.3. Producción de árido reciclado	15
1.2.3.1. Plantas fijas y móviles	16
1.2.3.2. Eliminación de impurezas	18
1.2.4. Propiedades de los áridos reciclados.....	20
1.3. El hormigón	20
1.3.1. Introducción	20
1.3.2. Estructura del hormigón.....	22
1.3.3. El árido del hormigón	22
1.3.4. La matriz o pasta de cemento hidratada.....	23
1.4. El hormigón reciclado.....	23
1.4.1. Introducción	23
1.4.2. Instrucción Española del Hormigón Estructural EHE-08.....	24
1.4.3. Propiedades físicas y durabilidad del hormigón con árido reciclado	25
1.4.4. Propiedades mecánicas del hormigón con árido reciclado	25
1.4.4.1. Comportamiento a fatiga del hormigón con árido reciclado	26
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y METODOLOGÍAS DE ENSAYO	27
2.1. Propiedades físicas y mecanismos del transporte	28
2.1.1. Densidades relativas, aparentes y saturadas	28
2.1.2. Determinación de la porosidad accesible.....	30
2.1.3. Determinación del coeficiente de absorción.....	30

2.1.4.	Coeficiente de permeabilidad al oxígeno	31
2.1.5.	Permeabilidad al agua	33
2.2.	Propiedades mecánicas del hormigón reciclado.....	34
2.2.1.	Determinación de la resistencia a compresión	35
2.2.2.	Determinación del módulo de elasticidad.....	37
2.2.3.	Determinación del límite a fatiga (LOCATI)	39
2.3.	Ensayos sobre elementos prefabricados.....	42
2.3.1.	Ensayos sobre bajantes	42
2.3.2.	Elementos armados prefabricados.....	43
CAPÍTULO 3. RESULTADOS		46
3.1.	Propiedades físicas del hormigón reciclado	46
3.1.1.	Densidades relativas, aparentes y saturadas	46
3.1.2.	Porosidad accesible, absorción, permeabilidad al oxígeno y penetración de agua	46
3.2.	Propiedades mecánicas del hormigón reciclado.....	47
3.2.1.	Resistencia a compresión	47
3.2.2.	Módulo de elasticidad del hormigón reciclado	47
3.2.3.	Límite a fatiga (LOCATI)	48
3.3.	Elementos prefabricados.....	49
3.3.1.	Bajantes de talud.....	49
3.3.2.	Pretilos o barreras New Jersey	49
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		50
4.1.	Propiedades físicas del hormigón reciclado	50
4.1.1.	Densidades aparentes, relativas y saturadas	50
4.1.2.	Porosidad accesible y coeficiente de absorción	50
4.1.3.	Permeabilidad al oxígeno	51
4.1.4.	Penetración de agua bajo presión	52
4.2.	Propiedades mecánicas del hormigón reciclado.....	54
4.2.1.	Resistencia a compresión uniaxial.....	54
4.2.2.	Módulo de elasticidad del hormigón reciclado	55
4.2.2.1.	Módulo de elasticidad frente a resistencia a compresión	55
4.2.3.	Límite a fatiga por el método LOCATI.....	56
4.3.	Elementos prefabricados.....	59
4.3.1.	Bajantes de talud.....	59
4.3.2.	Pretilos o barreras New Jersey	61
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES		64
CAPÍTULO 6. REFERENCIAS.....		65
CAPÍTULO 7. ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS		67

Índice de tablas.....	67
Índice de figuras.....	68
CAPÍTULO 8. ANEJOS.....	70
Anejo I. Inventario de probetas	70
Anejo II. Resultado de los ensayos de módulos elásticos.....	73
Anejo III. Resultado de los ensayos de rotura a compresión	103
Anejo IV. Resultados de los ensayos de fatiga.....	121
Anejo V. Geometría y resultados de los ensayos sobre bajantes.....	140
Anejo VI. Geometría y resultados de los ensayos sobre pretilas	149

Agradecimientos

A todo el personal de LADICIM, a Adrián Yoris y especialmente a el Doctor Carlos Thomas sin cuya ayuda no hubiese sido posible la realización del presente trabajo.

A la empresa ROCACERO, S.A. por su ayuda y la facilitación de los elementos prefabricados de hormigón.

Por último, señalar que este estudio ha sido realizado gracias a la financiación de los proyectos de investigación BIA 2013-48876-C3-1-R and BIA 2013-48876-C3-2-R concedidos por el Ministerio de Ciencias e Innovación, así como por la ayuda GR 15064 concedida al grupo de investigación MATERIA por parte de la Junta de Extremadura y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional – FEDER.

Resumen

En este trabajo se realizó una evaluación tanto de las propiedades físicas y mecánicas, así como del comportamiento de elementos prefabricados con distintos tipos de hormigones (distintas dosificaciones): un hormigón de control con cemento comercial (Portland tipo I) y árido natural, un hormigón con cemento reciclado y árido natural, dos hormigones con cemento comercial y sustituciones del árido grueso natural por árido grueso reciclado del 25% y 50% en peso, y finalmente, dos hormigones con cemento reciclado y sustituciones del 25% y 50% en peso del árido grueso natural por árido grueso reciclado. Se evaluaron las propiedades físicas: la densidad, la porosidad y las permeabilidades tanto al agua como al oxígeno. Se determinaron también sus propiedades mecánicas: resistencia a compresión, módulo de elasticidad y comportamiento frente a cargas cíclicas (fatiga) en resonancia mediante el método propuesto por Locati. También se realizaron ensayos de caracterización mecánica sobre elementos prefabricados no armados y armados.

Abstract

In this project an evaluation was made of both the physical and mechanical properties, as well as the behavior of precast elements with different types of concrete (different mix proportions): a control concrete with commercial cement (Portland type I) and natural aggregate, a concrete with recycled cement and natural aggregate, two concretes with commercial cement and substitutions of natural coarse aggregate by 25% wt. and 50% wt. recycled coarse aggregate, and finally, two concretes with recycled cement and substitutions of 25% and 50% by weight of the natural coarse aggregate by recycled coarse aggregate. Physical properties were evaluated: density, porosity and permeabilities to water and oxygen. Their mechanical properties were also determined: compressive strength, modulus of elasticity and cyclic loads behavior (fatigue) in resonance by the method proposed by Locati. Mechanical characterization tests were also carried out on reinforced precast concrete elements and concrete elements without steel reinforcements.

Capítulo 1. Estado del conocimiento

En este capítulo, se hace un resumen del estado del conocimiento, en especial de lo relativo a áridos procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) y de los diferentes logros alcanzados hasta la fecha en relación con los contenidos del presente trabajo.

1.1. Los residuos de construcción y demolición

Los RCD son como su nombre indica residuos generados en cualquier obra de construcción, rehabilitación, o demolición. Al ser un residuo ligado a la construcción se generan grandes cantidades a pesar del retroceso de esta, aunque también a la industria, como se puede ver en la Tabla 1. Por su parte la Comisión Europea fija el volumen de RCD en un tercio de todos los residuos generados en la Unión, lo que supone el mayor flujo de residuos [1]

Tabla 1. Residuos generados [2].

Residuos generados [miles de toneladas]		
	Peligrosos	No peligrosos
Industria	1.310	37.417
Construcción	177	35.869

La Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCD Asociación), establece un cálculo estimativo de los RCD producidos por un determinado tipo de obra como se ve en la Tabla 2 [3].

Tabla 2. Cálculo estimativo de producción de RCD.

Tipología de la obra	Ratio m³/m² RCD total
Infraestructuras de carreteras	1,56
Obras de reforma o rehabilitación	0,57
Construcción de obra de nueva edificación	0,14
Demolición completa de obra de fabrica	0,74
Demolición completa de estructura de hormigón	1,22
Demolición de naves industriales con estructura de metal	1,26
Demolición de naves industriales con estructura de hormigón	1,19

El reciclaje y reutilización de estos RCD conllevaría un crecimiento más sostenible ecológicamente puesto que el consumo de recursos naturales se vería disminuido además del consiguiente ahorro en vertederos. Por este motivo, tanto la legislación actual como presumiblemente la futura, van en la dirección del incentivo de reutilización y valorización y sea mediante obligaciones de porcentajes de uso o mediante gravámenes especiales.

1.1.1. Marco legal comunitario

La directiva 2008/98/CE [4] establece que *“antes de 2020, deberá aumentarse hasta un mínimo del 70 % de su peso la preparación para la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales, incluidas las operaciones de relleno que utilicen residuos como sucedáneos de otros materiales, de los residuos no peligrosos procedentes de la construcción y de las demoliciones[...]”*.

Esta directiva 2008/98/CE establece otros puntos clave diferentes del citado anteriormente como son:

- La legislación establece una jerarquía de residuos: prevención, reutilización, reciclado, recuperación con otros fines (como la valorización energética) y eliminación.
- Confirma el principio «quien contamina paga», por el que el productor original de los residuos debe pagar los costes de la gestión de dichos residuos.
- Introduce el concepto de «responsabilidad ampliada del productor». Con ella se impone la obligación a los fabricantes de aceptar y eliminar los productos devueltos tras haber sido utilizados.
- Distingue entre residuos y subproductos.
- La gestión de los residuos debe realizarse sin crear riesgos para el agua, el aire, el suelo, las plantas o los animales, sin provocar incomodidades por el ruido o los olores y sin atender contra los paisajes ni contra los lugares de especial interés.
- Los productores o poseedores de residuos deben tratarlos ellos mismos o hacer que sean tratados por un operador oficialmente reconocido. Estos deben estar autorizados y son inspeccionados periódicamente.
- Las autoridades nacionales competentes deben establecer planes de gestión y programas de prevención de residuos.
- Se aplican condiciones especiales a los residuos peligrosos, los aceites usados y los biorresiduos.
- Quedan fuera del ámbito de la legislación algunos tipos de residuos, como los residuos radiactivos, los explosivos desclasificados, las materias fecales, las aguas residuales y los cadáveres de animales.

Para alcanzar el objetivo de una reutilización de al menos el 70%, la Comisión Europea establece un Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE [1] que consta de un objetivo general cuya finalidad es aumentar la confianza en el proceso de gestión de los RCD, así como la confianza en la calidad de los materiales reciclados procedentes de la construcción y la demolición, considerándose 5 puntos que se pueden ver desarrollados en la Tabla 3:

- a) La mejora de la identificación de residuos, la separación según el origen y la recogida.
- b) La mejora de la logística de residuos.
- c) La mejora del procesamiento de residuos.
- d) La gestión de la calidad.
- e) Condiciones marco y políticas adecuadas.

Trabajo de fin de grado – Capítulo 1. Estado del conocimiento

Tabla 3. Los objetivos y el conjunto de medidas del protocolo de gestión de RCD en la UE [1].

Aumento de la calidad o fiabilidad percibida del proceso de gestión de los RCD y de los materiales reciclados	Mejora de la identificación de residuos, la separación según el origen y la recogida	Definición de residuo			
		Mejora de la identificación de residuos	Auditorías previas a la demolición		
		Inventario del material	Planes de gestión de residuos		
		Mejora de la separación en origen (clasificación in situ)	Separación de residuos peligrosos (descontaminación)		
			Separación de flujos paralelos de residuos		
		Mejora de la recogida de residuos	Desconstrucción controlada y demolición selectiva		
	Procesamiento in situ				
	Mejora de la logística de residuos	Trazabilidad de los flujos de residuos	Cumplimiento de la legislación sobre el registro de residuos		
		Transporte adecuado de los residuos	Cumplimiento de los requisitos de transporte		
		Prácticas de recogida selectiva externa	Clasificación mecánica		
			Clasificación no mecánica		
	Mejora del procesamiento de residuos	Organización y transparencia			
		Vertederos	Eliminación de residuos peligrosos		
		Relleno	Selección		
		Reutilización	Procesamiento/limpieza para reutilización		
		Reciclaje	Proceso de aprobación/rechazo a la entrada		
	Gestión de la calidad	Garantía de calidad	Recuperación de energía		
			Sellos de calidad	Sellos de la UE Sellos nacionales o regionales	
			Certificados y auditorías	Auditorías previas a la demolición Otras auditorías	
		Gestión del lugar de trabajo	Cumplimiento de la normativa		Reglamento sobre los productos de construcción Criterios de cuando un residuo deje de serlo
					Condiciones de trabajo
					Formación de los trabajadores
			Equipamiento adecuado Reparto claro de las responsabilidades Salud y seguridad		
		Organización y transparencia	Transparencia de las operaciones		
			Gestión del lugar de trabajo		
		Condiciones marco y políticas adecuadas	Restricción a los vertidos	Impuestos aplicables a los residuos	
	Prohibiciones de los vertidos				
	Relleno			Relleno de huecos Paisajismo	
Regulación de la gestión de RCD	Materiales vírgenes				
	Estrategias integradas de gestión de RCD				
	Residuos peligrosos de construcción y demolición				
Permisos					
Aplicación de la normativa sobre construcción y demolición					
Contratación pública					
Permiso para instalaciones de reciclaje					
Participación del sector público					
Percepción, concienciación y aceptación por parte del público					

Este protocolo también indica que a la hora de registrar RCD, que es un paso crucial para las actividades de rastreo y trazabilidad, se recomienda seguir la lista europea de residuos establecida por la Comisión Europea (Decisión 2000/532/CE) que consta de 9 categorías (con sus consiguientes subcategorías):

- 17 01 Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos.
- 17 02 Madera, vidrio y plástico.
- 17 03 Mezclas de bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados.
- 17 04 Metales (incluidas sus aleaciones).
- 17 05 Tierra y lodos de drenaje.
- 17 06 Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto.
- 17 07 Residuos de construcción y demolición mezclados.
- 17 08 Materiales de construcción a base de yeso.
- 17 09 Otros residuos de construcción y demolición.

1.1.2. Marco legal nacional

La legislación española que afecta a los RCD es la Ley 10/1998 del 21 de abril, posteriormente ampliada mediante el Real Decreto 105/2008 del 1 de febrero. Este real decreto define los conceptos de *“productor de residuos de construcción y demolición, que se identifica, básicamente, con el titular del bien inmueble en quien reside la decisión última de construir o demoler, y de poseedor de dichos residuos, que corresponde a quien ejecuta la obra y tiene el control físico de los que se generan en la misma”*.

El productor de residuos está obligado a incluir en el proyecto de obra un estudio de gestión de los residuos de construcción y demolición que incluirá aspectos como una estimación de la cantidad generada, medidas de prevención, destino de los residuos, una valorización de los costes derivados de su gestión que deberá incorporarse al proyecto, inventariado de los residuos peligrosos y retirada selectiva.

En este real decreto de 2008 se prohíbe el depósito sin tratamiento previo y demanda el establecimiento de sistemas de tarifas que desincentiven el depósito en vertedero de residuos valorizables. También establece que en aquellas obras en las que los promotores sean las administraciones públicas se deberán fomentar las medidas para la prevención de residuos de construcción y demolición y la utilización de áridos y otros productos procedentes de su valorización.

1.1.3. Normativa de las entidades locales

En Cantabria los RCD se regulan mediante el Decreto 14/2017 que establece el *“Plan de residuos de la Comunidad Autónoma de Cantabria”* y tiene prevista su vigencia hasta el año 2023. Establece la definición de residuo de acuerdo al real decreto 105/2008 y también le da conformidad. Establece una lista de plantas fijas autorizadas para la gestión de residuos como se ve en la Tabla 4, además de un gran número de plantas móviles con una finalidad única de trituración in situ.

Tabla 4. Plantas fijas de reciclaje autorizadas en Cantabria en 2015 [5].

Gestor	Capacidad [t/año]	
Sadisa, S.L.	80.000	Valorización
Valoria residuos, S.L.	362.800	Valorización
Reciclajes Camargo, S.L.	90.000	Valorización
Excavaciones Josman, S.L.	3.600	Valorización

Indica que materiales como la arena o los áridos reciclados se deberían utilizar de forma obligatoria en obra pública. También muestra un mapa de colores (Figura 1) en el que se observa una estimación de las zonas más generadoras de RCD, que como no podía ser de otra manera se corresponden con las zonas con una mayor población como son Santander y Torrelavega y en menor medida la zona del arco-bahía y Castro Urdiales.

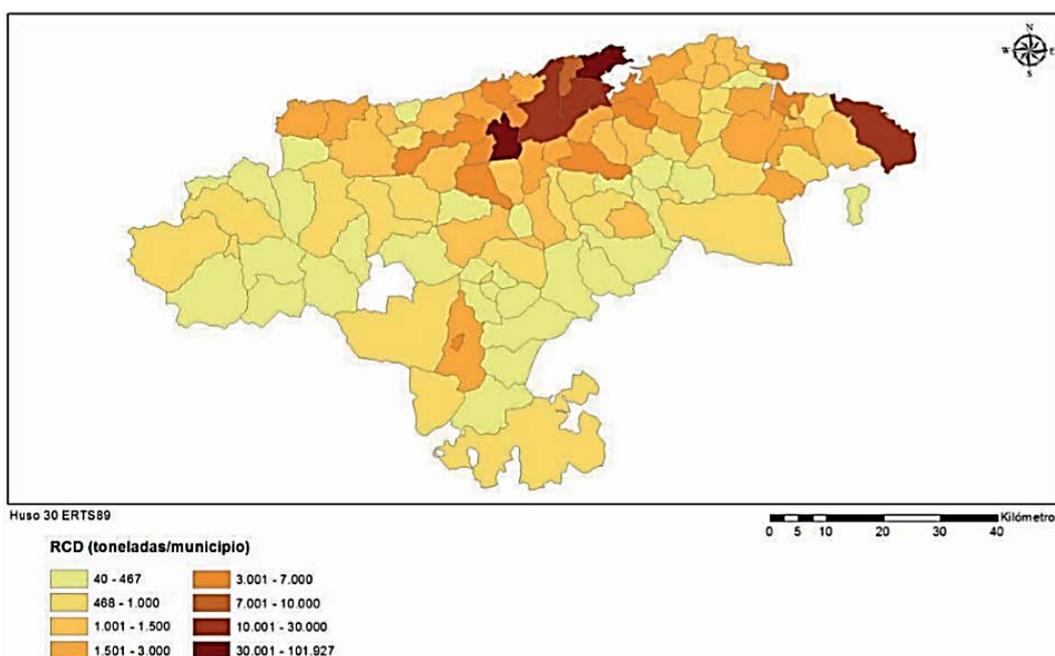


Figura 1. Estimación de la generación de RCD en Cantabria [5].

El plan también contiene un estudio de la evolución futura, el modelo de gestión propuesto unas actuaciones a desarrollar y unos objetivos que son los siguientes:

- Incremento en el control de la generación y gestión.
- Fomentar, por este orden, la prevención, reutilización, reciclado y otras formas de valorización de RCD, asegurando que los destinos a operaciones de eliminación reciban un tratamiento adecuado, y contribuir a un desarrollo sostenible de la actividad de la construcción.
- Fomento de los mercados secundarios de RCD reciclado.
- Erradicación del vertido incontrolado de RCD en la Comunidad Autónoma de Cantabria y asegurar la correcta gestión del 100% de dichos residuos.
- Promoción de la reutilización de materiales no pétreos.

- Sensibilización en relación con la problemática de los RCD, especialmente en las Entidades Locales de la región.

1.2. Los áridos reciclados

1.2.1. Introducción

Los áridos, usados para diversas obras, son la segunda materia prima más consumida por el ser humano después del agua [6] por lo que queda patente que una reutilización de su vida y/o revalorización puede resultar ventajosa para el medio ambiente. Además de su beneficio medioambiental, al ir hacia un futuro más sostenible es posible que la utilización de áridos reciclados se vea incentivada ya sea por una regulación especial o por mayores gravámenes en el momento en el que se hace un vertido de material.

1.2.2. Normativas internacionales

Existen numerosas normativas internacionales dependientes de cada país de origen, cada una de las cuales consta de sus propias particularidades. A continuación, se citarán una serie ilustrativa de normativas de algunos países importantes.

1.2.2.1. Normativa japonesa

En Japón, el JIS [7], estableció 3 clasificaciones de árido reciclado en función de su calidad. Algunas normas para el uso de árido reciclado de alta calidad en hormigón, para el cual se exigen unas determinadas propiedades físicas se puede ver en la Tabla 5.

Tabla 5. Requisitos de propiedades físicas de áridos reciclados en Japón.

	Árido grueso	Árido fino
Densidad seca [g/cm³]	No menor de 2,5	
Absorción [%]	No mayor de 3,0	No mayor de 3,5
Abrasión [%]	No mayor de 3,5	
Porcentaje de volumen sólido para la determinación de forma [%]	No menor de 55	No menor de 53
Cantidad de material que pasa el tamiz de 75 µm [%]	No mayor de 1	No mayor de 7
Contenido de iones cloruro	No más de 0,04	

La norma también dispone de límites superiores para el contenido de sustancias perjudiciales que pueden llevar incorporados los áridos, como se puede ver en la Tabla 6.

Tabla 6. Límites de sustancias perjudiciales en Japón.

Tipos de sustancia	Limite (% peso)
Azulejos, ladrillo, cerámica, asfalto	2,0
Cristal	0,5
Yeso	0,1
Sustancias inorgánicas diferentes al yeso	0,5
Plásticos	0,5
Madera, papel	0,1
Total	3

1.2.2.2. Normativa británica

La normativa británica acerca de los áridos reciclados distingue dos tipos, RCA y RA. El primero de ellos proviene de solo de hormigón mientras el segundo se trata de un árido reciclado mixto. Las normas británicas limitan el uso del RA a superficie de carreteras y hormigones de C16 y C20 como clase de resistencia en ambientes suaves.

Los RCA permiten sustituir el 20% en peso de los áridos naturales en hormigones de resistencia C40 / C50 en ambientes X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1 y DC-1. También permite el uso de un porcentaje mayor de sustitución siempre y cuando vaya acompañado de resultados experimentales documentados.

1.2.2.3. Normativa alemana

La normativa alemana DIN 4226-100 [8] establece 4 tipos de árido reciclado dependiendo de su contenido en hormigón, ladrillos, asfalto, plásticos, morteros, madera, plástico, papel, etc. Para cada tipo se definen dos criterios que se pueden ver en la Tabla 7.

Tabla 7. Tipos de árido reciclado en Alemania.

	Densidad seca [kg/m ³]	Absorción [%]
Tipo 1	≥2000	≤10
Tipo 2	≥2000	≤15
Tipo 3	≥1800	≤20
Tipo 4	≥1500	-

Los áridos tipo 1 están asociados a un porcentaje de áridos naturales y procedentes de hormigón de más de un 90%, también se limitan otros porcentajes como el contenido en asfalto (<1%), contenido en sustancias como vidrio, escorias... (<0,2). El tipo 2, es similar al tipo 1 pero con un contenido de áridos naturales y procedentes de hormigón mayor de un 70%.

Los tipos 3 y 4 son excluidos de la utilización de árido para hormigón estructural.

1.2.2.4. Normativa china

En China, la normativa GB/T 25177-2010 [9] referente a áridos reciclados gruesos para hormigón y GB/T 25176-2010 [10] referente al uso de áridos reciclados finos en morteros y hormigón, establecen 3 niveles con sus respectivas limitaciones dependiendo de la capacidad que debe tener el hormigón.

Respecto al árido reciclado grueso, que es establecido por aquellas partículas superiores a 4,75 mm y que están formadas por hormigón, motero, piedra, tejas y ladrillos procedentes de residuos de demolición. Indica que no puede usarse en hormigones prefabricados, además establece:

- Nivel 1: Cualquier hormigón.
- Nivel 2: Hormigón por debajo de C40.
- Nivel 3: Hormigón por debajo de C25. No adecuado para hormigón frente a heladas.

Algunas características exigibles a cada nivel se pueden ver en la Tabla 8.

Tabla 8. Características árido grueso en China.

	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Absorción (% masa)	<3,0	<5,0	<8,0
Contenido de filler (% masa)	<1,0	<2,0	<3,0
Contenido de limo (% masa)	<0,5	<0,7	<1,0
Contenido de sulfatos (% masa)	<2,0	<2,0	<2,0
Contenido de cloros (% masa)	<0,06	<0,06	<0,06
Densidad aparente (kg/m³)	>2450	>2350	>2250

Además, se indica que aquellos áridos reciclados que no cumplan con las características anteriores podrán usarse en hormigón no estructural.

Respecto a las partículas finas que son aquellas que tienen menos de 4,75 mm, cuya procedencia es la misma que las partículas gruesas también establece 3 niveles:

- Nivel 1: Hormigón por debajo de C40.
- Nivel 2: Hormigón por debajo de C25.
- Nivel 3: Componente no estructural.

Algunas características exigibles a cada nivel se pueden ver en la Tabla 9.

Tabla 9. Características árido fino en China.

	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Contenido de filler (% masa MB<1,4)	<5,0	<7,0	<10,0
Contenido de filler (% masa MB≥1,4)	<1,0	<3,0	<5,0
Contenido de limo (% masa)	<1,0	<2,0	<3,0
Contenido de mica (% masa)	<2,0	<2,0	<2,0
Contenido de sulfatos (% masa)	<2,0	<2,0	<2,0

	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Contenido de cloros (% masa)	<0,06	<0,06	<0,06
% Pérdida de masa en Na₂SO₄	<8,0	<10,0	<12,0
Densidad aparente (kg/m³)	>2450	>2350	>2250

1.2.3. Producción de árido reciclado

En el año 2016 se estima que en España se han consumido 120 millones de toneladas de áridos para la construcción y la industria, datos muy lejanos de los registrados en los años de 2004 a 2008 (que muy difícilmente se vuelvan a producir) como se puede ver en la Figura 2.

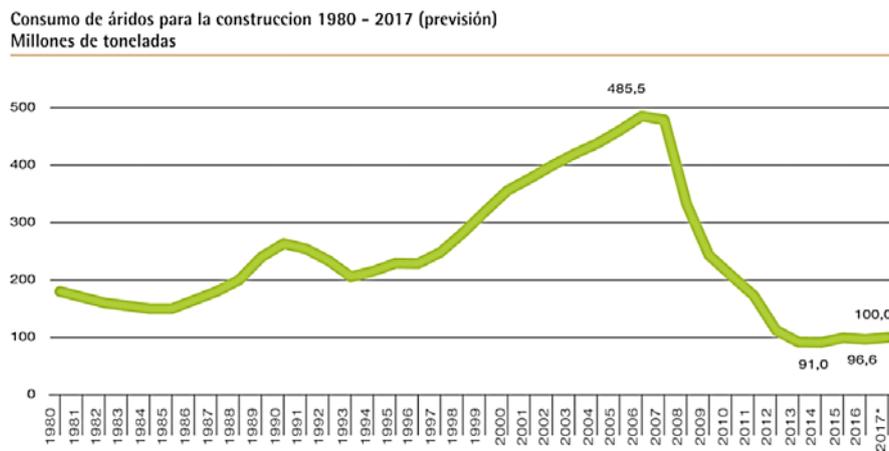


Figura 2. Consumo de áridos en España [11].

De los 120 millones de toneladas consumidas (100 para la construcción), solo 1 millón fueron de árido reciclado, es decir, solo cerca del 0,85%.

Los áridos reciclados son obtenidos en su mayor parte de RCD (Residuos de Construcción y Demolición) lo que hace que presenten un grado de heterogeneidad altísimo, aun siendo del mismo material, propiedades como la humedad o el envejecimiento pueden ser muy diferentes, lo que implica unas propiedades distintas a la hora de evaluar un hormigón reciclado fabricado con estos materiales. El acopio de materiales a la intemperie como se puede apreciar en la Figura 3 hace que factores como la lluvia modifiquen su humedad o el viento pueda arrastrar materiales menos densos.



Figura 3. Acopio de RCD y otros materiales, planta de Valoria (Cantabria).

La producción del árido reciclado se efectúa en instalaciones de planta fija e instalaciones de planta móvil.

1.2.3.1. Plantas fijas y móviles

Una planta de producción de árido reciclado puede ser muy diferente de otra, se puede disponer de una única unidad móvil de machaqueo con selección manual, hasta de varias líneas de producción y limpieza, cada una de las cuales produzca un tipo de árido específico.

El árido reciclado es producido en instalaciones de planta fija e instalaciones de planta móvil. El proyecto GEAR las clasifica en 3 niveles [12].

- Nivel 1: Se trata de unidades móviles de trituración unidades móviles de trituración que reciclan en obra materiales previamente seleccionados, son las más numerosas en el mercado. Procesan áridos procedentes de demolición para ser reutilizados en la misma obra, generalmente en un uso de menor nivel cualitativo que el original de los materiales reciclados.
- Nivel 2: Se consideran las que disponen de un emplazamiento fijo y un proceso productivo completo, pero con una única línea de producción. En algunos casos, la misma línea productiva sirve para tratar alternativamente materiales de características diferentes.
- Nivel 3: Son aquellas que cumpliendo los requisitos del nivel 2 constan de líneas de proceso múltiple y un amplio abanico de productos.

En España el porcentaje de plantas productoras de cada nivel se puede ver en la Figura 4.

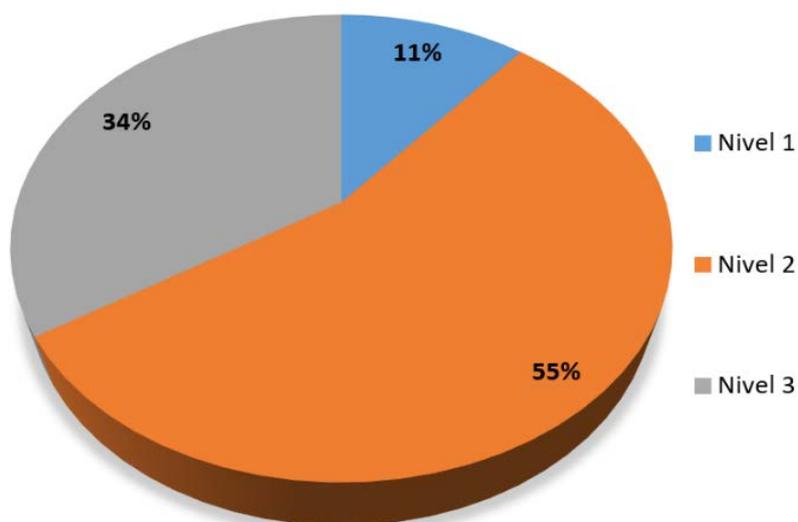


Figura 4. Porcentajes de instalaciones en España según nivel (proyecto GEAR).

A diferencia de la producción de áridos naturales, para la obtención de áridos reciclados es necesario un proceso más complejo que consta de 4 etapas básicas recogidas en la Tabla 10.

Tabla 10. Esquema general de procesos de una planta de reciclaje [13].

Etapa	Tipo de proceso	Proceso
Control de admisión	Manual	Control organoléptico inicial (color, olor y textura)
	Manual y/o informático	Documentación de origen
	Manual	Identificación de contaminaciones
	Manual y/o informático	Pesaje
	Manual	Definición de acopios específicos por material de entrada
Pre tratamiento (separación de entrada)	Manual	Separación manual en acopio
	Mecánico	Separación mecánica en acopio (uso de martillos, palas y retroexcavadoras)
Precibado	Mecánico	Alimentador precibador
		Trómel
Clasificación y limpieza	Manual	Cabina de triaje
	Mecánico	Trómel
		Electroimanes
		Lavadoras
		Sopladores
		Ciclón
Trituración primaria o secundaria	Mecánico	Mandíbulas
		Impacto
		Conos
Cribado	Mecánico	Cintas y criba

Primeramente, se hace un control de admisión que consta de unos procedimientos que implican el control de la documentación y una primera clasificación que garantiza la trazabilidad del residuo por toda la planta. Un buen control en la entrada es decisivo para obtener productos de calidad además de mejorar la productividad puesto que permitirá unos mejores ajustes de las máquinas.

Acto seguido un precibado antes de la trituración con el objetivo de evitar que elementos con una granulometría excesiva puedan producir averías o atascos. Luego una clasificación y limpieza de los áridos con el fin de obtener áridos procedentes solo de un tipo de material. A continuación, se realiza la trituración en la que los áridos adquieren la granulometría deseada. Esta trituración puede ser primaria o secundaria en la que son introducidos áridos que por su tamaño son rechazados en la trituración primaria. A su vez el tipo de trituración influirá en el tipo de árido que se obtendrá, obteniendo pocos finos con las machacadoras de mandíbulas, una cantidad intermedia con las machacadoras de conos, o una cantidad importante con las de impacto.

Finalmente se produce el cribado final en la que los áridos obtenidos después de todo el proceso forma acopios según la fracción de tamaño deseada.

Estos procesos pueden darse en plantas fijas, generalmente ubicadas en los mismos depósitos de residuos, o en plantas móviles, que se desplazan hasta la misma obra generadora de residuos.

En principio las plantas móviles tienen una mayor limitación de la calidad final del producto además de tener una productividad y un rendimiento menor. Las plantas móviles a su vez pueden no disponer de todos los procesos antes mencionados, como por ejemplo el proceso de limpieza que muy raramente está presente debido a las grandes maquinas que son necesarias, por lo que únicamente se hace un control visual en la entrada. También suele ser cierto que los acopios que son utilizados para este tipo de plantas tratan un residuo más limpio y homogéneo procedente de obras o demoliciones específicas.

1.2.3.2. Eliminación de impurezas

Una parte muy importante de la elaboración de áridos reciclados corresponde a la limpieza y eliminación de impurezas que estos llevan consigo. Al ser en muchos casos residuos de demolición su porcentaje de impurezas variará enormemente dependiendo del modo empleado, para evitarlo en su mayor parte se han de hacer demoliciones selectivas quitando previamente todo resto previo de escombros o tierras presentes.

Los elementos más comunes que nos podemos encontrar están recogidos en la Tabla 11.

Tabla 11. Componentes perjudiciales de los RCD [12].

Tipo de material	Componentes perjudiciales	Propiedades específicas	Concepto para clasificación
Material ligero	Madera, papel, plásticos	Ligeros y generalmente grandes	Peso, tamaño y densidad
Material fino	Tierra y arenas	Fracción fina (<4mm) lavable	Tamaño de la partícula
	Contaminantes orgánicos	Ligero	Hidrofilia de la partícula y densidad
	Sal soluble	Soluble en agua	Solubilidad
Material férrico	Hierro y acero	Magnético	Susceptibilidad magnética
Material no férrico	Al, Cu, Zn, Pb, latón	Metal no magnético	Propiedad no magnética
Yeso	Sulfato	Más pesado que el hormigón y la cerámica	Densidad

Los elementos más voluminosos se pueden retirar de manera manual ya sea en el mismo acopio o en una zona de triaje manual, en la que operarios clasifican los residuos que les suministra una cinta transportadora como se ve en la Figura 5.



Figura 5. Cabina de triaje manual.

Los materiales férricos pueden eliminarse mediante electroimanes generalmente una vez acaban de pasar el machaqueo, mientras que, para los materiales no férricos, al no ser magnéticos, son eliminados al hacerles atravesar un campo magnético variable.

Los materiales finos pueden ser separados gracias a un trómel (Figura 6), que es un cilindro que gira y tiene unos orificios de un determinado diámetro por el cual los materiales finos pueden pasar, además de todo esto el cilindro rotatorio está ligeramente inclinado.



Figura 6. Vista de un trómel, planta de Valoria (Cantabria).

Los materiales ligeros como plásticos pueden eliminarse mediante sopladores aplicadores de corrientes de aire que provocan su arrastre.

Otros elementos como el yeso han de controlarse desde un primer momento evitando la entrada de proporciones importantes debido a su contenido en sulfatos.

Para la limpieza, se pueden dar dos tipos, mediante flujos de aire y/o a base de agua siendo estas últimas las que producen una mejor calidad, pero teniendo como contrapartida una mayor complejidad además de un mayor coste, puesto que hay que introducir sistemas hidráulicos. La limpieza se puede dar antes del machaqueo, después de este, o en ambos momentos lo que implicaría un mayor coste y una mayor calidad.

1.2.4. Propiedades de los áridos reciclados

Los áridos reciclados pueden ser procedentes de otros hormigones estructurales o de alta resistencia una vez triturados pudiendo ser unos áridos excelentes o áridos mixtos los cuales además de estar compuestos por hormigón triturado contienen partículas cerámicas, de madera y otros elementos. Los áridos reciclados deben ir acompañados de documentación que indique características como, por ejemplo: naturaleza del árido, planta productora, impurezas, etc.

Los áridos procedentes de hormigón tienen cierta heterogeneidad en sus propiedades debido a los distintos procesos a los que son sometidos. Este árido procedente de hormigón tiene normalmente un porcentaje del 70 al 90% de partículas gruesas (≥ 4 mm) y el resto finas (< 4 mm) una vez ha sido triturado. El coeficiente de forma del árido reciclado es similar al árido natural si bien se puede presentar un porcentaje de lajas inferior. Su textura es rugosa y porosa debido al mortero que se encuentra adherido. La densidad de este tipo de áridos suele ser un 5-10% inferior al árido natural considerándose un árido de densidad normal (> 2 g/cm³). La diferencia más notable con respecto a los áridos naturales es su elevada absorción, del orden de un 4-9%. También es aconsejable tener bien presente el origen de los áridos puesto que, por ejemplo, un árido procedente de una obra marítima contendrá un elevado contenido en cloruros [14].

Los áridos reciclados mixtos son aquellos que están compuestos por al menos un 65% en peso de los siguientes componentes: ladrillo y ladrillo sílico-calcáreo, mezclados o no con hormigón. Uno de los mayores problemas que tienen estos áridos es la importante presencia de impurezas como la madera o el yeso que afectaran de manera importante a las futuras propiedades del hormigón. La absorción del árido cerámico grueso oscila entre el 6 y el 25%, aunque mezclados con árido procedente de hormigón se sitúa por debajo del 12%. Por otro lado, la densidad del ladrillo triturado se encuentra en torno a los 1,2-1,8 g/cm³ siendo inferior a la del árido reciclado procedente de hormigón y por supuesto a la de los áridos naturales [15].

1.3. El hormigón

1.3.1. Introducción

Hoy en día conocemos el hormigón como una mezcla de cemento, árido fino, árido grueso y agua, al que se le pueden añadir otras sustancias para mejora de algunas de sus características. Esta mezcla, que en un primer momento puede adquirir la forma deseada, una vez endurecida nos permite obtener un material de elevada resistencia. Esto no siempre fue así a lo largo de la historia, en la que se distinguen 3 etapas:

La cultura romana ya utilizaba su propio hormigón denominado *opus caementium* citado por Marco Porcio Catón (234 – 149 a.C.) y formado por tierra volcánica de la zona de Pozzuoli, arena, piedras y amasado con cal. Con estos ingredientes se obtenía una mezcla que endurecía incluso bajo el agua. Ya Vitruvio, en el capítulo VI del segundo libro *De architectura* daba recomendaciones para unas correctas proporciones de la mezcla: “Una vez que la cal esté apagada, se mezclara con arena, poniendo tres partes de arena por una de cal. Si fuera arena marina o fluvial, con dos partes será suficiente y se mezclará con ladrillos molidos, obteniendo un material aún mejor por su uso” [16].

Durante el medievo el hormigón romano entro en desuso por la caída del Imperio Romano de Occidente patrocinador de esta técnica en el año 476.

A finales del siglo XVIII, el ingeniero inglés John Smeaton estudió la cultura y las técnicas romanas y las implementó en la construcción de un faro que estuvo en uso más de 100 años. En 1824, Joseph Aspdin patentó el cemento Portland obtenido a partir de caliza arcillosa y carbón calcinados. En 1854 William Wilkinson, al que se suele atribuir la invención del hormigón armado solicitó la patente de un sistema que incluía armaduras de hierro, aunque fue Monier en 1861, con su patente de hormigón y alambres para la construcción de tiestos y a partir de 1867 sus patentes para la construcción de tubos, placas y puentes con hormigón y acero los que popularizan el hormigón armado. A principios del siglo XX Louis Vicat y Le Chatelier contribuyen al crecimiento de la industria del cemento con sus experimentos químicos y consiguen la fabricación de un cemento de calidad homogénea. En el siglo XX ya se convierte definitivamente en un material sumamente popular para la construcción de todo tipo de elementos por su elevada resistencia y su capacidad de adoptar diversas formas, así podemos ver puentes como el de la Figura 7 ideado por el famoso ingeniero suizo Robert Maillart cuya construcción finalizó en 1930.



Figura 7. Puente de Salginatobel en Suiza.

Cabe destacar el impacto que un material como el hormigón tiene sobre la vida de las personas, la economía global y que ha ayudado de manera notable al progreso. Por otro lado, si bien es cierto que la producción de hormigón sufrió un gran receso a partir del año 2007 como indica la Figura 8, es un material que aun continúa evolucionando y mejorando década tras década.

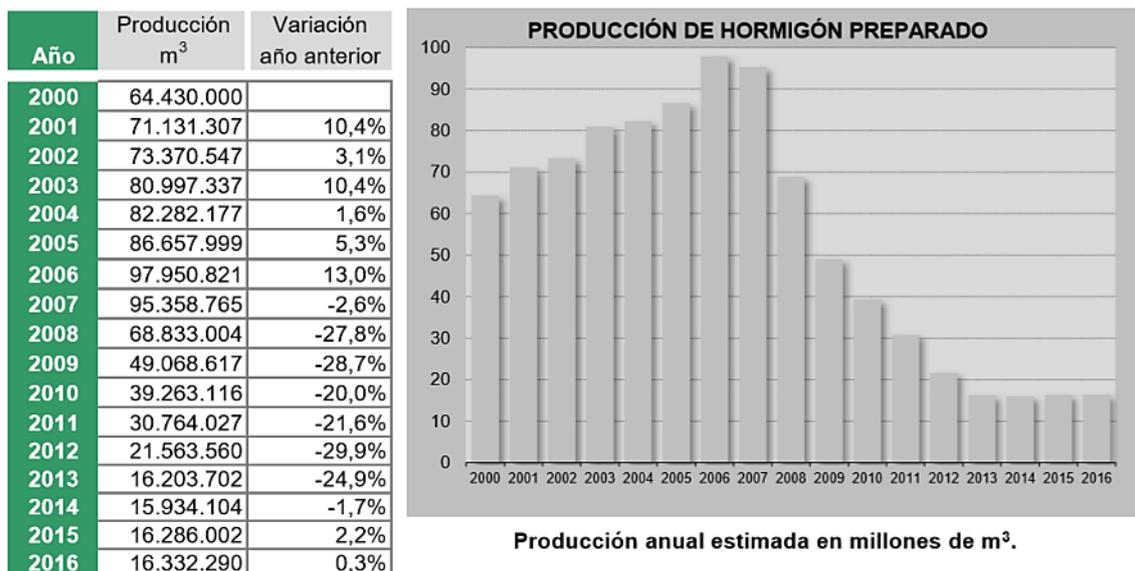


Figura 8. Cuadro histórico de producciones anuales [17].

1.3.2. Estructura del hormigón

Considerando el tamaño existen dos fases en el hormigón, la macroscópica y la microscópica.

La estructura macroscópica queda delimitada a elementos de tamaño superior al denominado límite de percepción visual (0,2 mm) en la que se engloban los áridos y la pasta de cemento hidratada. Los áridos pueden ser de diferentes formas y tamaños y a su vez la Instrucción Española los divide en dos, los áridos finos que son aquellos áridos con tamaños inferiores a 4 mm y los áridos gruesos con un tamaño superior. La mayoría de los hormigones están fabricados con tres tamaños de áridos, arena (<4 mm), gravilla (4-16 mm) y grava (>16 mm).

En la estructura microscópica (aquellos elementos menores a 0,2 mm) se pueden ver las regiones y zonas de contacto entre el árido y la pasta de cemento hidratada, que es generalmente la zona más débil del conjunto con gran influencia en su resistencia.

1.3.3. El árido del hormigón

Los áridos utilizados en el hormigón forman su esqueleto y son responsables de propiedades como el módulo de elasticidad o la densidad puesto que, al ser el componente más abundante y más denso, el utilizar un árido con una determinada densidad implicará un aumento o disminución del hormigón resultante. Por norma general la elección de un árido u otro no afecta a la resistencia del hormigón puesto que existirán zonas más débiles que serán susceptibles de una rotura previa.

Los áridos naturales son fundamentalmente de dos tipos: los cantos rodados procedentes de ríos, cuya característica principal es su forma redondeada y sus escasas o nulas aristas además de que la obtención de este árido implicaría un grave impacto ecológico en su zona de extracción y los áridos de machaqueo que proceden de plantas de machaqueo en los que la roca ha sido triturada para ajustarse a una determinada granulometría y el resultado es un árido irregular

con numerosas caras de fractura. En la Figura 9 se pueden apreciar las diferencias visibles entre un tipo y otro.

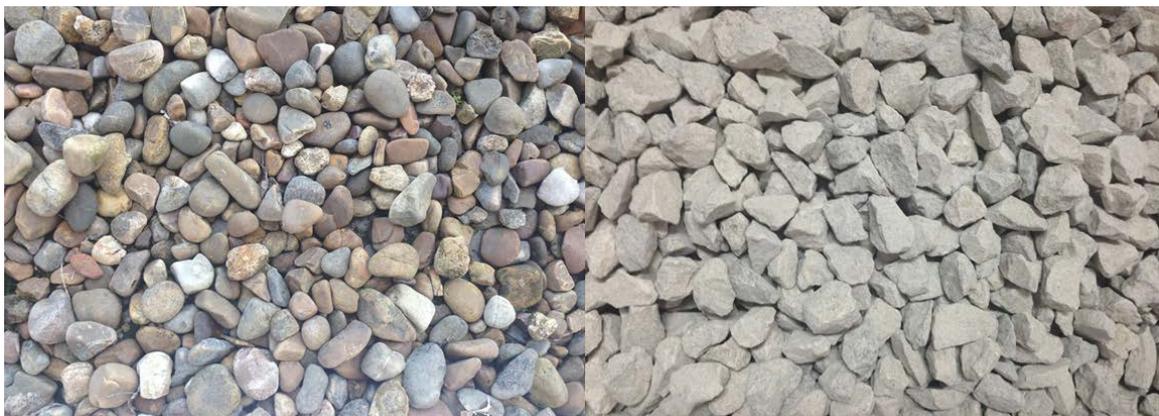


Figura 9. Árido natural (izq.) y árido de machaqueo (dcha.).

1.3.4. La matriz o pasta de cemento hidratada

Con una densidad de entre 3 y 3,2 g/cm³ el cemento Portland tipo I está constituido con al menos un 95% de clinker, pudiendo ser el 5% restante componentes secundarios como implica la norma EN 197-1. El clinker de cemento Portland debe tener al menos un 66% de su masa constituida por: silicatos tricálcicos (alita) que abarcaran en torno al 40-60%, silicatos bicálcicos (belita) en proporciones del 20-30% y pudiendo ser el resto combinaciones de óxido de aluminio, óxido de hierro y otros óxidos.

La alita (también denominada C₃S) tiene una velocidad de hidratación grande y produce un incremento de la resistencia rápida y prolongada generando portlandita (CH) y silicato cálcico hidratado (C-S-H).



Por su parte la belita (también denominada C₂S) tiene una velocidad de hidratación pequeña y produce un desarrollo de la resistencia lento y muy prolongado en el tiempo y al igual que la alita genera C-S-H y CH.



El silicato cálcico hidratado es el principal agente generador de la resistencia del cemento y una vez fraguado sirve de unión entre las partículas de árido presente.

1.4. El hormigón reciclado

1.4.1. Introducción

El hormigón reciclado es aquel en el que una parte de los áridos naturales que lo componen han sido sustituidos por áridos reciclados. Estos áridos pueden tener diversos orígenes, siendo los más adecuados los RCD.

Con la sustitución de árido natural por árido reciclado conseguimos reducir el volumen que es necesario extraer de la cantera y se da un nuevo uso a materiales que de otra forma podrían haber acabado en vertedero. Esto hace del hormigón reciclado un hormigón más sostenible, ecológico y puede que también más económico supuesto un ahorro en el precio del árido y en lo que no se tiene que llevar a vertedero.

1.4.2. Instrucción Española del Hormigón Estructural EHE-08

El anejo 15 de la Instrucción Española del Hormigón Estructural EHE-08 [18] versa sobre las recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados. Este anejo recomienda un contenido máximo de árido reciclado grueso del 20% en peso sobre el total de árido grueso, si bien no impide la elaboración de hormigones estructurales con cantidades superiores, siempre y cuando vayan acompañados de estudios específicos y experimentación complementaria. Solo contempla la sustitución de la fracción gruesa del árido, excluyendo los siguientes:

- Hormigones fabricados con árido fino reciclado ($D \leq 4$ mm).
- Hormigones reciclados fabricados con árido reciclado de naturaleza distinta del hormigón.
- Hormigones fabricados con áridos reciclados que procedan de estructuras con patologías que afecten a la calidad del hormigón.
- Hormigones fabricados con áridos reciclados de hormigones especiales tales como aluminosos, con fibras, polímeros, etc.

Limita su uso para hormigón en masa o armado cuya resistencia característica no sea superior a 40 MPa, excluyendo su empleo en hormigones pretensados.

Los cementos contemplados por el anejo 15 de la EHE-08 para el empleo de hormigones con áridos reciclados son los mismos que en un hormigón convencional.

Se establece también algunas generalidades respecto a los áridos, como pueden ser:

- Las partidas de áridos reciclados deben disponer de un documento de identificación de los escombros de origen que debe incluir aspectos tales como: naturaleza del material, presencia de impurezas, detalles sobre su procedencia, etc.
- Se deben disponer en acopios separados.
- Los áridos reciclados se designarán con el formato que se recoge en el Artículo 28 de la instrucción, y en el apartado naturaleza se denominarán “R”.
- El tamaño mínimo permitido es de 4 mm.
- Contenido de desclasificados inferior o igual al 10%.
- Absorción no superior al 7%, y el árido grueso natural no superior al 4,5%.
- Contenido máximo de impurezas como cerámicas (5% del peso total de la muestra), partículas ligeras (1%), asfalto (1%) y otros materiales tales como vidrio, plástico, metales, etc. (1%).
- Recomendación del uso de aditivos para modificar la reología del hormigón, compensando la mayor absorción de agua del árido reciclado si se utiliza en estado seco.
- Los áridos reciclados no deberán presentar reactividad potencial con los alcalinos del hormigón. En el caso de la utilización de áridos reciclados procedentes de distintos hormigones, estos deben considerarse potencialmente reactivos.

- Se recomienda la determinación del contenido de cloruros totales en lugar del contenido en cloruros solubles en agua, aplicando el mismo límite que establece la instrucción para este último.

1.4.3. Propiedades físicas y durabilidad del hormigón con árido reciclado

La norma EHE-08 en su anejo 15 establece una serie de características que debe cumplir el hormigón reciclado en relación a su durabilidad y propiedades físicas

La instrucción establece unos recubrimientos mínimos en función de la resistencia del hormigón y clase de exposición ambiental para hormigones con un reemplazo del 20% por árido reciclado. Para sustituciones de áridos superiores establece que, para mantener los mismos recubrimientos, estos hormigones deben ir acompañados de unos estudios específicos que verifique una durabilidad similar a la de un hormigón convencional.

Como indica la instrucción y diversos estudios han corroborado [19], la inclusión de árido reciclado, que consta de una mayor porosidad hace al hormigón más susceptible de sufrir los efectos del medio ambiente, lo cual deberá tenerse en cuenta. Para este problema la instrucción nos indica que podemos incrementar el contenido de cemento, reducir la relación agua/cemento, o también aumentar el recubrimiento.

La instrucción también establece una serie de consideraciones para el hormigón en relación con diversos ataques ambientales:

- Resistencia frente a la helada: Los áridos reciclados deberán cumplir la especificación relativa a la estabilidad de los áridos frente a soluciones de sulfato sódico o magnésico. En el caso de hormigones con más de un 20% de árido reciclado se necesitan estudios específicos.
- Resistencia frente a los sulfatos y frente agua de mar: la instrucción indica *“En este tipo de clase de exposición, la utilización del árido reciclado está condicionada a que se conozca la procedencia del hormigón de origen, debiendo este haber sido fabricado con cementos resistentes a los sulfatos/agua de mar”*.
- Resistencia frente a la erosión: El árido reciclado tiene que cumplir las especificaciones de Los Ángeles, inferior al 30%.
- Resistencia frente a la reactividad álcali-árido: En ambientes distintos a I y IIb se recomienda la utilización de árido reciclado procedente de un único hormigón de origen, en caso contrario se deberán considerar áridos potencialmente reactivos. Los ensayos de reactividad se efectuarán sobre la mezcla de árido natural y reciclado.

1.4.4. Propiedades mecánicas del hormigón con árido reciclado

Como norma general se entiende que la incorporación de árido reciclado al hormigón disminuye sus propiedades mecánicas. Esta afirmación es correcta si bien tiene matices, siendo muy importante el estado en el que se encuentran los áridos y la relación agua cemento efectiva, ya que la introducción de áridos reciclados secos produce una relación agua/cemento más baja debido su porosidad, mientras que la incorporación de áridos completamente saturados provoca un aporte excesivo de agua [20].

El módulo elástico de los hormigones reciclados es menor que el de los convencionales, llegando a un 45% menos para un reemplazo del 100% [21].

La instrucción española EHE-08 indica que se puede usar su diagrama para reemplazos no superiores al 20% del árido grueso. Para reemplazos mayores se deberán hacer estudios específicos debido a la menor resistencia máxima y a un posible aumento de las deformaciones, debido a la mayor deformación que admiten los áridos reciclados [21].

1.4.4.1. Comportamiento a fatiga del hormigón con árido reciclado

Si bien no se han encontrado estudios o documentación sobre el comportamiento a fatiga de hormigón reciclado en resonancia, sí se encontraron artículos sobre fatiga de hormigón reciclado en baja frecuencia [22,23], aunque el número de estudios es escaso, así pues, es un campo poco explorado y puede ser una posible futura línea de investigación.

El método Locati en frecuencias de 10 Hz, conduce a una buena aproximación del límite a fatiga, además, el uso de árido reciclado produce más pérdidas en el comportamiento frente a fatiga que en resistencia a compresión [24].

Capítulo 2. Materiales y metodologías de ensayo

Este capítulo abordara todo lo relacionado con los materiales y las metodologías seguidas en el presente trabajo.

Fueron utilizados un total de 6 hormigones distintos, un hormigón de control con árido natural y cemento Portland, un hormigón con árido natural y cemento reciclado, dos hormigones con cemento Portland y una sustitución del árido grueso natural por árido reciclado del 25 y del 50%, y finalmente 2 hormigones con cemento reciclado y una sustitución del árido grueso natural del 25 y del 50%. En la Tabla 12 puede se muestra un resumen de lo indicado.

Tabla 12. Lista de hormigones.

HP	Cemento Portland y árido natural
HP-R	Cemento reciclado y árido natural
HR-25	Cemento Portland y un 25% de árido reciclado
HR-50	Cemento Portland y un 50% de árido reciclado
HRR-25	Cemento reciclado y un 25% de árido reciclado
HRR-50	Cemento reciclado y un 50% de árido reciclado

Los hormigones con cemento Portland fueron elaborados con un cemento tipo I, según la norma UNE-EN 197-1 [25] y el cemento reciclado provenía de la molienda de materiales cerámicos provenientes de los RCD [26,27]. El árido natural era de naturaleza caliza y el árido reciclado era mixto, es decir, tiene restos de hormigón, cerámica, madera, etc.

En la Tabla 13 se puede muestra la dosificación utilizada en la elaboración de los distintos hormigones.

Tabla 13. Dosificación de los distintos hormigones para 1m³.

	HP	HP-R	HR-25	HR-50	HRR-25	HRR-50
Arena [kg]	732	732	719	705	719	705
Grava natural [kg]	766	766	568	369	568	369
Gravilla natural [kg]	382	382	284	184	284	184
Grava reciclada [kg]	-	-	178	356	178	356
Gravilla reciclada [kg]	-	-	89	178	89	178
Cemento CEM I [kg]	400	-	400	400	-	-
Cemento reciclado [kg]	-	400	-	-	400	400
Agua [kg]	193	193	202	211	202	211
Superplastificante [kg]	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2
Relación a/c	0,48	0,50	0,53	0,48	0,50	0,53

2.1. Propiedades físicas y mecanismos del transporte

En este apartado se describirá la metodología utilizada en el presente trabajo correspondiente a las propiedades físicas y los mecanismos de transporte del hormigón: densidades, porosidades y permeabilidad al agua y al oxígeno.

2.1.1. Densidades relativas, aparentes y saturadas

Para determinar las propiedades físicas del hormigón de alta densidad tales como densidades y porosidades se siguió la norma UNE-EN 12390-7 [28]. Para ello se tomaron cuatro probetas de la dosificación propuesta que fueron cortadas transversalmente a su vez en tres partes de acuerdo con lo citado anteriormente.

Para el cálculo del peso seco (P_s) se mantuvieron las probetas hasta peso constante en una estufa a 105°C, el tiempo requerido fue de aproximadamente 72 horas.

Para el cálculo del volumen aparente (V_a) se colocaron las muestras de las probetas en vacío durante 24 horas con el fin de extraer todo el aire de los poros dispuesto como en la Figura 10. Luego se procedió al llenado del recipiente con agua, que junto con la sobrepresión generada por el vacío hace que los poros se llenen de agua. Finalmente se dejaron otras 24 horas sumergidas en agua a presión atmosférica. Transcurrido todo el proceso, que dura 72 horas, se secan las muestras superficialmente y se pesan con lo que se obtiene el peso saturado con superficie seca (P_{SSS}).



Figura 10. Disposición del ensayo para la determinación de la densidad.

Una vez pesadas las muestras también se sumergen en agua, con lo que se determina el volumen aparente. Para el cálculo del volumen aparente se utilizó una balanza en el que se sumergieron las muestras con la ayuda de un cordel. La balanza fue tarada con el recipiente de agua y el

cordel sumergido antes de cada medición. En la Figura 11 se puede ver la forma utilizada para el cálculo del volumen aparente.



Figura 11. Determinación del volumen aparente.

Suponiendo que la densidad del agua en el laboratorio es de 1 g/cm^3 se obtienen las densidades aparentes y relativas por medio de la siguiente formulación.

$$V_r = V_a - h_a \quad (2.1)$$

Donde:

V_r es el volumen relativo en cm^3 .

V_a es el volumen aparente en cm^3 .

h_a es el volumen de poros accesible en cm^3 .

$$d_a = \frac{P_s}{V_a} \quad (2.2)$$

Donde:

d_a es la densidad aparente en g/cm^3 .

P_s es el peso seco en g.

V_a es el volumen aparente en cm^3 .

$$d_r = \frac{P_s}{V_r} \quad (2.3)$$

Donde:

d_r es la densidad relativa en g/cm^3 .

P_s es el peso seco en g.

V_r es el volumen relativo en cm^3 .

El proceso se resume en la Figura 12.

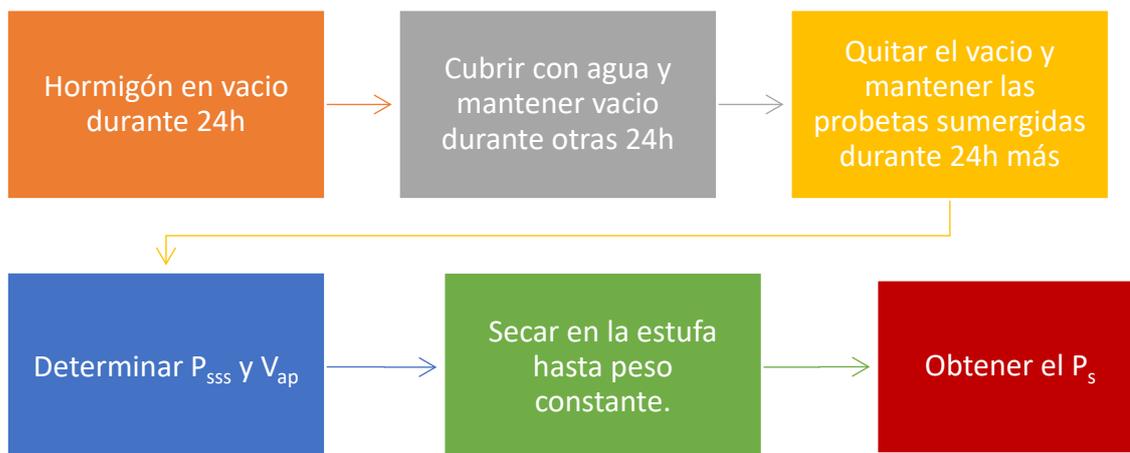


Figura 12. Proceso de determinación de densidad.

2.1.2. Determinación de la porosidad accesible

El volumen de poros accesible (h_a) se puede obtener por diferencias entre peso saturado superficie seca y peso seco ya que la densidad del agua en laboratorio se supone de $1\text{g}/\text{cm}^3$.

$$h_a = P_{sss} - P_s \quad (2.4)$$

Donde:

h_a es el volumen de poros accesible en cm^3 .

P_{sss} es el peso saturado en superficie seca en g.

P_s es el peso seco en g.

La relación entre el volumen de poros accesible y el volumen aparente de la muestra en tanto por cien proporciona la porosidad accesible del material.

$$\text{Porosidad} = \frac{h_a}{V_a} \cdot 100 \text{ (\% volumen)} \quad (2.5)$$

Donde:

h_a es el volumen de poros accesible en cm^3 .

V_a es el volumen aparente en cm^3 .

2.1.3. Determinación del coeficiente de absorción

Una vez conocida la porosidad accesible (h_a) y el peso seco (P_s) se puede calcular la absorción como la diferencia de peso saturado y seco en relación con el peso seco del material. La siguiente formulación expresada en tanto por ciento permite el cálculo de la absorción.

$$\text{Absorción} = \frac{h_a}{P_s} \cdot 100 (\% \text{ peso}) \quad (2.6)$$

Donde:

h_a es el volumen de poros accesible en cm^3 .

P_s es el peso seco en g.

2.1.4. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno

La obtención de la permeabilidad al oxígeno de los hormigones a caracterizar se basó en la norma UNE 83981 [29]. Las probetas fueron cortadas mediante una sierra circular desechando las caras superior e inferior obteniendo una nueva altura de 10 cm y procediendo después a un secado en estufa. Una vez cortadas y secas fueron medidas varias alturas y diámetros además de que fueron impregnadas lateralmente con silicona con el fin de mantener al mínimo las posibles pérdidas de oxígeno por los laterales, haciendo que el único flujo de oxígeno que pueda existir sea desde la cara superior a la inferior, e introducidas en un molde de caucho que aseguraba aún más la imposibilidad de pérdidas laterales como se puede apreciar en la Figura 13 y Figura 14.



Figura 13. Probeta cortada e impregnada con silicona para la permeabilidad al oxígeno.



Figura 14. Probeta de permeabilidad al oxígeno en molde de caucho.

Los moldes, con las probetas dentro, fueron metidos en unos portamuestras mecanizados de aluminio que fueron firmemente sellados con la ayuda de un gato hidráulico. La entrada de oxígeno está provista de un manorreductor-regulador capaz de mantener una presión entre 0 y 6 bar, y también de un manómetro regulador intermedio capaz de ajustar la presión de oxígeno aplicada con mayor precisión. Esta entrada de oxígeno se aplica por la cara superior de la probeta, sale por la inferior y el caudal remanente es medido mediante un caudalímetro digital. La disposición del ensayo se puede apreciar en la Figura 15.



Figura 15. Disposición del ensayo de permeabilidad al oxígeno.

En un primer lugar se hace una primera medida (con el fin de tarar el sistema) y se conecta todo el sistema. Posteriormente, transcurridos unos 15 minutos desde el comienzo del ensayo, se toma la segunda medida, cuando la medida que proporciona el caudalímetro ya es estable. La suma de ambas lecturas será la lectura final.

$$L_f = L_0 + L_1 \quad (2.7)$$

Con esta lectura final puede conocerse el coeficiente de permeabilidad al oxígeno K del material con la siguiente expresión:

$$K = \frac{2P_1 L_f H \eta}{A(P_2^2 - P_1^2)} \quad (2.8)$$

Donde:

K es el coeficiente de permeabilidad al oxígeno en m².

L_f es el caudal de gas de salida de la muestra en m³/s.

H es la altura de la probeta en m.

A es el área de la sección transversal de la probeta en m².

η es la viscosidad del gas utilizado en N·s/m².

P₂ es la presión absoluta a la salida de la muestra en N/m².

P₁ es la presión absoluta a la entrada de la muestra en N/m².

Como referencia se puede tener la Tabla 14 en la cual se hace una clasificación de los distintos tipos de hormigones con respecto a su permeabilidad al oxígeno [30].

Tabla 14. Clasificación del hormigón en función de su permeabilidad al oxígeno.

K · (10 ⁻¹⁶) [m ²]	Permeabilidad
< 0,01	Muy baja
0,01 – 0,1	Baja
0,1 – 1	Moderada
1,0 – 10	Alta
> 10	Muy alta

2.1.5. Permeabilidad al agua

Para la obtención de la profundidad de penetración de agua, se siguió la norma UNE EN 12390-8 [31]. En el cual una sección de la probeta es sometida a agua bajo presión, en este caso de 5 bar (equivalente a una columna de 50 m de agua, sin tener en cuenta la presión atmosférica), durante 72 h como se aprecia en la Figura 16, en la cual se observa que la unión entre la columna de agua y la probeta se hace por medio de una junta elástica con el fin de evitar las pérdidas de agua y hacer que este penetre en el hormigón.



Figura 16. Disposición de probetas en el ensayo de permeabilidad al agua.

Una vez transcurrido ese tiempo, las probetas se ensayan mediante el método “brasileño”, se marca con un rotulador permanente la línea que separa la zona mojada de la zona seca de la probeta y se mide la máxima penetración del agua como se aprecia en la Figura 17.



Figura 17. Ejemplo de frente de penetración de agua.

2.2. Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

En este apartado se expondrán las metodologías seguidas en los ensayos de resistencia a compresión, determinación del módulo de elasticidad y fatiga.

2.2.1. Determinación de la resistencia a compresión

Para la determinación de la resistencia a compresión de las probetas se utilizó la norma UNE-EN 12390-3 [32]. Las probetas fueron refrentadas con azufre puro con el fin de que la fuerza aplicada fuese perfectamente perpendicular además de que fuese aplicada en toda el área de la probeta.

La metodología a seguir para refrentar fue la de calentar pastillas de azufre hasta su punto de fusión a unos 115 °C (esta baja temperatura de fusión lo hace ideal). Una vez convertido el sólido en un líquido se procedió a verterlo en un molde con la cara inferior perfectamente plana donde fue apoyada la probeta (con la cara de la probeta que no fue encofrada en el molde) con la ayuda de dos guías perpendiculares a la base con lo que se consigue una perfecta perpendicularidad entre bases y altura. El proceso se muestra en la Figura 18.

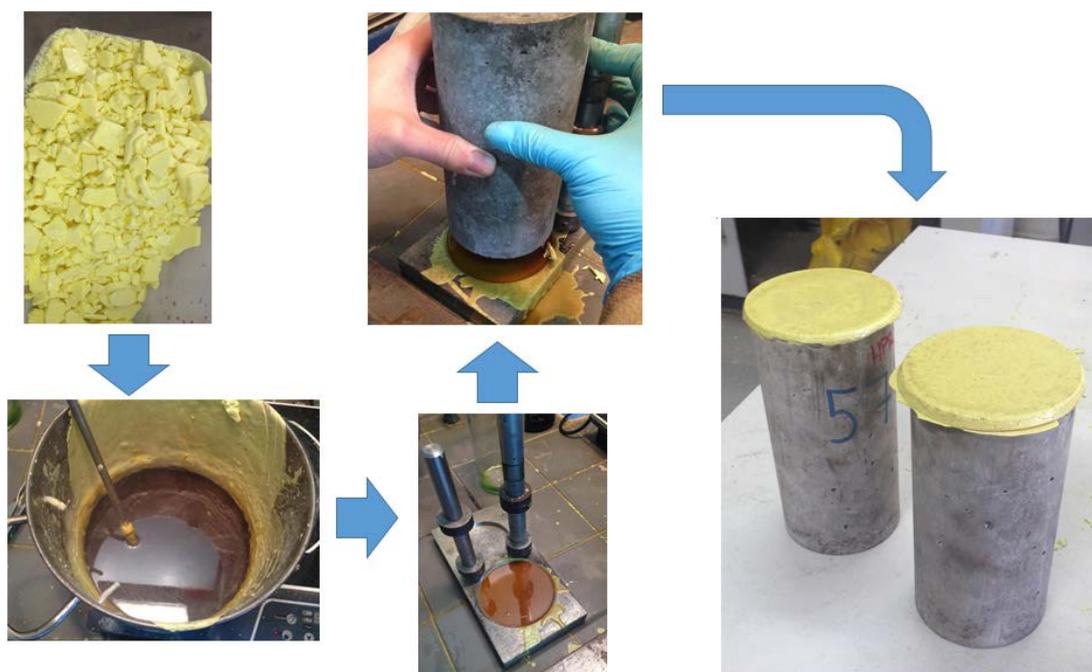


Figura 18. Refrentado de probetas.

Para la medición de las deformaciones producidas también fueron puestas dos galgas extensométricas de 60 mm y 120 Ω diametralmente opuestas en cada probeta.

Para la colocación de estas galgas se marcaron las probetas inicialmente a lápiz con la ayuda de un nivel laser. Una vez marcadas todas las líneas se procedió a colocar el pegamento que junto con un reactivo que la hace endurecer permite la perfecta interacción entre la galga y la probeta. El proceso seguido se muestra en la Figura 19.

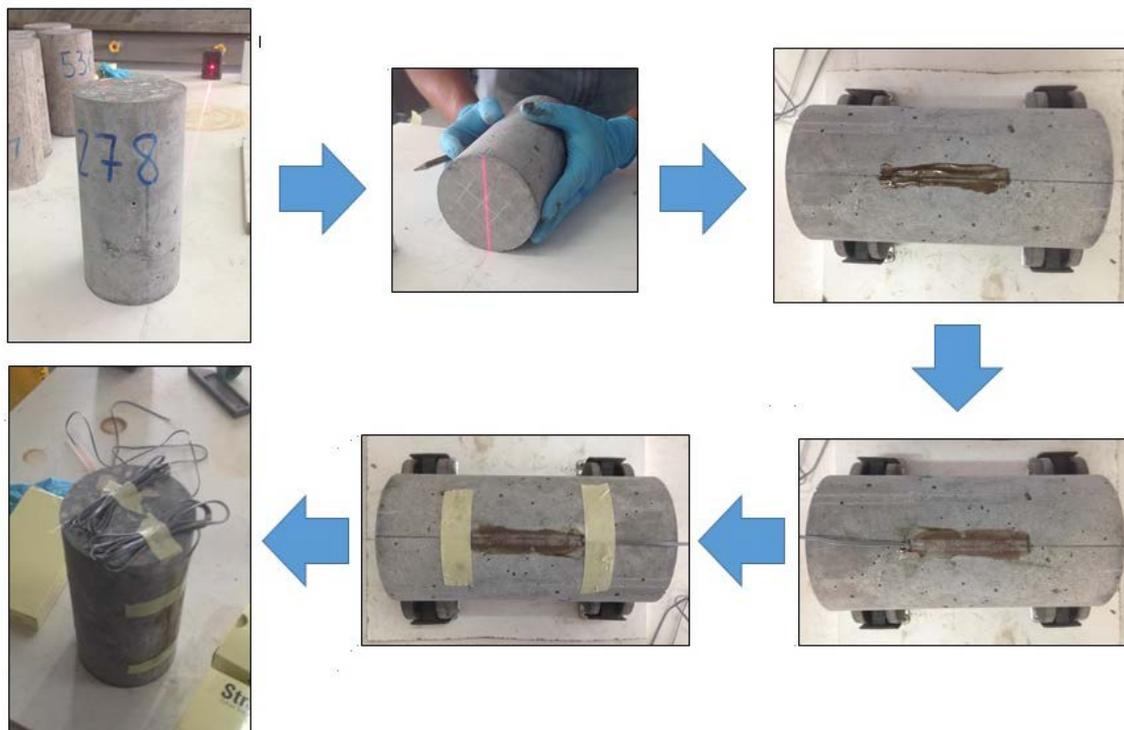


Figura 19. Procedimiento de instrumentación.

Las probetas fueron situadas en la prensa perfectamente centradas, además de utilizar la ayuda de una rotula para que la fuerza aplicada fuese completamente vertical, y comprobando que las galgas extensométricas median correctamente verificándolo con el alimentador de galgas. La disposición final se puede ver en la Figura 20. Se aplicó la carga en control de fuerza a una velocidad de 0,5 MPa/s, y los datos tanto de carga como las deformaciones de ambas galgas fueron recogidos por el ordenador, con lo que después en un procesado se pueden obtener las gráficas tensión-deformación correspondientes.

La resistencia a compresión del hormigón en probetas cilíndricas normalizadas se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{F}{A} \quad (2.9)$$

Donde:

R_c es la resistencia a compresión en MPa.

F es la carga máxima resistida por la probeta en N.

A es el área de la probeta expresada en mm^2 .



Figura 20. Ensayo de compresión.

2.2.2. Determinación del módulo de elasticidad

Para el cálculo del módulo de elasticidad se utilizó la norma UNE-EN 12390-13 [33], en dicha norma se recogen dos procedimientos. En concreto se utilizó la forma B descrita en dicha norma ya que se consideró que podría tener una ejecución más simple además de más rápida y se puede ver en la Figura 21.

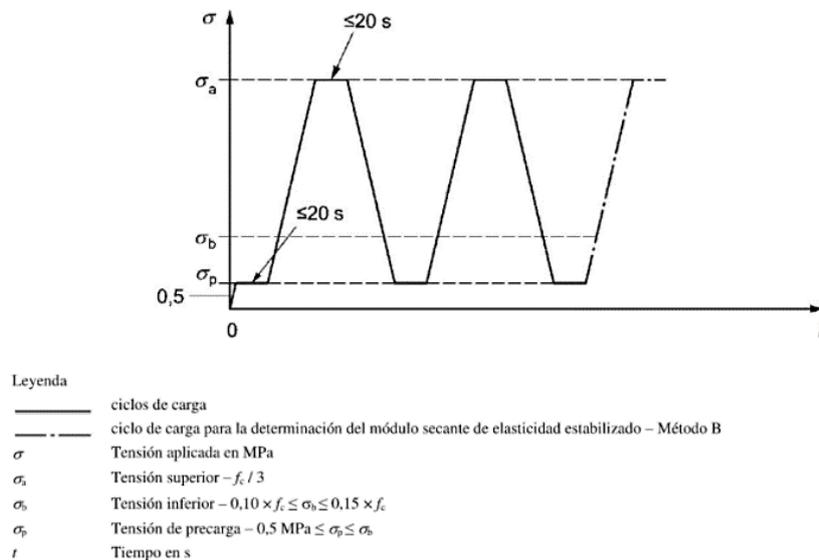


Figura 21. Método B de UNE-EN 12390-13:2014.

Las probetas utilizadas fueron refrentadas e instrumentadas con galgas extensométricas de 60 mm y 120 Ω según el procedimiento descrito en 2.2.1.

Se quitó la probeta anterior si es que la hubiese siempre en control de posición, se conectaron las galgas al alimentador, se balancearon hasta que indicase cero cuando no existe carga y se comprobó que al hacer pasar una corriente de ± 1 V se obtenía una respuesta de ± 1000 microdeformaciones.

En control de posición también se dio una ligerísima carga a la probeta para después comprobar que todo estaba correctamente centrado como se ve en la Figura 22, que la fuerza aplicada (con la ayuda de una bola de acero) por la maquina era perfectamente vertical. Posteriormente, en control de fuerza, indicar que fuese hasta la fuerza correspondiente a 0,5 MPa. La máquina fue configurada con una doble rampa cuyo punto mínimo es la fuerza correspondiente a 0,5 MPa y el punto máximo la fuerza correspondiente al 60% de la fuerza de rotura que se había obtenido previamente en ensayos de compresión.



Figura 22. Disposición del ensayo de determinación del módulo elástico.

Se hicieron 4 ciclos de carga-descarga, con lo que se obtienen 4 curvas de tensión deformación que, ajustadas a una recta, dan lugar al denominado módulo de elasticidad, siendo este la pendiente que se obtiene de la recta ajustada como se puede apreciar en la Figura 23.

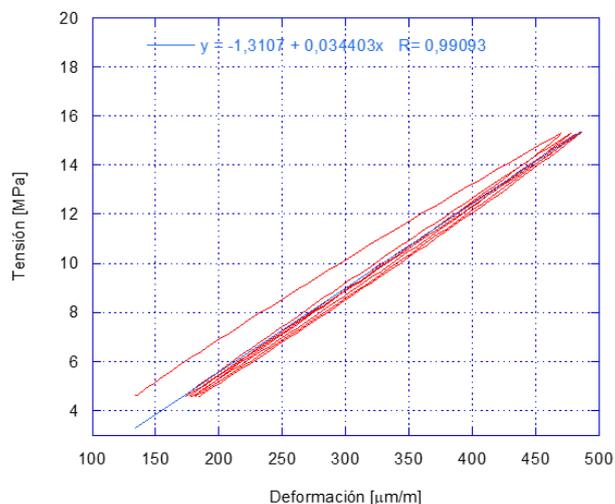


Figura 23. Ejemplo de gráfica de módulo elástico.

2.2.3. Determinación del límite a fatiga (LOCATI)

Se estudió los distintos tipos de hormigón a fatiga en resonancia por el método Locati, el cual aproxima el intervalo de tensiones donde se encuentra el límite a fatiga del material de ensayo. Para la realización de este ensayo se fijó una tensión mínima σ_0 , siempre constante. Se fue variando la tensión máxima σ_j , donde j es función del escalón en el que se encuentre el ensayo. Se programaron 6 escalones de carga en el que cada uno de ellos constaba de 100.000 ciclos, aplicándose una onda senoidal en control de carga. En la Tabla 15 se pueden observar cada escalón con su correspondiente tensión máxima, así como con su amplitud tensional y tensión media.

Tabla 15. Programa Locati.

Escalón [j]	Ciclo [N]	Tensión mínima σ_0 [MPa]	Tensión máxima σ_j [MPa]	Tensión media σ_m [MPa]	Amplitud de tensiones σ_a [MPa]
1	0 - $1 \cdot 10^5$	2,5	12,5	7,5	5,0
2	$1 \cdot 10^5$ - $2 \cdot 10^5$	2,5	17,5	10,0	7,5
3	$2 \cdot 10^5$ - $3 \cdot 10^5$	2,5	22,5	12,5	10,0
4	$3 \cdot 10^5$ - $4 \cdot 10^5$	2,5	27,5	15,0	12,5
5	$4 \cdot 10^5$ - $5 \cdot 10^5$	2,5	32,5	17,5	15,0
6	$5 \cdot 10^5$ - $6 \cdot 10^5$	2,5	37,5	20,0	17,5

La rigidez se obtuvo a partir de las tensiones y deformaciones máximas y mínimas registradas durante el ensayo, en el que se cumplía la siguiente ecuación:

$$Rigidez = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{\varepsilon_{m\acute{a}x} - \varepsilon_{m\acute{i}n}} \quad (2.10)$$

Para efectuar los ensayos de fatiga en resonancia las probetas no pudieron estar refrentadas como en ensayos anteriores como el de resistencia a compresión, puesto que, al constar de dos materiales distintos, uno se daña antes que el otro (en este caso el azufre), además de que cada uno tiene una rigidez distinta, con lo cual la frecuencia de resonancia cambia y no es la del propio hormigón. En este caso se optó por el pulido de la cara no encofrada para conseguir una superficie completamente plana sin rugosidades, si bien es cierto que mediciones más exhaustivas revelaron que el acabado mediante pulido tenía unas irregularidades superiores al acabado mediante azufre.

Para conseguir el pulido se colocaban las probetas con unas mordazas en una guía móvil mediante un tornillo. Una vez fijada la probeta se acercaba poco a poco girando el tornillo a una corona de diamante que degastaba el material poco a poco hasta conseguir el acabado deseado. En la Figura 24 se puede ver la pulidora, una probeta colocada, así como la diferencia entre una probeta sin acabado con una probeta pulida. Además de pulidas las probetas también fueron

instrumentadas con galgas extensométricas de 60 mm y 120 Ω según lo descrito en el apartado 2.2.1.

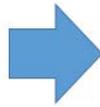


Figura 24. Pulido de probetas.

Los ensayos de resonancia se realizaron en un equipo Vibrophores Amsler 400 HFP 5100 de la marca Zwick Roell el cual se puede ver en la Figura 25. Las principales características con las que cuenta son: una carga máxima de 400 kN, una amplitud de fuerza máxima de ± 200 kN y un rango de frecuencias entre 35 y 300 Hz.

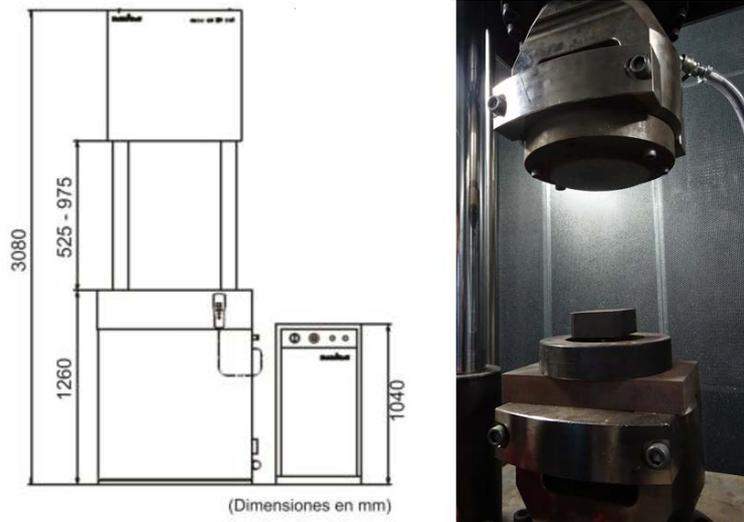


Figura 25. Equipo de resonancia.

Para la realización del ensayo a fatiga se colocaron las probetas en el equipo apoyadas sobre un útil que a su vez estaba apoyado en una rotula con el fin de mejorar que la carga aplicada fuese completamente perpendicular a la probeta. Se conectaron las galgas extensométricas al alimentador de galgas, se comprobó que haciendo pasar una corriente de ± 1 V el ordenador reflejaba ± 1000 microdeformaciones, y también se aplicó una ligera carga con el fin de evaluar si ambas galgas median similar y por lo tanto toda la sección de la probeta estaba trabajando de igual forma. Se conectó la salida BNC de fuerza del equipo de resonancia a un ordenador auxiliar al que también se conectó el alimentador de galgas. Además, se configuro el programa de recepción de datos para que solo registrase una onda de cada 1000, teniendo en cuenta que era necesario registrar al menos una onda completa. Una vez finalizado el ensayo además del registro de la deformación de cada una de las galgas y de la fuerza, se registró tanto la frecuencia media como la máxima de cada escalón. En la Figura 26 se puede ver una probeta justo antes de comenzar el ensayo.



Figura 26. Ensayo de resonancia.

2.3. Ensayos sobre elementos prefabricados

Se realizaron ensayos sobre elementos prefabricados con las dosificaciones HRR-50, HP y una tercera denominada “Rocacero”, propia de la fábrica donde se realizaron los elementos en la que se usaron tanto áridos como cemento convencional.

Se fabricaron 7 bajantes de talud y 3 pretiles que estaban armados con acero.

2.3.1. Ensayos sobre bajantes

Los ensayos en elementos prefabricados sin armadura (bajantes de talud) se fabricaron mediante el vertido y vibrado del hormigón fresco en moldes como se ve en la Figura 23. Los ensayos realizados fueron a flexión mediante una prensa servohidráulica Suzpecar de 200 toneladas. Se utilizó una de las piezas como apoyo inferior con el fin de corregir la diferencia de alturas que presentan las piezas entre un extremo y el otro, asegurándose de que la zona de apoyo este en horizontal. En la Figura 27 se muestran los moldes rellenos con el hormigón en estado fresco y en el Anejo V. Geometría y resultados de los ensayos sobre bajantes se muestra la geometría de las bajantes de talud.



Figura 27. Fabricación de bajantes de talud.

El bajante que sirve de apoyo se centra para que la fuerza aplicada por el rodillo de carga se de en el centro y se coloca una lámina de madera. A continuación, se coloca encima otra bajante a la que se les hace coincidir su extremo de menor altura con el extremo de mayor altura de la pieza inferior y se verifica que el apoyo entre las piezas y la lámina de madera sea lo más uniforme posible, así mismo, se verifica también que todo el conjunto de ensayo este correctamente centrado respecto al rodillo de carga. La disposición del ensayo se puede apreciar en la Figura 28.



Figura 28. Disposición del ensayo en bajantes.

Se acerca el rodillo de carga hasta que hace un primer contacto, y se configura el ensayo. En este caso se optó por una velocidad de 0,1mm/s y se registraron tanto los datos de fuerza como de posición por medio de un ordenador. Una vez rota el bajante superior como se ve en la Figura 29 se finaliza el ensayo y se procesan los datos obtenidos.



Figura 29. Canaleta en el momento de la rotura.

2.3.2. Elementos armados prefabricados

Para la realización de los ensayos sobre elementos prefabricados armados se fabricaron pretilas, cuyas dimensiones se pueden observar en el Anejo VI. Geometría y resultado de los ensayos sobre pretilas (46,3 cm de alto x 100 cm de largo x 80 cm de alto), se utilizó una prensa servohidráulica Instron de 50 toneladas. Los pretilas fueron fabricados con un molde al que previamente se le había dispuesto toda la armadura de acero, al que se vertió el hormigón como se puede apreciar en la Figura 30. Una vez que se produjo el endurecimiento del hormigón se desmoldó y se curó a temperatura y humedad ambiental. Finalmente cabe indicar que se

fabricaron 3 pretils con dosificaciones HP, HRR-50 y una propia de la empresa donde se fabricaron denominada “Rocacero”.



Figura 30. Molde de pretil y vertido del hormigón.

En el momento del ensayo, el pretil fue colocado con la ayuda de una pequeña grúa sobre unas vigas de acero en uno de sus extremos corrigiendo la inclinación que presentan en uno de sus lados, consiguiendo que la aplicación de la carga sobre el paramento en el cual se pueden llegar a presentar los esfuerzos quede de la manera más horizontal posible. En la Figura 31 se puede observar como quedo la pieza colocada un momento antes del comienzo del ensayo.



Figura 31. Disposición del ensayo sobre pretils.

El ensayo consistió en la aplicación de una fuerza, mediante un rodillo de 30 milímetros de radio y una longitud de 400 mm, hasta rotura con una velocidad de aplicación muy rápida con el fin de simular mejor un impacto. Se registraron tanto los datos de fuerza como de posición del actuador en cada momento. En la Figura 32 se ve la rotura justo al final del ensayo efectuado y se aprecia que esta es completamente longitudinal.



Figura 32. Vista de la rotura de un pretil.

Capítulo 3. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos para los distintos tipos de hormigones objeto de estudio. Se seguirá el mismo orden que el utilizado en el “Capítulo 2. Materiales y metodologías de ensayo”, es decir, propiedades físicas como densidades o permeabilidades, propiedades mecánicas como la resistencia a compresión, comportamiento bajo cargas cíclicas (fatiga) y finalmente los resultados relativos a los elementos prefabricados.

3.1. Propiedades físicas del hormigón reciclado

En este apartado se presentarán los resultados obtenidos de los ensayos relativos a densidades, coeficientes de absorción, porosidades y permeabilidades al oxígeno y al agua.

3.1.1. Densidades relativas, aparentes y saturadas

En la Tabla 16 se presenta el promedio de las densidades obtenidas para cada tipo de hormigón, las cuales fueron obtenidas entre 60 y 90 días desde el amasado.

Tabla 16. Densidades de los hormigones.

Hormigón	Densidad aparente [g/cm ³]	Densidad relativa [g/cm ³]	Densidad saturada [g/cm ³]
HP	2,34	2,60	2,44
HP-R	2,35	2,54	2,42
HR-25	2,31	2,55	2,41
HR-50	2,29	2,46	2,36
HRR-25	2,31	2,55	2,41
HRR-50	2,24	2,45	2,32

3.1.2. Porosidad accesible, absorción, permeabilidad al oxígeno y penetración de agua

En la Tabla 17 se muestra el promedio tanto de la porosidad accesible como de la absorción y las permeabilidades al oxígeno y al agua obtenidas para cada hormigón.

Tabla 17. Porosidad accesible, absorción y permeabilidad al oxígeno y al agua del hormigón.

Hormigón	Porosidad accesible [%]	Absorción [%]	Permeabilidad al oxígeno [m ²]	Penetración máxima de agua [mm]
HP	9,83	4,19	1,575E-17	45
HP-R	7,67	3,27	9,53E-18	47
HR-25	9,15	3,96	1,81E-17	52

Hormigón	Porosidad accesible [%]	Absorción [%]	Permeabilidad al oxígeno [m ²]	Penetración máxima de agua [mm]
HR-50	7,02	3,07	2,41E-17	48
HRR-25	9,28	4,02	2,409E-17	54
HRR-50	8,70	3,89	4,591E-17	58

3.2. Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

En este apartado se indicarán los resultados obtenidos en los ensayos realizados en relación a las propiedades mecánicas que presenta el material, tales como su resistencia a compresión y su módulo de elasticidad.

3.2.1. Resistencia a compresión

En la Tabla 18 se pueden ver los valores promedio de resistencia a compresión obtenidos para cada tipo de hormigón a una edad en torno a 160 días y alrededor de 1 año. En el Anejo III. Resultado de los ensayos de rotura a compresión, se pueden ver todas las gráficas tensión-deformación obtenidas en cada uno de los ensayos realizados.

Tabla 18. Resistencias a compresión promedio de los hormigones a 160 días.

Hormigón	Resistencia a compresión a 160 días [MPa]	Resistencia a compresión a 1 año [MPa]
HP	53,5	56,7
HP-R	50,2	46,6
HR-25	47,0	49,1
HR-50	48,8	42,1
HRR-25	47,5	43,7
HRR-50	47,5	42,4

3.2.2. Módulo de elasticidad del hormigón reciclado

En la Tabla 19 se pueden ver los resultados promedio pertenecientes a los ensayos de determinación del módulo elástico del hormigón, se muestran los valores a una edad de 150 días y superior a 1 año. Las gráficas correspondientes a todos los ensayos para la determinación del módulo de elasticidad pueden consultarse en el Anejo II. Resultado de los ensayos de módulos elásticos.

Tabla 19. Módulos elásticos promedio de los distintos hormigones.

Hormigón	Módulo elástico a 150 días [GPa]	Módulo elástico a 1 año [GPa]
HP	35,5	31,7
HP-R	34,1	29,5
HR-25	33,9	30,8
HR-50	31,9	29,3
HRR-25	34,2	27,9
HRR-50	27,7	27,5

3.2.3. Limite a fatiga (LOCATI)

En la Tabla 20 se resumen los resultados promedio obtenidos sobre el hormigón en resonancia utilizando el método Locati. Los ensayos de fatiga se realizaron sobre probetas con unas edades comprendidas entre los 200 y 250 días.

Tabla 20. Resultados de promedios en los ensayos de fatiga.

Hormigón	Escalón de rotura	Frecuencia mínima [Hz]	Frecuencia máxima [Hz]	Tensión de rotura [MPa]	Deformación de rotura [$\mu\text{m}/\text{m}$]
HP	5	76,26	84,91	32,5	2175
HP-R	5	76,84	85,36	29,2	1467
HR-25	3	77,02	82,68	20,0	1400
HR-50	5	76,59	84,48	30,8	1767
HRR-25	5	77,96	84,92	24,2	1583
HRR-50	4	76,61	83,29	17,5	1333

3.3. Elementos prefabricados

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos sobre elementos prefabricados, tanto en el caso de elementos no armados como las bajantes en el que se mostrará la carga de rotura necesaria, como en el caso de elementos armados como los pretiles en los que se mostrará la fuerza del impacto necesaria para conseguir la fractura del elemento.

3.3.1. Bajantes de talud

En la Tabla 21 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos sobre bajantes a una edad de 75 días. Se pueden comprobar sus graficas carga-flecha en el Anejo V. Geometría y resultados de los ensayos sobre bajantes.

Tabla 21. Resultados de los ensayos sobre bajantes.

Hormigón	Código	Flecha [mm]	Carga de rotura [kN]
Rocacero	CA-1	1,5	13,2
Rocacero	CA-3	1,3	14,7
HP	CA-4	2,1	12,2
HP	CA-5	1,9	18,6
HRR-50	CA-2	2,1	16,5
HRR-50	CA-6	2,2	13,3
HRR-50	CA-7	2,0	17,1

3.3.2. Pretiles o barreras New Jersey

En la Tabla 22 se pueden ver los resultados obtenidos en los ensayos de impacto sobre pretiles prefabricados a una edad de 161 días. Las gráficas correspondientes a cada ensayo se pueden consultar en el Anejo VI. Resultado de los ensayos sobre pretiles.

Tabla 22. Resultados de los ensayos sobre pretiles.

Hormigón	Flecha [mm]	Carga de rotura [kN]
Rocacero	2,3	349
HP	3,0	500
HRR-50	2,1	308

Capítulo 4. Análisis de resultados

A continuación, se realizará un análisis de los resultados obtenidos dividido en tres grandes grupos: propiedades físicas, propiedades mecánicas y elementos prefabricados.

4.1. Propiedades físicas del hormigón reciclado

4.1.1. Densidades aparentes, relativas y saturadas

En la Tabla 23 se ha tomado como referencia las densidades obtenidas de la dosificación HP, que contiene tanto un cemento Portland tipo I como áridos comerciales, para evaluar los porcentajes en los que varía su densidad.

Tabla 23. Porcentaje de densidades.

Hormigón	% densidad aparente	% densidad relativa	% densidad saturada
HP	100	100	100
HP-R	100,4	97,7	99,2
HR-25	98,7	98,1	98,8
HR-50	97,9	94,6	96,7
HRR-25	98,7	98,1	98,8
HRR-50	95,7	94,2	95,1

Como se aprecia, todos los porcentajes de las densidades descienden conforme el porcentaje de reemplazo aumenta debido a que al ser un árido reciclado mixto tiene una menor densidad respecto al árido natural. También se pone de manifiesto que el uso de este cemento reciclado no afecta de manera significativa a sus densidades.

4.1.2. Porosidad accesible y coeficiente de absorción

En la Figura 33 se dibuja la porosidad accesible de cada tipo de hormigón mientras que en la Figura 34 el coeficiente de absorción. Se denota una disminución de ambas propiedades en los hormigones constituidos por cemento Portland conforme va aumentando el porcentaje de reemplazo del árido. Sin embargo, en el caso del hormigón fabricado con cemento reciclado el porcentaje aumenta a medida que aumenta el porcentaje de áridos reciclados, esto puede ser debido a que a este tipo de cemento al interactuar con cada vez más áridos reciclados de diversa naturaleza le es más difícil rellenar todos los huecos existentes entre árido y árido, ya sea porque el árido reciclado al ser capaz de absorber más agua durante el amasado provoque un pequeño déficit en este tipo de cemento y sea muy susceptible a variaciones en la dosificación de agua, u otra razón que no ha sido posible identificar.

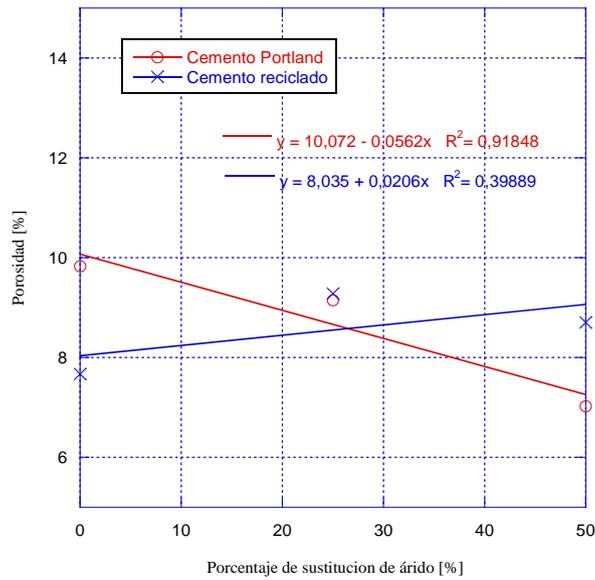


Figura 33. Porosidad abierta del hormigón.

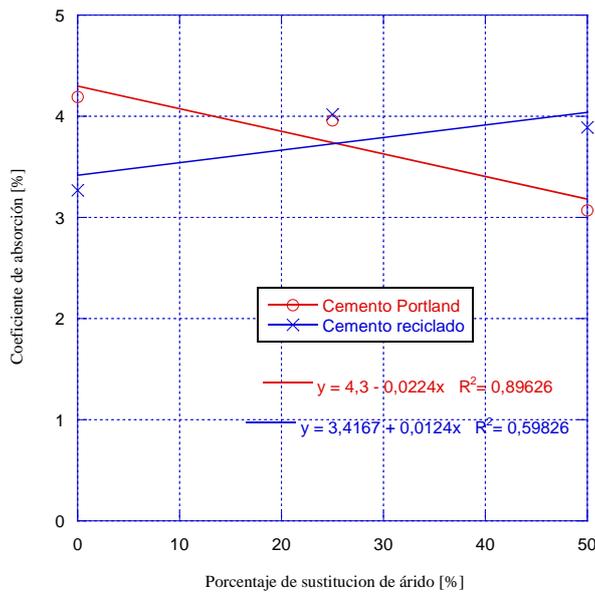


Figura 34. Coeficiente de absorción del hormigón.

4.1.3. Permeabilidad al oxígeno

En la Figura 35 se pueden ver los valores de permeabilidad al oxígeno de cada tipo de hormigón. Se ve un crecimiento de la permeabilidad en función del porcentaje de reemplazo existente, esto se ve reproducido en estudios como los de Ismail [34], Medina [35] o Thomas [36]. Este aumento de la permeabilidad es mayor en los hormigones que contienen cemento reciclado, en el cual su porosidad se ve aumentada conforme aumenta la sustitución del árido, siendo este un factor que puede afectar de manera notable a la permeabilidad.

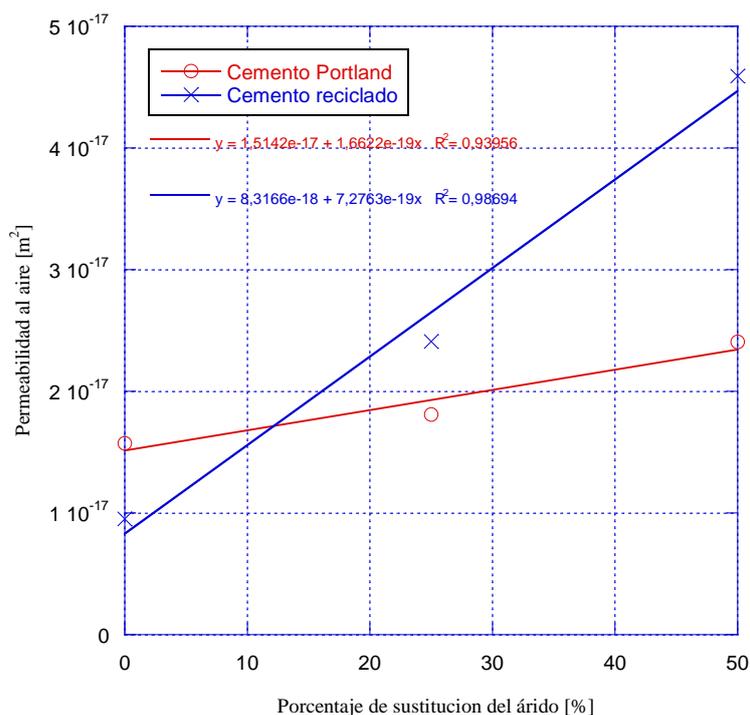


Figura 35. Permeabilidades al aire del hormigón.

4.1.4. Penetración de agua bajo presión

En la Figura 36 se ve la penetración de agua bajo presión obtenido para cada tipo de hormigón y se aprecia como de manera general la penetración aumenta en función del reemplazo del árido natural por árido reciclado. Con los resultados obtenidos solo cumplirían las exigencias de la EHE-08, en el caso de impermeabilización del hormigón con una exposición ambiental IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H y F, el hormigón de tipo HP o HP-R puesto que su máxima penetración al agua ha sido inferior a 50 mm. En el caso del hormigón del tipo HR-50, su penetración máxima también fue inferior a 50 mm, pero no cumplía con la segunda condición, puesto que su penetración media era superior a 30 mm. La máxima penetración en estos hormigones con árido reciclado mixto se ve muy condicionada por la disposición y tipología de los áridos puesto que, la disposición de un árido de naturaleza porosa como una madera en dirección longitudinal hace que el agua bajo presión siga ese camino por ser el que menos resistencia al avance le genera y su penetración máxima aumenta de manera considerable. Esta disposición de los áridos también puede ser la explicación al porque el hormigón HR-25 tiene una mayor penetración que el HR-50.

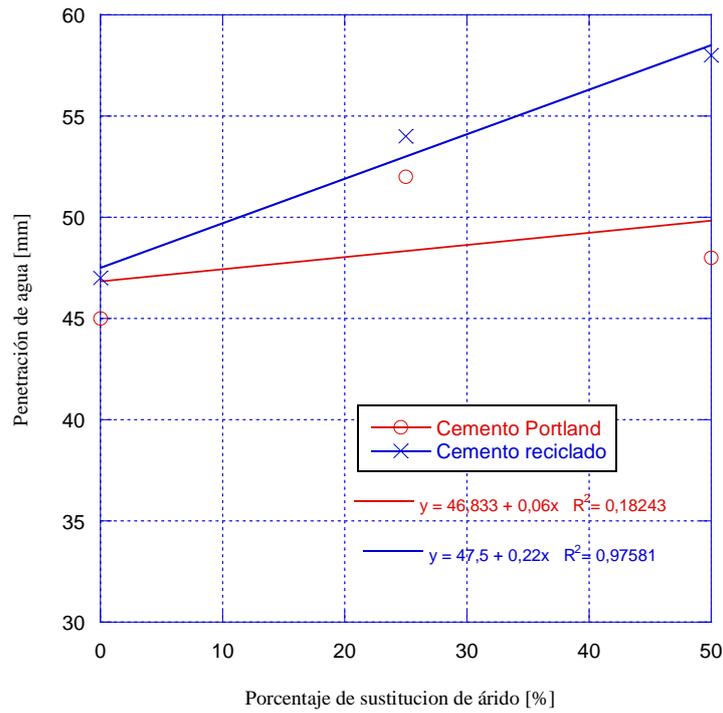


Figura 36. Penetraciones de agua.

En la Figura 37 se puede ver la diferencia de color entre una probeta de cemento comercial y este cemento reciclado y además la presencia de partículas de madera y cerámicas en una probeta HRR-50 con una sustitución del 50%.

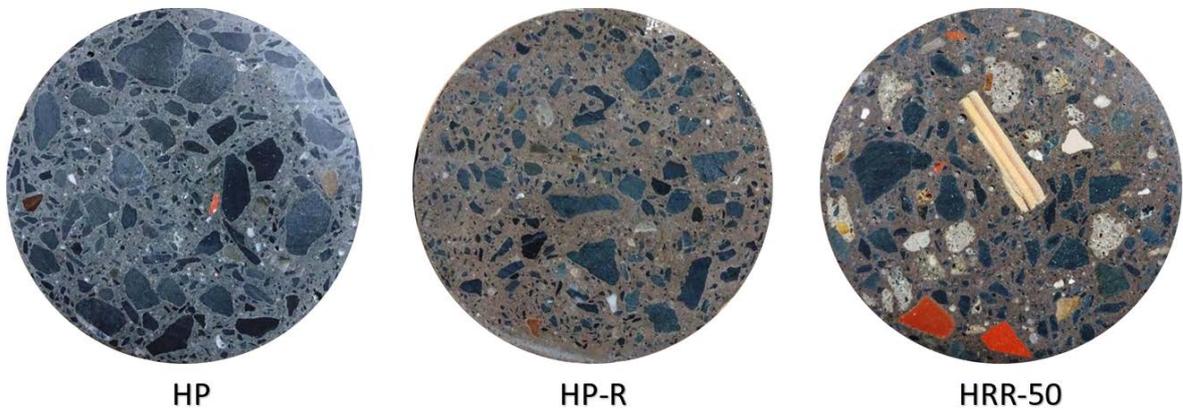


Figura 37. Sección de probetas.

4.2. Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

4.2.1. Resistencia a compresión uniaxial

En la Figura 38 se pueden ver las curvas tensión-deformación producidas por cada tipo de hormigón. Como se aprecia en numerosos estudios [21,37,38], el hormigón que aguanta una tensión mayor es aquel que no tienen ningún porcentaje de reemplazo de su árido, disminuyendo este valor conforme aumenta la sustitución. También se puede apreciar como el cambio de un cemento standard por un cemento reciclado no mejora los resultados producidos. En términos de deformación todos los hormigones obtienen unos valores similares en torno a los 2500 $\mu\text{m/m}$ salvo el hormigón HRR-50, que supera en casi 1000 $\mu\text{m/m}$ los valores del resto. Esto pudiera ser debido a que al tener este hormigón un reemplazo del 50%, la disposición espacial del árido reciclado, a lo que hay que sumar que las deformaciones admitidas por este tipo de árido son mayores, propicien unas deformaciones máximas tan claramente superiores.

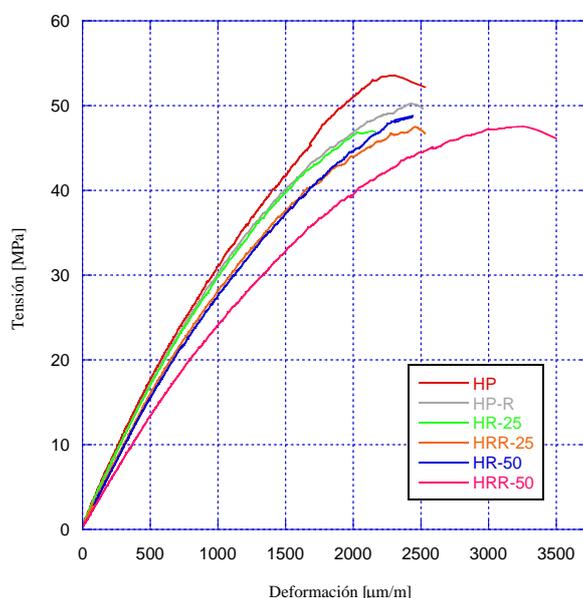


Figura 38. Roturas de hormigón a compresión.

En la Figura 39 se puede ver los mismos hormigones con una edad de un año. Se aprecia como las ventajas de unas deformaciones máximas que llegan a ser incluso mayores del hormigón reciclado desaparecen e incluso son menores que las del hormigón convencional, además, la resistencia a compresión disminuye mientras que la de los hormigones convencionales se ve incrementada. Esta disminución de resistencia también puede ser debida a la aleatoriedad del tipo de árido reciclado y su distribución del que está compuesto el hormigón y que provoca una incertidumbre mayor que los hormigones convencionales.

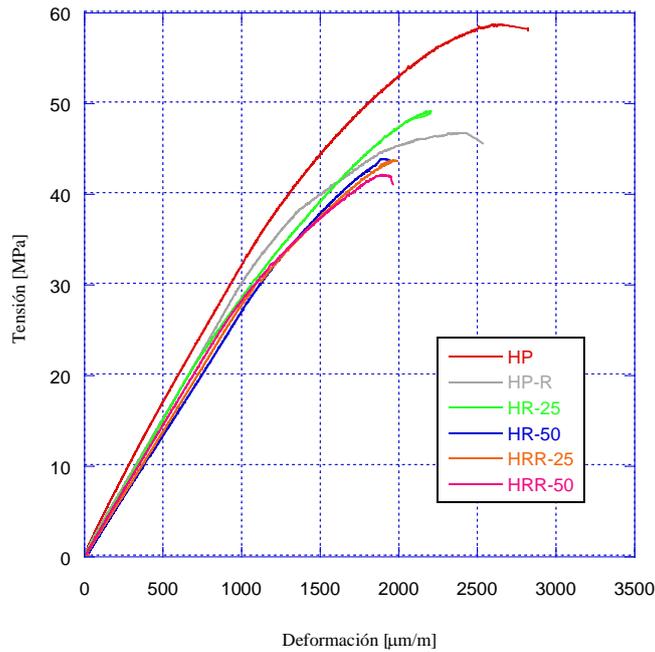


Figura 39. Roturas de hormigón a compresión a 1 año.

4.2.2. Módulo de elasticidad del hormigón reciclado

Como se puede observar en la Tabla 24 con la utilización de cemento reciclado se aprecia una disminución del módulo elástico en torno al 4% en el caso de que no exista sustitución del árido natural por árido reciclado. La sustitución del 25% por árido reciclado implica una disminución del módulo elástico del 5,6%, mientras que la sustitución del cemento en este caso no parece tener influencia. En el caso de sustituir un 50% de árido la influencia de la sustitución del cemento es importante, disminuyendo el módulo elástico un 15%. Con respecto a la pérdida de módulo elástico con el paso del tiempo se observa una mayor influencia del efecto del cemento que del tipo de árido con un límite que tiende a un valor asintótico de alrededor de 27 GPa.

Tabla 24. Análisis del módulo elástico.

Hormigón	Sustitución [%]	Cemento reciclado	Módulo elástico [GPa]	Módulo elástico a los 365 días [GPa]	% del módulo elástico inicial
HP	0	No	35,5	31,7	89,3
HP-R	0	Si	34,1	29,5	86,5
HR-25	25	No	33,9	30,8	90,8
HR-50	50	No	31,9	29,3	91,8
HRR-25	25	Si	34,2	27,9	81,6
HRR-50	50	Si	27,8	27,4	98,56

4.2.2.1. Módulo de elasticidad frente a resistencia a compresión

Se puede apreciar en la Figura 40, cuyo análisis es complicado debido a la escasez de puntos para representar, que a partir de un determinado punto (≈ 48 MPa) para que un hormigón con

cemento reciclado adquiera la misma resistencia a compresión que un hormigón convencional debe aumentar significativamente su módulo de elasticidad mientras que por debajo del citado punto el comportamiento es inverso. Esto también puede ser debido a la suma de una nueva incógnita como es el cemento reciclado comparado con un cemento convencional que está mucho más estandarizado en toda su producción.

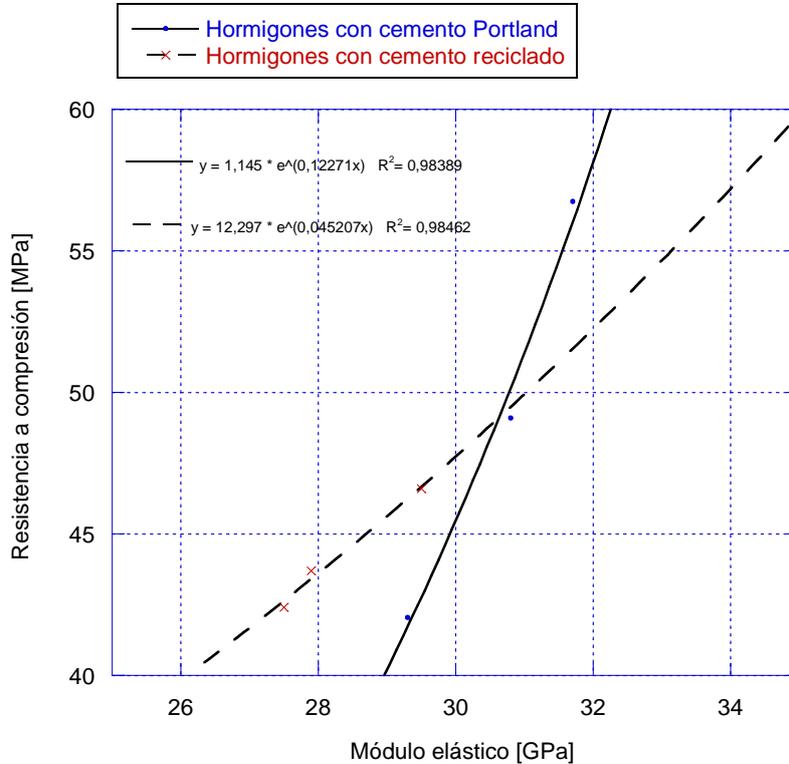


Figura 40. Resistencia a compresión frente a módulo elástico.

4.2.3. Limite a fatiga por el método LOCATI

En la Figura 41 se pueden ver los escalones del método Locati reales efectuados por la máquina de ensayo, que no corresponden perfectamente con los teóricos. Se aprecia un ligero aumento conforme aumenta la amplitud de tensión aplicada llegando hasta casi 5 MPa de tensión mínima cuando teóricamente se había configurado para 2,5 MPa.

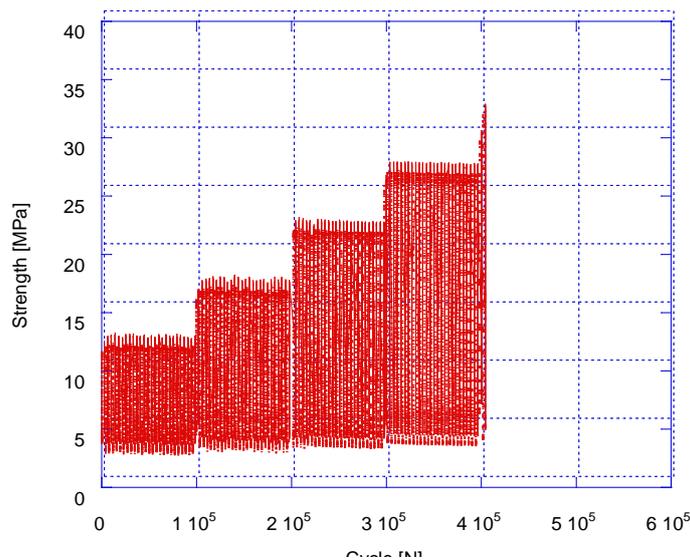


Figura 41. Tensión-ciclos en una probeta en resonancia

En la pérdida de resistencia a compresión estática con respecto a la resistencia a compresión en fatiga no parece que exista una clara correlación entre los distintos tipos como se ve en la Tabla 25 quedando los valores comprendidos en torno al 40-60%.

Tabla 25. Resistencia a compresión en fatiga

Tipo de hormigón	Resistencia a compresión estática [MPa]	Resistencia a compresión en fatiga [MPa]	% de resistencia a compresión estática
HP	53,5	32,5	60,7
HP-R	50,2	29,2	58,2
HR-25	47,0	20,0	42,5
HR-50	48,8	30,8	63,1
HRR-25	47,5	24,2	50,1
HRR-50	47,5	17,5	36,9

En la Figura 42 están representadas las deformaciones máximas con respecto avanzan los ciclos de una selección de hormigones de cada tipo. En los primeros ciclos los tipos que más se deforman son los hormigones con un porcentaje de reemplazo de 50% del árido natural, por lo que se intuye que la influencia de los áridos reciclados es mayor que la del cemento reciclado. También se aprecia que, en los últimos momentos, antes de producirse la rotura, el hormigón que más deformaciones admite es el convencional con cemento y árido convencional.

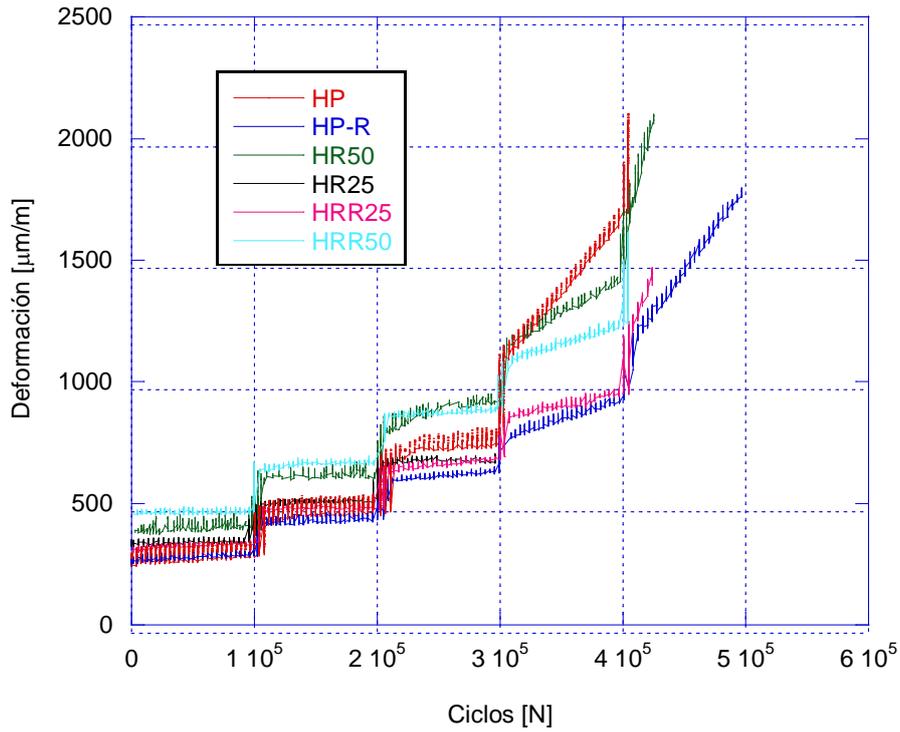


Figura 42. Deformación en fatiga según avanzan los ciclos

En la Figura 43 se puede ver la evolución de la rigidez de unas probetas de cada tipo de hormigón mientras se está produciendo el ensayo de fatiga a alta frecuencia y se aprecia como en todas tiende a descender.

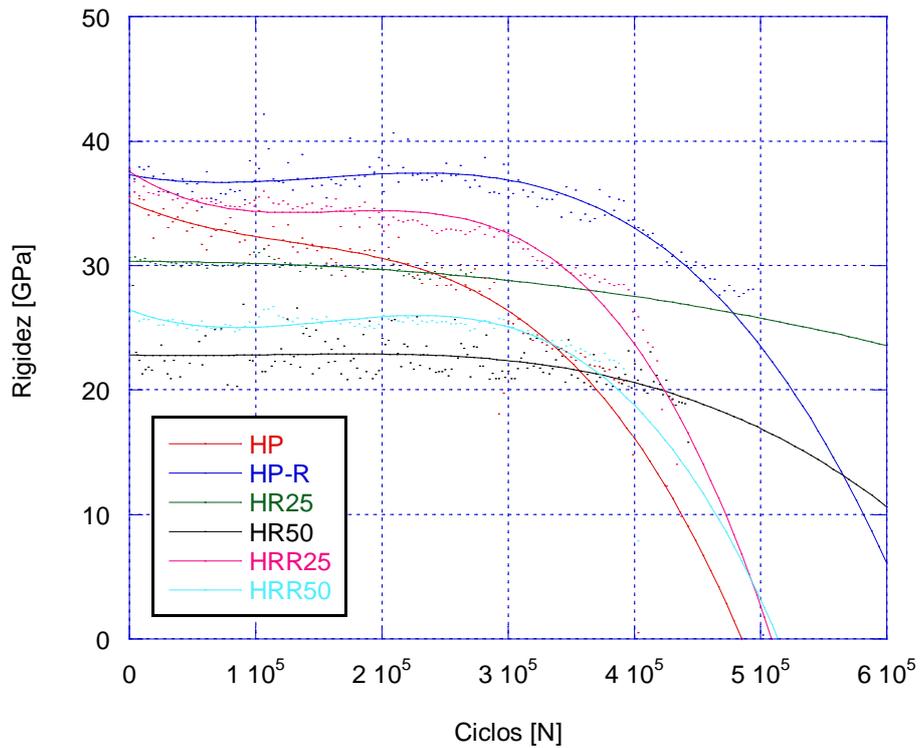


Figura 43. Rigidez en función de los ciclos.

La rotura de las probetas ensayadas a fatiga tiene generalmente una forma cónica, aunque a veces se produjeron roturas como la que se puede ver en la imagen derecha de la Figura 44 cuyos datos eran claramente inferiores a los esperables y fueron descartados. Esto pudo deberse a una colocación que no fuese perfectamente paralela y acompañado a una alta frecuencia de aplicación de fuerza provoca la rotura prematura, o también debido a un pulido no satisfactorio.



Figura 44. Rotura por fatiga buena (izqda.) y rotura mala (dcha.)

4.3. Elementos prefabricados

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos en los ensayos efectuados sobre los elementos prefabricados fabricados con las dosificaciones correspondientes a HP, HRR-50 (cemento reciclado y una sustitución del árido natural por árido reciclado del 50%) y Rocacero.

4.3.1. Bajantes de talud

En la Figura 45 se observan las gráficas de los elementos prefabricados con hormigón en masa. En el ensayo de flexión realizado se denota una mayor resistencia del hormigón denominado HP y un comportamiento similar del hormigón HRR-50 y Rocacero (propio de la empresa donde se realizaron los elementos del cual no se dispone dosificación, si bien este último consta de cemento comercial y áridos naturales). También se observa que las mayores flechas admitidas se dan en el caso del hormigón que contiene árido y cemento reciclado (HRR-50), llegando incluso a ser un 40% mayores comparando con uno de los hormigones de Rocacero. En la Figura 46 se puede ver la sección de rotura producida en una bajante después de efectuar un ensayo.

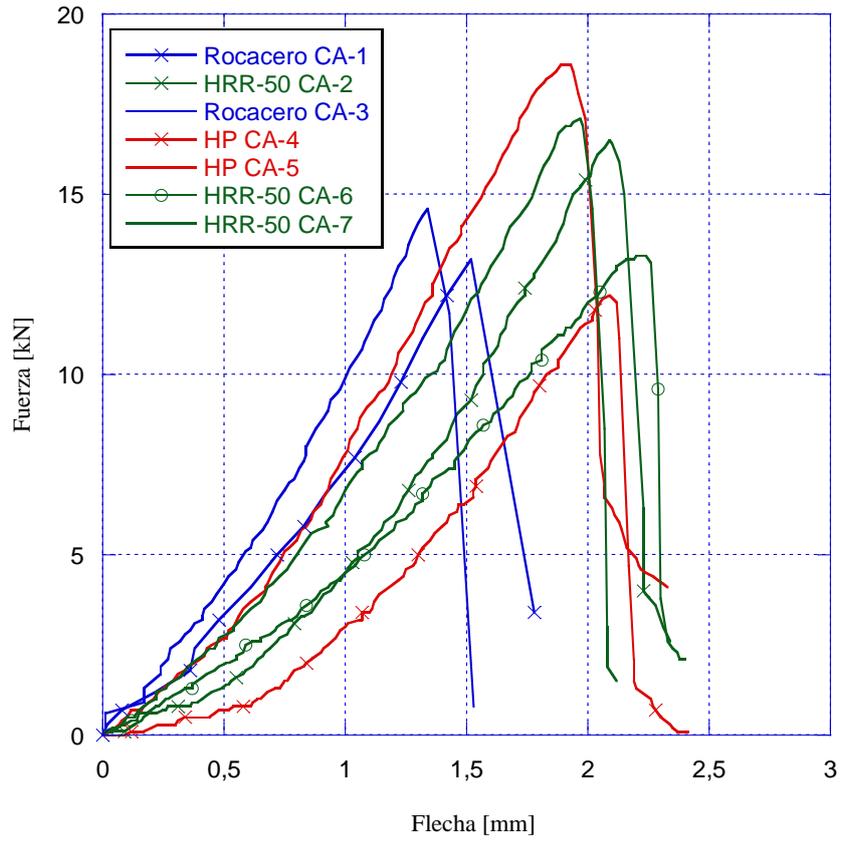


Figura 45. Roturas de las bajantes.



Figura 46. Detalles de la sección de rotura.

4.3.2. Pretiles o barreras New Jersey

En la Figura 47 se puede observar las gráficas superpuestas de Fuerza – Flecha de los pretiles armados ensayados mediante la simulación de un impacto.

Se aprecia como los hormigones que más resisten son los constituidos por un cemento convencional mientras que el hormigón con árido y cemento reciclados se aproxima al hormigón denominado “Rocacero”.

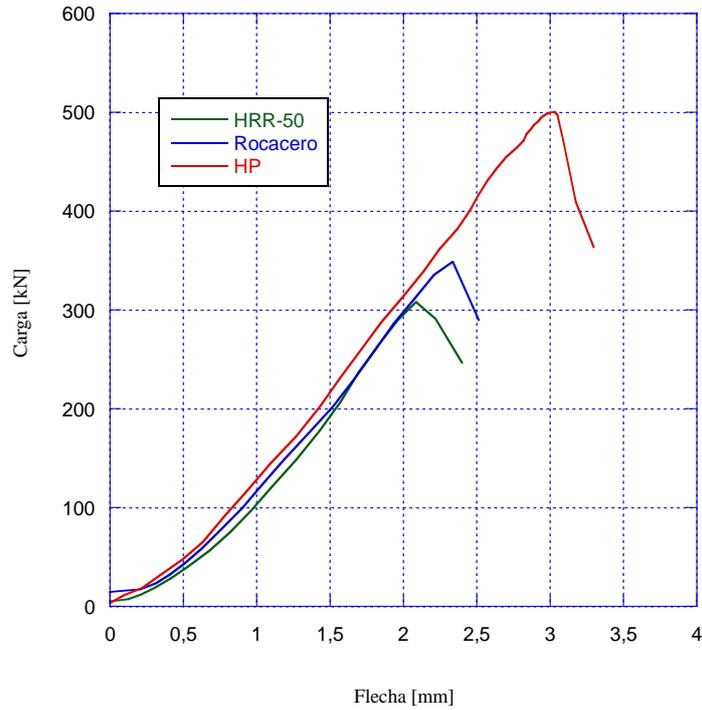


Figura 47. Gráficas Carga-Flecha de los pretiles.



Figura 48. Estado del pretil antes, durante y después del ensayo.

Si considerásemos el choque de un vehículo contra uno de estos pretiles de manera perpendicular para comprobar gráficamente si resistiría en función de la masa y la velocidad, sería necesario un coeficiente de restitución al no ser un choque elástico. Este coeficiente relaciona las velocidades antes del choque con las velocidades después del choque:

$$C_R = -\frac{V_{1f} - V_{2f}}{V_{1i} - V_{2i}} \quad (4.1)$$

Donde:

V_{1f} y V_{2f} son las velocidades finales y, V_{1i} y V_{2i} las velocidades iniciales de los cuerpos 1 y 2 respectivamente.

Considerando que el pretil esta fijo, es decir, inmóvil antes y después de que se produzca el impacto, la expresión (4.1) quedaría: $C_R = -\frac{V_f}{V_i}$

García y Cabreiro proponen en “Utilización de modelos dinámicos en la investigación de accidentes viales” [39] un método para la obtención del coeficiente de restitución basado en procesos experimentales, con lo que proponen dos ecuaciones:

$$\begin{aligned} C_R &= 0,45 \cdot e^{(-0,040278 \cdot v)} && \text{Para } v < 54 \text{ km/h} \\ C_R &= 0,12 \cdot e^{(-0,015278 \cdot v)} && \text{Para } v \geq 54 \text{ km/h} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Con la ecuación (4.1) y (4.2) obtenemos la expresión (4.3):

$$\begin{aligned} v_f &= -v_i \cdot 0,45 \cdot e^{(-0,040278 \cdot v)} && \text{Para } v < 54 \text{ km/h} \\ v_f &= -v_i \cdot 0,12 \cdot e^{(-0,015278 \cdot v)} && \text{Para } v \geq 54 \text{ km/h} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Aplicando la 2ª ley de Newton y la ecuación (4.1):

$$\begin{aligned} F &= m \cdot a \rightarrow F = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \rightarrow F = m \cdot \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} \xrightarrow{t_i=0} F = m \cdot \frac{v_f - v_i}{t_f} \\ \xrightarrow{\text{añadiendo el } C_R} m &= \frac{F \cdot t_f}{-v_i \cdot C_r - v_i} \end{aligned}$$

Si consideramos la fuerza máxima que es capaz de resistir cada pretil y la duración del choque de 0,1 segundos se obtienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} m &= \frac{F \cdot 0,1}{-\frac{v_i}{3,6} \cdot 0,45 \cdot e^{(-0,040278 \cdot v)} - \frac{v_i}{3,6}} && \text{Para } v < 54 \text{ km/h} \\ m &= \frac{F \cdot 0,1}{-\frac{v_i}{3,6} \cdot 0,12 \cdot e^{(-0,015278 \cdot v)} - \frac{v_i}{3,6}} && \text{Para } v \geq 54 \text{ km/h} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Donde:

m es la masa del vehículo en toneladas.

F es la fuerza que rompió el pretil en kN.

v_i es la velocidad del vehículo antes del choque en km/h.

A partir de la expresión (4.4) se pueden dibujar las curvas en función de la masa y la velocidad, en la cual, por debajo de ella los pretiles no se romperían, mientras que valores situados por encima conllevaría una sustitución del pretil. Esto se puede ver en la Figura 49 en la cual es apreciable un comportamiento ligeramente superior de aquellos pretiles constituidos por un hormigón convencional.

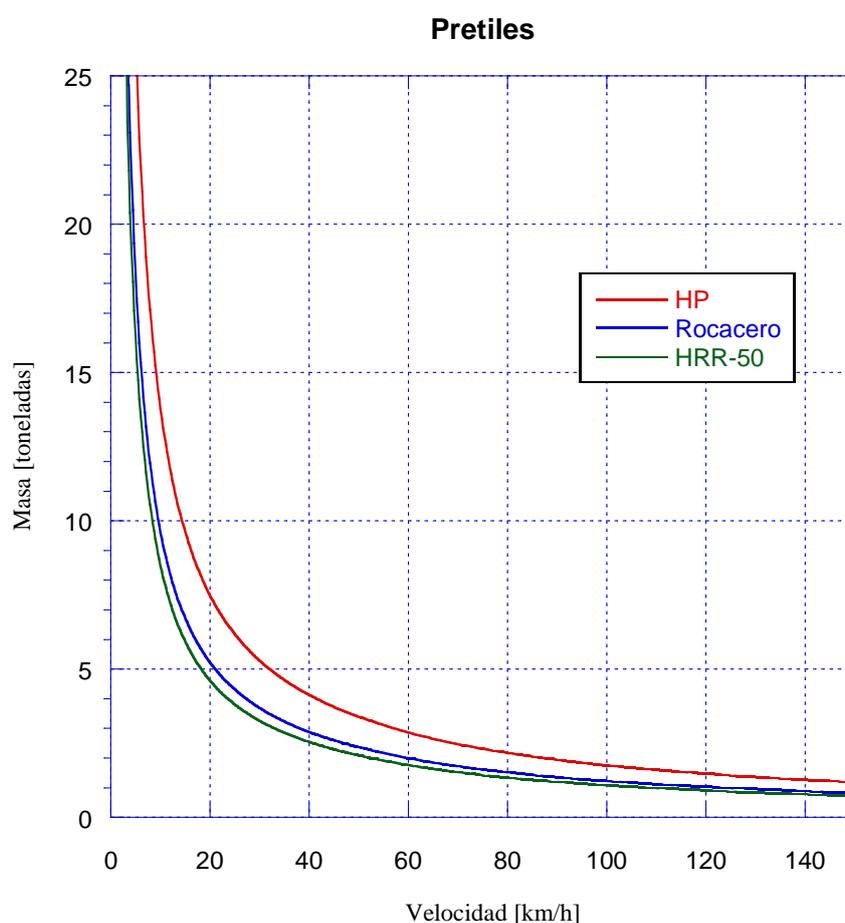


Figura 49. Gráficas masa-velocidad.

Estas graficas se encontraría del lado de la seguridad puesto que el pretil antes de la rotura permite pequeñas deformaciones que disiparían energía además de que no en todos los casos el pretil estaría inmóvil, puesto que solamente son anclados al terreno en viaductos, quedando únicamente posados en el resto de las ocasiones.

Capítulo 5. Conclusiones

Las conclusiones derivadas de este trabajo se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Las densidades de un hormigón convencional descienden conforme aumenta el porcentaje de reemplazo de árido natural por árido reciclado.
- La penetración al agua y la permeabilidad al oxígeno se incrementa con el aumento del porcentaje de reemplazo de árido natural por árido reciclado.
- La resistencia a compresión de un hormigón desciende tanto con el uso de cemento reciclado como con la sustitución de árido natural por árido reciclado, aunque continúa siendo un material competente además de más sostenible.
- El módulo elástico del hormigón desciende en mayor medida con la sustitución de árido natural por árido reciclado que por la sustitución del cemento por cemento reciclado.
- El comportamiento de elementos prefabricados no armados sometidos a flexión es relativamente similar. En el caso de prefabricados con armadura de acero, como son los pretilas, ven disminuidas sus propiedades sin que eso pueda comprometer su función.

Capítulo 6. Referencias

- [1] Comisión Europea. Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE. 2016.
- [2] Instituto Nacional de Estadística - INE. Estadísticas sobre generación de residuos. 2017.
- [3] Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición. Cálculo estimativo de RCD producidos en obra, <http://www.rcdasociacion.es/documentacion/calculo-rcd-obras>.
- [4] Parlamento Europeo. Directiva 2008/98/CE sobre los residuos. 2008.
- [5] Gobierno de Cantabria. Decreto 14/2017 Plan de Residuos de la Comunidad Autónoma de Cantabria 2017-2023. 2017.
- [6] ANEFA. <http://www.aridos.org/el-sector/>, 2017.
- [7] JIS A 5021. Recycled aggregate for concrete - Japanese Standards Association, Tokyo, Japan. 2005.
- [8] DIN 4226-100. Aggregates for concrete and mortar - Part 100: Recycled aggregates.
- [9] GB/T 25177-2010. Recycled coarse aggregate for concrete.
- [10] GB/T 25176-2010. Recycled fine aggregate from concrete and Mortar.
- [11] ANEFA. Estadísticas de la Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos. 2017.
- [12] Proyecto Gear. Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). 2012.
- [13] ANEFA. Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). 2017.
- [14] Centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX) - Ministerio de Fomento. Árido reciclado procedente de hormigón.
- [15] Centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX) - Ministerio de Fomento. Árido reciclado cerámico o mixto. 2017.
- [16] Romea C. El hormigón: Breve reseña histórica de un material milenario. 2014.
- [17] ANEFHOP. Datos estadísticos del sector. 2017.
- [18] EHE-08 ANEJO 15. Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados. .
- [19] Gómez-Soberón JMV. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cem.Concr.Res.* 2002;32(8):1301-11.
- [20] Etxeberria M, Vázquez E, Marí A, Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research* 2007;37:735-42.
- [21] Xiao J, Li J, Zhang C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research* 2005;35:1187-94.
- [22] Thomas C, Setién J, Polanco JA, Lombillo I, Cimentada A. Fatigue limit of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 2014;52:146-54.

- [23] Xiao J, Li H, Yang Z. Fatigue behavior of recycled aggregate concrete under compression and bending cyclic loadings. *Construction and Building Materials* 2013;38:681-8.
- [24] Thomas C, Sosa I, Setién J, Polanco JA, Cimentada AI. Evaluation of the fatigue behavior of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production* 2014;65:397-405.
- [25] UNE-EN 197-1:2011 . Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.
- [26] Asensio E, Medina C, Frías M, de Rojas MIS. Characterization of Ceramic-Based Construction and Demolition Waste: Use as Pozzolan in Cements. *J Am Ceram Soc* 2016;99(12):4121-7.
- [27] Medina C, Sáez del Bosque IF, Asensio E, Frías M, Sánchez de Rojas MI. New additions for eco-efficient cement design. Impact on calorimetric behaviour and comparison of test methods. *Mater.Struct.* 2016;49(11):4595-607.
- [28] UNE-EN 12390-7:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido.
- [29] UNE 83981:2008. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la permeabilidad al oxígeno del hormigón endurecido.
- [30] Ebensperger L, Torrent R. Medición 'in situ' de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo. 2010;25:371.
- [31] UNE-EN 12390-8:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión.
- [32] UNE-EN 12390-3:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- [33] UNE-EN 12390-13:2014. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión.
- [34] Ismail S, Kwan WH, Ramli M. Mechanical strength and durability properties of concrete containing treated recycled concrete aggregates under different curing conditions. *Construction and Building Materials* 2017;155:296-306.
- [35] Medina C, Sánchez de Rojas MI, Thomas C, Polanco JA, Frías M. Durability of recycled concrete made with recycled ceramic sanitary ware aggregate. Inter-indicator relationships. *Constr.Build.Mater.* 2016;105:480-6.
- [36] Thomas C, Setién J, Polanco JA, Alaejos P, de Juan MS. Durability of recycled aggregate concrete. *Constr.Build.Mater.* 2013;40:1054-65.
- [37] McGinnis MJ, Davis M, de la Rosa A, Weldon BD, Kurama YC. Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials* 2017;154:258-69.
- [38] López Gayarre F, Suárez González J, Blanco Viñuela R, López-Colina Pérez C, Serrano López MA. Use of recycled mixed aggregates in floor blocks manufacturing. *Journal of Cleaner Production* 2017;167:713-22.
- [39] García A, Cabreiro JP. Utilización de modelos dinámicos en la investigación de accidentes viales. Congreso Iberoamericano de accidentología vial 2003.
- [40] Rocacero. Prefabricados de hormigón.

Capítulo 7. Índice de tablas y figuras

Índice de tablas

Tabla 1. Residuos generados [2].	7
Tabla 2. Cálculo estimativo de producción de RCD.	7
Tabla 3. Los objetivos y el conjunto de medidas del protocolo de gestión de RCD en la UE [1].	9
Tabla 4. Plantas fijas de reciclaje autorizadas en Cantabria en 2015 [5].	11
Tabla 5. Requisitos de propiedades físicas de áridos reciclados en Japón.	12
Tabla 6. Límites de sustancias perjudiciales en Japón.	13
Tabla 7. Tipos de árido reciclado en Alemania.	13
Tabla 8. Características árido grueso en China.	14
Tabla 9. Características árido fino en China.	14
Tabla 10. Esquema general de procesos de una planta de reciclaje [13].	17
Tabla 11. Componentes perjudiciales de los RCD [12].	18
Tabla 12. Lista de hormigones.	27
Tabla 13. Dosificación de los distintos hormigones para 1m ³ .	27
Tabla 14. Clasificación del hormigón en función de su permeabilidad al oxígeno.	33
Tabla 15. Programa Locati.	39
Tabla 16. Densidades de los hormigones.	46
Tabla 17. Porosidad accesible, absorción y permeabilidad al oxígeno y al agua del hormigón.	46
Tabla 18. Resistencias a compresión promedio de los hormigones a 160 días.	47
Tabla 19. Módulos elásticos promedio de los distintos hormigones.	48
Tabla 20. Resultados de promedios en los ensayos de fatiga.	48
Tabla 21. Resultados de los ensayos sobre bajantes.	49
Tabla 22. Resultados de los ensayos sobre pretiles.	49
Tabla 23. Porcentaje de densidades.	50
Tabla 24. Análisis del módulo elástico.	55
Tabla 25. Resistencia a compresión en fatiga	57

Índice de figuras

Figura 1. Estimación de la generación de RCD en Cantabria [5].	11
Figura 2. Consumo de áridos en España [11].	15
Figura 3. Acopio de RCD y otros materiales, planta de Valoria (Cantabria).	15
Figura 4. Porcentajes de instalaciones en España según nivel (proyecto GEAR).	16
Figura 5. Cabina de triaje manual.	19
Figura 6. Vista de un trómel, planta de Valoria (Cantabria).	19
Figura 7. Puente de Salginatobel en Suiza.	21
Figura 8. Cuadro histórico de producciones anuales [17].	22
Figura 9. Árido natural (izq.) y árido de machaqueo (dcha.).	23
Figura 10. Disposición del ensayo para la determinación de la densidad.	28
Figura 11. Determinación del volumen aparente.	29
Figura 12. Proceso de determinación de densidad.	30
Figura 13. Probeta cortada e impregnada con silicona para la permeabilidad al oxígeno.	31
Figura 14. Probeta de permeabilidad al oxígeno en molde de caucho.	32
Figura 15. Disposición del ensayo de permeabilidad al oxígeno.	32
Figura 16. Disposición de probetas en el ensayo de permeabilidad al agua.	34
Figura 17. Ejemplo de frente de penetración de agua.	34
Figura 18. Refrentado de probetas.	35
Figura 19. Procedimiento de instrumentación.	36
Figura 20. Ensayo de compresión.	37
Figura 21. Método B de UNE-EN 12390-13:2014.	37
Figura 22. Disposición del ensayo de determinación del módulo elástico.	38
Figura 23. Ejemplo de gráfica de módulo elástico.	38
Figura 24. Pulido de probetas.	40
Figura 25. Equipo de resonancia.	41
Figura 26. Ensayo de resonancia.	41
Figura 27. Fabricación de bajantes de talud.	42
Figura 28. Disposición del ensayo en bajantes.	43
Figura 29. Canaleta en el momento de la rotura.	43
Figura 30. Molde de pretil y vertido del hormigón.	44
Figura 31. Disposición del ensayo sobre pretil.	44
Figura 32. Vista de la rotura de un pretil.	45
Figura 33. Porosidad abierta del hormigón.	51
Figura 34. Coeficiente de absorción del hormigón.	51
Figura 35. Permeabilidades al aire del hormigón.	52
Figura 36. Penetraciones de agua.	53
Figura 37. Sección de probetas.	53
Figura 38. Roturas de hormigón a compresión.	54
Figura 39. Roturas de hormigón a compresión a 1 año.	55
Figura 40. Resistencia a compresión frente a módulo elástico.	56
Figura 41. Tensión-ciclos en una probeta en resonancia.	57
Figura 42. Deformación en fatiga según avanzan los ciclos.	58
Figura 43. Rigidez en función de los ciclos.	58
Figura 44. Rotura por fatiga buena (izqda.) y rotura mala (dcha.).	59
Figura 45. Roturas de las bajantes.	60

Figura 46. Detalles de la sección de rotura.	60
Figura 47. Gráficas Carga-Flecha de los pretiles.	61
Figura 48. Estado del pretil antes, durante y después del ensayo.....	61
Figura 49. Gráficas masa-velocidad.....	63
Figura 50. Dimensiones de bajantes [40].....	141
Figura 51. Dimensiones del pretil [40].	150

Capítulo 8. Anejos

Anejo I. Inventario de probetas

Tipo de hormigón	Código	Fecha de fabricación	Ensayo
HP	C15-I	24/11/2016	Compresión
HP	C15-II	24/11/2016	Compresión
HP	C10-I	24/11/2016	Densidad
HP	C10-II	24/11/2016	Densidad
HP	CA-5	24/11/2016	Flexión
HP	CA-4	24/11/2016	Flexión
HP	P-1	24/11/2016	Flexión
HP	22	17/05/2016	Módulo elástico y compresión
HP	23	17/05/2016	Módulo elástico y fatiga
HP	24	17/05/2016	Módulo elástico y fatiga
HP	25	28/06/2016	Módulo elástico y compresión
HP	27	28/06/2016	Módulo elástico y compresión
HP	34	17/05/2016	O2 y densidad
HP	35	17/05/2016	O2 y densidad
HP	36	17/05/2016	O2 y densidad
HP	37	28/06/2016	O2 y agua
HP	38	28/06/2016	O2 y agua
HP	568	14/06/2016	Fatiga
HP	575	14/06/2016	Fatiga
HP-R	85	17/05/2016	Módulo elástico y compresión
HP-R	86	17/05/2016	Módulo elástico y fatiga
HP-R	87	17/05/2016	Módulo elástico y fatiga
HP-R	88	28/06/2016	Módulo elástico y compresión
HP-R	89	28/06/2016	Módulo elástico y compresión
HP-R	89	28/06/2016	Módulo elástico y compresión
HP-R	90	28/06/2016	Módulo elástico y compresión
HP-R	100	28/06/2016	O2 y agua
HP-R	101	28/06/2016	O2 y agua
HP-R	103	17/05/2016	O2 y densidad
HP-R	104	17/05/2016	O2 y densidad
HP-R	105	17/05/2016	O2 y densidad
HP-R	578	21/06/2016	Fatiga
HR-25	211	18/05/2016	Módulo elástico y compresión
HR-25	212	18/05/2016	Módulo elástico y fatiga
HR-25	213	18/05/2016	Módulo elástico y fatiga

Tipo de hormigón	Código	Fecha de fabricación	Ensayo
HR-25	215	29/06/2016	Módulo elástico y compresión
HR-25	216	29/06/2016	Módulo elástico y compresión
HR-25	223	18/05/2016	O2 y densidad
HR-25	224	18/05/2016	O2 y densidad
HR-25	225	18/05/2016	O2 y densidad
HR-25	226	29/06/2016	O2 y agua
HR-25	227	29/06/2016	O2 y agua
HR-25	588	27/06/2016	Fatiga
HR-25	589	27/06/2016	Fatiga
HR-50	274	19/05/2016	Módulo elástico y compresión
HR-50	275	19/05/2016	Módulo elástico y fatiga
HR-50	276	19/05/2016	Módulo elástico y fatiga
HR-50	278	29/06/2016	Módulo elástico y compresión
HR-50	279	29/06/2016	Módulo elástico y compresión
HR-50	286	19/05/2016	O2 y densidad
HR-50	287	19/05/2016	O2 y densidad
HR-50	288	19/05/2016	O2 y densidad
HR-50	289	29/06/2016	O2 y agua
HR-50	290	29/06/2016	O2 y agua
HR-50	599	05/07/2016	Fatiga
HR-50	600	05/07/2016	Fatiga
HRR-25	463	18/05/2016	Módulo elástico y compresión
HRR-25	464	18/05/2016	Módulo elástico y fatiga
HRR-25	465	18/05/2016	Módulo elástico y fatiga
HRR-25	467	29/06/2016	Módulo elástico y compresión
HRR-25	468	29/06/2016	Módulo elástico y compresión
HRR-25	475	18/05/2016	O2 y densidad
HRR-25	476	18/05/2016	O2 y densidad
HRR-25	477	18/05/2016	O2 y densidad
HRR-25	478	29/06/2016	O2 y agua
HRR-25	479	29/06/2016	O2 y agua
HRR-25	608	28/06/2016	Fatiga
HRR-25	609	28/06/2016	Fatiga
HRR-50	C15-I	24/11/2016	Compresión
HRR-50	C15-II	24/11/2016	Compresión
HRR-50	C10-I	24/11/2016	Densidad
HRR-50	C10-II	24/11/2016	Densidad
HRR-50	CA-7	24/11/2016	Flexión
HRR-50	CA-6	24/11/2016	Flexión
HRR-50	CA-2	24/11/2016	Flexión
HRR-50	P-2	24/11/2016	Flexión
HRR-50	526	19/05/2016	Módulo elástico y compresión
HRR-50	527	19/05/2016	Módulo elástico y fatiga
HRR-50	528	19/05/2016	Módulo elástico y fatiga

Tipo de hormigón	Código	Fecha de fabricación	Ensayo
HRR-50	530	29/06/2016	Módulo elástico y compresión
HRR-50	531	29/06/2016	Módulo elástico y compresión
HRR-50	538	19/05/2016	O2 y densidad
HRR-50	539	19/05/2016	O2 y densidad
HRR-50	540	19/05/2016	O2 y densidad
HRR-50	541	29/06/2016	O2 y agua
HRR-50	542	29/06/2016	O2 y agua
HRR-50	618	06/07/2016	Fatiga
HRR-50	619	06/07/2016	Fatiga
ROCACERO	C15-I	24/11/2016	Compresión
ROCACERO	C15-II	24/11/2016	Compresión
ROCACERO	C10-I	24/11/2016	Densidad
ROCACERO	C10-II	24/11/2016	Densidad
ROCACERO	CA-3	24/11/2016	Flexión
ROCACERO	P-3	24/11/2016	Flexión
ROCACERO	CA-1	24/11/2016	Flexión

Anejo II. Resultado de los ensayos de módulos elásticos

1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HP 22	EDAD: 153 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Control	

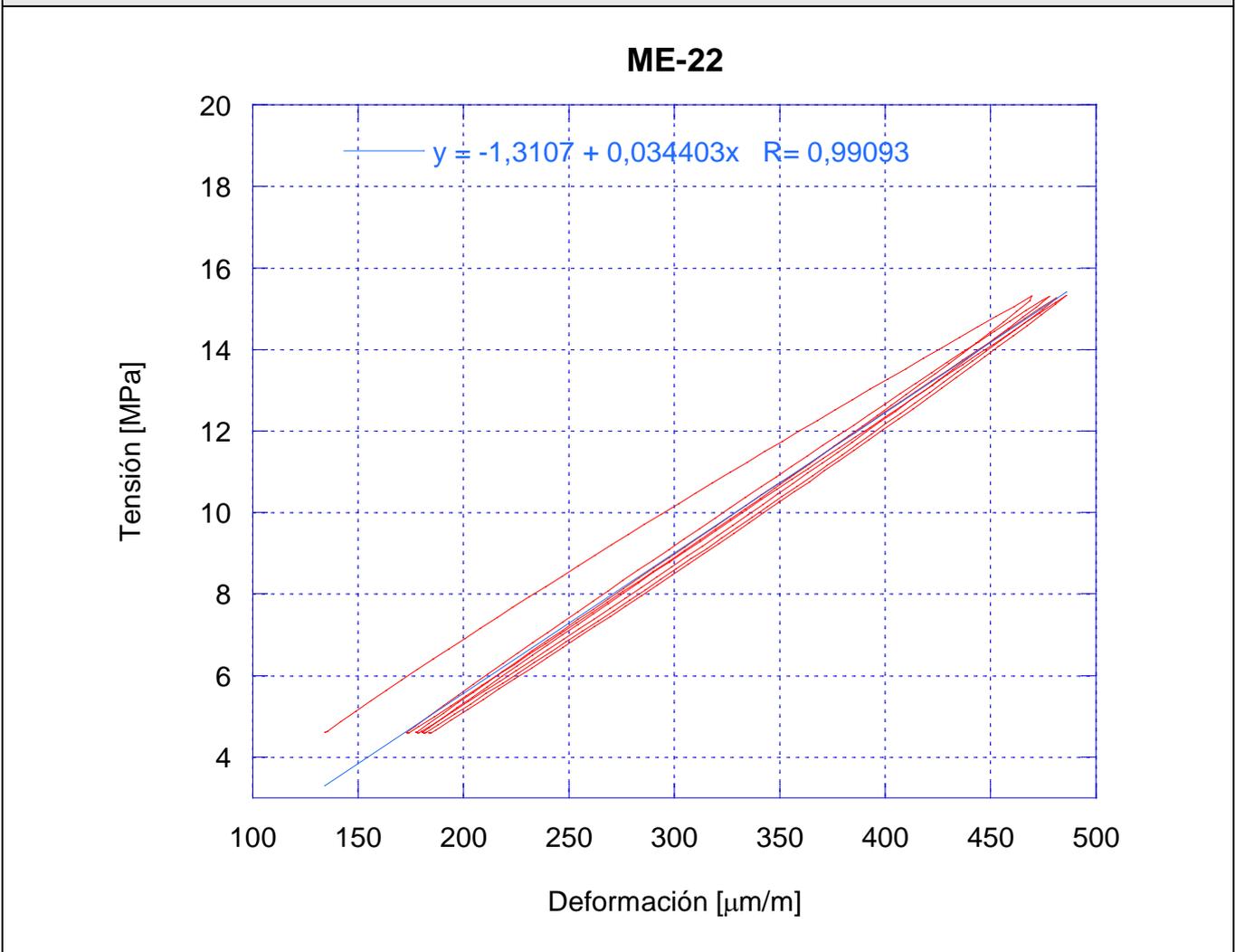
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 34,4 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HP 23	EDAD: 153 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Control	

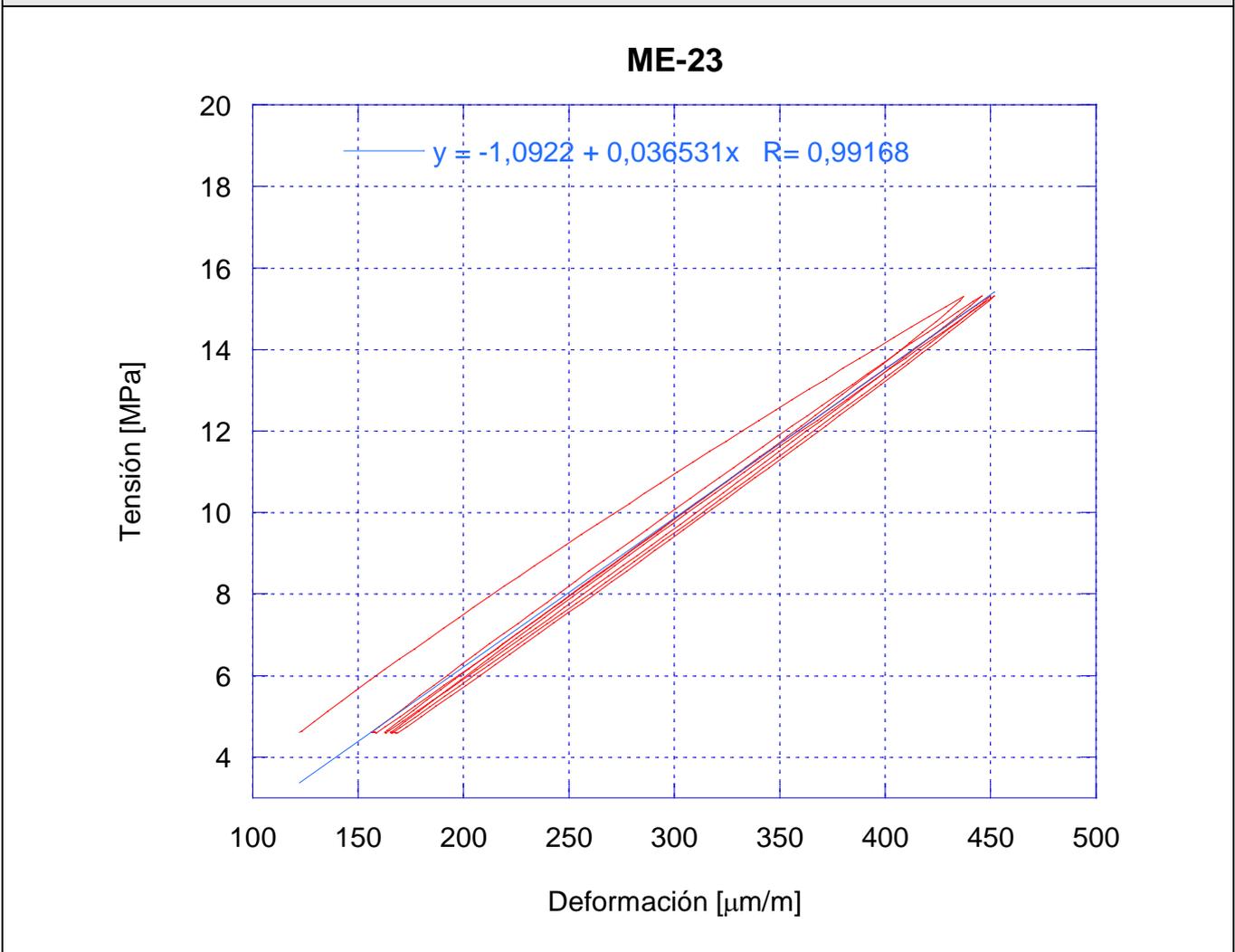
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 36,5 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HP 24	EDAD: 153 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Control	

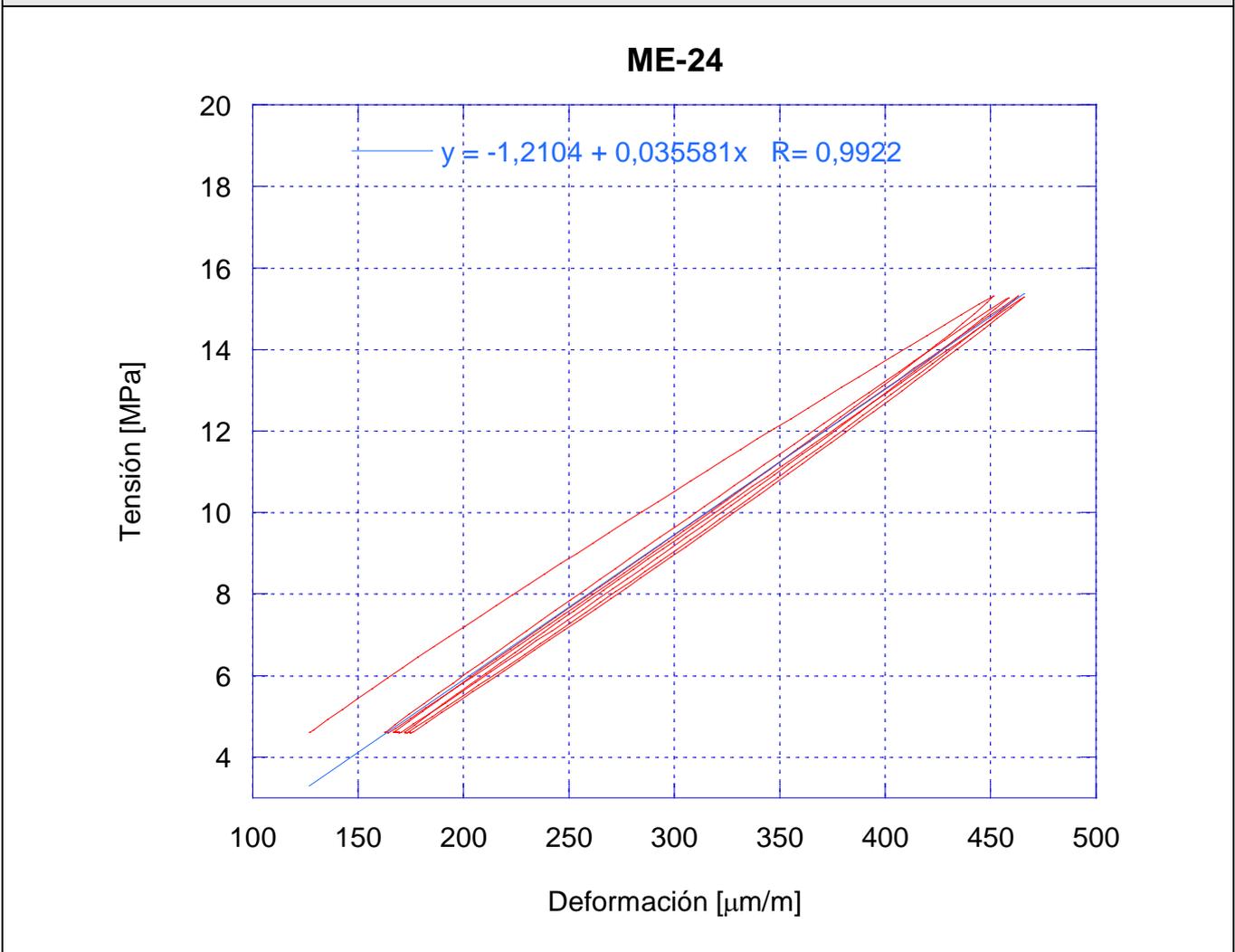
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 35,6 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HP-R 85	EDAD: 147 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

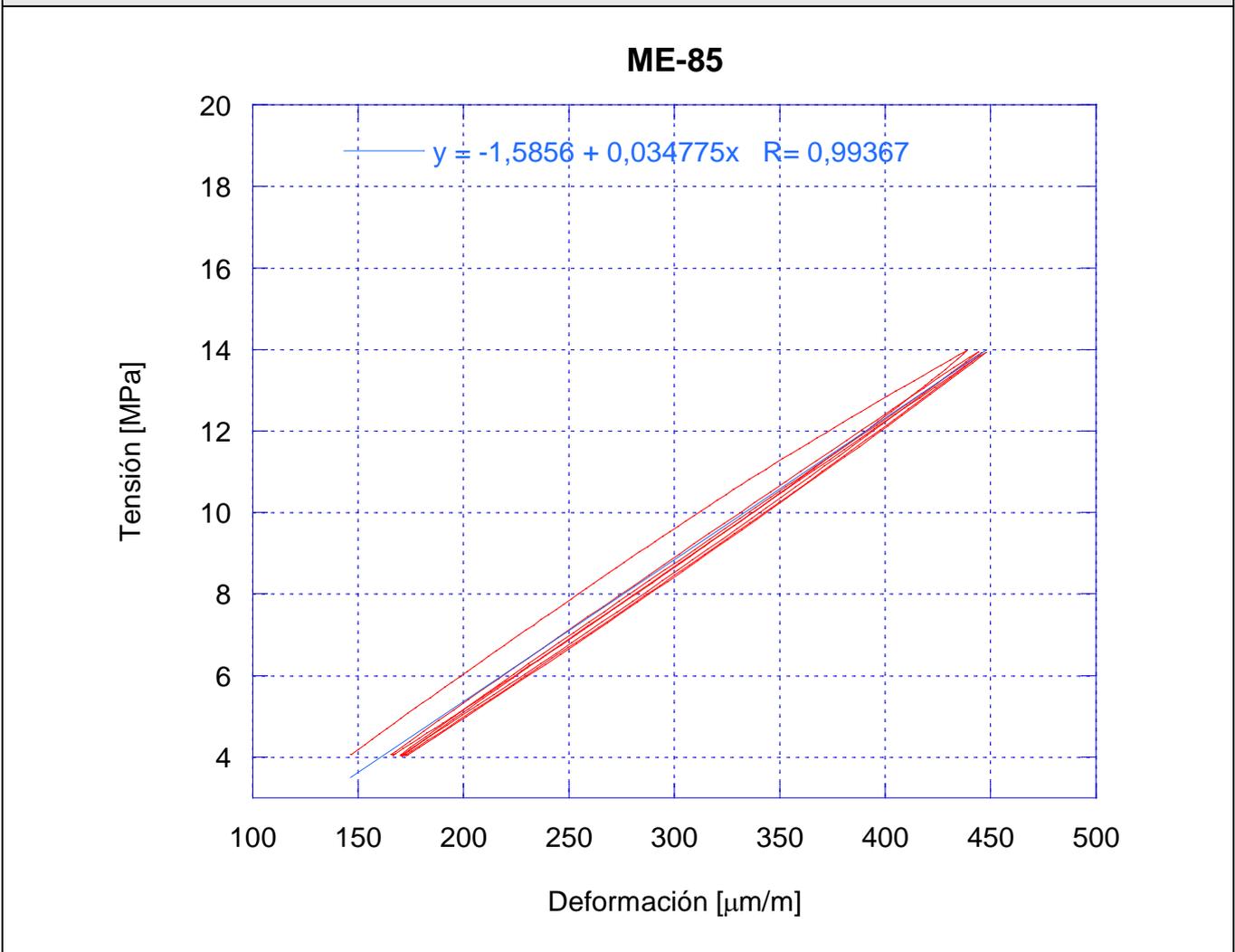
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 34,8 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HP-R 86	EDAD: 147 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

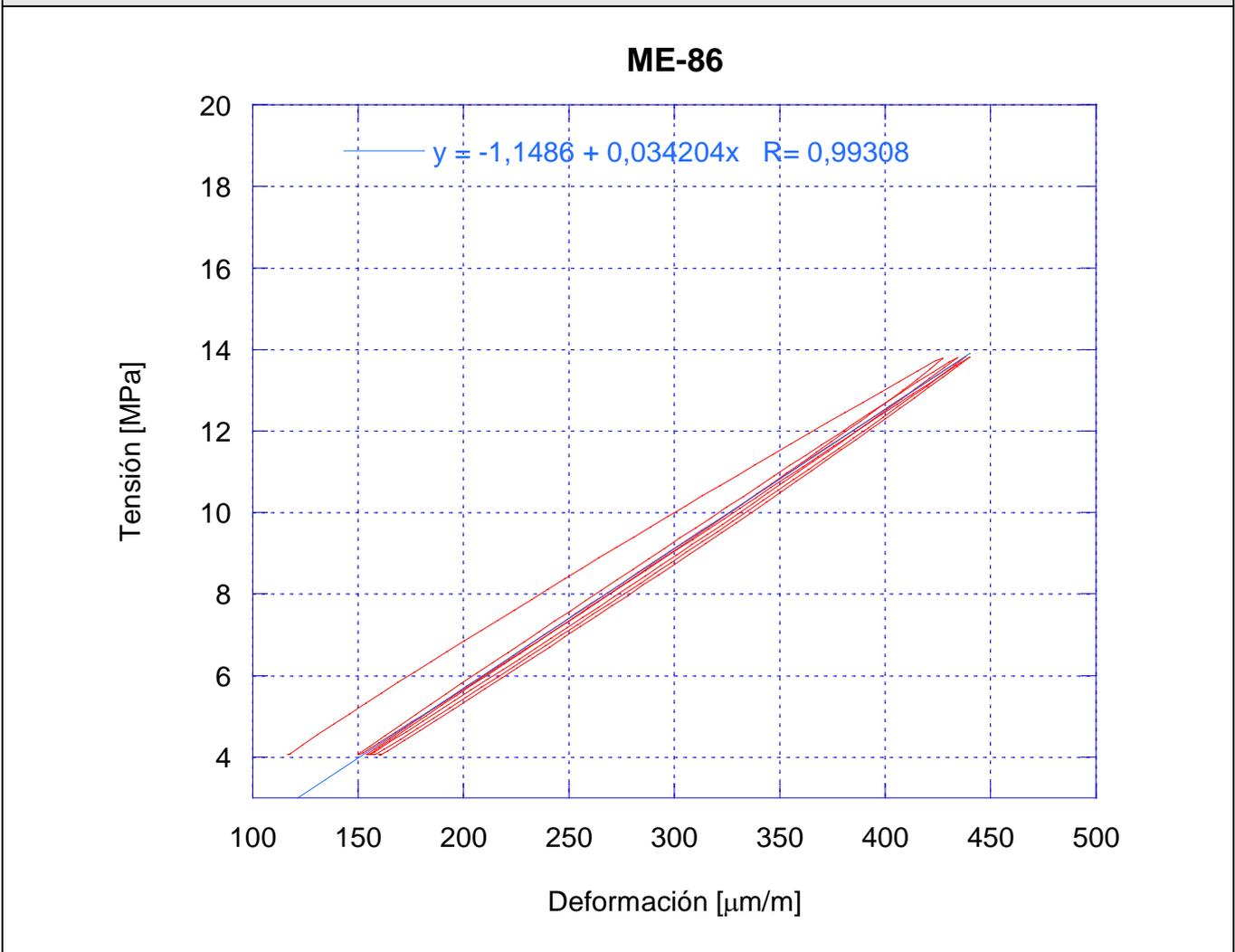
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 34,2 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HP-R 87	EDAD: 147 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

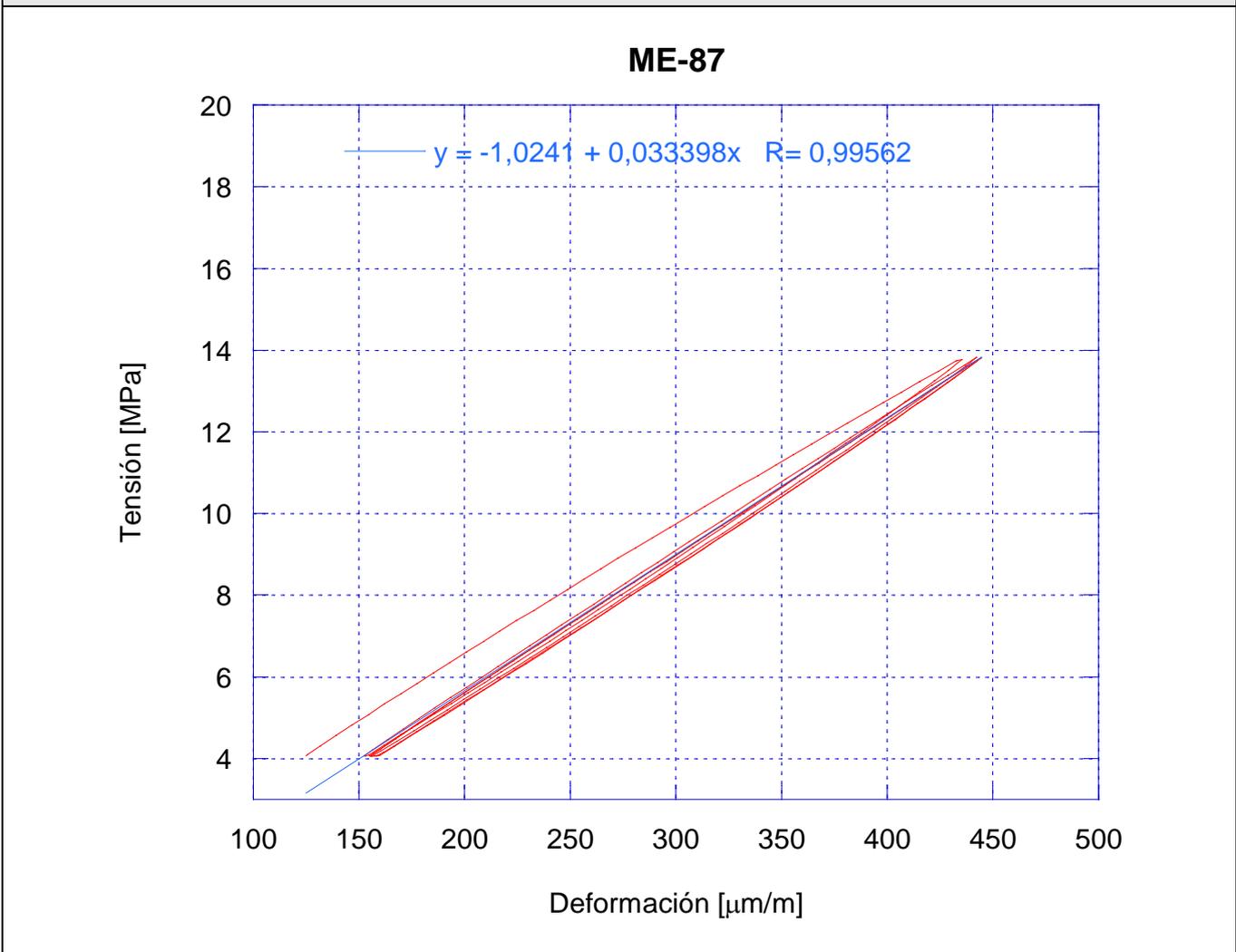
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 33,4 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR-25 211	EDAD: 147 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

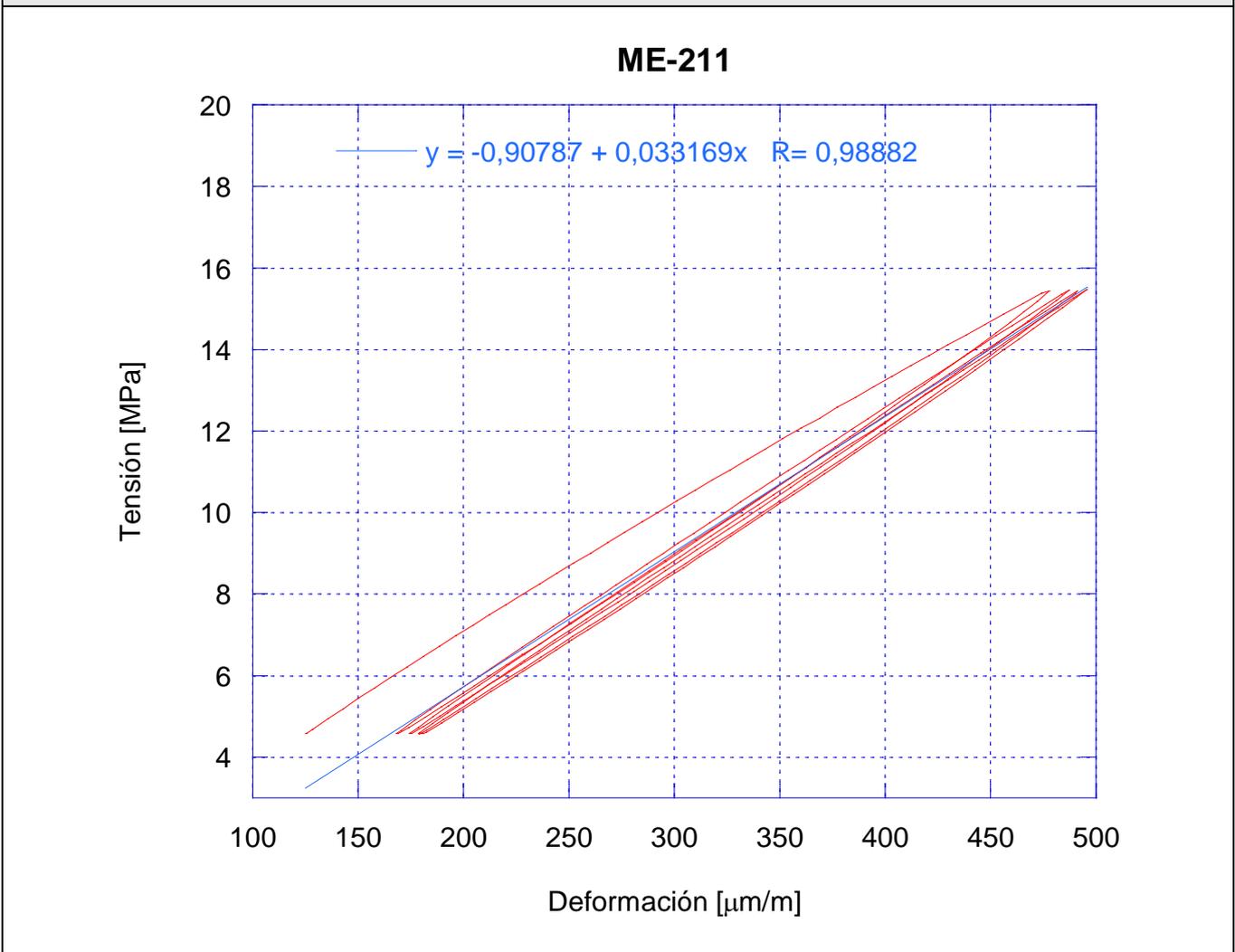
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 33,2 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR-25 212	EDAD: 147 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

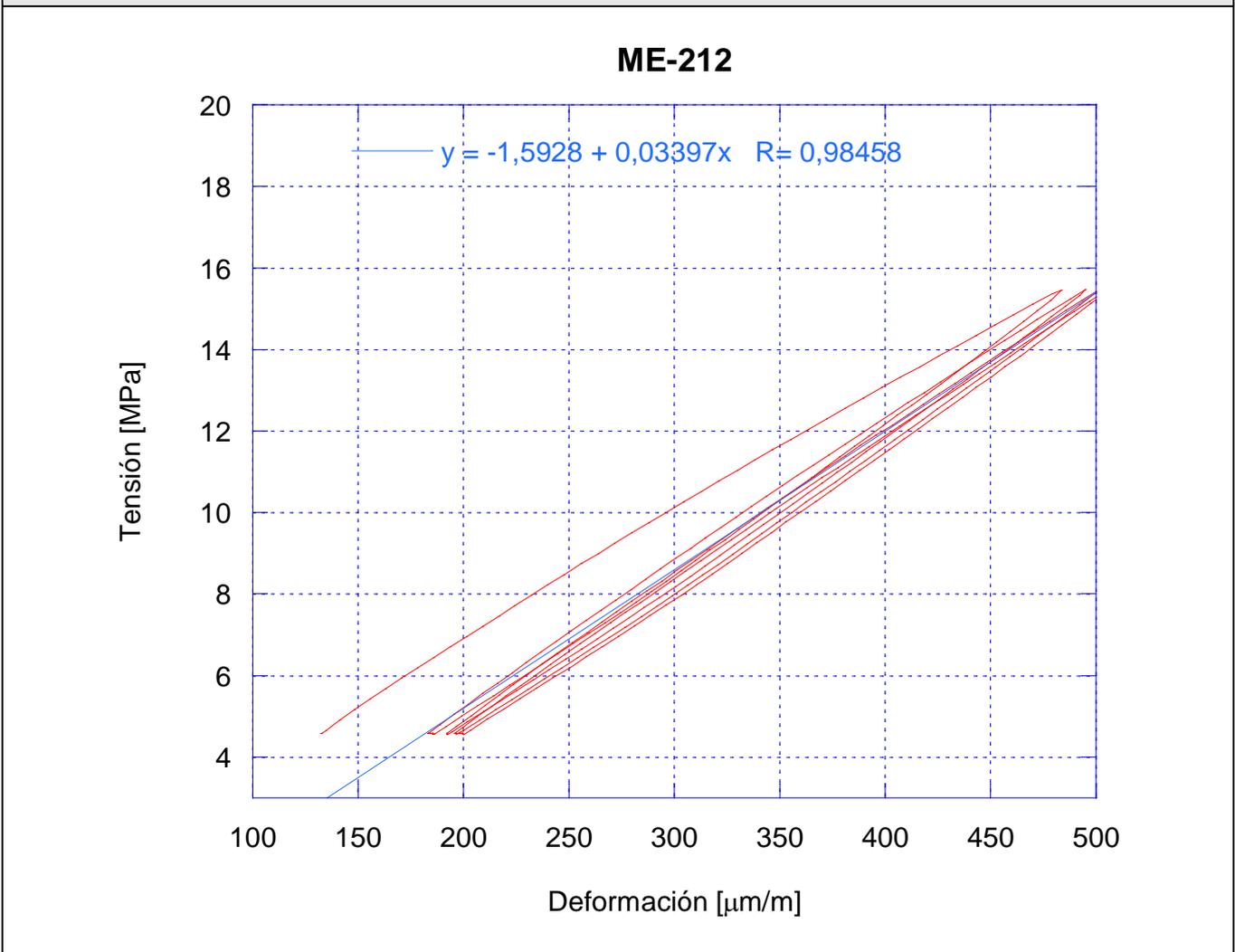
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 34,0 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR-25 213	EDAD: 147 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

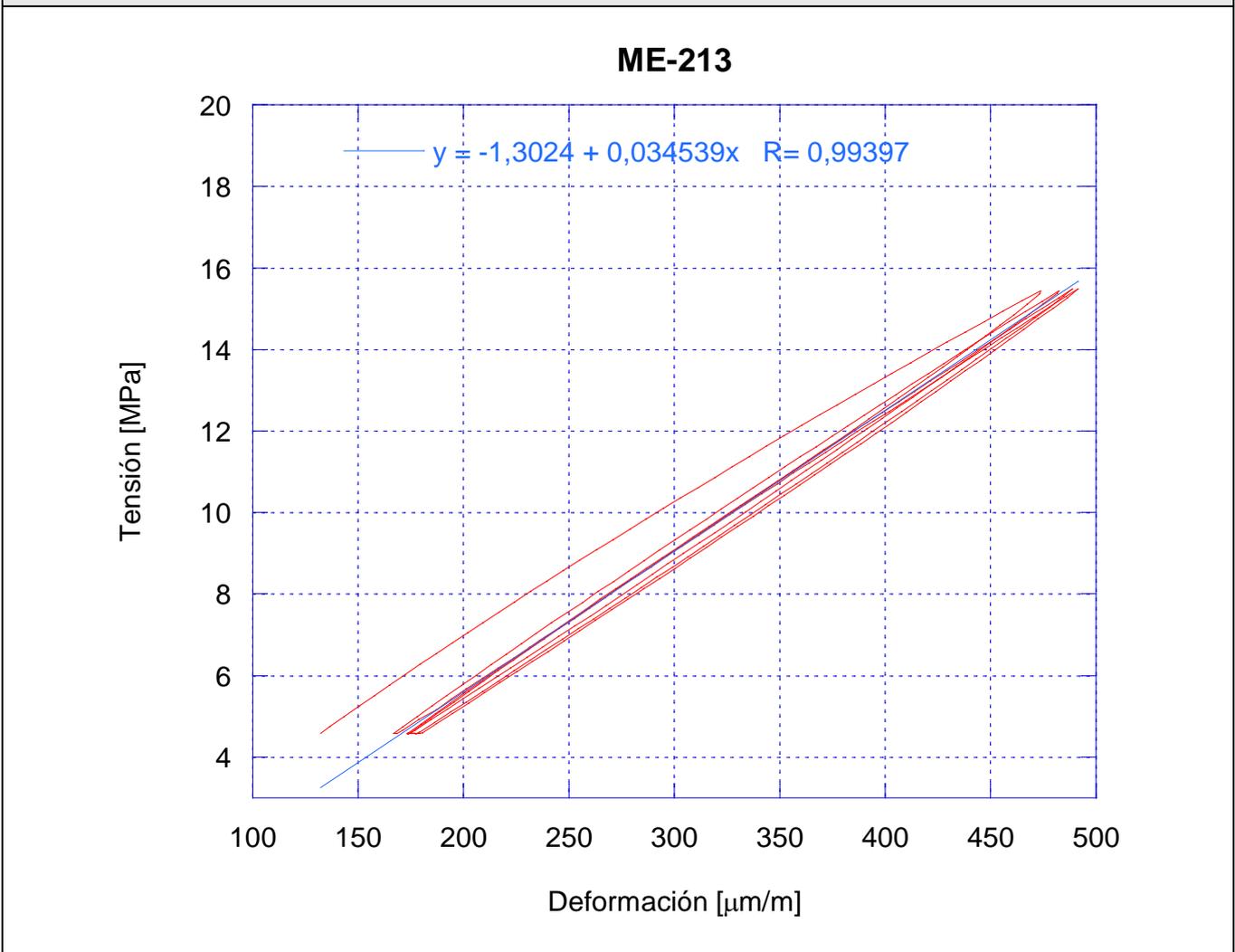
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 34,5 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR-50 274	EDAD: 153 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

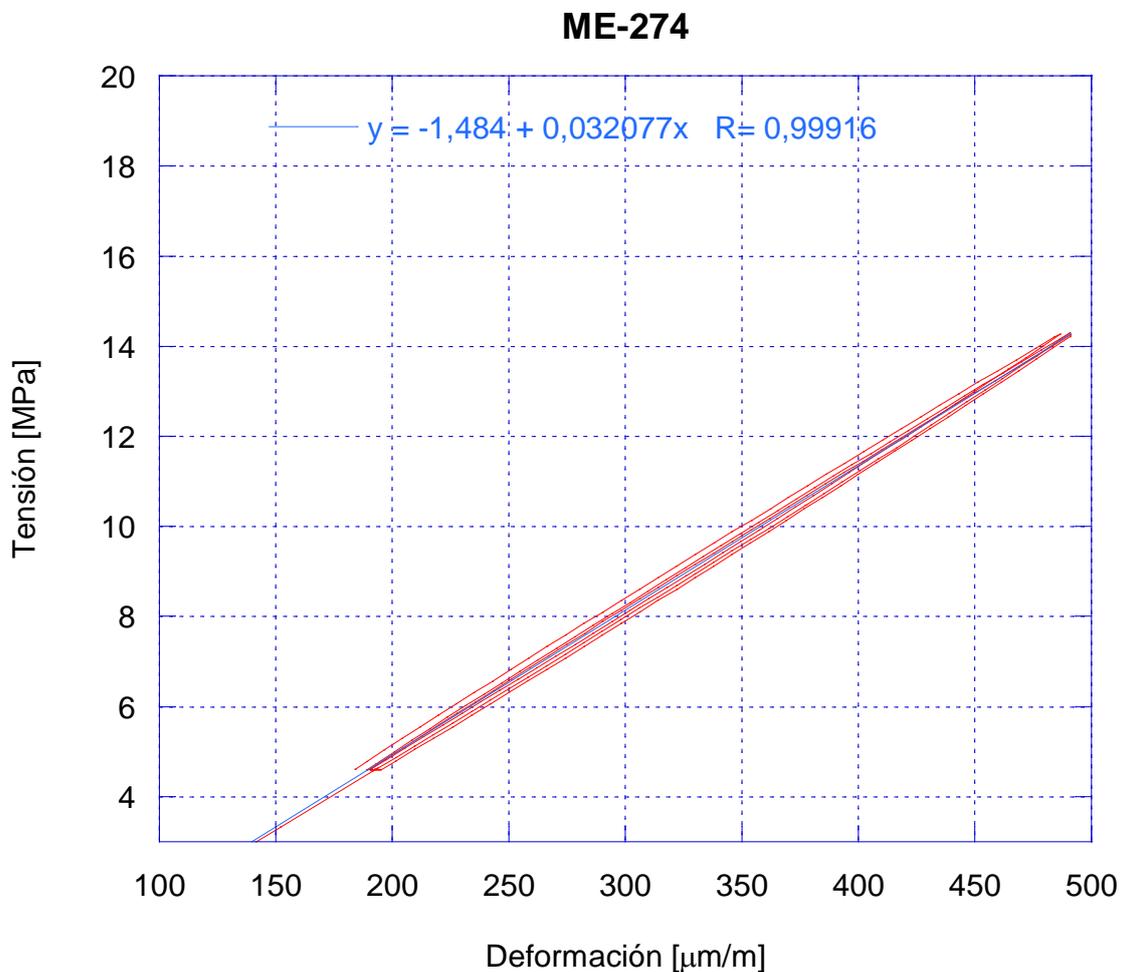
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 32,1 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR-50 275	EDAD: 153 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

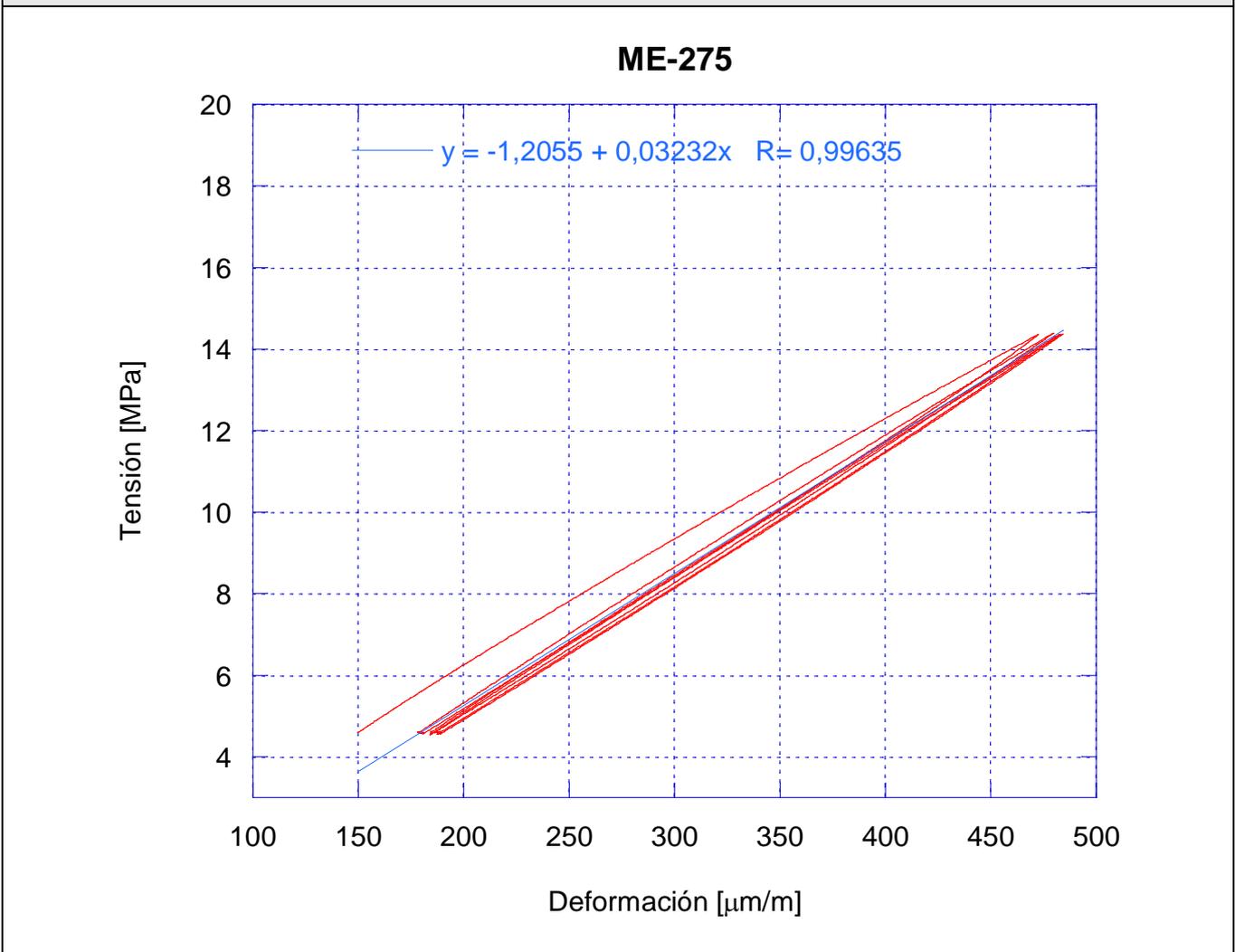
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 32,3 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR-50 276	EDAD: 153 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

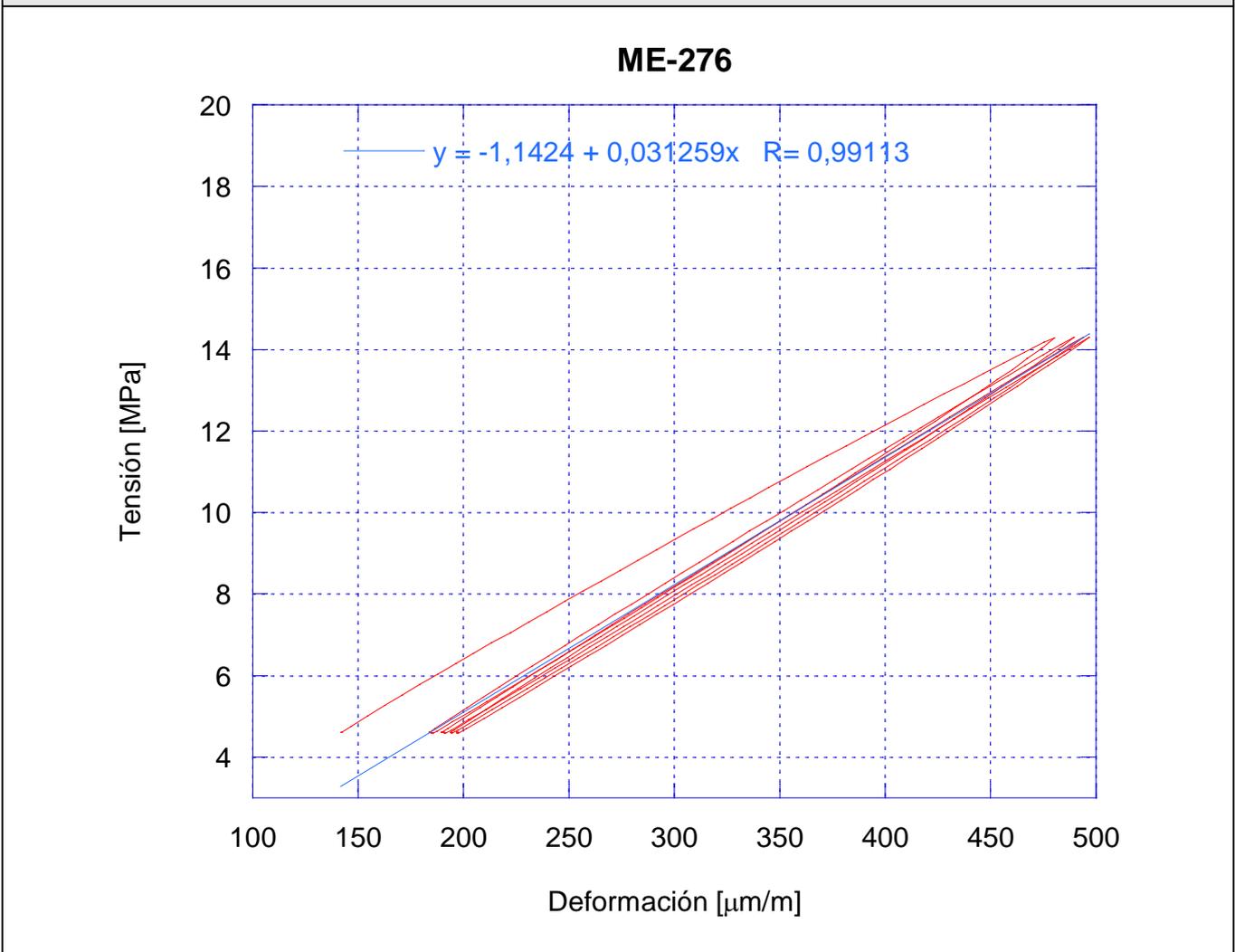
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 31,3 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR-25 463	EDAD: 153 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

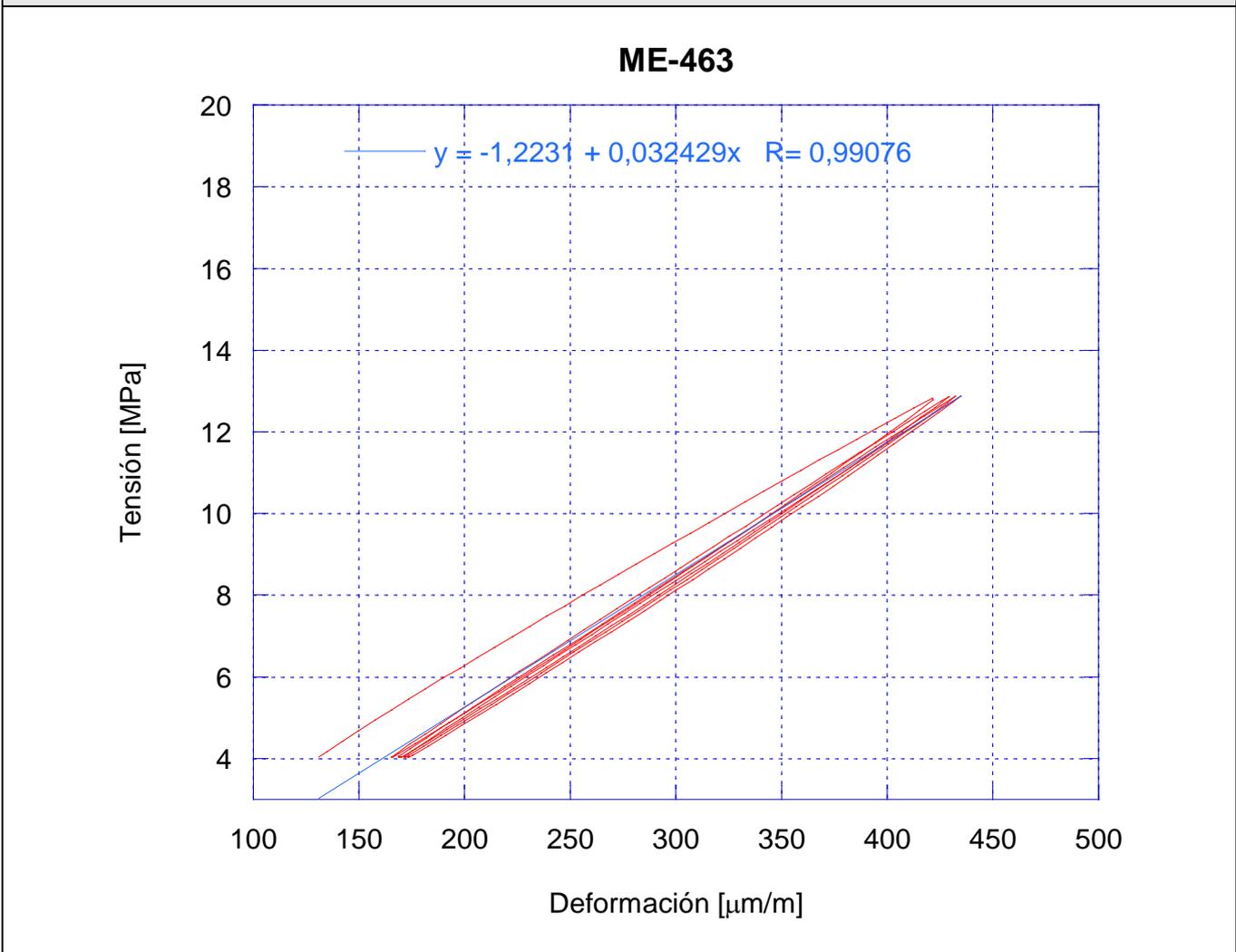
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 32,4 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR-25 464	EDAD: 153 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

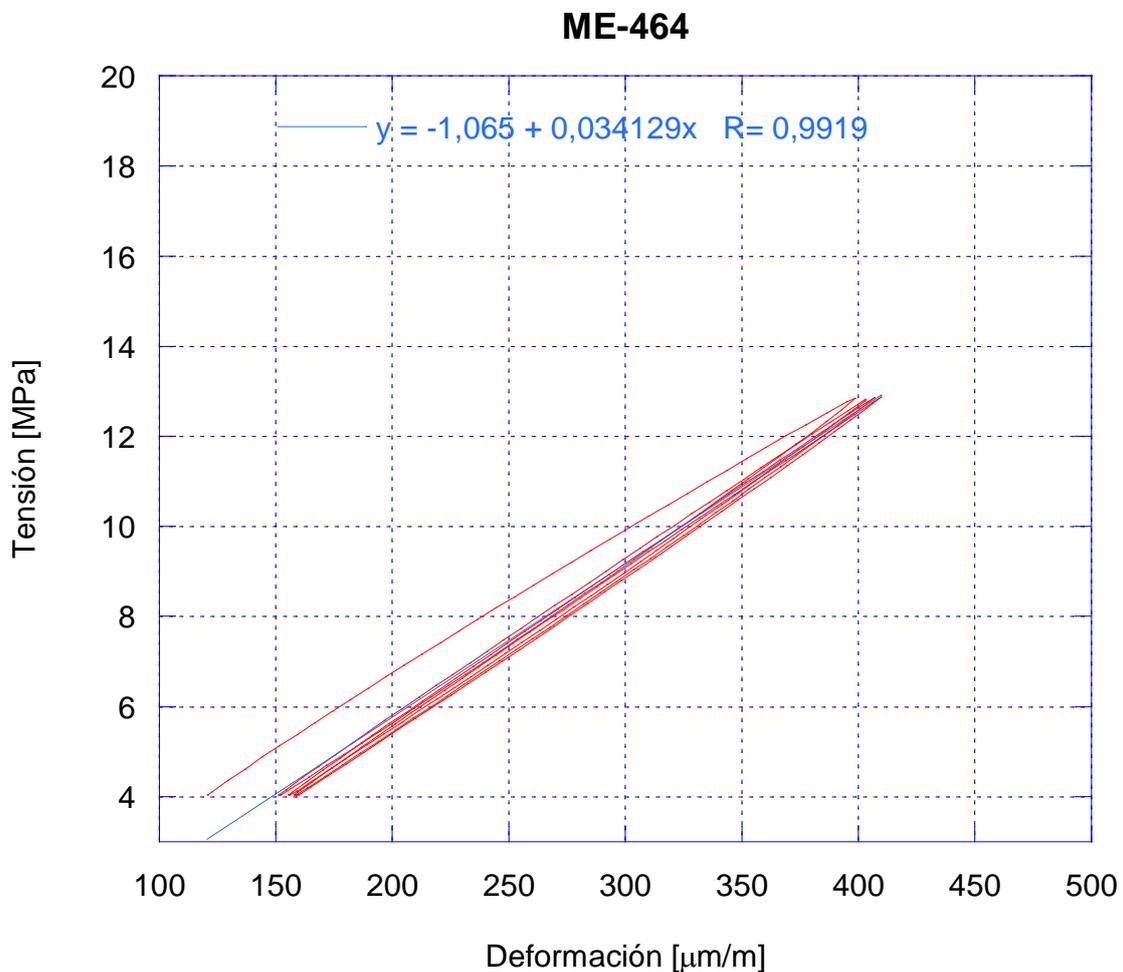
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 34,1 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR-25 465	EDAD: 153 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

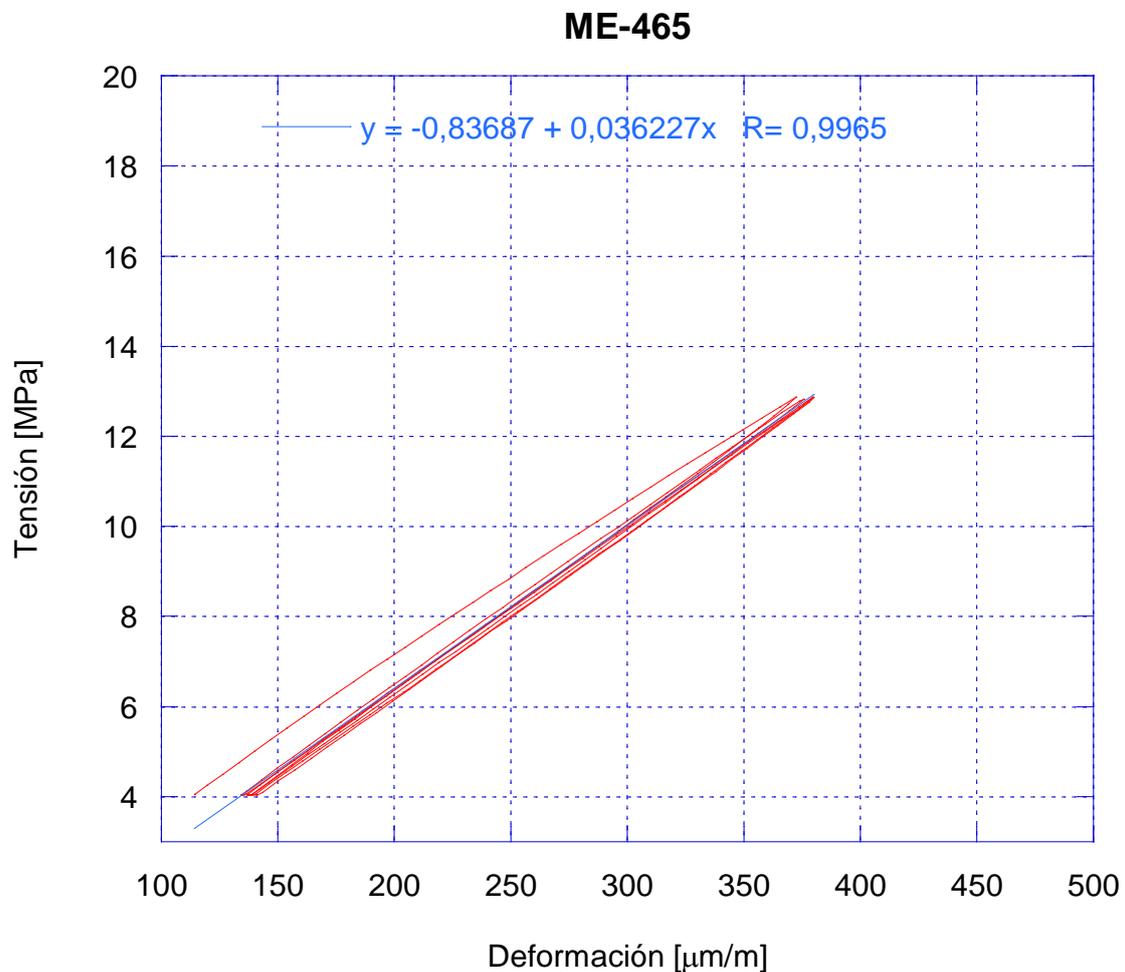
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 36,2 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR-50 526	EDAD: 147 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

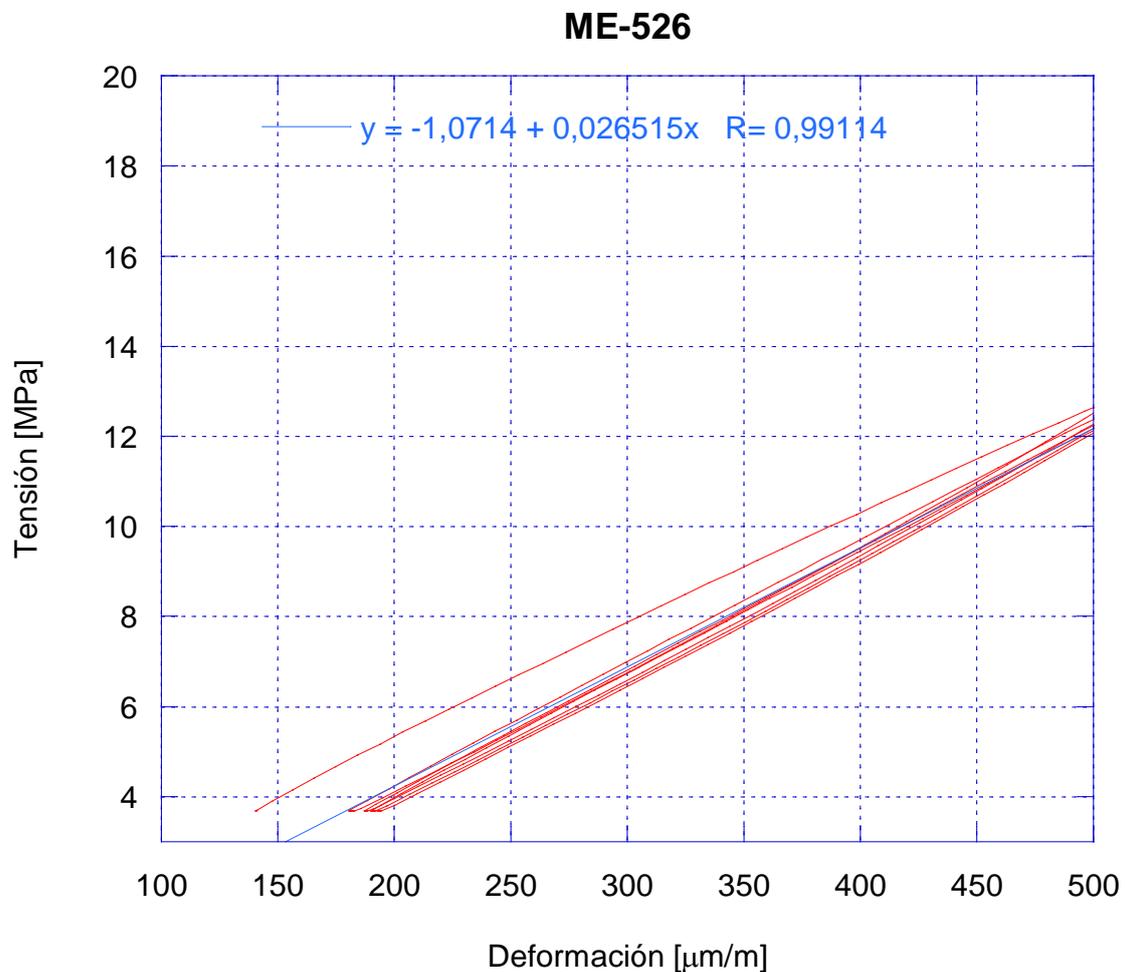
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 26,5 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR-50 527	EDAD: 147 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

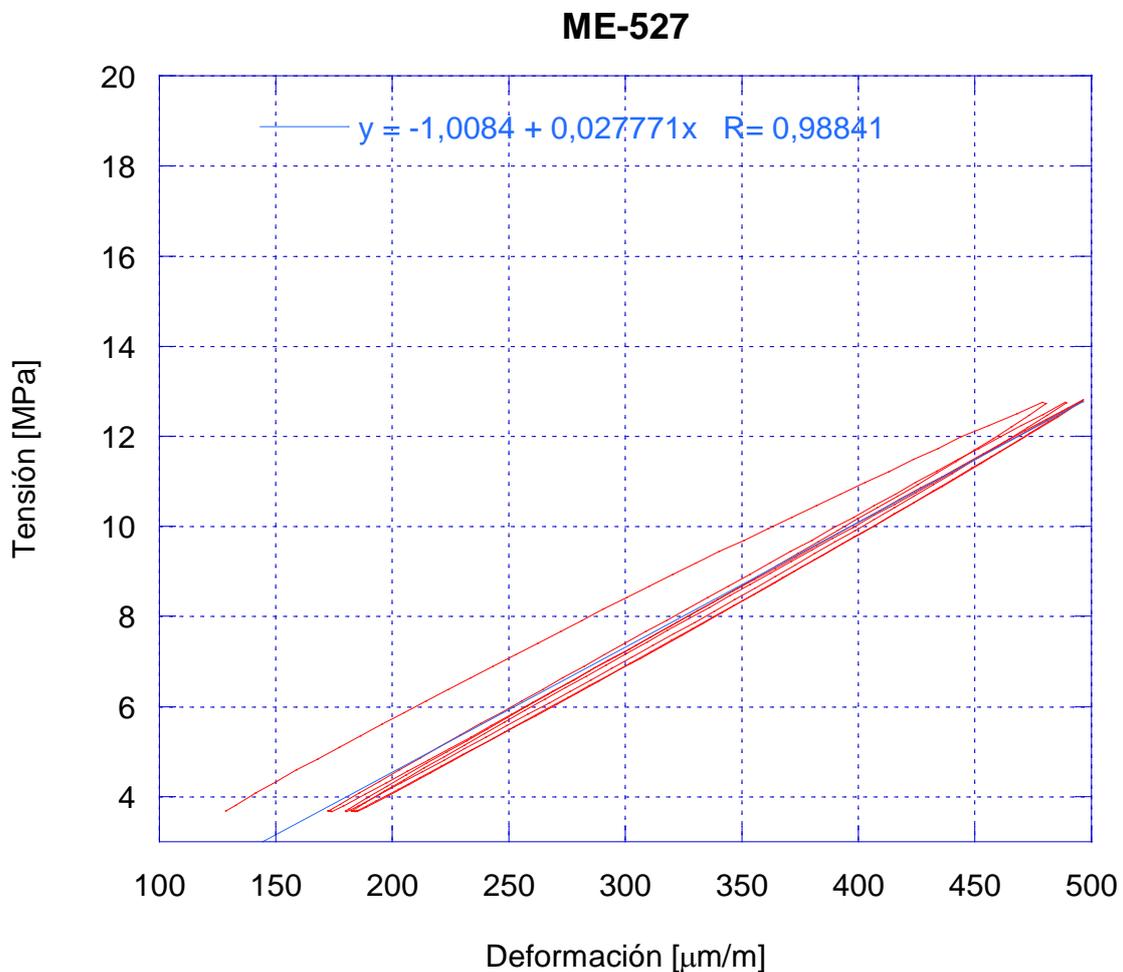
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 27,8 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR-50 528	EDAD: 147 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

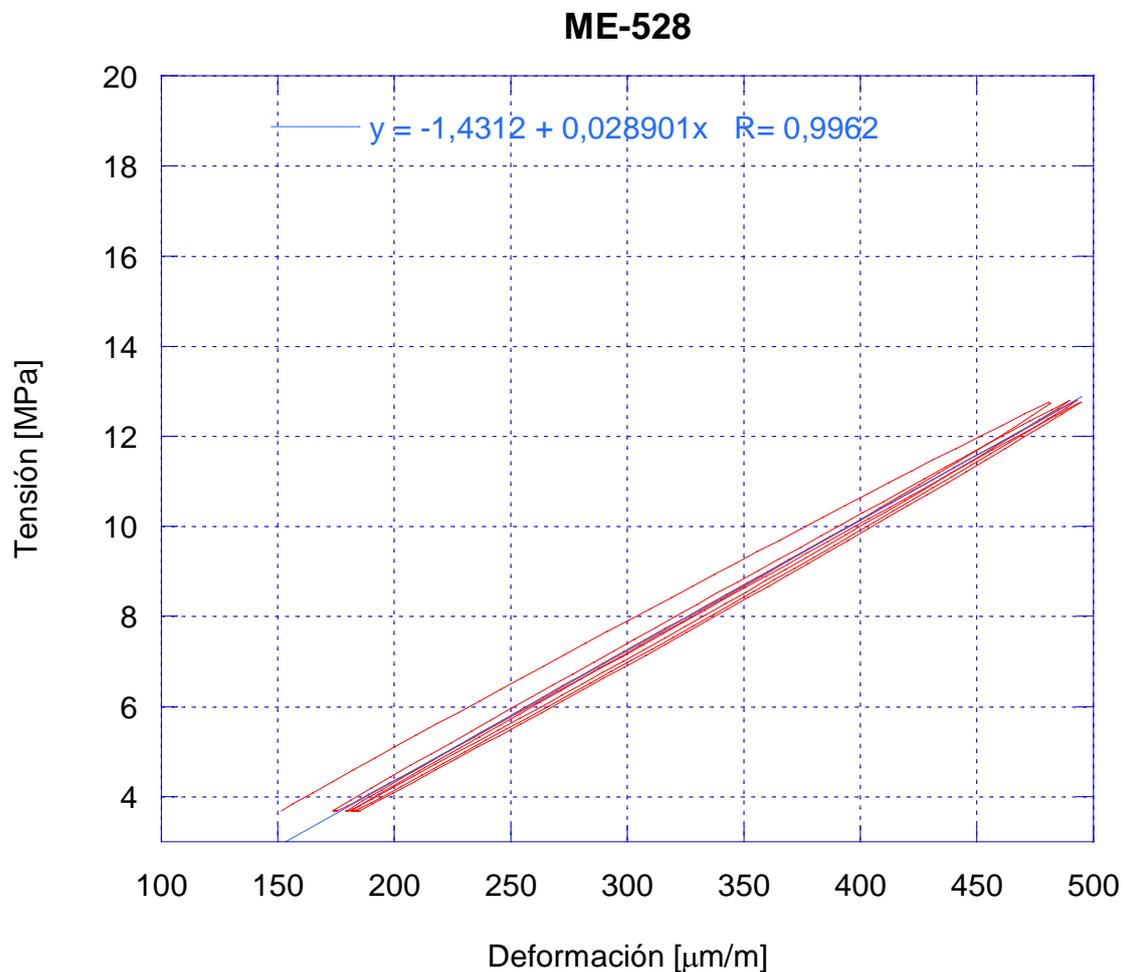
2. Ensayo

PRENSA: Instron 200 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 28,9 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HP 25	EDAD: 387 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Control	

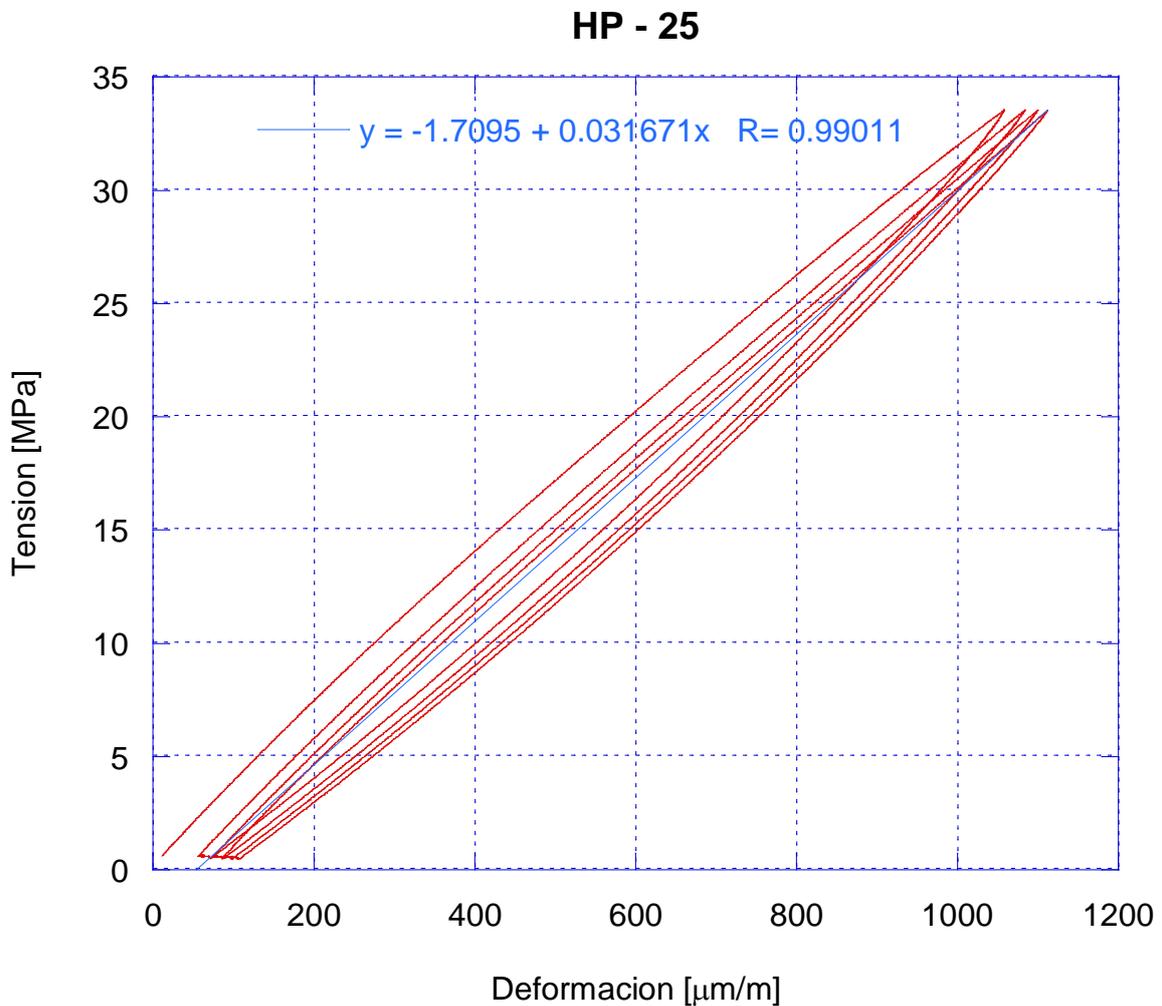
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 31,7 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HP - 27	EDAD: 387 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Control	

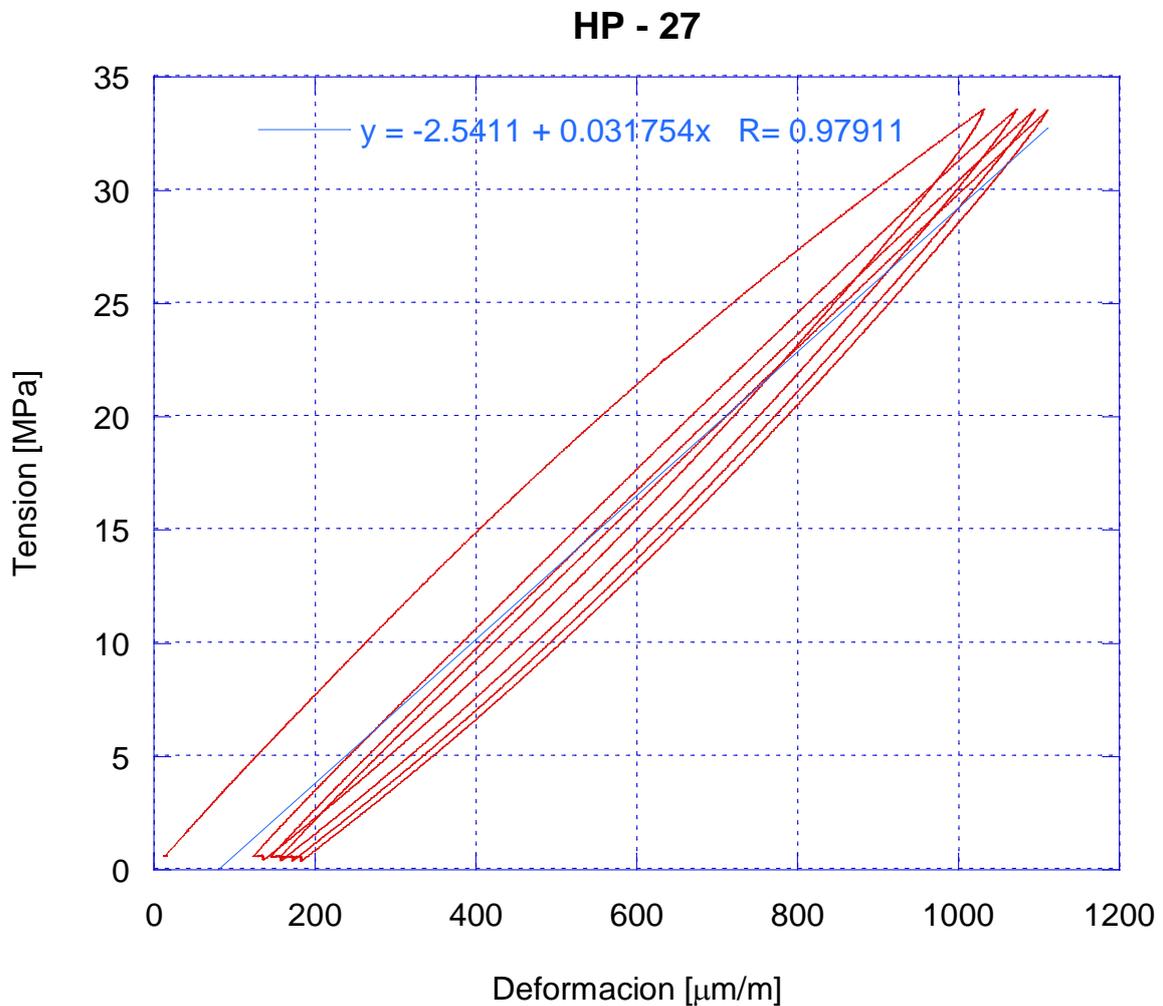
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 31,7 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HPR - 89	EDAD: 387 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

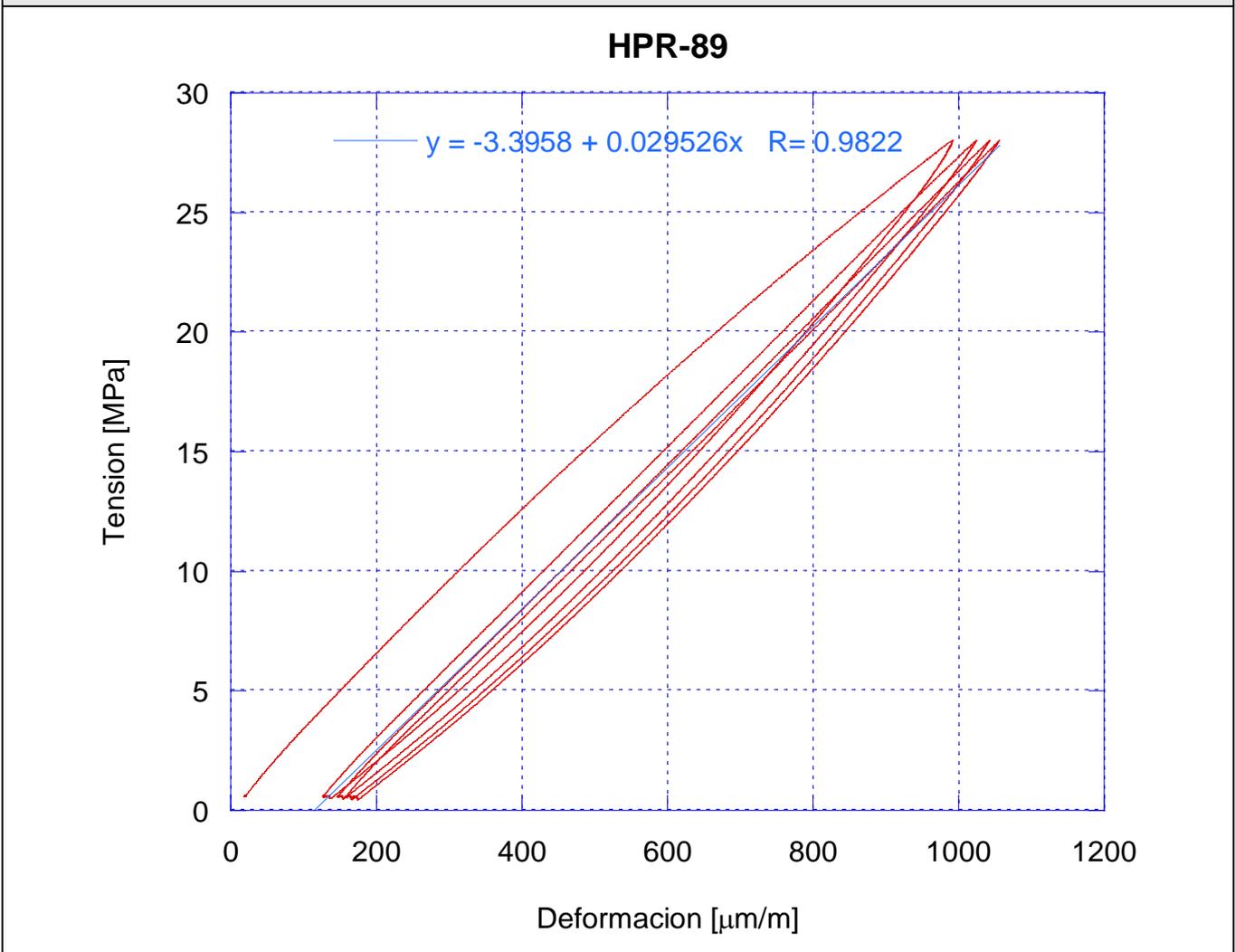
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1500 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 29,5 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HPR - 90	EDAD: 387 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

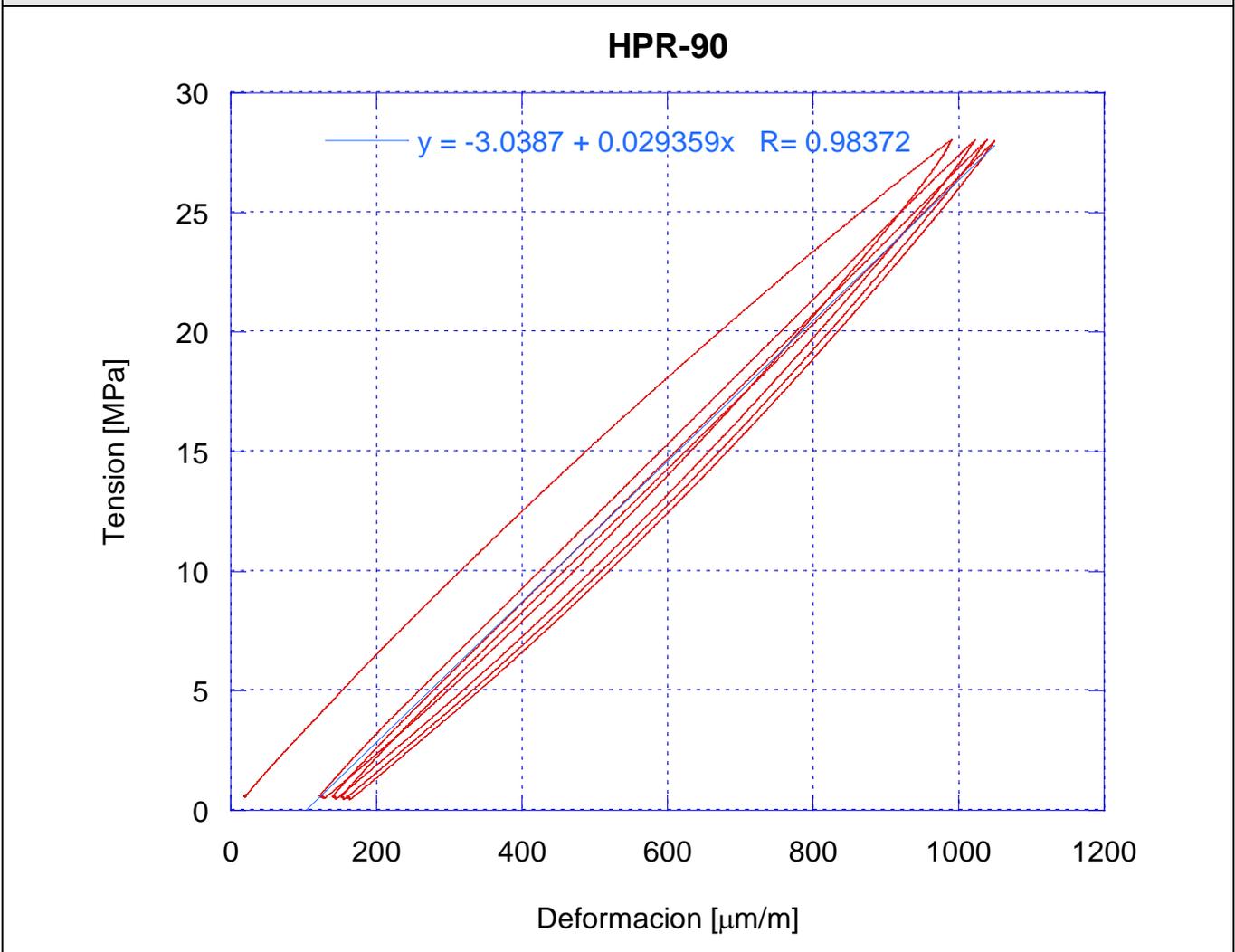
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 29,4 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR25 - 215	EDAD: 386 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

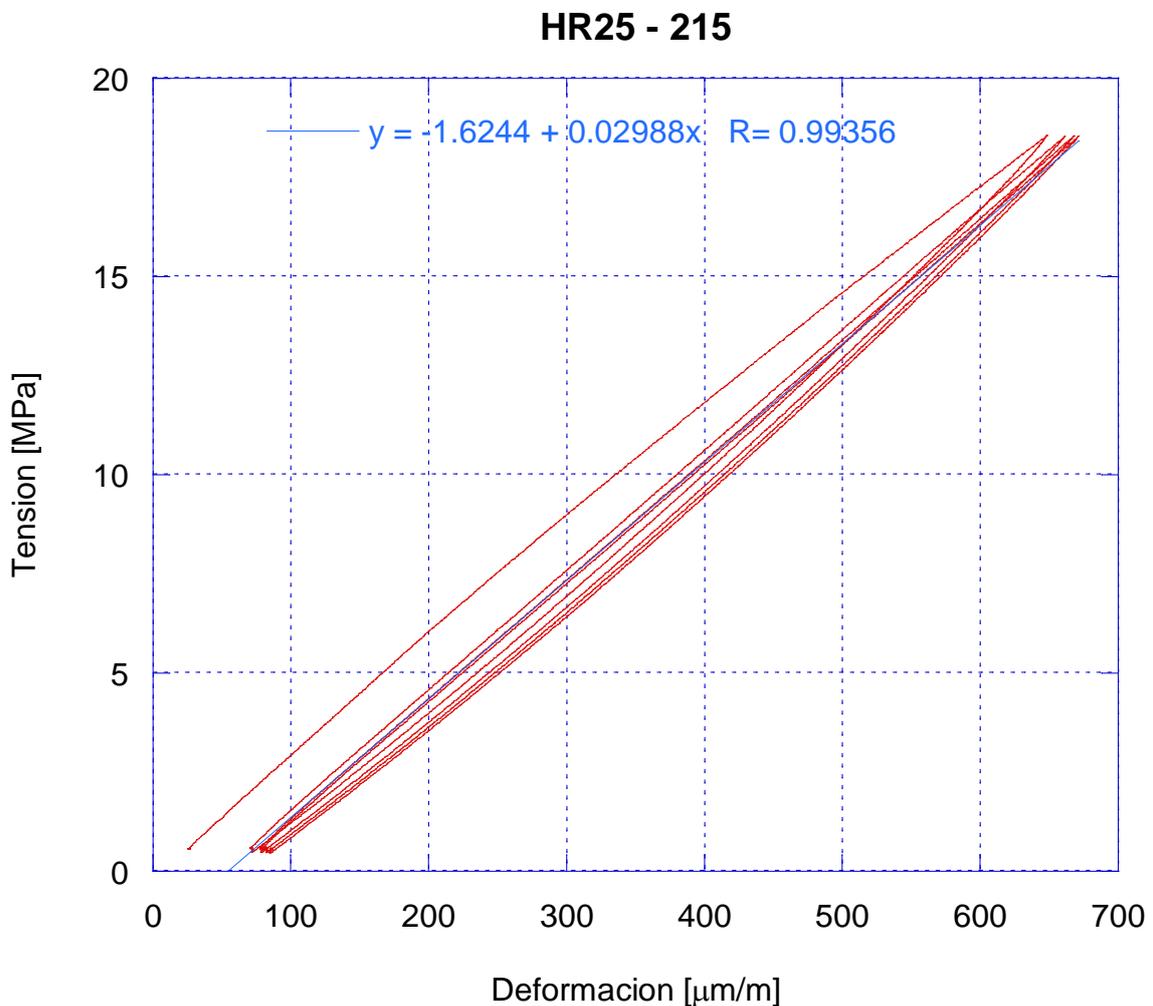
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 29,9 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR25 - 216	EDAD: 386 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

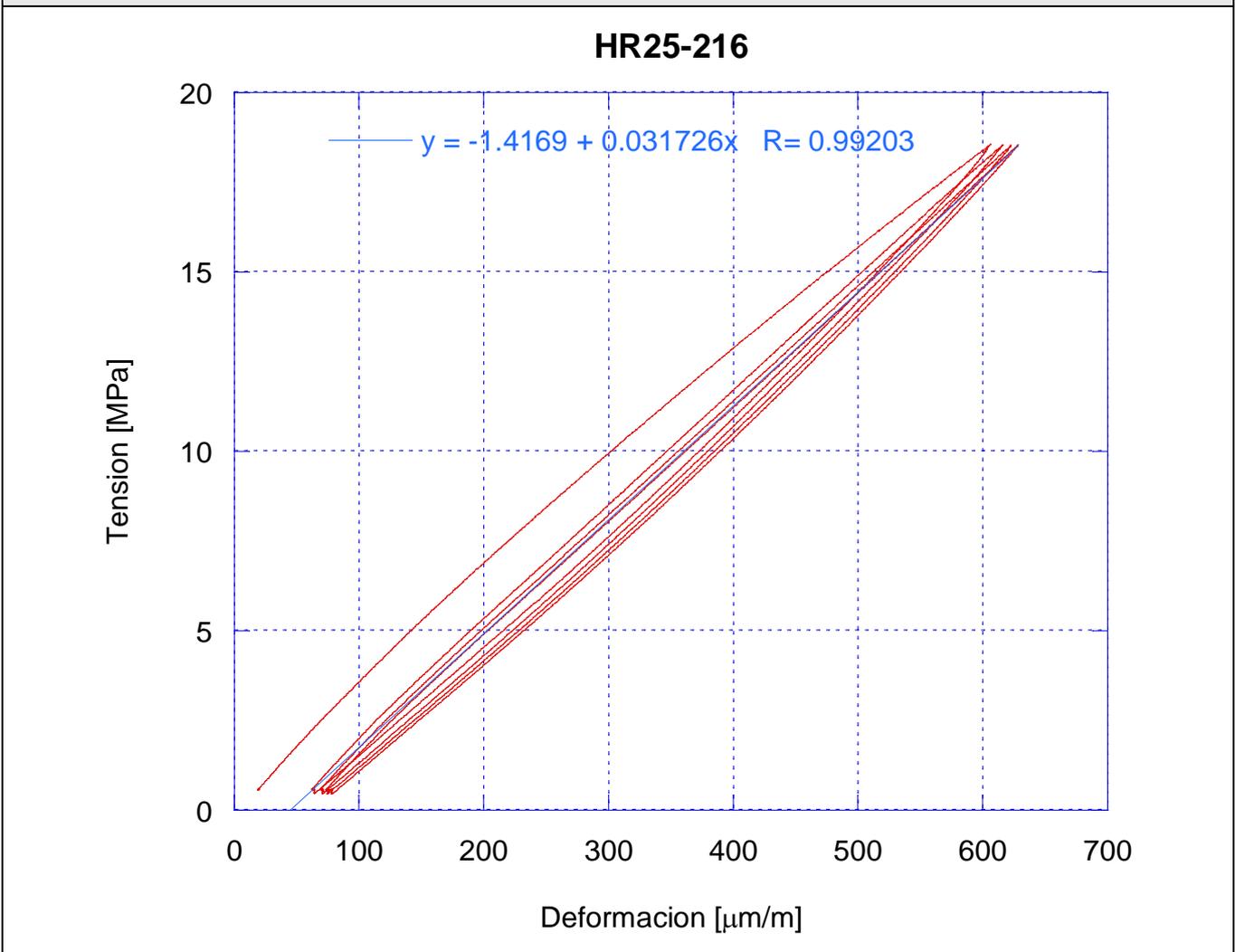
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1500 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 31,7 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR50 - 278	EDAD: 386 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

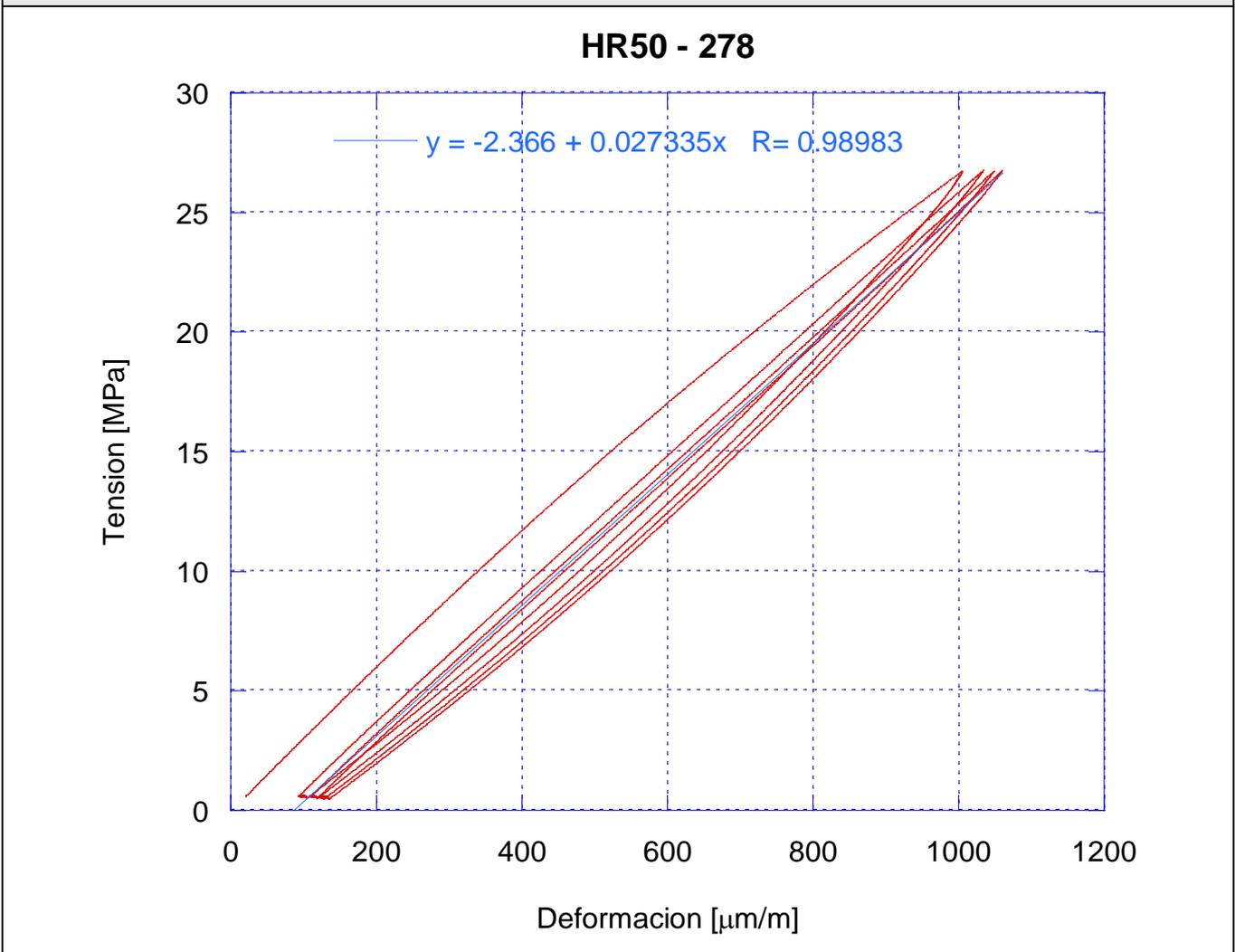
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 27,3 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR50 - 279	EDAD: 386 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

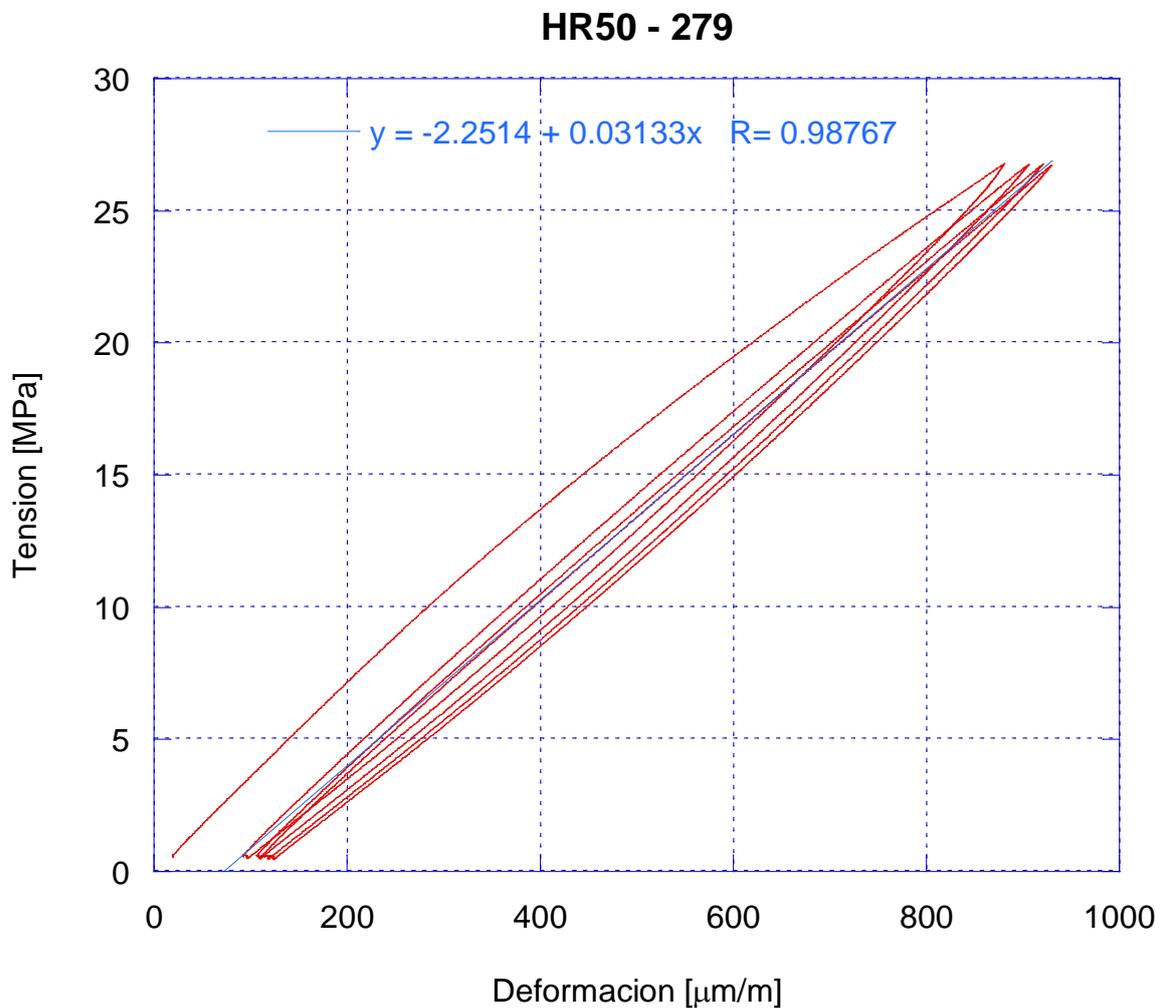
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1500 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 31,3 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR25 - 467	EDAD: 386 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

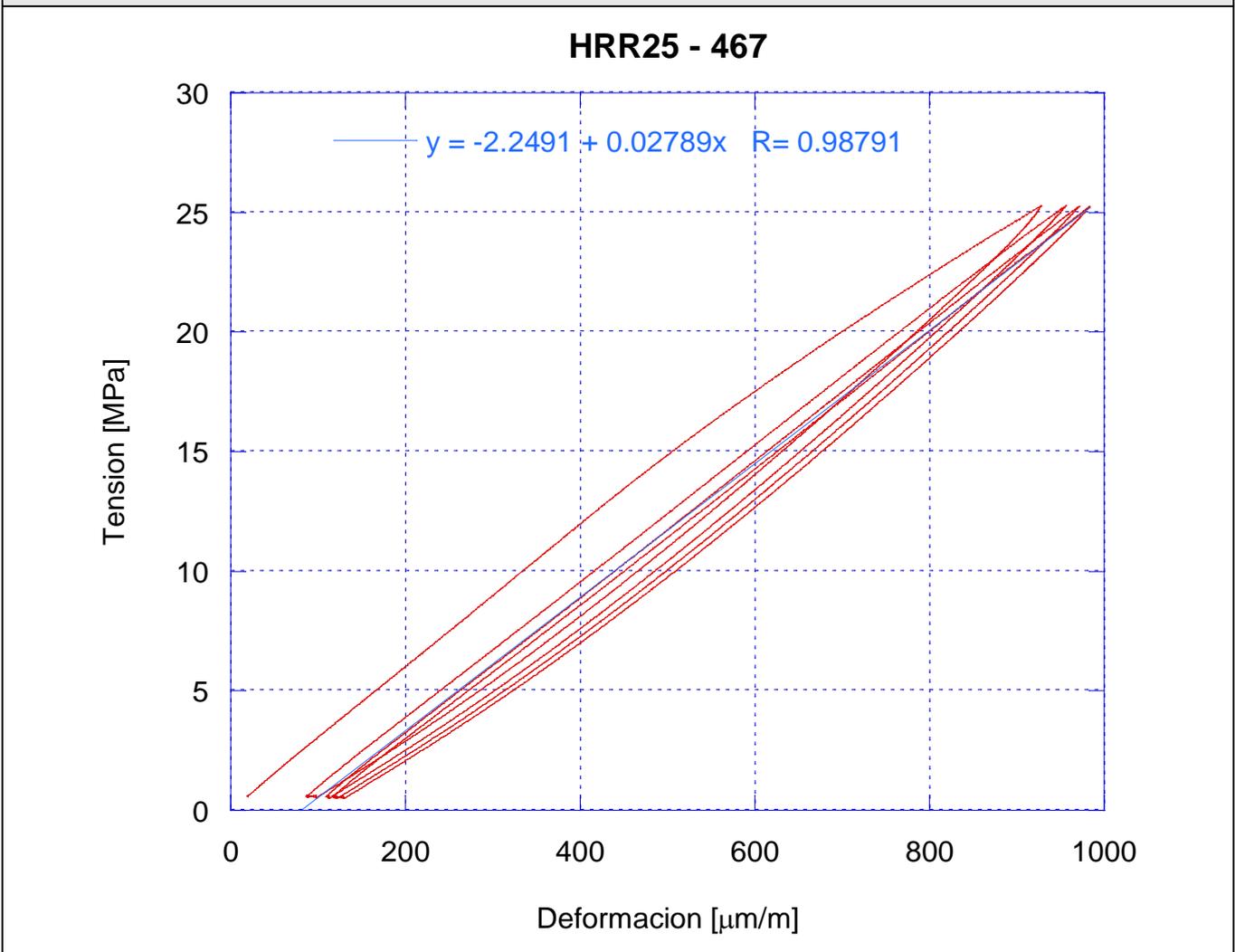
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 27,9 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR50 - 530	EDAD: 387 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

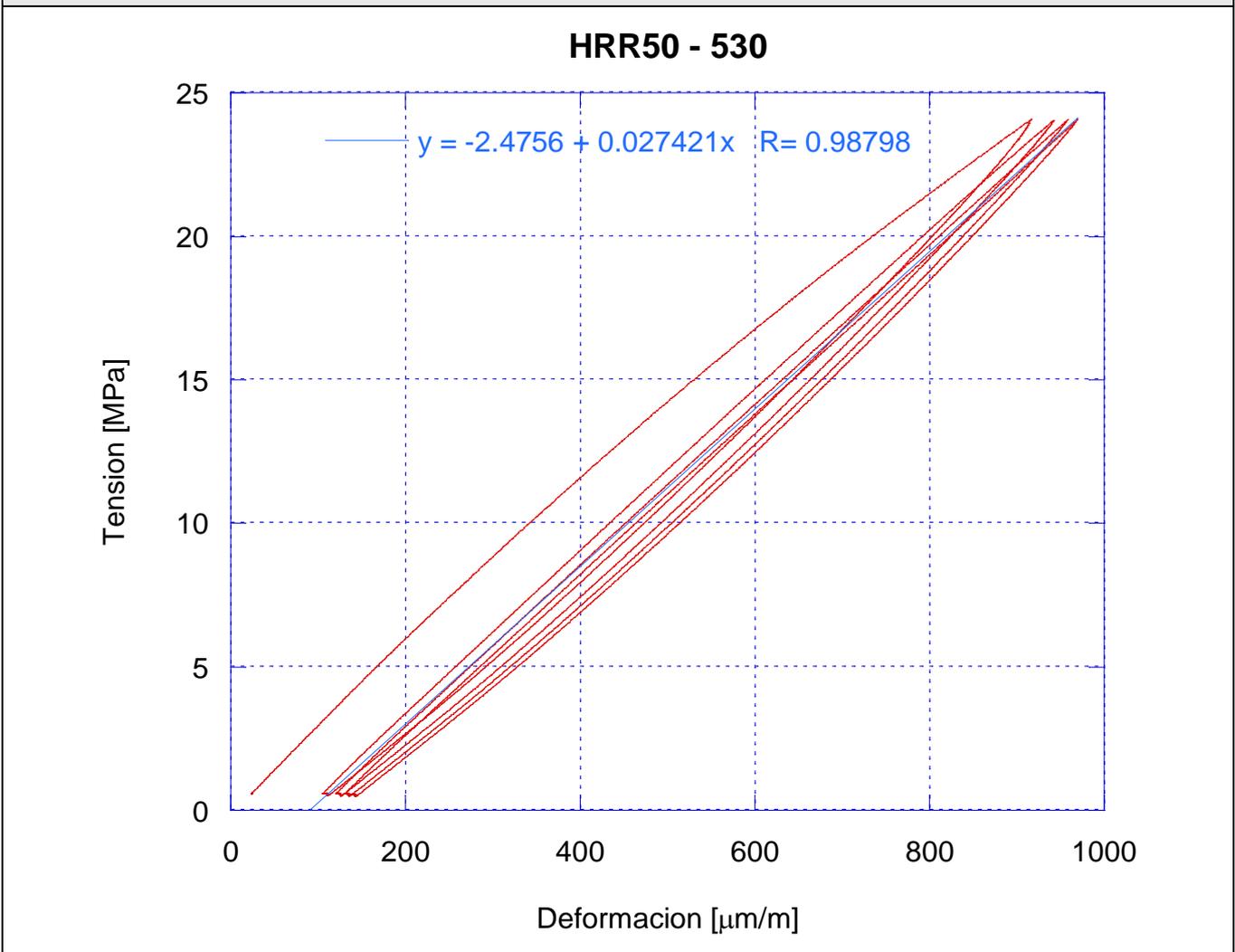
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 27,4 GPa

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR50 - 531	EDAD: 387 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

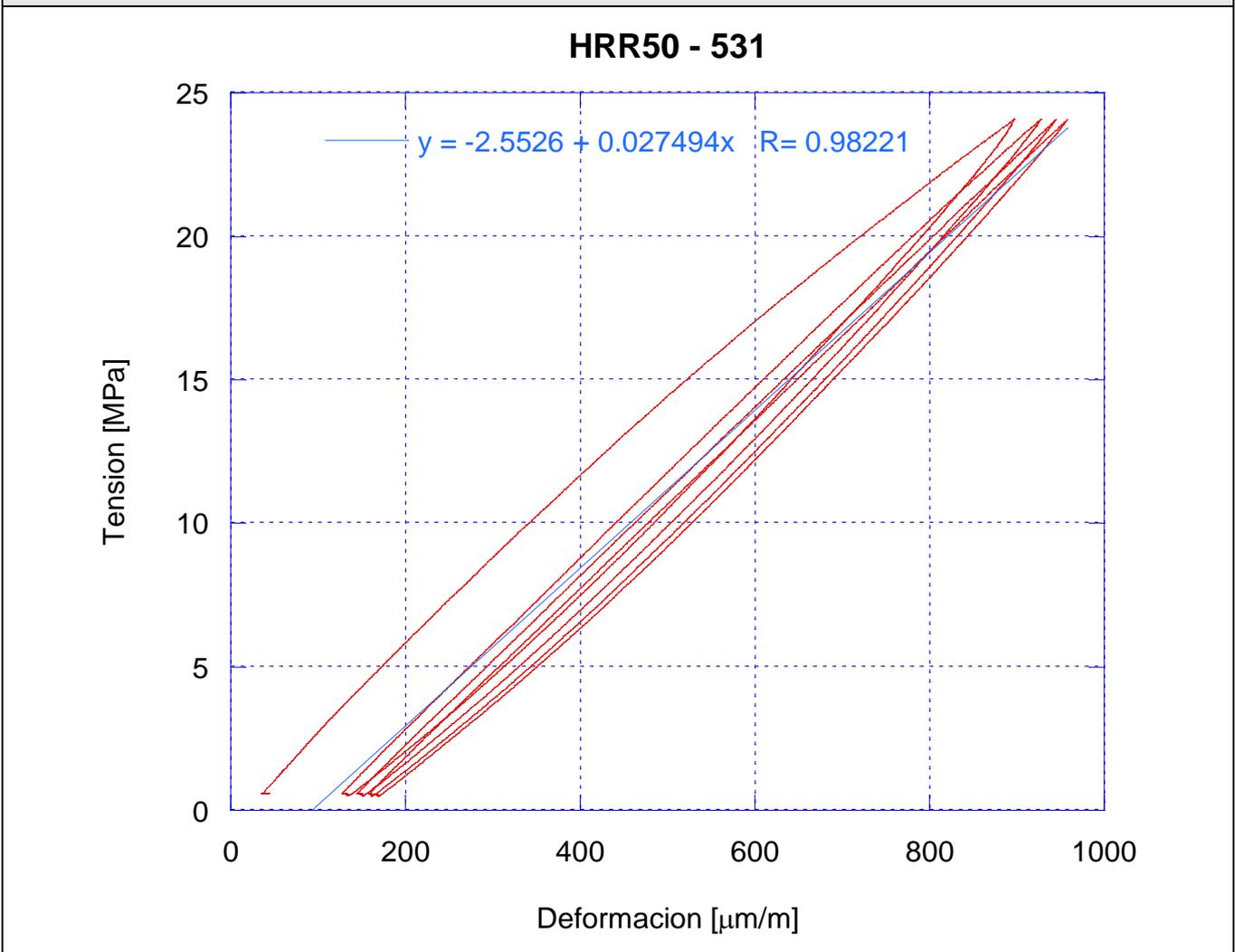
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Número de cargas/descargas: 4	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	----------------------------------	---

3. Resultados

MÓDULO DE ELASTICIDAD: 27,5 GPa

4. Tensión - Deformación



Anejo III. Resultado de los ensayos de rotura a compresión

1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HP 22	EDAD: 161 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Control	

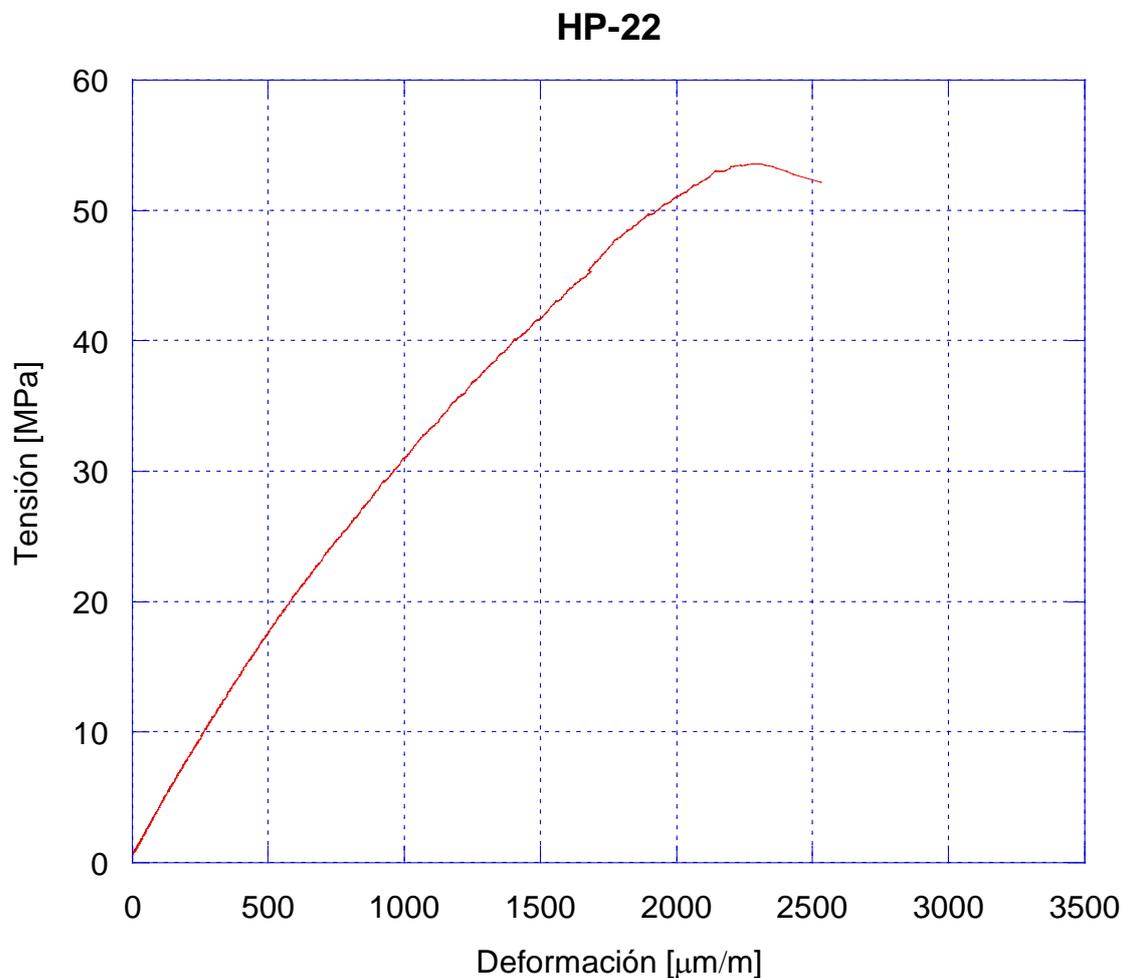
2. Ensayo

PRENSA: Servohidráulica Suzpecar 150 t	Velocidad de carga: 0,015 mm/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---	-------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 53,5 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 35,5 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HP-R 85	EDAD: 161 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

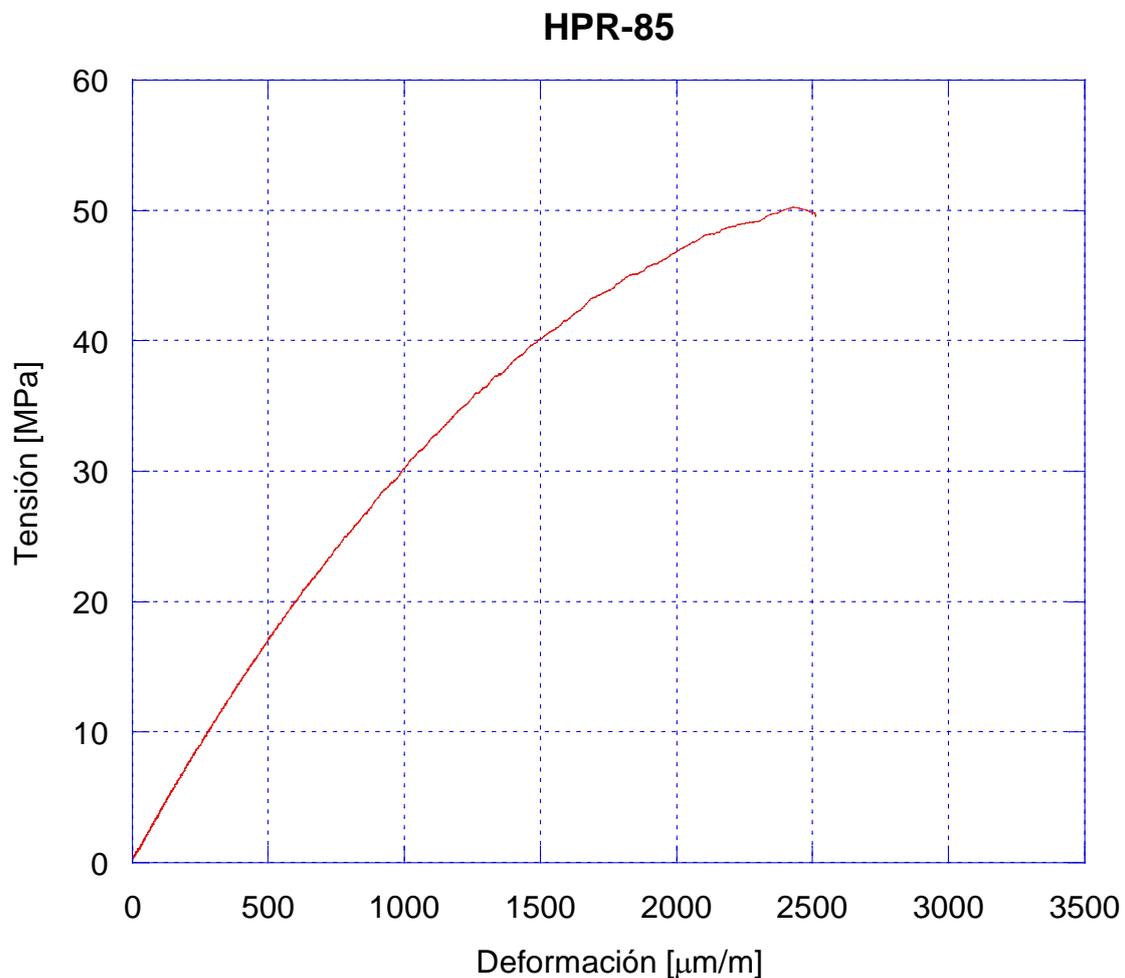
2. Ensayo

PRENSA: Servohidráulica Suzpecar 150 t	Velocidad de carga: 0,015 mm/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---	-------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 50,2 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 34,1 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR-25 211	EDAD: 160 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

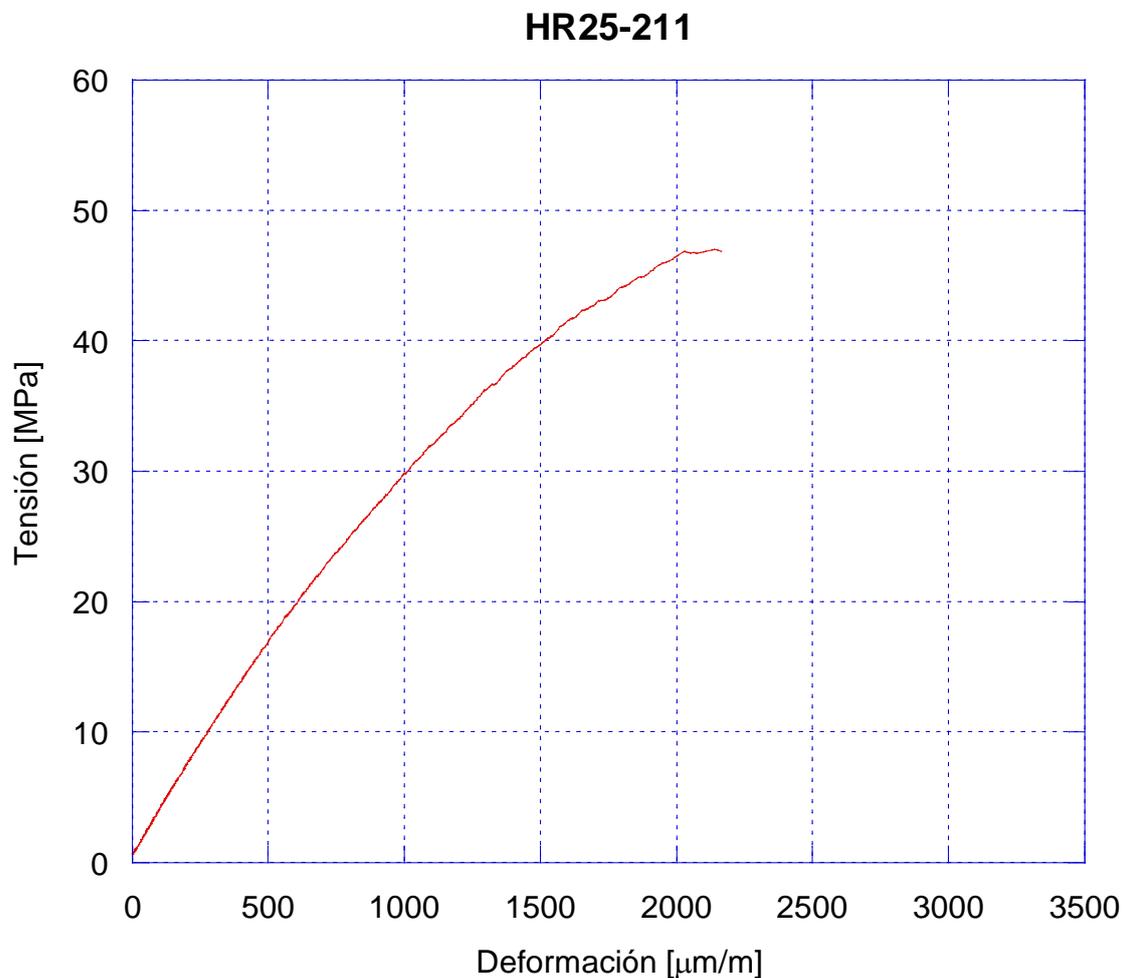
2. Ensayo

PRENSA: Servohidráulica Suzpecar 150 t	Velocidad de carga: 0,015 mm/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---	-------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 47,0 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 33,9 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR-50 274	EDAD: 159 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

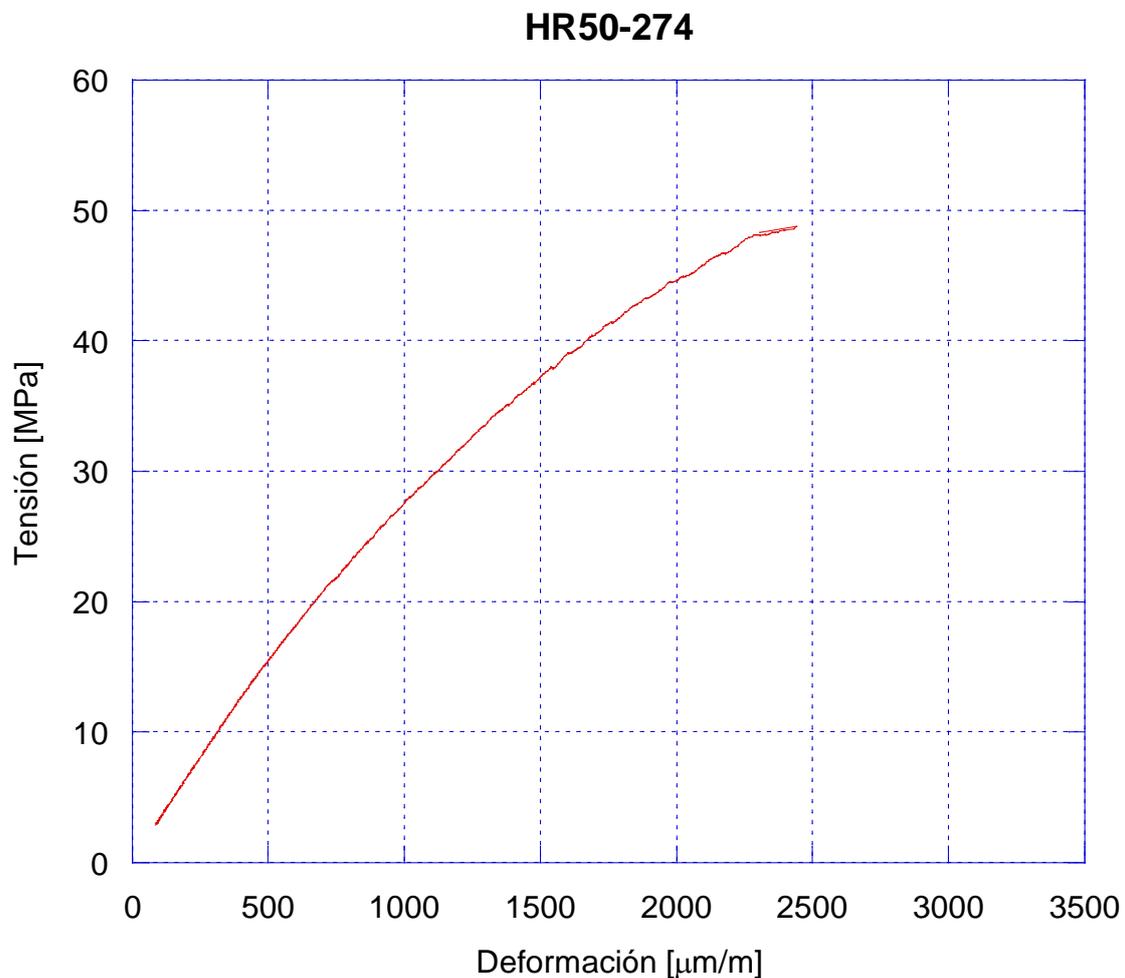
2. Ensayo

PRENSA: Servohidráulica Suzpecar 150 t	Velocidad de carga: 0,015 mm/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---	-------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 48,8 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 31,9 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR-25 463	EDAD: 160 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

2. Ensayo

PRENSA: Servohidráulica Suzpecar 150 t	Velocidad de carga: 0,015 mm/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---	-------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 47,5 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 34,2 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR-50 526	EDAD: 159 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y refrentada con azufre	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

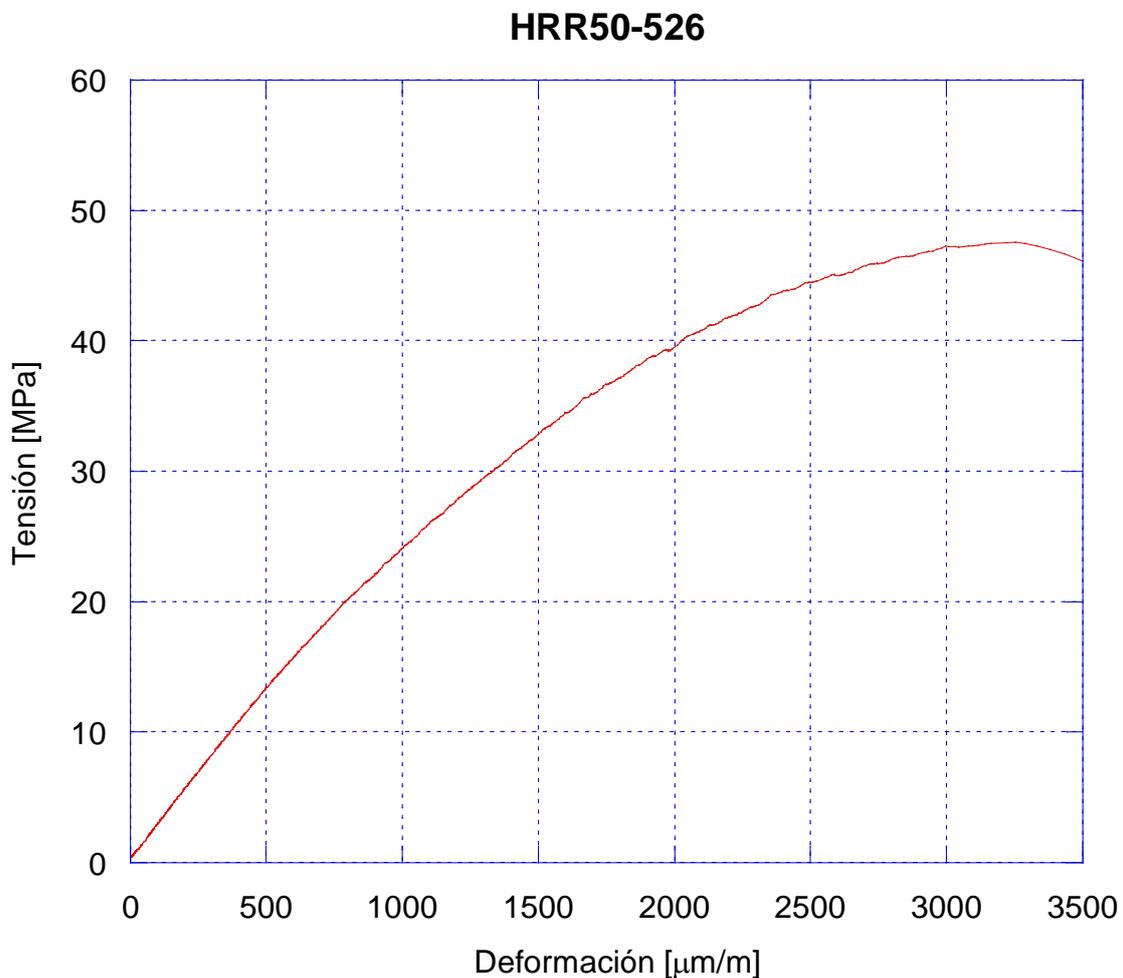
2. Ensayo

PRENSA: Servohidráulica Suzpecar 150 t	Velocidad de carga: 0,015 mm/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---	-------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 47,5 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 27,7 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HP-25	EDAD: 387 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Control	

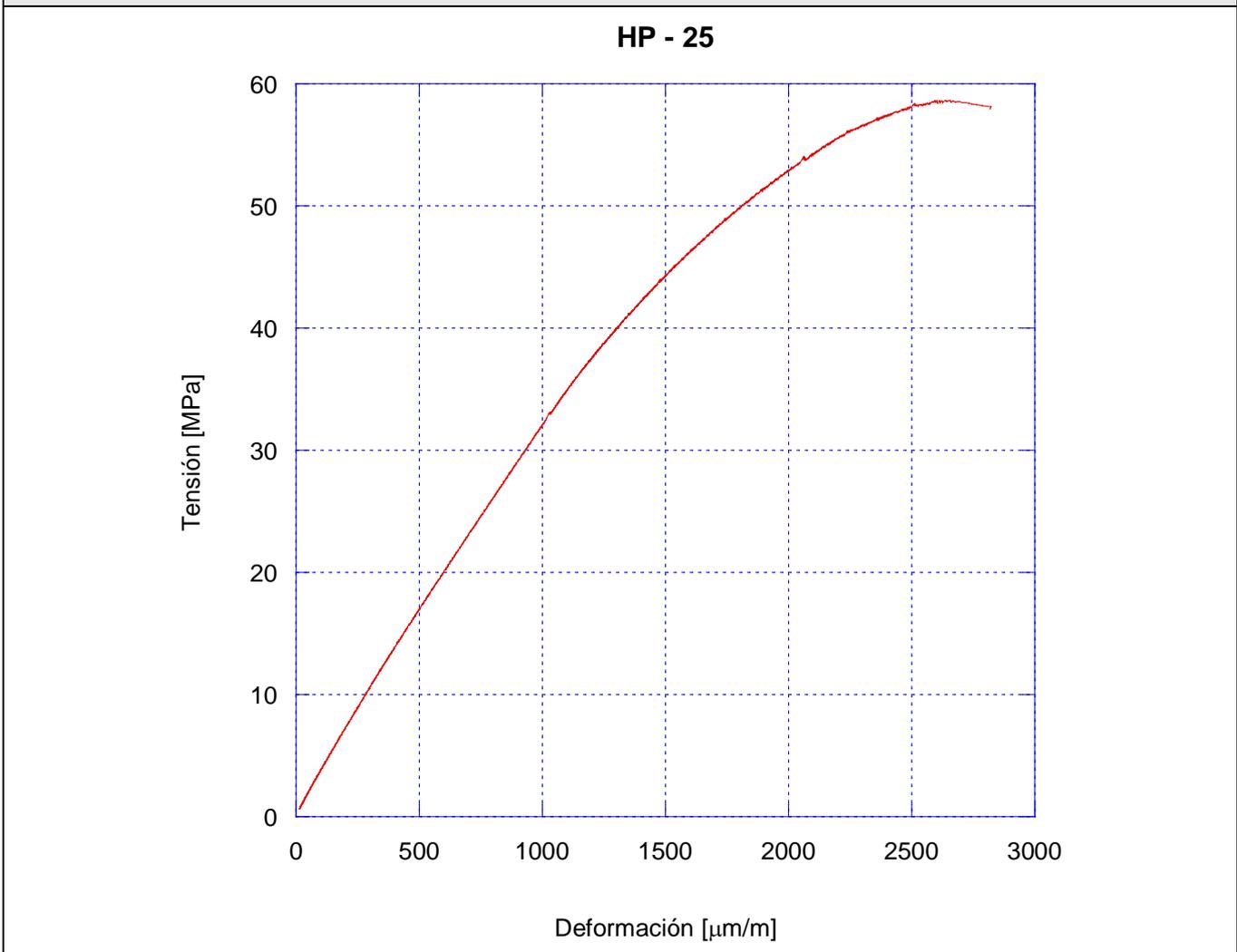
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Velocidad de carga: 0,5 MPa/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 58,5 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 31,7 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HP-27	EDAD: 387 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Control	

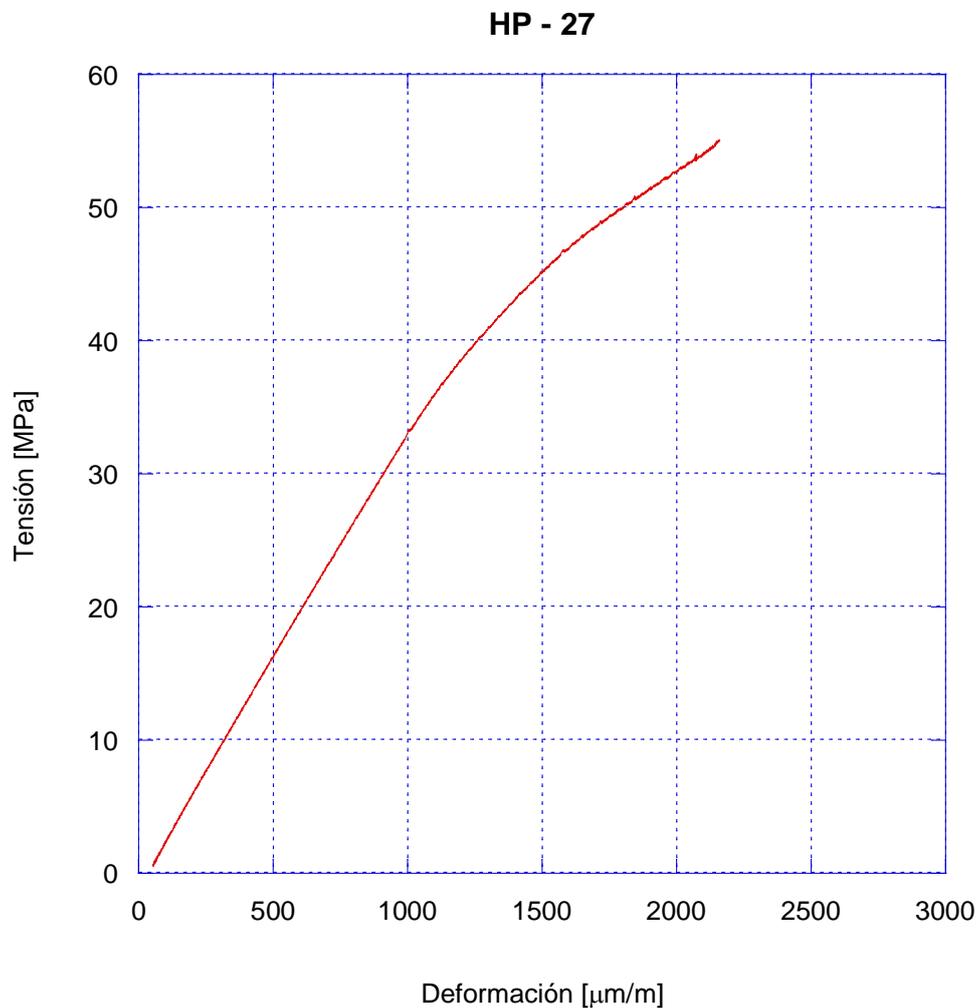
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Velocidad de carga: 0,5 MPa/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 55,0 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 31,7 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HPR-89	EDAD: 387 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

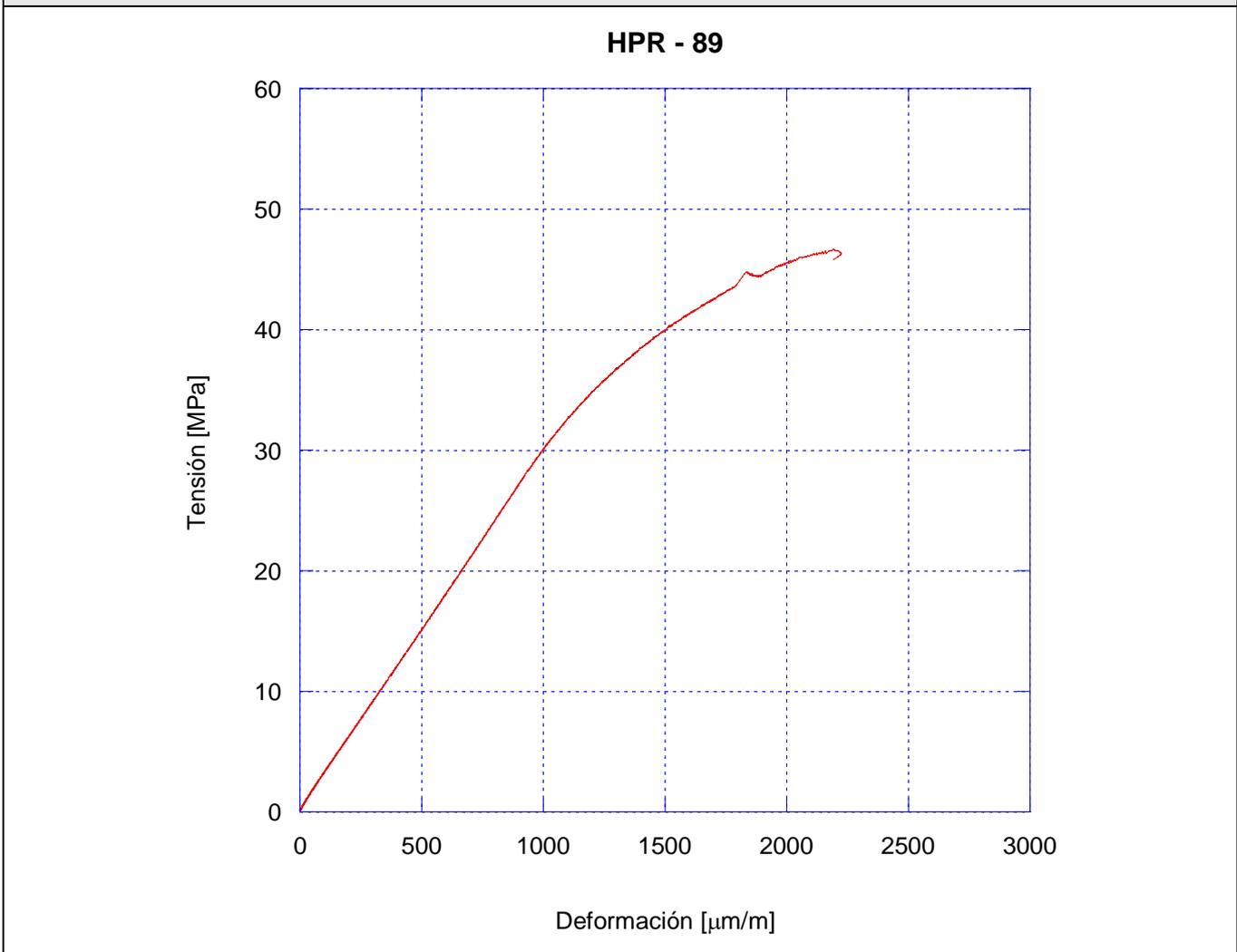
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Velocidad de carga: 0,5 MPa/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 46,5 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 29,5 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HPR-90	EDAD: 387 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

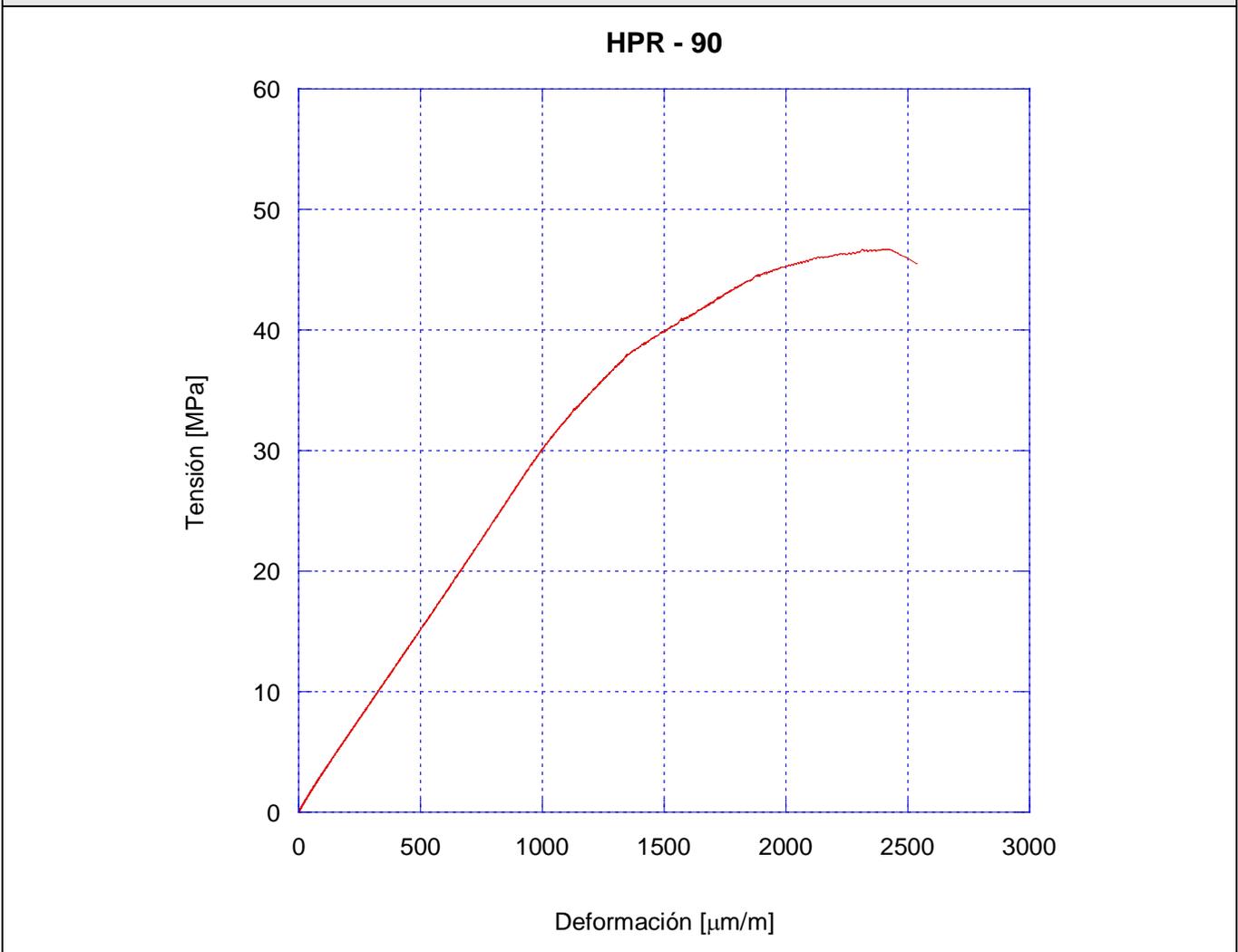
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Velocidad de carga: 0,5 MPa/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 46,7 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 29,4 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR25-215	EDAD: 386 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

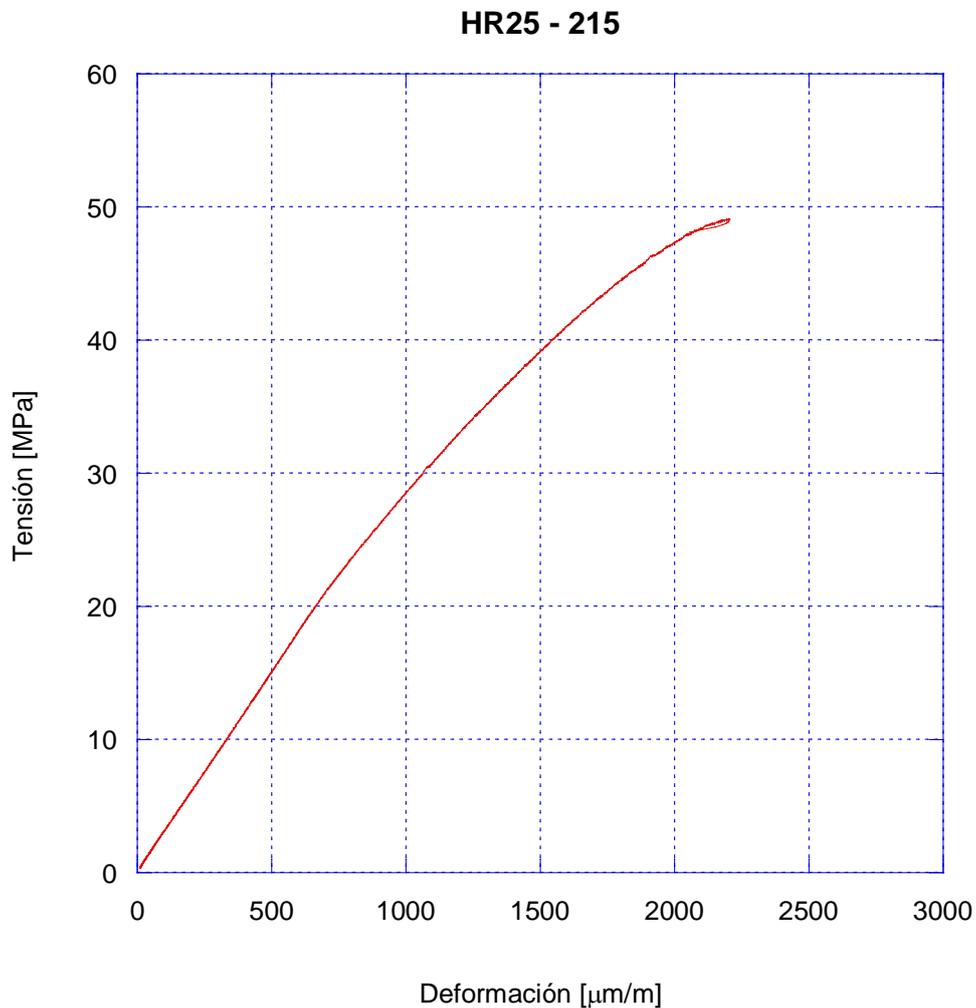
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Velocidad de carga: 0,5 MPa/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 49,1 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 29,9 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR25-216	EDAD: 386 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

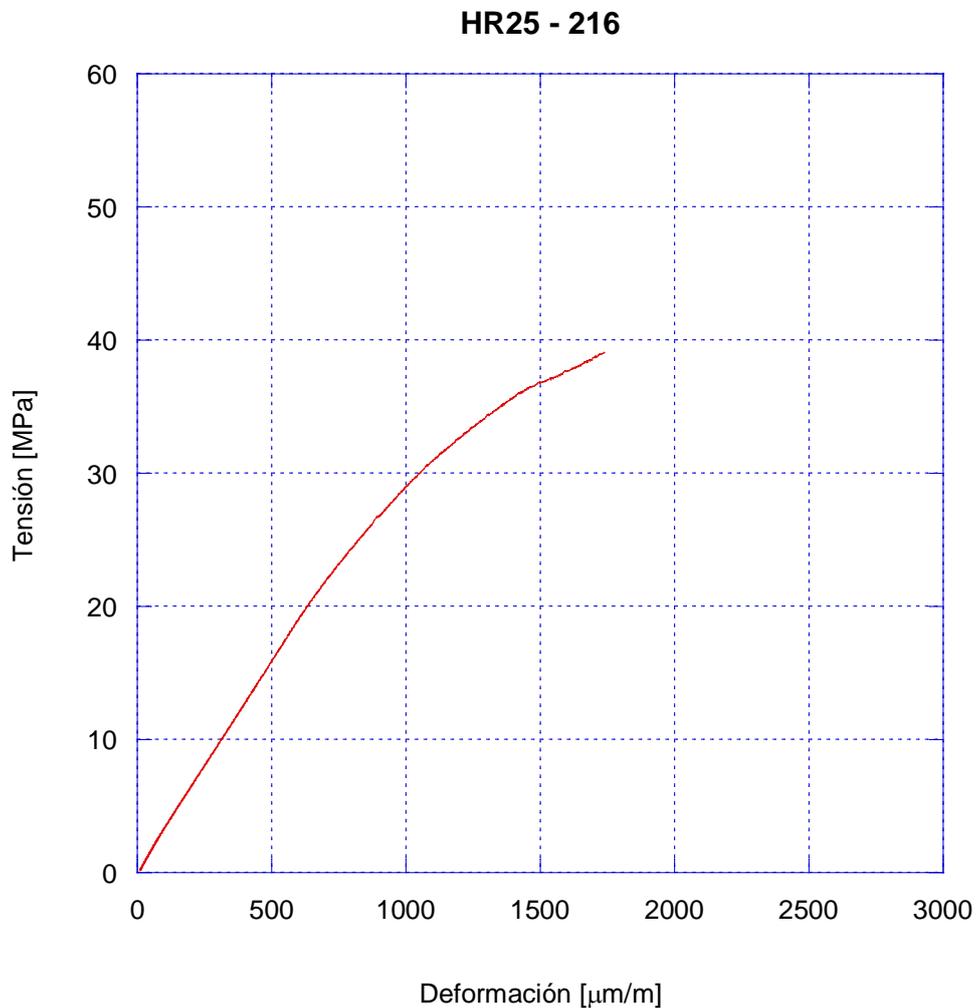
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Velocidad de carga: 0,5 MPa/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 39,0 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 31,7 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR50-278	EDAD: 386 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

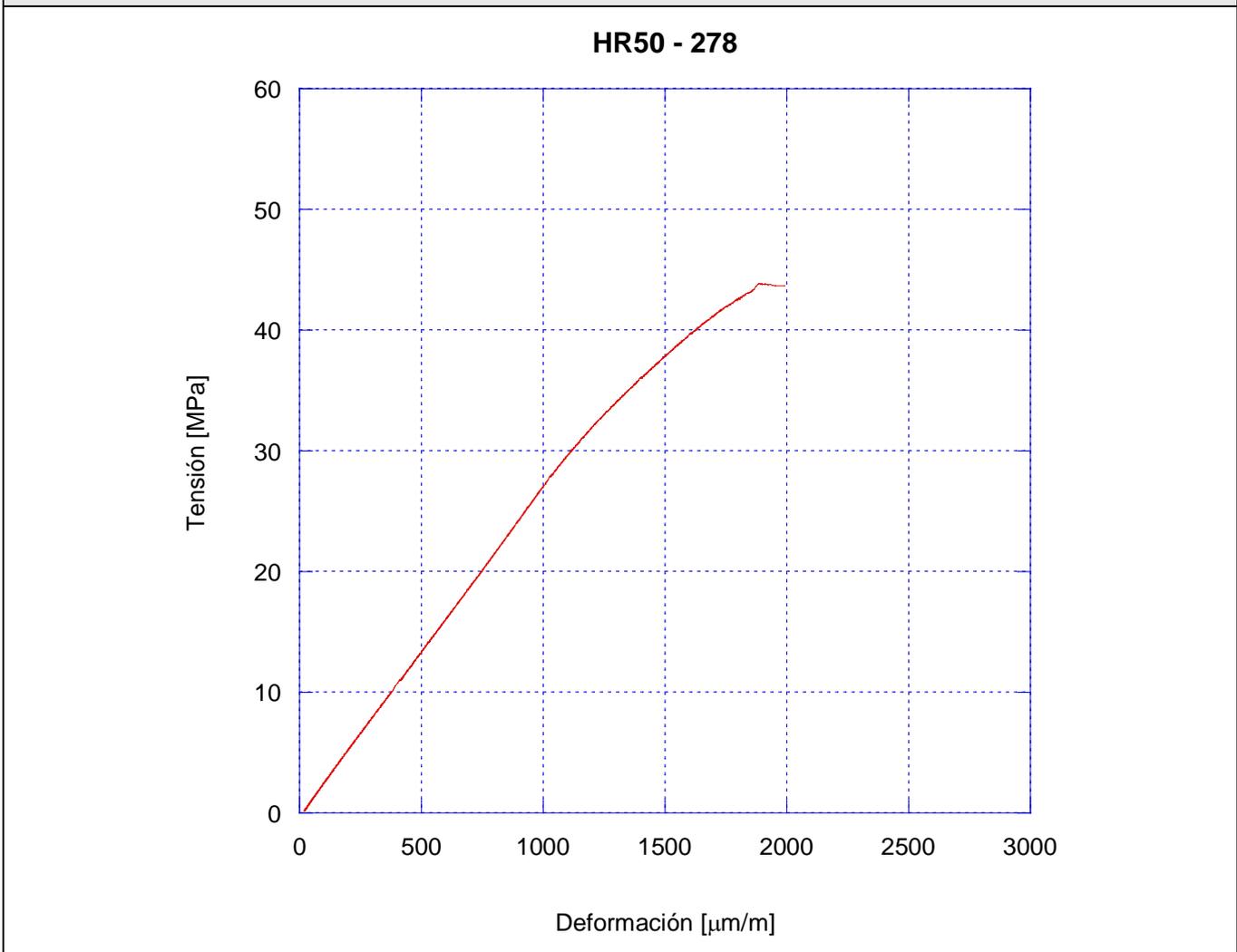
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Velocidad de carga: 0,5 MPa/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 43,8 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 27,3 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR50-279	EDAD: 386 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

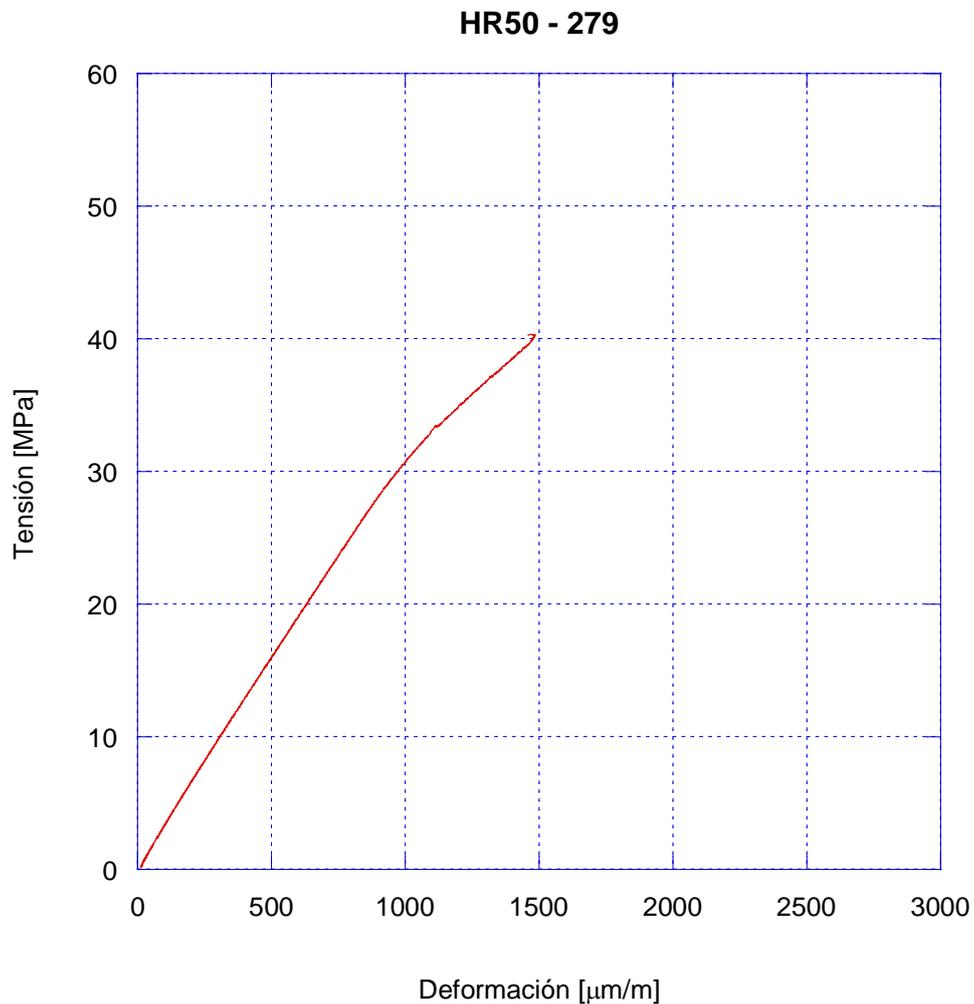
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Velocidad de carga: 0,5 MPa/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 40,3 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 31,3 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR25-467	EDAD: 386 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

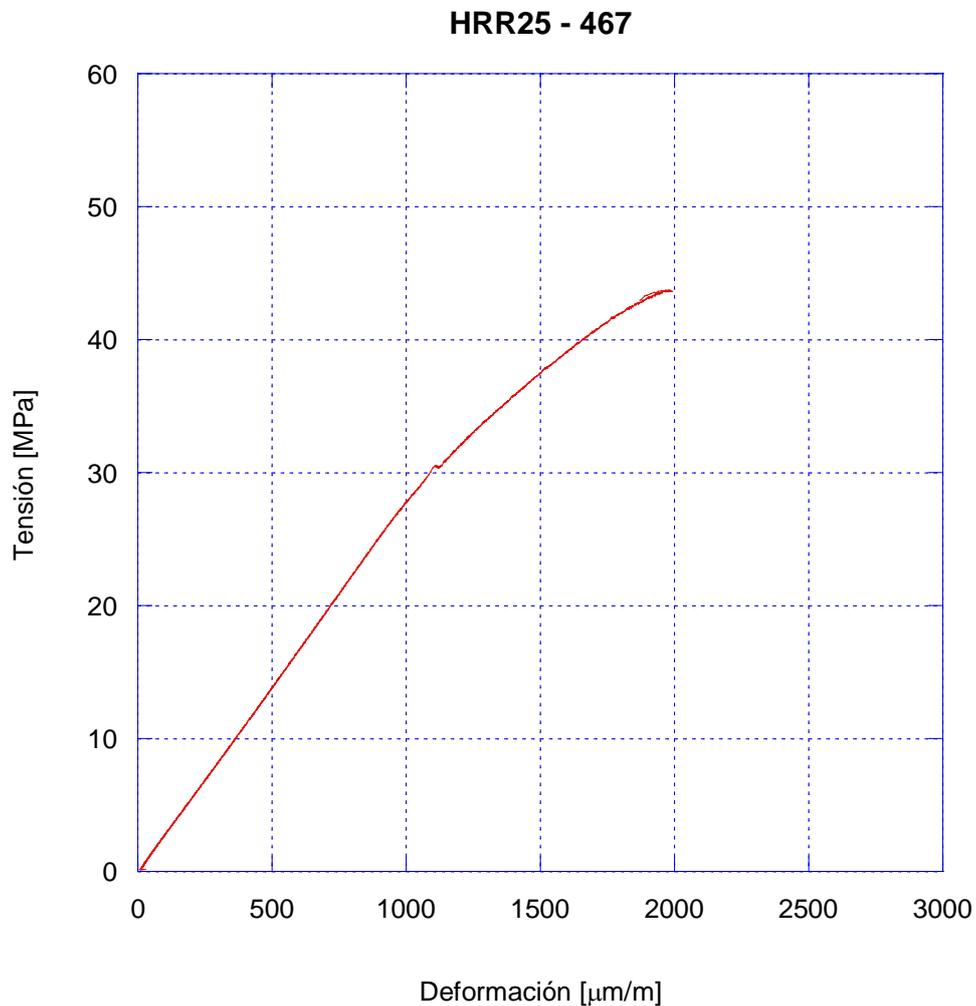
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Velocidad de carga: 0,5 MPa/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 43,7 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 27,9 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR50-530	EDAD: 387 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

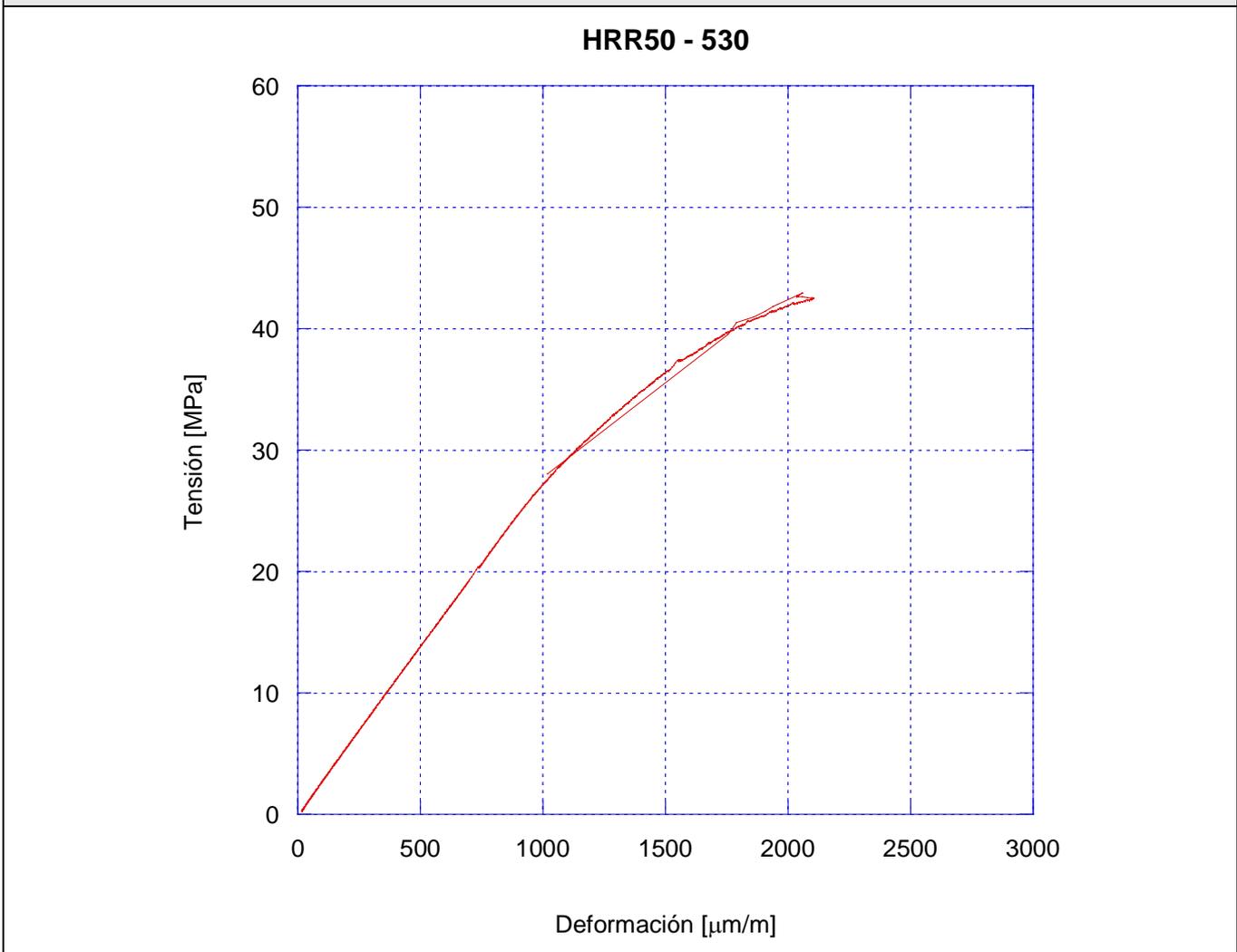
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Velocidad de carga: 0,5 MPa/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 42,7 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 27,4 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR50-531	EDAD: 387 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

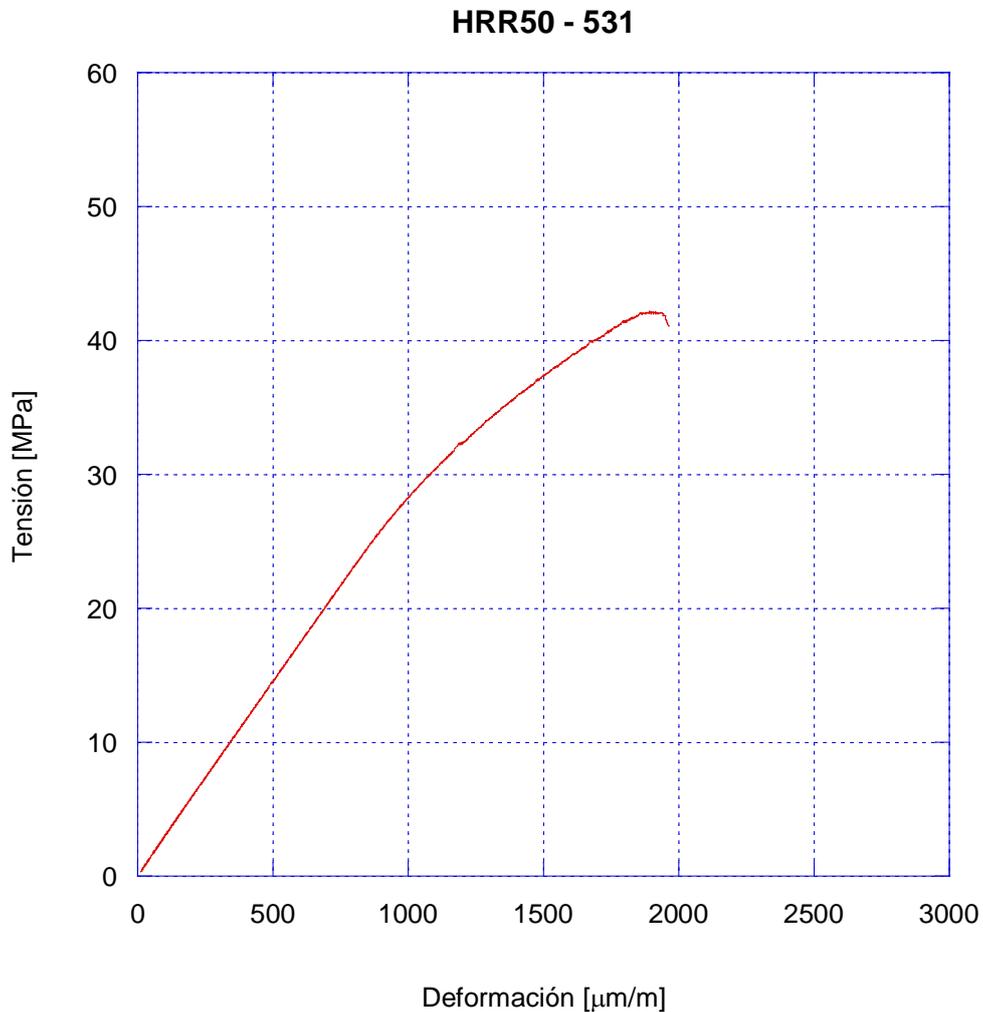
2. Ensayo

PRENSA: Instron 1000 kN	Velocidad de carga: 0,5 MPa/seg	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
----------------------------	------------------------------------	---

3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 42,1 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 27,5 GPa
---------------------------------------	------------------------------------

4. Tensión - Deformación



Anejo IV. Resultados de los ensayos de fatiga

1. Material

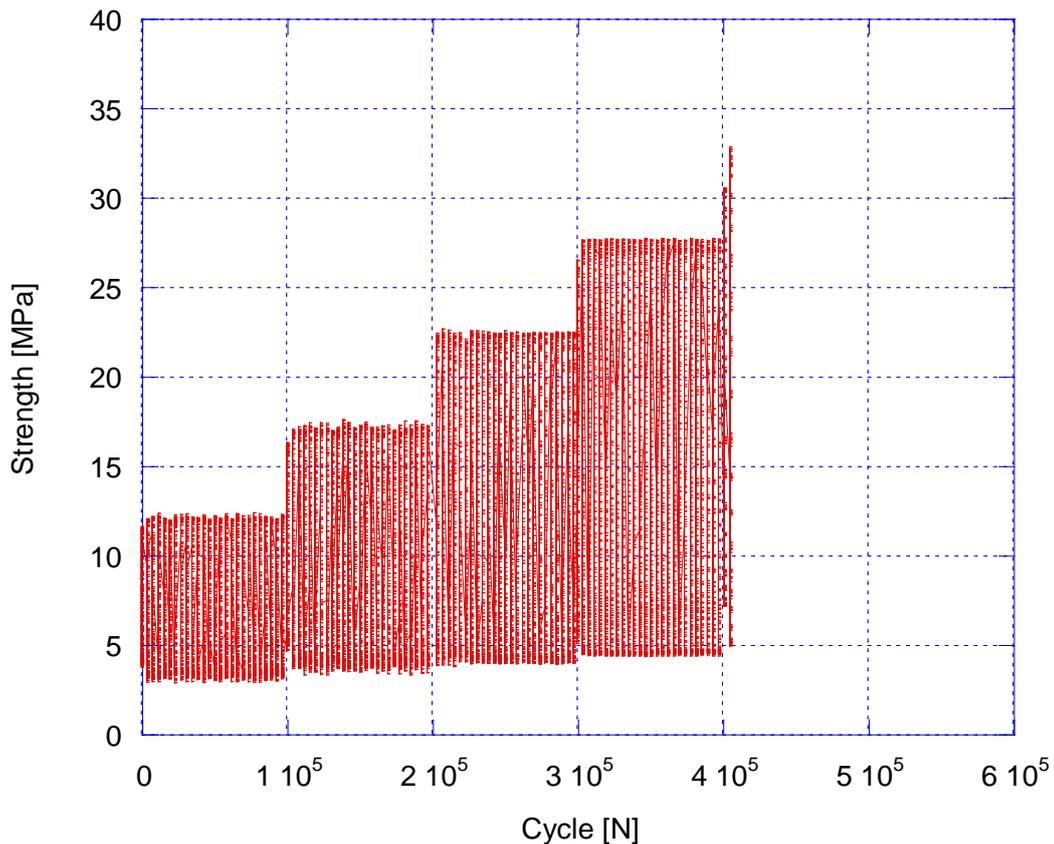
ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura		CÓDIGO/REFERENCIA: HP 568	EDAD: 209 días	
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida		TIPO DE HORMIGÓN: Control		
2. Ensayo				
PRENSA: Servohidráulica Zwick Resonancia		EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω		
Escalón Fat.1	σ_{min} [MPa]	σ_{max} [MPa]	f_{min} [Hz]	f_{max} [Hz]
1	2,5	12,5	77,10	77,27
2	2,5	17,5	78,77	80,55
3	2,5	22,5	83,17	83,68
4	2,5	27,5	83,87	84,55
5	2,5	32,5	84,69	84,69



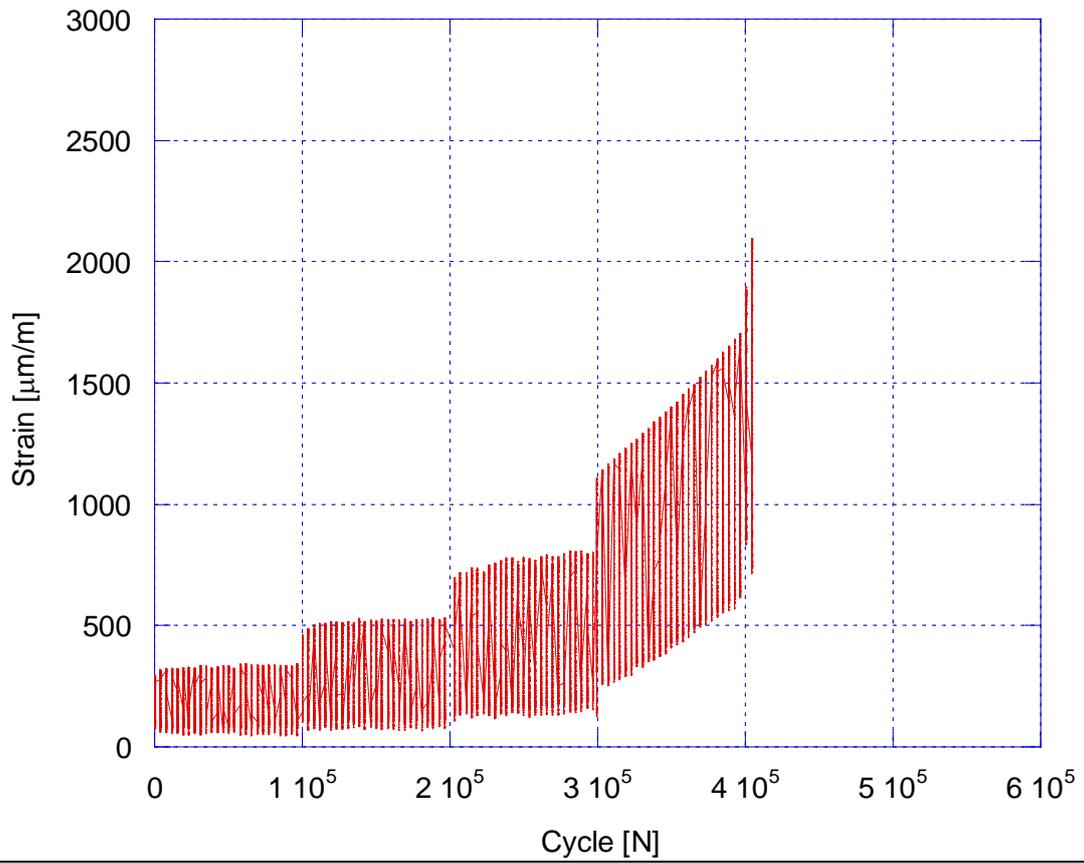
3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 53,6 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 35,5 GPa	ESCALÓN DE ROTURA: 5 – σ_{max} =32,5 MPa – 61%
---------------------------------------	------------------------------------	--

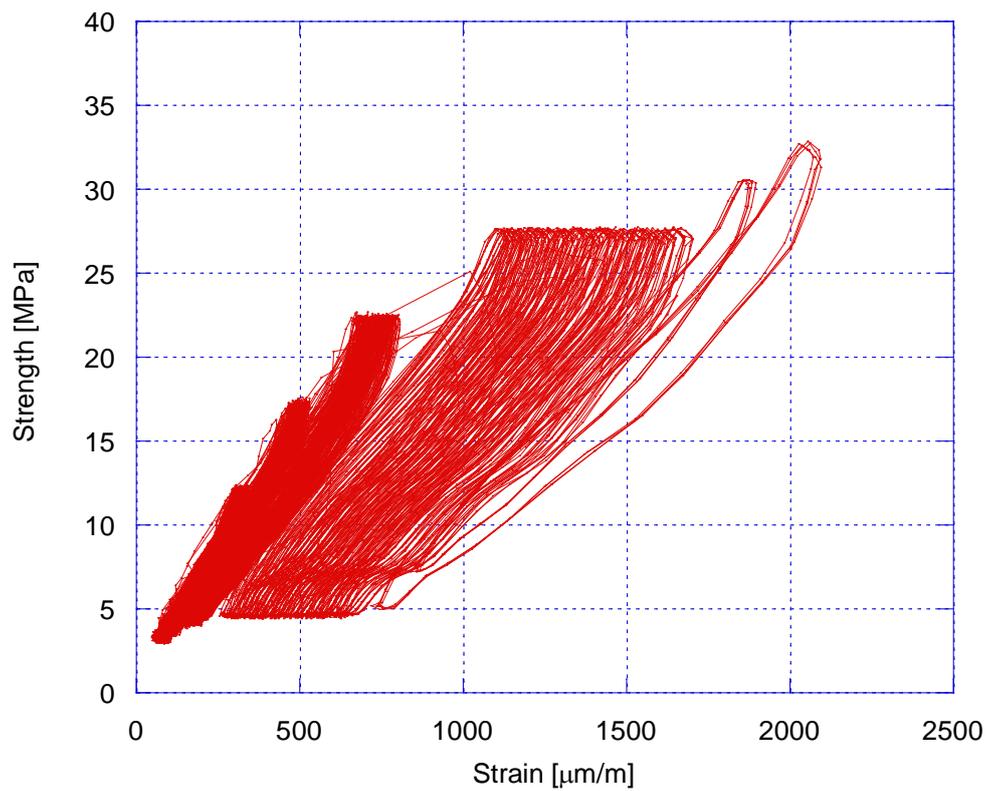
4. Tensión - Ciclos



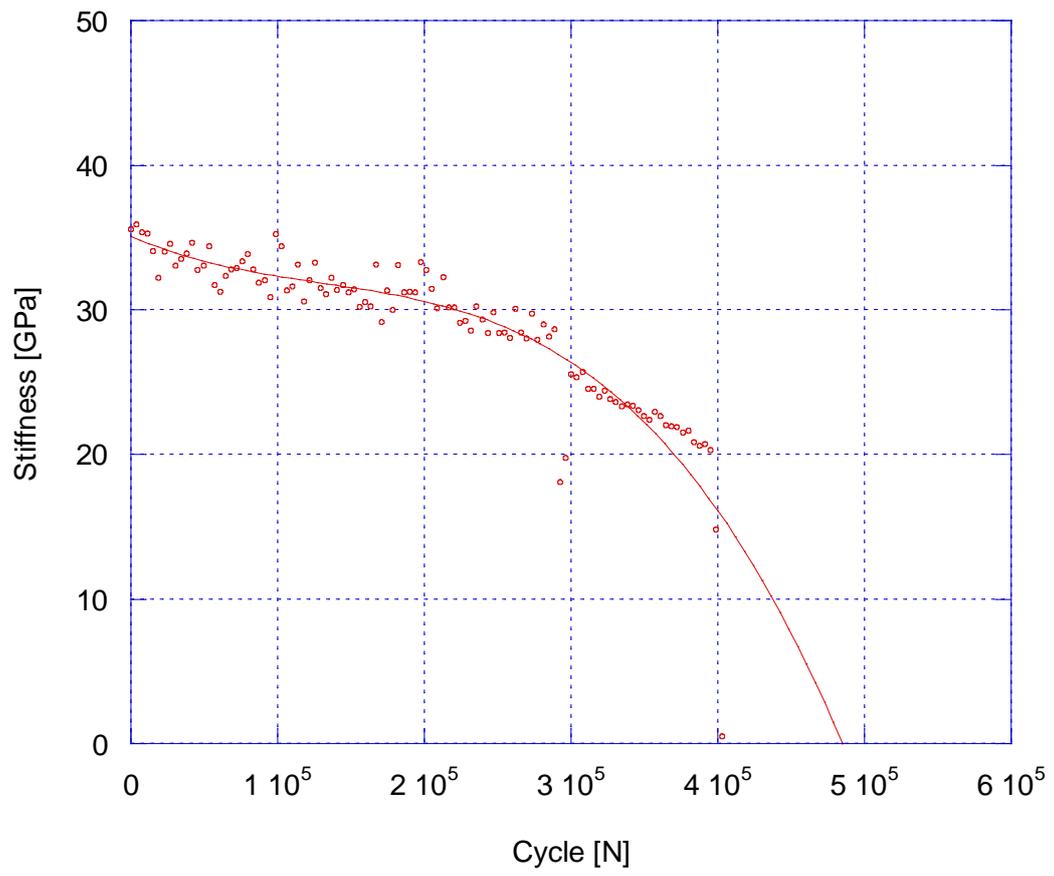
5. Deformación - Ciclos



6. Tensión - Deformación



7. Rigidez - Ciclos



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HP-R 578	EDAD: 204 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

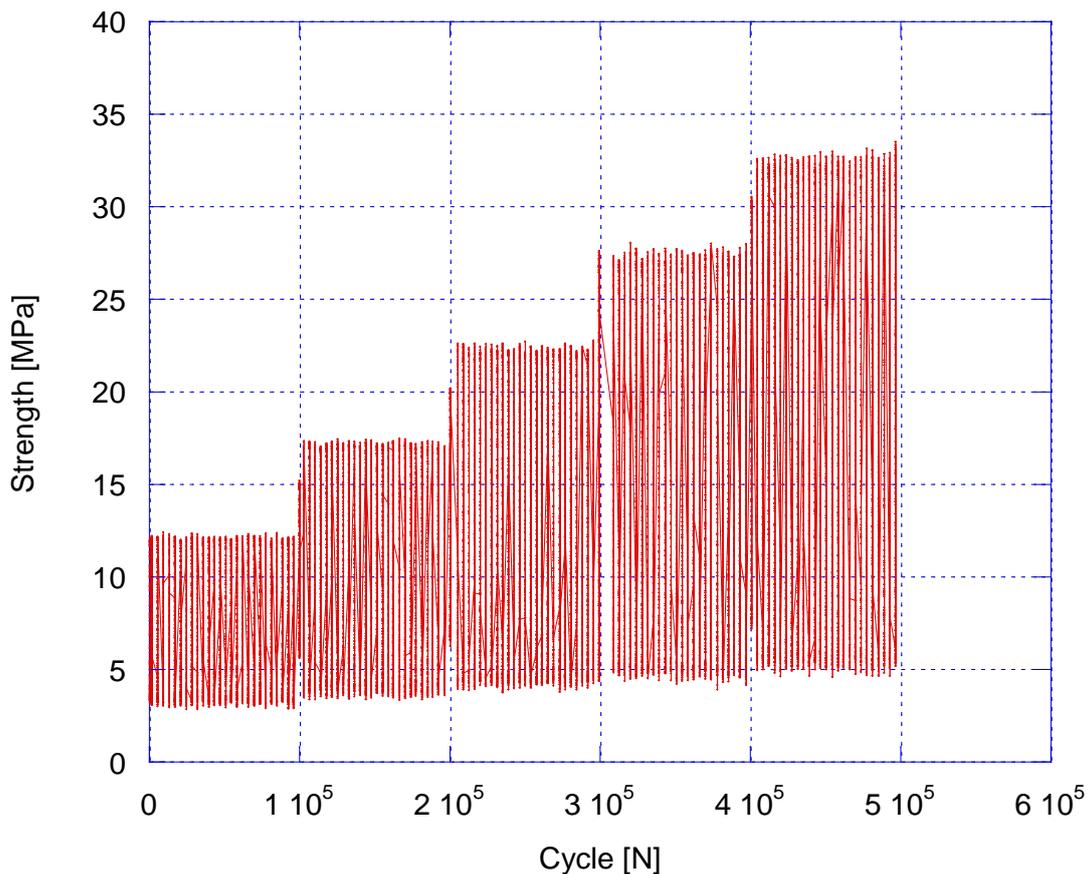
2. Ensayo

PRENSA: Servohidráulica Zwick Resonancia			EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω	
Escalón Fat.1	σ_{min} [MPa]	σ_{max} [MPa]	f_{min} [Hz]	f_{max} [Hz]
1	2,5	12,5	77,64	77,95
2	2,5	17,5	81,10	81,42
3	2,5	22,5	83,76	83,88
4	2,5	27,5	85,02	85,65
5	2,5	32,5	85,01	86,35

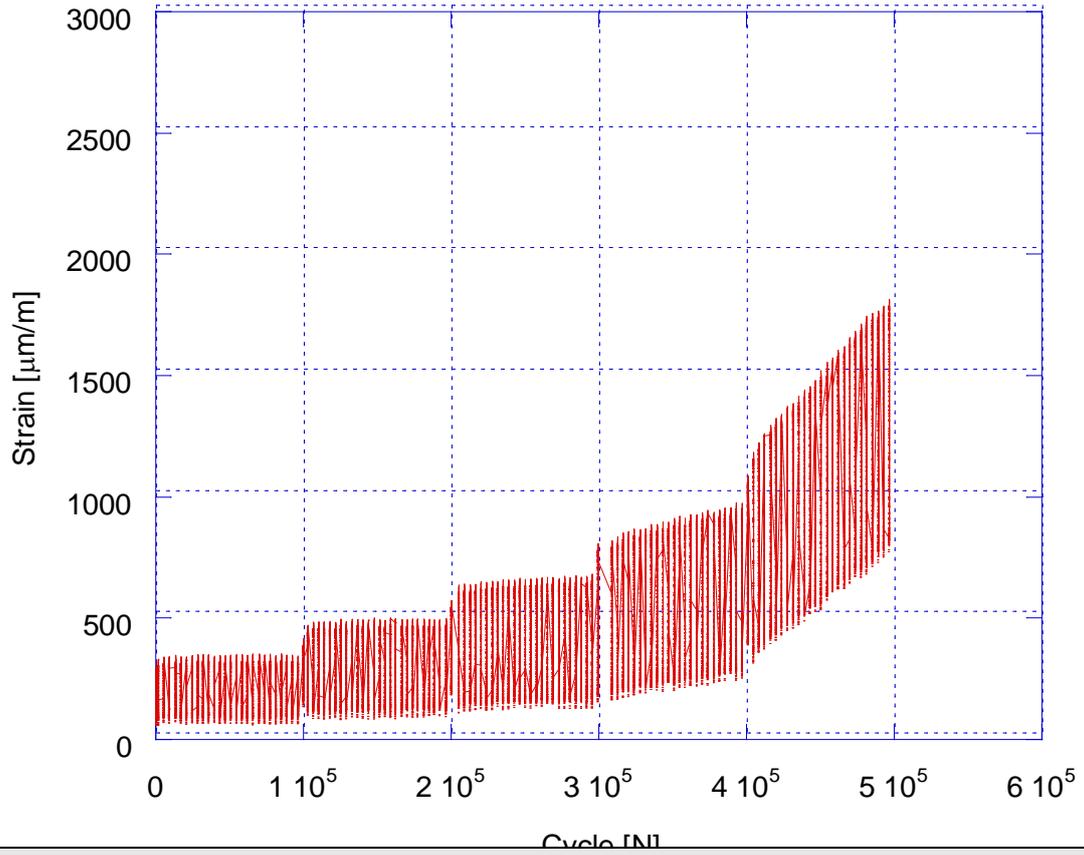
3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 50,3 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 34,1 GPa	ESCALÓN DE ROTURA: 5 – $\sigma_{max}=32,5$ MPa – 65%
---------------------------------------	------------------------------------	---

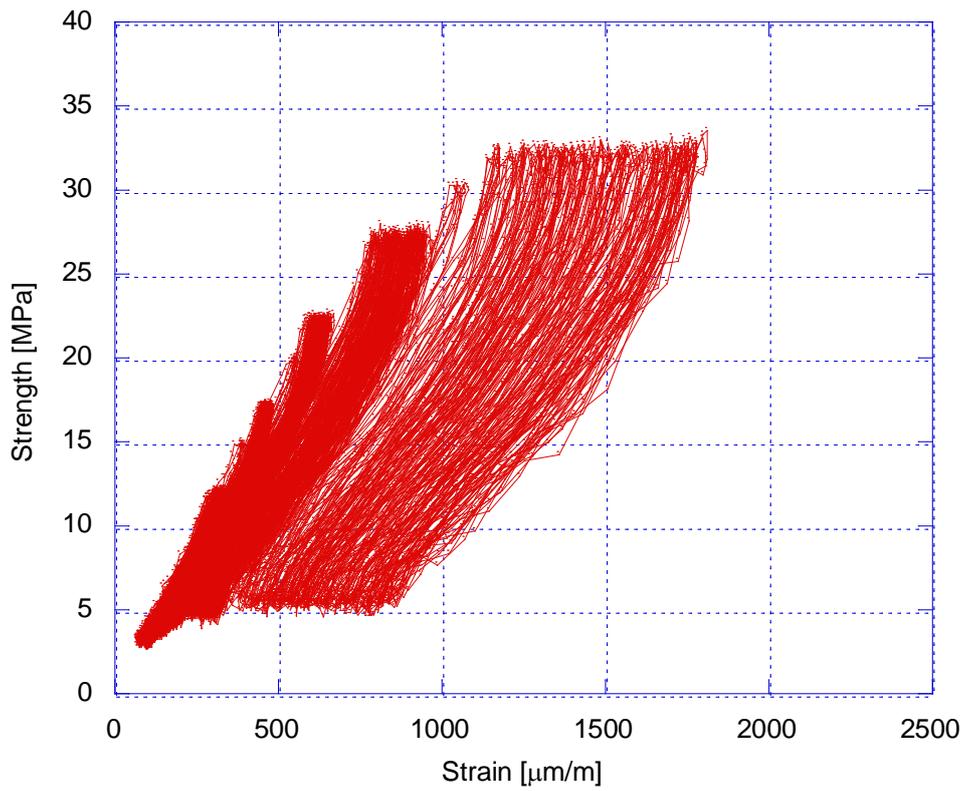
4. Tensión - Ciclos



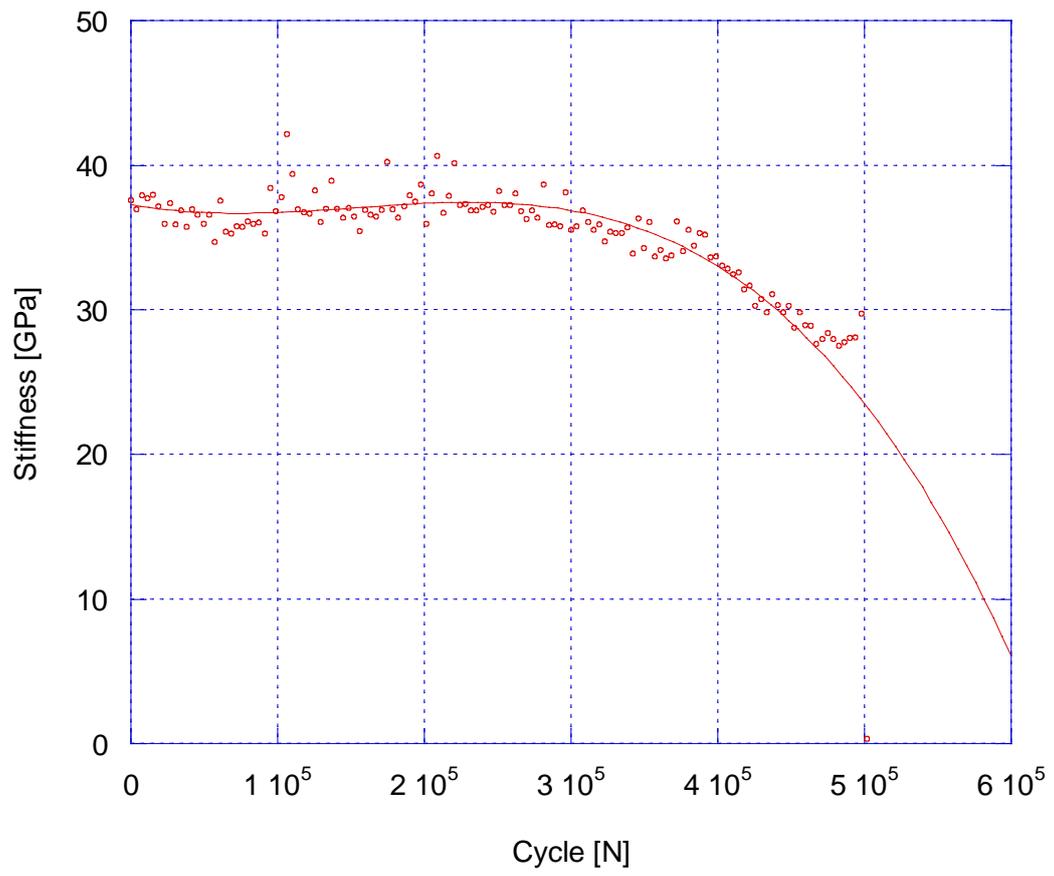
5. Deformación - Ciclos



6. Tensión - Deformación



7. Rigidez - Ciclos



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR-25 213	EDAD: 233 días
--	---------------------------------	-------------------

TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	
---	--------------------------------	---

2. Ensayo

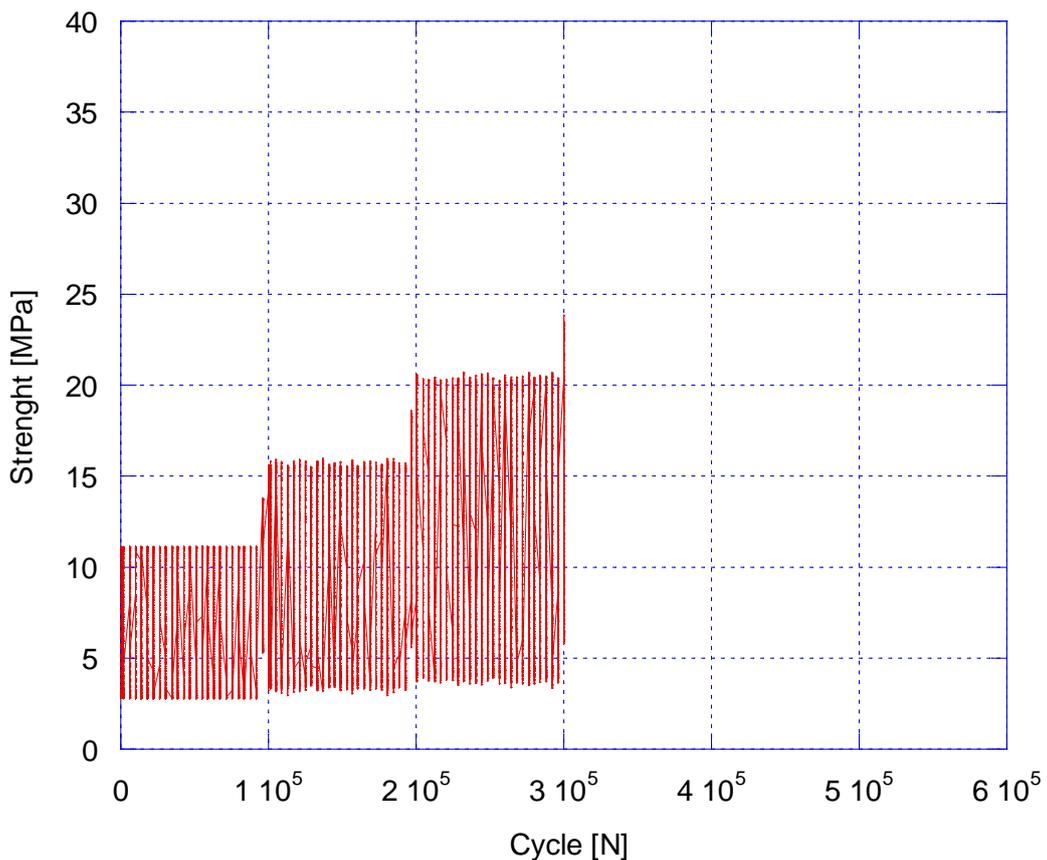
PRENSA: Servohidráulica Zwick Resonancia	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---	---

Escalón Fat.1	σ_{min} [MPa]	σ_{max} [MPa]	f_{min} [Hz]	f_{max} [Hz]
1	2,5	12,5	78,22	78,56
2	2,5	17,5	81,25	81,61
3	2,5	22,5	83,10	83,33
4	2,5	27,5	-	-
5	2,5	32,5	-	-

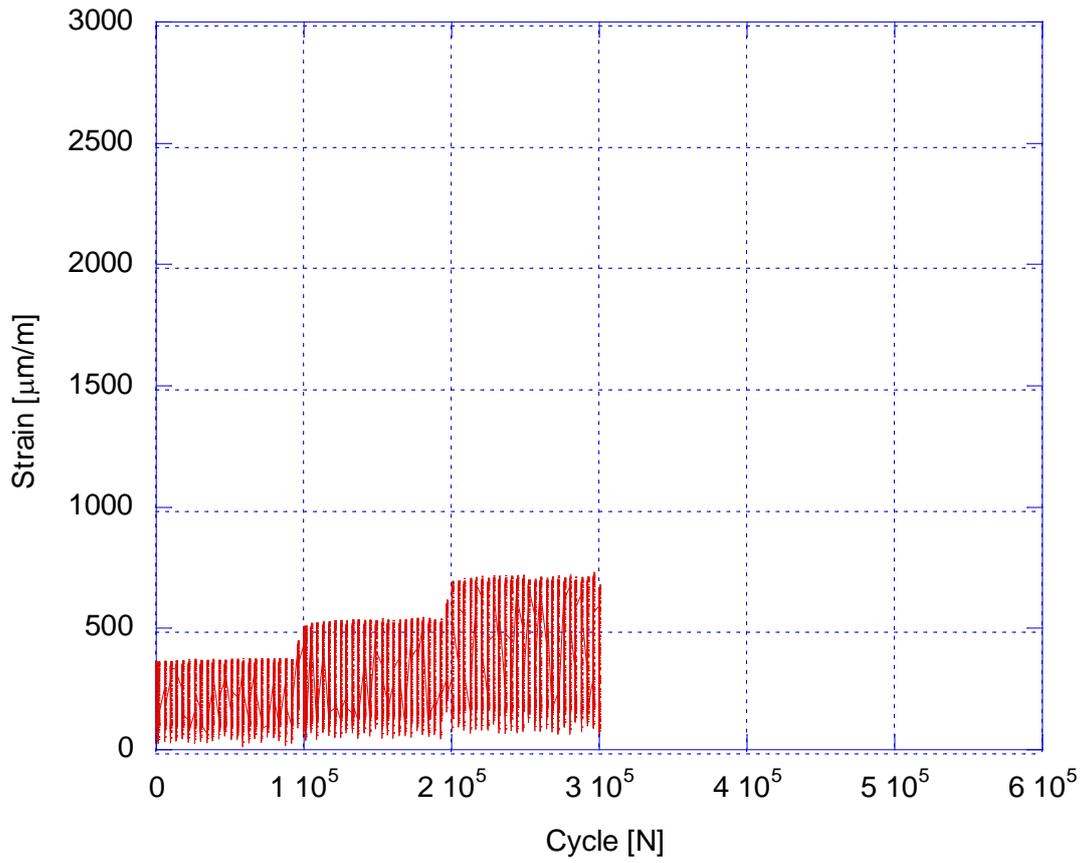
3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 46,9 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 33,9 GPa	ESCALÓN DE ROTURA: 4 – $\sigma_{max}=27,5$ MPa – 59%
---------------------------------------	------------------------------------	---

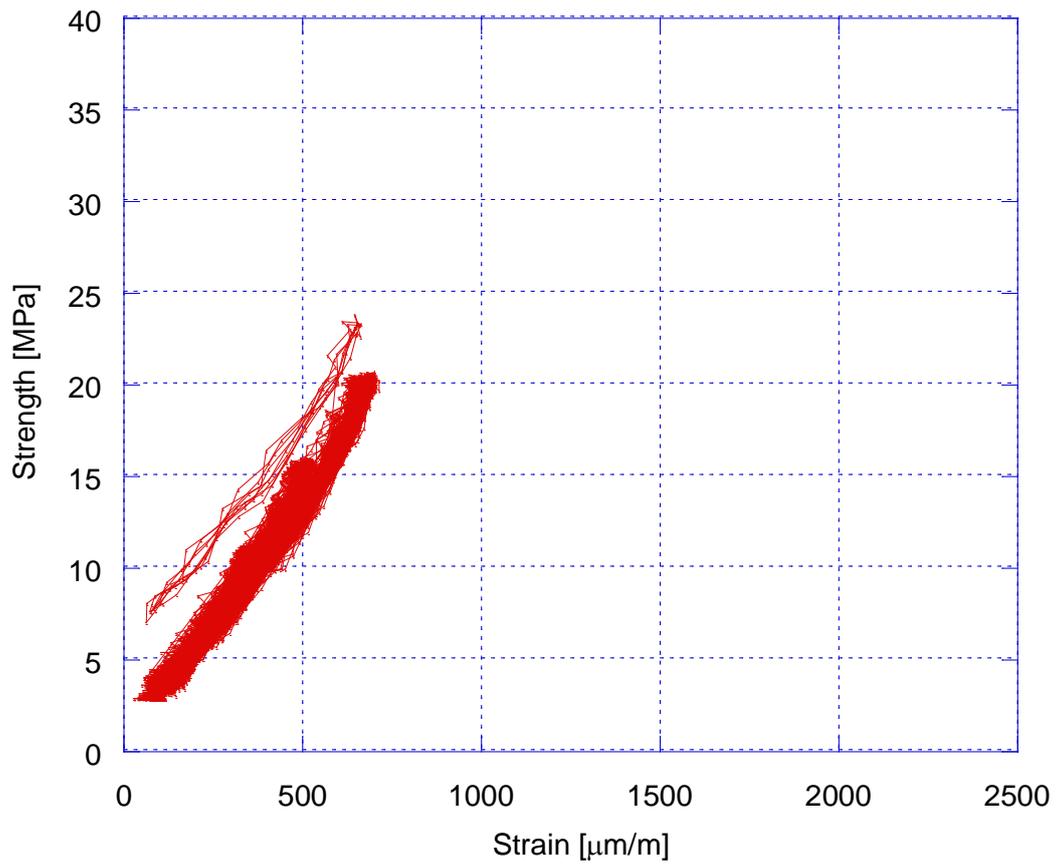
4. Tensión - Ciclos



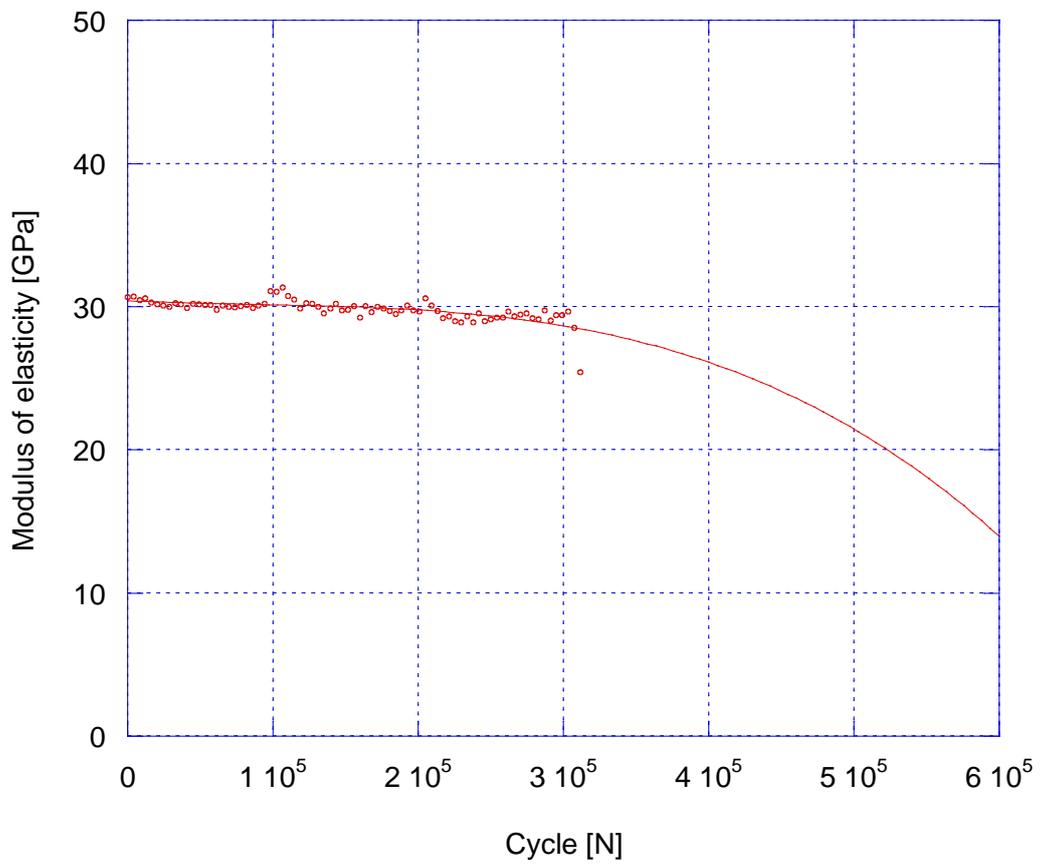
5. Deformación - Ciclos



6. Tensión - Deformación



7. Rigidez - Ciclos



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HR50 - 599	EDAD: 231 días
--	----------------------------------	-------------------

TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	
---	--------------------------------	---

2. Ensayo

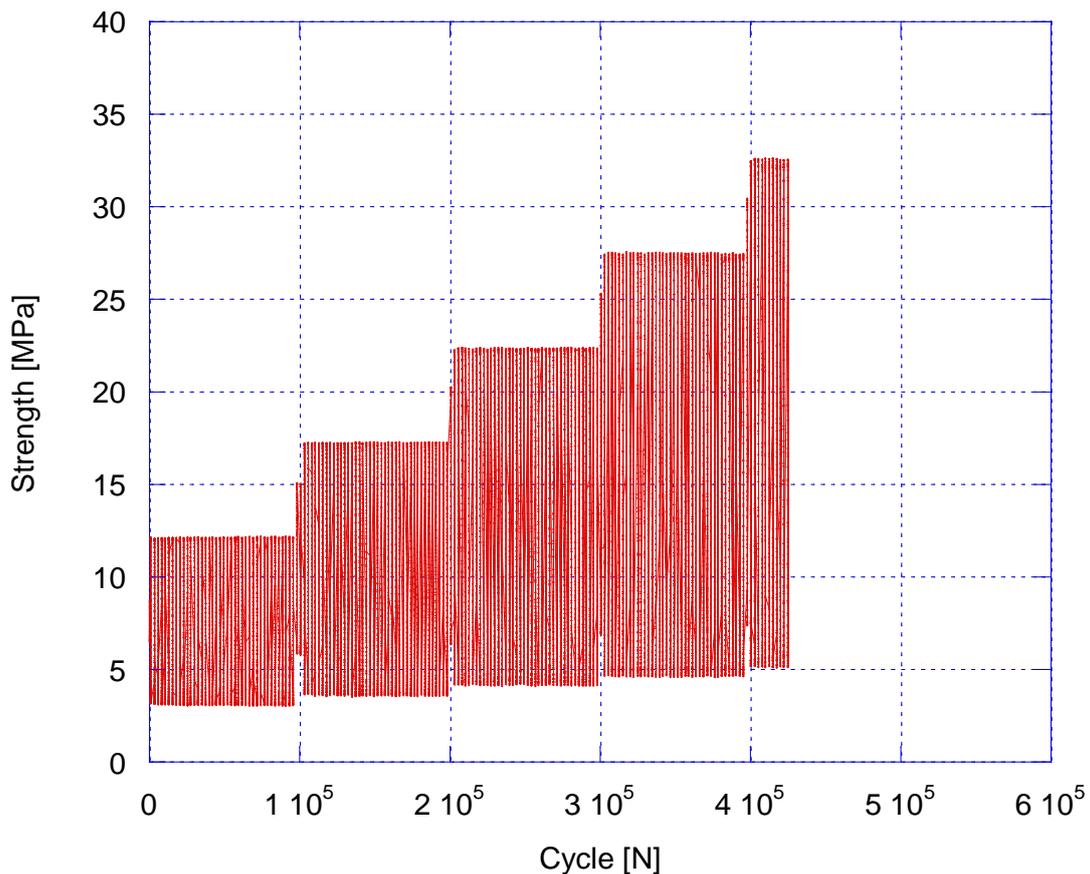
PRENSA: Servohidráulica Zwick Resonancia	EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω
---	---

Escalón Fat.1	σ_{min} [MPa]	σ_{max} [MPa]	f_{min} [Hz]	f_{max} [Hz]
1	2,5	12,5	75,04	75,73
2	2,5	17,5	78,74	78,77
3	2,5	22,5	80,86	81,04
4	2,5	27,5	82,96	83,22
5	2,5	32,5	83,98	83,98

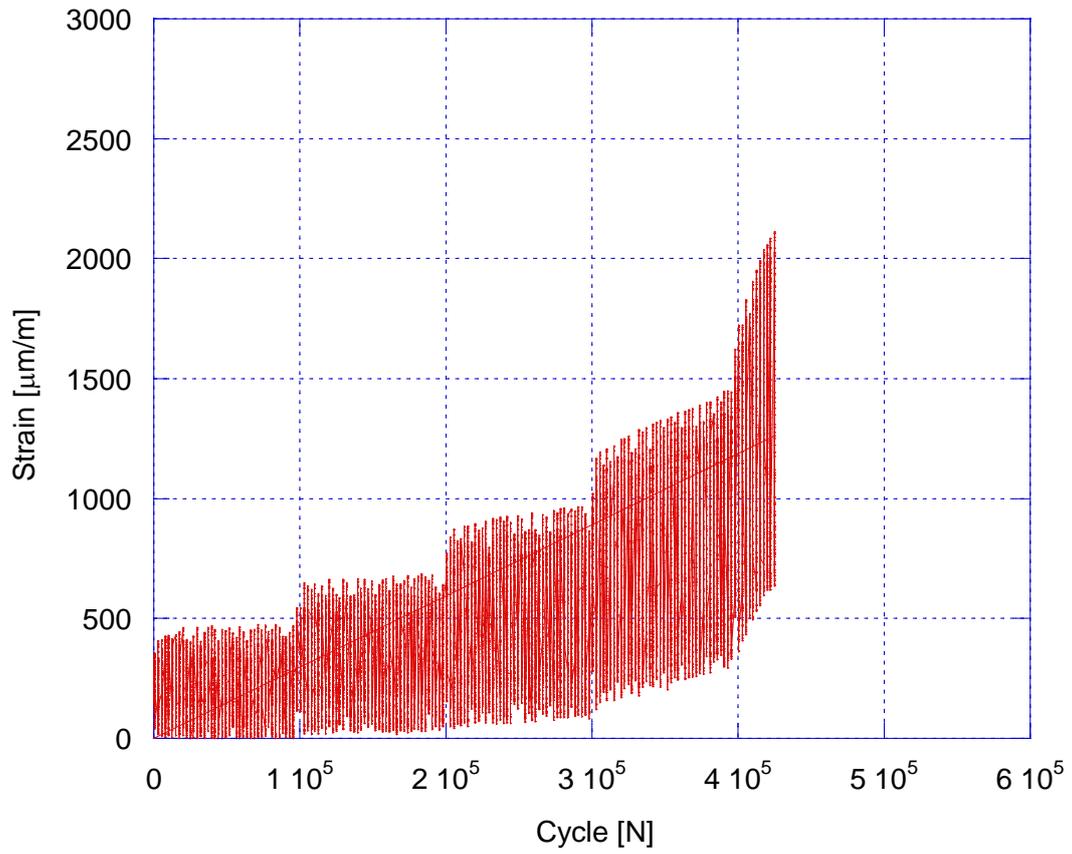
3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 48,9 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 31,9 GPa	ESCALÓN DE ROTURA: 5 – σ_{max} =32,5 MPa – 66%
---------------------------------------	------------------------------------	--

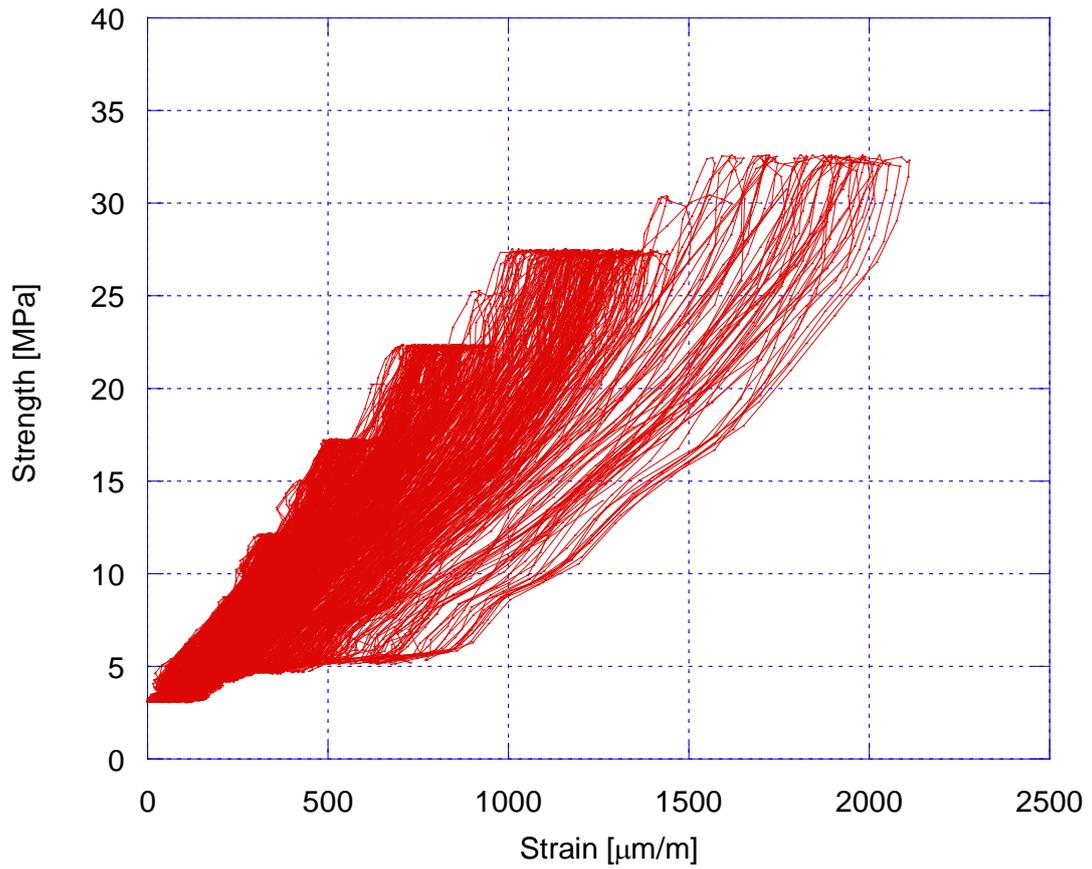
4. Tensión - Ciclos



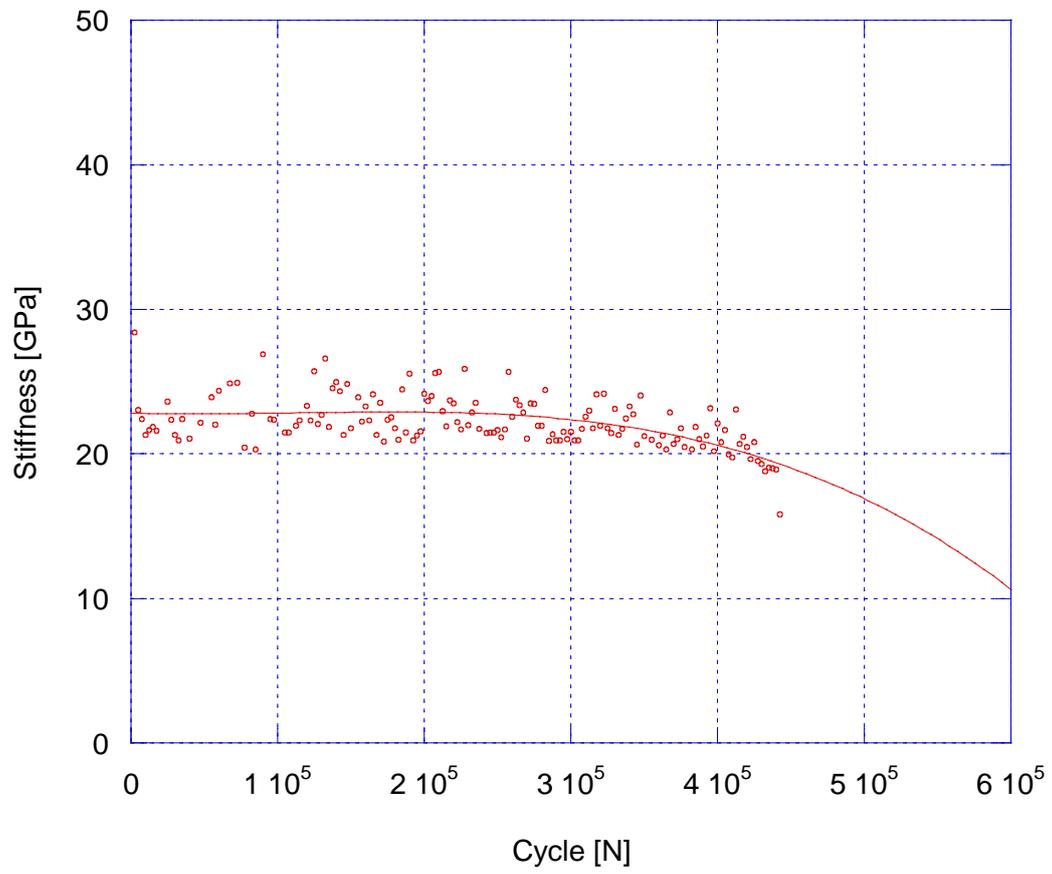
5. Deformación - Ciclos



6. Tensión - Deformación



7. Rigidez - Ciclos



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	CÓDIGO/REFERENCIA: HRR-25 464	EDAD: 232 días
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida	TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado	

2. Ensayo

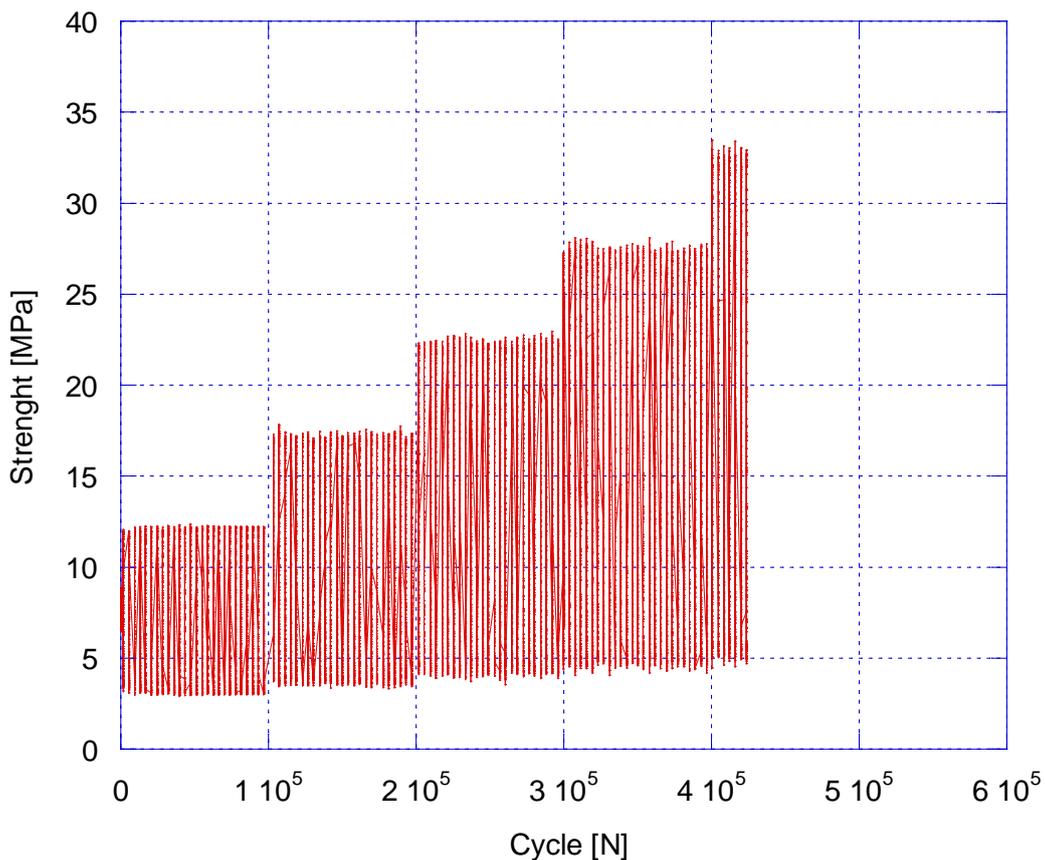
PRENSA: Servohidráulica Zwick Resonancia			EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω	
Escalón Fat.1	σ_{min} [MPa]	σ_{max} [MPa]	f_{min} [Hz]	f_{max} [Hz]
1	2,5	12,5	78,11	78,39
2	2,5	17,5	80,88	81,10
3	2,5	22,5	82,87	83,03
4	2,5	27,5	83,94	84,43
5	2,5	32,5	85,30	85,30



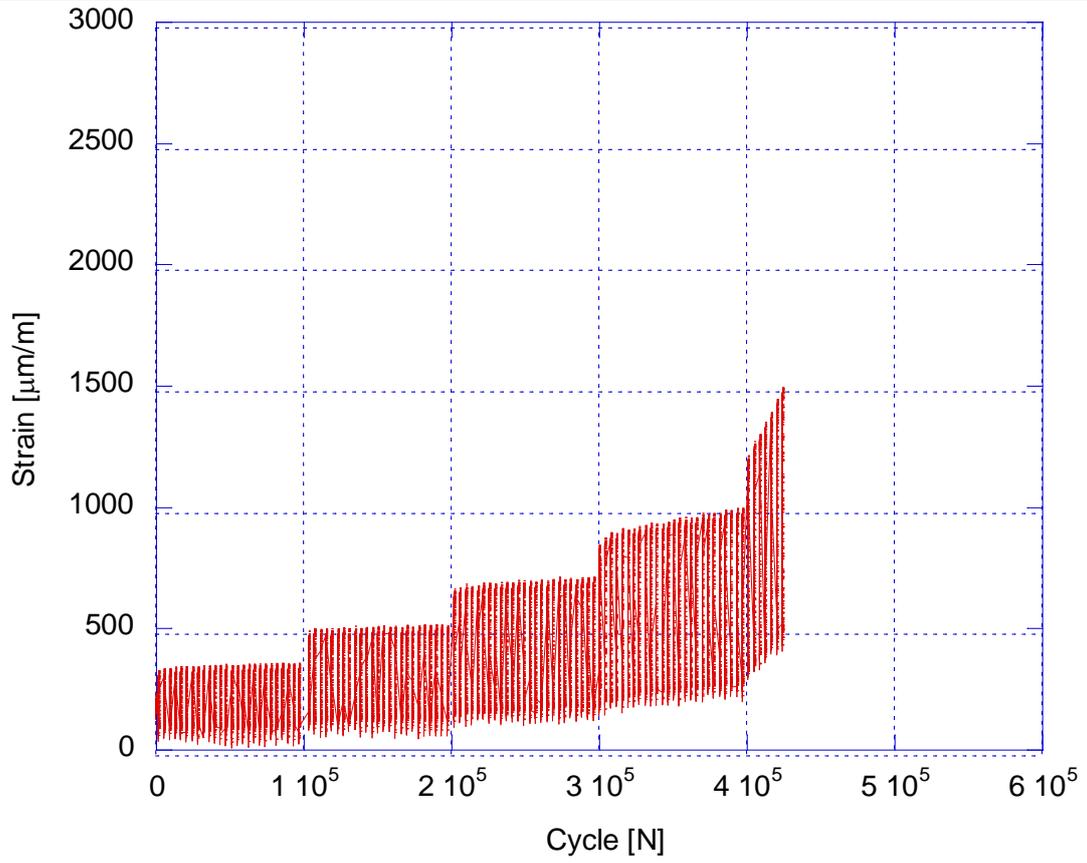
3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 47,5 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 34,2 GPa	ESCALÓN DE ROTURA: 5 – $\sigma_{max}=32,5$ MPa – 68%
---------------------------------------	------------------------------------	---

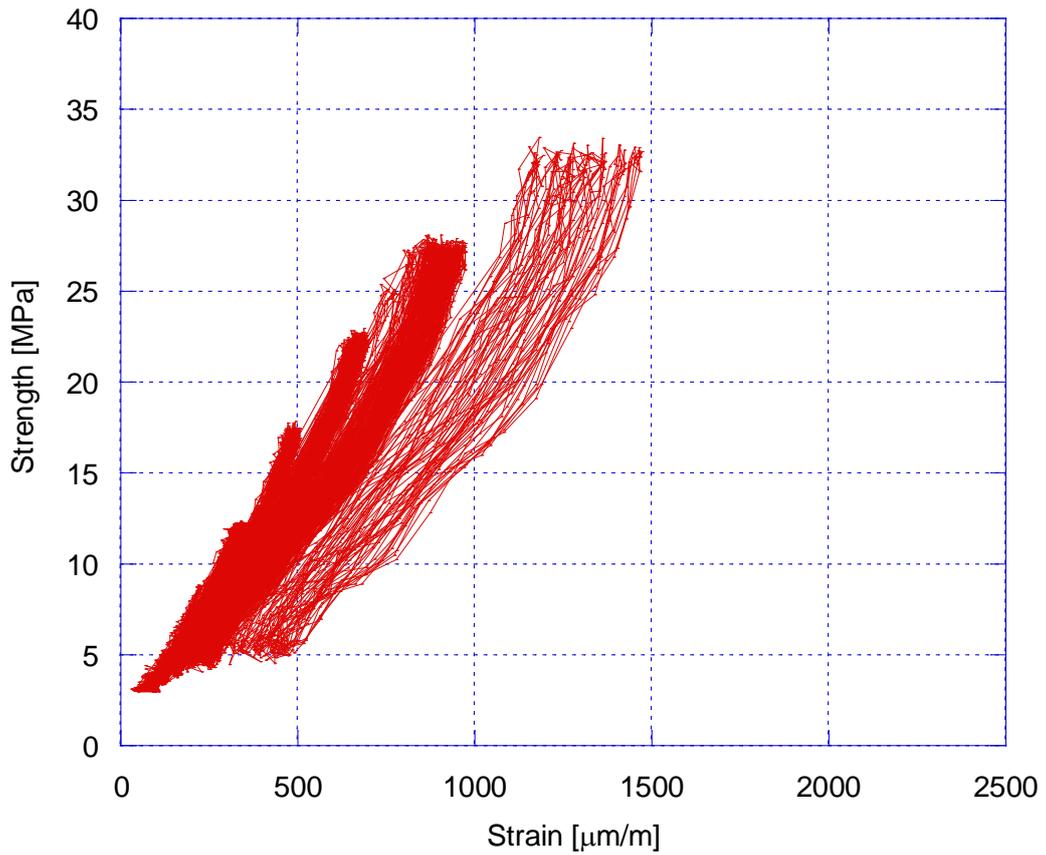
4. Tensión - Ciclos



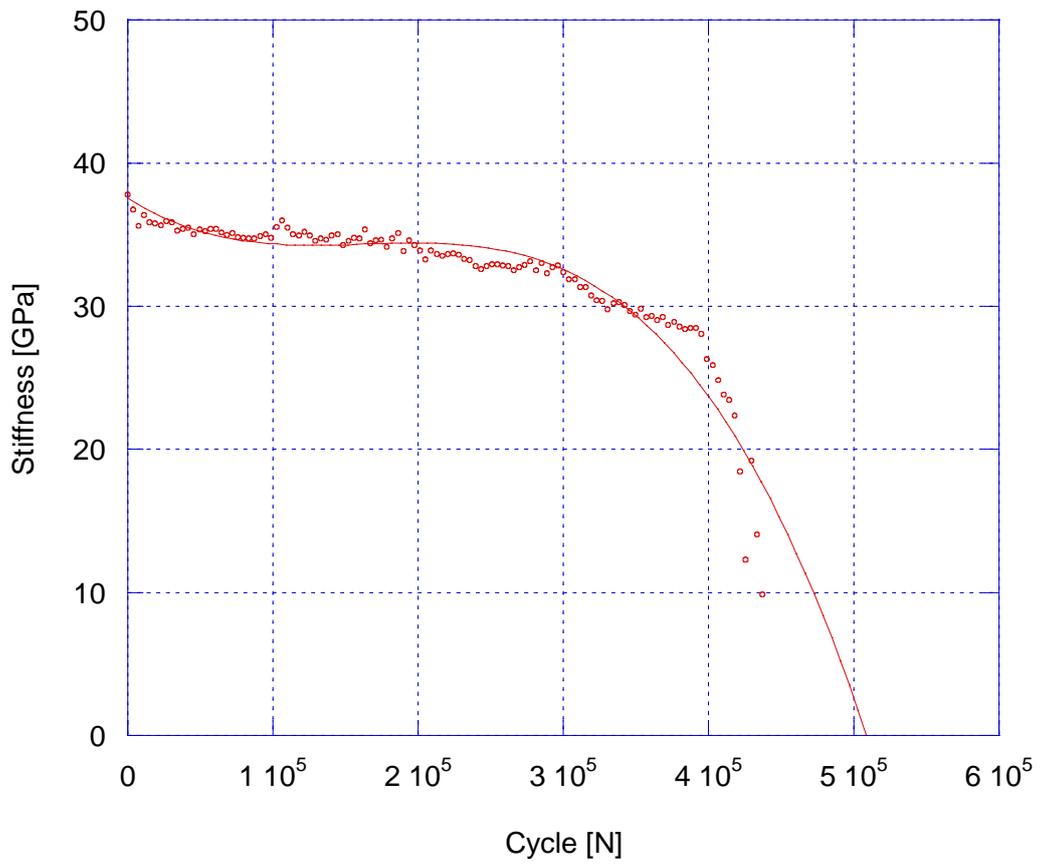
5. Deformación - Ciclos



6. Tensión - Deformación



7. Rigidez - Ciclos



1. Material

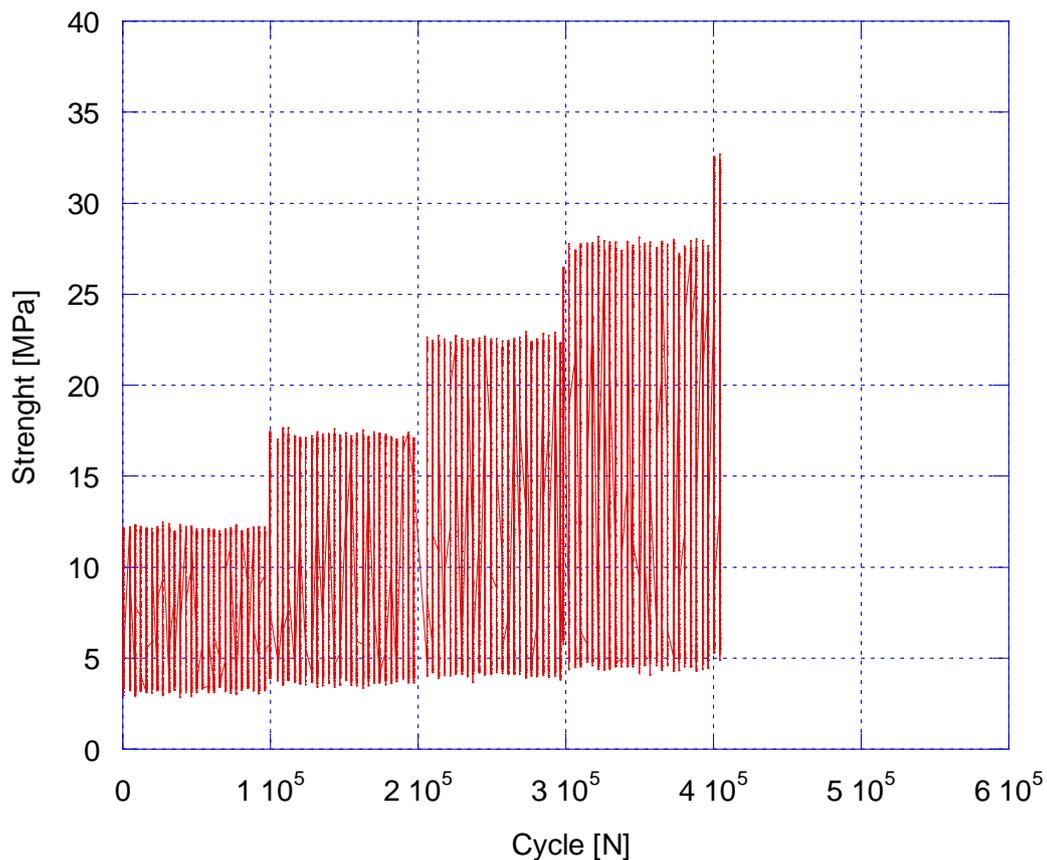
ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura		CÓDIGO/REFERENCIA: HRR-50 527	EDAD: 235 días	
TIPO DE PROBETA: Cilíndrica normalizada (10 x 20) y pulida		TIPO DE HORMIGÓN: Reciclado		
2. Ensayo				
PRENSA: Servohidráulica Zwick Resonancia		EXTENSÓMETRO: PL-60 2 galgas de 120Ω		
Escalón Fat.1	σ_{\min} [MPa]	σ_{\max} [MPa]	f_{\min} [Hz]	f_{\max} [Hz]
1	2,5	12,5	78,05	78,08
2	2,5	17,5	81,23	81,34
3	2,5	22,5	83,83	83,87
4	2,5	27,5	85,62	85,78
5	2,5	32,5	85,98	86,21



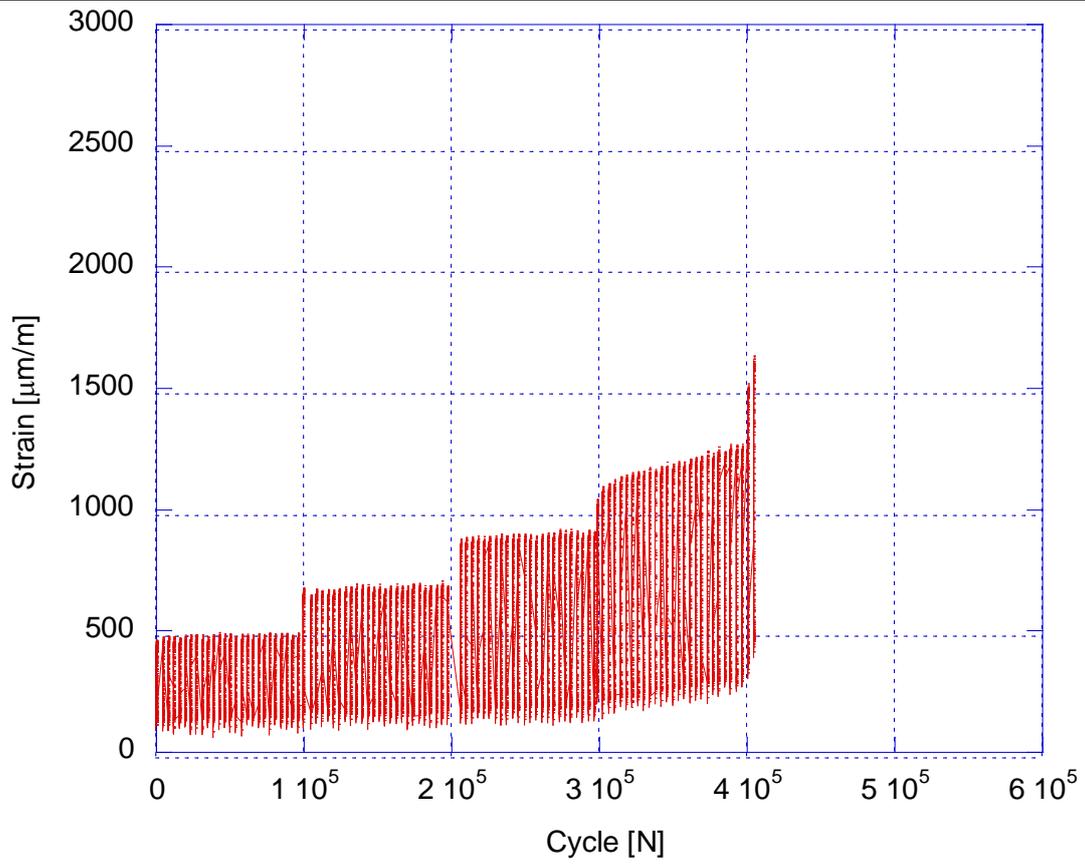
3. Resultados

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: 47,5 MPa	MÓDULO DE ELASTICIDAD: 27,7 GPa	ESCALÓN DE ROTURA: 5 – $\sigma_{\max}=32,5$ MPa – 68%
---------------------------------------	------------------------------------	--

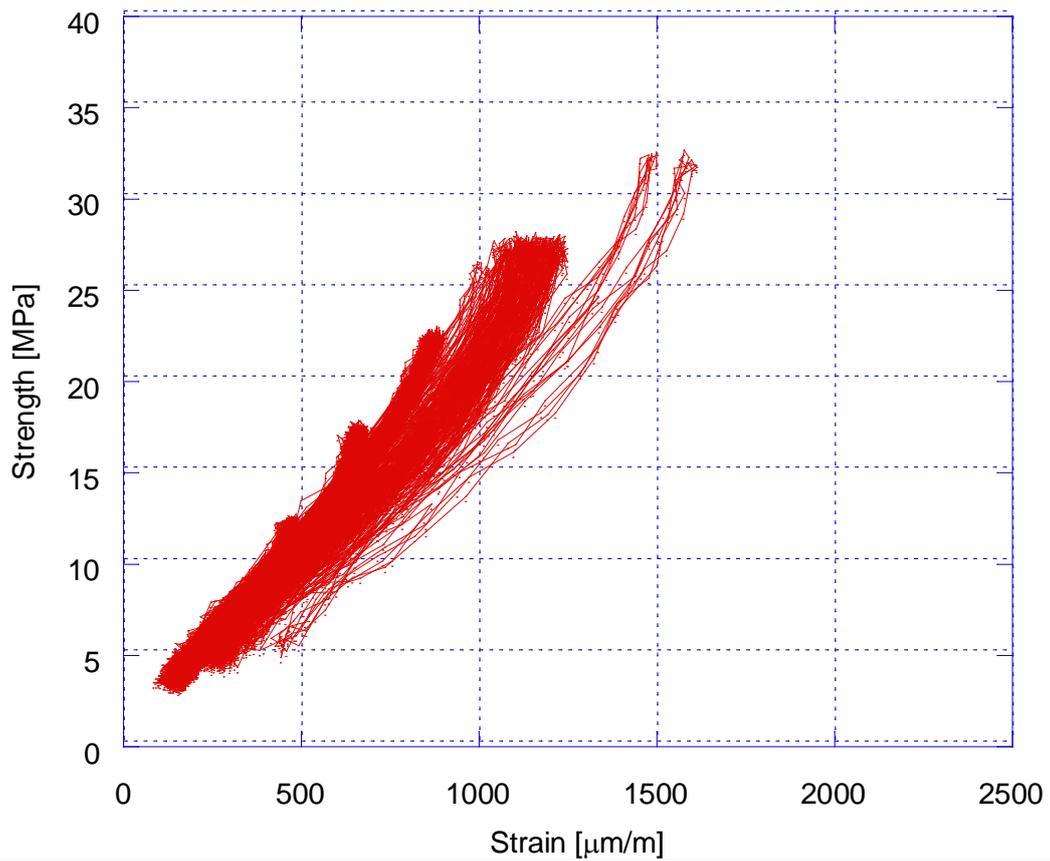
4. Tensión - Ciclos



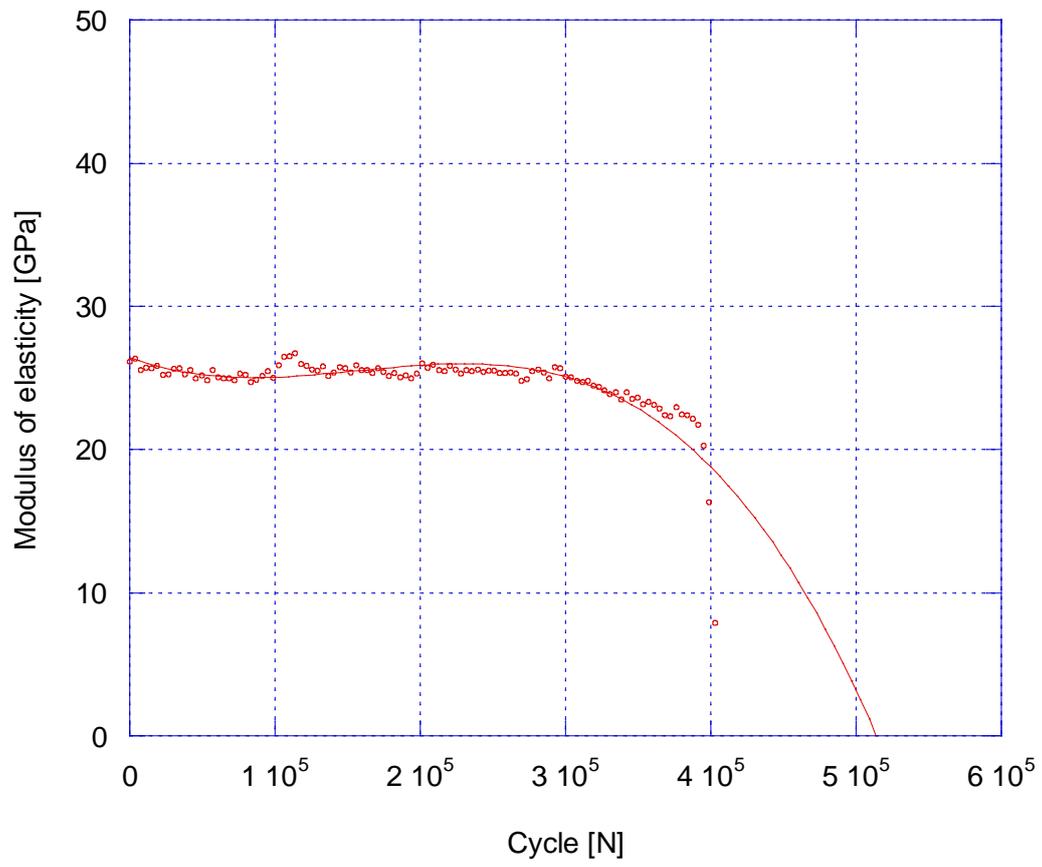
5. Deformación - Ciclos



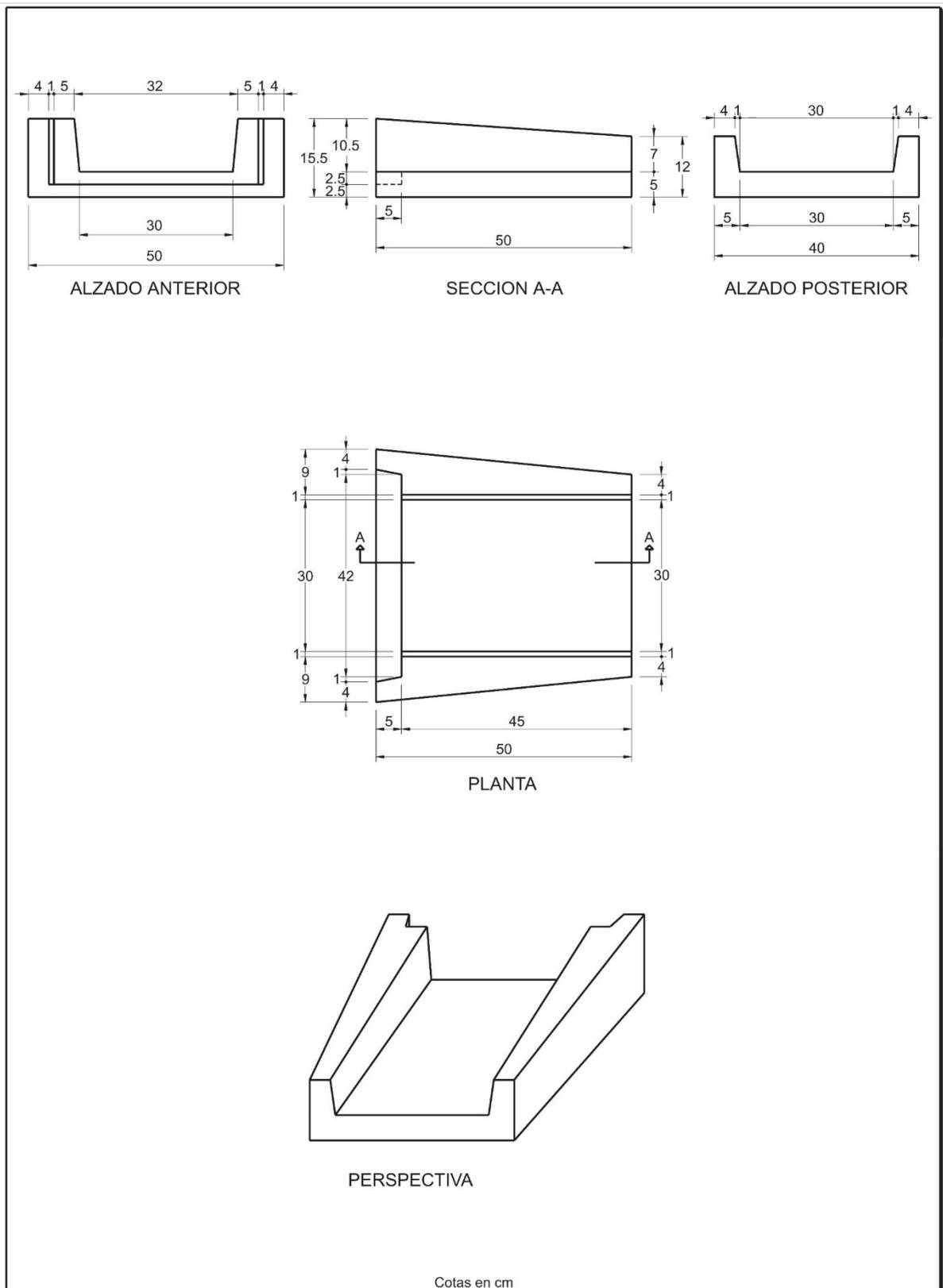
6. Tensión - Deformación



7. Rigidez - Ciclos



Anejo V. Geometría y resultados de los ensayos sobre bajantes



Referencia: BT-50

Peso: 42 kg

BAJANTE DE TALUD BT-50



ROCACERO
 PREFABRICADOS DE HORMIGÓN

Figura 50. Dimensiones de bajantes [40].

1. Material

ORIGEN:
Proyecto Universidad de Extremadura

CÓDIGO/REFERENCIA:
CA - 1

EDAD:
75 días

TIPO DE PROBETA:
Bajante de hormigón en masa

TIPO DE HORMIGÓN:
"Rocacero"

ANCHOxLARGOxALTO:
49,3 x 51 x 16cm

2. Ensayo

PRENSA:
Servohidráulica Suzpecar 150t

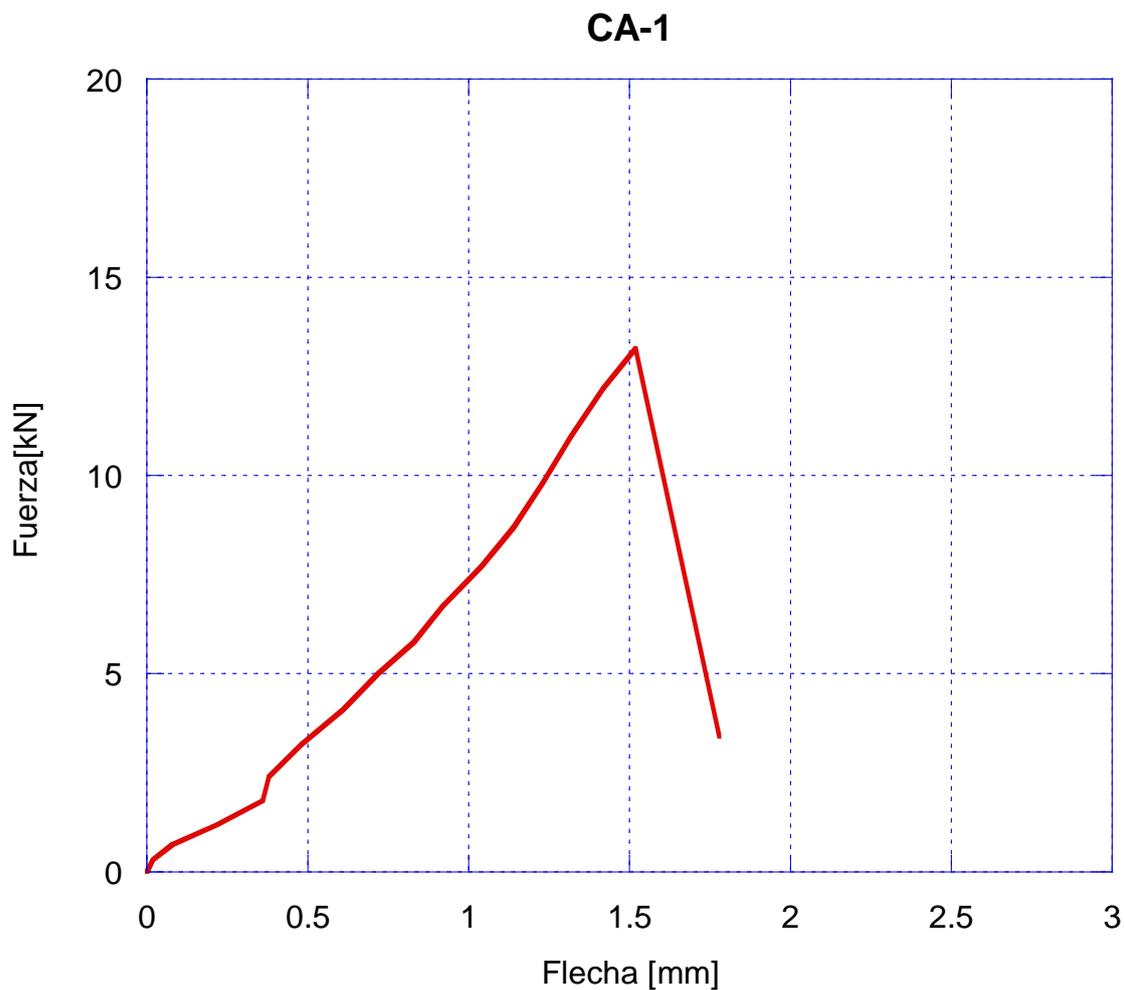
APLICADOR:
Rodillo (R=10cm,
L=22cm)

3. Resultados

Carga de rotura:
13,2 kN



4. Fuerza - Flecha



1. Material

ORIGEN:
Proyecto Universidad de Extremadura

CÓDIGO/REFERENCIA:
CA - 2

EDAD:
75 días

TIPO DE PROBETA:
Bajante de hormigón en masa

TIPO DE HORMIGÓN:
HR-50

ANCHOxLARGOxALTO:
49,3 x 51 x 16cm

2. Ensayo

PRENSA:
Servohidráulica Suzpecar 150t

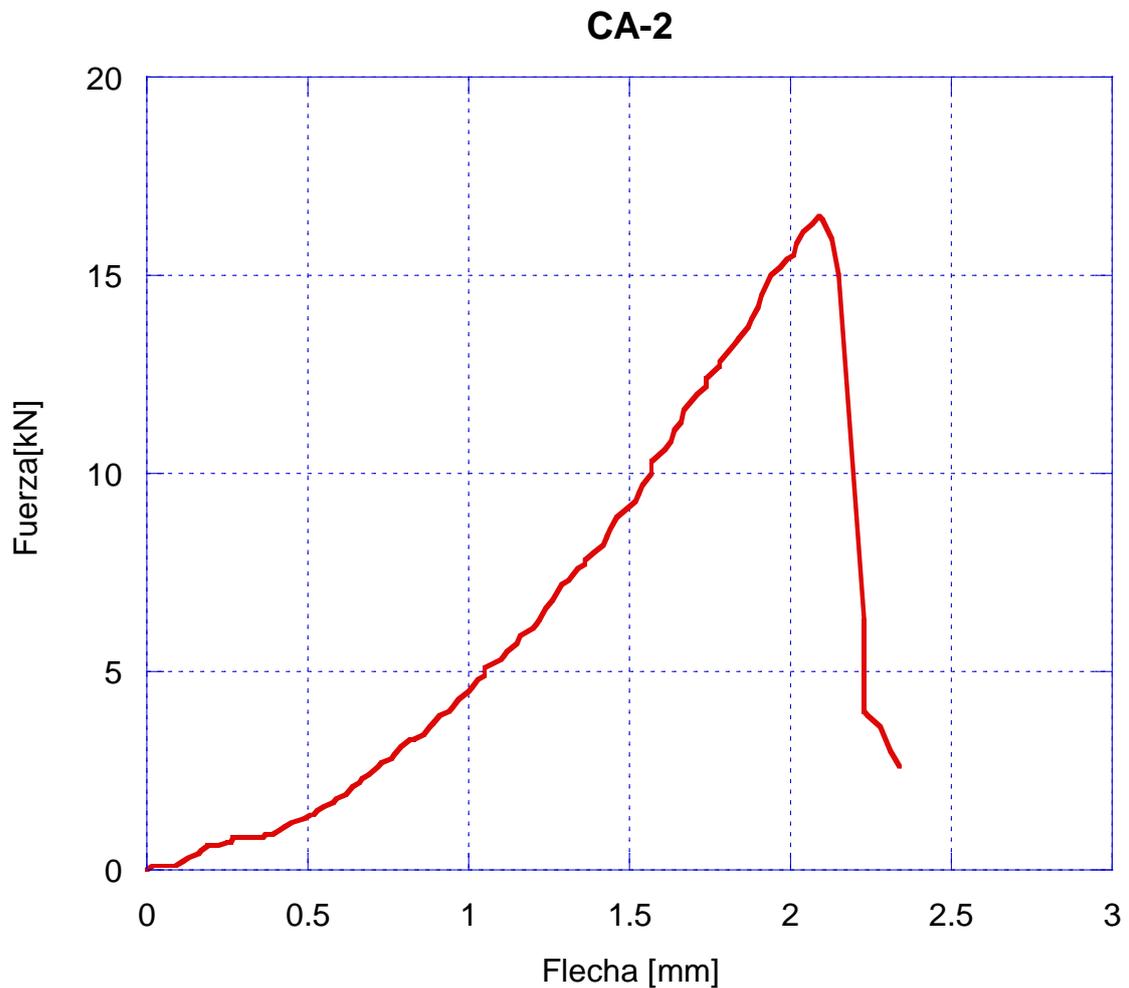
APLICADOR:
Rodillo (R=10cm,
L=22cm)

3. Resultados

Carga de rotura:
16,5 kN



4. Fuerza - Flecha



1. Material

ORIGEN:
Proyecto Universidad de Extremadura

CÓDIGO/REFERENCIA:
CA - 3

EDAD:
75 días

TIPO DE PROBETA:
Bajante de hormigón en masa

TIPO DE HORMIGÓN:
"Rocacero" ANCHOxLARGOxALTO:
49,3 x 51 x 16cm

2. Ensayo

PRENSA:
Servohidráulica Suzpecar 150t

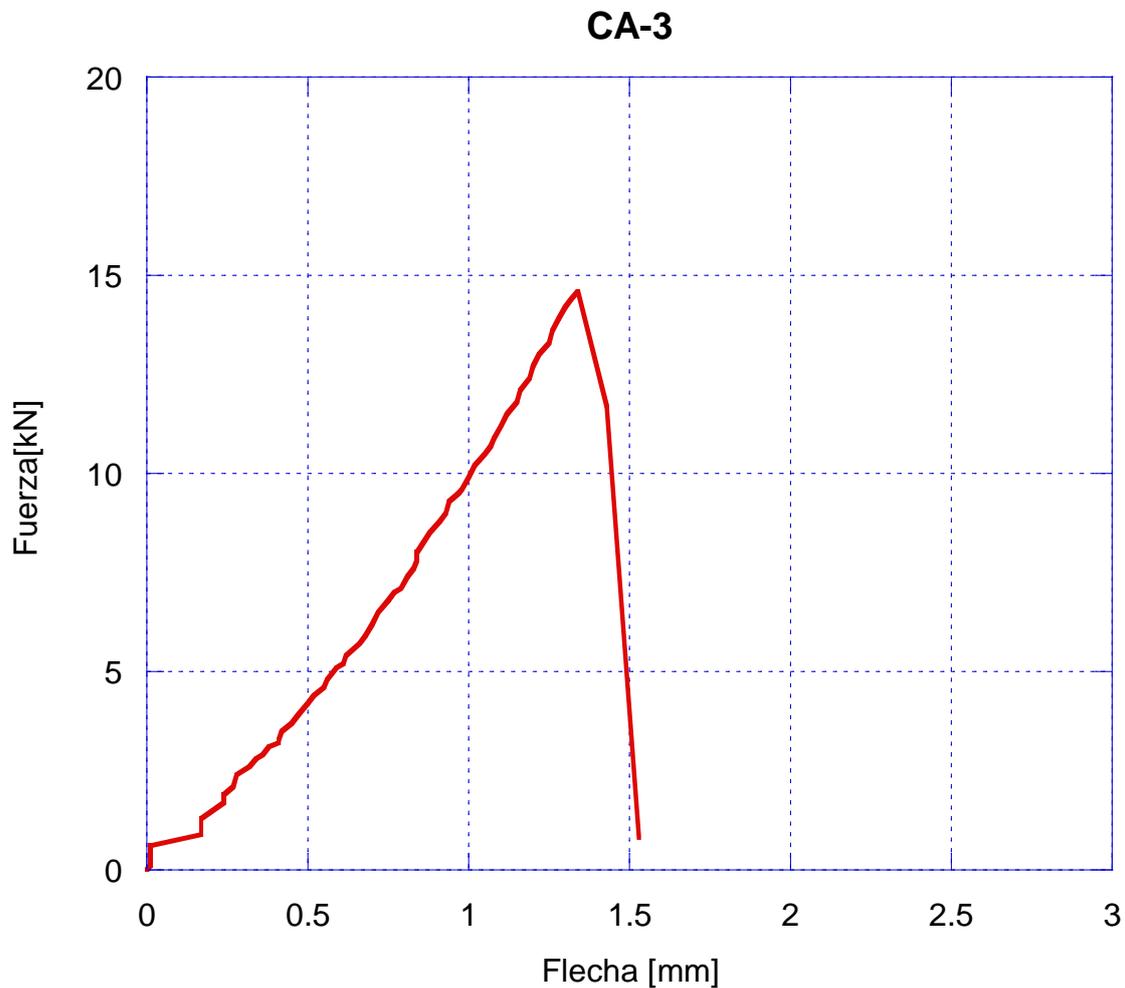
APLICADOR:
Rodillo (R=10cm,
L=22cm)

3. Resultados

Carga de rotura:
14,7 kN



4. Fuerza - Flecha



1. Material

ORIGEN:
Proyecto Universidad de Extremadura

CÓDIGO/REFERENCIA:
CA - 4

EDAD:
75 días

TIPO DE PROBETA:
Bajante de hormigón en masa

TIPO DE HORMIGÓN:
HP

ANCHOxLARGOxALTO:
49,3 x 51 x 16cm

2. Ensayo

PRENSA:
Servohidráulica Suzpecar 150t

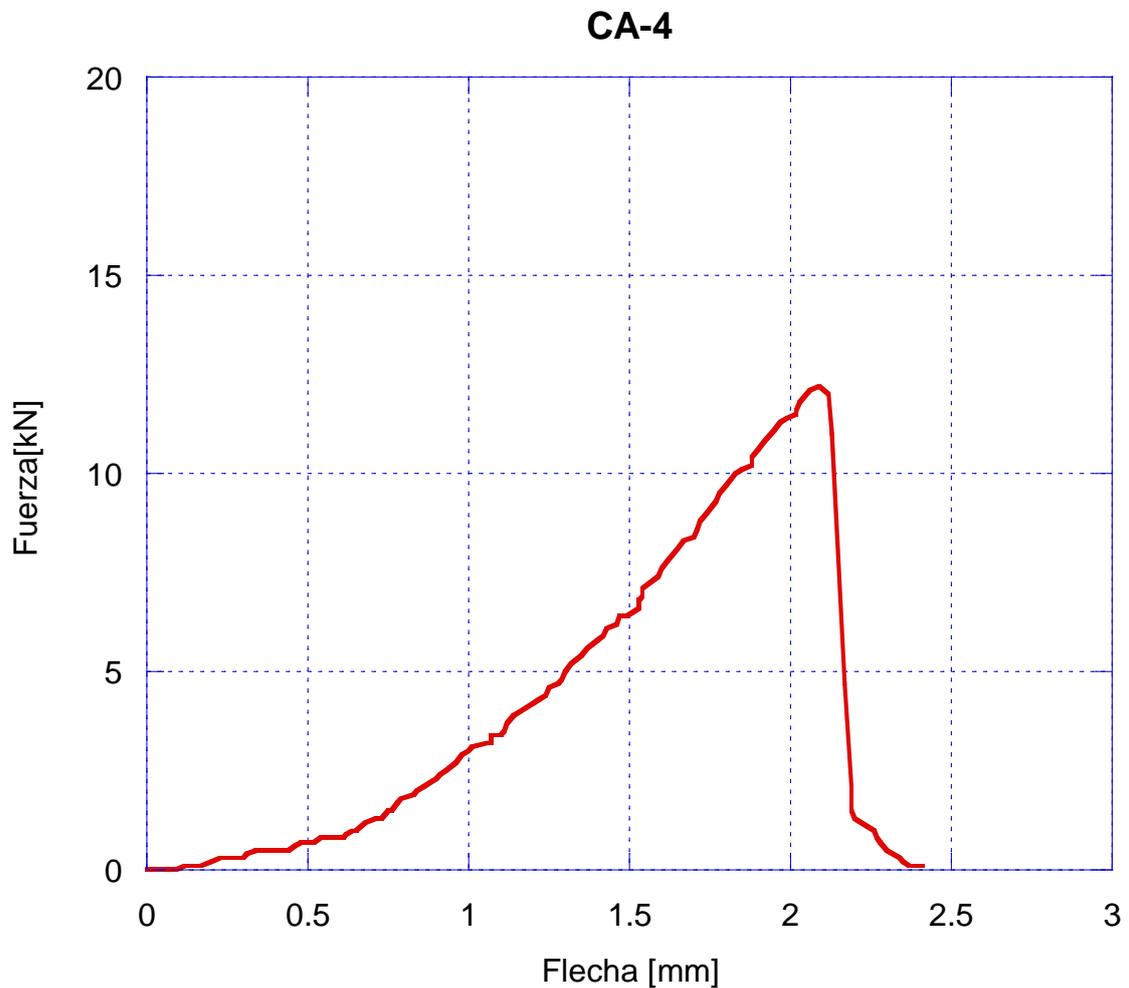
APLICADOR:
Rodillo (R=10cm,
L=22cm)

3. Resultados

Carga de rotura:
12,2 kN



4. Fuerza - Flecha



1. Material

ORIGEN:
Proyecto Universidad de Extremadura

CÓDIGO/REFERENCIA:
CA - 5

EDAD:
75 días

TIPO DE PROBETA:
Bajante de hormigón en masa

TIPO DE HORMIGÓN:
HP

ANCHOxLARGOxALTO:
49,3 x 51 x 16cm

2. Ensayo

PRENSA:
Servohidráulica Suzpecar 150t

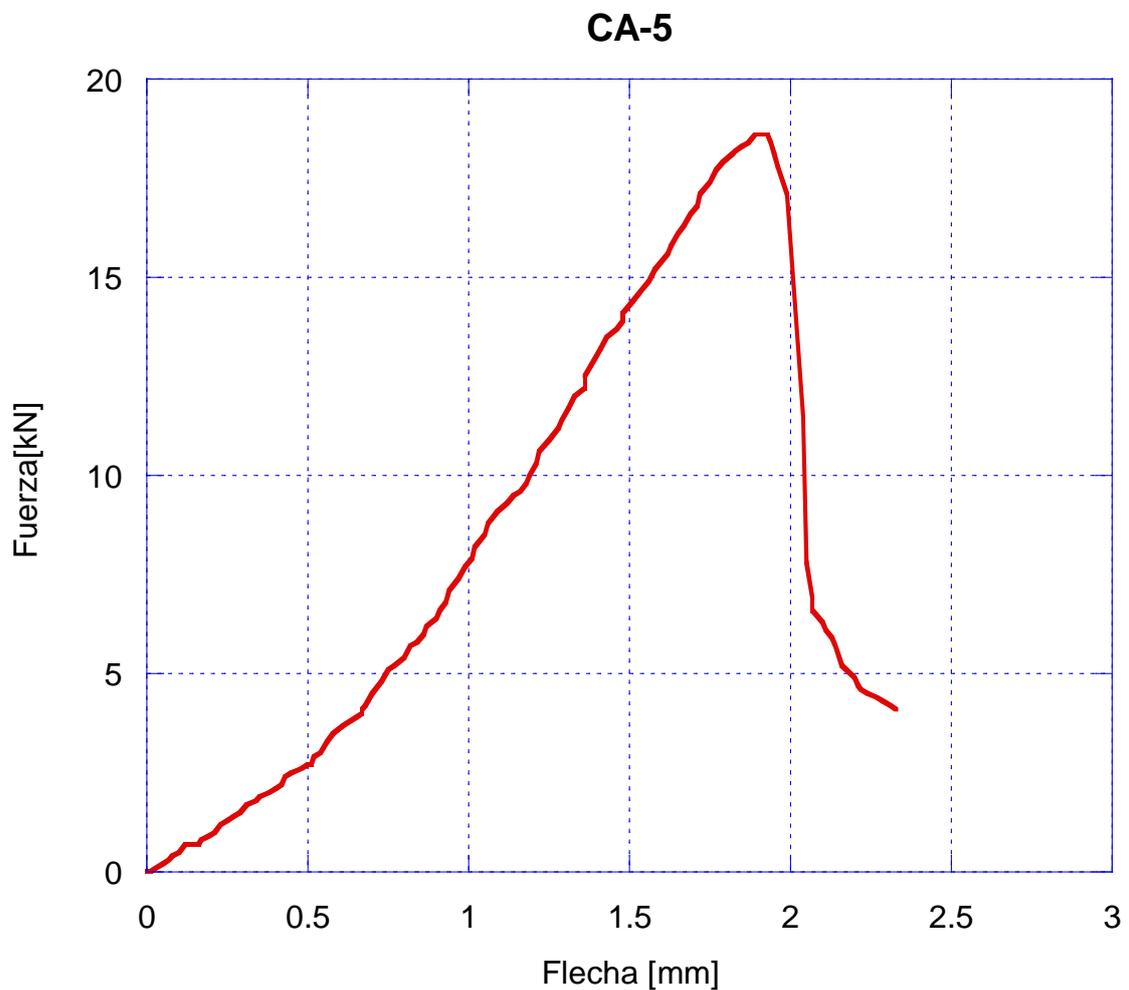
APLICADOR:
Rodillo (R=10cm,
L=22cm)

3. Resultados

Carga de rotura:
18,6 kN



4. Fuerza - Flecha



1. Material

ORIGEN:
Proyecto Universidad de Extremadura

CÓDIGO/REFERENCIA:
CA - 6

EDAD:
75 días

TIPO DE PROBETA:
Bajante de hormigón en masa

TIPO DE HORMIGÓN:
HR-50

ANCHOxLARGOxALTO:
49,3 x 51 x 16cm

2. Ensayo

PRENSA:
Servohidráulica Suzpecar 150t

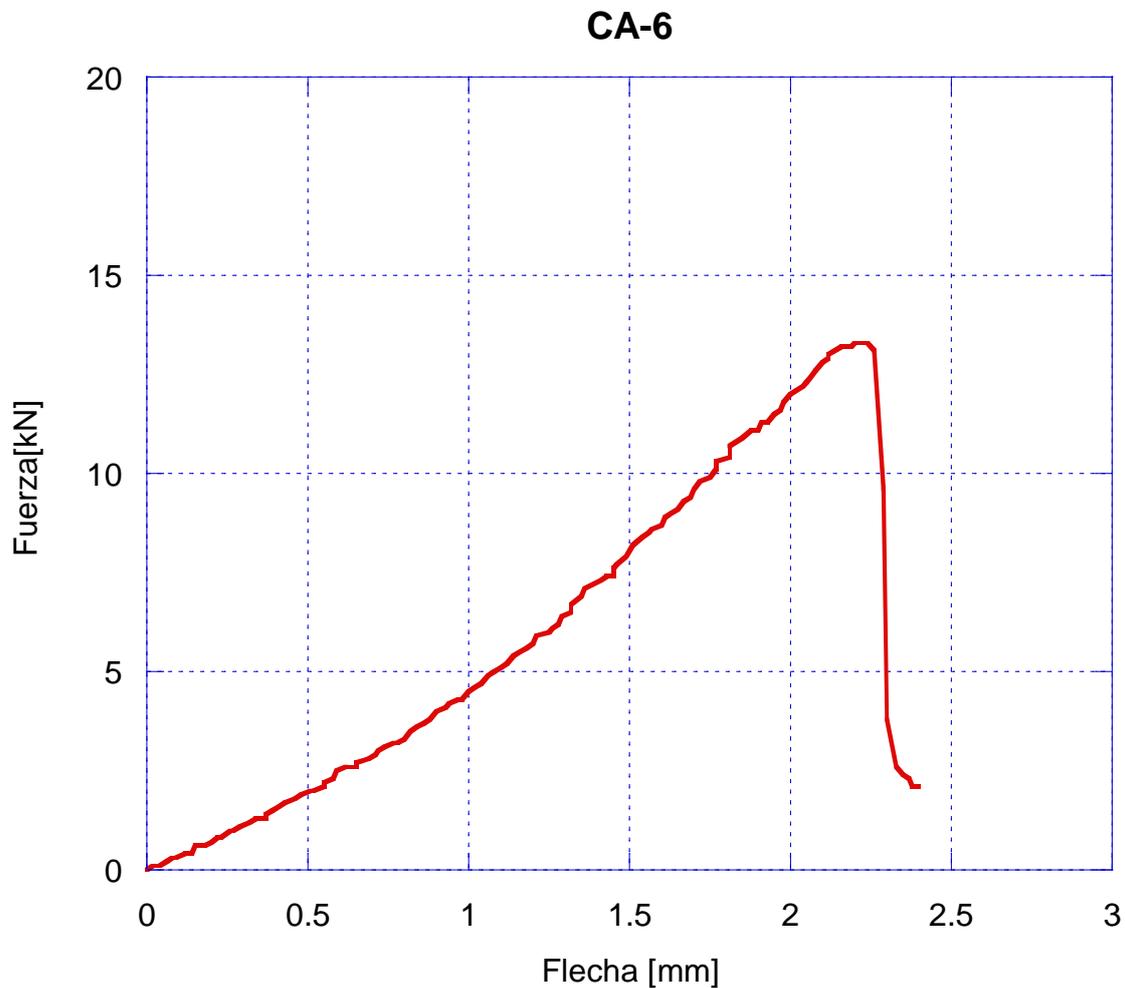
APLICADOR:
Rodillo (R=10cm,
L=22cm)

3. Resultados

Carga de rotura:
13,3 kN



4. Fuerza - Flecha



1. Material

ORIGEN:
Proyecto Universidad de Extremadura

CÓDIGO/REFERENCIA:
CA - 7

EDAD:
75 días

TIPO DE PROBETA:
Bajante de hormigón en masa

TIPO DE HORMIGÓN:
HR-50

ANCHOxLARGOxALTO:
49,3 x 51 x 16cm

2. Ensayo

PRENSA:
Servohidráulica Suzpecar 150t

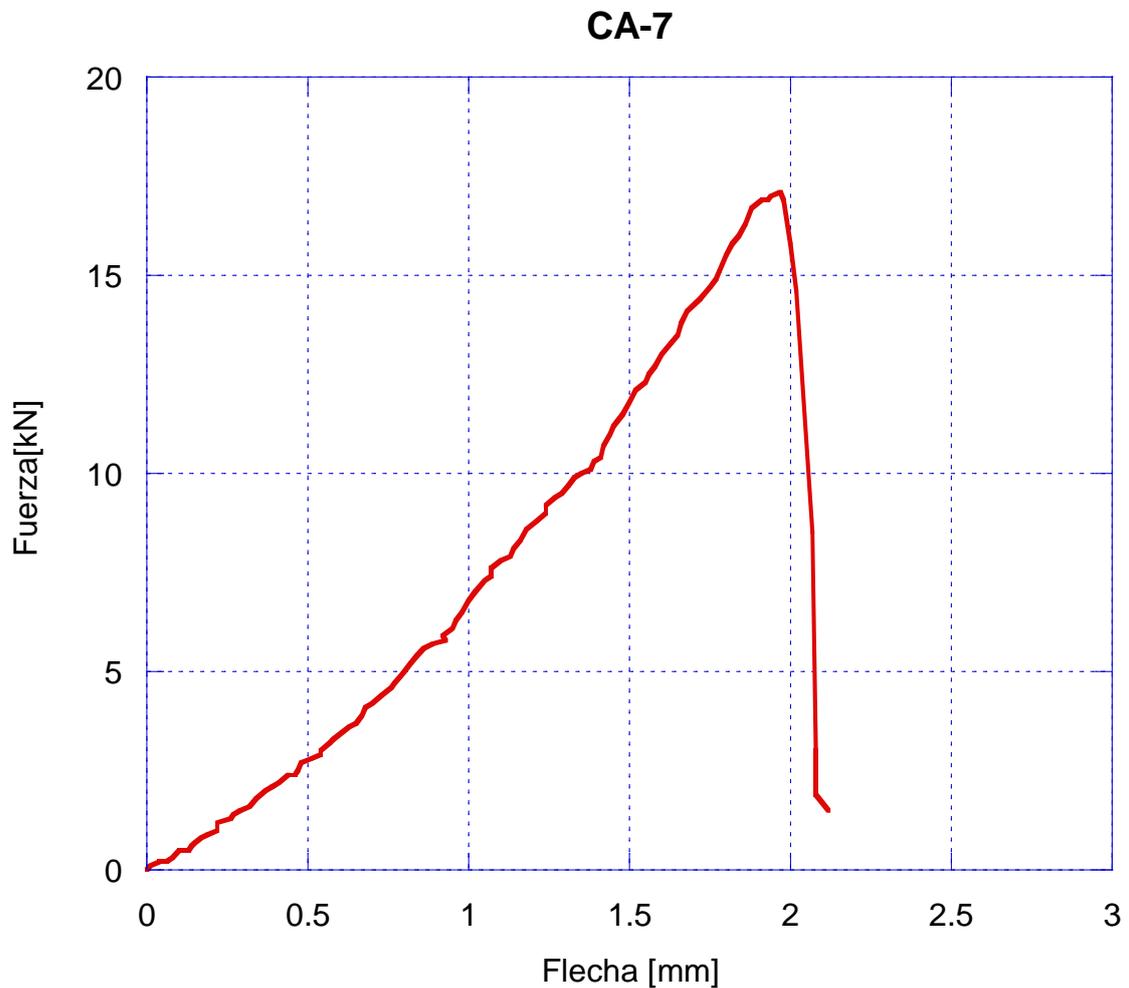
APLICADOR:
Rodillo (R=10cm,
L=22cm)

3. Resultados

Carga de rotura:
17,1 kN



4. Fuerza - Flecha



Anejo VI. Geometría y resultados de los ensayos sobre pretilos

1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	EDAD: 161 días
TIPO DE PROBETA: Barrera BHSPJ3/1a	
TIPO DE HORMIGÓN: HP	ANCHOxLARGOxALTO: 46,3 x 100 x 80cm



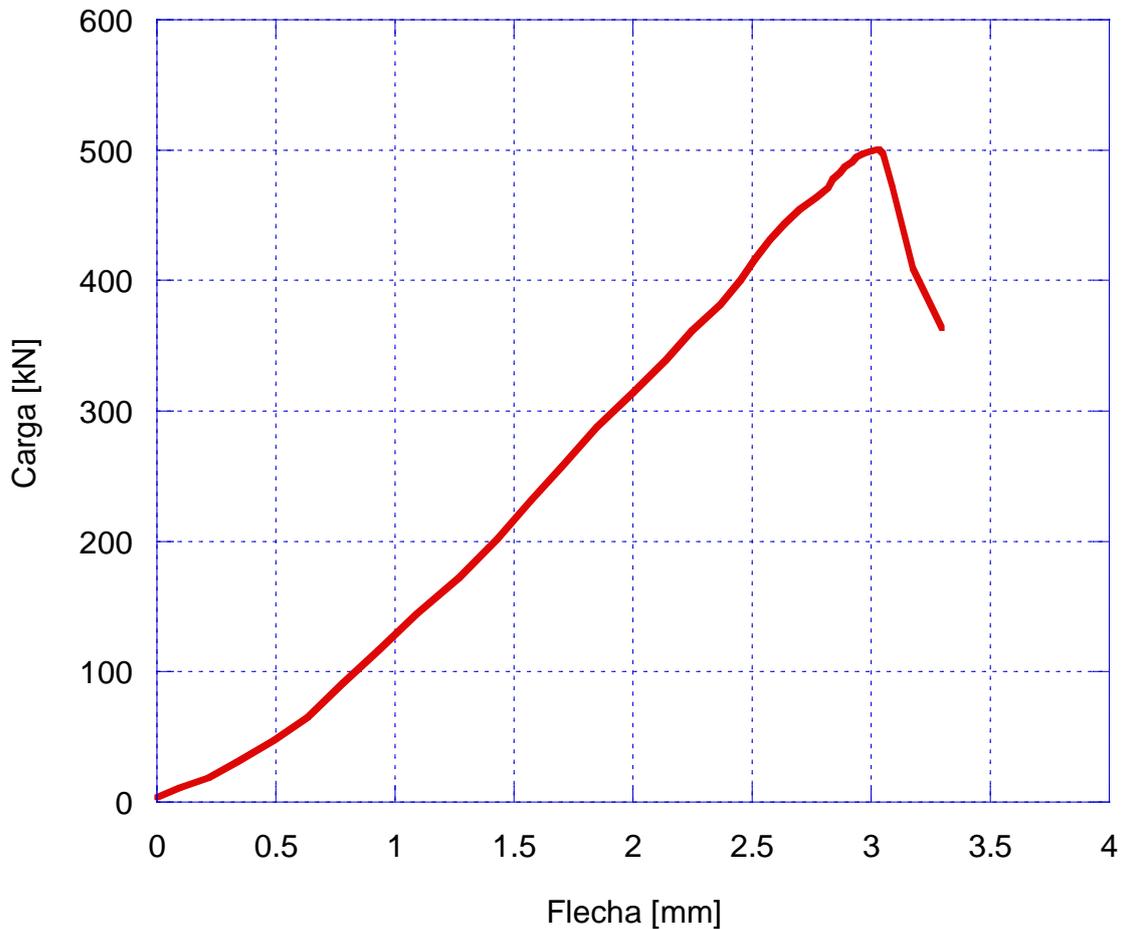
2. Ensayo

PRENSA: Servohidráulica Instron 50 t	APLICADOR: Rodillo (R=3cm, L=40cm)
---	---------------------------------------

3. Resultados

Carga de rotura:
500,0 kN

4. Fuerza - Flecha



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura	EDAD: 161 días
TIPO DE PROBETA: Barrera BHSPJ3/1a	
TIPO DE HORMIGÓN: "Rocacero"	ANCHOxLARGOxALTO: 46,3 x 100 x 80cm



2. Ensayo

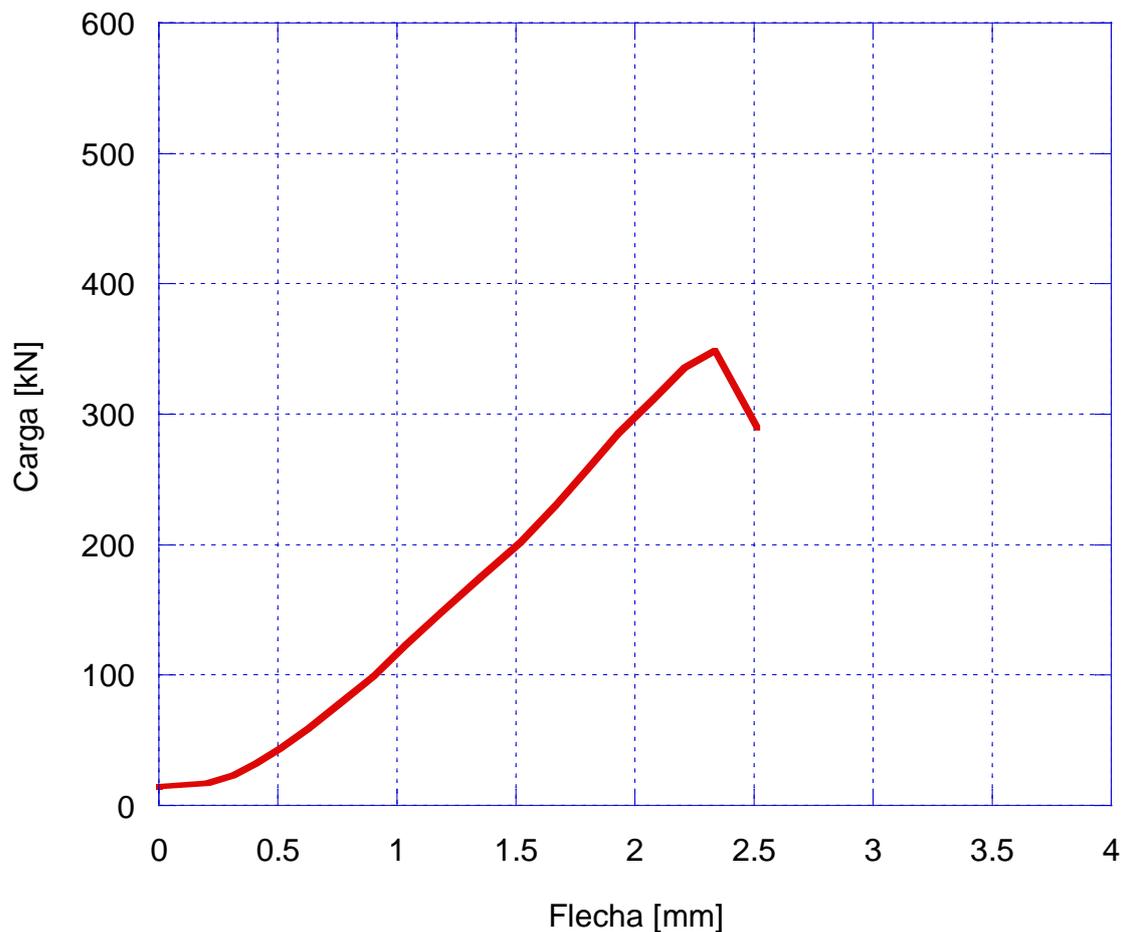
PRENSA: Servohidráulica Instron 50 t	APLICADOR: Rodillo (R=3cm, L=40cm)
---	---------------------------------------

3. Resultados

Carga de rotura:
349,0 kN

4. Fuerza - Flecha

Pretil Rocacero



1. Material

ORIGEN: Proyecto Universidad de Extremadura
EDAD: 161 días

TIPO DE PROBETA: Barrera BHSPJ3/1a

TIPO DE HORMIGÓN: HRR-50
ANCHOxLARGOxALTO: 46,3 x 100 x 80cm

2. Ensayo

PRENSA: Servohidráulica Instron 50 t
APLICADOR: Rodillo (R=3cm, L=40cm)

3. Resultados

Carga de rotura: 308,1 kN



4. Fuerza - Flecha

